

# ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЗС-КАМЕР И РЕНТГЕНОВСКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ

Н. Г. БЕЛЫЙ, С. В. ДЕНЬНОВЕЦКИЙ, А. В. ЛЕЩИШИН, С. Р. МИХАЙЛОВ, Н. В. СЛОБОДЯН, В. А. ТРОИЦКИЙ

*Приведены теоретические и экспериментальные исследования рентгентелевизионных систем на основе рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl) и телевизионных камер с использованием высокочувствительных ПЗС-матриц с микролинзовым массивом на поверхности (матрицы EXview HAD) фирмы «Sony».*

*Given are the theoretical and experimental studies of X-ray TV systems based on X-ray single-crystal screen from CsI (Tl) material and TV cameras using highly-sensitive CCD matrices with a microlens array on the surface (EXview HAD matrices) of Sony Company.*

Рентгентелевизионные системы (РТВС) широко применяются для неразрушающего контроля качества материалов и изделий в промышленности. В настоящее время наиболее распространены РТВС с промежуточным преобразованием теневого рентгеновского изображения в оптическое с помощью рентгеновских экранов или рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП), а также РТВС на основе рентгеновидикона [1, 2]. РТВС с рентгеновскими экранами имеют ряд преимуществ перед РТВС на основе РЭОП: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость и др. Однако из-за низкой яркости свечения экранов в телевизионных камерах таких РТВС используются высокочувствительные преобразователи свет–сигнал. Так, в прикладной телевизионной установке «Интроскоп» используется высокочувствительная передающая электронно-лучевая трубка изокон ЛИ-801, а в ПТУ-84 — супервидикон ЛИ-702. В последние годы в качестве преобразователей свет–сигнал в РТВС, выполненных главным образом на основе РЭОП, все шире используются ПЗС-матрицы. Этому способствуют известные преимущества ПЗС-матриц перед передающими трубками (минимальные геометрические искажения за счет фиксированной геометрии раstra, отсутствие инерционности, большой срок службы и др.). В последние годы фирмой «Sony» разработана серия ПЗС-матриц, в которой высокая чувствительность, соизмеримая с чувствительностью изокона и супервидикона, достигается за счет микролинзового массива на поверхности матрицы (так называемые матрицы EXview HAD CCD). Поэтому актуальны теоретические и экспериментальные исследования воз-

можности применения телевизионных камер на таких матрицах в РТВС на основе распространенного рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl), а также определение относительной чувствительности контроля таких РТВС.

**Методика расчета относительной чувствительности.** Относительная чувствительность контроля РТВС определяет наименьший в направлении просвечивания относительный размер дефекта просвечиваемого объекта, который может быть выявлен оператором с помощью данной системы. Возможность выявления на фоне рентгеновского изображения объекта дефектов с теми или иными относительными размерами в направлении просвечивания зависит от контраста изображения дефекта, отношения сигнал/шум, которое обеспечивает система на выходе, соотношения разрешающей способности системы и поперечного размера дефекта, а также от характеристик зрительного анализатора человека (оператора) [3]. Предельные размеры дефекта в направлении просвечивания  $\Delta H_{1por}$  при которых он еще может быть обнаружен с некоторой вероятностью, определяются из условия:

$$k_B = k_{por}, \quad (1)$$

где  $k_B$  — яркостный контраст изображения дефекта;  $k_{por}$  — соответствующий пороговый контраст, связанный с уровнем шумов, который определяется значением порогового отношения сигнал/шум  $\psi_{por}$  и свойствами зрительного анализатора человека.

В соответствии с принципами, изложенными в [3], для случая РТВС с рентгеноэлектрическим преобразователем, состоящим из рентгеновского экрана и ПЗС-матрицы, можно записать:



$$k_B = K_S M(v). \quad (2)$$

Здесь  $K_S$  — значение зарядового контраста изображения;  $M(v)$  — пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) рентгеноэлектрического преобразователя;  $v$  — пространственная частота, соответствующая поперечным размерам дефекта.

В свою очередь

$$k_{por} = \sqrt{k_b^2 + k_v^2}, \quad (3)$$

где  $k_v$  — пороговый контраст зрительного анализатора;  $k_b$  — компонент порогового контраста, обусловленный шумом на изображении.

