



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

# Дефектоскопия



*Неразрушающий контроль*

*Техническая диагностика*

*Анализ материалов*

№ 5

2024



НАУКА

— 1727 —

# ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

№ 5  
 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### Акустические методы

- А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин, С.А. Кокoлев, С.В. Ромашкин, Д.С. Тихонов.** Расчет АРД-диаграмм для изображений, восстановленных методом цифровой фокусировки апертуры ..... 3
- Л. Ю. Могильнер, В. А. Сясько, А. И. Шихов.** Моделирование дефектов в ультразвуковой дефектоскопии. Состояние и перспективы ..... 13
- В.Н. Беркович, С.И. Буйло, Б.И. Буйло.** Реконструкция амплитуды сигналов акустической эмиссии на основе ее математического моделирования как случайного процесса ..... 36

### Радиационные методы

- В.А. Удод, С.Э. Воробейчиков, С.П. Осипов.** Математическое моделирование радиационных прозрачностей в счетной реализации метода дуальных энергий на основе аналогового амплитудного анализа исходных сигналов ..... 49

### Тепловые методы

- А.О. Чулков, В.П. Вавилов, О.М. Жуков.** Тепловой неразрушающий контроль трещин в газотурбинных лопатках с использованием ультразвуковой стимуляции ..... 61

### По материалам XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

- Р. А. Соколов, К. Р. Муратов.** Оценка временного сопротивления стали по параметрам гармонического спектра кривой перемещения ..... 71
- Информация ..... 76

## РАСЧЕТ АРД-ДИАГРАММ ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АПЕРТУРЫ

© 2024 г. А.Е. Базулин<sup>1\*</sup>, Е.Г. Базулин<sup>1</sup>, А.Х. Вopilкин<sup>1</sup>, С.А. Кокорев<sup>1</sup>, С.В. Ромашкин<sup>1</sup>, Д.С. Тихонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,  
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»  
\*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024; после доработки 09.04.2024  
Принята к публикации 03.05.2024

Широкое внедрение антенных решеток в практику ультразвукового контроля позволило получать изображения отражателей с использованием либо технологии фазированной антенной решетки, либо технологии цифровой фокусировки апертуры (ЦФА). Однако многие действующие нормативные документы, регламентирующие правила проведения ультразвукового неразрушающего контроля в атомной энергетике, нефтехимии, газодобывающей промышленности и т.п., требуют определять эквивалентные размеры отражателей. В статье предложена методика расчета ЦФА—АРД-массива для определения диаметра эквивалентного плоскодонного отверстия (ПДО) при анализе изображения. Показано, что эффективнее работать не с амплитудой изображения, а с интегральной амплитудой. Численные эксперименты показали точность определения диаметра ПДО порядка  $\pm 0,1$  мм. В модельных экспериментах точность определения диаметра ПДО оказалась по модулю меньше 0,2 мм.

*Ключевые слова:* антенная решетка, АРД-диаграмма (DAC curve), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка апертуры (ЦФА).

## CALCULATION OF THE DAC CURVE FOR IMAGES RECONSTRUCTED BY DIGITAL APERTURE FOCUSING METHOD

© 2024 А.Е. Bazulin<sup>1\*</sup>, E.G. Bazulin<sup>1</sup>, A.H. Vopilkin<sup>1</sup>, S.A. Korolev<sup>1</sup>, S.V. Romashkin<sup>1</sup>, D.S. Tikhonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ECHO+ Research and Production Center LLC, Russia 123458 Moscow, Tvardovsky str., 8, Technopark «Strogino»  
\*E-mail: bazulin@echoplus.ru

The widespread introduction of antenna arrays into the practice of ultrasonic testing has made it possible to obtain images of reflectors using either phased array technology or digital aperture focusing (DAF) technology. However, many current regulatory documents regulating the rules for conducting ultrasonic non-destructive testing in the nuclear power industry, petrochemistry, gas industry, etc., require determining the equivalent dimensions of reflectors. The article proposes a method for calculating the DAF—DAC array to determine the diameter of an equivalent flat-bottomed hole (FBH) when analyzing an image. It was shown that it is more efficient to work not with the amplitude of the image, but with the integral amplitude. Numerical experiments have shown the accuracy of determining the diameter of the FBH of the order of  $\pm 0.1$  mm. In model experiments, the accuracy of determining the diameter of the FBH turned out to be modulo less than 0.2 mm.

*Keywords:* antenna array, DAC curve, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Digital Aperture Focusing (DAF).

DOI: 10.31857/S0130308224040061

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении ультразвукового неразрушающего контроля широко используют либо технологию фазированных антенных решеток (ФАР) [1], либо технологию цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) [2]. С их помощью можно получать изображения отражателей В-, С- и D-типа с высокой разрешающей способностью и с низким уровнем шума, по которым можно определить тип отражателя и его размеры. Однако многие действующие нормативные документы, регламентирующие правила проведения ультразвукового неразрушающего контроля в атомной энергетике, нефтехимии, газодобывающей промышленности и т.п., требуют определять эквивалентные размеры отражателей [3—5]. Это связано с тем, что многие из этих документов были разработаны для случая использования одноэлементных пьезопреобразователей (ПЭП) и предполагают оценку типа и размера отражателей по амплитуде эхосигнала.

Возникла парадоксальная ситуация — новые технологии позволяют повысить достоверность ультразвукового контроля, но старые нормативные документы по-прежнему требуют подготовки протокола контроля с указанием диаметра эквивалентного плоскодонного отража-

теля (ПДО). Для устранения этого противоречия необходимо изменить множество документов, регламентирующих проведение ультразвукового контроля и в первую очередь получить разрешение на применение размерных критериев от эксплуатирующей организации или главного конструктора. Такая работа выполняется для объектов АО «Росэнергоатом», ПАО «Газпром», ПАО «Транснефть». На это нужно немалое время и в основной практике УЗК возникает проблема, когда по ФАР- или ЦФА-изображению нужно определить размер или площадь эквивалентного ПДО или превышение браковочного уровня, определяемого заданной площадью эталонного отражателя.

Наравне с прямой настройкой чувствительности на образцах, которая имеет свои сложности и заслуживает написания еще одной статьи, как один из вариантов решения задачи в статье [6] была предложена методика расчета ФАР—АРД с привязкой чувствительности по одному эталонному отражателю на заданной глубине, выявляемому одним углом ввода, а в статье [7] было предложено для оценки эквивалентного ПДО использовать таблицы амплитуд индикаций ЦФА-изображения, восстановленных по эхосигналам, измеренных на специальных образцах с множеством ПДО разного диаметра на разных глубинах и с разными наклонами. Второй подход эффективен для случая малого типа антенных решеток и призм, но для широкой номенклатуры такой подход недостаточно удобен, так как требует большого числа измерений, а для ФАР-режима вообще неприменим из-за того, что закономерность изменения амплитуд от расстояния и угла ввода зависит от конкретного закона фокусировки ФАР. Поэтому задача оперативного получения таблиц для оценки эквивалентного ПДО по ЦФА-изображениям является актуальной.

Применение такого подхода не противоречит духу нормативной документации, потому что обычно в требованиях к настройке чувствительности разрешается настройка на отражателях, отличных от требуемых эталонных, при условии демонстрации повторяемости измерения амплитуд на эталонных отражателях, что и показано в данной статье.

## 2. РАСЧЕТ ЦФА—АРД

Логика расчета массива ЦФА—АРД и его применения в целом совпадает с той, что изложена в статье [6]. Ее можно описать следующим образом:

1. В режиме 3D в режиме ФМС рассчитываются эхосигналы от ПДО разных диаметров  $d_n$ , расположенных в координатах  $(x_n, z_n)$ , которые определяются областью восстановления изображения (ОВИ), типом антенной решетки и призмы в соответствии с методикой контроля конкретного изделия. Углы наклона ПДО  $\alpha_n$  таковы, что их дно перпендикулярно лучу, выходящему из центра антенной решетки. Для ускорения расчета массива ЦФА—АРД для объектов контроля толщиной порядка 60 мм шаг сетки по пространству целесообразно выбрать от 5 до 10 мм, а диапазон диаметров ПДО можно выбрать от 0,5 до 5,5 мм с шагом 0,5 мм.

2. На заданной ОВИ  $\{x_i, z_i\}$  по рассчитанным эхосигналам восстанавливается ЦФА-изображение ПДО  $I(x_i, z_i; d_n)$  для каждого значения диаметра  $d_n$ .

3. Определяются амплитуды индикаций ПДО по каждому диаметру  $d_n$ , т.е. подготавливается массив  $A(x_n, z_n, d_n)$ .

4. Проводится интерполяция массива  $A(x_n, z_n, d_n)$  на сетку ОВИ  $\{x_i, z_i\}$ , определенной методикой контроля, и формируется массив  $A(x_i, z_i, d_n)$ .

5. Проводится интерполяция  $A(x_i, z_i, d_n)$  по диаметрам ПДО с начального шага 0,5 мм на шаг 0,1 мм и формируется окончательный ЦФА—АРД-массив  $A(x_i, z_i, d_i)$ . На этом этапе закончены трудоемкие вычисления эхосигналов, восстановления ЦФА-изображений  $I(x_i, z_i, d_n)$ , интерполяции массива  $A(x_n, z_n, d_n)$ .

