

УДК 620.179

*Е.И. Косарина<sup>1</sup>, О.А. Крупнина<sup>1</sup>, А.А. Демидов<sup>1</sup>, Е.М. Турбин<sup>1</sup>*

## **ЦИФРОВАЯ РАДИОГРАФИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-562-574

*Приведены результаты опробования и внедрения неразрушающего контроля средствами цифровой радиографии. Показан механизм формирования оптического изображения на детекторе и его различия с традиционной рентгенографией, определены условия оптимальных энергий излучения. Показано, что основными характеристиками цифровых детекторов являются пространственное разрешение, контрастная чувствительность, диапазон допустимых дозовых нагрузок. Выбраны типы цифровых преобразователей для оценки возможности их использования при контроле изделий авиационной техники из алюминиевых, магниевых, титановых, жаропрочных сплавов и сталей.*

**Ключевые слова:** *неразрушающий рентгенографический контроль, цифровая рентгенография, отношение «сигнал/шум», нерезкость изображения, контраст изображения.*

*E.I. Kosarina, O.A. Krupnina, A.A. Demidov, E.M. Turbin*

### **Digital radiography in nondestructive testing of aerostructures**

*This article represents the results of testing and introduction of nondestructive control by means of digital radiography. The mechanism of formation of optical image on the detector and its differences from the conventional radiography is shown, the conditions of selection of optimal radiation energy are determined. It is shown that the main characteristics of digital detectors are the spatial resolution, contrast sensitivity, range of acceptable dose rates. The types of digital detectors according to possibility of their use in non-destructive testing of products from aluminum, magnesium, titanium, high temperature alloys and steels have been selected.*

**Keywords:** *x-ray non-destructive testing, digital radiography, signal-to-noise ratio, image confusion, image contrast.*

### **Введение**

Создание и успешная эксплуатация летательных аппаратов и образцов космической техники в значительной степени зависят от свойств авиационных материалов, качество которых непосредственно зависит от

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

отсутствия в них дефектов [1—4]. Узлы и детали авиационной техники на стадии производства подвергают стопроцентному неразрушающему контролю – в частности рентгенографическому. Этот метод неразрушающего контроля широко распространен в производстве литых деталей и сварных соединений. Использование радиографической пленки в качестве детектора изображения делает этот метод трудоемким и неэкономичным. Вопрос снижения трудоемкости рентгеновского контроля решается заменой рентгенографии на цифровую радиографию, в результате которой исключаются применение дорогостоящей серебросодержащей радиографической пленки и временные затраты, связанные с ее фотообработкой. Информация о применении цифровых радиографических установок известна. Некоторый опыт их использования для контроля авиационной техники есть и во ФГУП «ВИАМ» – например, проведены работы по использованию установок с рентгенотелевизионным преобразователем для контроля:

- влаги в сотовых конструкциях планера;
- керамических стержней и восковых моделей;
- отливок из алюминиевых сплавов с оценкой пористости [5–7].

Широкое применение цифровой радиографии ограничено в основном двумя причинами: во-первых, снижением чувствительности и разрешающей способности контроля, во-вторых, возможностью проводить цифровой рентгенографический контроль относительно простых по своей форме изделий. Устранение первой причины связано с внедрением цифровых технологий, в которых в качестве преобразователей используются плоскопанельные детекторы [8]. Для устранения второй причины, мешающей широкому внедрению беспленочных технологий, в том числе и цифровой радиографии, необходимо наличие манипуляторной системы, обеспечивающей многовариантную ориентацию объекта контроля относительно преобразователя. Так, если последняя причина может быть устранена индивидуально для конкретного производства с учетом его особенностей, то первая причина универсальна практически для всех предприятий, проводящих рентгеновскую дефектоскопию. Однако преимущество использования беспленочных технологий велико. Таким образом, рентгеновские методы неразрушающего контроля необходимо проводить с применением цифровой радиографии как наиболее эффективной технологии неразрушающего контроля [9–11].

Во ФГУП «ВИАМ» осуществляется комплексное научное направление «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль на период до 2030 года») [1]. В ходе его реализации проводятся исследования (раздел 2.3) для замены рентгенографического

контроля с использованием серебросодержащих расходных материалов на беспленочные методы – в частности на цифровую радиографию.

