

На правах рукописи



СОЛОДУШКИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

**РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ  
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.11.13.- Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2002

Работа выполнена в Томском государственном  
архитектурно-строительном университете и  
Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Недавний Олег Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Смирнов Геннадий Васильевич  
  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Забродский Виталий Антонович

Ведущая организация: НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва

Защита состоится " 23 " декабря 2002 г. в " 15 " часов на засе-  
дании диссертационного Совета Д 212.269.09 при Томском политехни-  
ческом университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных,  
7. Библиотека НИИ интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского поли-  
технического университета.

Автореферат разослан " 12 " ноября 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Б.Б.Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.

Несмотря на значительное количество работ в области теории радиационного неразрушающего контроля и инженерно-технических разработок, практически реализующих положения метода, до сих пор остается нерешенной в полной мере задача радиометрического контроля сложнопрофильных объектов (изделий). Для дальнейшего развития методов и средств радиометрического контроля существующие алгоритмы обработки не позволяют реализовать потенциальные возможности метода. Это справедливо как для процедур выбора апертур детектирующих устройств, так и для способов формирования и обработки информации. Данное обстоятельство сдерживает практическое использование потенциальных возможностей радиометрического контроля, особенно при контроле изделий, имеющих сложную геометрическую форму. В связи с этим, тема, избранная для диссертационных исследований, является актуальной. Об этом свидетельствует и то, что работа выполнялась в рамках темы НИР:211.09.02 «Разработка принципов комплексного использования научных достижений в области контроля и диагностики в строительной отрасли и методологии подготовки специалистов высшей квалификации» подпрограммы «Архитектура и строительство» научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» и проекта №2.03-28 «Диагностика внутренних пространств остановленных уран-графитовых реакторов и разработка концепции контроля и управления технологией их консервации» по межотраслевой программе сотрудничества Министерства образования Российской Федерации по атомной энергии по направлению «Научно-инновационное сотрудничество».

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование радиометрического контроля сложнопрофильных изделий, имеющих значительные перепады по толщине, на основе оптимизации методов формирования и обработки радиометрической информации.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- выбрать оптимальную функцию пространственной чувствительности детектора, разработать алгоритм коррекции апертурных искажений при формировании радиационного сигнала и способ реализации этого алгоритма;

- разработать метод определения оптимального шага сканирования объекта контроля;

- оценить влияние аппаратного «мертвого времени» непреодолеваемого типа и построить алгоритм коррекции его влияния методом построения градуировочной кривой шкалы радиометра;

- провести сравнительный анализ эффективности аналогового и счетного режимов контроля при исследовании объектов со значительными перепадами по толщине;

- выполнить апробацию разработанных алгоритмов и рекомендаций в приборах радиометрического контроля.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования базируются на теоретических положениях радиационного метода неразрушающего контроля. Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением математического и функционального анализа, теории множеств, теории вероятностей и математической статистики. Подтверждением достоверности теоретических положений диссертационных исследований является согласованность с ранее полученными теоретическими результатами других авторов. Экспериментальным подтверждением достоверности данной работы является применение полученных методик и расчетных соотношений при модернизации и функционировании 256-ти канального радиометрического комплекса, разработанного в НИИ строительных материалов ТГАСУ.

### НАУЧНАЯ НОВИЗНА

работы заключается в следующем:

1) С целью расширения функциональных возможностей радиометрического тракта дополнена и скорректирована математическая модель, которая более адекватно описывает процессы формирования и обработки сигнала для объектов контроля, имеющих сложную геометрическую форму. В данной модели, в отличие от ранее известных, учтены:

- объемно-пространственное представление объекта контроля и инородных включений;

-нелинейность таких процессов как квантование сигнала и прохождение сигнала через преобразователь, имеющий аппаратное «мертвое» время.

2)Выполнена оптимизация пространственной функции чувствительности детектора излучения с учетом объемного модельного представления объекта контроля и инородного включения

3)Получена система интегральных уравнений, позволяющая определить характеристики импульсного потока (обусловленного фотонным излучением), прошедшего через инерционное звено, имеющего аппаратное «мертвое» время.

### ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ ДЛЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ.

1.Теория радиометрического контроля дополнена и развита применительно к объектам, имеющим сложную объемную геометрическую форму со значительными перепадами по толщине. Найдены оптимальные соотношения, связывающие параметры и условия работы радиометрической системы с характеристиками объекта контроля.

2.Практическая ценность работы состоит в разработке математических соотношений, рекомендаций, методов инженерного расчета и алгоритмов для обеспечения корректного функционирования радиометрического комплекса, предназначенного для контроля сложнопрофильных объектов и изделий.

### РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.

1.Научные положения диссертационной работы использованы при модернизации 256-ти канального радиометрического комплекса, предназначенного для изучения внутренней структуры сложнопрофильных композиционных материалов и изделий.