6. Для нормировки перед контролем устанавливается связь между ЦФА—АРД-массивом  $A(x_i, z_i, d_i)$  и амплитудой индикации ПДО в известном месте  $(x_0, z_0)$  с известным диаметром  $d_0$  в ЦФА-изображении  $I(x_0, z_0; d_0)$ , восстановленным той же программой, что и в разделе 2.

7. После нормировки на ЦФА-изображении  $I(x_i, z_i)$ , полученном при контроле, установив маркер на индикацию, амплитуда которого выше контрольного уровня, можно рассчитать диаметр эквивалентного ПДО, как  $d_i$  при котором

$$I(x_i, z_i) \approx A_{\text{wrk}}(x_i, z_i, d_i), \text{ где } A_{\text{wrk}}(x_i, z_i, d_i) = A(x_i, z_i, d_i) \frac{I(x_0, z_0; d_0)}{A(x_0, z_0, d_0)}. \quad (1)$$

8. Альтернативный вариант применения рассчитанного ЦФА—АРД-массива заключается в следующем: ЦФА-изображение  $I(x_i, z_i)$  через ЦФА—АРД-массив  $A_{\text{wrk}}(x_i, z_i, d_i)$  трансформи-

руется в АРД-изображение  $d(x_i, z_i)$ , которое сразу будет показывать диаметр эквивалентных ПДО.

Работа с амплитудой индикации имеет неприятную особенность, которой нет при работе с одноэлементными нефокусирующим ПЭП. Фронтальная разрешающая способность ЦФА-изображения может достигать в определенной области ОВИ величину порядка длины ультразвуковой волны в объекте контроля, например, 1 мм. Поэтому, если диаметр ПДО будет больше разрешающей способности ЦФА-изображения, то амплитуда индикации ПДО диаметром 2 мм и больше будет слабо меняться — возникает эффект насыщения, который приводит к возрастанию ошибки определения значения больших диаметров ПДО. В статье [8] для устранения эффекта насыщения было предложено работать не с амплитудой индикации ЦФА-изображения  $I(x_i, z_i)$ , а с интегральной амплитудой. Она рассчитывается как сумма амплитуд всех пикселей индикации ПДО на изображении  $I(x_i, z_i)$ , превышающих заданный уровень. ЦФА—АРД-массив, рассчитанный таким образом, будем обозначать как  $A_{IA}(x_i, z_i, d_i)$ . Так как сетка ЦФА-изображения может меняться, то для того, чтобы не перевосстанавливать заново ЦФА-изображения и формировать ЦФА—АРД-массив (хотя по рассчитанным уже эхосигналам это сделать быстро!), например, с сетки 0,2 мм на 0,1 мм, и заново формировать ЦФА—АРД-массивы, при сложении амплитуды каждого пикселя изображения нужно учесть площадь пикселя. Поэтому интегральную амплитуду нужно умножить на сумму площадей пикселей выше заданного уровня, что равно площади индикации.

Отметим важный момент — рассчитав эхосигналы для режима FMC с целью сформировать ЦФА—АРД-массив, можно провести расчет ФАР—АРД-массивов. Для этого по один раз рассчитанным эхосигналам, определив задержки на излучение и прием для произвольных законов фокусировки (по смещению, по глубине и пр.), можно построить секторный скан  $I_{PA}(x_i, z_i)$  с изображениями ПДО. По этим изображениям можно рассчитать ФАР—АРД-массивов, как изложено выше в данном разделе, только вместо  $I(x_i, z_i)$  надо использовать изображение  $I_{PA}(x_i, z_i)$ . В этом случае при пересчете ФАР—АРД-массивов для разных законов фокусировки скорость расчета существенно повысится, так как самой трудоемкой операцией является расчет эхосигналов, а она выполняется для заданного типа антенной решетки и призмы один раз.

## 2.1. Расчет поля от ПДО

Как сказано в разделе 2, в пункте 1 нужно рассчитать эхосигналы от ПДО разных диаметров  $d_n$ , расположенных в заданных точках  $(x_n, z_n)$ . Это классическая задача, которая с достаточной точностью решена для пьезоэлементов разной формы как аналитически [9—12], так и с помощью специализированных программ, например, CIV4 [13], которая позволяет рассчитывать эхосигналы от различных отражателей с помощью теории лучевых трубок и разных моделей рассеяния.

Опишем вкратце алгоритм расчета эхосигналов  $p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t; x_n, z_n, d_n, \alpha_n)$ , отраженных от ПДО заданного диаметра  $d_n$ , наклона  $\alpha_n$  и расположенного в точке  $(x_n, z_n)$  при излучении элементом решетки с центром в точке  $\mathbf{r}_i$  и приеме элементом решетки с центром в точке  $\mathbf{r}_r$ .

1. Для каждой элементарной площадки  $\Delta_{fbh}$  «освещенной» поверхности ПДО рассчитывается форма эхосигнала  $s_{irm,fbh}(t)$ , которая формируется по всем парциальным лучам от элементарных площадок  $\Delta_{irm}$ , на которые разбит излучающий элемент решетки. Все элементарные площадки  $\Delta_{irm}$  элемента решетки излучают одинаковый импульс  $s(t)$ . Траекторию пробега луча можно построить, используя принцип Ферма [14]. С его помощью определяется время пробега  $t_{irm,fbh}$  каждого парциального импульса  $s_{irm,fbh}(t) = s(t - t_{irm,fbh})$ . При работе на прямом луче рассчитать траекторию можно по аналитической формуле, приведенной в работе [15]. Для расчета амплитуды парциального импульса  $a_{irm,fbh}$  нужно обязательно учесть диаграмму направленности точечной силы при излучении, коэффициент преломления на границе «призма—образец» в варианте границы со скольжением и изменение радиуса кривизны лучевой трубки. Таким образом, для каждой элементарной площадки  $\Delta_{fbh}$  освещенной поверхности ПДО, можно рассчитать форму падающего сигнала по формуле:

$$s_{fbh}(t) = \sum_{irm} a_{irm,fbh} s(t - t_{irm,fbh}). \quad (2)$$

2. По аналогичному принципу рассчитываются парциальные эхосигналы для каждой элементарной площадки  $\Delta_{rcv}$  приемника:

$$s_{rcv}(t) = \sum_{fbh} K(\alpha_{irm}, \alpha_{rcv}) a_{fbh,rcv} s_{fbh}(t - t_{fbh,rcv}), \quad (3)$$



где  $t_{fbh,rcv}$  — время пробега импульса от элементарной площадки  $\Delta_{fbh}$  поверхности ПДО до элементарной площадки  $\Delta_{rcv}$  приемника, видимой на прямом луче;  $a_{fbh,rcv}$  — коэффициент, учитывающий коэффициент преломления на границе «образец—призма» в варианте границы со скольжением, изменение радиуса кривизны лучевой трубки и диаграмму направленности элементарной площадки  $\Delta_{rcv}$  при приеме;  $K(\alpha_{irm}, \alpha_{rcv})$  — коэффициент Кирхгофа, который зависит от угла падения на элементарную площадку  $\Delta_{fbh}$  луча при излучении  $\alpha_{irm}$  и приеме  $\alpha_{rcv}$ .

3. Суммируя парциальные сигналы  $s_{rcv}(t)$  по поверхности приемника, рассчитать эхосигнал от ПДО можно по формуле:

$$p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t, x_n, z_n, d_n, \alpha_n) = \sum_{rcv} s_{rcv}(t). \quad (4)$$

Для расчета коэффициентов  $a_{irm,fbn}$  и  $a_{fbh,rcv}$  можно воспользоваться стандартными формулами для вычисления коэффициентов преломления на границе со скольжением для разных типов волн [10]. При распространении, преломлении и отражении импульса нужно рассчитывать его амплитуду из-за изменения радиуса волнового фронта [10]. При расчетах диаграмма направленности элементарной площадки элемента антенной решетки для продольной волны на излучение и на прием аппроксимировалась функцией  $\cos()$ . Коэффициенты Кирхгофа  $K(\alpha_{irm}, \alpha_{rcv})$  с учетом трансформации типа волны в параксиальном приближении рассчитывались по формуле (3.1.8), приведенной в статье [10], и по формуле (20) из статьи [16].

Отметим, что времена задержек при расчетах можно учитывать за счет мелкого шагом дискретизации по оси времени (примерно 1/40 от периода несущей частоты), как в программе CIVА [13]. При расчетах по формулам (2), (3) и (4) времена задержек учитывалась в спектральной области, что позволило работать с более грубым шагом дискретизации по времени, не снижая точности расчета формы парциальных эхосигналов.

## 2.2. Учет затухания в призме и объекте контроля

Для эффективного применения ЦФА—АРД-массивов обязательно нужно учитывать эффект затухания при распространении ультразвука в призме и в объекте контроля. Для точного учета затухания в призме и объекте контроля в коэффициенты  $a_{irm,fbn}$  и  $a_{fbh,rcv}$  можно для каждого луча добавить множитель  $e^{-\delta r}$ , который описывает уменьшение амплитуды импульса при его пробеге на расстояние  $r$  в среде с декрементом затухания  $\delta$ . Более того, работа со спектром импульсов позволяет учесть и частотно-зависимое затухание. Однако для ускорения расчетов ЦФА—АРД-массив  $A(x_p, z_p, d_i)$  рассчитывался без учета затухания, а далее он корректировался умножением на массив  $D(x_p, z_p)$ :

$$D(x_i, z_i) = e^{-2(\delta_w r_w(x_i, z_i) + \delta_{obj} r_{obj}(x_i, z_i))}, \quad (5)$$

где  $\delta_w, \delta_{obj}$  — коэффициенты затухания продольной волны в призме и продольной или поперечной волны в объекте контроля на несущей частоте;  $r_w(x_p, z_p), r_{obj}(x_p, z_p)$  — длина луча в призме и объекте контроля при распространении от центра антенной решетки до точки  $(x_p, z_p)$  ОВИ.

