

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ, ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 620.179

Н.А. Саввина, Е.И. Косарина, К.Г. Мирошин, А.В. Степанов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В статье рассмотрены вопросы вероятности обнаружения дефектов в виде несплошностей в металлических и неметаллических материалах.

Процесс обнаружения дефекта радиационным методом неразрушающего контроля сводится к следующему. Оператор исследует радиографический снимок объекта контроля (ОК) и регистрирует отклонение оптической плотности, причиной которого (отклонения) не являются конструктивные особенности самого объекта (изменение толщины, наличие внутренних элементов и т. п.). Таким образом, вероятность обнаружения дефекта зависит от качества исследуемого изображения (его четкости и контрастности), остроты зрения оператора, его физического состояния, свойств дефекта (размеров, его природы, места расположения в ОК).

На участках радиографического снимка объекта контроля, где отсутствуют дефекты, оптическая плотность S_{ϕ} (фоновая) не является строго постоянной величиной, ее значения по всей площади рентгенограммы принимают различные значения, в пределах от S_{\min} до S_{\max} . Проведем теоретические исследования фоновых участков оптической плотности радиографических снимков. Неоднородность оптической плотности снимка, оцениваемая визуально (зернистость) или с помощью микрофотометра (гранулярность), возникает в результате:

- статистических колебаний числа микрокристаллов бромида серебра в желатине на единице площади радиографической пленки;
- квантовых флуктуаций излучения;
- образования «клубков» зерен на длине свободного пробега фотоэлектронов и электронов отдачи.

Поэтому зернистость пленки сильно растет с ростом энергии фотонов до 500 кэВ; при дальнейшем увеличении энергии фотонов излучения рост зернистости пленки незначителен. Таким образом, зернистость пленки носит случайный характер и зависит от суммарного воздействия многих случайных факторов с неизвестными законами распределения. При этом колебания оптической плотности S_{ϕ} группируются вокруг среднего значения: по требованиям нормативных документов оптическая плотность должна быть не менее 1,5 Б (ГОСТ) и 2,0–2,3 Б (EN). Поскольку оптическую плотность фоновых участков радиограмм S_{ϕ} можно измерить в каждой точке и ее изменение от точки к точке может быть сколь угодно малым, обоснованно предположить, что статистическое распределение вероятности величины S_{ϕ} непрерывно и подчиняется нормальному закону.

Если случайная величина S распределена по нормальному закону, то плотность ее распределения имеет вид:

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(S-S_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}.$$

Нетрудно убедиться, что эта функция обладает основными свойствами плотности. Она не отрицательна, и интеграл от нее

$\int_{-\infty}^{\infty} f(S) dS = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(S-S_{cp})^2}{2\sigma^2}} \cdot dS = 1$ в силу равенства интеграла $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt = \sqrt{2\pi}$, установленного Пуассоном (S_{cp} – среднее значение нормально распределенной величины S ; σ – ее среднее квадратическое отклонение [1, 2]).

Исследуем график функции $f(S)$. Его называют кривой Гаусса. Определим точки экстремума $f(S)$. При $S=S_{cp}$ производная $f'(S_{cp})=0$. Максимальное значение функция $f(S)$ принимает при $S=S_{cp}$.

$$[f(S)]_{\max} = f(S_{cp}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}.$$

По второй производной функции $f(S)$ определим точки перегиба, отделяющие выпуклые участки кривой от вогнутых. При $S=S_{cp}-\sigma$ и $S=S_{cp}+\sigma$ $f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-1/2}$.

Кривая $f(S)$ представляет собой колоколообразную кривую с вершиной в точке с абсциссой $S=S_{cp}$ и двумя симметрично расположенными точками перегиба (рис. 1). Изменение величины S_{cp} смещает кривую вправо (S_{cp} растет) или влево (S_{cp} падает). Что касается второго параметра (σ), то чем меньше σ , тем выше и уже холм кривой: σ – мера рассеяния оптической плотности снимка S . Чем меньше σ , тем плотнее значения случайной величины группируются около среднего значения оптической плотности снимка, т. е. тем больше вероятность таких значений оптической плотности снимка S , которые близки к среднему значению S_{cp} .