При вычислении  $k_b$  необходимо учесть путем деления на соответствующие коэффициенты уменьшение порогового отношения сигнал/шум вследствие интегрирования зрительным анализатором в пространстве и во времени [4]:

$$k_b = \frac{\Psi_{por}}{\sqrt{(T_i/T_{EX})(\Omega/A_{CCD})}} M(v) K_N. \quad (4)$$

Здесь  $K_N$  — относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы за время накопления;  $T_i$  — время интегрирования зрительным анализатором;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления;  $\Omega$  — площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы;  $A_{CCD}$  — площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы.

Для упрощения процедуры оценок в данной работе принято допускать, что характеристики изображения дефекта на экране видеоконтрольного устройства (яркостный и пороговый контрасты, отношение сигнала к шуму, пространственно-частотный спектр изображения) определяются исключительно характеристиками выходного сигнала рентгеноэлектрического преобразователя.

Выходной сигнал рентгеноэлектрического преобразователя на основе ПЗС-матрицы определяется электрическим зарядом  $Q$ , накапливаемым в светочувствительном элементе матрицы за время накопления, либо соответствующим ему количеством электронов  $Q/q$ , где  $q$  — заряд электрона. Значения фонового сигнала, соответствующего бездефектным участкам просвечиваемого образца толщиной  $H_1$ , можно определить как  $Q_\phi/q = Q(H_1)/q$ , а разностного полезного сигнала, соответствующего локальному утолщению (углублению) высотой (глубиной)  $\Delta H_1$  как:

$$\frac{Q_S}{q} = \pm \frac{Q(H_1 \pm \Delta H_1)}{q} \mp \frac{Q(H_1)}{q}. \quad (5)$$

Таким образом, зарядовый контраст сигнала от дефекта может быть выражен отношением

$$K_S = \frac{Q_S/q}{Q_\phi/q}. \quad (6)$$

Если принять во внимание, что наиболее совершенные из современных ПЗС-матриц характеризуются чрезвычайно низким уровнем собственных шумов [5], то уровень шумов количества накопленных электронов  $n_N$  определится квантовым шумом, связанным с флуктуациями светового потока, который, в соответствии с [6, 7], можно выразить следующим образом:

$$n_N = \sqrt{Q_\phi/q}. \quad (7)$$

Тогда относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента за время накопления будет:

$$K_N = \frac{n_N}{Q_\phi/q} = \frac{1}{\sqrt{Q_\phi/q}}. \quad (8)$$

Таким образом, для определения минимального размера дефекта, который может быть обнаружен РТВС, целесообразно рассчитать в соответствии с (1)–(8) зависимости яркостного и порогового контрастов от размера дефекта. Тогда точка пересечения этих зависимостей определит минимальный размер дефекта и соответственно относительную чувствительность РТВС [3].

В основу используемой ниже математической модели преобразования сигналов в рентгеноэлектрическом преобразователе на основе рентгеновского экрана CsI(Tl) и ПЗС-матрицы положены результаты математического моделирования процесса формирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта [8], физические принципы функционирования сцинтилляционных преобразователей излучения [9] и приборов с зарядовой связью [6, 7].

На основании сформированной таким образом математической модели можно записать выражения для количества накопленных в элементарной ячейке ПЗС-матрицы электронов, которые соответствуют разностному сигналу от дефекта в просвечиваемом объекте  $Q_S(H_1, \Delta H_1)/q$  (т. е. полезному сигналу) и сигналу от бездефектного участка объекта  $Q_\phi(H_1)/q$  (фоновому сигналу):

$$\frac{Q_S(H_1, \Delta H_1)}{q} = K_{opt} N_k T_{EX} A_{CCD} \times$$

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{hc} \times \frac{C_{ef}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{nS}(\lambda) d\lambda}$$



$$\int_0^{E_{\max}} N_0(E) \exp[-\mu_1(E)H_1] (1 - \exp[-\mu_1(E)\Delta H_1]) \times \\ \times (1 - \exp[-\mu_S(E)H_S]) EdE, \quad (9)$$

$$\frac{Q_\Phi(H_1)}{q} = K_{opt} N_k T_{EX} A_{CCD} \frac{C_{ef}}{hc} B(E_{\max}) \times \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{ns}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda \\ \times \frac{\lambda_1}{+\infty} \times \\ \int_{-\infty}^{\lambda_1} \varphi_{ns}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$\int_0^{E_{\max}} N_0(E) \exp[-\mu_1(E)H_1] \exp[-\mu_S(E)H_S] EdE,$$