2.Математические соотношения, полученные в диссертационной работе и описывающие процессы функционирования радиометрического тракта, используются в учебном процессе электрофизического факультета ТПУ при обучении студентов по специальности 190200-«Методы и приборы контроля качества и диагностики» и подготовке бакалавров и магистров по направлению 5511000-«Приборостроение».

### НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

-совокупность установленных закономерностей формирования радиометрической информации и математических соотноше-

ний, связывающих характеристики сложнопрофильных объектов и изделий с параметрами радиометрической системы, предназначенной для их контроля;

- метод нахождения оптимальной апертуры детектора излучения для объекта контроля произвольной геометрической формы;
- способ коррекции апертурных искажений;
- выбор режима контроля.

### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Основные положения диссертационной работы и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на семинарах ТПУ, ТГАСУ, а так же на научных конференциях и симпозиумах различных уровней, в частности:

- международном симпозиуме Proceedings of the 5<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, Tomsk, Russia, June 26 - July 3, 2001.;

- XX Уральской региональной конференции "Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами", г. Екатеринбург, 2001.;

- втором Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (летняя сессия), г. Самара, 1-6 июля 2001.

### ПУБЛИКАЦИИ.

По материалам диссертации опубликовано 24 научных работы.

### ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, приложения и содержит 137 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 3 таблицы, 153 наименования библиографии и 1 приложение.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований, изложены научные и практические результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных данных и обоснованию целей и задач исследований, сформулированных во введении. Проанализировано современное состояние методов обработки информации для радиометрического контроля сложно-

профильных изделий, имеющих значительные перепады по толщине.

Вторая глава посвящена оптимальному выбору апертуры детектора излучения и коррекции апертурных искажений.

### **Выбор оптимальной функции пространственной чувствительности детектора**

Теоретически исследована перспектива использования в радиометрических системах контроля детекторов с неоднородной пространственной чувствительностью к излучению. Рассмотрена задача выбора оптимальной функции пространственной чувствительности детектора излучения, применяемой при регистрации излучения в радиометрических системах радиационного контроля. Данная задача рассмотрена для широкого класса однородных объектов контроля (ОК) и большого разнообразия инородных однородных включений (ИВ). Более полное и подробное исследование проведено для практически важного случая обнаружения системой плотных инородных включений в контролируемом объекте, когда лучевой размер включения описывается выпуклой функцией (рис.1). Представлена геометрическая интерпретация основных расчетных соотношений. Отмечена область преимущественного использования полученных результатов.

Из проведенного исследования вытекает следующий вывод: для достижения максимального значения ОСШ (для наилучшего обнаружения ИВ в ОК) необходимо регистрировать только ту часть пучка излучения, которая прошла через ИВ на участках с лучевым размером ИВ, не меньшим пороговой величины  $L$ . Для однородного ОК постоянной толщины получим:

$$L = \frac{\ln(1 - r)}{m}, \quad (1)$$

где  $\rho$  находится из уравнения

$$\int_{x_1(r)}^{x_2(r)} j(x) dx = 2r(x_2(r) - x_1(r)), \quad (2)$$

либо из равенства площадей геометрических фигур  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (рис.2). Здесь  $\varphi(x) = 1 - \exp(-\mu g_0(x))$ ,  $g_0(x)$ -лучевая длина дефекта,  $f_{opt} = c_{D_r}$  - оптимальная функция чувствительности,  $C_{D_r}$  - характеристическая функция множества  $D_\rho = \{x \mid \varphi(x) \geq \rho; x \in [0; a]\}$ ,  $[0, a] \times [0, b]$  - проекция дефекта на рабочую поверхность детекто-

ра,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - линейные коэффициенты ослабления излучения ОК и ИВ соответственно,  $\mu = |\mu_2 - \mu_1|$ .

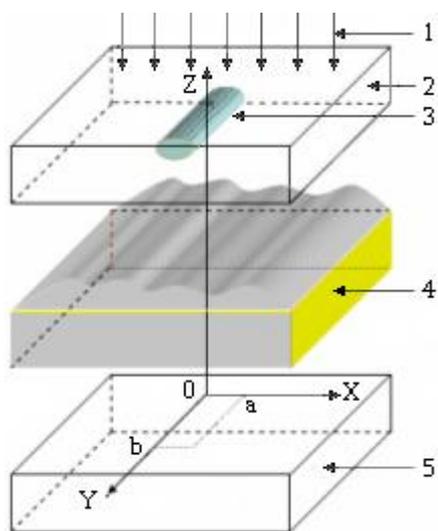


Рис.1. Геометрия контроля: 1- пучок излучения от источника; 2- объект контроля; 3- дефект; 4- фильтрующий поглотитель; 5- детектор излучения.

