

На правах рукописи



Солодушкин Владимир Иванович

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ПРИ  
РАДИОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ СО  
ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ПЕРЕПАДАМИ ПО ТОЛЩИНЕ**

**05.13.01** – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации);

**05.11.13** – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск - 2010

Работа выполнена в НИИ Интроскопии ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научные руководители:**

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Удод Виктор Анатольевич  
доктор технических наук, профессор  
Недавний Олег Иванович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
Смагин Валерий Иванович  
  
доктор технических наук, профессор  
Маркин Виктор Борисович

**Ведущая организация:**

ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 01 июля 2010 г. в 10<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.267.12 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 2, ауд. 212-б

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 26 мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф-м.н., доцент



Тарасенко П.Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Большинство изделий промышленного производства имеет сложную геометрическую форму. Данные изделия подлежат проверке на качество, что предполагает необходимость их надежного контроля. Известно, что существует зависимость между характеристиками объекта (изделия) контроля и оптимальными параметрами измерительной системы. Вследствие чего возникает необходимость найти эту зависимость и определить наилучший режим работы измерительной системы. Так, например, исходя из публикаций многих авторов, при радиометрическом контроле для наилучшего обнаружения локальных дефектов в объекте контроля существует апертура, согласованная с геометрической формой данного инородного включения.

Таким образом, большое разнообразие объектов контроля предопределяет исследование и разработку новых, адаптированных к данным объектам радиометрических измерительных систем с улучшенными характеристиками.

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 объектов со значительными перепадами по толщине. 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 тематического плана научно-исследовательских работ НИИ интроскопии НИ Томского политехнического университета по программе ПНР-5: "Неразрушающий контроль и диагностика в производственной и социальной сферах".

**Объект исследования.** Радиометрические системы неразрушающего радиационного контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине.

**Предмет исследования.** Закономерности обработки информации в радиометрических системах неразрушающего радиационного контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине.

**Цель диссертационной работы и задачи исследований.**

**Целью** диссертационной работы является совершенствование существующих и разработка новых алгоритмов обработки радиометрической информации для повышения эффективности радиометрических систем неразрушающего радиационного контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- найти оптимальную функцию пространственной чувствительности детектора излучения для решения задачи обнаружения радиометрической системой инородных включений в контролируемом изделии;
- оценить влияние аппаратного «мертвого времени» непродлевающегося типа на точность радиометрических измерений потока излучения и усовершенствовать алгоритм его коррекции;
- провести сравнительный анализ эффективности применения счетного и аналогового режимов регистрации излучения в радиометрической системе контроля изделий со значительными перепадами по толщине;
- разработать алгоритм обработки информации для многоканальной радиометрической системы контроля изделий со значительными перепадами по толщине, который позволяет повысить достоверность радиометрического контроля и автоматизировать процесс его проведения;
- провести экспериментальную апробацию разработанных алгоритмов и рекомендаций.

**Методы исследования.** 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 их согласованность с ранее полученными теоретическими результатами других авторов. Экспериментальным подтверждением достоверности результатов данной работы является множество численных экспериментов, а также использование полученных алгоритмов и расчетных соотношений на предприятиях ООО «Диагностика-М» (Москва) и ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» (Миасс).

**Научная новизна. Результаты, выносимые на защиту.** Научная новизна работы заключается в следующем:

- найдена оптимальная по критерию максимума отношения сигнал/шум функция пространственной чувствительности детектора для задачи обнаружения радиометрической системой локальных инородных включений в контролируемом изделии;
- усовершенствован алгоритм коррекции влияния аппаратного «мертвого времени» непродлевающегося типа, что позволило повысить точность радиометрических измерений;
- разработан новый алгоритм обработки радиометрической информации применительно к многоканальной радиометрической системе контроля изделий со значительными перепадами по толщине, который позволяет автоматизировать процесс контроля и получать относительную погрешность радиометрических измерений в каждом детекторе не хуже наперед заданной (полученный алгоритм лег в основу разработки новых устройств радиометрического контроля, защищенных тремя патентами РФ).

**Результаты, выносимые на защиту:**

- решение в одномерном варианте вариационной задачи оптимизации функции пространственной чувствительности детектора в радиометрической системе контроля из условия максимума отношения сигнал/шум на выходе детектора;
- решение в двумерном варианте вариационной задачи оптимизации функции пространственной чувствительности детектора в радиометрической системе контроля из условия максимума отношения сигнал/шум на выходе детектора;
- алгоритм коррекции влияния аппаратурного «мертвого времени» непродлевающегося типа на точность оценивания интенсивности потока импульсов на выходе детектора излучения для радиометрической системы контроля;
- алгоритм обработки радиометрической информации для многоканальной радиометрической системы контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине, который позволяет автоматизировать процесс контроля и обеспечить заданную точность измерения излучения в каждом детекторе системы.

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

**Практическое значение работы** состоит в разработке математических соотношений, рекомендаций, методов инженерного расчета и алгоритмов для обеспечения корректного функционирования радиометрического комплекса, предназначенного для контроля объектов и изделий со значительными перепадами по толщине.

**Реализация результатов работы.**

1. Результаты предложенных в диссертационной работе решений были использованы в опытно-конструкторских работах, выполняемых ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева».

2. Научные положения диссертационной работы использованы в Центре диагностики ООО «Диагностика-М» при проведении работ по неразрушающему контролю и проведении экспертизы промышленной безопасности.

3. Материалы диссертационных исследований используются в учебном процессе электрофизического факультета Томского политехнического университета.