## 3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки правильности работы предложенного подхода с помощью программы CIVА [13] были рассчитаны эхосигналы от ПДО разного диаметра, расположенные на разных глубинах при использовании антенной решетки с рабочей частотой 5 МГц из 32 элементов размером 0,75 мм и зазором между краями элементов 0,25 мм. Предполагалось, что антенная решетка установлена на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Девять ПДО с диаметрами 0,5; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 и 4 мм были размещены в пределах ОВИ (рис. 1а). Углы наклона ПДО выбирались такими, что луч от центра антенной решетки падал перпендикулярно к поверхности ПДО. Поэтому эхосигналы на поперечных волнах рассчитывались для одного положения антенной решетки. На рис. 1а показано ЦФА-изображение  $I(x_p, z_p)$  девяти ПДО, диаметр которых указан выносками с цифрами к индикациям. Максимальная разница между эхосигналами, рассчитанными программой CIVА, и по алгоритму, изложенному в разделе 2.1, меньше 5 %. Максимальная разница между ЦФА-изображениями — меньше 2,5 %.

При расчете ЦФА—АРД-массива  $A(x_p, z_p, d_i)$  использовались ПДО с десятью диаметрами от 0,5 до 5,5 мм с шагом 0,5 мм, расположенными равномерно в 36 положениях в пределах ОВИ. ЦФА-изображения  $I(x_p, z_p)$  восстановились на поперечных волнах. Для ускорения расчетов эхосигналов  $p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t, x_n, z_n, d_n, \alpha_n)$  применялись эхосигналы только трех выстрелов: 1, 17 и 32. Эхосигналы выстрела с заданным номером формируются, когда зондирующий сигнал

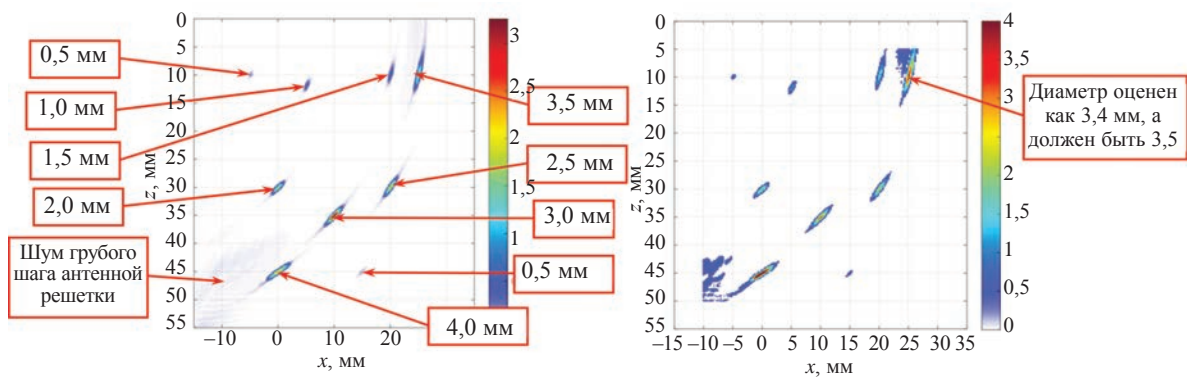


Рис. 1. ЦФА-изображение  $I(x_p, z_p)$  (а) и АРД-изображение  $d(x_p, z_p)$  (б) при расчете ЦФА—АРД-массива  $A(x_p, z_p, d_i)$ .

излучает заданный элемент антенной решетки, а экосигналы регистрируются всеми элементами решетки.

На рис. 1б показано АРД-изображение как диаметр эквивалентного ПДО  $d(x_p, z_p)$ . Цветовая шкала справа от растрового изображения соответствует диаметру ПДО от 0 до 4 мм. Все диаметры эквивалентных ПДО совпали с заданными при расчете в СИВА диаметрами ПДО с точностью  $\pm 0,1$  мм, за исключением ПДО диаметром 3,5 мм в точке (25, 10) мм — его эквивалентный диаметр получился равным 3,4 мм.

На рис. 2а показан график амплитуды индикации ЦФА-изображения  $I(x_p, z_p)$  при изменении диаметра ПДО от 0,5 до 4 мм, расположенного в точке (10, 35) мм. Видно, что график имеет тенденцию к насыщению, а диапазон изменения амплитуды индикации около 20. На рис. 2б представлен график амплитуды индикации в режиме интегральной амплитуды при использовании ЦФА—АРД-массива  $A_{IA}(x_p, z_p, d_i)$ . Видно, что эффекта насыщения нет, а диапазон изменения амплитуды индикации около 40, что должно позволить точнее определять значения больших диаметров эквивалентных ПДО.

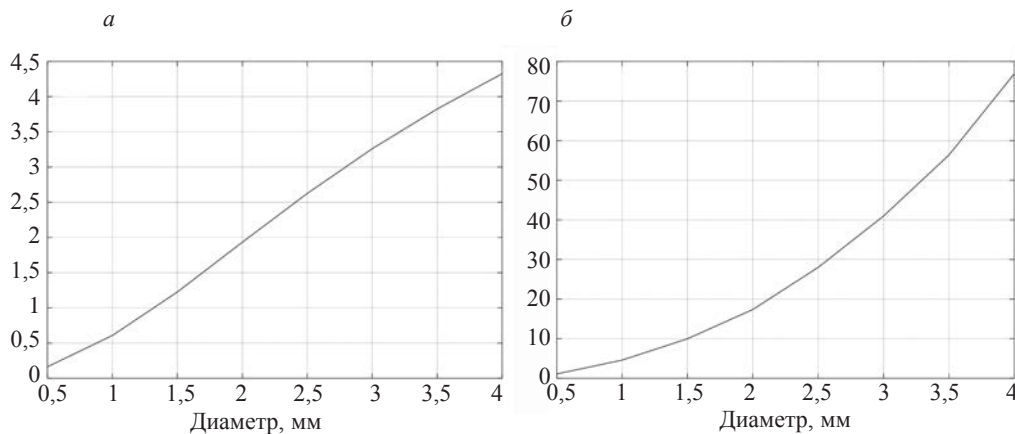


Рис. 2. График амплитуды индикации ЦФА-изображения  $I(x_p, z_p)$  при расчете ЦФА—АРД-массива  $A(x_p, z_p, d_i)$  (а) и при расчете ЦФА—АРД-массива  $A_{IA}(x_p, z_p, d_i)$  (б).

Простейший способ формирования АРД-изображения в виде интегральных амплитуд  $I_{IA}(x_p, z_p)$  заключается в том, что интегральная амплитуда рассчитывается в скользящем квадратном окне как сумма пикселей, амплитуда которых больше заданного уровня отсечки. Так как диаметр ПДО заранее неизвестен, то работать с скользящим квадратом фиксированного размера некорректно. Если использовать квадрат со стороной 5 мм, то для вычислений интегральной амплитуды индикаций протяженностью 1 или 2 мм размеры скользящего окна желательно уменьшить, а если размер индикации больше 5 мм, то размеры скользящего окна нужно увеличить. Иначе диаметр ПДО может быть неверно определен. Кроме того, в скользящем квадратном окне должна быть только одна индикация. В противном случае диаметр ПДО будет определен с ошибкой. Поэтому в статье использовался более сложный алгоритм построения АРД-изображения:

- определялись максимумы и их координаты ЦФА-изображения;
- из списка удалялись максимумы меньше уровня фиксации;
- начиная с максимума каждой индикации, из списка определялась маска пикселей, амплитуда которых выше уровня отсечки, сумма амплитуд этих пикселей, умноженная на площадь пикселя, равна интегральной амплитуде;
- на АРД-изображение наносится изображение маски с координаты пикселей, амплитуда которых больше уровня отсечки, амплитуда АРД-индикации полагается равной интегральной амплитуде.

На рис. 3 представлено АРД-изображение как диаметр эквивалентного ПДО  $d_{IA}(x_p, z_p)$  при расчете ЦФА—АРД-массива  $A_{IA}(x_p, z_p, d_p)$  по эхосигналам трех выстрелов: 1, 17 и 32. Уровень отсечки был равен 70 % от максимума индикации. Цветовая шкала справа от растрового изображения соответствует диаметру ПДО от 0 до 4 мм. Диаметр эквивалентного ПДО определен с точностью, меньше чем  $\pm 0,1$  мм, за исключением двух ПДО. Эквивалентный диаметр ПДО 1,5 мм в точке (20, 10) мм получился равным 1,7 мм, а эквивалентный диаметр ПДО 3,5 мм в точке (2, 10) мм — равным 3,8 мм. Углы падения лучей на эти два ПДО около 75 град, что на самом краю рабочего углового диапазона антенной решетки и призмы. Возможно, что размещение ПДО с более мелким шагом по осям  $x$  и  $y$  при расчете эхосигналов позволит уменьшить эту ошибку.

