

УДК 620.192.63

*Е.И. Косарина<sup>1</sup>, Н.А. Михайлова<sup>1</sup>, А.А. Демидов<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>*

## **ИНДИКАТОРЫ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ ПО РЕГЛАМЕНТУ ISO**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-114-127

*Приведено описание теоретических исследований объективности определения чувствительности по индикаторам качества изображения (ИКИ), регламентированным международной системой стандартов (ISO).*

*Установлено, что оценка чувствительности по ИКИ типа «ступень–отверстие» более объективна, чем по проволочному. Индикаторы типа «ступень–отверстие» более технологичны, чем проволочные, и могут быть изготовлены самостоятельно организацией, проводящей радиационный контроль, с последующей аттестацией метрологической службой.*

**Ключевые слова:** чувствительность контроля, индикатор качества изображения, пространственно-частотный спектр, оптическое изображение, преобразователь рентгеновского излучения.

*E.I. Kosarina<sup>1</sup>, N.A. Mikhailova<sup>1</sup>, A.A. Demidov<sup>1</sup>, A.V. Smirnov<sup>1</sup>*

## **IMAGE QUALITY INDICATORS IN RADIATION MONITORING ACCORDING TO ISO REGULATIONS**

*The description of theoretical researches of objectivity of determination of sensitivity is provided in article on the image quality indicators (IQI) regulated by the international system of standards (ISO).*

*It is established that the assessment of sensitivity on IQI of the step opening type is more objective, than on the wire. IQI of the step opening type are more technological, than wire and can be made independently by the organization which is carrying out radiation monitoring, with the subsequent certification by metrological service.*

**Keywords:** sensitivity of control, image quality indicator, space and frequency range, optical pattern, converter of x-ray emission.

---

<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

### **Введение**

Рентгенографический метод неразрушающего контроля (НК), несмотря на трудоемкость, в производстве продукции ответственного назначения регламентирован целым рядом российских государственных (ГОСТ) и международных стандартов (ISO) [1–3].

Необходимое повышение качества материалов диктует ужесточение требований, предъявляемых к НК. Прогресс развития авиационной и космической техники привел к созданию нового класса авиационных материалов [4, 5]. Это жаропрочные и сверхлегкие сплавы и композиционные материалы, принципиально отличающиеся от сплавов и неметаллов, а также материалы, производимые по аддитивным технологиям [6].

Дефекты, свойственные такому широкому спектру материалов, – разнообразны и специфичны, поэтому по-разному влияют на свойства изделий. Существует тесная связь между наличием дефекта и эксплуатационными характеристиками изделия, его

содержащего. В результате проведения рентгеновского контроля должны быть обнаружены недопустимые для данного изделия дефекты. Определяющим фактором рентгеновского контроля является чувствительность – минимальный дефект, видимый на преобразователе (радиографическом снимке или экране монитора). В системе международных стандартов ISO, которую Росстандарт активно внедряет в народное хозяйство РФ, для оценки чувствительности используют индикаторы качества изображения (ИКИ). Некоторые из ИКИ отличаются от аналогов, регламентированных системой ГОСТ, именуемых эталонами чувствительности [7].

В данной статье приведено описание теоретических исследований объективности определения чувствительности по ИКИ, регламентированном международной системой стандартов ISO.

В статье приведены результаты исследований, выполненных в рамках комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»[4]).

## Материалы и методы

### *Метод математического моделирования формирования радиационных изображений элементов проволоочного ИКИ и ИКИ типа «ступень–отверстие»*

#### *Описание ИКИ проволоочного типа и типа «ступень–отверстие»*

Проволоочный ИКИ представляет собой комплект из четырех наборов проволок разного диаметра, герметично запаянных в прозрачный пластиковый чехол. Каждый набор содержит семь проволок, диаметры которых изменяются в геометрической прогрессии (рис. 1, а; табл. 1). Существуют два варианта комплектов с длиной проволок, равной 60 и 25 мм.

Второй тип ИКИ, регламентированный системой стандартов ISO, «ступень–отверстие» представляет собой комплект из четырех ступенчатых клиньев со сквозными отверстиями в каждой ступеньке. Каждый клин запаян в прозрачный пластиковый чехол, имеющий маркировку (рис. 1 б, табл. 2).

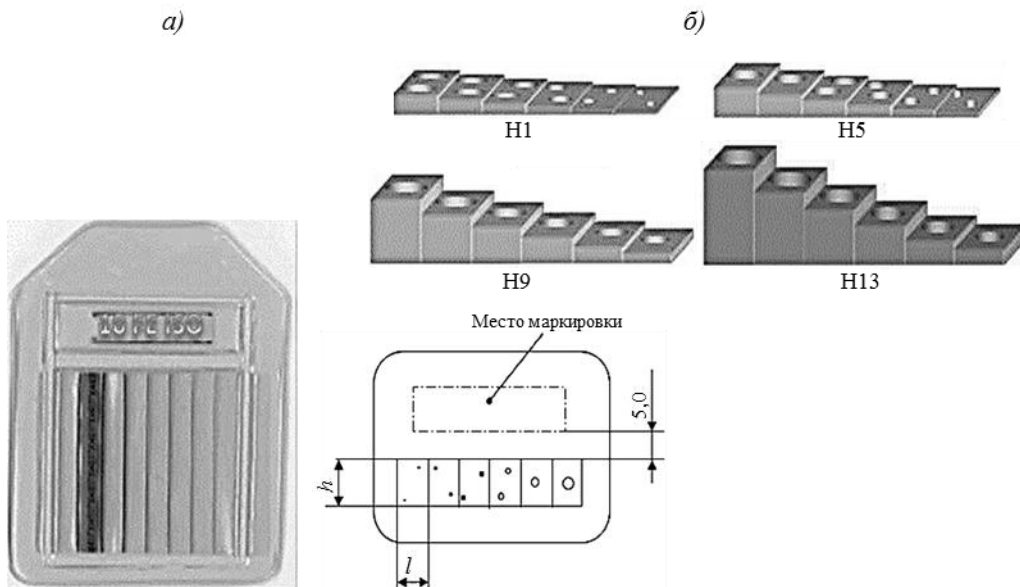


Рис. 1. Индикаторы качества изображения проволоочного типа – железный №10 (а) и типа «ступень–отверстие» (б)

