

УДК 20.179.111.4

Е.И. Косарина<sup>1</sup>, О.А. Крупнина<sup>1</sup>, А.А. Демидов<sup>1</sup>, Н.А. Михайлова<sup>1</sup>**ЦИФРОВОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ  
И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ РАДИАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ  
МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42

*Приведено описание теоретических исследований и экспериментов по применению неразрушающего контроля методом цифровой рентгенографии. Определены условия наилучшей адаптации радиационного изображения к применяемому детектору, обеспечивающие заданные показатели цифрового оптического изображения объектов контроля. Получено пригодное для инженерных расчетов относительно простое аналитическое выражение для расчета контраста цифрового изображения при заданной чувствительности контроля.*

**Ключевые слова:** цифровая радиография, радиационное и цифровое изображения, плоскопанельный детектор, контраст изображения, отношение «сигнал/шум» (ОСШ), передаточная функция плоскопанельного детектора.

Е.И. Kosarina<sup>1</sup>, O.A. Krupnina<sup>1</sup>, A.A. Demidov<sup>1</sup>, N.A. Mikhaylova<sup>1</sup>**DIGITAL OPTICAL PATTERN AND ITS DEPENDENCE ON  
THE RADIATION IMAGE AT NON-DESTRUCTIVE TESTING  
BY METHOD OF DIGITAL RADIOGRAPHY**

*The description of theoretical researches and experiments on application of non-destructive testing by method of digital radiography is provided. Conditions of the best adaptation of the radiation image to the applied detector, ensuring the preset parameters of the digital optical pattern of the monitored objects are defined. Rather simple analytical expression suitable for engineering calculations for computation of the digital pattern contrast at the set sensitivity of control has been received.*

**Keywords:** digital radiography, radiation and digital images, flat panel detector, contrast of the image, relation «signal/noise» (OSSh), transfer function of the flat panel detector.

<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**

Неразрушающие методы контроля – неотъемлемая часть технологического процесса при производстве авиационной техники, которая одновременно является самостоятельной технической дисциплиной. Ее развитие определяют возрастающие требования к успешной и безотказной эксплуатации летательных аппаратов [1–3]. Узлы и детали авиационной техники далеко не всегда имеют высокое качество и стабильность своих характеристик. Причиной этого является наличие разного рода дефектов, обнаружение которых – непосредственная задача неразрушающих методов контроля. Одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля является рентгенографический [4]. Несмотря на высокую чувствительность к выявлению внутренних дефектов, наглядность и четкость получаемого изображения, метод неудовлетворителен по следующим причинам:

- высокая трудоемкость, обусловленная фотообработкой экспонированной радиографической пленки;
- невозможность автоматизации процесса контроля;
- наличие расходного серебросодержащего материала.

Развитие новых технологий производства авиационной техники диктует необходимость обнаружения малых по своим размерам специфических дефектов с высокой производительностью. Это требует, в свою очередь, применения производительных рентгеновских методов неразрушающего контроля, исключающих использование радиографической пленки, но без потери качества получаемого изображения. Такой реально альтернативный метод – цифровая радиография с применением плоскопанельных детекторов (ППД). Широкому внедрению цифровой радиографии

в производство предшествует ее продолжительная и тщательная адаптация, связанная с изучением свойств ППД, определением области ее применения в производстве, обучением персонала, созданием нормативно-технической базы. В предлагаемой статье приведено описание теоретических и экспериментальных исследований, целью которых является определение области применения цифровой радиографии в технологическом процессе рентгеновского контроля.

### **Формирование радиационного и цифрового оптического изображений объекта контроля с учетом стохастичности потока излучения от источника**

Для тормозного рентгеновского излучения характерно то, что оно:

- хаотично распределено по энергии во времени и пространстве;
- дискретно по своей природе;
- взаимодействие его с веществом носит вероятностный характер.

Следствием этого является тот факт, что не вся энергия, переданная веществу в некотором объеме, в нем же и остается, но часть энергии, которая остается, составляет поглощенную энергию излучения. Поглощенная энергия, так же как и энергия от источника, стохастична, т. е. недетерминирована, и последующее ее состояние может быть представлено как случайной величиной, так и той, которая может быть предсказана [4, 5].