**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.;

– IX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 2003.;

– втором Всероссийском симпозиуме по вычислительной томографии, г. Куйбышев, 1985.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель и 8 статей в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

**Личный вклад автора** состоит:

– в решении одномерной вариационной задачи оптимизации (по критерию максимума отношения сигнал/шум) функции пространственной чувствительности детектора в радиометрических системах контроля;

– в постановке и решении двумерной вариационной задачи оптимизации (по критерию максимума отношения сигнал/шум) функции пространственной чувствительности детектора в радиометрических системах контроля;

– в усовершенствовании алгоритмов коррекции влияния аппаратурного «мертвого времени» непродлевающегося типа для радиометрических систем контроля;

– в построении алгоритма обработки радиометрической информации для многоканальных радиометрических систем контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине, который позволяет автоматизировать процесс контроля при одновременном обеспечении требуемой точности измерений в каждом детекторе;

– в усовершенствовании алгоритма апертурных искажений радиационных изображений;

– в разработке структурных представлений математических моделей теневых радиационных изображений;

– в решении задачи оптимального выбора размера апертуры детектора излучения и шага дискретного сканирования объекта контроля;

– в разработке алгоритма оптимизации параметров фильтрации радиометрического сигнала;

– в проведении сравнительного анализа эффективности использования счётного и аналогового режимов регистрации излучения.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, содержит 174 страницы машинописного текста, 53 рисунка, 3 таблицы, 169 наименований библиографии и 6 приложений.

**Краткое содержание диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дана общая характеристика выполненной работы.

**Первая глава** посвящена обзору литературных данных и обоснованию цели и задач исследований, сформулированных во введении. Проана-

лизировано современное состояние методов и алгоритмов обработки информации для радиометрического контроля изделий, имеющих значительные перепады по толщине.

**Вторая глава** посвящена оптимизации геометрических характеристик блока детектирования излучения в радиометрической системе неразрушающего радиационного контроля и коррекции апертурных искажений радиационных изображений.

Теоретически исследована перспектива использования в радиометрических системах контроля детекторов с неоднородной пространственной чувствительностью к излучению, физическая реализация которой представляет собой однородную пластину переменной толщины (фильтрующий поглотитель (ФП)), расположенную между объектом контроля и детектором. Решена задача выбора оптимальной функции пространственной чувствительности детектора (ФПЧД), применяемого для регистрации излучения в радиометрических системах контроля. Данная задача рассмотрена в одно- и двумерном вариантах 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. Представлена геометрическая интерпретация основных расчетных соотношений. Отмечена область преимущественного использования полученных результатов.

В одномерном варианте математическая постановка задачи выбора оптимальной ФПЧД выглядит следующим образом:

$$F(f) = \frac{\int_0^a f(x)\varphi(x)dx}{\sqrt{\int_0^a f(x)dx}} \rightarrow \max_f \quad (1)$$

при условии

$$f, \varphi \in L_1[R^1]; \|f\|_{L_1} \neq 0; 0 \leq f \leq 1; a(a > 0) = \text{const}. \quad (2)$$

Физические предположения (ограничения), соответствующие оптимизационной задаче (1)-(2): поток квантов излучения мононаправленный и моноэнергетический; сканирование осуществляется дискретно с малым шагом; применяется счётный режим регистрации излучения; ОК – однородный и постоянной (в зоне контроля) толщины; ИВ (дефект) – однородное и имеет цилиндрическую форму с образующими перпендикулярными пучку излучения.

Физический смысл параметров и переменных в задаче (1)-(2):  $F = M/c$ ;  $c = \sqrt{bN_0 \epsilon T \exp(-\mu_1 H)}$ ;  $M = |\Delta N|/\sigma$  – отношение сигнал/шум (ОСШ);  $\Delta N$  – изменение среднего числа квантов излучения, регистрируемых детектором, обусловленное наличием инородного включения ИВ в ОК (сигнал);  $f$  – ФПЧД;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение числа квантов излучения, регистрируемых детектором при отсутствии ИВ в ОК (шум);

$$f(x) = \frac{1}{b} \int_0^b \exp(-\mu_3 p(x, y)) dy; \quad \varphi(x) = |1 - \exp(-\Delta\mu \cdot h(x))| - \text{ функция влияния ИВ; } N_0 -$$

плотность потока квантов излучения вблизи поверхности детектора при отсутствии ОК;  $H$  – толщина ОК(в зоне контроля);  $p(x, y)$  – толщина ФП;  $\varepsilon$  – эффективность регистрации излучения детектором;  $T$  – время регистрации излучения в одной позиции дискретного

санитирования ОК;  $h(x)$  – лучевой размер ИВ (дефекта) по направлению сканирования;  $\mu_1$  – линейный коэффициент ослабления (ЛКО) излучения для материала ОК;  $\mu_2$  – ЛКО ИВ;  $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$ ;  $\mu_3$  – ЛКО ФП;  $a, b$  – размеры проекции ИВ на рабочую поверхность детектора излучения (на плоскость XOY).

Решение одномерной вариационной задачи (1), (2):

$$f_{opt} = \chi_{D_\beta}, \quad (3)$$

где  $\chi_{D_\beta}$  – характеристическая функция множества

$$D_\beta = \{x \mid \varphi(x) \geq \beta; x \in [0, a]\};$$

$\beta$  (оптимальный уровень среза) находится из уравнения

$$\int_{x_1(\beta)}^{x_2(\beta)} \varphi(x) dx = 2\beta(x_2(\beta) - x_1(\beta)), \quad (4)$$

где  $x_1(\beta) = \inf(D_\beta)$ ,  $x_2(\beta) = \sup(D_\beta)$ .