Таблица 1

## Индикатор качества изображения (ИКИ) проволочного типа

Номер проволочного ИКИ*				Элементы ИКИ	
W1	W6	W10	W13	номер элемента	номинальный диаметр проволоки, мм
×	–	–	–	W1	3,20
×	–	–	–	W2	2,50
×	–	–	–	W3	2,00
×	–	–	–	W4	1,60
×	–	–	–	W5	1,25
×	×	–	–	W6	1,00
×	×	–	–	W7	0,80
–	×	–	–	W8	0,63
–	×	–	–	W9	0,50
–	×	×	–	W10	0,40
–	×	×	–	W11	0,32
–	×	×	–	W12	0,25
–	×	×	×	W13	0,20
–	–	×	×	W14	0,160
–	–	×	×	W15	0,125
–	–	×	×	W16	0,100
–	–	–	×	W17	0,080
–	–	–	×	W18	0,063
–	–	–	×	W19	0,050

\* Знак × – наличие проволоки в наборе.

Таблица 2

## Индикатор качества изображения типа «ступень–отверстие»

Номер ИКИ типа «ступень–отверстие»*				Элементы ИКИ	
H1	H5	H9	H13	номер элемента	номинальные диаметр отверстия и толщина ступеньки, мм
×	–	–	–	H1	0,125
×	–	–	–	H2	0,160
×	–	–	–	H3	0,200
×	–	–	–	H4	0,250
×	×	–	–	H5	0,320
×	×	–	–	H6	0,400
–	×	–	–	H7	0,500
–	×	–	–	H8	0,630
–	×	×	–	H9	0,800
–	×	×	–	H10	1,000
–	–	×	–	H11	1,250
–	–	×	–	H12	1,600
–	–	×	×	H13	2,000
–	–	×	×	H14	2,500
–	–	–	×	H15	3,200
–	–	–	×	H16	4,000
–	–	–	×	H17	5,000
–	–	–	×	H18	6,300

\* Знак × – наличие отверстий в наборе.

При экспонировании ИКИ располагают непосредственно на объекте контроля (ОК) (рис. 2). Чувствительность контроля – минимальный видимый на рентгеновском снимке элемент ИКИ, определяемый условиями контроля. Разная конструкция ИКИ (проволочных и типа «ступень–отверстие») определяет разные условия их (элементов)

обнаружения, т. е. разную выявляемость. Следовательно, оценка чувствительности контроля различна в зависимости от того, какой используют ИКИ.

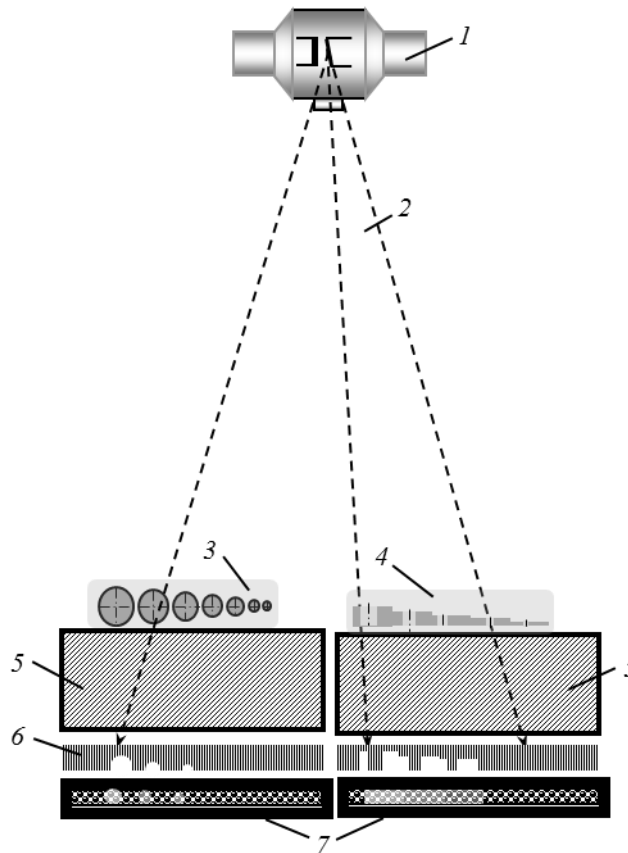


Рис. 2. Схема экспонирования объекта контроля (ОК) с индикатором качества изображения (ИКИ) проволочного типа и типа «ступень-отверстие»: 1 – источник излучения; 2 – рентгеновское излучение; 3, 4 – ИКИ проволочный и типа «ступень-отверстие» соответственно; 5 – ОК; 6 – радиационное изображение; 7 – оптическое изображение

### ***Получение пространственно-частотных спектров элементов ИКИ***

Для того чтобы определить, у какого ИКИ выявляемость выше, воспользуемся методом пространственно-частотного анализа, применяемого для оценки качества изобразительной информации [8].

Рассмотрим систему радиационного контроля как систему передачи информации. Для всякой системы передачи информации характерны следующие понятия: входной сигнал, канал передачи информации и детектор. Для схемы, изображенной на рис. 2, входным сигналом является ОК с расположенным на нем ИКИ, каналом передачи информации – источник излучения, преобразующий информацию об ОК в радиационное изображение, а детектор – это радиографическая пленка, которая после фотообработки представляет выходной сигнал – радиографический снимок. На радиографическом снимке информация об ОК представлена его проекцией в виде распределения оптической плотности. Упростим задачу исследования. Поскольку на рис. 2 объект контроля один и тоже, будем считать, что входной сигнал – это только ИКИ, который можно представить как функцию толщины при некоторой постоянной плотности материала, из которого ОК изготовлен: для проволочного ИКИ –  $z_{\text{пр}}=f_{\text{пр}}(x, y)$ ; для ИКИ типа «ступень-отверстие» –  $z_{c/o}=f_{c/o}(x, y)$  [8–10].