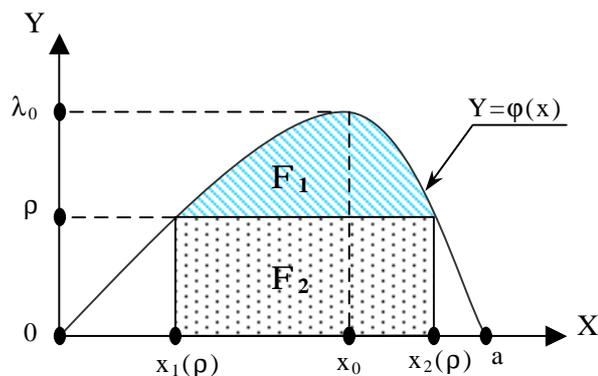


Рис.2. К расчету значения  $\rho$ .

Примечательной особенностью полученной оптимальной функции пространственной чувствительности детектора является то, что соответствующая ей апертура детектора обладает однородной чувствительностью к излучению, однако не по всей проекции ИВ, а лишь в той его части, где лучевой размер ИВ больше некоторого критического значения, определяемого через параметр  $r$  из уравнения (2). В работе получены аналогичные соотношения и для произвольных однородных объемных ОК и ИВ.

Выигрыш от применения оптимальной апертуры может быть проиллюстрирован для дефекта имеющего ступенчатую форму (см. рис.3.).

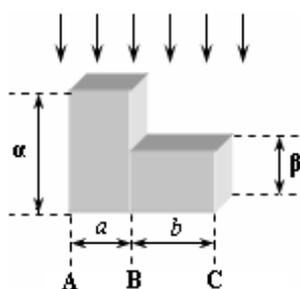


Рис.3. Дефект ступенчатой формы.

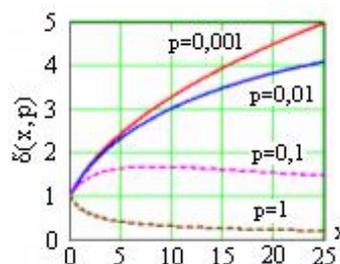


Рис.4. Величина выигрыша от применения оптимальной апертуры для дефекта имеющего ступенчатую форму.

Если  $0 < p < 0,5$  и  $0 < x < (1-2p)/p^2$  (см. рис.3.), то выигрыш в ОСШ равен:  $d = d(x, p) = (ОСШ(AB))/(ОСШ(AC)) = (\sqrt{1+x})/(1+px)$  (см. рис.4.), где  $p = \beta/\alpha$ ,  $x = b/a$ ,  $0 < \beta \leq \alpha$ .

При заданных параметрах апертуры предложен способ коррекции апертурных искажений.

### Алгоритм коррекции апертурных искажений

Апертурная трансформация (искажение) одномерного сигнала  $s(t)$  описывается уравнением:

$$\int_{x-b}^x s(t) dt = y(x), \quad (3)$$

где  $b$ -размер апертуры детектора в направлении сканирования, а  $y(x)$  - измеряемый сигнал.

Решение уравнения (3) имеет вид:  $s(t) = s_0(t) + p(t)$ , где  $s_0(t)$  - некоторое фиксированное решение данного уравнения, а  $p(t)$  - произвольная периодическая (с периодом  $T = b$ ) функция, удовлетворяющая условию

$$\int_0^b p(t) dt = 0.$$

Для однозначного же разрешения уравнения (3) необходимо наложить дополнительные условия (априорную информацию) на функцию  $s(t)$ . Такой информацией может быть, например, одно из условий:

- 1)  $s(t) = 0$  при  $t < 0$ ; 2)  $\int_{-\infty}^0 s(t) dt$  - существует и конечен; 3)

значения  $s(t)$  известны на отрезке  $[a; a+b]$ , где  $a$  - некоторое фиксированное число.

Предложенный в данной работе метод коррекции обладает всеми достоинствами инверсии по формуле

$$s(t) = \left( \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d}{dt} (y(t - nb)) \right),$$

но притом лишен недостатка "накопления шумов" и влияния соседних участков ОК при непрерывном сканировании. Сущность технической реализации этого способа состоит в том, что весь объект контроля условно разбивается на участки длиной, равной длине апертуры. Затем сначала считывается (циклическим сканированием коллимационных пластин и линейки детекторов) ин-

формация об объекте на участках через один (нечетные участки), а потом на всех остальных участках объекта контроля (четных).

После этого полученные сигналы в каждом канале регистрации дифференцируются, а затем эти отдельные фрагменты изображения "склеиваются" в естественном порядке.

Эффективность восстановления сигнала по предложенному алгоритму (при  $b=2$ ) представлена на рис.5. На этом рисунке  $s(x)$  - входной сигнал;  $y(x)$  - выходной сигнал (наблюдаемый);  $s1(x)$  - восстановленный сигнал (с интервалом сглаживания, равным  $0.05 \cdot b$ , где  $b$  - размер апертуры);  $s2(x)$  - восстановленный сигнал (с интервалом сглаживания, равным  $0.005 \cdot b$ ).

