

Буллер Алексей Иванович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ
СКАНИРУЮЩЕГО ТИПА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2012

Работа выполнена в Институте неразрушающего контроля ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Кулешов Валерий Константинович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ефимов Валерий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Бийского технологического института (филиала Алтайского государственного технического университета), профессор кафедры «Информационных управляющих систем»

Карлов Юрий Кимович, кандидат технических наук, главный метролог ОАО «Новосибирский завод химконцентратов»

Ведущая организация:

Институт технических средств неразрушающего контроля «МГТУ МИРЭА», г. Москва.

Защита состоится 11 декабря 2012 г. в 17 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, Россия, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно – технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «___» ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.269.09 к.т.н., доцент



Винокуров Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие нефте- и газодобывающей промышленности сопровождается необходимостью транспортировки углеводородов на большие расстояния по трубопроводам. Внешние и внутренние факторы в процессе эксплуатации трубопровода оказывают на него постоянное негативное воздействие, что приводит к образованию дефектов (дефекты сварных соединений, возникновение коррозии, трещин, пор и т.д.). Все это способно привести к техногенной катастрофе, значительному экологическому и материальному ущербу.

Транспортировка углеводородов в промышленных масштабах в основном осуществляется по трубопроводам диаметром более 1 метра и толщиной стальной стенки от 12 мм и более, состояние которых оценивается методами неразрушающего радиационного контроля. Следовательно, требуется радиационный контроль сотен километров трубопроводов большого диаметра. При проектировании высокоэффективных систем цифровой радиографии сканирующего типа (СЦРСТ) неизбежно возникает задача определения их оптимальных параметров и характеристик, обеспечивающих максимум производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера.

В ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) проводятся широкомасштабные научные исследования по определению оптимальных характеристик и созданию рентгеноскопических установок, удовлетворяющих решению данной задачи.

Подобные комплексы разрабатываются, изготавливаются и внедряются фирмами VJ Technologies Company (США), Envision Product Group (США).

Цель работы: – разработка и создание СЦРСТ для контроля объектов большого диаметра, оптимизированных по критерию максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера.

Основные задачи:

- получить формализованное описание критерия оптимальности параметров СЦРСТ, предназначенных для контроля цилиндрических объектов большого диаметра, в виде максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданных размеров;
- оптимизировать по критерию максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданных размеров основные параметры данных систем с учетом возможности применения в них цифровой фильтрации результатов регистрации излучения;
- обосновать выбор и параметры сцинтиллятора детектора типа «сцинтиллятор-фотодиод» для эффективной энергии рентгеновского излучения;
- разработать СЦРСТ для проведения экспериментальных исследований;
- создать опытный образец СЦРСТ для контроля трубопроводов большого диаметра.

Методы исследований основываются на физических принципах взаимодействия квантов рентгеновского излучения с веществом и их регистрации. Теоретические исследования дополнены экспериментальной проверкой полученных результатов, проведенной с использованием методов экспериментальной физики. Анализ результатов натурных и вычислительных экспериментов проводился с помощью численных и статистических методов обработки экспериментальных данных.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается измерением физических величин с погрешностью, не превосходящей 1 %, она подтверждена технической реализацией в опытном образце мобильного дефектоскопического комплекса. Полученные аналитические соотношения реализованы в численных алгоритмах и проверены для актуальных задач, освещаемых в современной литературе.

Научная новизна работы:

1. Впервые получено детализированное формализованное описание критерия оптимальности СЦРСТ, предназначенных для контроля цилиндрических объектов большого диаметра, в виде максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданных размеров;

2. Решена задача оптимального выбора параметров СЦРСТ, предназначенных для контроля цилиндрических объектов большого диаметра, по критерию максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданных размеров с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения;

3. Разработана, испытана и внедрена СЦРСТ для контроля трубопроводов большого диаметра, оптимизированная по критерию максимума производительности контроля, при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в результате диссертационных исследований аналитические выражения и алгоритмы расчета научно обосновывают проектирование, рациональный выбор и повышают эффективность оценки параметров систем цифровой рентгенографии на основе линейных детекторов и источников рентгеновского излучения для трубопроводов большого диаметра.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований использованы при разработке рентгентелевизионной системы для радиационного контроля нефте- и газопроводов большого диаметра (Институт неразрушающего контроля (ИНК НИ ТПУ) и используются при чтении курса лекций для студентов электрофизического факультета НИ ТПУ по дисциплине «Неразрушающие методы контроля». Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований на прототипе установки, использованы при разработке мобильного дефектоскопического комплекса, предназначенного для контроля трубопроводов большого диаметра, который успешно прошел экспертизу технической документации и аттестационные испытания в ОАО «Газпром», г. Москва.

Личный вклад автора:

- в разработке плана экспериментальных работ, проведении экспериментальных исследований, обработке результатов экспериментальных исследований;
- состоит в теоретическом обосновании, подборе оптимальных параметров сканирующей системы цифровой радиографии для контроля цилиндрических объектов большого диаметра, обеспечивающих максимальную производительность с выявляемостью дефектов заданного размера;
- в разработке алгоритмического и программно-технического обеспечения дефектоскопических комплексов;
- разработке мобильного дефектоскопического комплекса на базе СЦРСТ для контроля трубопроводов большого диаметра;
- в определении перспективных направлений дальнейшего развития исследований в данной области.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались: на научно-технических семинарах ИНК НИ ТПУ; на 8-ой международной конференции по неразрушающему контролю, Москва, 18-20 марта 2009 г.; на международной школе-семинаре для магистров, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Хорста Герольда (Университет им. Отто фон- Герики, Магдебург, Германия), 26-30 июня 2009 г.; на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, ТПУ, 4-8 мая 2009 г.; на международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А.Воробьева – Томск, ТПУ, 14-16 сентября 2009 г.; на Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля», Екатеринбург, 6-8 апреля 2009 г., на 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю, Москва 7-11 июня 2010 г.; на Всероссийской научно-технической конференции «Физические основы диагностики материалов и изделий и приборы для ее реализации», 12-13 ноября 2010 г.; на II международной научно-практической конференции молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений» 23-25 ноября 2010 г.; на 18-ой Всемирной конференции по неразрушающему контролю - 16-20 апреля 2012 г. – Дурбан – ЮАР.