Фотоны тормозного излучения в рентгеновской трубке образуются в результате торможения электронов на вольфрамовой мишени анода. При этом кинетическая энергия электронов трансформируется двумя путями:

- при прохождении электрона в электронном слое материала мишени происходит потеря кинетической энергии электрона за счет ионизации атомов и повышения температуры мишени – это так называемые ионизационные и тепловые потери;
- если электрон достигает ядра, то при столкновении с ним образуется фотон тормозного излучения, и поскольку к ядру электрон может подойти с любой кинетической энергией, утратив часть ее при прохождении электронного слоя, то энергия тормозного фотона может быть любой, но не более  $e \cdot U$ .

В этом заключается стохастичность процесса рождения фотонов.

На выходе рентгеновского излучателя поток фотонов тормозного излучения является стохастической величиной, имеющей определенные статистические характеристики. Для их описания возможно применение такой вероятностно-статистической модели, которая репрезентативно описывала бы процесс генерации фотонов. В теории математической статистики существует ряд классических распределений случайных величин: распределение Бернулли, биномиальное, распре-

деление Пуассона и др. Все перечисленные распределения можно использовать для разработки вероятностно-статистической модели. По мнению авторов, наиболее соответствующей физическому процессу – генерации фотонов тормозного излучения с заданной энергией – является пуассоновская модель. С ее помощью обычно описывают схему редких событий при некоторых сведениях о характере протекающего процесса [6]. Примем распределение энергии тормозного излучения пуассоновским и обоснуем это.

### *Обоснование пуассоновского распределения энергии тормозного излучения*

Пусть из окна рентгеновской трубки вылетают фотоны, и допустим, что случайное возникновение фотонов удовлетворяет следующим условиям.

1. Вероятность попадания фотона в тот или иной диапазон энергий зависит только от анодного напряжения на рентгеновской трубке. Иными словами – поток фотонов во времени равномерен. Обозначим количество фотонов в единицу времени  $\lambda$ .

2. Фотоны возникают во времени независимо друг от друга, т. е. вероятность появления фотонов в заданный отрезок времени не зависит от того, сколько фотонов возникло в следующий отрезок времени, не перекрывающийся с ним.

3. Вероятность появления двух или более фотонов с одинаковой энергией за короткий промежуток времени  $\Delta t$  пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью возникновения одного фотона [7, 8].

Выделим на оси абсцисс определенный отрезок времени  $t$  и рассмотрим дискретную случайную величину  $X$  – число фотонов, возникающих за этот отрезок времени. Возможные значения величины будут  $0, 1, 2, \dots, m, \dots$ . Поскольку фотоны возникают за данный отрезок времени независимо друг от друга, то теоретически не исключено, что их там окажется сколь угодно много, т. е. данный ряд продолжается неограниченно. Докажем, что случайная величина  $X$  распределена по закону Пуассона. Для этого надо подсчитать вероятность  $P_m$  того, что за некоторое время трубка генерирует ровно  $m$  фотонов. Рассмотрим малый отрезок времени  $\Delta t$  и вычислим вероятность того, что за этот отрезок времени возникнет хотя бы один фотон. Рассуждаем так: поскольку в единицу времени в среднем трубка генерирует  $\lambda$  фотонов, то математическое ожидание числа фотонов, генерированных трубкой за промежуток времени  $\Delta t$ , равно  $\lambda \cdot \Delta t$ . Согласно принятому условию 3 для малого отрезка времени  $\Delta t$  можно пренебречь возможностью появления двух или более фотонов. Поэтому математическое ожидание числа фотонов, генерированных трубкой за продолжительность времени  $\Delta t$  и равное  $\lambda \cdot \Delta t$ , будет приближенно равно вероятности возникновения фотона [9].

Таким образом, с точностью до бесконечно малых величин высшего порядка при  $(\Delta t \rightarrow 0)$  можно считать вероятность того, что за время  $\Delta t$  возникнет хотя бы один фотон, равной  $\lambda \cdot \Delta t$ , а вероятность того, что не появится ни один фотон, равной  $1 - \lambda \cdot \Delta t$ .