*Входной сигнал* – представим как функцию толщины и плотности материала в трехмерном пространстве. Элемент ИКИ типа «ступень–отверстие» в трехмерном пространстве представлен на рис. 3. Видно, что в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$  сечение отверстия представляет собой прямоугольный импульс с размерами  $D_{c/o} \times D_{c/o}$ , где  $D_{c/o}$  – диаметр отверстия и толщина ступеньки (рис. 4, а). В плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$  уравнение пространственных функций элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» можно записать аналитическими выражениями вида

$$z_{c/o}(x) = \begin{cases} D_{c/o} & \text{при } -\frac{D_{c/o}}{2} \leq x \leq +\frac{D_{c/o}}{2} \end{cases},$$

$$z_{c/o}(x) = 0 \text{ – для всех остальных } x;$$

$$z_{c/o}(y) = \begin{cases} D_{c/o} & \text{при } -\frac{D_{c/o}}{2} \leq y \leq +\frac{D_{c/o}}{2} \end{cases},$$

$$z_{c/o}(y) = 0 \text{ – для всех остальных } y.$$

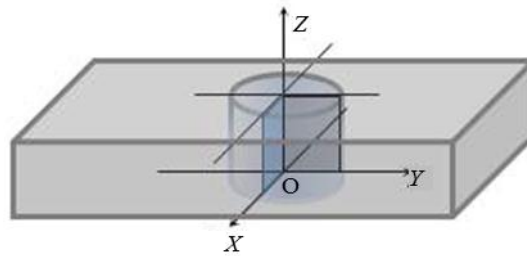


Рис. 3. Элемент индикатора качества изображения типа «ступень–отверстие» в трехмерной системе координат

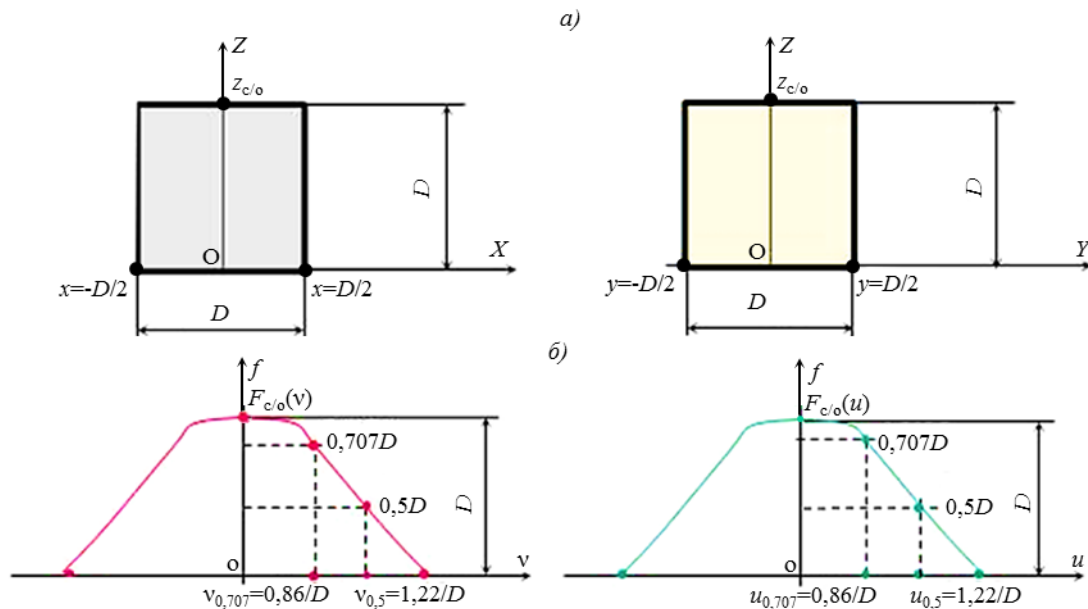


Рис. 4. Пространственные функции элементов индикатора качества изображения типа «ступень–отверстие» в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$  (а) и их пространственно-частотные спектры в плоскостях  $f_{ov}$  и  $f_{ou}$  (б)

Пространственно-частотный спектр сечений ИКИ типа «ступень–отверстие» получаем прямым преобразованием Фурье (рис. 4, б) [11, 12]:

$$F_{c/o}(v) = \int_{-D_{c/o}/2}^{D_{c/o}/2} D_{c/o} \cdot e^{-j2\pi vx} dx = D_{c/o} \left( \frac{\sin \pi v D_{c/o}/2}{\pi v D_{c/o}/2} \right);$$

$$F_{c/o}(u) = \int_{-D_{c/o}/2}^{D_{c/o}/2} D_{c/o} \cdot e^{-j2\pi uy} dy = D_{c/o} \left( \frac{\sin \pi u D_{c/o}/2}{\pi u D_{c/o}/2} \right).$$

Пространственные частоты  $v$  и  $u$ , при которых  $F_{c/o}(v)$  и  $F_{c/o}(u)$  равны  $D_{c/o}$ ;  $0,707D_{c/o}$ ;  $0,5D_{c/o}$  и  $0$ , представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 3

Зависимость величины спектра  $F_{c/o}$  от пространственных частот

Пространственный спектр			Пространственная частота, мм <sup>-1</sup>		
$F_{c/o}(v)$	$F_{c/o}(u)$	$F_{c/o}(\omega) = \sqrt{[F_{c/o}(v)]^2 + [F_{c/o}(u)]^2}$	$v$	$u$	$\omega = \sqrt{v^2 + u^2}$
$D_{c/o}$	$D_{c/o}$	$D_{c/o}\sqrt{2} = 1,41D_{c/o}$	0	0	0
$0,707D_{c/o}$	$0,707D_{c/o}$	$D_{c/o}$	$0,86/D_{c/o}$	$0,86/D_{c/o}$	$1,21/D_{c/o}$
$0,5D_{c/o}$	$0,5D_{c/o}$	$0,707D_{c/o}$	$1,22/D_{c/o}$	$1,22/D_{c/o}$	$1,72D_{c/o}$
0	0	0	$2/D_{c/o}$	$2/D_{c/o}$	$2,82/D_{c/o}$