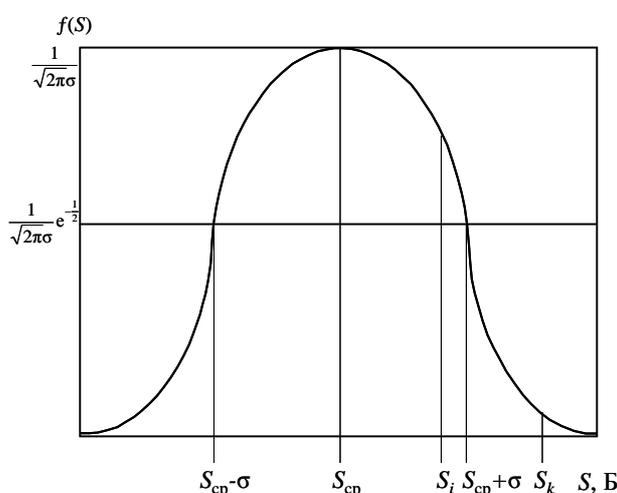


Рис. 1. Кривая распределения оптической плотности рентгенограмм по нормальному закону

Если S – нормальная случайная величина с параметрами S_{cp} и σ , то вероятность (P) того, что на участках радиографического снимка объекта контроля, не содержащих дефектов, S принимает значения в промежутке $[S_i; S_k]$, определяется равенством:

$$P(S_i \leq S \leq S_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{S_i}^{S_k} f(S) dS = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{S_k - S_{cp}}{\sigma}} e^{-\frac{S^2}{2}} \cdot dS - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{S_i - S_{cp}}{\sigma}} e^{-\frac{S^2}{2}} \cdot dS.$$

Интеграл в правой части равенства – «не берущийся», его можно вычислить приближенно для конкретных значений S_i и S_k . Для этого введем функцию, называемую *интегралом вероятности* (функцией Лапласа)

$$\Phi(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^S e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx,$$

тогда искомая вероятность выразится как разность значений:

$$P(S_i \leq S \leq S_k) = \Phi\left(\frac{S_k - S_{cp}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{S_{cp} - S_i}{\sigma}\right).$$

Для функции нормального закона распределения составлены достаточно подробные таблицы, пользуясь которыми нетрудно вычислить вероятность того, что оптическая плотность фоновых участков радиографического снимка с параметрами S_{cp} ; σ находится в пределах $[S_i; S_k]$. Для того чтобы оценить вероятность отклонения оптической плотности фоновых участков снимка S_{ϕ} от среднего значения S_{cp} на величину не более ΔS , используют так называемое *правило трех сигм*. В качестве ΔS – величины отклонения от среднего значения S_{cp} – берут число, кратное σ : т. е. ΔS равна σ ; 2σ ; 3σ , тогда соответствующие значения вероятности, вычисленные по таблице [3], составят:

$$P(|S_{\phi} - S_{cp}| \leq \sigma) = 2\Phi(\sigma) = 0,683;$$

$$P(|S_{\phi} - S_{cp}| \leq 2\sigma) = 2\Phi(2\sigma) = 0,954;$$

$$P(|S_{\phi} - S_{cp}| \leq 3\sigma) = 2\Phi(3\sigma) = 0,997.$$

Правило трех сигм показывает, что отклонение оптической плотности снимка на величину более 3σ не является причиной зернистости (шумовых колебаний эмульсионного слоя пленки).