Разработанный мобильный дефектоскопический комплекс, предназначенный для автоматического цифрового рентгенографического контроля трубопроводов успешно прошел аттестацию в ОАО «Газпром». Комплекс прошел апробацию на площадках ОАО «Газпром трансгаз Томск». На разработку подана заявка на патент, номер заявки 2012116783 от 25.04.2012, получено положительное решение формальной экспертизы.

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 15 печатных работах, из них 6 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 151 страницу машинописного текста, в том числе 36 рисунков, 15 таблиц, 118 наименований использованных источников.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность соотношений для оптимального выбора значений основных параметров СЦРСТ по критерию максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера.
2. Обоснование выбора материала сцинтиллятора и его параметров в детекторах типа «сцинтиллятор-фотодиод» для эффективной энергии рентгеновского излучения;
3. Результаты экспериментальных исследований, полученных с использованием СЦРСТ в лабораторных условиях;
4. Опытный образец оптимизированной мобильной СЦРСТ, предназначенный для автоматического контроля сварных соединений и основного металла труб газопроводов диаметром 1020-1220 мм.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная и практическая ценность результатов, дана общая характеристика выполненной работы.

В первой главе проведен обзор литературных данных, посвященный анализу современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии, широко используемых в промышленной дефектоскопии, в медицинской диагностике, досмотре и т. д., обоснованы основные задачи диссертационных исследований.

Современное состояние неразрушающего радиационного контроля характеризуется интенсивным развитием и широким распространением систем цифровой радиографии (СЦР), в которых радиационное изображение просвечиваемого объекта контроля (ОК) преобразуется в цифровой сигнал. В дальнейшем этот цифровой сигнал заносится в память компьютера и перераспределяется в двумерный массив измерительных данных, который может подвергаться различным видам цифровой обработки (контрастирование, масштабирование, сглаживание, фильтрация и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране графического дисплея в виде полутонного изображения, непосредственно воспринимаемого оператором или анализируемого ЭВМ.

Источниками излучения в данных системах обычно являются рентгеновские аппараты, в ряде случаев применяются бетатроны и линейные ускорители.

По принципу формирования рентгеновского изображения (РИ) существующие СЦР можно разделить на два типа:

- системы с двумерными преобразователями (детекторами) РИ;
- системы, использующие принцип сканирования ОК веерным пучком излучения или «бегущим лучом».

Но наиболее распространенной принято считать классификацию по способам детектирования РИ. Это системы на основе оцифровки традиционных рентгенограмм, системы на основе запоминающих люминофоров, системы на основе фоторезистивных экранов, системы на основе усилителей радиационных изображений, системы на основе двумерных матричных детекторов,

сканирующие системы на основе линейки одномерных матричных детекторов, сканирующие системы на основе «бегущего рентгеновского луча».

В обзоре литературы описаны принципы действия и уровень развития вышеуказанных систем на современном этапе, отмечены их преимущества и недостатки, приведены примеры РИ. В результате анализа литературных данных был сделан вывод, что в настоящее время среди различных типов СЦР одними из наиболее перспективных для контроля цилиндрических объектов большого диаметра являются сканирующие системы на основе линейки одномерных матричных детекторов. Это обусловлено целым рядом существенных преимуществ данных систем перед остальными, а именно: значительно более низкими дозами излучения, что обеспечивает безопасность контроля; большим динамическим диапазоном; возможностью получения снимков большой длины (отсутствие «сшивок» между отдельными фрагментами снимка), что особенно актуально при контроле протяженных ОК; минимальной выраженностью или полным отсутствием геометрических искажений; высокой контрастной чувствительностью при низких дозах излучения; высокой эффективностью регистрации излучения, приводящей к высокой производительности контроля; высокой восприимчивости к автоматизации; более низкой стоимости установок по сравнению с существующими цифровыми двумерными системами при сохранении сходного качества РИ.

В рамках развития этого направления были сформулированы основные задачи исследований.

Во **второй главе** обоснован выбор материала сцинтиллятора и его параметров в детекторах типа «сцинтиллятор-фотодиод» для эффективной энергии рентгеновского излучения для контроля цилиндрических объектов большого диаметра и рассмотрены возможные варианты цифровой фильтрации РИ СЦРСТ.

Преобразователи рентгеновского излучения для СЦРСТ чаще всего изготавливают из люминесцентных материалов на основе вольфрамит кадмия $CdWO_4$ и цезий-йода, активированного таллием $CsI(Tl)$. Этот выбор определяется, прежде всего высокой эффективностью регистрации рентгеновского излучения, которая обусловлена большим атомным номером, высокой плотностью и максимальной конверсионной эффективностью данных люминесцентных материалов и высокой прозрачностью к собственному излучению.

Однако существует ряд параметров преобразователя, способных ограничить возможность применения того или иного сцинтиллятора в быстродействующих системах. Одним из таких параметров является послесвечение сцинтиллятора. На рис. 1 показана амплитуда времени высвечивания сцинтилляторов $CsI(Tl)$ и $CdWO_4$.

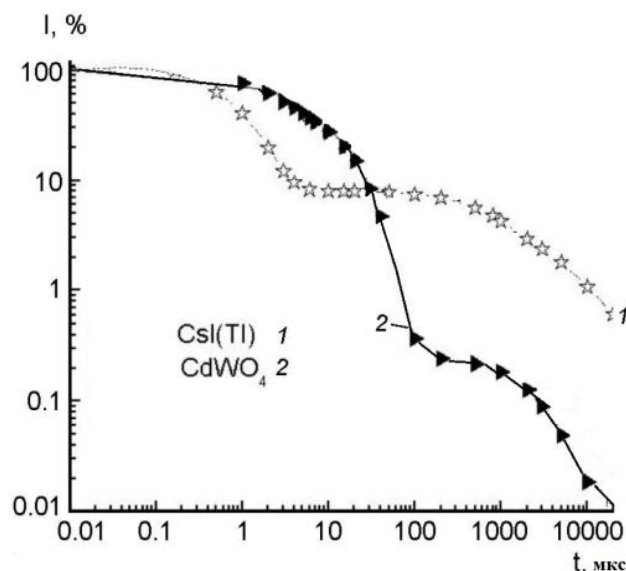


Рис. 1. Амплитуда времени высвечивания сцинтилляторов $CsI(Tl)$ и $CdWO_4$.