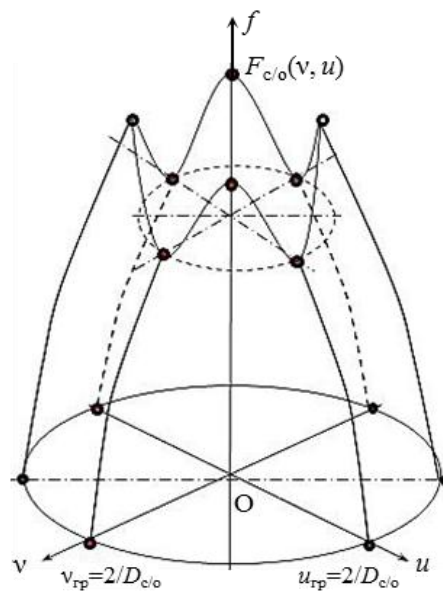


Рис. 5. Пространственный спектр отверстия ( $v_{гр}=2/D_{c/o}$  и  $u_{гр}=2/D_{c/o}$  – граничные пространственные частоты, при которых пространственный спектр  $F_{c/o}=0$ ;

$$\omega_{гр} = \sqrt{v_{гр}^2 + u_{гр}^2} = \sqrt{\frac{4}{D_{c/o}^2} + \frac{4}{D_{c/o}^2}} = \frac{1}{D_{c/o}} \sqrt{8} = \frac{2,82}{D_{c/o}}$$

Итак, спектр пространственных частот ИКИ типа «ступень–отверстие» определен пространственной частотой  $2,82/D_{c/o}$ , где  $D_{c/o}$  – диаметр отверстия, который должен быть виден на радиографическом снимке. Самый малый диаметр ИКИ равен  $0,125$  мм (рис. 5). В пространственно-спектральной интерпретации  $\omega_{гр}=2,82/0,125=22,56 \approx 23$  мм<sup>-1</sup> – самая высокая пространственная частота.

Элемент проволочного ИКИ представлен на рис. 6. Видно, что в плоскости XOZ сечение проволоки представляет собой круг диаметром  $D_{\text{пр}}$ , а в плоскости YOZ прямоугольный импульс с размерами  $l \times D_{\text{пр}}$ , где  $l$  – длина проволоки;  $D_{\text{пр}}$  – диаметр проволоки.

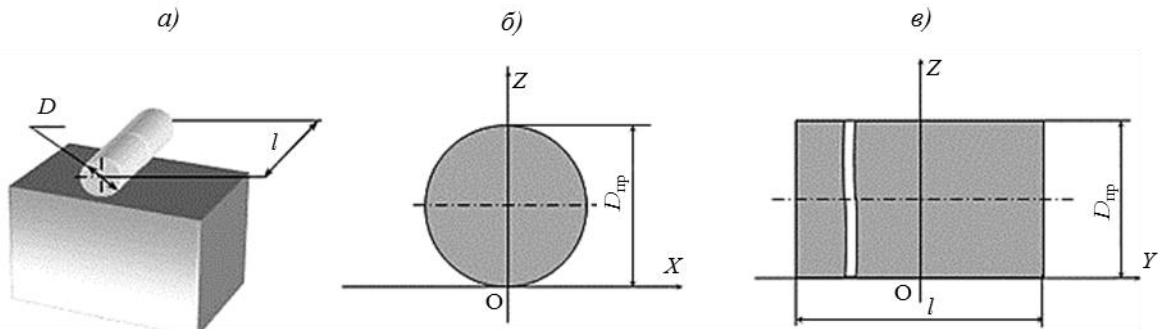


Рис. 6. Расположение элемента проволочного индикатора качества изображения на объекте контроля (а); ориентация проволоки в плоскостях XOZ (б) и YOZ (в)

В плоскостях XOZ и YOZ уравнение пространственных функций элемента проволочного ИКИ можно записать аналитическими выражениями вида

$$z_{\text{пр}}(x) = D_{\text{пр}} \sqrt{(D_{\text{пр}}/2)^2 - x^2} \quad \text{— для } -D_{\text{пр}}/2 \leq x \leq +D_{\text{пр}}/2,$$

$$z_{\text{пр}}(x) = 0 \quad \text{— для всех остальных } x;$$

$$z_{\text{пр}}(x) = \left\{ D_{\text{пр}} \text{ при } -\frac{l}{2} \leq y \leq +\frac{l}{2} \right\},$$

$$z_{\text{пр}}(y) = 0 \quad \text{— для всех остальных } y.$$

Пространственно-частотный спектр сечений проволочного ИКИ получаем прямым преобразованием Фурье (рис. 7):

– в плоскости  $f_{ov}$

$$F_{\text{пр}}(v) = \int_{-D/2}^{D/2} \sqrt{\left(\frac{D_{\text{пр}}}{2}\right)^2 - x^2} \cdot e^{-j2\pi vx} dx \quad \text{— решение этого интеграла } F_{\text{пр}}(v) = \frac{D_{\text{пр}}}{2} \cdot \sin(\pi \cdot v D_{\text{пр}});$$

– в плоскости  $f_{ou}$

$$F_{\text{пр}}(u) = \int_{-l/2}^{l/2} D_{\text{пр}} \cdot e^{-j2\pi ux} dx \quad \text{— решение этого интеграла } F_{\text{пр}}(u) = D_{\text{пр}} \cdot \frac{\sin \pi(u l / 2)}{\pi(u l / 2)}.$$