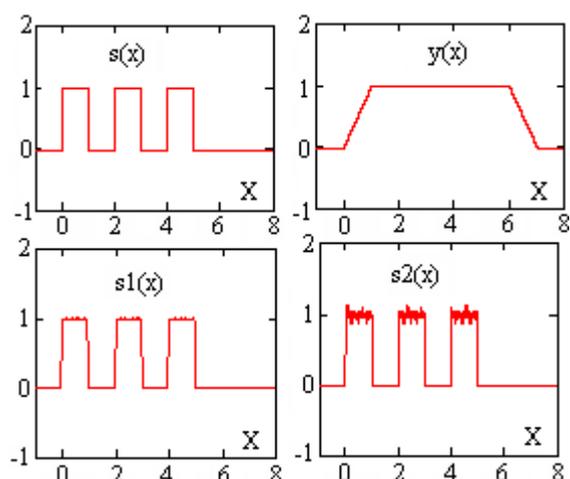


Рис.5. Результаты коррекции апертурных искажений.

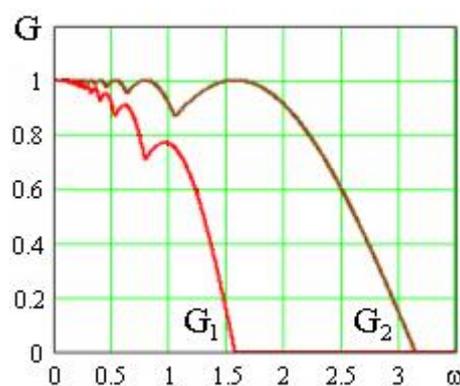


Рис.6. Зависимости  $G_1(\omega)$  и  $G_2(\omega)$ , где  $\omega = \pi \nu l$ ,  $\nu = 1/2a$  - пространственная частота;  $l$  - величина шага дискретизации.

Третья глава посвящена анализу и оптимальному выбору основных параметров и характеристик радиометрической системы с дискретным и непрерывным сканированием радиационного поля. Таковыми параметрами и характеристиками являются: шаг дискретизации, размер апертуры детектора в направлении сканирования, размер «окна» квантования, функция усиления сигнала и величина интенсивности потока при наличии аппаратного «мертвого» времени.

### **Шаг дискретизации и размер апертуры детектора в направлении сканирования**

Выбор шага дискретизации и размера апертуры детектора в направлении сканирования основывался на оптимизации коэффициента передачи амплитудной модуляции (КПМ) для ОК с дефектной прослойкой (ДП), имеющей по толщине периодическую

структуру. Данное модельное представление выступает своеобразным «радиационным» аналогом штриховой миры – тест-объекта, используемого в оптике для экспериментальной оценки пространственного разрешения оптических систем. Задача решалась с ограничениями на производительность контроля.

В качестве нормированного профиля ДП брались функции

$$S_1(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}((x - 2ak + y)/a) \quad \text{и} \quad S_2(x) = (\sin(p(x+y)/a) + 1),$$

где  $y$  ( $0 \leq y \leq 2a$ ) - некоторая фаза,  $2a$  – период ДП.

Максимум КПМ для  $S_1(x)$  достигается при  $b_{opt} = a$ ,  $l_{opt} = 2a/3$ , где  $b_{opt}$ ,  $l_{opt}$  - размер апертуры в направлении сканирования и шаг дискретизации соответственно. Если в качестве ДП взять функцию  $S_2(x)$ , то соответствующая ей строка радиационного поля будет характеризоваться плавными перепадами по амплитуде. В этом случае (оптимизируя по фазе) нормированные коэффициенты передачи амплитудной модуляции оператора дискретизации со ступенчатой интерполяцией будут равны: минимальный -  $G_1(w) = \sin(w(1 + [p/2w])) \sin(w[p/2w])$  и максимальный -  $G_2(w) = \sin(w[(p+w)/2w])$  - рис.6. Здесь  $[d]$  – целая часть числа  $d$ . В результате численных расчетов получено, что максимум КПМ для  $S_2(x)$  достигается при  $b_{opt} = 0,74a$ ;  $l_{opt} = 2a/3$ .

При изменении фазы  $y$  значения ОСШ, полученные при оптимальном сканировании строки радиационного поля с резкими ( $S_1(x)$ ) перепадами по амплитуде, изменяются от 54% до 100% от своего максимально возможного значения, определяемого из ограничения на полное время сканирования строки. Аналогично, при сканировании строки с плавными ( $S_2(x)$ ) перепадами по амплитуде вариации ОСШ составляют приблизительно от 78% до 100% от своего максимально возможного значения.