где энергетический спектр плотности потока рентгеновских квантов

$$N_0(E) = \frac{k_1 I_A Z(E_{\max} - E)}{r^2 E} \times \\ \times \exp \left[ -\frac{\mu_m(E) \text{ctg} \Theta}{\rho_m C_{TB}(E_{\max})} (E_{\max}^2 - E^2) - \mu_0(E) H_0 \right], \quad (11)$$

$k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$  квант/А с·кэВ;  $Z$  — атомный номер материала анода;  $E$  — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ;  $E_{\max}$  — максимальная энергия квантов, кэВ (численно равная напряжению на аноде рентгеновской трубки  $U_A$ , кВ);  $I_A$  — анодный ток, А;  $r$  — расстояние от анода трубки до объекта, см;  $H_0, H_S$  — толщины выходного окна рентгеновской трубки и монокристаллического экрана, см;  $\mu_m(E), \mu_0(E)$  и  $\mu_1(E)$  — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения материалов анода, окна рентгеновской трубки и контролируемого образца,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\mu_S(E)$  — линейный коэффициент истинного поглощения материала монокристаллического экрана,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\rho_m$  — плотность материала анода,  $\text{г/см}^3$ ;  $\Theta$  — угол наклона анода;  $C_{TB}(E_{\max})$  — константа Томсона-Виддингтона;  $B(E_{\max})$  — фактор накопления рассеянного излучения, который зависит от ускоряющего напряжения рентгеновской трубки, материала объекта и его толщины;  $K_{opt}$  — коэффициент передачи оптической системы;  $N_k$  — количество кадров накопления;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления, с;  $C_{ef}$  — конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического сцинтилляционного экрана;  $\lambda$  — длина волны оптического излучения, см;  $F(\lambda)$  — зависимость квантовой эффективности ПЗС-матрицы от длины волны оптического излучения;  $\varphi_{ns}(\lambda)$  — нормированная спектральная ха-

рактеристика излучения монокристаллического экрана;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  ограничивают диапазон длин волн, в котором произведение характеристик  $\varphi_{ns}(\lambda)$  и  $F(\lambda)$  не равно нулю;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света.

**Теоретические и экспериментальные исследования.** Для теоретических и экспериментальных исследований были выбраны две телевизионные камеры на основе наиболее высокочувствительных EXview HAD ПЗС-матриц фирмы «SONY» формата 1/2" (размер диагонали 8 мм) с количеством активных светочувствительных элементов 752×582 [10, 11]. Одна из камер типа КТ-62.013 разработана ОКБ «ТЕКОН-ЭЛЕКТРОН» ОАО «КОНЦЕРН-ЭЛЕКТРОН» (г. Львов) на основе матрицы ICX-249AL [12]. Вторая камера типа VSC-746 производится ЗАО ЭВС (Санкт-Петербург, Россия) на основе матрицы ICX-429ALL [13]. Параметры ПЗС-матриц ICX-249AL и ICX-429ALL примерно одинаковы. Обе камеры работали в вещательном стандарте разложения изображения (625 строк, 25 кадров в сек., развертка чересстрочная). Камера КТ-62.013, наряду с вещательным стандартом разложения, имела возможность работы в режиме регулируемой длительности накопления изображения на матрице (до 32-х кадров) и в режиме накопления четырех соседних элементов. Камера КТ-62.013 снабжена объективом типа Xenoplan фирмы «Schneider Kreuznach» с относительным отверстием 1:1.7 и фокусным расстоянием 17 мм, а камера VSC-746 — объективом типа Computar H1214 с относительным отверстием 1:1.4 и фокусным расстоянием 12 мм.

В экспериментальных исследованиях использовали рентгеновский аппарат РАП-150/300 с трубкой 1,2-ЗБПМ5-300, имеющей вольфрамовый анод с углом наклона  $\Theta = 19^\circ$  и выходное бериллиевое окно толщиной 4 мм [14]. В качестве контролируемых объектов использовали соединенные методом сварки стальные пластины толщиной  $H_{kz} = 10, 20$  и 30 мм. Для преобразования теневого рентгеновского изображения в оптическое применялся монокристаллический экран из материала CsI(Tl) диаметром 200 мм и толщиной 4 мм. Для переноса изображения с экрана на вход телевизионных камер использовали угловую оптическую приставку с зеркалом. Коэффициент уменьшения изображения при переносе изображения с экрана на ПЗС-матрицу составлял  $\delta = 21,5$  для камеры КТ-62.013 и  $\delta = 30,4$  для камеры VSC-746. Измерения относительной чувствительности контроля проводили с помощью соответствующих ГОСТ 7512-82 канавочных (Fe-1, Fe-2) и проволочных (Fe-2, Fe-3) эталонов чувствительности [15]. Сварные соединения стальных пластин с эталонами для измерения чувствительности контроля размещали в непосредственной близости к монокрис-



таллическому экрану. Расстояние между анодом рентгеновской трубки и монокристаллическим экраном составляло 400 мм.