При оптимальном значении  $\beta$  получим максимальную величину ОСШ:

$$M_{max} = 2c\beta \sqrt{x_2(\beta) - x_1(\beta)}.$$

На рис.1. представлена геометрическая интерпретация алгоритма нахождения оптимального уровня среза  $\beta$ :

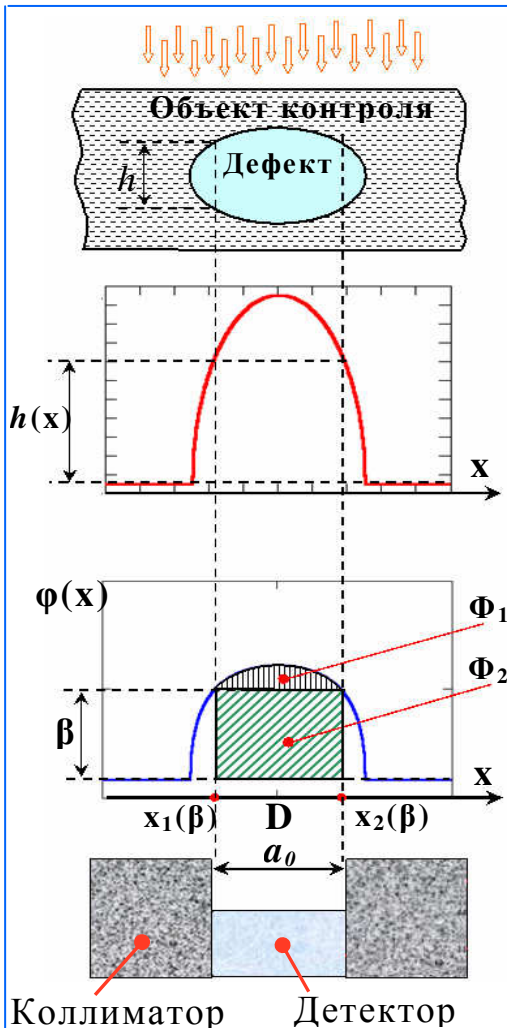


Рис.1. Геометрическая иллюстрация

оптимального уровня среза  $\beta$ :

$S(\Phi_1) = S(\Phi_2)$ , где  $S$  означает площадь;

$$\Phi_1 = \{(x, y) \mid \beta \leq y \leq \varphi(x); x \in [0, a] \cap Q\}; \quad \Phi_2 = \{(x, y) \mid 0 \leq y \leq \beta; x \in [0, a] \cap Q\};$$

$$Q = \{x \mid \varphi(x) \geq \beta\}.$$

Показано, что если ИВ выпукло, то существует единственная оптимальная апертура детектора излучения.

Техническая реализация полученного решения – применение коллиматора детектора без ФП с длиной апертуры  $a_0 = x_2(\beta) - x_1(\beta)$ .

Примечательной особенностью полученной оптимальной функции пространственной чувствительности детектора (3) является то, что соответствующая ей апертура детектора обладает однородной чувствительностью к излучению, однако не по всей проекции ИВ, а лишь в той её части,



где лучевой размер ИВ больше некоторого критического значения, определяемого через параметр  $\beta$  из уравнения (4).

В двумерном варианте математическая постановка задачи выбора оптимальной ФПЧД выглядит следующим образом:

$$F(f) = \frac{\iint_{\Omega} f \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \, dx dy}{\sqrt{\iint_{\Omega} f \cdot \varphi_1 \, dx dy}} \rightarrow \max_f \quad (5)$$

при условии:  $\Omega (\Omega \subset R^2)$  – ограниченное множество конечной меры;

$$f, \varphi_1 \in G_1 = \{g : R^2 \rightarrow R^1 \mid 0 \leq g \leq 1, g \in L_1[\Omega]\}; \quad (6)$$

$$\varphi_2 \in G_2 = \{g : R^2 \rightarrow R^1 \mid g \geq 0; \sup(g) < +\infty; g \in L_1[\Omega]; D = \{(x, y) \mid g(x, y) > 0\} \subset \Omega; \iint_D dx dy > 0\}$$

Физические предположения (ограничения), соответствующие оптимизационной задаче (5), (6): поток квантов излучения мононаправленный и моноэнергетический; сканирование осуществляется дискретно с малым шагом; применяется счётный режим регистрации излучения; ОК – однородной переменной толщины; ИВ (дефект) – однородный.

Физический смысл параметров и переменных в задаче (5), (6):

$$F = M/c_0; c_0 = \sqrt{N_0 \varepsilon \tau}; M = |\Delta N|/\sigma; \varphi_1(x, y) = \exp(-\mu_1 H(x, y));$$

$$\varphi_2(x, y) = |1 - \exp(-\Delta \mu h(x, y))|; f(x, y) = \exp(-\mu_3 p(x, y)); H(x, y) – толщина ОК;$$

$h(x, y)$  – лучевой размер ИВ;  $p(x, y)$  – толщина ФП;  $\mu_3$  – ЛКО фильтрующего поглотителя;  $f(x, y)$  – ФПЧД;  $\Delta N$  – изменение среднего числа квантов излучения, регистрируемых детектором, обусловленное наличием инородного включения в объекте контроля (сигнал);  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение числа квантов излучения, регистрируемых детектором при отсутствии ИВ в ОК (шум);  $\Omega$  – рабочая поверхность детектора излучения;  $D$  – проекция ИВ на рабочую поверхность детектора.

Вероятностный смысл функций в задаче (5), (6):

1)  $f(x, y) = \exp(-\mu_3 p(x, y))$  – вероятность того, что квант излучения пройдёт через ФП без взаимодействия;

2)  $\varphi(x, y) = \exp(-\mu_1 H(x, y))$  – вероятность того, что квант излучения пройдёт через ОК без взаимодействия.

Решение двумерной вариационной задачи:

$$f_{opt} = \chi_{D_\beta},$$

где  $\chi_{D_\beta}$  – характеристическая функция множества

$$D_\beta = \{(x, y) \mid \varphi_2(x, y) \geq \beta\};$$

$\beta$  (оптимальный уровень среза) находится из уравнения

$$\iint_{D_\beta} \varphi_1 (\varphi_2 - \beta) dx dy = \beta \cdot \iint_{D_\beta} \varphi_1 dx dy.$$

При этом максимальное ОСШ будет равно:

$$M_{\max} = c_0 \cdot \iint_{D_\beta} \varphi_1 \cdot \varphi_2 \, dx dy \Big/ \sqrt{\iint_{D_\beta} \varphi_1 \, dx dy}.$$

Геометрическая интерпретация полученного решения – для ОК постоянной толщины выполнено равенство объёмов:  $V(\Phi_1) = V(\Phi_2)$ , где

$$\Phi_1 = \{(x, y, z) \mid \beta \leq z \leq \varphi_2(x, y)\}; \Phi_2 = \{(x, y, z) \mid 0 \leq z \leq \beta; (x, y) \in D_\beta\}.$$

Техническая реализация полученного решения – применение коллиматора без ФП с апертурой равной проекции области  $\Phi_1$  или  $\Phi_2$  на плоскость ХОУ (рабочую поверхность детектора излучения).

