

РАДИАЦИОННЫЙ ИНТРОСКОП НА ОСНОВЕ ПЗС-КАМЕРЫ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЭНЕРГИЙ ИЗЛУЧЕНИЙ ДО 10 МэВ

Проведены исследования радиационного интроскопа на основе ПЗС – камеры и экранов – преобразователей CsI(Tl) при неразрушающем контроле различных объектов в диапазоне энергий до 10 МэВ.

Проблема создания высокоэффективных радиационных интроскопов для широкого диапазона энергий излучения обусловлена, прежде всего, проблемами регистрации излучения и преобразования его в видимое изображение с последующей цифровой обработкой. При этом основная сложность решаемой задачи заключается в высокой проникающей способности излучения с энергией до 10 МэВ. Поскольку, с одной стороны, необходимо обеспечить просвечивание и выявление дефектов в объектах большой толщины, а с другой стороны - прошедшее через объект контроля излучение необходимо эффективно зарегистрировать в преобразователе излучения – экране, относительно небольшой толщины.

В большинстве существующих и разрабатываемых интроскопах используется классическая схема (рис.1) компоновки: люминесцентный экран - преобразователь излучения – поворотное зеркало - объектив - ПЗС-камера - процессор - компьютер с программным обеспечением.

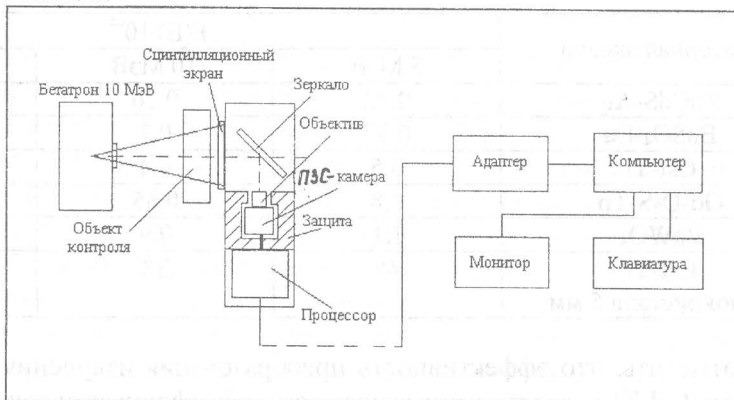


Рис. 1. Схема интроскопа на основе ПЗС – камеры

Поскольку излучение с энергией до 10 МэВ обладает высокой проникающей способностью и создает весьма слабый радиационный контраст, разработка интроскопов с цифровой обработкой изображений с высокой контрастной чувствительностью является достаточно сложной научной и технической задачей. При этом для успешного решения этой задачи все элементы интроскопа должны обеспечивать достижение максимальных значений эффективности регистрации излучения, снижения фона рассеянного излучения и повышения радиационного и светового контраста изображения.

Условно в интроскопах можно выделить два основных блока – рентгеночувствительный (X-Ray Detector/Image) и блок обработки изображений. Первый находится в поле излучения и включает в себя сцинтилляционный экран-преобразователь, зеркало, объектив, ПЗС-камеру в защите и процессор. Второй находится в радиационно безопасном помещении и включает в себя адаптер и компьютер с программным обеспечением.

В настоящее время для преобразования излучений с высокой энергией используется три вида экранов: сцинтилляционные экраны на основе монокристаллического

CsI(Tl), поликристаллические люминесцентные экраны из фосфоров различного состава и волоконные экраны из люминесцирующего стекла с добавлением тербия. Однако по данным работы [1] волоконные экраны не имеют преимуществ перед другими типами экранов при энергиях излучения свыше 1 МэВ и, кроме того, кванты излучения с высокой энергией вызывают радиационное повреждение скинтилляционного материала волокон.

Для определения эффективности применения экранов различного состава для преобразования излучения высокой энергии был проведен расчет доли энергии кванта излучения, поглощаемой люминесцентным экраном $F(E)$. Расчет проведен по методике работы [2]. При расчете толщина фосфорных экранов принималась равной 500 мкм. Толщина монокристаллического экрана CsI-Tl была равна 5 мм. Результаты приведены в табл. 1.