Оптическая плотность рентгенограмм S – физическая величина, поэтому не может иметь отрицательного значения, она меняется в пределах от S_{min} до некоторого максимального значения S_{max} . Величина S_{min} равна оптической плотности вуали $S_{вуаль}$ – оптической плотности неэкспонированной радиографической пленки, подвергшейся химико-фотографической обработке ($S_{вуаль} \leq 0,3$ Б). Максимальная оптическая плотность S_{max} , пропорциональная массе серебра на единицу площади пленки, для фотоматериалов с двойным слоем эмульсии может достигать 12–16 Б [4]. В рентгеновской дефектоскопии максимальная оптическая плотность рентгенограмм, ограниченная яркостью негатоскопов, не превышает 3,5–4,5 Б. Величина σ зависит от типа радиографической пленки, средней оптической плотности снимка и приведена в нормативных документах на пленку (по Европейским нормам EN 584-1) в виде величин:

– $(\sigma S)_{max}$ – максимальная гранулярность при оптической плотности снимка $S=2+S_{вуаль}$;

– $(g/\sigma_s)_{min}$ – минимальное отношение «градиент/шум».

Для радиографических пленок «Agfa» эти величины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие характеристики радиографических пленок «Agfa»

Класс пленок по EN 584-1	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Тип пленки	D2	D3	D4	D5	D7	D8
$(g/\sigma_s)_{min}$ при $S=2+S_{вуаль}$	392	303	232	177	144	117
$(\sigma S)_{max}$ при $S=2+S_{вуаль}$	0,013	0,016	0,020	0,026	0,032	0,035

Влияние локальных дефектов на оптическую плотность радиографических снимков

При рентгенографическом контроле режим рентгеновского просвечивания выбирают таким образом, чтобы оптическая плотность фоновых участков рентгенограммы была не менее 1,5 Б (стандарты РФ) или 2,0 Б (европейские стандарты EN). Эти величины оптической плотности снимков гарантируют их достаточный контраст. Таким образом, при $S_{cp}=1,5$ (2,0) Б, значения фоновых участков рентгенограммы $S_{\phi}=S_{cp} \pm \Delta S$. Если объект контроля не содержит дефектов, то неравенство $|\Delta S| \leq 3\sigma$ обусловлено только гранулярностью рентгенограммы.

Дефект в изделии – случайное явление и проявляется на снимке в виде участка рентгенограммы с повышенной или пониженной оптической плотностью. Регистрация дефектов происходит по определению разницы между оптической плотностью изображения дефекта S_d и ее фоновым значением S_ϕ . Если разница между S_d и S_ϕ выше порогового значения $\Delta S_{\text{пор}}$, то такой дефект может быть обнаружен (рис. 2, а), в противном случае дефект не выявляется (см. рис. 2, б). Характер и величина разницы оптической плотности радиографического снимка, вызванной наличием дефекта, зависят от типа и размера дефекта.

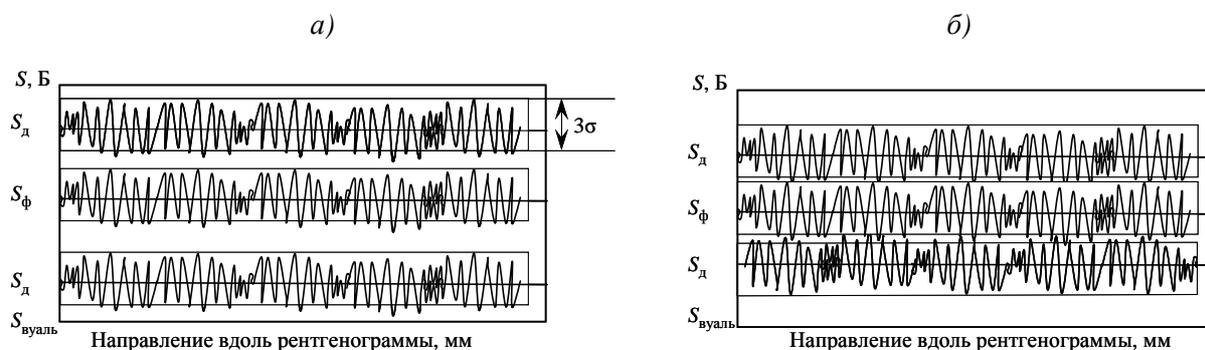


Рис. 2. Распределение оптической плотности вдоль линии ее измерения на дефектном и фоновом участках рентгенограммы: а – обнаружение дефекта; б – необнаружение дефекта