Из результатов исследований вытекает, что геометрическая форма ДП не оказывает существенного влияния на выбор оптимального значения шага дискретизации  $l$ , но в достаточной мере влияет на выбор длины  $b$  апертуры детектора в направлении сканирования. Заметим, что для частоты Найквиста выполнено  $l=a$ , а в нашем случае  $l=(2/3)a$ . Это означает, что на локальный дефект приходится при частоте Найквиста – один дискретный отсчет, а при оптимальной дискретизации- 3/2 отсчета (если считать размер дефекта в направлении сканирования равным  $a$ , то есть равным

размеру разрешаемого элемента). Полученные соотношения могут быть взяты за основу при проектировании радиометрических систем с дискретным сканированием радиационного поля.

### **Влияние аппаратурного «мертвого» времени**

Построена и проанализирована модель процесса формирования информативного сигнала при наличии инерционного звена, имеющего аппаратурное "мертвое" время непродлевающегося типа.

Рассматривается задача оценки влияния аппаратурного «мертвого» времени непродлевающегося типа на погрешность оценивания средней скорости счета  $\lambda$  (интенсивности) рекуррентной импульсной последовательности, порожденной источником радиоактивного излучения. Данная задача возникает как в радиометрическом контроле материалов, так и в оптической связи и спектрометрии ядерных излучений.

Получено, что плотность  $j(t)$  распределения интервалов между импульсами наблюдаемой последовательности (выходящего рекуррентного потока) равна:

$$j(t) = f(t) + \int_0^t f(t-x)g(x)dx, \quad t \geq t; \quad j(t) = 0, \quad t < t,$$

где  $f(t)$  - плотность распределения интервалов между импульсами входящего рекуррентного потока; функция  $g(x)$  определяется из решения интегрального уравнения

$$g(x) = f(x) + \int_0^{\infty} f(x-y)g(y)dy,$$

$t$  - длительность аппаратурного «мертвого» времени.

Рассмотрены результаты решения нашей задачи для различных типов импульсных последовательностей, а именно: для потока Эрланга произвольного порядка, для равномерного закона распределения интервалов между импульсами. Подробные исследования проведены для пуассоновского потока, который является достаточно точной моделью подавляющего большинства потоков радиационного излучения. Таким образом, если интервалы между импульсами наблюдаемой последовательности - случайные величины, распределенные с плотностью вероятностей:

$$f(t) = l \exp(-l t) \text{ при } t \geq 0 \text{ и } f(t) = 0 \text{ при } t < 0$$

(пуассоновская последовательность импульсов), то в этом случае

$g(x)=1$  и  $j(t) = 1 \exp(-I(t-t))$  при  $t \geq t$  и  $j(t) = 0$  при  $t < t$ , то есть имеют смещенное показательное (экспоненциальное) распределение.

Отсюда вытекает следствие, состоящее в том, что инерционное звено, имеющее аппаратное "мертвое" время  $t$  (непродлевающегося типа), трансформирует пуассоновский поток с интенсивностью  $I$  ( $A_i$  - независимые одинаково распределенные случайные величины)

$$x_1(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot d(t-t_i)$$

в поток событий вида

$$x_2(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^* \cdot d(t-t_i^* - (i-1)t), \text{ где } x_3(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^* \cdot d(t-t_i^*)$$

-является пуассоновским потоком с интенсивностью  $I$ , а  $A_i^*$ - независимые одинаково распределенные случайные величины,  $d(\cdot)$ -дельта-функция Дирака. Данные формулы являются обобщением известных соотношений, полученных при нулевом «мертвом» времени. Также отметим, что случайная величина

$$I_N = (N-2)/(T_N - (N-1) \cdot t) \quad (4)$$

является несмещенной оценкой для интенсивности  $I$ , где  $T_N$  - время регистрации  $N$  импульсов равное промежутку времени между моментами прихода первого и  $N$ -го зарегистрированных импульсов. То есть найден способ полной коррекции систематической составляющей погрешности измерения интенсивности потока, вызванной аппаратным "мертвым" временем (4).

Наличие "мертвого" времени увеличивает среднюю длительность измерения в одной позиции сканирования (ОК) в  $K$  раз (при обеспечении той же точности измерения, что и при нулевом "мертвом" времени), где  $K=(1+It)$ .

Четвертая глава посвящена обоснованию выбора режима контроля, практическому применению результатов диссертационных исследований и перспективам дальнейших исследований.

В данной главе рассматривается проблема выбора оптимизированных способов регистрации радионуклидного излучения при контроле объектов со значительными перепадами по толщине. Найденны граничные величины радиационной толщины и интенсивности потока излучения, разделяющие приоритетность приме-

нения счетного или токового режимов регистрации. Для контроля объектов со значительными перепадами по толщине, предложен способ селективного измерения интенсивности излучения.