При расчете относительной чувствительности контроля с помощью приведенной в математической модели справочные данные по энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления для W (материала анода рентгеновской трубки), Be (материала выходного окна рентгеновской трубки), Fe (материала контролируемых объектов) и массовых коэффициентов истинного поглощения для Cs и I (элементов монокристаллического экрана) взяты из работы [16]. При этом массовый коэффициент истинного поглощения CsI(Tl) рассчитывали по формуле для сложных соединений путем сложения произведений массовых доль каждого элемента соединения и его массового коэффициента истинного поглощения. Линейные коэффициенты ослабления и истинного поглощения  $\mu_m(E)$ ,  $\mu_0(E)$ ,  $\mu_1(E)$  и  $\mu_s(E)$  получали умножением массовых коэффициентов на плотность соответствующих материалов.

Коэффициент передачи оптической системы камер определяли как

$$K_{opt} = \xi \frac{K_{pr}}{4D^2}, \quad (12)$$

где  $K_{pr} = 0,85$  — коэффициент пропускания объектива; диафрагма объектива  $D = 1,7$  для камеры КТ-62.013 и  $D = 1,4$  для камеры VSC-746;  $\xi = 0,7$  — коэффициент потерь оптической системы.

Таким образом,  $K_{opt} = 0,05$  для камеры КТ-62.013 и  $K_{opt} = 0,075$  для камеры VSC-746. Площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы  $A_{CCD} = L_{py} \times L_{pz} = 0,71 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; конверсионная эффективность сцинтиллятора CsI(Tl)  $C_{ef} = 0,06$  [9]. Нормированная спектральная зависимость излучения сцинтиллятора CsI(Tl)  $\varphi_{ns}(\lambda)$  взята из работы [9]. Фактор накопления рассеянного излучения  $B(E_{max})$ , который учитывается при вычислении фонового сигнала, в соответствии с работой [8] определяли по формуле:  $B(H_1, E_{max}) = 1 + 0,013(E_{max}H_1)^{0,8}$ . Толщина объекта для случая использования проволочных эталонов равна толщине контролируемого образца:  $H_1 = H_{kz}$ , а размер дефекта — диаметру эталонной проволоки:  $\Delta H_1 = d$ . Для случая использования канавочного эталона толщина объекта равна сумме толщин контролируемого образца и эталона:  $H_1 = H_{kz} + h_e$ , а размер дефекта — глубине канавки, значение которой берется с противоположным знаком:  $\Delta H_1 = -h_k$ . Пространственную частоту дефекта определяет ширина канавки  $b$ . Площадь дефекта  $\Omega$ , приведенная к поверхности ПЗС-матрицы, определяли как  $\Omega = b^2/\delta^2$  и  $\Omega = d^2/\delta^2$  при использовании

канавочных и проволочных эталонов соответственно.

Как показало сопоставление ПЧХ ПЗС-матриц ICX-429ALL и ICX-249AL (оцененной в соответствии с работой [6]) с одной стороны, и пространственных частот использованных эталонных проволок и канавок (оценки выполнены в соответствии с работой [3]) с другой, эффект пространственной фильтрации в данных условиях несущественен ( $M(v)$  не опускается ниже 95 %) и в настоящих вычислениях не принимался во внимание.

Время интегрирования зрительным анализатором принимали равным  $T_i = 0,1 \text{ с}$ , значение порогового зрительного контраста  $k_v = 2 \%$ , а пороговое отношение сигнал/шум  $\psi_{por} = 3$  [3, 17].

**Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований.** Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице для камеры КТ-62.013 и камеры VSC-746. В таблице указаны ускоряющее напряжение рентгеновской трубки  $U_A$ , толщина контролируемого стального объекта  $H_{kz}$  и количество кадров накопления ПЗС-камеры  $N_k$ . Анодный ток рентгеновской трубки поддерживался постоянным и составлял 10 мА. Результаты измерений представлены указанием номера наименьшей по глубине обнаруженной канавки (в скобках указаны номера канавок, которые намечались) и наименьшей по диаметру обнаруженной проволоки, с обозначением типов соответствующих эталонов (Fe-1, Fe-2 или Fe-3), а также экспериментальными значениями относительной чувствительности контроля  $K_k$  и  $K_d$ . Для сравнения в таблице представлены значения  $K_k$  и  $K_d$ , вычисленные с помощью математической модели, описанной ранее.

Из таблицы видно, что при работе камеры КТ-62.013 в вещательном стандарте разложения наилучшая относительная чувствительность по канавочному эталону составляет  $K_k = 3,3 \%$  для толщины объекта  $H_{kz} = 10 \text{ мм}$ ,  $K_k = 2,1 \%$  для толщины  $H_{kz} = 20 \text{ мм}$  и  $K_k = 2,9 \%$  для толщины  $H_{kz} = 30 \text{ мм}$ . Перевод камеры КТ-62.013 в режим накопления телевизионных кадров значительно улучшает относительную чувствительность контроля. Так, накопление 32-х кадров для толщин  $H_{kz} = 10 \text{ мм}$  и  $H_{kz} = 30 \text{ мм}$  улучшает чувствительность приблизительно в два раза (с 3,3 в п. 1 до 1,7 % в п. 3 и с 2,9 в п. 6 до 1,5 % в п. 7). Для толщины  $H_{kz} = 20 \text{ мм}$  чувствительность по проволочному эталону при накоплении 32-х кадров увеличилась в 2,5 раза (см. п. 4 и 5). Для этой толщины при накоплении 32-х кадров чувствительность по канавочному эталону составляла менее 2 % (наблюдались все канавки эталона Fe-2), т. е. в п. 5 измерение чувствительности следовало бы проводить по эталону Fe-1. Накопления четырех соседних элементов позволяет улучшить

Номер	$U_A$ , кВ	$H_{kz}$ , мм	$N_k$	Канавочный эталон			Проволочный эталон		
				Номер канавки и тип эталона	$K_k$ , % (эксп.)	$K_k$ , % (выч.)	Номер проволоки и тип эталона	$K_d$ , % (эксп.)	$K_d$ , % (выч.)
КТ-62-013									
1	130	10	1	3 Fe-1	3,3	1,67	—	—	—
2	160	10	1	3 Fe-1	3,3	1,67	—	—	—
3	160	10	32	5 Fe-1	1,67	1,67	2 Fe-2	3,2	3,2
4	180	20	1	6 Fe-2	2,1	2,1	2 Fe-3	5	2
5	180	20	32	6 Fe-2	2,1	2,1	6 Fe-3	2	1,6
6	200	30	1	3 Fe-2 (4 Fe-2)	3,68 (2,9)	1,47	—	—	—
7	200	30	32	6 Fe-2	1,47	1,47	4 Fe-3	2,1	1,67
VSC-746									
1	130	10	1	4 Fe-1 (5 Fe-1)	2,5 (1,67)	2,5	—	—	—
2	140	10	1	4 Fe-1 (5 Fe-1)	2,5 (1,67)	1,67	—	—	—
3	160	10	1	5 Fe-1	1,67	1,67	—	—	—
4	160	20	1	2 Fe-1 (6 Fe-2)	2,27 (2,1)	2,27 (2,1)	—	—	—
5	180	20	1	3 Fe-1 (6 Fe-2)	1,8 (2,1)	1,8 (2,1)	3 Fe-3	4	2,5
6	200	20	1	2 Fe-1	2,27	1,8	4 Fe-3	3,15	2,5
7	200	30	1	6 Fe-2	1,47	1,47	—	—	—

чувствительность по канавочному эталону в 1,3 раза, однако режим накопления элементов уменьшает разрешающую способность системы (в ряде случаев проволочный эталон на изображении вообще не наблюдался).

Данные таблицы свидетельствуют, что камера VSC-746, которая может работать лишь в вещательном стандарте разложения, обеспечивает наилучшую относительную чувствительность по канавочному эталону  $K_k = 1,7\%$  для толщины объекта  $H_{kz} = 10$  мм,  $K_k = 1,8\%$  для толщины  $H_{kz} = 20$  мм и  $K_k = 1,5\%$  для толщины  $H_{kz} = 30$  мм. По проволочному эталону наилучшая чувствительность для толщины  $H_{kz} = 20$  мм составила 3,2 %.