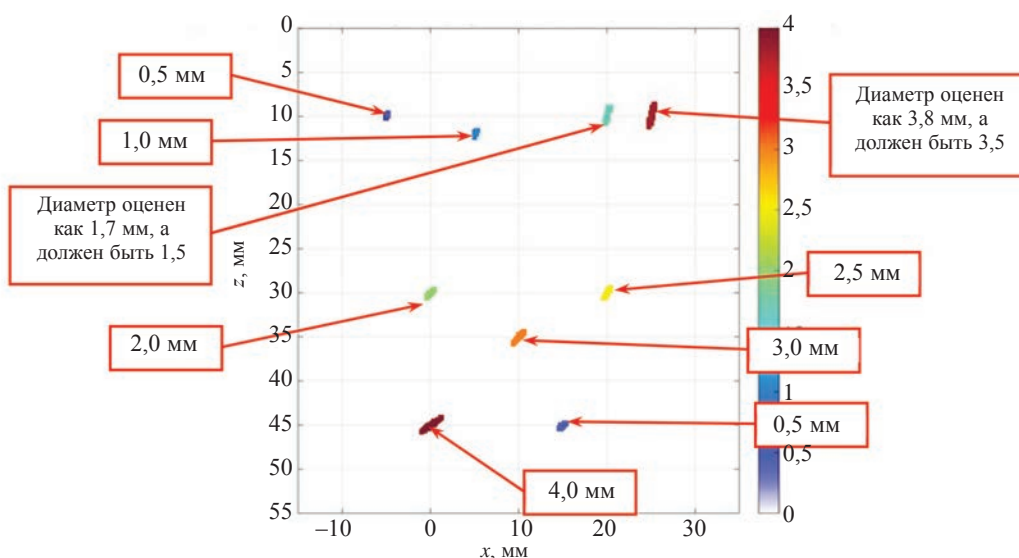


Рис. 3. АРД-изображение  $d(x_p, z_p)$  при расчете ЦФА—АРД-массива  $A_{IA}(x_p, z_p, d_p)$ .

#### 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготавливаемого в НПЦ «ЭХО+» [17]. Измерения осуществляли в образце, изготовленном из стали Ст20, эскиз которого приведен на рис. 4. В образце с наклоном граней 45 град были изготовлены шесть ПДО диаметром 2,3 мм на разных глубинах и четыре ПДО разного диаметра на глубине 22 мм. Следует отметить, что точность изготовления ПДО для целей ультразвукового контроля регламентируется ГОСТом [18], в котором оговорены допуски для углов наклона, диаметра, неровности поверхности ПДО и пр. Образец, на котором проводили измерения, не проходил аттестацию в соответствии с упомянутым ГОСТом.

Для изменения эхосигналов использовалась антенная решетка с рабочей частотой 5 МГц из 32 элементов размером 0,75 мм и зазором между краями элементов 1,25 мм, установленная на рексолитовую призму с углом наклона 17 град. Апертура антенной решетки была увеличена за счет грубого шага, равного 2 мм, между центрами ее элементов. Антенная решетка перемещалась по поверхности призмы с шагом 2,5 мм, чтобы регистрировать эхосигналы при попадании центрального луча призмы в центр каждого ПДО. Для ускорения расчетов эхосигналов



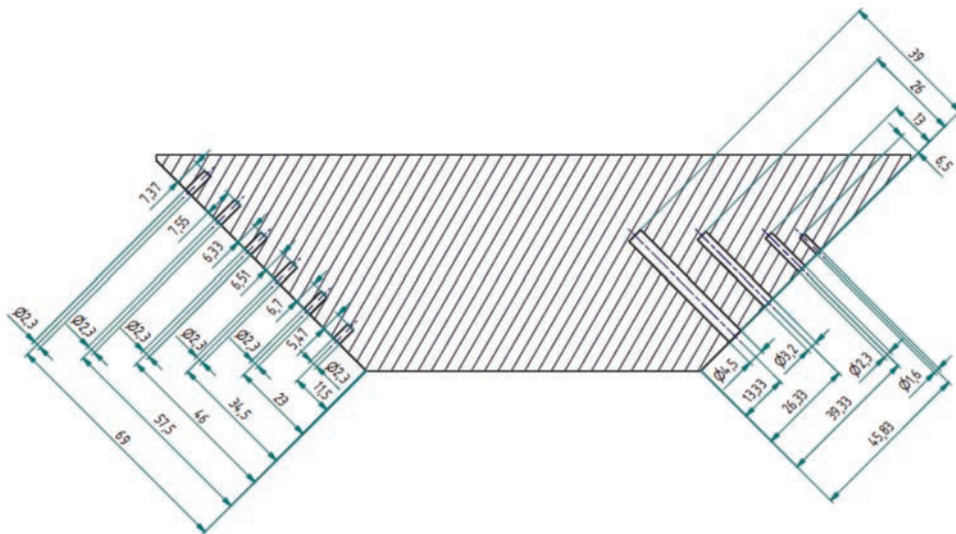


Рис. 4. Эскиз образца с ПДО на разных глубинах и с разными диаметрами.

$p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t; x_n, z_n, d_n, \alpha_n)$  на продольной волне применяли эхосигналы только пяти выстрелов: 1, 8, 17, 24 и 32. При расчете ЦФА-АРД-массива  $A_{IA}(x_p, z_p, d_i)$  использовались ПДО с десятью диаметрами от 0,5 до 5,5 мм с шагом 0,5 мм, расположенные равномерно в 36 положениях в пределах ОВИ. ЦФА-изображения ПДО восстанавливались на продольных волнах.

#### 4.1. ПДО разного диаметра на глубине 22 мм

Результат оценки диаметра ПДО приведен в табл. 1 при привязке ЦФА—АРД-массива к амплитуде ПДО № 4. Ошибка определения диаметра ПДО находится в интервале от  $-0,2$  до  $0,1$  мм.

Таблица 1

Результат оценки диаметра ПДО, расположенных на глубине 22 мм

Номер ПДО	Координаты и диаметр ПДО по чертежу			Оценка диаметра ПДО, мм	Ошибка, мм
	x, мм	z, мм	Диаметр, мм		
1	-34,0	-22,2	1,5	1,5	0,0
2	-33,4	-22,2	2,3	2,1	-0,2
3	-34,6	-21,8	3,2	3,3	0,1
4	-33,2	-22,2	4,5	4,5	0,0

#### 4.2. ПДО диаметром 2,3 мм на разных глубинах

Результат оценки диаметра ПДО приведен в табл. 2 при привязке ЦФА—АРД-массива к амплитуде ПДО № 3. Ошибка определения диаметра ПДО находится в интервале от  $-0,1$  до  $0,2$  мм (диапазон 0,3 мм).

Таблица 2

Результат оценки диаметра ПДО на разной глубине

Номер ПДО	Координаты и диаметр ПДО по чертежу			Оценка диаметра ПДО, мм	Ошибка, мм
	x, мм	z, мм	Диаметр, мм		
1	-50,0	-5,8	2,3	2,5	0,2
2	-40,6	-14,0	2,3	2,5	0,2
3	-32,3	-23,0	2,3	2,3	0,0
4	-25,0	-31,0	2,3	2,4	0,1
5	-15,6	-39,2	2,3	2,3	0,0
6	-7,6	-47,6	2,3	2,2	-0,1

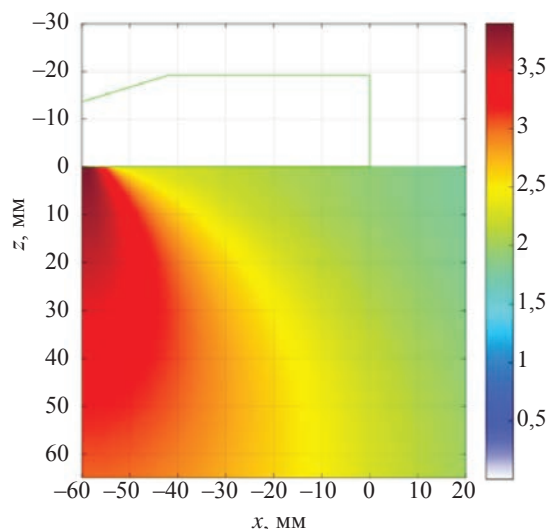


Рис. 5. Вид функции  $D(x, z)$ , рассчитанный по формуле (5), для коэффициентов затухания продольной волны в призме и материале, равных  $(0,2, 0,002) \text{ мм}^{-1}$ .

На рис. 5 показан вид функции  $D(x, z)$ , рассчитанный по формуле (5), для коэффициентов затухания продольной волны в призме и материале, равных  $(0,2, 0,002) \text{ мм}^{-1}$ . Многоугольником зеленого цвета показан контур призмы.

Результат оценки диаметра ПДО с учетом функции  $D(x, z)$  приведен в табл. 3 при привязке ЦФА—АРД-массива к амплитуде ПДО № 3. По сравнению с табл. 2 диапазон ошибки определения диаметра ПДО уменьшился до 0,2 мм.

Таблица 3

Результат оценки диаметра ПДО на разной глубине с учетом функции  $D(x, z)$ 

Номер ПДО	Координаты и диаметр ПДО по чертежу			Оценка диаметра ПДО, мм	Ошибка, мм
	$x$ , мм	$z$ , мм	Диаметр, мм		
1	-50,0	-5,8	2,3	2,4	0,1
2	-40,6	-14,0	2,3	2,4	0,1
3	-32,3	-23,0	2,3	2,3	0,0
4	-25,0	-31,0	2,3	2,4	0,1
5	-15,6	-39,2	2,3	2,5	0,2
6	-7,6	-47,6	2,3	2,3	0,0

## 5. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

1. Построение ЦФА—АРД-массива в виде интегральной амплитуды снимает проблему насыщения функции зависимости амплитуды индикации ПДО от диаметра.