Определим величину выигрыша от применения оптимальной ФПЧД как отношение ОСШ для оптимальной ФПЧД к ОСШ для «традиционной» ФПЧД, равной характеристической функции проекции дефекта на рабочую поверхность детектора, то есть характеристической функции множества  $D$ .

На рис.2. представлена величина выигрыша от применения оптимальной ФПЧД для дефекта, имеющего шаровую форму, а на рис.3 – ступенчатую (рис.4).

Если  $p = \beta/\alpha$ ,  $x = b/a$ ,  $0 < \beta \leq \alpha$  (параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$  указаны на рис.4.), то при  $0 < p < 0,5$ ,  $0 < x < (1-2p)/p^2$  выигрыш в ОСШ равен  $\delta = \delta(x, p) = (ОСШ(AB)) / (ОСШ(AC)) = (\sqrt{1+x}) / (1+px)$  (рис.3.).

Предложен алгоритм коррекции апертурных искажений радиационных изображений. Реконструкция изображений по данному алгоритму обладает тем преимуществом, что количество вычислительных операций значительно уменьшено по сравнению с общеизвестными алгоритмами инверсии.

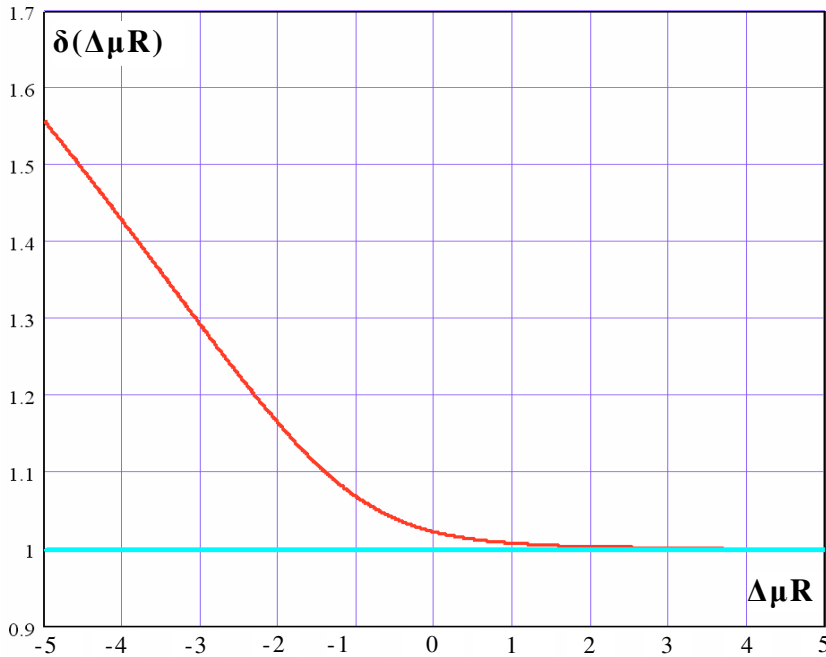


Рис.2. Величина выигрыша  $\delta$  от применения оптимальной ФПЧД для дефекта имеющего шаровую форму в зависимости от  $\Delta\mu R$ :  
 $R$  – радиус дефекта;  $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$ ;  $\mu_1$  – ЛКО ОК;  $\mu_2$  – ЛКО ИВ

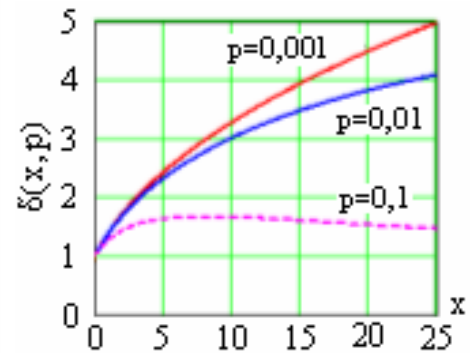


Рис.3. Величина выигрыша от применения оптимальной ФПЧД для дефекта имеющего ступенчатую форму.

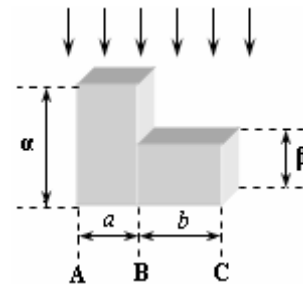


Рис.4. Дефект ступенчатой формы

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

Выбор шага дискретизации и размера апертуры детектора в направлении сканирования основывался на максимизации коэффициента передачи амплитудной модуляции для ОК с дефектной прослойкой, 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.

Построена и проанализирована модель процесса формирования информативного сигнала при наличии инерционного звена, имеющего аппаратное «мертвое время» непродлевающегося типа.

Рассмотрена задача оценки влияния аппаратного «мертвого времени» непродлевающегося типа на погрешность оценивания параметра  $\lambda$  – интенсивности рекуррентной импульсной последовательности. Данная задача возникает как в радиометрическом контроле материалов, так и в оптической связи и спектрометрии ядерных излучений.

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

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

где  $f(t)$  – плотность распределения интервалов между импульсами входящего рекуррентного потока;  $\tau$  – длительность аппаратного «мертвого времени»; функция  $g(x)$  определяется из решения интегрального уравнения

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

Рассмотрены результаты решения данной задачи для различных типов импульсных последовательностей, а именно: для потока Эрланга произвольного порядка, для равномерного закона распределения интервалов между импульсами. Более подробные исследования проведены для пуассоновского потока, который является достаточно точной моделью подавляющего большинства потоков радиационного излучения.