Таким образом, камера VSC-746 показала относительную чувствительность, которая в 2 раза превысила аналогичный параметр для камеры КТ-62.013 в вещательном стандарте разложения, и, фактически, достигла показателей камеры КТ-62.013 при ее работе в режиме накопления 32-х кадров. Это обусловлено наличием у камеры VSC-746 более светосильного объектива, а также эффективной автоматической регулировки усиления (АРУ) с глубиной регулировки 32 дБ и автоматическим смещением уровня черного.

Для теоретического расчета относительной чувствительности в соответствии с формулами (1)–(12) вычисляли зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы и порогового контраста от размера дефекта для тех же условий, для которых осуществлялись эксперименты, с использованием параметров камер КТ-62.013 и VSC-746.

Графики рассчитанных зависимостей представлены на рис. 1 и рис. 2 для камер КТ-62.013 и VSC-746 соответственно. На рисунках на шкале толщин отмечены размеры, соответствующие эталонам.

Зависимости, приведенные на рис. 1, а, соответствуют:

канавочному эталону Fe-1: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 130$  кВ, 1' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ, 2' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 2'' — при  $N_k = 32$ ;

рис. 1, б — канавочному эталону Fe-2: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ; 1' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 1'' — при  $N_k = 32$ ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ, 2' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 2'' — при  $N_k = 32$ ;

рис. 1, в — проволочным эталонам: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ, 1' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 32$ ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ, 2' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 2'' — при  $N_k = 32$ ; 3 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ, 3' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 3'' — при  $N_k = 32$ .

Зависимости, приведенные на рис. 2, а, соответствуют канавочному эталону Fe-1: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 130$  кВ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 140$  кВ; 3 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ; 4 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 160$  кВ; 5 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ; 6 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 200$  кВ;

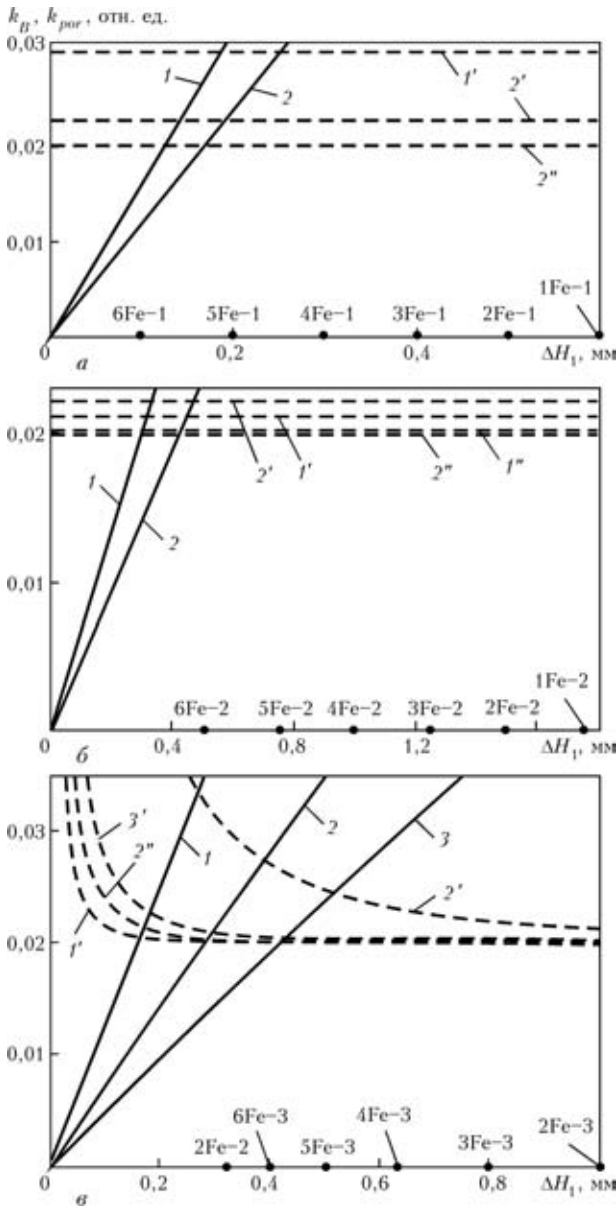


Рис. 1. Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_B$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{por}$  (штриховые линии) для камеры КТ-62.013 от размера дефекта  $\Delta H_1$  для канавочного эталона Fe-1 (а); Fe-2 (б) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (в) (обозначения кривых см. в тексте)

рис. 2, б — канавочному эталону Fe-2: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 160$  кВ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ; 3 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ;

рис. 2, в — проволочным эталонам: 1 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ; 2 —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 200$  кВ.