## Применяемые материалы и методы

### *Принцип работы детектора*

Плоскопанельный детектор (ППД), внешний вид которого показан на рис. 1, представляет собой матрицу рентгеночувствительных элементов, называемых детекторным слоем, работа которых описана следующим образом на рис. 2.

В определенный промежуток времени, именуемый кадром, на вход детекторного слоя матрицы поступают фотоны рентгеновского излучения, ослабленные объектом контроля (ОК). Под действием излучения в каждом рентгеночувствительном элементе прямо или опосредованно возникает электрический сигнал, величина которого определяется числом получаемых фотонов. Весь массив электрических сигналов поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и преобразуется в цифровой массив данных. При этом детекторный слой обнуляется. В течение второго кадра все повторяется, а цифровой массив второго кадра складывается с предыдущим значением. Последовательное суммирование кадров приводит к повышению отношения «сигнал/шум» (ОСШ), так как установлено, что сигнал повышается пропорционально числу получаемых фотонов  $N$ , а шум –  $\sqrt{N}$ . Полученный цифровой массив данных выводится на экран монитора дефектоскописта в виде изображения [10, 11].



Рис. 1. Внешний вид плоскопанельного детектора

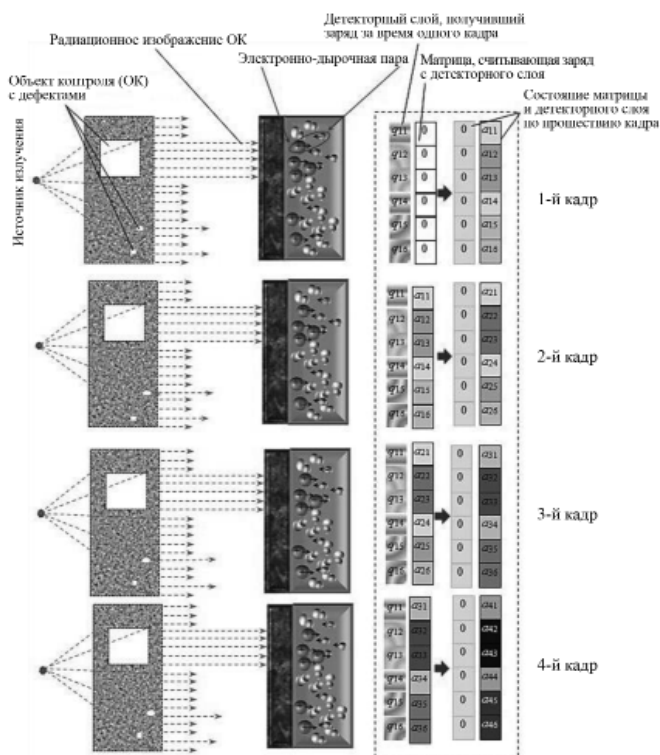


Рис. 2. Процесс формирования изображения на плоскочувствительном детекторе

*Преимущество цифровой радиографии перед традиционной рентгенографией*

В схеме рентгеновского контроля ППД предназначен для преобразования радиационного изображения ОК и формирования его цифрового изображения. Замена радиографической пленки на ППД возможна лишь в том случае, когда качество получаемого цифрового изображения не хуже, чем на рентгеновском снимке.

Качество рентгенографического снимка определяется двумя свойствами: контрастом и четкостью. Контраст рентгенографического снимка определяется достигнутой чувствительностью, а четкость – величина обратная нерезкости изображения.

Нормативными документами по рентгенографическому контролю установлен регламент:

– чувствительность контроля  $k$ , мм (минимальный видимый размер дефекта в направлении оси пучка излучения), должна быть такой, чтобы выполнялось условие:  $k \leq \frac{\delta_{\text{доп}}}{2}$ , где  $\delta_{\text{доп}}$  – размер предельно допустимого дефекта, мм;

– нерезкость изображения  $u$ , мм, не должна превышать половины чувствительности контроля  $k$ , мм:  $u \leq \frac{k}{2}$  [12, 13].