Из данных таблицы следует, что среди фосфорных экранов наиболее эффективными по поглощению излучения являются составы CsI-Tl, Gd_2O_2S-Tb и $PbWO_4$, при этом в диапазоне 5-20 МэВ поглощенная энергия излучения в $PbWO_4$ в 2 раза больше, чем в CsI-Tl. Однако учитывая, что фосфор $PbWO_4$ находится еще в стадии разработки и не имеет высокой эффективности преобразования поглощенной энергии в кванты люминесценции реально применяемыми на сегодняшний день являются экраны из Cs-Tl и Gd_2O_2S-Tb .

Таблица 1
Эффективность преобразования излучения экранами различного состава

Материал экрана	$F(E) \cdot 10^{-4}$		
	5 МэВ	10 МэВ	20 МэВ
ZnCdS-Ag	0,32	0,26	0,2
BaSO ₄ -Eu	0,37	0,3	0,22
CsI-Tl	0,5	0,4	0,3
Gd_2O_2S-Tb	0,8	0,65	0,5
$PbWO_4$	1,1	0,9	0,7
CsI-Tl монокристалл 5 мм	46	38	29

Следует отметить, что эффективность преобразования излучения монокристаллическим экраном CsI-Tl в десятки раз выше, чем у фосфорных экранов, даже при использовании подложек из тяжелых металлов - вольфрама и тантала. Поэтому максимальные значения контрастной чувствительности и отношения сигнал/шум в настоящее время достигаются в интроскопах с использованием монокристаллических экранов. Применение фосфорных экранов с подложками из тяжелых металлов имеет преимущество при контроле крупногабаритных объектов, поскольку экраны из монокристалла CsI-Tl технологически трудно изготовить больше, чем 200 мм в диаметре. В данной работе при создании интроскопа использовались монокристаллические экраны CsI-Tl толщиной 5 мм и диаметром 200 мм, а также поликристаллические экраны из CsI-Tl размером $200 \times 400 \text{ мм}^2$ с подложкой из свинца толщиной 1 мм.

Для получения максимально контрастных изображений и низкого фонового уровня рассеянного рентгеновского излучения при разработке радиационно чувствительного блока были использованы следующие технические решения. Зеркало представляет собой слой алюминия, напыленный на пластиковую подложку. Был применен объектив 'Avenir' 75/1.3. ПЗС-камера защищена слоем свинца толщиной 20 мм. Контроллер камеры смонтирован внутри рентгеночувствительного блока. Фоточувствительный массив сенсора состоит из 1160×1040 пикселей размером $16 \times 16 \text{ мкм}$. Сенсор установлен

внутри газонаполненного корпуса, охлаждаемого холодильником Пельтье, что позволяет поддерживать температуру -35°C . Это позволяет уменьшить внутренние шумы сенсора и повысить время накопления до 15 минут, что особенно важно при контроле объектов большой толщины и плотности. Контроллер устанавливает режим накопления, необходимый для слабоконтрастных изображений, поддерживает оптимальную температуру сенсора, считывает накопленный заряд и передает сигнал адаптеру через двадцатиметровый кабель. Адаптер последовательно принимает аналоговый сигнал, преобразует его в 12-битный код и обеспечивает ввод данных в компьютер через параллельный порт, работающий в режиме EPP. Контроль процесса сканирования, так же, как обработка и сохранение изображений происходит при использовании программного обеспечения Diada 2.3.

В результате экспериментов, в ходе которых стальная плита толщиной 50 мм была просвечена излучением бетатрона на 10 МэВ установлено, что использование интроскопа с монокристаллом CsI-Tl толщиной 5 мм позволяет обнаружить канавку глубиной 0,2 мм в канавчатом эталоне № 2 по ГОСТ 7512-82. Канавки глубиной 0,4 и 1,0 мм выявляются при просвечивании стальных плит толщиной 100 и 150 мм соответственно. Это означает, что чувствительность интроскопа меняется от 0,4 до 0,7 % при изменении толщин объектов контроля от 50 до 150 мм.