Характеристики, номер которых отмечен штрихом, обозначают соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ .

Из представленных на рис. 1, 2 зависимостей видно, что контраст выходного сигнала матрицы в рассмотренном диапазоне линейно возрастает с увеличением размера дефекта (глубины канавки и диаметра проволоки). Соответствующий угол

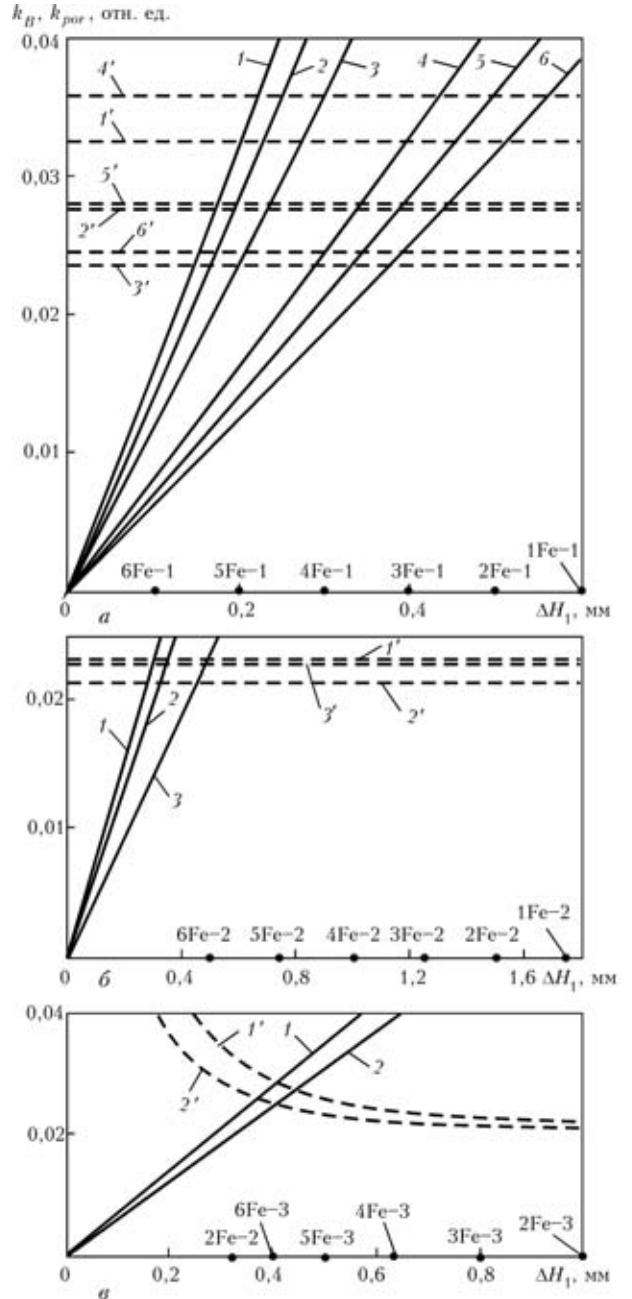


Рис. 2. Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_B$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{por}$  (штриховые линии) для камеры VSC-746 от размера дефекта  $\Delta H_1$  для канавочного эталона Fe-1 (а); Fe-2 (б) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (в) (обозначения кривых см. в тексте)

наклона характеристики тем меньше, чем больше толщина контролируемого образца и чем выше напряжение на аноде трубки. Значение  $k_{por}$  уменьшается при увеличении площади, на которой происходит интегрирование квантов и при увеличении времени, на протяжении которого оно осуществляется, в частности, в режиме регулируемой длительности накопления. Значение  $k_{por}$  крайне слабо зависит от глубины (толщины) дефекта. Для канавочных эталонов, у которых поперечные размеры канавок (ширина  $b$ ) одинаковые, соответствующие зависимости порогового контраста имеют вид линий, параллельных оси абсцисс. Для

проволочных эталонов, толщина проволоки которых равна ее поперечному размеру (диаметру  $d$ ), форма зависимостей более сложная и пороговый контраст уменьшается с увеличением диаметра проволоки.