### Выбор режима контроля

В метрологическом отношении выбор того или иного режима регистрации излучения в радиометрических системах преимущественно обусловлен величиной интенсивности (скоростью счета, интенсивностью загрузки, средней частотой следования) потока импульсов на выходе (входе) детектора излучения. А именно, при малых интенсивностях целесообразно применять счетный режим, а при высоких - аналоговый.

Это обусловлено тем, что при больших значениях интенсивности загрузки наличие аппаратного "мертвого" времени приводит к значительным "просчетам" выходных импульсов с детектора, и, как следствие, снижает эффективность применения счетного режима регистрации излучения. С другой стороны, при малых загрузках наличие амплитудных флуктуаций импульсов приводит к значительному снижению эффективности использования аналогового режима регистрации. Таким образом, существует некоторое граничное значение  $I_0$  величины интенсивности загрузки, менее которого целесообразно использовать счетный режим, а более - аналоговый.

В настоящей работе проведен количественный анализ и получено аналитическое соотношение между вышеуказанным значением  $I_0$ , величиной коэффициента амплитудного разброса электрических импульсов и величиной аппаратного "мертвого" времени непродлевающегося типа.

В качестве критерия сравнения эффективности применения двух заданных режимов регистрации излучения примем величину  $\Delta = d_Q / d_N$ , где  $d_Q$ ,  $d_N$  - относительные погрешности оценки параметра  $p = \exp(-mH)$ , при использовании аналогового и счетного режимов регистрации излучения соответственно, где  $m$  и  $H$  - ЛКО и толщина ОК соответственно. Относительная погрешность  $d_N$  оценки параметра  $p$  при счетном способе регистрации излучения равна  $d_N = 1/\sqrt{N-3}$ ,  $N \geq 4$ . Относительная погрешность  $d_Q$  оценки параметра  $p$  при токовом способе регистрации излучения с использованием идеального интегратора равна  $d_Q = h/\sqrt{IpeT}$ , где

$I$  интенсивность источника излучения,  $\varepsilon$ - эффективность регистрации,  $T$ - время измерения в одной позиции дискретного сканирования,  $\eta$ - величина коэффициента амплитудного разброса импульсов. При больших  $N$  получим:

$$\Delta = h / \sqrt{1 + I t \varepsilon \cdot \exp(-mH)}.$$

Коэффициенту  $h$  можно придать и другое (новое) физическое толкование, а именно: этот коэффициент показывает во сколько раз при нулевом "мертвом" времени счетный режим лучше аналогового (токового) в смысле величины относительной среднеквадратической погрешности измерения интенсивности. На рис.7. представлена зависимость отношения (погрешностей)  $D=D(x, h)$  от  $x=I_1 t$  (при различных значениях коэффициента  $h=1,0;1,2;1,5;2,0$ ), где  $I_1=I \varepsilon p$ .

Таким образом, граничное значение  $I_0$  интенсивности потока импульсов на выходе люминесцентного счетчика, имеющего "мертвое" время  $t$ , равно

$$I_0 = d_A^2 / t,$$

где  $d_A = S_A / \bar{A}$  - относительные флуктуации амплитуд электрических импульсов. При этом граничное значение радиационной толщины равно

$$mH = \ln(I t \varepsilon / d_A^2).$$

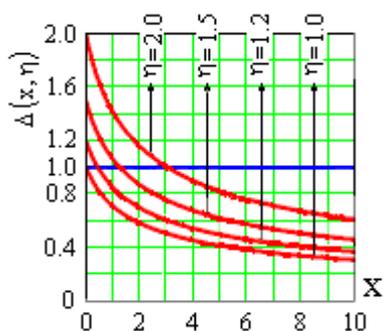


Рис.7. Зависимость отношения (погрешностей)  $D=D(x, h)$  от  $x=I_1 t$  (при различных значениях коэффициента  $h=1,0;1,2;1,5;2,0$ ).

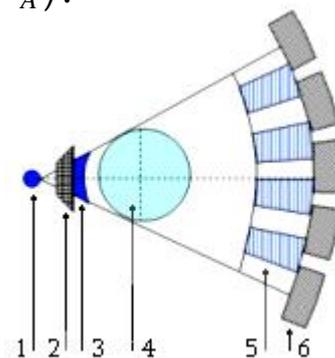


Рис.8. Схема 256-ти канального радиометрического комплекса: 1-источник излучения; 2- диафрагма; 3- выравнивающий фильтр; 4- объект контроля; 5-коллиматоры детекторов; 6-сцинтилляторы.