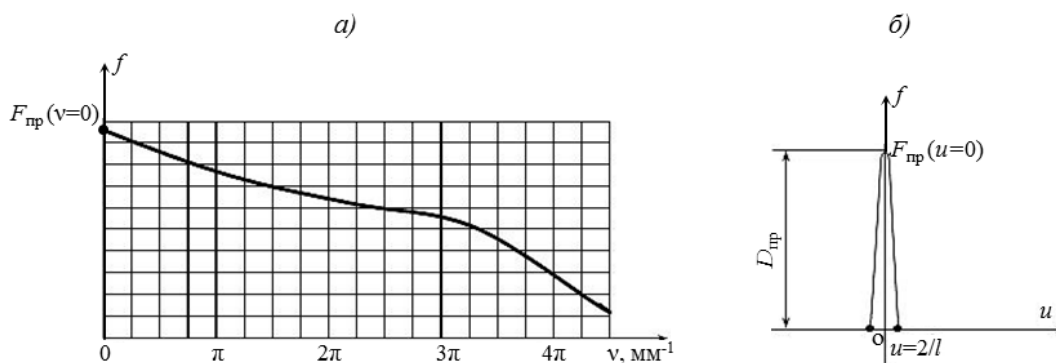


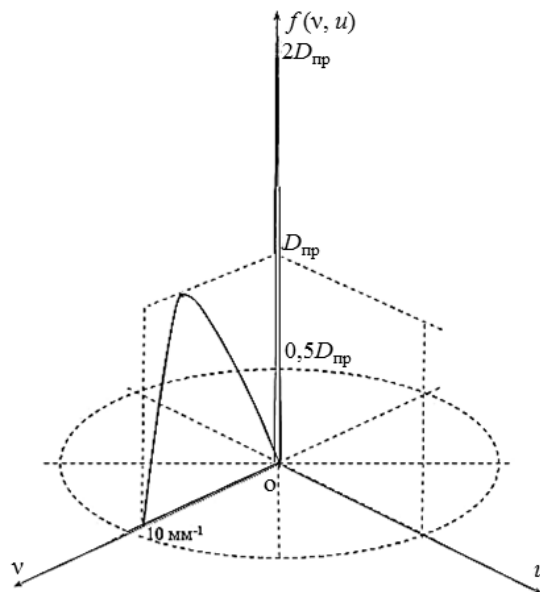
Рис. 7. Пространственно-частотные спектры проволоки в плоскостях  $f_{ov}$  (а) и  $f_{ou}$  (б)

Пространственные частоты  $\nu$  и  $u$ , при которых спектры  $F_{\text{пр}}(\nu)$  и  $F_{\text{пр}}(u)$  – не равны. В плоскости  $YOZ$  проволока ориентирована по длине, спектр ее узкий – для проволоки длиной 25 мм практически достигает максимума на нулевой пространственной частоте (табл. 4). В плоскости  $XOZ$  проволока ориентирована диаметром – спектр ее широкий.

Таблица 4

Зависимость величины спектра  $F_{\text{пр}}$  от пространственных частот

$F_{\text{пр}}(\nu) = \frac{D_{\text{пр}}}{2} \sin(\pi \cdot \nu D_{\text{пр}})$		$F_{\text{пр}}(u) = D_{\text{пр}} \cdot \frac{\sin \pi(u/2)}{\pi(u/2)}$			
пространственная частота		$\frac{F_{\text{пр}}(\nu)}{D_{\text{пр}}/2}$	пространственная частота		$\frac{F_{\text{пр}}(u)}{D_{\text{пр}}}$
$\pi \nu D_{\text{пр}}$	$\nu, \text{мм}^{-1}$		$\pi(u/2)$	$u, \text{мм}^{-1}$	
0	0	0	0	0	1
$\pi/6$	1,67	0,500	$\pi/6$	0,013	0,955
$\pi/4$	2,50	0,707	$\pi/4$	0,020	0,900
$\pi/3$	3,34	0,866	$\pi/3$	0,026	0,827
$\pi/2$	5	1,000	$\pi/2$	0,040	0,637
$2\pi/3$	6,68	0,866	$2\pi/3$	0,053	0,413
$3\pi/4$	7,50	0,707	$3\pi/4$	0,060	0,300
$5\pi/6$	8,35	0,500	$5\pi/6$	0,066	0,191
$\pi$	10	0	$\pi$	0,08	0

Рис. 8. Пространственный спектр проволоки диаметром  $D_{\text{пр}}=0,100$  мм и длиной  $l_{\text{пр}}=25$  мм

При сравнении пространственных спектров отверстия и проволоки (рис. 5 и 8) видно, что пространственный спектр проволоки, хотя и шире, чем частотно-пространственный спектр отверстия, но только в плоскости  $fov$ . В плоскости  $foi$  он практически отсутствует: его значение, равное  $D_{\text{пр}}$ , существует только на нулевой пространственной частоте, а далее на всем диапазоне пространственных частот  $u$  он равен нулю. Вероятность формирования радиационного изображения элемента проволочного эталона выше, чем вероятность формирования радиационного изображения элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» того же диаметра.

**Радиационные изображения элементов ИКИ**

Пространственно-частотные свойства источника излучения ограничены соотношением фокусного расстояния (источник–детектор) и размером фокусного пятна. При формировании радиационного изображения элементов ИКИ типа «ступень–отверстие» и проволочного они будут претерпевать искажения. Определим, какова должна быть частотно-пространственная характеристика (ЧПХ –  $f_{\text{ист.изл}}$ ) источника излучения, чтобы сформировать радиационное изображение проволоки  $D_{\text{пр}}$  и отверстия  $D_{\text{с/о}}$  при условии  $D_{\text{с/о}}=D_{\text{пр}}$ . Приведем пример для самой высокой чувствительности контроля. Согласно ISO 5579–2013, при контроле объектов толщиной до 2,5 мм чувствительность контроля для изделий класса В должна быть  $H_2=0,160$  мм. При каких условиях радиационное изображение отверстия диаметром 0,160 мм будет сформировано? В стандарте [12] рассмотрено формирование радиационных изображений дефектов методом пространственно-частотного анализа, в работе [13] проведены исследования объективности контроля при использовании проволочных и канавочных эталонов чувствительности при рентгеновском контроле, в результате которых установлено аналитическое выражение ЧПХ источника излучения. Воспользуемся результатами проведенных теоретических исследований. Для фокусного пятна источника излучения размером  $\Phi \times \Phi$ , с расстоянием от источника до кассеты с радиографической пленкой, равным  $F$ , и расстоянием от объекта до кассеты, равным  $d$ , ЧПХ имеет вид

$$f(v)_{\text{ист.изл}} = \int_0^{\frac{\Phi d}{F-d}} F \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi+x}\right) \cdot e^{-j2\pi vx} dx \cong F \frac{\sin\left(\pi v \cdot \frac{\Phi d}{F-d}\right)}{\pi v \cdot \frac{\Phi d}{F-d}};$$

$$f(u)_{\text{ист.изл}} = \int_0^{\frac{\Phi d}{F-d}} F \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi+y}\right) \cdot e^{-j2\pi uy} dy \cong F \frac{\sin\left(\pi u \cdot \frac{\Phi d}{F-d}\right)}{\pi u \cdot \frac{\Phi d}{F-d}}.$$

Согласно международному стандарту ISO 17636, при рентгеновском контроле ответственных объектов, относящихся к классу В, толщиной до  $d=2,5$  мм, следует использовать ИКИ типа «ступень–отверстие», а видимый на снимке элемент должен иметь размер не более  $D_{\text{с/о}}=0,160$  мм, при этом рекомендуемое фокусное расстояние должно удовлетворять условию:  $f/d \geq 15\Phi^{2/3}$ , где  $f$  – расстояние «источник–объект». Проверим, выполнимо ли такое условие.