Так, если интервалы между импульсами входящего потока – случайные величины, распределенные с плотностью вероятностей:

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

(пуассоновская последовательность импульсов), то на выходе (у наблюдаемой последовательности) будем иметь

$$\varphi(t) = \lambda \exp(-\lambda(t - \tau)) \text{ при } t \geq \tau \text{ и } \varphi(t) = 0 \text{ при } t < \tau.$$

То есть получим смещенное показательное (экспоненциальное) распределение. Отсюда вытекает следствие, состоящее в том, что инерционное звено, имеющее аппаратурное «мертвое время»  $\tau$  непродлевающегося типа,

трансформирует пуассоновский поток  $\xi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \delta(t - t_i)$  с интенсивностью  $\lambda$  ( $A_i$  – независимые одинаково распределенные случайные величины) в

поток событий вида  $\xi_1(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^* \cdot \delta(t - t_i^* - (i-1)\tau)$ , где  $\xi_0(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^* \cdot \delta(t - t_i^*)$  – является пуассоновским потоком с интенсивностью  $\lambda$ , а  $A_i^*$  – независимые одинаково распределенные случайные величины,  $\delta(t)$  – дельта-функция Дирака.

**Четвертая глава** посвящена исследованию эффективности применения аналогового, счетного и счетно-временного режимов регистрации излучения в радиометрических системах контроля изделий со значительными перепадами по толщине.

Получена оценка интенсивности потока импульсов на выходе детектора излучения (параметра  $\lambda$ ) с учётом аппаратурного «мертвого времени» непродлевающегося типа при использовании в радиометрической системе счётно-временного режима регистрации

$$\lambda_N = (N - 2) / (T_N - (N - 1)\tau), \quad (4)$$

где  $N$  – задаваемое количество импульсов,  $T_N$  – время регистрации этих  $N$  импульсов равное промежутку времени между моментами прихода первого и  $N$ -го зарегистрированных импульсов,  $\tau$  – длительность «мертвого времени».

Показано, что оценка (4) обладает свойствами несмещенности, состоятельности и асимптотической эффективности, а величина её эффективности равна  $\text{eff}(\lambda_N) = 1 - 2/(N - 1)$ .

Для обеспечения той же относительной погрешности оценки параметра  $\lambda$ , что и при нулевом «мертвом времени», средняя продолжительность измерения в одной позиции сканирования объекта контроля должна быть увеличена в  $K$  раз, где  $K = 1 + \lambda\tau$ .

В метрологическом отношении выбор того или иного режима регистрации излучения в радиометрических системах контроля преимущественно обусловлен значением параметра  $\lambda$ . А именно, при малых значениях  $\lambda$  целесообразно применять счетный (счетно-временной) режим, а при больших – аналоговый. Это обусловлено тем, что при больших значениях параметра  $\lambda$  наличие аппаратурного «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 значениях параметра  $\lambda$  наличие амплитудных флуктуаций импульсов с детектора приводит к значительному снижению

эффективности использования аналогового режима регистрации. Таким образом, существует некоторое граничное значение  $\lambda_0$  параметра  $\lambda$ , менее которого целесообразно использовать счетный режим, а более – аналоговый.

В качестве критерия сравнения эффективности применения счетно-временного и аналогового режимов регистрации примем величину  $\Delta = \delta_Q / \delta_N$ , где  $\delta_Q, \delta_N$  – относительные погрешности оценки параметра  $\lambda$  при использовании аналогового и счетно-временного режимов регистрации излучения, соответственно.

Из условия равной производительности контроля для рассматриваемых режимов, то есть при  $T = M(T_N) = (N - 1)(1 + \lambda\tau)/\lambda$ , получаем

$$\Delta = \delta_Q / \delta_N = \eta / \sqrt{1 + \lambda\tau},$$

где  $\eta = \sqrt{M(A^2)} / |M(A)|$  – коэффициент амплитудного разброса электрических импульсов с выхода детектора;  $M(*)$  – знак математического ожидания;  $A$  – случайная амплитуда отдельного импульса с выхода детектора. На рис.5. представлен график зависимости величины  $\Delta$  от произведения  $\lambda\tau$ .

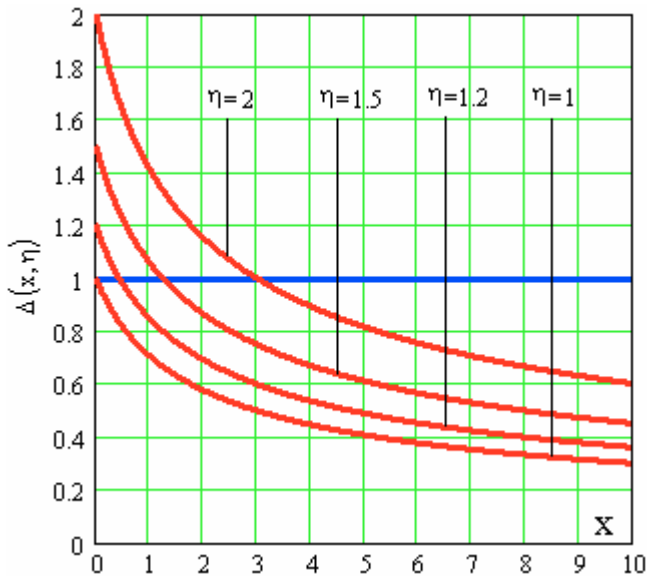


Рис.5. Отношение относительных погрешностей оценок параметра  $\lambda$  при аналоговом и счётно-временном режимах регистрации излучения  $\Delta = \Delta(x, \eta)$  в зависимости от  $x = \lambda\tau$  при различных значениях коэффициента амплитудного разброса  $\eta = 1,0; 1,2; 1,5; 2,0$ .

Из уравнения  $\delta_N = \delta_Q$  найдено граничное значение  $\lambda_0$  параметра  $\lambda$ :

$$\lambda_0 = \frac{1}{\tau} \cdot \delta_A^2,$$

где  $\delta_A = \sigma_A / M(A)$  – относительные флуктуации амплитуд электрических импульсов с детектора излучения,  $M(A)$  – их математическое ожидание,  $\sigma_A$  – среднеквадратическое отклонение амплитуд импульсов,  $\tau$  – длительность «мертвого времени» радиометрической системы контроля.