### Практическое приложение

Модернизированный 256-ти канальный радиометрический дефектоскоп работает аналогично сканирующему интроскопу. Ве-

ерный пучок рентгеновского излучения, ограниченный щелевой диафрагмой, проходит через выравнивающий фильтр, затем через объект контроля (ОК) облучает линейку коллимированных детекторов. Информационным параметром является время, за которое детектором регистрируется заданное число квантов  $N$ . После накопления  $N$  импульсов всеми измерительными каналами информация передается в компьютер. Полное изображение ОК формируется путем дискретного перемещения изделия по вертикали. Перемещение ОК в зону контроля и позиционирование осуществляется манипулятором, управляемым центральным компьютером комплекса. Анализ изображения осуществляется на основе специального программного обеспечения, позволяющего просматривать весь яркостный динамический диапазон теневого радиационного изображения ОК на экране монитора. Решение о годности или дефектности изделий принимает компьютер или оператор после обработки изображения. В соответствии с принятым решением манипулятор выносит изделие из зоны контроля и помещает в зону годных или бракованных изделий.

Блок детектирования состоит из 256 каналов, расположенных в две линейки по 128 каналов, со смещением одной линейки относительно другой на ширину канала. Указанное расположение позволяет устранить эффект неполного заполнения объема и свести к минимуму взаимное радиационное влияние детекторов друг на друга. В данном комплексе предусмотрен набор съемных насадок имеющих различную форму в зависимости от характера изделий и неоднородностей, подлежащих выявлению. Также в радиометрическом комплексе предусмотрен алгоритм апертурной коррекции с применением коллимационных масок. Форма насадок и масок выбиралась в соответствии с рекомендациями диссертационной работы. На рис.8. приведена геометрическая схема 256-ти канального радиометрического комплекса.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1) Разработана совокупность математических соотношений, устанавливающих оптимальные условия формирования и обработки радиометрической информации при контроле сложнопрофильных изделий.

2) Выведено соотношение, позволяющее найти оптимальную функцию пространственной чувствительности детектора, используемого в радиометрической системе при обнаружении ею ино-

родных включений в контролируемом объекте. Показано, что если лучевой размер инородного включения описывается выпуклой функцией, то существует единственная оптимальная функция пространственной чувствительности детектора. Для неоднородностей другого класса принцип единственности может быть нарушен.

3) Выигрыш в отношении сигнал/шум за счет выбора оптимальной формы и параметров апертуры детектора излучения может быть значительным при неоднородностях типа скопления разноразмерных воздушных пор в сварных швах, а также расслоений, трещин и т.п., что указывает на целесообразность использования предложенных рекомендаций и методик в инженерном проектировании и расчетах блоков и систем радиационного контроля.

4) Предложен алгоритм коррекции апертурных искажений и способ его технической реализации. Данный метод коррекции позволяет практически полностью избавиться от систематической составляющей погрешности, вызванной апертурным «смазом».

5) Разработан алгоритм коррекции влияния аппаратного «мертвого» времени непродлевающегося типа для оценки истинных значений интенсивностей входящего и выходящего потоков излучения. Лежащая в основе этого алгоритма формула пересчета дает более точные значения интенсивностей в отличие от общеизвестной приближенной формулы  $I_{ex} = I_{вых} / (1 - t \cdot I_{вых})$ , верной только при  $tI_{вых} \ll 1$ , где  $I_{вых}$  - интенсивность загрузки, показываемая прибором, а  $I_{ex}$  - интенсивность загрузки, которую прибор должен показывать при нулевом "мертвом" времени  $t$ .

6) При контроле объектов со значительными перепадами по толщине целесообразно предусмотреть возможность применения в радиометрической системе измерительного канала регистрации излучения, режим работы которого (счетный или аналоговый) изменяется в зависимости от величины измеряемого сигнала. Для реализации этого положения получены расчетные математические соотношения.

7) Научные положения и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, используются при выполнении научно-исследовательских работ НИИ интроскопии и учебном процессе электрофизического факультета Томского политехнического университета.

По материалам диссертации автором опубликованы следующие научные работы:

1. Квасница М.С., Солодушкин В.И. Влияние аппаратурного "мертвого времени" на погрешность измерения интенсивности импульсной последовательности // Радиотехника и электроника. - 1987. -Т. 32. - № 6. - С. 1317-1320.

2. Горбунов В.И., Завьялкин Ф.М., Солодушкин В.И., Удод В.А. Выбор параметров радиометрических систем с дискретным сканированием радиационного поля // Автометрия.- 1987. - № 4. - С. 21-27.

3.Солодушкин В.И., Удод В.А. О выборе параметров фильтрации при решении интегрального уравнения Абеля //Метрология.-1986.- № 10. - С.12-16.

4. Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная по разрешающей способности одномерная фильтрация изображений // Оптика атмосферы. -1991. - т.4.- № 10. - С. 1030-1034.

5. Солодушкин В.И., Темник А.К., Удод В.А. Согласованная фильтрация изображений в системах цифровой рентгенографии // Дефектоскопия.- 1999. - № 11.- С. 57-62.

6. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная аподизация апертуры детектора излучения в радиометрических системах // Вестник Томского государственного университета.- 2000. - № 271.- С. 77-80.