Рассмотрим конкретный пример. Объект контроля толщиной 2,5 мм из стали относится к классу В. Его экспонируют посредством источника излучения РАП 220-5 с фокусным пятном  $2,0 \times 2,0$  мм, тогда расстояние «источник–объект» равно  $f=d \cdot 15\Phi^{2/3}=2,5 \cdot 15 \cdot 2^{2/3} \approx 60$  мм, а фокусное расстояние «источник–пленка»:  $F=f+d=60+2,5=62,5$  мм.

Частотно-пространственная характеристика источника излучения с приведенными параметрами  $F$ ,  $f$  и  $\Phi$  имеет вид

$$f(v)_{\text{ист.изл}} = F \frac{\sin\left(\pi v \cdot \frac{\Phi d}{F-d}\right)}{\pi v \cdot \frac{\Phi d}{F-d}} = 62,5 \frac{\sin(0,083\pi v)}{0,083\pi v},$$

аналогично

$$f(u)_{\text{ист.изл}} = 62,5 \frac{\sin(0,083\pi u)}{0,083\pi u}.$$

Обратимся к рис. 9, на котором изображены нормированные ЧПХ рентгеновского аппарата РАП220-5 при фокусных расстояниях 62,5 и 137, мм:

$$\bar{f}_{\text{ист.изл}}(v)_{62,5 \text{ мм}} = \frac{f(v)_{62,5 \text{ мм}}}{f_{\text{max}}(v=0)_{62,5 \text{ мм}}};$$

$$\bar{f}_{\text{ист.изл}}(v)_{137,5 \text{ мм}} = \frac{f(v)_{137,5 \text{ мм}}}{f_{\text{max}}(v=0)_{137,5 \text{ мм}}}.$$

На уровне 0,707 показана так называемая «полоса пропускания» – диапазон пространственных частот, в пределах которого элементы ОК должны иметь пространственные спектры уже «полосы пропускания». Только в этом случае источник излучения сформирует радиационное изображение элемента ОК. На рис. 9 показаны нормированный пространственный спектр элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» ( $D_{c/o}=0,160$  мм):

$$\bar{F}_{D_{c/o}=0,160 \text{ мм}}(v) = \frac{F_{D_{c/o}=0,160 \text{ мм}}(v)}{F_{\text{max}D_{c/o}=0,160 \text{ мм}}(v=0)},$$

а также нормированный пространственный спектр элемента проволочного ИКИ ( $D_{\text{пр}}=0,100$  мм):

$$\bar{F}_{D_{\text{пр}}=0,100 \text{ мм}}(v) = \frac{F_{D_{\text{пр}}=0,100 \text{ мм}}(v)}{F_{\text{max}D_{\text{пр}}=0,100 \text{ мм}}(v=5)}.$$

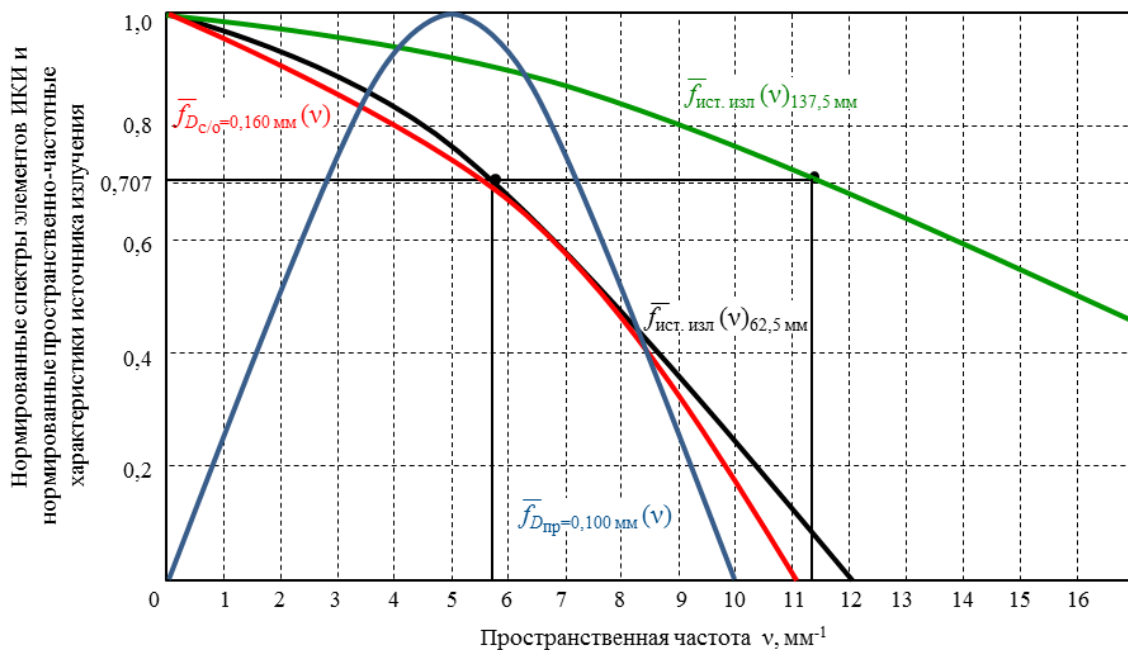


Рис. 9. Нормированные частотно-пространственные характеристики источника излучения при фокусных расстояниях 62,5 и 137,5 мм, а также спектр элемента индикатора качества изображения (ИКИ) типа «ступень–отверстие» ( $D_{c/o}=0,160$  мм) и спектр проволоки ( $D_{\text{пр}}=0,100$  мм)

Для воспроизведения элемента размером  $D_{c/o}=0,160$  мм необходимо выполнение такого условия, чтобы пространственный спектр отверстия полностью укладывался в «полосу пропускания» источника излучения по уровню 0,707 от его максимального значения (рис. 9). Ширина спектра элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» составляет

$$2/D_{c/o}=2/0,160 \text{ мм}=12,5 \text{ мм}^{-1}.$$

При минимальном рекомендуемом фокусном расстоянии, равном 62,5 мм, ЧПХ источника излучения такова, что не сформирует радиационное изображение этого элемента (рис. 9). Расчет показывает, что для того, чтобы изображение отверстия диаметром 0,160 мм было сформировано, фокусное расстояние должно быть не менее 135 мм. Элемент ИКИ типа «ступень–отверстие» симметричен в плоскостях  $fov$  и  $foi$ , и, следовательно, его спектр в плоскости  $foi$  точно такой же, как и в плоскости  $fov$ , а значит, условия формирования радиационного изображения одинаковые.