Для определения вероятности обнаружения дефекта будем считать, что она равна 1, если оптическая плотность его изображения S_d и оптическая плотность фоновых участков радиографического снимка S_ϕ отличаются на величину, равную пороговому значению $S_{\text{пор}}$ или больше него:

$$|S_d - S_\phi| \geq \Delta S_{\text{пор}}$$

Если $S_\phi = \text{const}$ и $S_d = \text{const}$, то вероятность обнаружения дефекта может быть представлена в виде:

$$P(S_d) \begin{cases} 1, & \text{при } S_{\text{взаль}} \leq S_d < (S_\phi - \Delta S_{\text{пор}}) \text{ и } (S_\phi + \Delta S_{\text{пор}}) < S_d \leq S_{\text{max}} \\ 0, & \text{при } (S_\phi - \Delta S_{\text{пор}}) < S_d < (S_\phi + \Delta S_{\text{пор}}). \end{cases}$$

Функция $P(S_d)$ представлена на рис. 3.

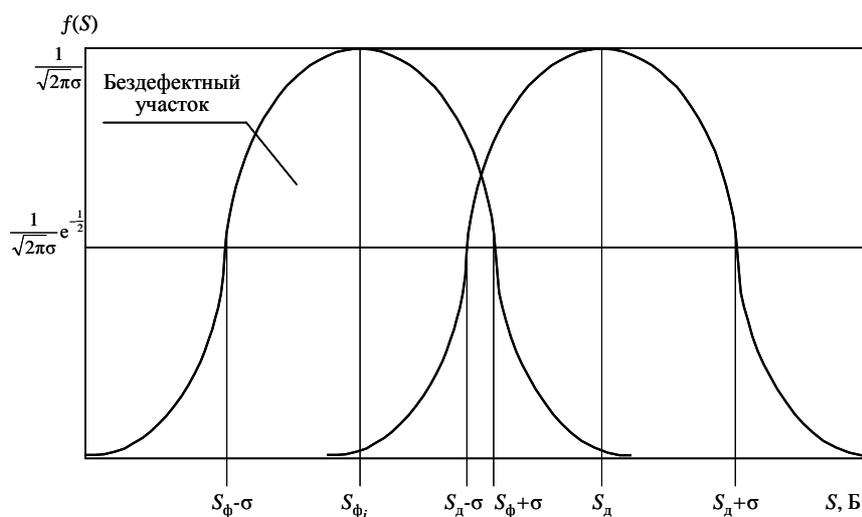


Рис. 3. Распределение оптической плотности рентгенограмм

В действительности в силу гранулярности оптической плотности рентгеновских снимков на фоновых участках, как сказано выше, оптическая плотность является не постоянной, а случайной величиной, распределенной по нормальному закону с параметрами S_{cp} и σ . На участках рентгенограммы, изображающих дефекты, оптическая плотность также не является постоянной величиной. Это нормально распределенная случайная величина с параметрами $S_{д,ср}$ и σ . Плотность распределения нормальной случайной величины S_d :

$$f(S_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(S_d - S_{д,ср})^2}{2\sigma^2}}.$$

Для нее также справедливо правило трех сигм:

$$P(|S_d - S_{д,ср}| \leq \sigma) = 2\Phi(\sigma) = 0,683;$$

$$P(|S_d - S_{д,ср}| \leq 2\sigma) = 2\Phi(2\sigma) = 0,954.$$

Оценим, какова должна быть минимальная разница оптических плотностей участков рентгенограммы, изображающих дефекты, по сравнению с фоновыми участками при заданном значении вероятности. Пусть минимальное значение $\Delta S_{пор\ min} = 0,02$ Б. Для обнаружения дефекта с вероятностью $P = 0,997$:

$$S_d - 3\sigma - S_{ф} - 3\sigma = \Delta S_{пор\ min}.$$

При $S_{ф} = 2$, у радиографической пленки D7 «Agfa» максимальное значение гранулярности $\sigma = 0,032$. Подставив эти значения в равенство, получим:

$$|S_d - S_{ф}| = 6\sigma + \Delta S_{пор\ min} = 6 \cdot 0,032 + 0,02 = 0,212 \text{ Б.}$$