Вычислим вероятность  $P_m$  появления  $m$  фотонов за промежуток времени  $\Delta t$ . Разделим этот промежуток  $\Delta t$  на  $n$  равных частей продолжительностью  $\Delta x = \Delta t/n$ . Назовем  $\Delta x$  «пустым» промежутком времени, если за время его продолжительности не возникло ни одного фотона, и «занятым», если за время его продолжительности возник хотя бы один фотон. Тогда вероятность «занятого» промежутка  $-\lambda \cdot \Delta x = \lambda \cdot \Delta t/n$ , вероятность «пустого»  $-1 - \lambda \cdot \Delta t/n$ .

Поскольку, согласно условию 2, появление фотонов в неперекрывающиеся отрезки времени независимо, то  $n$  частей отрезков можно рассмотреть как  $n$  независимых «опытов», в каждом из которых отрезок может быть «занят» с вероятностью  $p = \lambda \cdot \Delta t/n$ .

Найдем вероятность того, что среди  $n$  временных отрезков будет ровно  $m$  «занятых». По теореме о повторных независимых испытаниях эта

вероятность равна:  $C_m^n \left(\frac{\lambda \cdot \Delta t}{n}\right)^m \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \Delta t}{n}\right)^{n-m}$ . Обозначим

$\lambda \cdot \Delta t = a$ , тогда выражение примет вид

$$C_m^n \left(\frac{a}{n}\right)^m \cdot \left(1 - \frac{a}{n}\right)^{n-m}.$$

При достаточно большом  $n$  эта вероятность приближенно равна вероятности того, что за отрезок времени продолжительностью  $\Delta t$  появятся  $m$  фотонов, так как появление двух или больше фотонов за отрезок времени  $\Delta t/n$  имеет пренебрежимо малую вероятность [10]. Для того чтобы найти точное значение  $P_m$ , нужно перейти к пределу при  $n \rightarrow \infty$ :

$$\begin{aligned} P_m &= \lim_{n \rightarrow \infty} C_m^n \left(\frac{a}{n}\right)^m \cdot \left(1 - \frac{a}{n}\right)^{n-m} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(n-1)\dots(n-m+1)a^m(1-a/n)^n}{m! \cdot n^m (1-a/n)^m} = \\ &= \frac{a^m}{m!} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(n-1)\dots(n-m+1)}{n^m} \left[ \left(1 - \frac{a}{n}\right)^{n/a} \right]^a. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(n-1)\dots(n-m+1)}{n^m} = 1$  и  $\lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \left(1 - \frac{a}{n}\right)^{n/a} \right]^a = e^{-a}$ , получаем, что искомая вероятность выражается формулой  $P_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a}$ , где

$a = \lambda \cdot \Delta t$ , т. е. величина  $X$  распределена по закону Пуассона с параметром  $a = \lambda \cdot \Delta t$ .

Следует отметить, что величина  $a$  по смыслу представляет собой среднее число фотонов, проходящее на промежуток времени  $\Delta t$ . Величина

$R_1$  (вероятность того, что величина  $X$  примет положительное значение) в данном случае выражает вероятность того, что за промежуток времени  $\Delta t$  появится хотя бы один фотон:  $R_1 = 1 - e^{-a}$ . Таким образом, стохастичный поток фотонов, вылетающих из окна рентгеновской трубки, подчиняется распределению Пуассона, так как возникшие фотоны появляются независимо друг от друга и их энергия может принимать любое значение в ограниченном диапазоне в зависимости от величины анодного напряжения [10, 11].

#### Формирование радиационного изображения

Если распределение энергии фотонов тормозного излучения пуассоновское, то любая выборка из этого множества фотонов также распределяется по закону Пуассона.

При взаимодействии излучения с веществом часть фотонов поглощается, часть фотонов рассеивается, поэтому на выходе из объекта контроля (ОК) фотонов окажется меньше, но эта часть прошедших фотонов также подчиняется закону пуассоновского распределения [9–11]. Фотоны, прошедшие через ОК, т. е. радиационное изображение, – это и сигнал, несущий полезную информацию об ОК, и шум, вуалирующий полезный сигнал. Считается, что, если число фотонов, составляющих сигнал, равно  $N$ , то число фотонов, составляющих шум, будет  $\sqrt{N}$ , т. е. в пучке фотонов фотоны шума и полезного сигнала неотделимы, но справедливым будет утверждение, что выборка фотонов, равная  $\sqrt{N}$ , также подчиняется закону распределения Пуассона.