Определяющим фактором в выборе сцинтиллятора для СЦРСТ, обеспечивающего высокую производительность контроля, стала медленная компонента послесвечения сцинтиллятора. Время полного высвечивания сцинтиллятора $CsI(Tl)$ составляло до 100 с. После 100 мс амплитуда этого высвечивания составляла 5-10% от амплитуды первоначального сигнала, но имела накопительный характер, что приводило к появлению нерезкости при наложении структур и появлению «смазывания» РИ и негативно влияло на быстродействующие СЦР. Это также оказывало влияние на контрастность изображения, внося свой вклад в фон РИ. Следует отметить, что медленная компонента сцинтиллятора $CdWO_4$ после 100 мс по амплитуде не превышала 0,1% от первоначального сигнала.

Толщина сцинтиллятора в направлении просвечивания выбиралась из соображений максимальной эффективности регистрации рентгеновского излучения. Эффективность регистрации различных толщин сцинтиллятора $CdWO_4$ при различных энергиях излучения представлена на рис. 2.

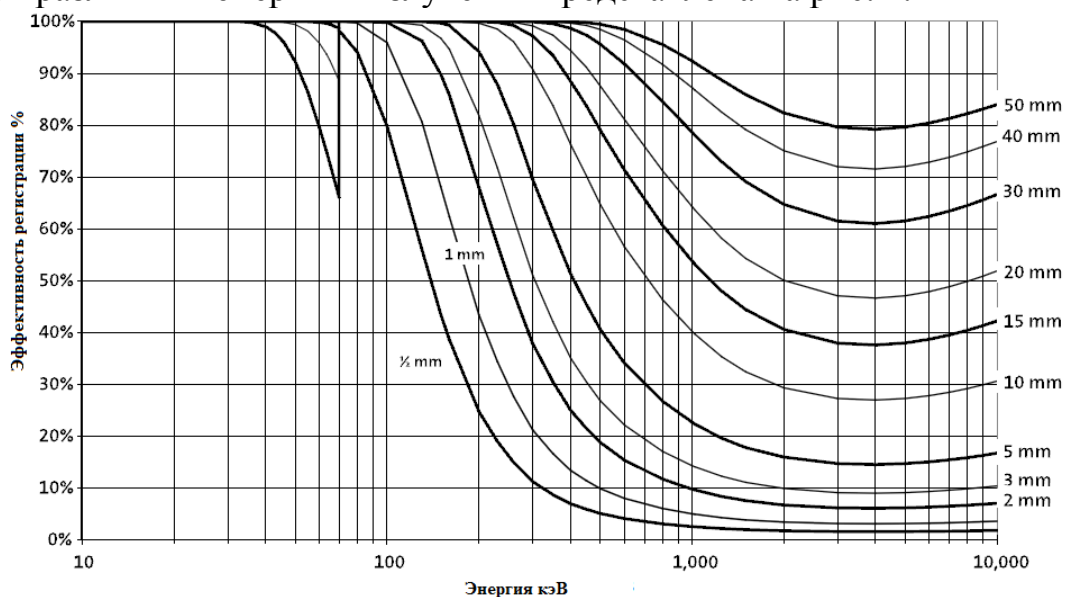


Рис. 2. Квантовая эффективность взаимодействия различной толщины сцинтиллятора $CdWO_4$.

Принципиально возможны две основных схемы сканирования ОК – продольная и поперечная. В случае с цилиндрическим ОК большого диаметра наиболее предпочтительной является поперечная схема сканирования, когда ось линейки радиометрических детекторов параллельна оси цилиндра (рис. 3). Перемещение детекторов и источника ионизирующего излучения осуществляется в направлении, перпендикулярном оси цилиндра, с пошаговым сдвигом на 1 строку линейки детекторов вокруг оси цилиндра.

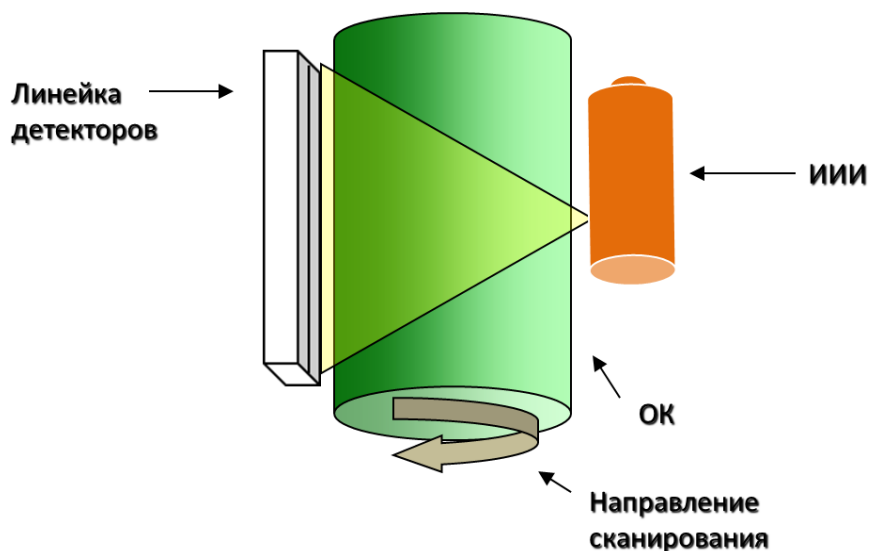


Рис. 3. Схема контроля цилиндрических ОК большого диаметра.
(ИИИ - источника ионизирующего излучения)

Для улучшения качества диагностики и увеличения производительности данные, считанные с детектора, проходят предварительную обработку в виде калибровки и цифровой фильтрации. Функциональная схема цифровой фильтрации показана на рис. 4.

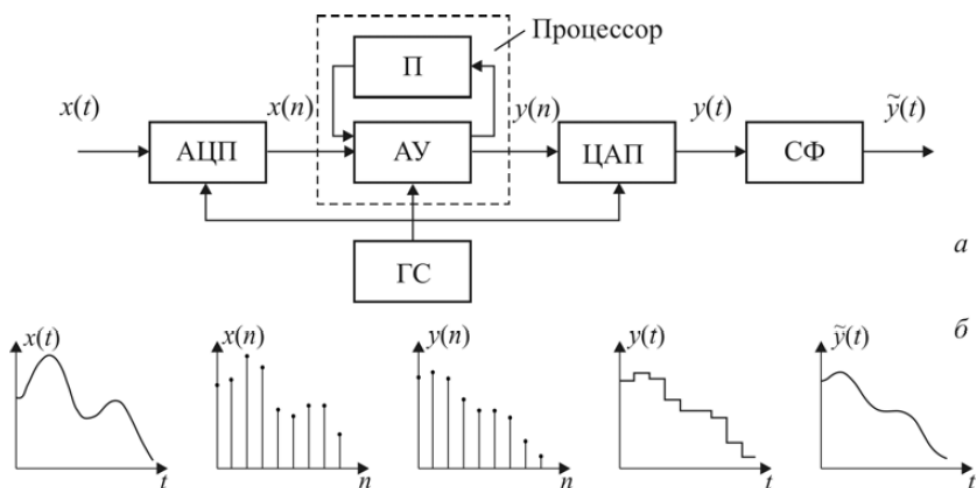


Рис. 4. Функциональная схема цифровой фильтрации.