2. Для ускорения расчета ЦФА—АРД-массива можно рассчитывать эхосигналы не всего залпа, а только пяти выстрелов с номерами 1, 8, 17, 24 и 32 для антенной решетки из 32 элементов.

3. Проверка результатов работы на эхосигналах в численном эксперименте показала, что диаметр эквивалентного ПДО определяется с ошибкой менее  $\pm 0,1$  мм. Для ПДО, на которые лучи падают с углом около 75 град, ошибка достигает значения 0,3 мм.

4. При проведении модельного эксперимента с ПДО разного диаметра ошибка определения диаметра ПДО находится в интервале от  $-0,2$  до 0,1 мм

5. Модельный эксперимент с ПДО на разных глубинах без учета затухания в призме и материале показал, что ошибка определения диаметра ПДО находится в интервале  $[-0,1; 0,2]$  мм. Учет затухания позволил уменьшить интервал ошибки до  $[0; 0,2]$  мм.

6. Все полученные в модельных экспериментах результаты, выраженные в мм, при переводе в децибелы показывают, что ошибка определения площади, эквивалентной ПДО, не более  $\pm 1,6$  дБ для ПДО всех диаметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 12.03.2022).
2. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
3. НП-084-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a39/4293756285.pdf?ysclid=lsw7p981ry575993062> (дата обращения: 21.02.2024).
4. СТО Газпром 15-1.3-004-2023. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений промысловых и магистральных трубопроводов. URL: <https://www.centrmag.ru/catalog/product/sto-gazprom-15-13-004-2023-nerazrushayushhie-metody-kontrolya/?ysclid=lsw7tbl059149326470> (дата обращения: 21.02.2024).
5. РД-25.160.10-КТН-0016-23. Руководящий документ. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. ПАО «ТРАНСНЕФТЬ».
6. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М. Расчет АД-диаграмм для систем ультразвукового контроля с применением фазированных решеток // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 37—46.
7. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Оценка несплошностей металла ультразвуковым дефектоскопом с цифровой фокусировкой антенной решетки // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 2. С. 8—13.
8. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Оценка дефектов при ультразвуковом контроле методом цифровой фокусировки апертуры. Условия, возможности, границы применимости // Контроль. Диагностика. 2017. № 9. С. 6—18. DOI: 10.14489/td.2017.09.pp.006-018
9. Голубев А.С. Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // Акустический журнал. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
10. Данилов В.Н. Расчеты акустических трактов наклонных преобразователей в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом «Спектр», 2021. 182 с.: ил.
11. Ямщиков В.С., Данилов В.Н. Об отражении продольных и поперечных упругих волн от цилиндрической полости в полупространстве // Дефектоскопия. 1984. № 4. С. 3—11.
12. Achenbach J.D., Brind R.J., Gubernatis J.E. High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities // Wave Motion 6. North-Holland. 1982. P. 41—60.
13. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 25.11.2023).
14. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. Изд. 2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
15. Базулин Е.Г., Голубев А.С., Кокколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 18—32.
16. Данилов В.Н. К расчету эхосигналов поперечных и продольных волн от отражателей с плоскими поверхностями // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 34—55.
17. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 25.11.2023).
18. ГОСТ Р 50.05.14—2019 Средства ультразвукового контроля основных материалов, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Общие требования. URL: <https://ntcexpert.ru/documents/gost-r-50-05-14-2019.pdf?ysclid=lrhxpk7td424904104> (дата обращения: 17.01.2024).

#### REFERENCES

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (circulation date: 12.03.2022).
2. Bazulin E.G. Determination of the reflector type from an image reconstructed using echo signals measured with ultrasonic antenna arrays // Defectoscopy. 2014. No. 3. P. 12—22.
3. NP-084-15. Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Rules for control of parent material, weld joints, deposited surfaces during operation of equipment, pipelines and other elements of nuclear power plants.: URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a39/4293756285.pdf?ysclid=lsw7p981ry575993062> (circulation date: 21.02.2024).
4. STO Gazprom 15-1.3-004-2023. Non-destructive methods of quality control of welded joints of field and trunk pipelines.: URL: <https://www.centrmag.ru/catalog/product/sto-gazprom-15-13-004-2023-nerazrushayushhie-metody-kontrolya/?ysclid=lsw7tbl059149326470> (circulation date: 21.02.2024).

5. RD-25.160.10-KTN-0016-23. Guidance Document. Trunk pipeline transportation of oil and oil products nondestructive testing of welded joints during construction and repair of trunk pipelines. PJSC TRANSNEFT.
6. *Bazulin A.E., Bazulin E.G., Ismailov G.M.* The calculation of DGS diagrams for ultrasound testing systems with the use of phased arrays // Defectoscopyia. 2014. No. 1. P. 37—46.
7. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Assessment of metal non-flaws by ultrasonic flaw detector with digital focusing of antenna array // In the world of non-destructive testing. 2013. No. 2. P. 8—13.
8. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Evaluation of defects in ultrasonic testing by digital focused array technique. The conditions, possibilities, boundaries of the applicability // Testing. Diagnostics. 2017. No. 9. P. 6—18. DOI: 10.14489/td.2017.09.pp.006-018
9. *Golubev A.S.* Reflection of plane waves from a cylindrical defect // Soviet physics. Acoustics. 1961. V. VII. No. 2. P. 174—180.
10. *Danilov V.N.* Calculations of acoustic paths of inclined transducers in ultrasonic flaw detection. Moscow: Publishing House «Spektr», 2021. 182 p.
11. *Yamshchikov V.S., Danilov V.N.* Reflection of longitudinal and transverse elastic-waves from a cylindrical cavity in a half-space // Defectoscopyia. 1984. No. 4. P. 3—11.
12. *Achenbach J.D., Brind R.J., Gubernatis J.E.* High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities // Wave Motion 6. North-Holland. 1982. P. 41—60.
13. Official website of the company EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (circulation date: 25.11.2023).
14. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Pergamon Press, 1970. 808 p.
15. *Bazulin E.G., Kokolev S.A., Golubev A.S.* Application of an ultrasonic antenna array for registering echo signals by the double-scanning method for obtaining flaw images // Defectoscopyia. 2009. No. 2. P. 18—32.
16. *Danilov V.N.* On the calculation of characteristics of Echo signals of transverse and longitudinal waves from reflectors with flat surfaces // Defectoscopyia. 2010. No. 1. P. 34—55.
17. Official website of the company Echoplus. URL: <https://echoplus.ru/> (circulation date: 25.11.2023).
18. GOST R 50.05.14—2019: Conformity assessment system in the field of atomic energy use. Means of ultrasonic testing of basic materials, welded joints and deposited surfaces of equipment and pipelines of nuclear power plants. General requirements. URL: <https://ntcexpert.ru/documents/gost-r-50-05-14-2019.pdf?ysclid=lrhxpk57td424904104> (circulation date: 17.01.2024).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2024 г. Л. Ю. Могильнер<sup>1,2,\*</sup>, В. А. Сясько<sup>3,\*\*</sup>, А. И. Шихов<sup>4,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГУВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5

<sup>3</sup>ООО «Константа», Россия 199106 Санкт-Петербург, Огородный переулок, 21

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский Горный Университет,  
Россия 199106 Санкт-Петербург, 21 линия ВО, 2

E-mail: \*mogilner@mail.ru; \*\*9334343@gmail.com; \*\*\*shihov-gol@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2024; после доработки 03.05.2024

Принята к публикации 03.05.2024

Во введении к статье отмечены четыре фактора, наиболее значимые для обеспечения точности измерений параметров дефектов при ультразвуковом контроле: параметры искусственных отражателей в образцах, соответствие акустических свойств материала настроечных образцов и контролируемых изделий, переходные характеристики электроакустических трактов, методические особенности выполнения измерений. Настоящая статья посвящена анализу первого и отчасти четвертого из перечисленных факторов. Проведен обзор отражателей, применение которых регламентировано в различных стандартах. Отмечены достоинства и недостатки отверстий с плоским дном, сегментных и угловых отражателей («зарубок»), боковых (БЦО) и вертикальных цилиндрических сверлений, пазов. Учитывая особенности рассеяния ультразвуковых волн, отмечено, что искусственные «отражатели» типа «паз» и БЦО используются для настройки параметров современных дифракционных методов контроля. Рекомендовано расширить применение пазов, БЦО и вертикального сверления при пересмотре стандартов, регламентирующих применение классических эхометодов. Приведена оценка точности измерения параметров дефектов, в первую очередь координат острия трещин, с применением современных цифровых методов обработки информации при ультразвуковом контроле. Указано, что для повышения точности измерений, определения положения и ориентации трещин в сварных швах необходимо создание базы данных цифровых двойников образцов с искусственными отражателями и изделий с реальными дефектами. Приведена общая схема выполнения работ по контролю качества, учитывающая применение эталонов (мер), цифровых моделей искусственных отражателей и цифровых двойников процесса контроля для обеспечения необходимой выявляемости дефектов и достоверности ручного, автоматизированного и потенциально автоматического контроля.

*Ключевые слова:* ультразвуковой контроль, метрологическое обеспечение, моделирование дефектов, искусственные отражатели, измерение размеров, цифровые двойники.