Качество изображения определено его свойствами: контрастностью, разрешающей способностью и отношением «сигнал/шум» (ОСШ). При воспроизведении мелких и малоконтрастных дефектов перечисленные величины связаны между собой.

В рентгеновской и гамма-дефектоскопии различают радиационное изображение – распределение экспозиционной дозы или мощности экспозиционной дозы излучения, прошедшего ОК, и световое (оптическое) изображение, сформированное видимым излучением, непосредственно воспринимаемое глазом оператора (рис. 1) [12].

Качество оптического изображения как при радиоскопическом, так и при радиографическом контроле зависит от свойств радиационного изображения. Полезная информация об объекте контроля формируется на стадии взаимодействия излучения с материалом ОК.

В общем случае радиационный контроль можно рассматривать как систему передачи информации, для которой дефект в контролируемом изделии является сигналом, полезной информацией, действующей на вход системы одновременно с шумом. Рассмотрим условия прохождения сигнала и шума через систему радиационного контроля.

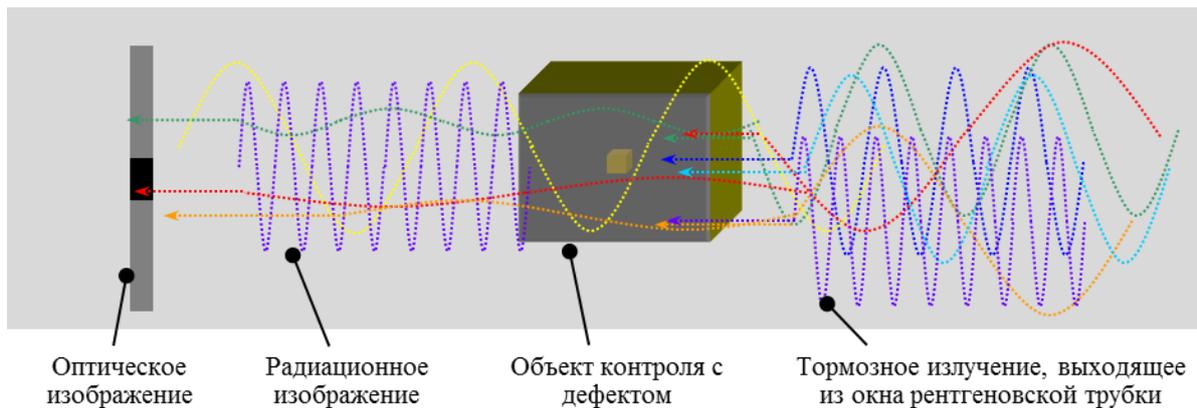


Рис. 1. Модель формирования радиационного и оптического изображения объекта контроля при радиационном контроле

Согласно пуассоновскому распределению вероятности:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a},$$

где  $a$  – некая константа;  $m=1, 2, 3, \dots, n$ .

Для случайной величины, распределенной по закону Пуассона, характерен факт совпадения математического ожидания и дисперсии. Так, случайной величиной является перенос энергии  $F_E$ , выходящей из окна рентгеновской трубки:

$$F_E = \frac{dE}{ds} = \frac{\varepsilon \cdot dN}{ds} = h\nu \frac{dN}{ds},$$

где  $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – энергетическая постоянная Планка;  $dN$  – число фотонов;  $\nu$  – частота колебаний фотонного излучения,  $c^{-1}$ ;  $ds$  – площадь поперечного сечения элементарной сферы,  $m^2$ .