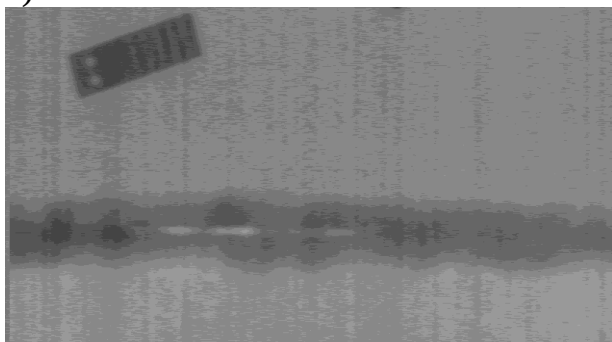
(а – функциональная схема реализации цифровой фильтрации, б – этапы цифровой фильтрации)

Непрерывный сигнал $x(t)$ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который фиксирует значения $x(n)$ сигнала в дискретные моменты времени $t = nT$, $n = 0, 1, \dots, N$ и преобразует их в цифровой код в виде двоичного числа. Последовательность $x(n)$ поступает в процессор, состоящий из

арифметического устройства (АУ) и памяти (П). В процессоре осуществляется преобразование последовательности $x(n)$ в соответствии с определенным алгоритмом. В результате на его выходе образуется последовательность $y(n)$. Последовательность $y(n)$ поступает на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), в котором текущее значение $y(n)$, представленное в цифровом виде, преобразуется в постоянное напряжение, удерживаемое в течение соответствующего интервала дискретности. На выходе ЦАП формируется непрерывный сигнал $y(t)$ в виде ступенчатой функции (рис. 4б). С помощью аналогового фильтра низких частот (ФНЧ) устраняются высокочастотные колебания и выходной сигнал $y^*(t)$ цифрового фильтра приобретает сглаженный вид.

Необходимость обработки также связана со следующими особенностями работы детектора. Во-первых, в каждом пикселе регистрируется электрический сигнал даже в случае отсутствия рентгеновского излучения (так называемый темновой ток). Во-вторых, из-за того, что невозможно изготовить абсолютно одинаково чувствительные зоны детекторов, существует некоторый разброс в величинах сигналов для разных пикселей, даже если они регистрируют одинаковое количество излучения. Чтобы устранить этот эффект, для каждого пикселя используют поправочный коэффициент, который умножают на полученное значение сигнала в пикселе. На рис. 5. приведены рентгенограммы сварного шва с использованием калибровки и цифровой фильтрации (а) и без использования их (б).

а)



б)

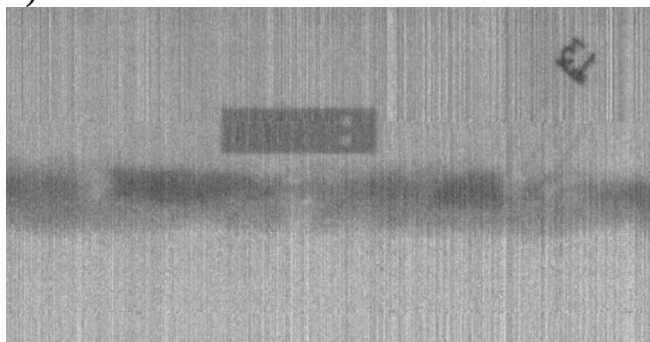


Рис. 5. Рентгенограмма сварного шва: а – с калибровкой по опорному каналу, темновому току и с фильтром низких частот, б – без калибровки по опорному каналу и темновому току и без фильтра низких частот.

Третья глава посвящена определению оптимальных параметров СЦРСТ, предназначенных для контроля цилиндрических объектов большого диаметра.

Для систем неразрушающего радиационного контроля и диагностики одним из обобщенных критериев оптимальности их функционирования является максимум производительности контроля при условии обеспечения системой выявляемости дефектов заданных размеров. Поскольку между размером a выявляемого дефекта и пространственной разрешающей способностью (РС) R системы существует прямая зависимость

$$R = \frac{1}{2a}, \quad (1)$$

представляется разумным использовать в дальнейшем следующий обобщенный критерий оптимальности выбора параметров СЦРСТ – максимум

производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ заданной разрешающей способностью (РС).

Очевидно, что при веерной геометрии просвечивания ОК, которая используется для рассматриваемой нами СЦРСТ, производительность контроля фактически будет целиком определяться скоростью ν сканирования (перемещения) ОК.

Что же касается условия обеспечения системой контроля (СК) заданной РС R_0 , то оно может быть представлено так: $R \geq R_0$.

Следовательно, критерий оптимальности в виде $\{c(m,k)\}$ будет иметь следующее формальное описание:

$$\nu \rightarrow \sup \quad (2)$$

при условии

$$R \geq R_0. \quad (3)$$

Неравенство (3) будет выполнено, если будет верно неравенство

$$\inf_{\nu_x^2 + \nu_y^2 \leq R_0^2} D(\nu_x, \nu_y) \geq K. \quad (4)$$

Здесь $D(\nu_x, \nu_y)$ - двумерная ЧКХ системы; ν_x, ν_y - пространственные частоты вдоль соответствующих координатных осей; K - относительный пороговый контраст.