7. Солодушкин В.И., Темник А.К., Удод В.А. Оценка разрешающей способности систем цифровой рентгенографии // Автометрия.- 2000. - № 6. - С. 113-116.

8. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимизация функции чувствительности детектора в радиометрических системах радиационного контроля // Автометрия. - 2001. - № 1.- С. 75-83.

9. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Модель теневых радиационных изображений и процессы их формирования // Автометрия.- 2001. -№ 4.- С.103-109.

10. Недавний О.И., Солодушкин В.И. Сравнительный анализ эффективности применения счетного и аналогового режимов регистрации излучения в радиометрических системах радиационной толщинометрии // Дефектоскопия.- 2002.- № 7.- С. 70-81.

11. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная коррекция теневого радиационного изображения по направлению сканирования в радиометрических системах контроля // Том-

ский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 1999. -19 с.- Деп. в ВИНТИ 01.12.99, № 3565-В99.

12. Солодушкин В.И. Выбор оптимальной формы апертуры детектора излучения в радиометрических системах контроля // Томский государственный архитектурно-строительный университет.-Томск, 1999, -8 с.- Деп. в ВИНТИ 01.12.99, № 3564-В99.

13. Солодушкин В.И. Минимизация погрешности измерений характеристик структурно неоднородных объектов при радиометрическом контроле // Томский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 1999, -10с.- Деп. в ВИНТИ 01.12.99, № 3566-В99.

14. Солодушкин В.И. Оценка неизвестного параметра изделия по квантованным значениям измеряемого случайного сигнала при радиометрическом контроле // Томский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 1999, -9с. -Деп. в ВИНТИ 01.12.99, № 3563-В99.

15. Недавний О.И., Солодушкин В.И. Разработка оптимизированных процедур формирования информативного сигнала при радионуклидном радиометрическом методе контроля // Томский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 2001, -20 с.- Деп. в ВИНТИ 31.01.02, № 197-В2002.

16. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Солодушкин А.И., Сафронов А.А. Разработка программного обеспечения для изучения внутренней структуры непрозрачного объекта методом рентгеновской вычислительной томографии // Томский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 2002, -39с.- Деп. в ВИНТИ 26.07.02, № 1410-В2002.

17. Недавний О.И., Солодушкин В.И., Агеев Ю.М., Метель А.А. Анализ и построение структурных схем для измерения технологических параметров объектов и оценка инструментальной погрешности разрабатываемой системы // Томский государственный архитектурно-строительный университет.- Томск, 2002, -19 с.- Деп. в ВИНТИ 26.07.02, № 1412-В2002.

18. Sidulenko O., Solodushkin V., Udod V. Correction of aperture distortions in radiometric systems of radiation control // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. Tomsk, Russia, June 26 - July 3, 2001, p. 374-377.

19. Сидуленко О.А., Солодушкин В.И., Удод В.А. Границы применимости аналогового и счетного режимов регистрации излучения в радиометрии // XX Уральская региональная конференция

"Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами". -Тез. докл. - Екатеринбург, 2001. - С. 84-85.

20. Сидуленко О.А., Солодушкин В.И., Удод В.А. Фильтрация изображений с переменной разрешающей способностью на основе применения аподизированных приемников изображений // Второй Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (летняя сессия). - Тез. докл.- Самара, 1-6 июля 2001 г. - С. 350-351.

21. Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимизация характеристик сканирующих систем по модифицированному критерию пространственной разрешающей способности // Региональная конференция "Обработка изображений и дистанционные исследования". Тез. докл.- Новосибирск, 1987, - С. 173-174.

22. Солодушкин В.И., Удод В.А. Оценка передачи модуляции при дискретизации с интерполяцией // 5-я региональная научно-практическая конференция "Молодые ученые и специалисты - ускорению научно-технического прогресса".- Тез. докл.- Томск, 1986.- С. 18.

23. Завьялкин Ф.М., Солодушкин В.И., Удод В.А. Коррекция апертурных искажений пространственным кодированием проекций // 2-й Всесоюзный симпозиум по вычислительной томографии.-Тез. докл.- г. Куйбышев, 1985.- С. 57-58.

24. Солодушкин В.И. О выборе апертуры детектора излучения радиометрической системы контроля // Научно-практическая конференция "Молодые ученые и специалисты - народному хозяйству.-Тез. докл.- Томск, 1983.- С.6.

Автор выражает благодарность научному руководителю – профессору Недавнему Олегу Ивановичу за помощь и поддержку в проведении данных исследований, а также свою признательность коллективам кафедр «Физические методы и приборы контроля качества» ТПУ и «Основания, фундаменты и испытания сооружений» ТГАСУ за содействие в выполнении настоящей работы.

Подписано в печать 04.11.02.  
Заказ № 518. Тираж 100 экз.  
Офсетная печать ООП ТГАСУ  
634003, Томск, ул. Партизанская, 15