Использование интроскопа с поликристаллическим экраном из CsI-Tl толщиной 0,4 мм в сочетании со свинцовым фильтром толщиной 1 мм дает контрастную чувствительность в 1 % при толщине стального изделия 100 мм, при использовании канавчатых эталонов.

Таким образом, применение интроскопа может полностью заменить рентгеновскую пленку при контроле качества изделий большой толщины.

Для неразрушающего контроля качества в диапазоне энергий рентгеновского излучения 40-300 кВ в НИИ ИН при ТПУ разработан ряд интроскопов, специализированных по видам объектов контроля. В частности, разработаны интроскопы для контроля качества стального и титанового литья, сварных швов газовых баллонов, насосно-компрессорных, обсадных и буровых труб, а также для контроля сварных швов трубопроводов. Конструктивно интроскопы разработаны на основе экранов CsI-Tl диаметром от 80 до 200 мм и камер с ПЗС матрицами, что обеспечивает их высокую надежность и позволяет применять их как в цеховых, так и в полевых условиях.

В НИИ ИН при ТПУ также разработан рентгеновский дефектоскопический комплекс, предназначенный для оперативного контроля качества и технической диагностики основной номенклатуры особо ответственных объектов нефтегазодобывающей отрасли. Он позволяет непосредственно на месте проведения сварочных и других технологических работ обнаруживать дефекты, отмечать их местоположение и производить повторный контроль после ремонта и восстановления нефтедобывающего оборудования.

Дефектоскопический комплекс представляет собой рентгенотелевизионную установку, смонтированную на базе автомобиля. Установка состоит из трех частей: выносного рентгеночувствительного блока (РЧБ); блока визуализации, обработки и хранения изображений (БВИ); механизма крепления и перемещения (МКП).

РЧБ дефектоскопа состоит из монокристаллического экрана CsI-Tl толщиной 3 мм и диаметром 150 мм, поворотного зеркала и широкоугольного объектива со светосилой 1,2 и телевизионной камеры. Монокристаллический экран предназначен для преобразования рентгеновского излучения в видимое изображение. Поворотное зеркало с внешним напылением отражающего слоя устанавливается под углом 45° к монокристаллу и объективу и служит для исключения попадания рентгеновского излучения на

оптические и электронные элементы телевизионной аппаратуры. Объектив предназначен для фокусировки светового изображения с монокристаллического экрана на входное окно телевизионной передающей камеры. Корпус РЧБ обеспечивает защиту аппаратуры от внешних климатических факторов. Длина кабеля между РЧБ и БВИ составляет 20 м.

Принцип работы дефектоскопа основан на преобразовании энергии рентгеновского излучения при облучении объекта контроля в видимое изображение на экране-преобразователе РЧБ. Дефектоскоп работает совместно с рентгеновским аппаратом любого типа.

Просвечивание сварного шва осуществляется при пошаговом перемещении рентгеновского аппарата и РЧБ, которые закрепляются на контролируемой трубе. Изображение сварного шва наблюдается оператором на экране видеомонитора. Регистрация результатов контроля производится с помощью компьютера, входящего в комплект БВИ. Цифровой видеопроцессор в составе БВИ предназначен для оцифровки и усреднения сигнала от 4 до 256 кадров телевизионного изображения. Это позволяет отфильтровать нерегулярные помехи и повысить отношение сигнал/шум.

Преобразованный в аналоговую форму обработанный видеосигнал с видеопроцессора поступает на видеомонитор, на котором оператором производится визуальный анализ изображения сварного шва и делается заключение о его качестве. При необходимости производится документирование результатов контроля путем записи изображений при помощи компьютера на цифровой носитель.

Все составные части дефектоскопа, кроме РЧБ, смонтированы на специальной аппаратурной стойке, которая устанавливается в салоне автомобиля. РЧБ с комплектом соединительных кабелей при транспортировке также закрепляется в салоне автомобиля.

Источником питания комплекса является автомобильная аккумуляторная батарея напряжением 12 В.