## MODELING OF DEFECTS IN ULTRASONIC FLAW DETECTION. STATUS AND PROSPECTS

© 2024 L. Yu. Mogilner<sup>1,2,\*</sup>, V. A. Syasko<sup>3,\*\*</sup>, A. I. Shikhov<sup>4,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Russia 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1

<sup>2</sup>Scientific and Training Centre «Welding and Control» Bauman Moscow State Technical University,  
Russia 105005 Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1

<sup>3</sup>«Constanta» Ltd, Russia 199106 Saint Petersburg, Ogorodny Lane, 21

<sup>4</sup>Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St Petersburg, 21st Line, 2  
E-mail: \*mogilner@mail.ru; \*\*9334343@gmail.com; \*\*\*shihov-gol@mail.ru

In the introduction to the article four factors, which are most important for ensuring the accuracy of defect parameters measurements at ultrasonic inspection, are mentioned: parameters of artificial reflectors in samples, compliance of acoustic properties of material of tuning samples and controlled products, transient characteristics of electroacoustic paths, methodological features of measurements. The present article is devoted to the analysis of the first and partly fourth of listed factors. The review of reflectors, the use of which is regulated in various standards, is carried out. Advantages and disadvantages of flat-bottomed holes, segmental and angular reflectors (“notches”), lateral (BCO) and vertical cylindrical drills, grooves are noted. Taking into account the peculiarities of ultrasonic wave scattering, it is noted that artificial “reflectors” such as “grooves” and BCOs are used to adjust the parameters of modern diffraction control methods. It is recommended to expand the use of grooves, BCO and vertical drilling in the revision of standards governing the use of classical echo-methods. The estimation of accuracy of measurement of defects parameters, first of all — coordinates of crack tip, with application of modern digital methods of information processing at ultrasonic control is given. It is indicated that to increase the accuracy of measurements, to determine the position and orientation of cracks in welds, it is necessary to create a database of digital doubles of samples with artificial reflectors and products with real defects. The general scheme of quality control work execution is given, taking into account the use of standards (measures), digital models of artificial reflectors and digital twins of the control process to ensure the necessary detectability of defects and reliability of manual, automated and, potentially, automatic control.



*Keywords:* ultrasonic inspection, metrological support, defect modelling, artificial reflectors, dimensional measurement, digital twins.

DOI: 10.31857/S0130308224040028

## ВВЕДЕНИЕ

В конце XX века технология ультразвукового контроля эхометодом достигла определенного насыщения: использовалась малогабаритная электронная аппаратура, извлекался максимум информации из А-сканов на дисплее дефектоскопов, т.е. из представления сигналов от дефектов в координатах «время—амплитуда». Дифракционные методы также применялись, но в основном в качестве вспомогательного средства для уточнения результатов [1—3]. При этом для настройки и проверки оборудования использовались «стандартные» и настроечные образцы, в которых выполнялись искусственные дефекты с заданными размерами.

С начала нынешнего века техника и технология дефектоскопии, в том числе ультразвукового (УЗ) контроля качества, перешла на новый этап развития. Современная цифровая аппаратура в равной степени использует эхо- и дифракционные методы УЗ контроля. Это позволяет получать акустические образы (томограммы) различных сечений контролируемых изделий и сварных швов различной конфигурации и сшивать их в объемные изображения (см., например, [4—7]). При решении теоретических и прикладных задач неразрушающий контроль переходит от дефектоскопии, т.е. умения обнаружить дефект, к дефектометрии, т.е. к измерению параметров дефекта в изделии. Задачей является выполнение измерения с той точностью, которая необходима для расчетов эксплуатационных характеристик и ресурса обследуемого объекта [8—12]. При этом требуют корректировки подходы к настройке и поверке оборудования, и на первый план выходят вопросы о погрешности измерения размеров дефектов, определения их типа и ориентации, в том числе — при автоматизированном и автоматическом контроле изделий при их производстве и монтаже, а также при периодическом диагностировании в период эксплуатации. При разработке новых подходов целесообразно шире использовать опыт, накопленный в смежных отраслях: биотехнологиях, медицине, геофизике (см., например, [13—16]).

Исходя из изложенного, представляется актуальным рассмотреть факторы, наиболее значимые для обеспечения точности измерений при ультразвуковом контроле. В первую очередь необходимо учитывать: форму, размеры и ориентацию искусственных отражателей в образцах [1, 2, 17—19], соотношение акустических свойств настроечных образцов и реальных изделий [20—22], переходные характеристики электроакустических трактов УЗ преобразователей [1, 2, 23, 24], методические особенности выполнения измерений [3, 24, 25].

В настоящей статье рассмотрим первый из перечисленных факторов, включая парк образцов и действующих требований к искусственным отражателям, которые используются для настройки и проверки оборудования при импульсной ультразвуковой дефектоскопии, и обозначим направления развития в этой области. При этом подчеркнем некоторые особенности, которые, как представляется, сохраняют наибольшую актуальность в настоящее время. Также, с учетом наработанной практики применения цифровых методов обработки данных, рассмотрим некоторые направления совершенствования методик и технологии определения размеров и типов дефектов с использованием отражателей различного типа.

## ДОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Кратко обозначим вопрос о настройке глубиномера импульсного УЗ дефектоскопа или толщиномера. Известно, что эта операция основана на измерении времени приема УЗ импульса, отраженного от донной поверхности образца [1, 26]. Например, может использоваться пластинка толщиной 3 мм, закрепленная на корпусе прибора, или набор ступенек с толщиной в заданном диапазоне. В отечественной практике поверка толщиномеров проводилась по набору мер КУСОТ-180, плоскопараллельных и с разной шероховатостью и кривизной поверхности. Аналоги выпускаются и в настоящее время (см., например, сайт [27]).

Базовые операции, необходимые для настройки и поверки толщиномера, предельно просты (рис. 1) и могут выполняться на продольных (для пьезопреобразователей — ПЭП) или поперечных волнах (для электромагнитно-акустических преобразователей — ЭМАП). Измеряется время приема донного сигнала  $t$  (если требуется — за вычетом времени задержки УЗ волн  $t_1$  в призме ПЭП или с учетом серии донных отражений), и показания глубиномера калибруются по значению толщины, определенной по формуле:

$$S = \frac{1}{2}v(t - t_1), \quad (1)$$

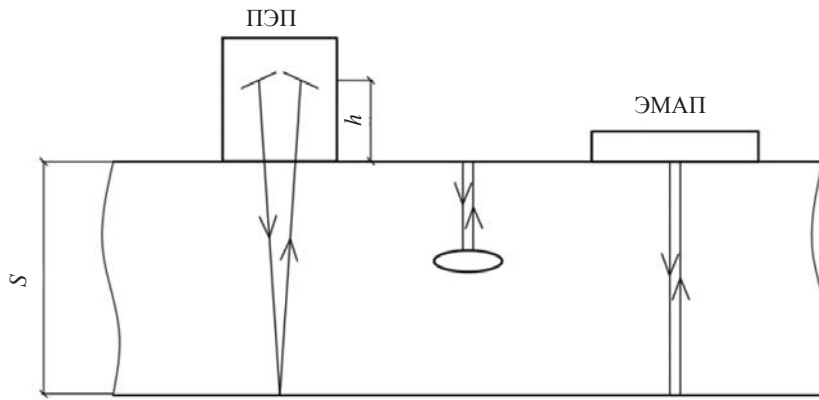


Рис. 1. Схема настройки глубиномера и измерения толщины материала.

где  $S$  — «измеренная» толщина образца;  $v$  — скорость УЗ волн (продольных или поперечных). Погрешность измерения определяется по соотношениям:

$$\Delta S = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2S}{v} \Delta v + v(\Delta t + \Delta t_1) \right\}, \quad \frac{\Delta S}{S} = \left\{ \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t + \Delta t_1}{t - t_1} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  — погрешности измерения (или задания) соответствующих величин.

Обычно приборная абсолютная допустимая погрешность измерения толщины задается в паспорте УЗ толщиномера в виде  $(A + 0,01X)$ , где  $A$  — случайная составляющая погрешности,  $X$  — номинальное значение измеряемой толщины. Например, при  $A = 0,1$  мм,  $X = 10$  мм, относительная погрешность  $\Delta S/S$  составит 2 %. Однако следует учитывать, что согласно [20—22], в формуле (2) разница скорости УЗ волн в контролируемом материале и в настроечном образце может составить 10 % и более. В результате погрешность измерения толщины может существенно превышать данные, приводимые в паспортах на толщиномеры [28].

Имея в виду перспективу развития УЗ толщинометрии, отметим некоторые новые возможности, которые дает использование изображений сечений изделия на дисплее цифровых приборов. На рис. 2а время приема донных сигналов может быть зафиксировано как по А-скану

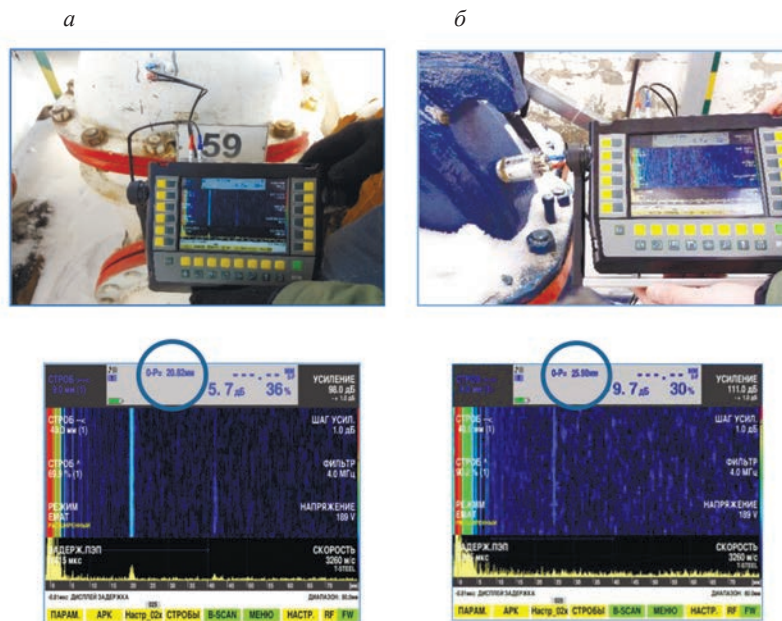


Рис. 2. Измерение толщины литого материала по шероховатой поверхности при относительно малом (а) и большом (б) коэффициентах затухания УЗ волн [11, 28].