Определение значений относительной чувствительности осуществлялось на основе наименьшей по глубине канавки канавочного эталона или наименьшего по диаметру проволочного эталона, для которых выполняется критерий (1) (т. е. ближайшее со стороны больших размеров значение глубины или диаметра эталона относительно точки пересечения соответствующих кривых на рис. 1, 2). Вычисленные на основе таких принципов расчетные значения относительной чувствительности помещены для сравнения рядом с соответствующими экспериментальными значениями в таблице.

Видно, что расчетные оценки относительной чувствительности достаточно хорошо согласуются с экспериментальными. Различия расчетных и экспериментальных оценок в основном наблюдаются при использовании проволочных эталонов чувствительности. Причиной такого различия для проволочных эталонов может быть то, что при расчетах не учитывалась пространственная фильтрация изображений в рентгеноэлектрическом преобразователе. Вместе с тем пространственная фильтрация больше проявляется как раз при использовании проволочных эталонов.

## Выводы

Телевизионные камеры КТ-62.013 и VSC-746 в вещательном стандарте разложения с монокристаллическим рентгенооптическим преобразователем CsI(Tl) при неразрушающем контроле стальных объектов толщиной до 30 мм обеспечивает относительную чувствительность контроля не хуже относительной чувствительности контроля прикладных телевизионных установок ПТУ «Интроскоп» на изоконе ЛИ-801 и ПТУ-84 на супервидиконе ЛИ-702.

Телевизионная камера VSC-746 в вещательном стандарте разложения при прочих равных условиях обеспечивает относительную чувствительность контроля, превосходящую почти в 2 раза аналогичный показатель для камеры КТ-62.013.

Перевод телевизионной камеры КТ-62.013 в режим накопления кадров позволяет улучшить относительную чувствительность контроля в 2...2,5 раза.

Использование режима накопления элементов в камере КТ-62.013 нецелесообразно из-за уменьшения разрешающей способности рентгенотелевизионной системы.

Разработанная математическая модель рентгеноэлектрического преобразователя на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) и ПЗС-матрицы оптического диапазона ICX-429ALL (ICX-249AL) хорошо соответствует реальному прототипу и может быть использована для выполнения предварительных оценок технических характеристик разрабатываемых рентгенотелевизионных систем.

1. *Дефектоскопические* рентгенотелевизионные системы высокой чувствительности / С. В. Денбовецкий, В. А. Троицкий, Н. Г. Белый и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1997. — № 4. — С. 13–22.
2. *Денбовецкий С. В., Лецишин А. В., Михайлов С. Р.* Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы неразрушающего контроля на основе электронно-лучевых приборов // Электроника и связь. — Тем. вып. «Проблемы электроники». — 2005. — Ч. 1. — С. 72–81.
3. *Гурвич А. М.* Физические основы радиационного контроля и диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 168 с.
4. *Luhta R., Rowlands J. A.* Feasibility of a large area X-ray sensitive vidicon for medical fluoroscopy: signal and noise factors // Med. Phys. — 1997. — **24**, № 5. — P. 609 — 620.
5. *Diagonal 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR B/W Video Cameras ICX429ALL.* //www.sony.net.
6. *Носов Ю. Р., Шилин В. А.* Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
7. *Быков Р. Е., Фрайер Р., Иванов К. В., Мануцетов А. А.* Цифровое преобразование изображений / Под ред. Р. Е. Быкова. — М.: Горячая линия-Телеком, 2003. — 228 с.
8. *Михайлов С. Р.* Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // Электроника и связь. — 2002. — № 16. — С. 59–70.
9. *Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.
10. *Майоров В., Овчинников Л.* CCD-матрицы компании SONY. Что выбрать? //www.videoscan.ru.
11. *SONY B/W Video Camera CCD.* //www.sony.net/Products/SC-HP/pro/image\_senser/bw\_video.html.
12. *Денна* телевизионная камера КТ-62.013 //www.tecon.lviv.ua.
13. *Внутренние ТВ камеры.* Сер. V-C //www.evs.ru.
14. *Рентгенотехника.* Справ.: В 2-х кн. Кн.2. / А. А. Алтухов, К. В. Анисович, Х. Г. Бергер и др. — 2-е изд., доп. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1992. — 431 с.
15. *ГОСТ 7512–82.* Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 30 с.
16. *Сторм Э., Израэль Х.* Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001...100 мэВ и элементов с 1 по 100). Справ. / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1973. — 256 с.
17. *Роуз А.* Зрение человека и электронное зрение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 216 с.