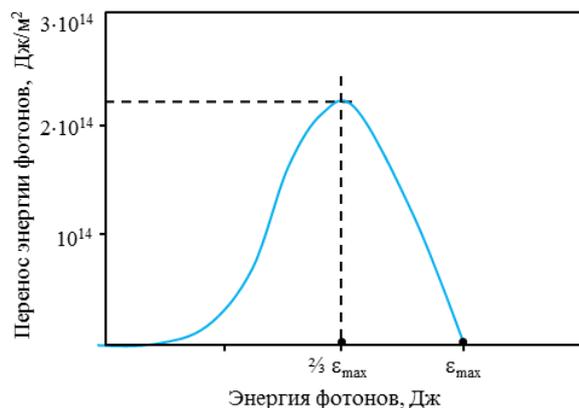


Рис. 2. Распределение энергетического спектра тормозного излучения ( $\varepsilon_{\max}=h\nu_{\max}=eU$ )

В результате проведенных математических преобразований получили для потока энергии тормозного фотонного излучения (рис. 2) [13]:

– математическое ожидание

$$M(E)=e^{-U} \cdot p_i = a e^{-U} = 2/3 \cdot e^{-U};$$

– дисперсия

$$D(E)=M(E)^2 - [M(E)]^2 = (ae^{-U})^2 + ae^{-U} - (ae^{-U})^2 = ae^{-U},$$

где  $a=2/3$ .

Если на ОК падают фотоны, энергия которых подчиняется пуассоновскому распределению, то очевидно, что при выходе из ОК распределение энергии фотонов также подчиняется закону распределения Пуассона с измененными математическим ожиданием и дисперсией. Если излучение ослаблено ОК, содержащим дефект, то теневое распределение излучения содержит полезный сигнал в виде радиационного контраста дефекта и флуктуаций фотонов, обусловленных пуассоновским распределением, их случайным взаимодействием с материалом ОК. В работе [14] установлено, что контраст радиационного изображения  $K_p$ , содержащего полезный сигнал и шум, обусловленный флуктуациями фотонов при пуассоновском распределении, выражается соотношением

$$K_p = K_d \cdot \frac{ОСШ_p}{1+ОСШ_p},$$

где  $K_d$  – радиационный контраст дефекта ( $K_d=\mu\delta/B$ ,  $\mu$  – эффективный коэффициент ослабления излучения,  $см^{-1}$ ;  $\delta$  – размер дефекта вдоль оси пучка излучения;  $B$  – фактор накопления рассеянного излучения);  $ОСШ_p$  – отношение «сигнал/шум» радиационного изображения.

#### Формирование цифрового изображения

Рассмотрим процесс рентгеновского контроля как систему последовательной передачи информации (рис. 3) – преобразование радиационного изображения в оптическое посредством детектора. Если в качестве детектора изображения используют ППД, то сигнал на выходе представляет собой цифровое оптическое изображение [15, 16]. Поскольку ППД сам по себе представляет сложную систему электронных узлов, анализировать прохождение и преобразование сигнала и шума

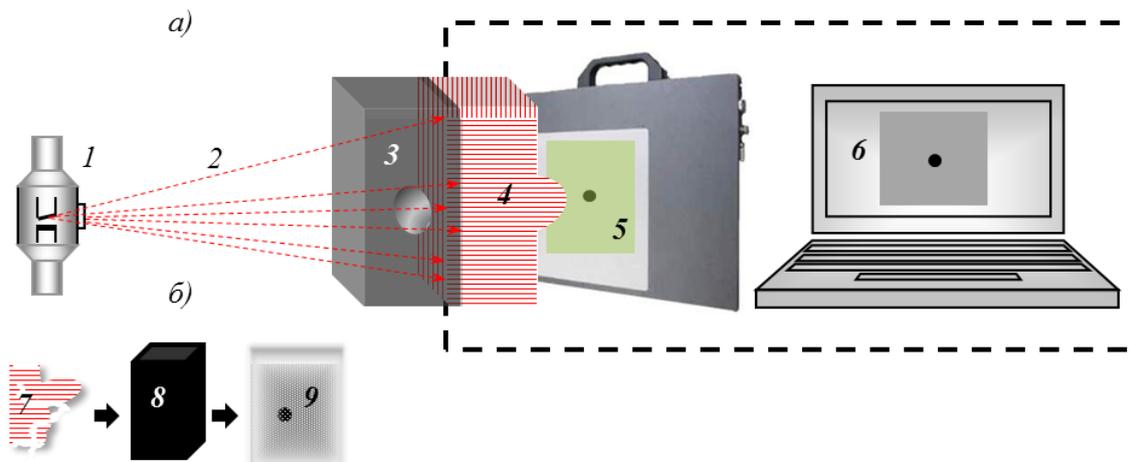


Рис. 3. Схема рентгеновского контроля с плоскочувствительным детектором (а):  
 1 – рентгеновская трубка; 2 – рентгеновское излучение; 3 – объект контроля; 4 – радиационное изображение; 5 – плоскочувствительный детектор; 6 – монитор;  
 эквивалентная схема – ППД–«черный ящик» (б): 7 – входной сигнал; 8 – «черный ящик»; 9 – выходной сигнал

в каждом из этих узлов – это сложные, а для технолога зачастую ненужные операции. Примем, что ППД представляет собой некий «черный ящик», на вход которого поступает радиационное изображение, а на выходе визуализируется цифровое изображение.