Для обеспечения этих требований необходимо, чтобы, во-первых, анодное напряжение на рентгеновской трубке не превышало значений, регламентированных ГОСТ 20426, и, во-вторых, расстояние  $f$  от источника излучения до обращенной к нему поверхности ОК было не менее:

$$f \geq \frac{2\Phi}{k} \cdot d,$$

где  $\Phi$  – размер фокусного пятна источника, мм;  $k$  – чувствительность контроля, мм;  $d$  – расстояние между кассетой с радиографической пленкой и самой удаленной от нее точкой ОК, мм (рис. 3).

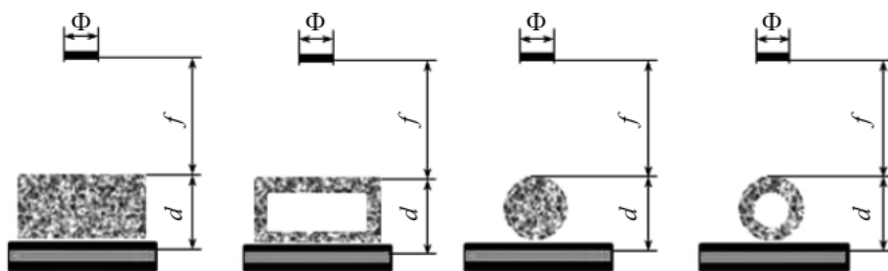


Рис. 3. Выбор параметров схемы в зависимости от объекта контроля при рентгенографическом контроле

Общая нерезкость изображения  $u$  зависит от геометрической нерезкости  $u_r$  и собственной нерезкости  $u_c$  детектора  $u = \sqrt{u_r^2 + u_c^2}$ . При рентгенографическом контроле детектором является радиографическая пленка. У радиографических пленок устройство эмульсионного слоя таково, что собственная нерезкость на порядок меньше геометрической:  $u_c \ll u_r$ , поэтому  $u \approx u_r$ .

При использовании ППД следует учитывать, что собственная нерезкость на по-рядок и более превосходит собственную нерезкость радиографических пленок, поэтому вклад в общую нерезкость соизмерим с геометрической нерезкостью. Для получения четкого изображения ППД используют в сочетании с микрофокусными источниками излучения [12, 13], что позволяет снизить геометрическую нерезкость, а посредством вариации схем контроля получить увеличенное изображение ОК (рис. 4).

Качество цифрового рентгенографического изображения определяется – помимо контраста и четкости – таким параметром, как ОСШ.

Для радиографических пленок ОСШ – это отношение «градиент/шум» и величина его высока. Для радиографических пленок марок Агфа D2–D5 классов С1–С4 отношение «градиент/шум» меняется в пределах

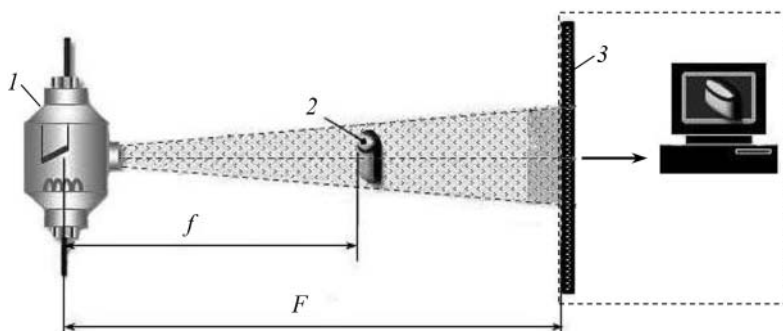


Рис. 4. Изменение коэффициента увеличения и размеров зоны контроля в зависимости от взаимного расположения рентгеновской трубки (1), объекта контроля (2) и детектора (3);  $F$  – фокусное расстояние;  $f$  – расстояние от источника излучения до объекта контроля

от 392 до 177 [14]. Плоскопанельный детектор – устройство, которое обладает высоким уровнем собственных шумов, снижающих контраст изображения в большей степени, чем повышение энергии излучения снижает контраст радиационного изображения. В радиографии низкий радиационный выход источника можно скомпенсировать длительностью экспозиции. В цифровой радиографии используют микрофокусные источники, и низкий радиационный выход источника может привести к снижению ОСШ. Поэтому при использовании ППД, как показывает практика, оптимальны повышенные значения анодного напряжения. В радиографии энергию излучения выбирают таким образом, чтобы радиационная толщина  $d$  составляла пять слоев половинного ослабления излучения объектом контроля  $\Delta_{1/2}$ :

$$d = 5\Delta_{1/2},$$

где  $\Delta_{1/2} = 0,693/\mu$ ;  $\mu$  – линейный коэффициент излучения материалом ОК, мм.