В качестве источника излучения используются переносные импульсные рентгеновские аппараты типа АРИНА, РАДАН или другие подобного класса. Данные рентгеновские аппараты, при массе до 7 кг, генерируют импульсный поток рентгеновского излучения с напряжением до 250 кВ и обеспечивают возможность контроля качества трубопроводов с толщиной двух стенок до 30 мм стали. Для проведения контроля качества сварных швов автомобиль с дефектоскопом располагается на расстоянии 20-30 м от места контроля трубопровода. На трубе помещается МКП, на котором, в свою очередь, устанавливается рентгеновский аппарат и РЧБ дефектоскопа. При включении рентгеновского аппарата в РЧБ установки формируется рентгеновское изображение сварного шва, которое через 10-20 секунд преобразуется в рентгенограмму на мониторе, установленном в салоне автомобиля.

Рентгенограмма анализируется оператором, определяется наличие дефектов и качество сварного шва. После окончания экспозиции, длительность которой составляет 5-15 секунд, с помощью механизма перемещения устанавливается следующий участок контролируемого сварного шва. За одну экспозицию контролируется шов длиной 90-150 мм для труб различного диаметра. РЧБ дефектоскопа работоспособен в диапазоне температур $(-20...+40)^{\circ}\text{C}$.

Эксплуатация дефектоскопа в условиях сибирских нефтегазовых предприятий показала его высокую надежность и удобство в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cliff Bueno and Marlon D. Baker. High-resolution digital radiography and three-dimensional computed tomography.

УДК 519.272

А.К. ТЕМНИК, Е.В. МОСКВИТИН, Е.Ю. УСАЧЕВ

ЦИФРОВОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕНЕВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В работе рассмотрены теоретические предпосылки, позволяющие определить необходимое число уровней квантования исходного изображения внутренней структуры контролируемого изделия с целью минимизации искажения исходной информации.

Проблема формирования полутонового изображения состоит из оценки распределения интенсивности светового излучения за объектом F . Эта оценка \bar{F} называется восстановлением изображения. Если не учитывать влияние записи изображения на монитор, то проблема восстановления изображения сводится к решению интегрального уравнения вида

$$g(x, y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} h(x-x_1, y-y_1) \cdot F(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (1)$$

относительно функции F .

Однако аналитическое решение данного уравнения связано с большими математическими допущениями. Принимая за предпосылку лемму Римана-Леберга, имеем, что сколь угодно малое возмущение g в левой части уравнения (1) приводит к сколь угодно большой погрешности при определении функции F .

Цифровое восстановление изображения формируется как решение уравнения, представляющего собой дискретную аппроксимацию уравнения (1).

Дискретная аппроксимация этих уравнений требует использования квадратурных методов, позаимствованных из численного анализа. В начале нужно взять отсчеты входящих в (1) функций с шагом, равным интервалу Найквиста, а затем применить квадратурный метод. Простейшим представлением уравнения (1), для его аппроксимации квадратурным методом, является метод прямоугольников, отсюда следует:

$$g(j\Delta x, k\Delta y) \cong \sum_{n=a_2}^{b_2} \sum_{m=a_1}^{b_1} h[(j-m)\Delta x, (k-n)\Delta y] \cdot F(j\Delta x, k), \quad (2)$$

где $a_i, b_i, i = 1, 2$ - размеры изображения.

Дискретизированное изображение $g(i, k)$ создается совокупностью отсчетов, образующих матрицу из $N \times N$ элементов, причем каждый элемент квантован на 2^R уровней, где $R = 12$. Для представления всего дискретизованного изображения требуется $N^2 R$ бит.

Сформируем вектор-столбец из N^2 элементов, образуемый в результате построчного упорядочивания матрицы-изображения $g(i, k)$, т.е. первые N элементов вектора g образуются первой строкой этой матрицы, элементы с $N+1$ по gN вектора – второй строкой и т.д. В этом случае сумма (2) может быть представлена как матричное произведение. Элементы матрицы, соответствующие коэффициентам h, b (2) в надлежащем порядке умножаются на элементы вектора F , полученного упорядочиванием матрицы F . Таким образом, (2) в матричной форме имеет вид