Исходя из этого критерий оптимальности (2), (3) может быть преобразован к следующему виду:

$$\nu \rightarrow \sup \quad (4)$$

при условии

$$\inf_{\nu_x^2 + \nu_y^2 \leq R_0^2} D(\nu_x, \nu_y) \geq K. \quad (5)$$

Получено детализированное описание критерия (4), (5) применительно к СЦРСТ. А именно:

$$\nu \rightarrow \sup$$

при условии

$$\begin{aligned} \inf_{\nu_x^2 + \nu_y^2 \leq R_0^2} & \left(\frac{|\sin(\pi \nu_x b)|}{|\pi \nu_x b|} \cdot \frac{\left| \sin\left(\pi \frac{\nu_y}{\cos \alpha} g\right) \right|}{\left| \pi \frac{\nu_y}{\cos \alpha} g \right|} \cdot \left| \frac{\sin \pi \nu_x \nu T}{\pi \nu_x \nu T} \right| \cdot \cos(\pi \nu_x \nu T) \cdot \cos\left(\pi \frac{\nu_y}{\cos \alpha} g\right) \cdot \text{rect}(\nu_x \nu T) \cdot \text{rect}\left(\nu_y \frac{g}{\cos \alpha}\right) \right) \\ & \cdot \left[\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c(m,k) \cos\left[2\pi\left(\nu_x m \nu T + \nu_y k \frac{g}{\cos \alpha}\right)\right] \right]^2 + \\ & + \left[\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c(m,k) \sin\left[2\pi\left(\nu_x m \nu T + \nu_y k \frac{g}{\cos \alpha}\right)\right] \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \geq \frac{L_1 \sqrt{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c^2(m,k)}}{\sqrt{bgT}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь b и g - соответственно длина и ширина апертуры отдельного детектора из линейки; α - угол между осью Oz (осью симметрии рабочего пучка излучения от источника) и направлением от источника на крайний (любой из крайних)

детектор линейки (фактически угол α совпадает с половинным углом раствора рабочего пучка излучения); T – время регистрации излучения (постоянная времени каждого из временных интеграторов); $L_1 = \frac{L}{\sqrt{\varepsilon_0}}$; ε_0 – эффективность регистрации излучения детектором; L – обобщенный параметр СЦРСТ;

$$L = \frac{M_{\text{пор}} \eta}{k_r \sqrt{\exp\left[-\frac{\mu(E_{\text{эфф}})H}{\cos \alpha}\right] \cdot F^{-2} \cdot P_0(\alpha)}} \quad (7)$$

η – коэффициент амплитудного разброса электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки; k_r – радиационный контраст; μ – линейный коэффициент ослабления излучения для материала ОК; $E_{\text{эфф}}$ – эффективная энергия излучения за ОК; H – толщина ОК; F – фокусное расстояние; $P_0(\alpha)$ – суммарный квантовый выход источника в единицу времени в единичный телесный угол, центрированный относительно направления от источника на крайний детектор линейки; $\{c(m, k)\}$ – импульсный отклик цифрового фильтра, который предполагается удовлетворяющим условию нормировки

$$\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c(m, k) = 1; \quad (8)$$

M – некоторое натуральное число. Величина $(2M-1)^2$ при этом интерпретируется как площадь апертуры (окна) цифрового фильтра;

Решена задача оптимального выбора параметров b, g, T и импульсного отклика $\{c(m, k)\}$ цифрового фильтра по критерию (4), (6), т.е. по критерию максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ заданной РС. В итоге, с учетом соотношения (1), получено, что

$$\nu_{\text{max}} = 0,192 \frac{a^3 \cos \alpha}{L_1^2} \quad (9)$$

- максимум производительности контроля, который достигается при следующих оптимальных значениях параметров СЦРСТ:

$$b_{\text{opt}} = 0,88a; g_{\text{opt}} = 0,37a \cos \alpha; T_{\text{opt}} = \frac{1,42L_1^2}{a^2 \cos \alpha}. \quad (10)$$

При этом оптимальный импульсный отклик цифрового фильтра будет представлен в виде табл. 1.

Табл. 1. - Оптимальные значения отсчетов $c(m, k)$ импульсного отклика цифрового фильтра при $M = 2$

$\begin{matrix} m \\ k \end{matrix}$	-1	0	1
-1	0,0877	0,1249	0,0874
0	0,1212	0,1582	0,1209
1	0,0875	0,1248	0,0875

Таким образом, нами получены оптимальные значения длины и ширины апертуры отдельного чувствительного элемента из линейки детекторов, времени регистрации излучения и оптимального импульсного отклика цифрового фильтра, при которых достигается максимум производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера для случая, когда в СЦРСТ осуществляется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения.

После оптимизации параметров рентгенографической системы контроля были определены предварительные требования к её отдельным составляющим, что позволило перейти к практической части исследований.

В четвертой главе описана сканирующая система цифровой рентгенографии, разработанная и собранная при участии автора данной работы.

Мобильный дефектоскопический комплекс для цифрового рентгеновского контроля трубопроводов осуществляет непрерывное сканирование с помощью механизма позиционирования как в продольном направлении, так и по окружности трубы в пределах 360° и формирует непрерывную цифровую рентгенограмму сварного шва длиной 3-4 м в зависимости от длины окружности трубопровода. Внешний вид комплекса показан на рис. 6.