Таким образом, при  $\lambda < \lambda_0$  целесообразно применять счётно-временной режим регистрации, а при  $\lambda > \lambda_0$  – аналоговый (токовый).

Разработан новый (модифицированный) алгоритм обработки информации для многоканальных (на основе линейки детекторов) радиометрических систем контроля изделий со значительными перепадами по толщине. Алгоритм основан на модификации счётно-временного режима регистрации излучения и заключается в следующем:

1. Задается количество  $N$  регистрируемых импульсов для всех  $n$  каналов линейки детекторов.
2. После накопления  $N$  импульсов в произвольном  $j$ -ом канале подается сигнал о накоплении на устройство управления и импульсы в данном кана-

ле продолжают считаться до тех пор, пока последний из детекторов не зарегистрирует заданное число импульсов  $N$ . Таким образом,  $j$ -й канал накопит  $N + N_j$  импульсов ( $j=1, 2, \dots, n$ ).

3. Измеряется промежуток времени  $T$ , за который последний измерительный канал зафиксировал эти  $N$  импульсов (он равен промежутку времени от момента начала контроля в данной дискретной позиции до момента поступления на управляющее устройство  $n$ -го сигнала о накоплении). Время  $T$  будет общим временем контроля в одной позиции дискретного сканирования для всех измерительных каналов.

Преимущества модифицированного алгоритма:

1. Для каждого канала, кроме последнего (с максимальным временем регистрации  $N$  импульсов), добавляется еще один дополнительный информативный параметр –  $N_j$ . Данный параметр уменьшает статистическую погрешность измерений для каждого канала и, следовательно, повышает достоверность результатов контроля, причем без потери производительности.
2. Для каждого измерительного канала заранее известно максимальное значение относительной погрешности оценки интенсивности потока импульсов. Это значение постоянно для любого ОК и равно  $1/N^{0,5}$ , то есть является легко регулируемым параметром.
3. Автоматически определяется время контроля в каждой дискретной позиции, обеспечивающее заданную относительную погрешность измерений.

Проведено сравнение разработанного алгоритма с двумя известными алгоритмами.

Первый алгоритм основан на применении счётного режима регистрации излучения – для каждого детектора и в каждой позиции дискретного сканирования фиксируется временной промежуток  $T$  накопления зарегистрированных импульсов. При использовании данного алгоритма матрица относительных погрешностей измерений будет равна

$$\Omega_1 = \left\| 1/\sqrt{\lambda_{i,j} \cdot T} \right\|_{i=1, \dots, m}^{j=1, \dots, n},$$

где  $\lambda_{i,j}$  – интенсивность потока импульсов на выходе  $j$ -го ( $j=1, 2, \dots, n$ ) детектора в  $i$ -ой ( $i=1, 2, \dots, m$ ) позиции дискретного сканирования ОК. При этом общее время измерения излучения в  $m$  позициях будет равно  $T_1 = m \cdot T$ .

Второй алгоритм основан на применении счётно-временного режима регистрации излучения – для каждого детектора и в каждой позиции дискретного сканирования задается количество  $N$  регистрируемых импульсов. При этом после накопления ровно  $N$  импульсов каждый канал прекращает работу. При использовании данного алгоритма матрица относительных погрешностей измерений будет равна

$$\Omega_2 = \left\| 1/\sqrt{N} \right\|_{i=1, \dots, m}^{j=1, \dots, n}.$$

При этом общее среднее время измерения излучения в  $m$  позициях при больших  $N$  будет равно

$$T_2 = M(\hat{t}_i) = N \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_m} \right),$$

где  $\lambda_i = \min_{1 \leq j \leq n} \{\lambda_{ij}\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

При использовании предложенного модифицированного алгоритма матрица относительных погрешностей измерений будет равна

$$\Omega_3 = \left\| \sqrt{\lambda_i / (N \cdot \lambda_{i,j})} \right\|_{i=1, \dots, m}^{j=1, \dots, n}.$$

Для данного алгоритма общее среднее время  $T_3$  измерения излучения в  $m$  позициях при больших  $N$  будет равно  $T_2$  (как и для второго алгоритма).

Ниже представлены результаты численных экспериментов. При этом во всех рассматриваемых примерах изделия бездефектны и каждое из них расположено между двумя параллельными плоскостями, находящимися на расстояниях  $F_1 - 0,5 \cdot H_{\max}$  и  $F_1 + 0,5 \cdot H_{\max}$  от источника излучения, где  $F_1$  – расстояние от источника до плоскости симметрии контролируемого изделия,  $H_{\max}$  – максимальная толщина изделия (все расстояния отсчитываются по центральному лучу). Сканирование осуществляется дискретно по прямой, параллельной этим двум плоскостям. Условия и параметры контроля: источник излучения – радионуклид кобальта  $^{60}\text{Co}$  с активной массой 0,5 г и эффективной энергией  $E_{\text{эфф}} = 1,25$  МэВ; излучение регистрируется линейкой детекторов с числом каналов  $n = 100$ ; источник и детекторы коллимированы; размер прямоугольных апертур детекторов  $1 \times 1$  см; фокусное расстояние  $F = 150$  см; регистрируемая часть веерного пучка излучения имеет угол раствора  $\alpha = 20^\circ$ ; количество накапливаемых импульсов  $N = 10^4$ ; для каждого изделия количество позиций сканирования  $m = 50$ ; для каждого из трёх рассматриваемых режимов регистрации излучения производительность контроля одинакова.

В таблице 1 приведены: эффективные линейные коэффициенты ослабления излучения для материалов изделий –  $\mu_{\text{эфф}}$ ; эффективные атомные номера для материалов изделий –  $Z_{\text{эфф}}$ ; плотности изделий –  $\rho$ ; угол между образующими конуса и клина –  $\varphi$ ; общее время контроля изделия –  $T_{\text{общ}}$ ;  $\delta T$  – коэффициент увеличения общего времени контроля изделия при использовании первого алгоритма по сравнению с модифицированным при условии равенства максимальных значений относительных погрешностей для данных алгоритмов.