Цифровое изображение представляет собой нюансную картину дискретных колебаний серого цвета – от белого, соответствующего  $S_б=0$ , до черного, соответствующего  $S_ч=1$ . Величина элементарного скачка ( $\Delta S_i$ ) от фиксированного серого цвета к фиксированному более темному серому

цвету составляет:  $\Delta S_i = \frac{S_ч - S_б}{2^n}$ , где  $n$  – разрядность детектора [17, 18].

Пусть детектор имеет 8 разрядов. Это означает, что переход от белого до черного цвета осуществляется за 256 скачков. Пороговый контраст глаза при нормальной яркости не менее  $300 \text{ кд/м}^2$  составляет  $0,05 \text{ кд/м}^2$ . Для того чтобы аномалия была зафиксирована глазом, нужно, чтобы яркость ее изображения отличалась от яркости фона не менее чем на 13 скачков:

$$\Delta S_{ц.д} = 13 \Delta S_i = 13 \frac{S_ч - S_б}{2^n}, \text{ где } \Delta S_{ц.д} = S_д - S_ф - \text{приращение}$$

яркости на цифровом изображении дефекта  $S_д$  по сравнению с яркостью фона  $S_ф$ . Цифровое изображение помимо полезного сигнала содержит шум. Источником шума является размер пикселя матрицы. На изображении цифровой шум ( $S_{ц.ш}$ ) заметен в виде наложенной маски из пикселей случайной яркости. Цифровое изображение может быть записано в виде:  $S_{ц.и} = \Delta S_{ц.д} - S_{ц.ш}$ . Определим контраст цифрового изображения  $K_{ц.и}$ , поделив

$$\text{обе части уравнения на } S_ф - \frac{S_{ц.и}}{S_ф} = \frac{S_{ц.д}}{S_ф} - \frac{S_{ц.ш}}{S_ф}, \text{ полу-}$$

чим  $K_{ц.и} = K_{ц.д} - K_{ц.ш}$ , где  $K_{ц.д}$  – контраст цифрового изображения дефекта;  $K_{ц.ш}$  – контраст цифрового изображения шума. Тогда передаточная функция  $\Psi$  для ППД – «черного ящика» – определится следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{K_{ц.и}}{K_p} = \frac{K_{ц.д} - K_{ц.ш}}{K_d \cdot \frac{\text{ОСШ}_p}{1 + \text{ОСШ}_p}} = \frac{\text{ОСШ}_p + 1}{\text{ОСШ}_p} \left[ \frac{K_{ц.д}}{K_d} \cdot \frac{K_{ц.ш}}{K_d} \right] = \\ &= \frac{\text{ОСШ}_p + 1}{\text{ОСШ}_p} \left[ \Psi_d - \frac{K_{ц.ш} \cdot K_{ц.д}}{K_d \cdot K_{ц.д}} \right] = \\ &= \frac{\text{ОСШ}_p + 1}{\text{ОСШ}_p} \left[ \Psi_d - \frac{\Psi_d}{\text{ОСШ}_{ц.и}} \right] = \\ &= \Psi_d \left[ \frac{\text{ОСШ}_{ц.и} - 1}{\text{ОСШ}_{ц.и}} \right] \cdot \left[ \frac{\text{ОСШ}_p + 1}{\text{ОСШ}_p} \right]. \end{aligned}$$

Окончательно получим:

$$\Psi = \Psi_d \left[ \frac{\text{ОСШ}_{\text{вх}} - 1}{\text{ОСШ}_{\text{вх}}} \right] \cdot \left[ \frac{\text{ОСШ}_{\text{вх}} + 1}{\text{ОСШ}_{\text{вх}}} \right],$$