(линия развертки желтого цвета в нижней части дисплея), так и по В-скану (изображению сечения). На рис. 2б при прозвучивании крупнозернистого материала донные сигналы на А-скане практически неразличимы, но донная поверхность просматривается на В-скане. Согласно [28], в данном примере толщина материала составила  $26 \pm 2$  мм, т.е. погрешность измерения — около 8 %. Очевидно, что в связи с уширением импульса и менее четкими его границами здесь не приходится говорить о точных измерениях. Однако результат может быть достаточен для оценки технического состояния изделий из крупнозернистых материалов с неплоскопараллельными шероховатыми поверхностями (литые корпуса задвижек, насосов и т.д.). При наличии расслоения глубина его залегания также может быть определена с погрешностью, достаточной для выполнения проверочных расчетов на прочность.

### СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ, МЕРЫ И НАСТРОЕЧНЫЕ ОБРАЗЦЫ С ИСКУССТВЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Рассмотрим другие отражатели на примере «стандартного образца СО-1» по [29] и предыдущим версиям этого стандарта, изданным до 1972 года. Этот образец не внесен в действующий стандарт [17]. Однако в период становления ультразвуковой дефектоскопии он был обязательным в практике УЗ контроля.

Образец СО-1 изготавливался из плексигласа (полиметилметакрилата) (рис. 3). По БЦО-сверлениям диаметром 2 мм измерялась «условная» чувствительность пары ПЭП—дефектоскоп. Так называлась максимальная глубина расположения БЦО (в миллиметрах), которое может быть выявлено при выбранных параметрах оборудования. Также, образец СО-1 применялся для проверки и настройки глубиномера по сигналу от горизонтального пропила. Наконец, по образцу СО-1 можно было оценить лучевую разрешающую способность пары ПЭП—дефектоскоп. Для этого использовались пазы и донная поверхность — для прямых ПЭП и цилиндрические сверления разного диаметра — для наклонных ПЭП. Отметим, что в действующем стандарте [17] обязательная проверка разрешающей способности не предусмотрена. Также отметим, что образец СО-1 в первую очередь предназначался для работы с призмами (ПЭП) из плексигласа, в то время как в последние годы для изготовления призм часто используются материалы с другими акустическими свойствами.

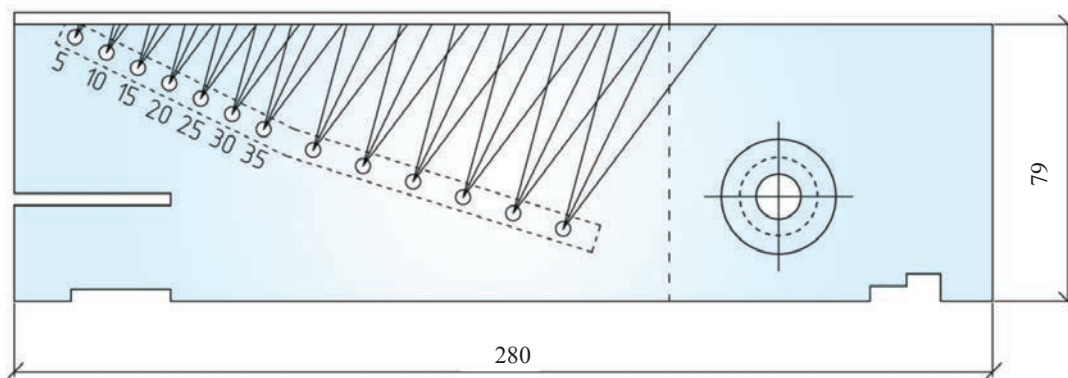


Рис. 3. Образец из плексигласа СО-1.

В действующих документах термин «стандартные образцы» заменен на термин «мера» («калибровочные образцы») [17, 30]. Так называются изделия специальной формы и размеров, в материале которых выполнены «искусственные дефекты», или, как указано выше, «отражатели».

Согласно [17] для проверки и настройки оборудования используются образцы СО-2, СО-3 (рис. 4) и их вариант СО-3Р с отражателями:

- плоские поверхности СО-2 и СО-3 — для калибровки глубиномера;
- цилиндрическая поверхность СО-3 — для определения положения точки ввода УЗ лучей;
- БЦО диаметром 2 мм в СО-2 — для проверки мертвой зоны пары УЗ преобразователь—дефектоскоп;
- БЦО диаметром 6 мм в СО-2 — для определения угла ввода УЗ волн в сталь и настройки чувствительности пары УЗ преобразователь—дефектоскоп.

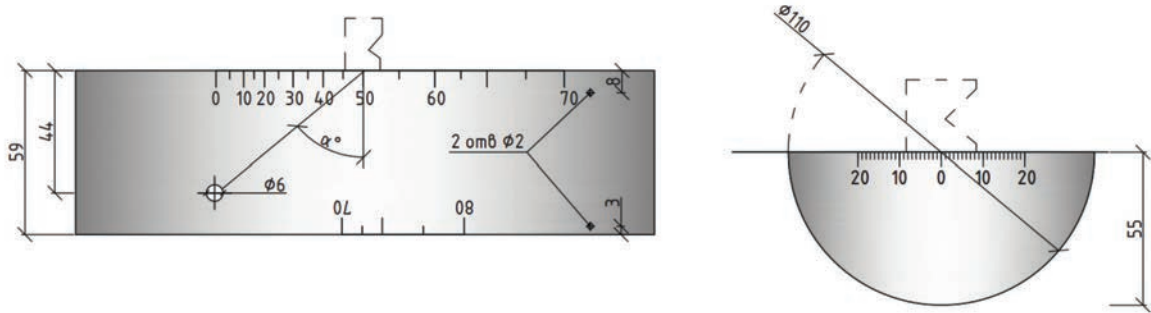


Рис. 4. Образцы из стали CO-2 и CO-3.

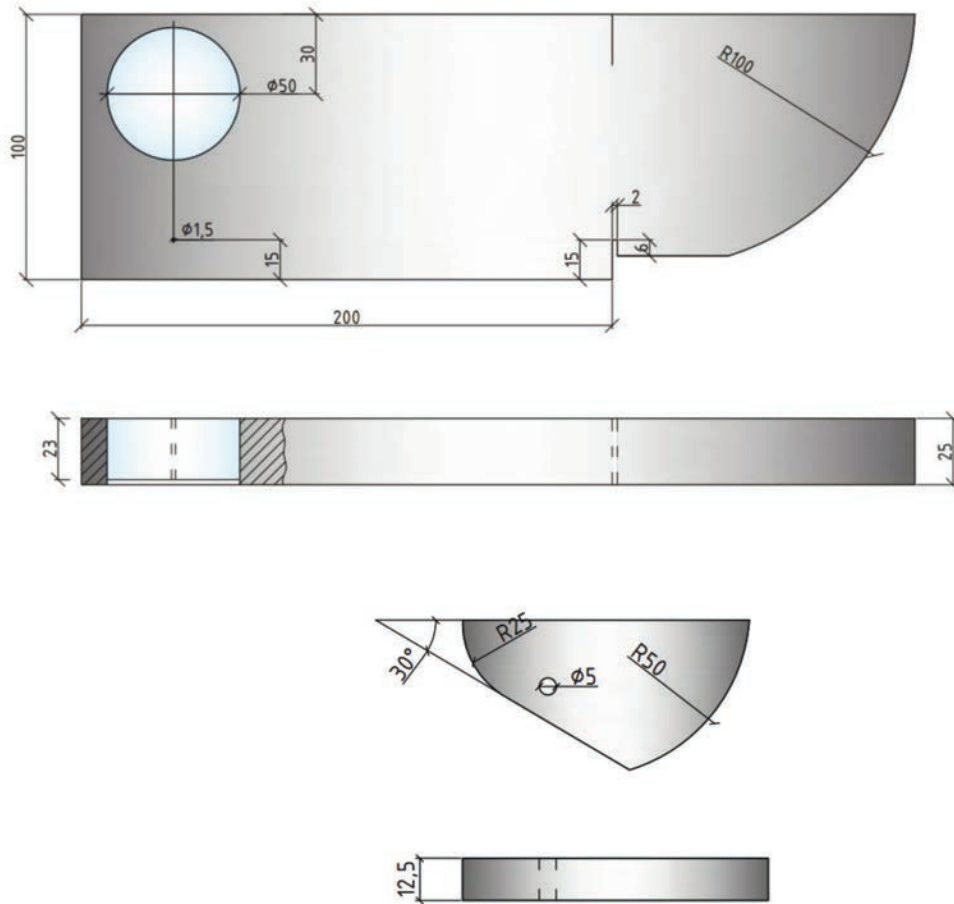


Рис. 5. Образцы из стали V1 и V2.