Таблица 1. Характеристики изделий и параметры контроля

Условия контроля	$H_{\max}$ , см	$F_1$ , см	$Z_{\text{эфф}}$	$\mu_{\text{эфф}}$ , 1/см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{\text{общ}}$ , с	$\delta T$	$m$	$\varphi$ , град
Усеченный конус	22,53	50	26	0,424	7,89	12,22	7,25	50	10
Клин	25,14	80	26	0,424	7,89	50,01	10,14	50	27

На рис.6., рис.8. представлены схемы контроля изделий и их теневые радиационные изображения, а на рис.7., рис.9. – графики относительных

погрешностей измерений для каждого из трёх алгоритмов: на рисунке *в* – для первого алгоритма; на рисунке *г* – для второго; на рисунке *д* – для третьего. Обозначение координатных осей: *X* – номер детектора, *Y* – номер позиции сканирования, *Z* – величина относительной погрешности.

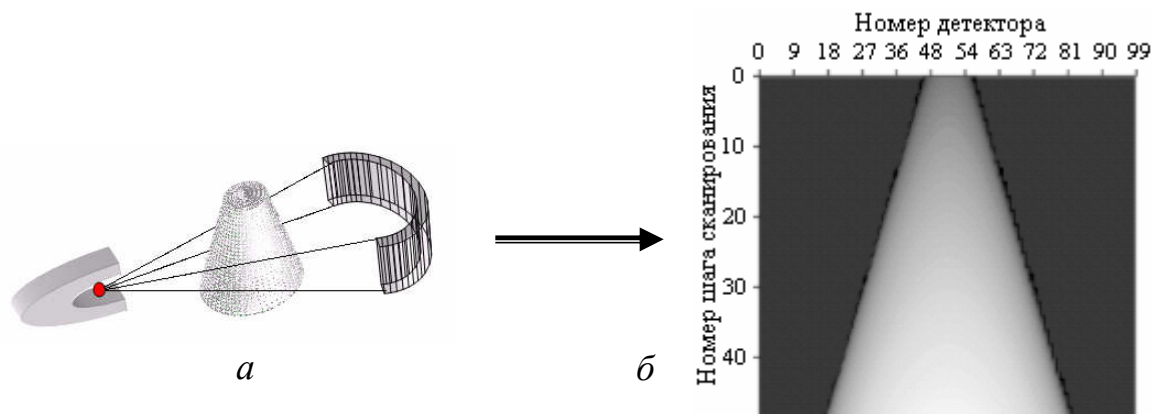


Рис.6. Изделие конической формы: *а* – схема контроля, *б* – теневое радиационное изображение.

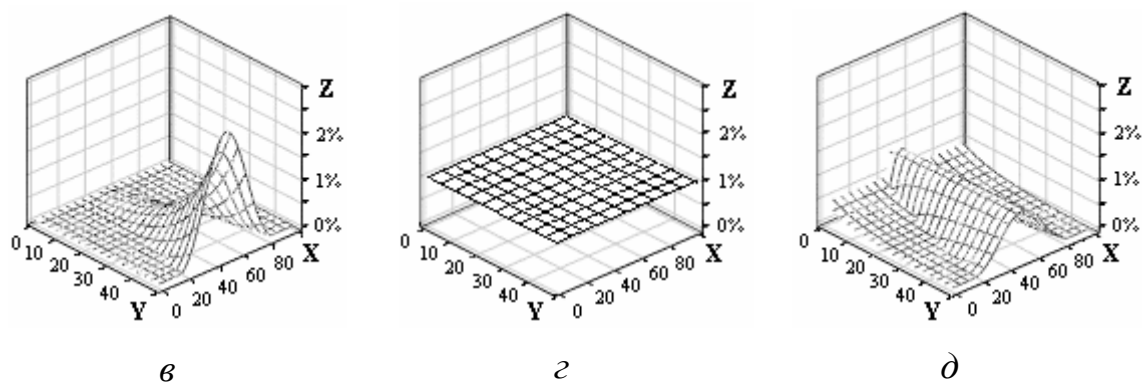


Рис.7. Графики относительных погрешностей при сканировании изделия конической формы.

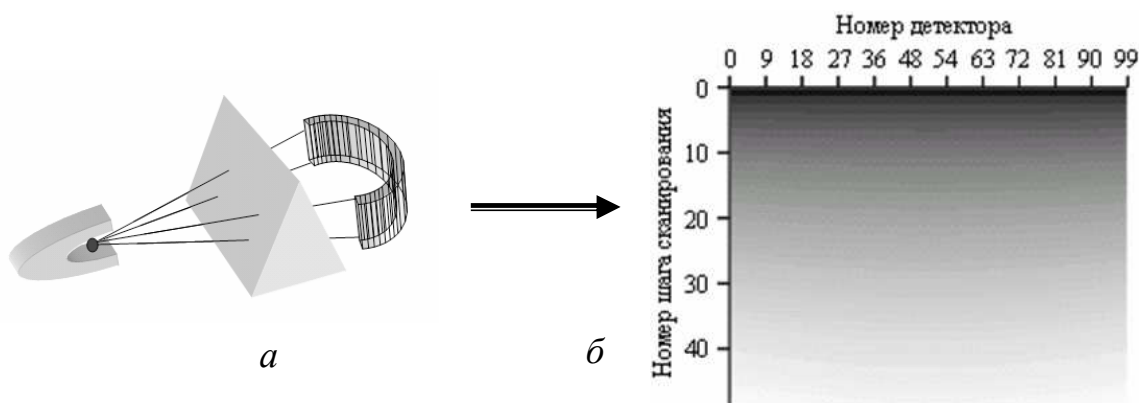


Рис.8. Изделие клиновидной формы: *а* – схема контроля, *б* – теневое радиационное изображение.