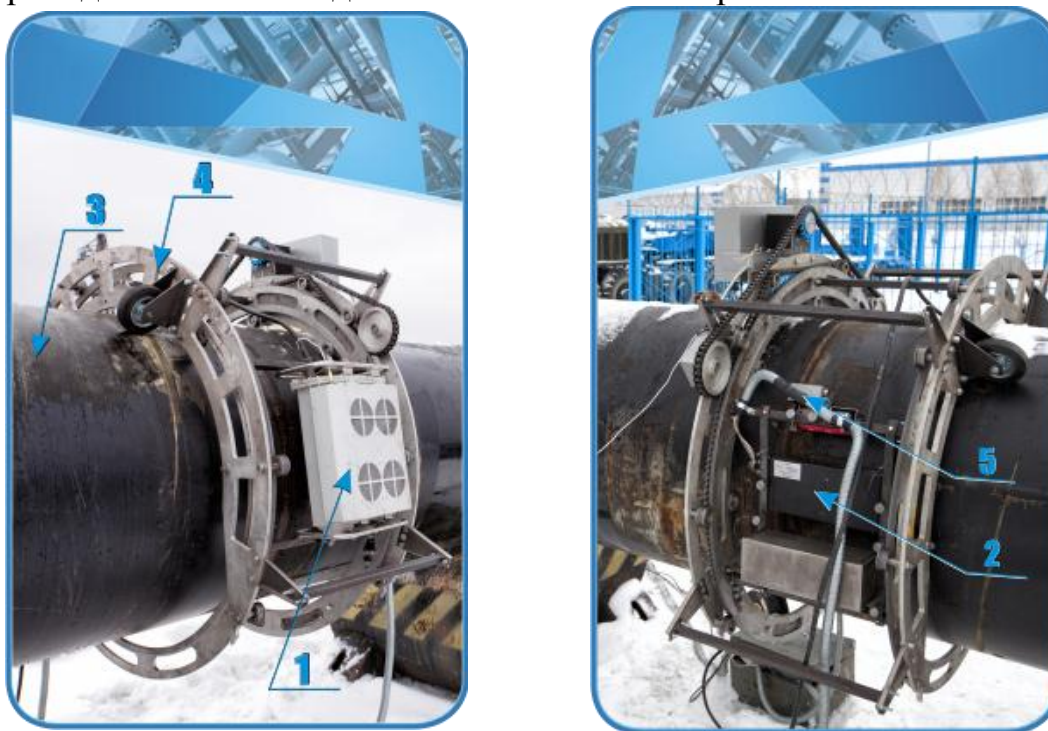


Рис. 6. Мобильный дефектоскопический комплекс на трубопроводе диаметром 1020 мм и толщиной стенки 12 мм. 1 - источник рентгеновского излучения; 2- линейка детекторов; 3 – трубопровод (ОК); 4 - механизм позиционирования; 5 – дефектоотметчик.

Рассчитаны оптимальные параметры мобильного дефектоскопического комплекса:

- требуемый к выявлению размер дефекта $a = 0,55 \text{ мм}$, тогда требуемая РС составляет 0,9 пар.лин/мм;

- оптимальная длина апертуры детектора $b_{opt} = 0,88 \cdot a = 0,484 \text{ мм}$;
- оптимальная ширина детектора $g_{opt} = 0,37 \cdot a \cdot \cos \alpha = 0,2 \text{ мм}$;
- толщина детектора $h_{ct} = 3 \text{ мм}$;
- толщина ОК по стали $H = 24 \text{ мм}$;
- эффективная энергия рентгеновского излучения $E_{эфф} = 170 \text{ кэВ}$;
- линейный коэффициент ослабления для 24 мм стали $\mu(E_{эфф}) = 1,31 \text{ см}^{-1}$;
- радиационный контраст $k_r = 2\%$;
- интенсивность ИИИ 9,25 Р/мин на расстоянии 1 м;
- плотность потока квантов излучения на расстоянии 1,2 м от источника вдоль оси пучка излучения (оси Oz) при отсутствии ОК, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$N_f = \frac{0,11}{E_{эфф} \mu_{ne}(E_{эфф}) 1,6 \cdot 10^{-6}} \frac{X}{1,44} = 2,488 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}; \quad (11)$$

- суммарный квантовый выход источника в единицу времени в единичный телесный угол, центрированный около направления от источника на один из крайних детекторов линейки:

$$P_0(\alpha) = \psi_H(\alpha) \cdot 10,95^4 \cdot N_f = 3,577 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{с}}; \quad (12)$$

- обобщенный параметр СЦРСТ

$$L = \frac{M_{nop} \eta}{k_r \sqrt{\exp\left[-\frac{\mu(E_{эфф})H}{\cos \alpha}\right] \cdot F^{-2} \cdot P_0(\alpha)}} = 0,046 \frac{1}{\text{см} \sqrt{\text{с}}}; \quad (13)$$

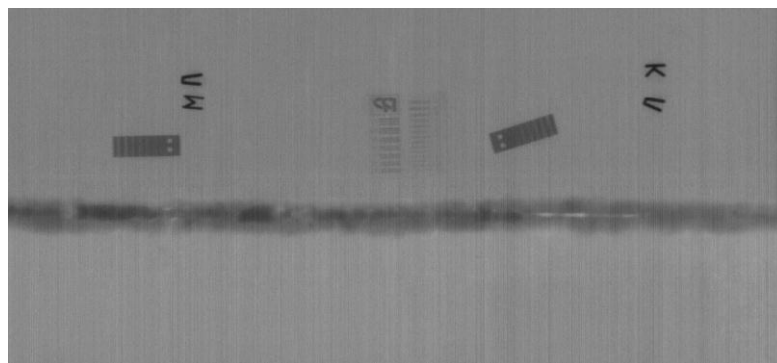
- время регистрации излучения: $T_{opt} = \frac{1,42 L_1^2}{a^2 \cos \alpha} = \frac{1,42 \cdot 0,046^2}{0,55^2} = 9,846 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; (14)

- максимум производительности системы с оптимальными параметрами длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и оптимальным импульсным откликом цифрового фильтра при условии обеспечения СК выявляемости дефектов заданного размера: $v_{max} = 0,192 \frac{a^3 \cos \alpha}{L_1^2} = 0,192 \frac{0,55^3}{0,046^2} = 15,23 \text{ мм/с}$. (15)

На данном комплексе произведены экспериментальные исследования:

1. По оценке производительности системы с оптимальными параметрами, обеспечивающими максимум производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданного размера для случая, когда в СЦРСТ осуществляется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения.

а)



б)

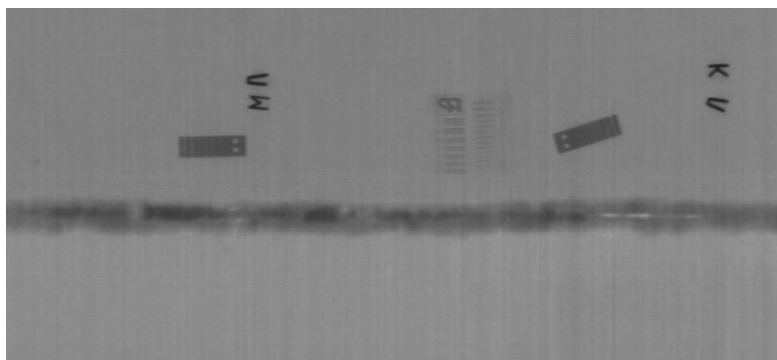
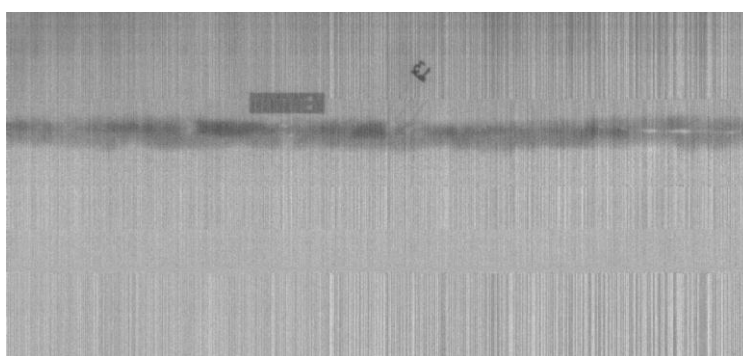