Аналогично для вероятностей

$$P = 0,954: |S_d - S_{ф}| = 4\sigma + \Delta S_{пор\ min} = 0,148 \text{ Б.}$$

$$P = 0,683: |S_d - S_{ф}| = 2\sigma + \Delta S_{пор\ min} = 0,084 \text{ Б.}$$

Оценим размер минимального дефекта δ , обнаруживаемого с заданной вероятностью. Воспользуемся выражением для минимального обнаруживаемого на рентгеновском снимке дефекта δ (абсолютная чувствительность контроля) [5]:

$$\delta = \frac{2,3 \Delta S_{пор\ min}}{\gamma} \cdot \frac{B}{\mu},$$

где γ – коэффициент контрастности радиографической пленки (для D7 $\gamma = 4,5$); μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см^{-1} (при контроле стальной пластины толщиной 12 мм ГОСТ 20426 требует выбора такой энергии рентгеновского излучения, при которой $\mu = 2,92 \text{ см}^{-1}$); B – фактор накопления рассеянного излучения (для стали толщиной 12 мм $B = 3,0$);

тогда
$$\delta = \frac{2,3 \cdot 0,214 \cdot 3,0}{4,0 \cdot 2,82} \approx 0,31 \text{ см.}$$

Дефект, размер которого в направлении излучения составляет 1,31 мм, расположенный в объекте контроля из стали толщиной 12 мм, может быть обнаружен с вероятностью $P = 0,997$. Относительная (процентная) чувствительность, равная процентному отношению δ (мм) к толщине объекта контроля в направлении излучения d (мм) составляет:

$$K = (\delta/d) \cdot 100\% = 10,9\%.$$

С вероятностью $P = 0,954$ можно достичь чувствительности контроля $K = 7,54\%$ ($\delta = 0,90$ мм), с вероятностью $P = 0,683$ можно достичь чувствительности контроля $K = 4,25\%$ ($\delta = 0,51$ мм).

Расчет других значений вероятности обнаружения минимальных дефектов (чувствительности) был проведен с использованием таблиц математической статистики [2].

Зависимость вероятности обнаружения дефектов при разных значениях их относительного размера, полученная расчетным путем, представлена на рис. 4. Аналогичный теоретический расчет для объекта из алюминиевого сплава представлены в табл. 2.

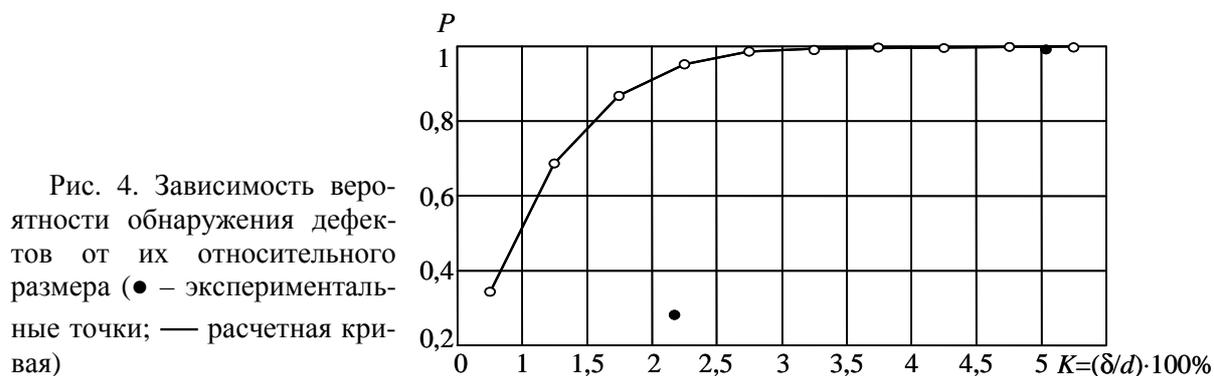


Таблица 2

Зависимость вероятности обнаружения дефектов при их разных относительных размерах ($K=(\delta/d) \cdot 100\%$)