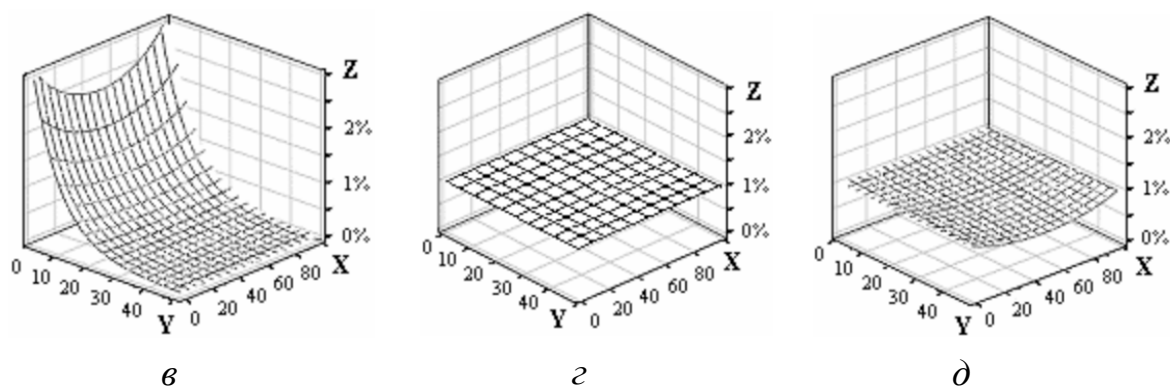


Рис.9. Графики относительных погрешностей при сканировании изделия клиновидной формы.

Согласно результатам численных экспериментов (рис.7., рис.9.):

- значения относительных погрешностей для модифицированного алгоритма не превосходят соответствующих значений относительных погрешностей для второго алгоритма;
- максимальное значение матрицы относительных погрешностей для модифицированного алгоритма значительно меньше максимального значения матрицы относительных погрешностей для первого алгоритма.

### Основные результаты и выводы

Разработана совокупность математических соотношений, устанавливающих оптимальные условия обработки информации при радиометрическом контроле изделий со значительными перепадами по толщине.

1) Выведены соотношения, позволяющие найти оптимальную функцию пространственной чувствительности детектора излучения, используемого в радиометрической системе при обнаружении ею инородных включений в контролируемом изделии. Показано, что если лучевой размер инородного включения описывается выпуклой функцией, то существует единственная оптимальная функция пространственной чувствительности детектора.

2) Выигрыш в отношении сигнал/шум за счет применения оптимальной функции пространственной чувствительности детектора излучения может быть значительным при обнаружении локальных инородных включений, что указывает на целесообразность использования предложенных рекомендаций в инженерном проектировании и расчетах блоков и систем радиационного контроля.

3) Получена несмещённая оценка интенсивности потока импульсов на выходе детектора с учётом аппаратного «мёртвого времени» при использовании в радиометрической системе контроля счётно-временного режима регистрации излучения, что позволило усовершенствовать алгоритм коррекции влияния «мёртвого времени» и тем самым повысить точность радиометрических измерений.

4) Найдено граничное значение интенсивности потока импульсов на

выходе детектора, позволяющее установить приоритетность использования аналогового и счётного режимов регистрации излучения.

5) Разработан новый алгоритм обработки радиометрической информации применительно к многоканальной радиометрической системе контроля изделий со значительными перепадами по толщине, который позволяет автоматизировать процесс контроля и получать относительную погрешность радиометрических измерений в каждом детекторе не хуже наперёд заданной. Полученный алгоритм лег в основу разработки новых устройств радиометрического контроля, защищенных тремя патентами РФ.

### **Список публикаций по теме диссертации**

- 1) Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимизация функции чувствительности детектора в радиометрических системах радиационного контроля // Автометрия. – 2001. – № 1. – С. 75–83.
- 2) Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Модели формирования теневых радиационных изображений // Автометрия.– 2001. – № 4. – С. 103–109.
- 3) 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.
- 4) Солодушкин В.И., Метель А.А. Оценка эффективности счётного метода обработки информации в многоканальных радиометрических системах контроля // Дефектоскопия. – 2005. – № 2.– С. 79–90
- 5) Недавний О.И., Солодушкин В.И., Удод В.А. Оптимальная аподизация апертуры детектора излучения в радиометрических системах // Вестник Томского государственного университета. Математика. Кибернетика. Информатика. – 2000. – № 271. – С. 77–80.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Солодушкин В.И., Удод В.А. О выборе параметров фильтрации при решении интегрального уравнения Абеля //Метрология. – 1986.– № 10. – С. 12–16.
- 9) Недавний О.И., Солодушкин В.И., Метель А.А. Способ радиометрического контроля и устройство для его осуществления // Патент РФ на изобретение №2251661RU С1 МПК7 G01 В15/02. По заявке 2004103893/28, дата поступления: 10.02.2004, опубликовано: 10.05.2005, бюл. № 13
- 10) Метель А.А., Недавний О.И., Солодушкин В.И. Устройство радиационного контроля. // Патент РФ на полезную модель № 38398 (заявка 2004104644), 2004.

- 11) Метель А.А., Недавний О.И., Солодушкин В.И. Устройство радиометрического контроля. // Патент РФ на полезную модель № 40481 (заявка 2004110539), 2004.
- 12) Солодушкин В.И. Нахождение оптимальной функции пространственной чувствительности детектора излучения с учётом объёмности объекта контроля // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика.– 2008. – № 2(3). – С. 51–60.
- 13) Sidulenko O., Solodushkin V., Udod V. Correction of aperture distortions in radiometric systems of radiation control // Proceedings of the 5th Korea–Russia International Symposium on Science and Technology.: Tomsk, June 26 – July 3, 2001. – P. 374–377.
- 14) Солодушкин В.И., Метель А.А., Сафронов А.А. Улучшенная модификация счётного способа регистрации ионизирующего излучения для многоканальных радиометрических систем / IX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии».: Труды. В 2 т. Томск, 7–11 апреля, 2003.– С. 107–108.
- 15) 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.
- 16) Завьялкин Ф.М., Солодушкин В.И., Удод В.А. Коррекция апертурных искажений пространственным кодированием проекций // 2-й Всесоюзный симпозиум по вычислительной томографии.: Тез. докл.– Куйбышев, 1985.– С. 57–58.