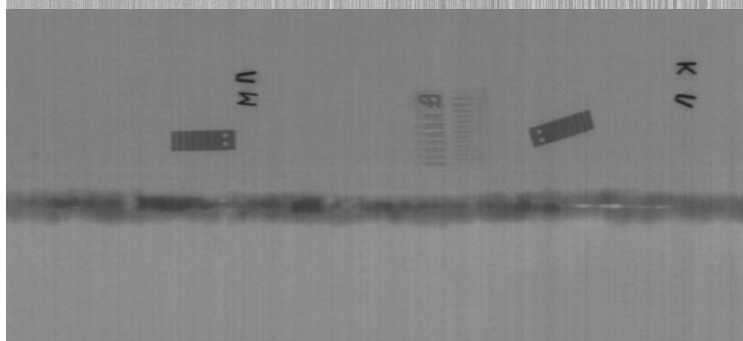
Рис. 7. Рентгенографические изображения, сварного шва трубы диаметром 1020 мм с суммарной толщиной по стали 24 мм: а – без использования цифровой фильтрации при скорости сканирования 5 мм/с; б - с использованием цифровой фильтрации при скорости сканирования 15 мм/с.

2. По оценке соответствия максимума производительности системы с оптимальными параметрами длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и оптимального импульсного отклика цифрового фильтра при условии обеспечения системой контроля (СК) выявляемости дефектов заданного размера для случая, когда в СК осуществляется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения.

а)



б)



в)

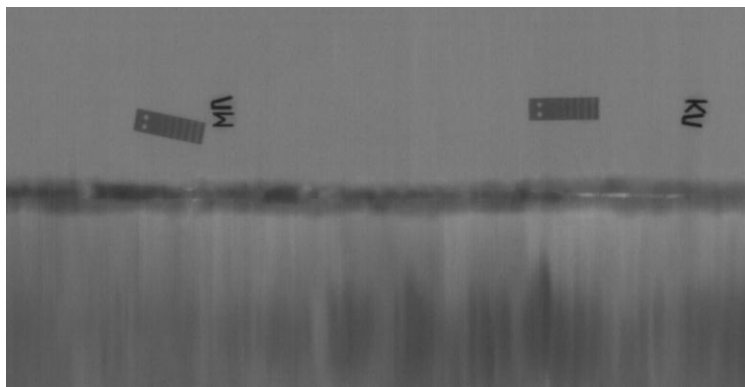


Рис. 8. Рентгенографические изображения, сварного шва трубы диаметром 1020 мм с суммарной толщиной по стали 24 мм: а – скорость 30 мм/с без применения цифровых фильтров; б – скорость 15 мм/с; в – скорость 5 мм/с.

Результаты экспериментов, проведенных на мобильном дефектоскопическом комплексе, были сопоставлены с полученными ранее теоретическими результатами.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности создания СЦРСТ для контроля цилиндрических объектов большого диаметра, таких как нефте- и газопроводы, на основе рентгеновского источника с энергией от 170 кэВ и блока регистрации с детекторами CdWO_4 + фотодиод с кристаллом размером $0,2 \times 0,5 \times 3 \text{ мм}^3$, обладающей чувствительностью 2%, достигаемостью по толщине 24 мм (для энергии 170 кэВ), способной выявлять дефекты, размером более 0,55 мм при скорости сканирования (производительности контроля) 15 мм/с.

Следует также заметить, что увеличение эффективной энергии квантов до 280 кэВ (эффективная энергия стандартного рентгеновского аппарата РАП 300 с номинальным анодным напряжением 300 кВ, выпускаемого компанией ООО «Фотон», г. Томск) при аналогичных параметрах ОК, размерах выявляемого дефекта более 0,55 мм и контрастной чувствительности 2%, повышает скорость контроля в 2,4 раза.

Применение СЦРСТ вместо рентгенографического метода позволяет значительно увеличить производительность контроля без потерь выявляемости дефектов, что, в свою очередь, увеличивает производительность сварочных работ при монтаже и ремонте трубопроводов, а также снижает затраты как материальных, так и трудовых ресурсов. Также обеспечивается обработка цифровых рентгенограмм без геометрических искажений и с высоким контрастом, которая способна повысить производительность контроля в 3 раза.

На заключительном этапе был создан мобильный дефектоскопический комплекс для контроля трубопроводов диаметром 1020 мм, и толщиной стенки 12 мм, представленный на рис. 9. На данной рентгентелевизионной установке получены следующие характеристики:



Рис. 9. Мобильный дефектоскопический комплекс.

Табл. 5 - характеристики мобильного дефектоскопического комплекса

Параметры	Величина
Разрешающая способность, пар.лин/мм	2,6
Чувствительность, %	2
Скорость сканирования, мм/с	15,0
Анодное напряжение, кВ	220
Анодный ток, мА	5
Интенсивность излучения на расстоянии 1 м, Р/мин	9,25
Размеры фокусного пятна, мм	2*2
Частота импульсов формирования рентгеновского излучения, Гц	400
Длительность импульса, мкс	400
Ширина рабочего пучка, °	10
Число каналов линейки детекторов, шт	1024
Размеры детектора, мм	0,2*0,5*3
Тип сцинтиллятора	$CdWO_4$

В **заключении** рассмотрены перспективы применения результатов диссертационной работы и определены дальнейшие направления исследований.

В данной работе был реализован комплекс аппаратуры и программное обеспечение для цифровой радиографии сварных соединений магистральных трубопроводов, испытания которых в лабораторных и полевых условиях продемонстрировали технические возможности комплекса, превосходящие возможности аналогичных зарубежных образцов.

Приведенный пример практического применения подтверждает преимущества полученных оптимальных параметров СЦРСТ, разрабатываемых по критерию максимальной производительности контроля обеспечивающего заданную выявляемость дефекта. Соотношения, на основании которых были рассчитаны оптимальные параметры, могут быть применены при проектировании новых систем контроля цилиндрических объектов большого диаметра.

Дальнейшие исследования по расширению возможностей метода цифровой радиографии проводятся в институте в направлении расширения спектра приемников рентгеновского излучения от 50 кэВ до 10 МэВ с целью проведения контроля материалов и изделий в широком диапазоне толщин и плотностей, а также повышения чувствительности к обнаружению локальных неоднородностей до 0,7 – 1 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен аналитический обзор современного состояния и развития систем цифровой радиографии, в ходе которого выявлено, что для контроля цилиндрических объектов большого диаметра с высокой производительностью наиболее перспективными являются системы цифровой радиографии сканирующего типа.