Рассмотрим условия формирования радиационного изображения проволоки. Согласно требованиям ISO 17636-1 (класс В), минимальный элемент проволочного ИКИ при толщине 2,5 мм должен иметь диаметр 0,1 мм. Минимальное фокусное расстояние 62,5 мм. Если источником излучения является рентгеновский аппарат РАП 220-5 с фокусным пятном  $2 \times 2$  мм, то воспроизведение радиационного изображения проволоки диаметром 0,1 мм (ширина спектра  $10 \text{ мм}^{-1}$ ) на расстоянии 62,5 мм невозможно, так как в плоскости  $fov$  ширина спектра не попадает в «полосу пропускания» источника излучения по уровню 0,707. В плоскости  $foi$  ширина спектра радиационного изображения сформируется полностью, так как ширина спектра проволоки длиной 25 мм практически равна нулю. При увеличении фокусного расстояния до 137,5 мм радиационное изображение проволочного ИКИ ( $D_{пр}=0,1$  мм) будет полностью сформировано. По пространственно-частотным свойствам проволока более благоприятна к формированию радиационного изображения.

## Результаты

### *Оптические изображения элементов ИКИ, регламентированных ISO 19232 (части 1 и 2)*

Сформированные радиационные изображения посредством детектора преобразуются в их оптические изображения [14–16]. Это преобразование осуществляется с некоторой потерей полезной информации, поэтому даже сформированное радиационное изображение не является достаточным условием создания оптического изображения, на котором видны элементы ИКИ. Определим вероятность обнаружения элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» и вероятность обнаружения элемента проволочного ИКИ при анализе оптического изображения на рентгенограмме. Процесс расшифровки рентгенографического изображения заключается в обнаружении области с аномальным отклонением оптической плотности по сравнению с фоном, определении его формы и размеров. Однако фоновые значения оптической плотности снимка не являются постоянной величиной. Установлен нормальный закон распределения оптической плотности рентгенограммы, полученной при равномерно экспонированной радиографической пленке [17, 18]:

$$\Phi(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \int_{S_{\min}}^S \exp \left[ -\frac{(S_\phi - \overline{S_\phi})^2}{2\sigma_S^2} \right],$$

где  $S_\phi$  – оптическая плотность фоновых участков рентгеновского снимка;  $\overline{S_\phi}$  – среднее значение оптической плотности;  $\sigma_S$  – отклонение оптической плотности от среднего значения.

Для радиографической пленки  $\sigma_S$  – это так называемая гранулярность, т. е. воспринимаемые приборными средствами неравномерности оптической плотности равномерно экспонированного эмульсионного слоя радиографической пленки. Количественные

значения гранулярности радиографических пленок разных классов приведены в технических условиях на них, а также в работе [14] (табл. 5).

Таблица 5

**Значения гранулярности радиографических пленок фирмы Agfa  
при оптической плотности рентгенограмм  $S=2$  Б**

Класс радиографической пленки	C1 (D2)	C2 (D3)	C3 (D4)	C4 (D5)	C5 (D7)	C6 (D8)
Гранулярность $\sigma_S$	0,013	0,016	0,020	0,026	0,032	0,035

Рентгенографическое изображение элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» – зона с повышенной оптической плотностью, а рентгенографическое изображение элемента проволочного ИКИ – зона с пониженной оптической плотностью. Распределение оптической плотности на изображениях элементов ИКИ также подчиняется нормальному закону, с теми же значениями отклонения  $\sigma_S$ , но с другими средними значениями оптической плотности (рис. 10).

Для получения оптического изображения ОК толщиной 2,5 мм с элементом ИКИ типа «ступень–отверстие» необходимы следующие условия, диктуемые ISO 17636-1 (класс В):

- анодное напряжение – не более 120 кВ;
- радиографическая пленка класса С3;
- оптическая плотность снимка – не менее 2,3 Б.

Элемент ИКИ должен быть виден. Для этого необходимо, чтобы оптическая плотность его изображения отличалась от оптической плотности фонового участка на величину не менее абсолютного порогового контраста глаза. Величина порогового контраста глаза составляет 0,02 Б [19].

У радиографической пленки класса С3 гранулярность равна 0,020, поэтому, если оптическая плотность элемента ИКИ отличается от фона на 0,02 Б, то его изображение затеряется в шумовых колебаниях оптической плотности. Необходимо, чтобы изображение элемента ИКИ отличалось по плотности по крайней мере на величину  $4\sigma_S$  (рис. 10).

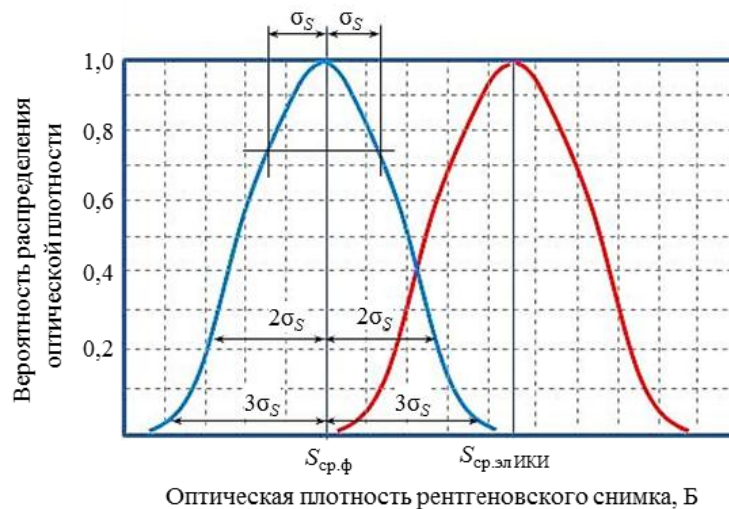


Рис. 10. Распределение оптической плотности рентгеновских снимков на фоновом участке и на изображении элемента индикатора качества изображения (ИКИ) типа «ступень–отверстие»

Проведем расчет для проверки – достигим ли такой контраст по регламенту ISO 17636-1 (класс В).