$K, \%$	1,0	1,4	2,0	2,6	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
P	0,355	0,683	0,748	0,954	0,981	0,982	0,997	0,998	0,998

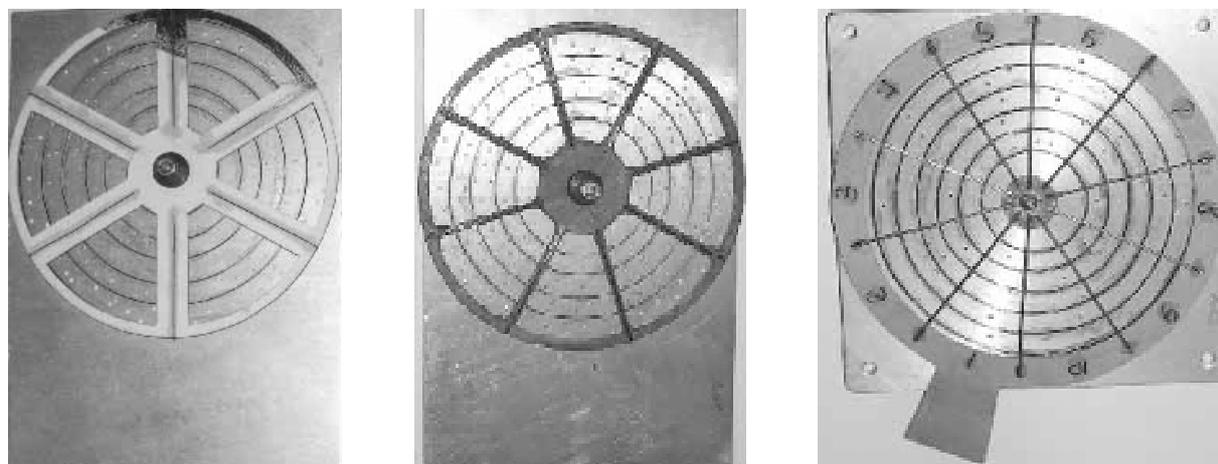


Рис. 5. Тест-образцы для проведения экспериментальных исследований по определению вероятности обнаружения дефектов

Для практической проверки расчетных значений вероятности обнаружения дефектов при разных значениях чувствительности контроля были разработаны специфические тест-образцы (рис. 5). На алюминиевой пластине с помощью медной проволоки размечены концентрические круги (кольца), в которых расположены сквозные отверстия разного диаметра. Кольца разделены вращающимися медными реперами на сектора. При каждом повороте реперов на случайно выбранную величину отверстия относительно проволок располагаются случайно. Зная общее количество отверстий в кольцах и определяя их количество на снимке, вычисляем вероятность как отношение количества обнаруженных дефектов к их общему количеству. Для получения экспериментальных данных вероятности, тест-образцы просвечивали, помещая их на пластины из алюминиевого сплава разной толщины. Так, при общей радиационной толщине объекта контроля 45 мм и относительном размере дефекта $K=5\%$ вероятность обнаружения искусственных дефектов $\varnothing 0,5$ мм и глубиной 2,0 мм близка к 1. При относительном размере дефектов $K=2\%$ вероятность обнаружения искусственных дефектов $\varnothing 0,5$ мм и глубиной 1,0 мм составляет 0,28.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гильдерман Ю.И. Закон и случай. – Новосибирск: Наука, 1991, 200 с.
2. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика: Учебн. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1984, 248 с.
3. Большов Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983, 416 с.
4. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1. Кн. 2. Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003, 560 с.
5. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1999, 104 с.