В цифровой радиографии допустимо –  $d = 2,5 \Delta_{1/2}$  [12].

#### *Описание экспериментов по цифровой радиографии и их результатов*

Основными техническими характеристиками цифрового детектора являются: размер чувствительной матрицы детектора, мм (рабочая зона); размер пикселя, мкм; динамический диапазон; разрядность АЦП, бит; время захвата (интегрирования) единичного кадра, мс; минимальная/максимальная допустимая энергия излучения, МэВ. Для тестирования детектора и оценки качества получаемого изображения использовали специализированные тест-образцы (СТО), имитирующие минимальную и максимальную толщину ОК. СТО представляют собой двухступенчатые клинья, изготовленные из сплавов на основе алюминия, магния, титана,

железа. Каждая ступень содержит участок с пятью канавками глубиной от 1 до 5% от толщины ступени для определения контрастной чувствительности. На каждой ступеньке имеется площадка для установки дуплексного индикатора качества изображения (ИКИ) для определения разрешающей способности (рис. 5, табл. 1). Для оценки геометрической нерезкости изображения использовали дуплексный ИКИ по ISO 19232-5, представляющий собой набор вольфрамовых проволок разного диаметра. Геометрические размеры элементов дуплексного ИКИ представлены на рис. 6 и в табл. 2.

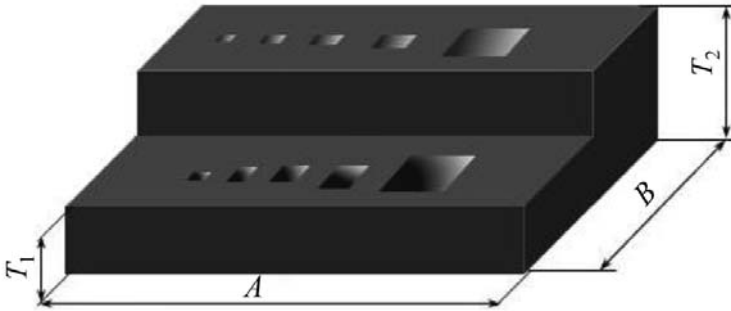


Рис. 5. Чертеж специального тест-образца

Таблица 1

**Основные размеры тест-образцов (см. рис. 5)**

Толщина объекта контроля, мм, из сплава на основе															
железа				алюминия				магния				титана			
$T_1$		$T_2$		$T_1$		$T_2$		$T_1$		$T_2$		$T_1$		$T_2$	
6		20		12		60		10		50		5		14	
Относительная (%) и абсолютная (мм) глубина гнезд															
%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм
1	0,06	1	0,20	1	0,12	1	0,60	1	0,1	1	0,5	1	0,05	1	0,14
2	0,12	2	0,40	2	0,24	2	1,20	2	0,2	2	1,0	2	0,10	2	0,28
3	0,18	3	0,60	3	0,36	3	1,80	3	0,3	3	1,5	3	0,15	3	0,42
4	0,24	4	0,80	4	0,48	4	2,40	4	0,4	4	2,0	4	0,20	4	0,56
5	0,30	5	1,00	5	0,60	5	3,00	5	0,5	5	2,5	5	0,25	5	0,70
Размеры тест-образцов, указанные в чертеже, мм															
A								B							
130								103							

Для повышения разрешающей способности используют схему контроля с увеличением изображения (рис. 7). Для каждой схемы контроля должна быть выполнена оценка достигаемой нерезкости с применением дуплексного ИКИ по ISO 19232-5. Для этого дуплексный ИКИ должен быть закреплен на ОК со стороны источника излучения на границе контролируемой области, где нерезкость максимальна.