Радиационный контраст  $K_{\text{радс/о}}$  элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» ( $D_{\text{с/о}}=0,016$  см) при напряжении 120 кВ [18, 19]:

$$K_{\text{радс/о}} = \frac{\mu \delta}{B} = \frac{4,76 \cdot 0,016}{1,5} = 0,051,$$

где  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения материалом ОК,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\delta$  – размер элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» в направлении оси пучка излучения,  $\delta=D_{\text{с/о}}=0,016$  см;  $B$  – фактор накопления рассеянного излучения  $B=1,5$  [20].

В стандарте ISO 17636-1 (класс В) регламентировано использовать пленочную систему класса С3, у которой средний градиент при оптической плотности равен  $g=4,6$ , тогда оптический контраст  $K_o$ , определяемый как произведение радиационного контраста и среднего градиента, составит  $K_o=K_{\text{радс/о}} \cdot g=0,051 \cdot 4,6=0,23$ . С другой стороны, оптический контраст равен относительной разнице оптических плотностей участков изображения элемента ИКИ ( $S_{\text{эл ИКИ}}$ ) и фоновых участков ОК ( $S_{\text{ф}}$ ), Б:

$$K_o = \frac{|S_{\text{эл ИКИ}} - S_{\text{ф}}|}{S_{\text{ф}}} = 0,23,$$

если  $S_{\text{ф}}=2,3$  Б, то  $S_{\text{эл ИКИ}}=2,83$  Б  $> 2,38$  Б.

Результаты расчета показывают, что режим, регламентируемый ISO 17636-1 для стального ОК толщиной 2,5 мм, относящегося к классу В, обеспечивает требуемый контраст оптического изображения для элемента ИКИ типа «ступень–отверстие» диаметром  $D_{\text{с/о}}=0,160$  мм.

Аналогичный расчет проведен для элемента диаметром  $D_{\text{пр}}=0,10$  мм проволочного ИКИ. По требованиям ISO 17636-1 для ОК толщиной 2,5 мм, относящегося к классу В, чувствительность по проволочному ИКИ должна быть не хуже 0,10 мм. По результатам расчета установлено, что требуемый оптический контраст изображения проволоки обеспечен режимом, регламентируемым ISO 17636-1.

### **Заключения**

1. Проведены теоретические исследования формирования радиационных изображений минимальных элементов ИКИ типа «ступень–отверстие» и ИКИ проволочного типа, регламентируемых ISO 17636-1 и преобразования их в оптические. При исследовании применен метод частотно-пространственного анализа.

2. Установлено, что оптические изображения элементов ИКИ типа «ступень–отверстие» на рентгеновских снимках менее четкие, чем элементов ИКИ проволочного типа. Этот факт определяется их конфигурацией.

3. Оценка чувствительности по ИКИ типа «ступень–отверстие» более объективна, чем по проволочному ИКИ. Однако при контроле сварных соединений конструктивные особенности ИКИ типа «ступень–отверстие» менее удобны, чем проволочные ИКИ. Поэтому при контроле сварных швов предпочтительнее применять проволочные ИКИ, а при контроле отливок следует пользоваться ИКИ типа «ступень–отверстие».

4. Индикаторы качества изображения типа «ступень–отверстие» технологичны в большей степени, чем проволочные ИКИ. Они могут быть изготовлены самостоятельно организацией, проводящей радиационный контроль, с последующей аттестацией метрологической службой, а также могут быть использованы при проведении контрольных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 17636-1–2017. Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Ч. 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением пленки. М.: Стандартиформ, 2018. 34 с.
2. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод // Государственные и международные стандарты в области неразрушающего контроля: сб. документов. М.: Науч.-технич. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. Сер. 28. Вып. 6. С. 9–26.
3. ISO 16371-1. Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1: Classification of systems. 2011. 25 p.
4. 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.
5. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. №5. С. 79–82.
6. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
7. Косарина Е.И., Генералов А.С., Демидов А.А. Проблемы в государственной системе стандартизации РФ в области радиационного неразрушающего контроля // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №11 (71). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-86-92.
8. Головинский П.А. Математические модели. М.: Научная и учебная литература, 2011. С. 56–73.
9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: учеб. пособие. 2-е изд. М.: Либроком, 2012. 488 с.
10. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Либроком, 2012. 354 с.
11. Сухарев А.Г. Минимаксные алгоритмы в теории численного анализа. М.: Научная и учебная литература, 2010. 281 с.
12. ISO 19232-3–2013. Неразрушающие испытания. Качество радиографических снимков. Ч. 3: Классы качества изображения. М.: Стандартиформ, 2013. 9 с.
13. Косарина Е.И., Степанов А.В., Крупнина О.А., Демидов А.А. Объективность оценки чувствительности радиационного контроля по эталонам чувствительности, регламентированным ГОСТ 7512 // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам: приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2016. №5. С. 2–10.
14. Добромислов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999. 104 с.
15. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
16. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Кн. 2: Радиационный контроль. 560 с.
17. Сасанпур М., Саввина Н.А. Моделирование процессов рентгенографии в целях оценки выявляемости дефектов в металлических отливках // Вестник МЭИ. 2009. №5. С. 74–77.
18. Демидов А.А., Степанов А.В., Турбин Е.М., Крупнина О.А. О режимах рентгеновского контроля, обеспечивающих формирование радиационных изображений с заданным контрастом // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 80–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85.
19. ISO 11699-1. Контроль неразрушающий. Рентгенографические пленки. Ч. 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии. изд. 2-е. М.: Стандартиформ, 2018. 9 с.
20. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1. С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.