2. Дано обоснование выбора сцинтиллятора для детектора типа «сцинтиллятор-фотодиод» для СЦРСТ с высокой производительностью контроля, способного обеспечить высокую эффективность регистрации рентгеновского излучения при заданной эффективной энергии, не приводящего к появлению нерезкости при наложении структур, «смазыванию» рентгеновского изображения и снижению контраста РИ.

3. Получено детализированное формализованное описание критерия оптимальности СЦРСТ в виде максимума производительности контроля при условии обеспечения СЦРСТ выявляемости дефектов заданных размеров.

4. Получены оптимальные значения длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и оптимальный импульсный отклик цифрового фильтра, при которых достигается максимум производительности контроля при условии обеспечения СК выявляемости дефектов заданного размера для случая, когда в СК осуществляется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения.

5. Определены значения основных параметров СЦРСТ как без учета, так и с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения. Применение цифровой фильтрации позволяет повысить максимум производительности контроля

в 3,2 раза.

6. Совокупность полученных соотношений была использована в ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» ИНК (г.Томск) при проектировании мобильного дефектоскопического комплекса для контроля трубопроводов большого диаметра (1020 мм) с толщиной стенки 12 мм для ОАО «Газпром».

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:

1. Буллер А.И., Кулешов В.К. Оптимизация параметров люминесцентных преобразователей и условий просвечивания. // Известия Томского политехнического университета, 2008 – т. 312, - № 2(приложение). (88834070). с. 106-109.

2. Москалев Ю.А., Буллер А.И., Бабилов С.А. Люминесцентные преобразователи рентгеновского излучения для медицинской и технической диагностики и систем неразрушающего контроля. // Дефектоскопия. – 2011. – №11 – С. 18 – 23.

3. Удод В.А., Клименов В.А., Буллер А.И., Усачев Е.Ю., Темник А.К. Оптимизация основных параметров многоканальных сканирующих систем цифровой радиографии. VIII Международная научная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах».

4. Буллер А.И., Бабилов С.А. Москалев Ю.А., Кулешов В.К. Исследование морфологии преобразователей излучения для медицинской диагностики и дефектоскопии. // Контроль. Диагностика. – 2011.– Специальный выпуск –С. 12 – 16.

5. Буллер А.И., Федотов Н.М., Оферкин А.И., Ларионов Д.Ю., Разумов А.Ю. Разработка ротационного рентгеновского аппарата с кольцевым штативом для оперативного создания 3D изображений сердца. // Доклады ТУСУР. – 2010. – Ч. 2 – С. 97 – 101.

6. Куликова М.В., Прокудин И.А., Буллер А.И., Косинцев В.И., Сечин А.И., Бордунов С.В. Анализ физико-химических процессов удаления солей жесткости энтальпийным методом расчеты с применением приложения excel. // Фундаментальные исследования – 2010 - №12 - с. 105-111.

7. Klimenov V. A. , Buller A. I. , Moskalev Y. A. , Chakhlov S. V. , Shteyn M. M. Mobile digital radiography system for nondestructive testing of large diameter pipelines. // Контроль. Диагностика. – 2012.– № 13 –С. 185 – 189.

8. Буллер А.И., Москалев Ю.А., Глазков А.В. Передвижной рентгеновский дефектоскоп для контроля качества сварных швов трубопроводов // Физические методы неразрушающего контроля: Труды XXIV Уральской конференции Физические методы неразрушающего контроля: Труды XXIV Уральской конференции – Екатеринбург, 6-8 апреля 2009. – Екатеринбург: СО РАН - 2009. – (11983456) – с. 39.

9. Буллер А.И., Москалев Ю.А. Применение отсеивающего раstra в дефектоскопии. // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Сборник материалов 8-ой международной конференции –

Москва, СК «Олимпийский», 18-20 марта 2009. – Москва: Издательский дом – (3496318). – 2009. с. 152-154.

10. Буллер А.И., Клименов В.А., Вавилов В.П., Авдеева Д.К., Белкин Д.С. Диагностика и неразрушающий контроль новых материалов, изделий и конструкций // Труды Международной школы-семинар для магистров, аспирантов и молодых ученых посвященной памяти профессора Хорста Герольда (Университет им. Отто-фон-Герике, Магдебург, Германия). Новые технологии, материалы и инновации в производстве. – 2009. – С. 46-54.

11. Буллер А.И., Москалев Ю.А., Кулешов В.К. Исследование динамических характеристик люминесцентных преобразователей // Томск: Изд. ТПУ, - 2009 – Т. 1. – (31220196).– с. 144-145.

12. Буллер А.И., Москалёв Ю.А., Глазков А.В., Дмитров А.А., Кулешов В.К. Рентгеновские интроскопы для контроля качества материалов и изделий // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А.Воробьева – Томск, ТПУ, 14-16 сентября 2009. – Томск: Изд. ТПУ - 2009 – т. 2. – (31212052) - с. 38-44.

13. Buller A.I., Moskalev J.A., Kuleshov V.K., Application of the Interference Research Technique of a Surface for Quality Assurance and Scintillation Crystals and microelectronics Technique //10-я Европейская Конференция по Неразрушающему Контролю и Выставке Средств НК, Москва: печатный дом «Спектр», - 2010 - ч. 2 - (978-5-904270-27-8) - с. 300-302.

14. Буллер А.И., Бабилов С.А., Москалев Ю.А. Изготовление люминесцентных преобразователей ионизирующего излучения высокого разрешения для рентгеновских интроскопов // Всероссийская научно-техническая конференция «Физические основы диагностики материалов и изделий, и приборов для ее реализации».- 2010 - ISBN 978-5-9961-0276-1 – с. 89-94.

15. Буллер А.И., Бабилов С.А., Москалев Ю.А. Влияние различных факторов на качество и характеристики люминесцентных преобразователей высокого разрешения для рентгеновских интроскопов изготовленных экспериментальным путем // II Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений» 23-25 ноября 2010 года, - г. Томск, ТПУ - 2010. – с. 69-71.

16. Буллер А.И., Оферкин А.И., Жарый С.В., Федотов Н.М., Петш А.И., Гушин И.В. Трехмерная ротационная атрио-вентрикулография при катетерной аблации аритмий. // Материалы Третьего Всероссийского съезда аритмологов - Анналы аритмологии. – 2009. – № 2.,- с.137-147.