Рис. 6. Внешний вид дуплексного индикатора качества изображения (ИКИ)

Таблица 2

**Характеристики элементов дуплексного эталона**

Номер элемента	Нерезкость изображения, мм	Диаметр проволок и расстояние между ними, мм
D13	0,10	0,050
D12	0,13	0,063
D11	0,16	0,080
D10	0,20	0,100
D9	0,26	0,130
D8	0,32	0,160
D7	0,40	0,200
D6	0,50	0,250
D5	0,64	0,320
D4	0,80	0,400
D3	1,00	0,500
D2	1,26	0,630
D1	1,60	0,800

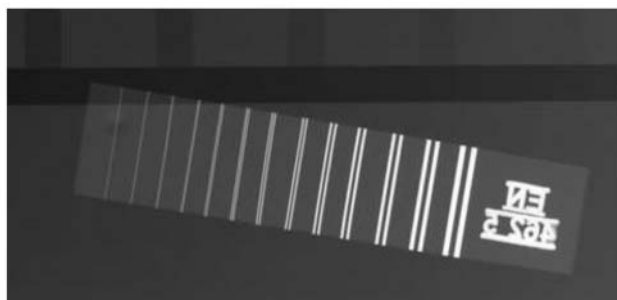


Рис. 7. Рентгеноскопическое изображение дуплексного эталона

Максимальная нерезкость полученного цифрового изображения не должна превышать значений, указанных в табл. 3.



Таблица 3

**Максимально допустимая геометрическая нерезкость изображения**

Радиационная толщина, мм	Номер видимого на изображении элемента	Максимально допустимая геометрическая нерезкость изображения, мм
Не более 1,5	D13+	0,080
Свыше 1,5 – не более 4,0	D13	0,100
Свыше 4,0 – не более 8,0	D12	0,125
Свыше 8,0 – не более 12	D11	0,160
Свыше 12 – не более 40	D10	0,200
Свыше 40 – не более 120	D9	0,260

При этом допустимое увеличение изображения ОК определяется из условия:

$$M \geq \frac{5 \cdot SR_6^{\text{дет}}}{\delta_{\text{доп}}}$$

где  $M$  – коэффициент увеличения;  $\delta_{\text{доп}}$  – предельно допустимый размер дефекта, мм;  $SR_6^{\text{дет}}$  – базовое пространственное разрешение цифрового детектора, мм.

Нерезкость цифрового изображения может быть вычислена в зависимости от коэффициента геометрического увеличения  $M$ , геометрической нерезкости  $u_r$  и базового пространственного разрешения детектора  $SR_6^{\text{дет}}$ .

$$u_{\text{изоб}} = \frac{1}{M} \sqrt{(u_r)^2 + (2SR_6^{\text{дет}})^2}$$

где  $u_r = \left(\frac{F}{f} - 1\right) \Phi = (M - 1) \Phi$  – геометрическая нерезкость, мм;  $F$  – расстояние от источника излучения до цифрового детектора, мм;  $f$  – расстояние от источника излучения до объекта контроля, мм;  $\Phi$  – размер фокусного пятна источника излучения в соответствии с ISO 12543-1, мм;  $SR_6^{\text{дет}}$  – базовое пространственное разрешение цифрового детектора, численно равно размеру пикселя детектора, мм.

**Результат и обсуждение**

*Рассмотрим пример.* Размер пикселя цифрового детектора по техническим характеристикам составляет 200 мкм. Размер фокусного пятна рентгеновской трубки равен 0,1 мм. Размер предельно допустимого дефекта  $\delta_{\text{доп}}$  равен 1,5 мм. Тогда нерезкость цифрового изображения должна быть не более 0,375 мм. Устанавливаем коэффициент геометрического увеличения  $M=1,5$ . Полученная нерезкость изображения при таких параметрах составит:

$$u_r = (M - 1) \Phi = (1,5 - 1) \cdot 0,1 = 0,05 \text{ мм};$$

$$u_{\text{изоб}} = \frac{1}{M} \sqrt{(u_r)^2 + (2SR_6^{\text{дет}})^2} = \frac{1}{1,5} \sqrt{(0,05)^2 + (2 \cdot 0,2)^2} = 0,269 \text{ мм}.$$

Проверка условия допустимого увеличения:  $1,5 \geq \frac{5 \cdot 0,2}{1,5}$ .