где  $\text{ОСШ}_{\text{вх}}$  и  $\text{ОСШ}_{\text{вх}}$  – есть ни что иное, как  $\text{ОСШ}_p$  и  $\text{ОСШ}_{ц.и}$  соответственно;  $\Psi_d$  – передаточная функция изображения дефекта:

$$\Psi_d = \frac{K_{ц.д}}{K_d} = \frac{\Delta S_{ц.д}}{S_ф} = \frac{B}{\mu \delta}.$$

Значение  $\text{ОСШ}_{\text{вх}}$  – для конкретного объекта контроля может быть вычислено с точностью до константы с учетом выбранного анодного напряжения на рентгеновской трубке и пуассоновского распределения энергии фотонов, исходящих от источника излучения [14, 19, 20]. Согласно данным, приведенным в таблице, значения  $\text{ОСШ}_{\text{вх}}$  рассчитаны по формуле  $\text{ОСШ}_{\text{вх}} = \text{const} \cdot e^{-\mu d/2} \cdot I^{1/2}$ .

Зависимость  $K_p$  и ОСШ<sub>p</sub> радиационного изображения от напряжения на аноде ( $U_a$ ) рентгеновской трубки для стального объекта толщиной 6 мм

$U_a$ , кВ	$\mu$ , см <sup>-1</sup>	$K_p = \mu \cdot \delta$	ОСШ <sub>p</sub>
80	12,25	0,148	0,24
100	9,42	0,112	0,61
120	4,67	0,056	2,70
150	2,92	0,034	5,14
200	2,13	0,026	7,49
250	1,34	0,016	10,59
300	1,15	0,014	12,64
400	1,08	0,010	14,60

Значение ОСШ<sub>вых</sub> определяется по цифровому изображению на ППД. Таким образом, располагая исходными данными – размером недопустимого дефекта и материалом объекта контроля – можно прогнозировать качество изображения, ориентируясь на значения ОСШ<sub>вх</sub> и напряжение на рентгеновской трубке.

#### Заключения

1. Доказана справедливость принятого предположения о пуассоновском распределении энергии фотонов, выходящих из окна рентгеновской трубки.

2. Для упрощения анализа цифрового изображения, сформированного плоскопанельным детектором (ППД), принято считать, что входным воздействием на него является контраст радиационного изображения, а выходным результатом – контраст цифрового изображения.

3. Получено пригодное для инженерного расчета выражение для передаточной функции плоскопанельного детектора (ППД), позволяющего посредством исходных данных об объекте контроля прогнозировать качество получаемого цифрового изображения и определить, как следует изменить параметры контроля, чтобы при необходимости его улучшить.

#### 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. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // *Металлы Евразии*. 2017. №3. С. 2–6.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
4. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: уч. пособие. 2-е изд. М.: Либроком, 2012. 488 с.
5. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Либроком, 2012. 354 с.
6. Сухарев А.Г. Минимаксные алгоритмы в теории численного анализа. М.: Науч. и учеб. лит., 2010. 281 с.
7. Головинский П.А. Математические модели. М.: Науч. и учеб. лит., 2011. Кн. 1. С. 56–73.
8. Гильдерман Ю.И. Закон и случай. Новосибирск: Наука, 1991. 200 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 832 с.
10. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика: учеб. М.: Либроком, 2014. 352 с.
11. Боровков А.А. Теория вероятностей. М.: Либроком, 2016. 656 с.
12. 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.
13. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 562–574. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-562-574.
14. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Влияние энергии излучения на формирование оптического изображения при рентгеновском контроле // *Дефектоскопия*. 2018. №3 С. 58–63.
15. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // *Сфера Нефтегаз*. 2009. №9. С. 26–37.
16. Майоров А.А. Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин – что это такое? // *В мире неразрушающего контроля*. 2004. №3 (25). С. 42–43.
17. 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.
18. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
19. Moreira E.V., Fritz M.C. Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection // *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires*. 2007. 13 p.
20. Bavendiek K., Heike U., Meade W.D. et al. New Digital Radiography Procedure Exceeds Film Sensitivity Considerably in Aerospace Applications ECNDT. 2006. 16 p.