Расчет допустимой нерезкости по изображению дуплексного ИКИ (рис. 8) осуществляют следующим образом. Профиль изображения пар проволок, выведенный на экран монитора, имеет вид, представленный на рис. 9. Пара проволок, у которой величина впадины (ВВ) составит не более 20%, считается неразличимой, а достигнутая величина нерезкости рентгеноскопического изображения определяется крайним номером элемента дуплексного ИКИ, у которого ВВ более 20%. Определение ВВ по профилю изображения дуплексного эталона (в %) вычисляется по формуле (см. обозначения на рис. 9):

$$ВВ = [(A + B - 2 \cdot B) / (A + B)] 100\%.$$

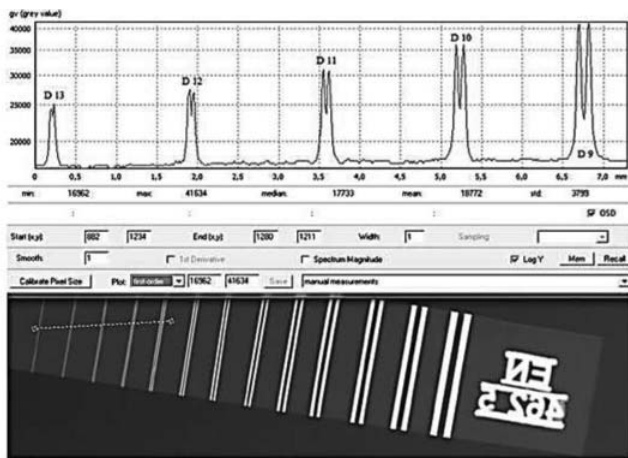


Рис. 8. Профиль изображения проволок дуплексного индикатора качества изображения (ИКИ) на экране монитора

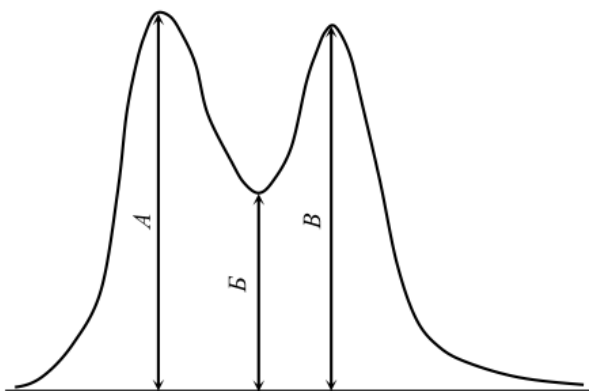


Рис. 9. Схема определения величины впадины В (%) по профилю изображения дуплексного эталона; А и В – максимальная яркость изображения пары проволок

В качестве примера рассмотрим, как осуществляется контроль сварного соединения патрубка обвязки газотурбинного двигателя (ГТД). Установив ОК в положение просвечивания, корректируем анодное напряжение и ток рентгеновской трубки до получения контрастного изображения ОК. Оптимальность установленного режима определяется по уровню интенсивности (яркости) сигнала на изображении ОК или по информации, содержащейся в гистограмме. Численное значение уровня сигнала определяют по графику линии профиля или гистограмме изображения (рис. 10). Оптимальный или нормальный уровень сигнала соответствует – от 60 до 80% от максимального значения яркости (интенсивности).

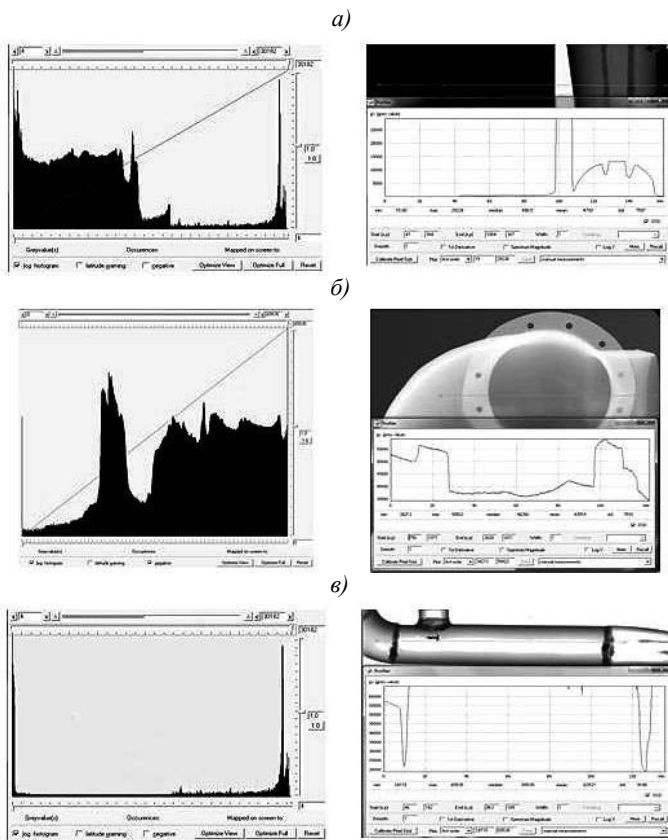


Рис. 10. Примеры гистограмм и профилей уровней яркости (интенсивности) рентгеноскопического изображения:

- а* – с недостаточным уровнем сигнала (слишком темное изображение);
- б* – с оптимальным или нормальным уровнем сигнала;
- в* – с завышенным уровнем сигнала (слишком светлое изображение)

После подбора напряжения в окне программы управления устанавливаем калибровку детектора, соответствующую выбранным анодному напряжению и току трубки или наиболее близкие к ним, – с разницей не более 10 кВ и 1 мА. Калибровочный набор создают для конкретной схемы контроля и рентгеновской трубки. Поэтому, изменяя хотя бы один параметр (фокусное расстояние, коэффициент увеличения, размер фокусного пятна и т. д.), необходимо создать новый калибровочный набор.

После установки калибровок и выхода рентгеновского аппарата на заданный режим получим цифровое рентгенографическое изображение интересующей области ОК.

### **Заключения**

Проведенный цифровой радиографический контроль магниевых, алюминиевых, титановых, жаропрочных и стальных полуфабрикатов и деталей показал, что по выявляемости дефектов в изделиях авиационной техники цифровой детектор не уступает радиографической пленке.

По полученным экспериментальным данным установлено, что выполнение технологических рекомендаций по проведению цифрового рентгенографического контроля позволяет достичь разрешающей способности изображения 10 пар линий/мм и относительной чувствительности контроля 2%.

Применение плоскочастотных детекторов – при соблюдении технологии контроля – возможно на всех стадиях производства, на которых в настоящее время проводится контроль с использованием радиографической пленки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий и их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
4. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
5. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение

- ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 423–430.
6. Степанов А.В., Косарина Е.И., Демидов А.А. Компьютерная рентгенография с применением фотостимулированных пластин // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-79-85.
  7. Ложкова Д.С., Степанов А.В., Косарина Е.И. Компьютерная радиография, результаты практических исследований и возможность замены пленочных технологий // Вестник МЭИ. 2011. №3. С. 57–62.
  8. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Сфера Нефтегаз. 2009. №9. С. 26–37.
  9. Yaffe M.J., Rowlands J.A. X-ray detectors for digital radiography // Phys. Med. Biol. 1997. Vol. 42. P. 1–39.
  10. Moreira E., Fritz M., H. Simoes Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection // Proceedings of the 4th Conferencia Panamericana de END. 2007. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/127.pdf> (дата обращения: 22.11.2016).
  11. Bavendiek K., Heike U., Meade W. D., Zscherpel U., Ewert U. New Digital Radiography Procedure Exceeds Film Sensitivity Considerably in Aerospace Applications // 9th ECNDT (Berlin. September 25–29, 2006). URL: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.3.2.1.pdf> (дата обращения: 22.11.2016).
  12. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
  13. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999. 104 с.
  14. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А. и др. Испытание радиографических пленок для определения возможности их применения для НК изделий авиационной техники // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. №2. С. 61–65.