Также допускается использование образцов V1 и V2 (рис. 5), принятых в зарубежной практике [3, 18, 19]. Диаметры БЦО этих в образцах — 1,5 и 5 мм соответственно, т.е. отличаются от БЦО в CO-2. Паз в образце V1 вместе с расположенными рядом плоскими поверхностями используется для проверки лучевой разрешающей способности пары УЗ преобразователь—дефектоскоп.

**Примечание.** При проверке параметров УЗ контроля по мерам и другим образцам следует иметь в виду отмеченные выше замечания о скорости УЗ волн.

К важному вопросу об отражателе типа «паз» вернемся ниже, а здесь рассмотрим другие «отражатели» в «настроечных» образцах, применяющиеся при выполнении УЗ контроля. Следуя работам проф. И.Н. Ермолова, начать необходимо с цилиндрического отверстия с плоским дном (плоскодонного искусственного отражателя) — рис. 6а [24, 31]. Исходя из приближения геометрической акустики, в указанных, а также зарубежных работах, например, [3],

показано, что амплитуда  $A_n$  эхосигнала, зеркально отраженного от плоского дна сверления, связана с радиусом этого сверления  $b_{\Pi}$  (или площадью его дна  $S_{\Pi}$ ), расстоянием до отражателя  $r$  и длиной УЗ волн  $\lambda$ , согласно соотношению [24]:

$$A_n \sim \frac{S_{\Pi}}{\lambda^2 r^2} = \frac{\pi b_{\Pi}^2}{\lambda^2 r^2}. \quad (3)$$

На этой основе разработаны АРД-диаграммы, т.е. номограммы, которые позволяют по амплитуде и времени приема эхосигнала от дефекта оценить его «эквивалентную» площадь (или диаметр) как площадь (или диаметр) сверления с плоским дном, амплитуда отраженного эхосигнала от которого равна амплитуде эхосигнала, принятого от дефекта. Пример такой номограммы приведен на рис. 7.

Сверление с плоским дном широко использовалось и используется в отечественной практике. Однако известны сложности, связанные с его применением. Во-первых, для того, чтобы считать отражение зеркальным, необходимо, чтобы диаметр сверления был достаточно большим по сравнению с длиной УЗ волны. На традиционных частотах 0,6—5 МГц минимальная длина поперечной волны в стали составляет 0,62 мм. Отсюда — ограничения по использованию АРД-диаграмм для оценки эквивалентной площади небольших дефектов (диаметром ориентировочно менее 2—3 мм) при контроле изделий и сварных соединений малых толщин (ориентировочно — 20 мм и менее). Кроме того, проверить плоскостность и шероховатость, а также откалибровать дно сверления малого диаметра, очевидно, достаточно сложно. Поэтому часто, в особенности при настройке оборудования для выполнения контроля изделий (стенки) малой толщины, используются другие отражатели, например, сегментный (рис. 6б) и угловой («зарубка» — рис. 6в), которые имитируют дефекты, выходящие на поверхность сварных швов — непровары, подрезы, несплавления по кромке.

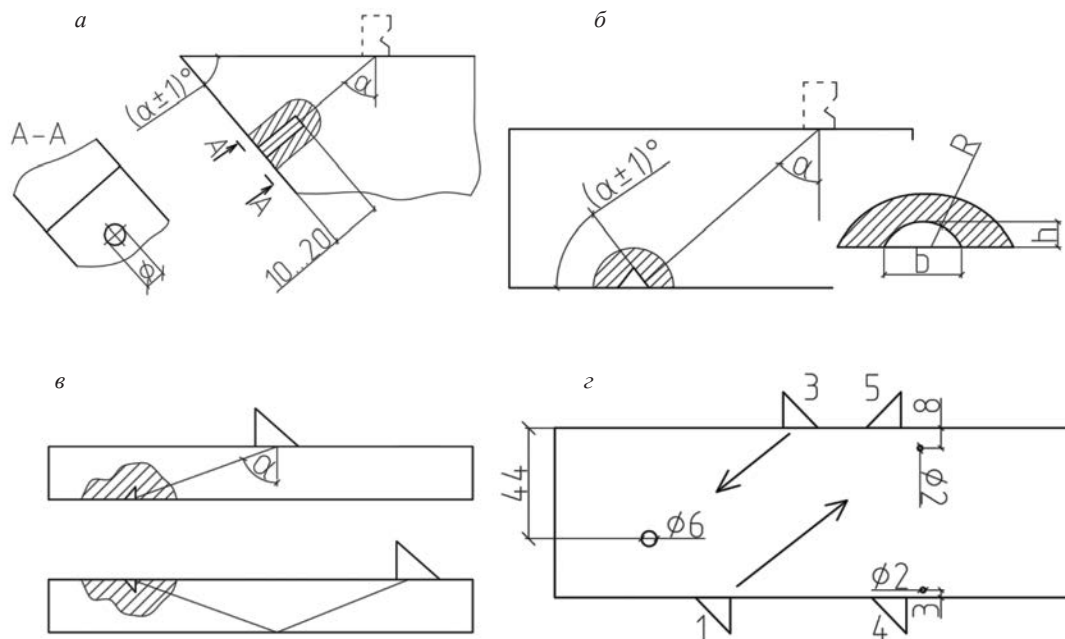


Рис. 6. Отражатели в настроечных образцах: сверление с плоским дном (а); сегментный (б); угловой (в); БЦО (г).

Согласно [11, 17, 31], принимается, что амплитуды сигналов, зеркально отраженных от сверления с плоским дном  $A_n$  и от сегментного отражателя  $A_{\text{Сег}}$  равны, если они одинаково ориентированы, расположены на одной глубине и имеют одинаковую площадь  $S_{\Pi} = S_{\text{Сег}}$ . При этом  $A_n$  вычисляется по (3). Размеры сегментного отражателя очевидно, должны быть такими, чтобы можно было вести речь о зеркальном отражении УЗ волн от его наклонной поверхности. Согласно [30], для этого необходимо выполнение условий:  $h > \lambda$ ,  $h/b > 0,4$ , где  $b$  — длина линии пересечения наклонного сегмента с поверхностью образца.



Требования к размерам и ориентации углового отражателя также можно найти в [29]:  $b, h > \lambda, h/b = 0,5 - 4$ . Пересчет площади вертикальной грани зарубки  $S_y = hb$  в площадь сверления с плоским дном выполняется по формуле:

$$S_{\Pi} = NS_y, \quad (4)$$

где коэффициент  $N$  определяется углом ввода УЗ волн согласно графику на рис. 8. Однако проблема в том, что требования к размерам и ориентации сегментных и в особенности угловых отражателей также очень сложно выполнить.

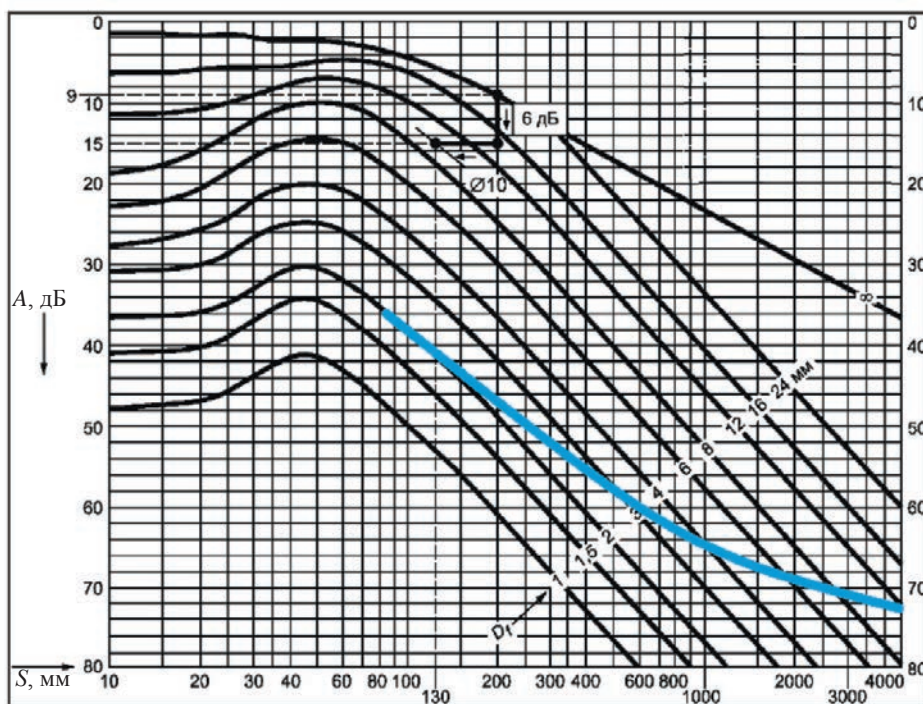


Рис. 7. Пример АРД-диаграммы по И.Н. Ермолову. Кривые черного цвета — для сверления с плоским дном. Для сравнения кривая синего цвета — для БЦО.

Для пояснения целесообразно привести справку по истории зарубки. Кривая, приведенная на рис. 8, была опубликована в журнале «Дефектоскопия» в 1973 г., т.е. более чем 50 лет назад [32]. Объяснение характера этой кривой было опубликовано спустя 6 лет в статьях [33], в которых установлено, что сигнал, рассеянный зарубкой, формируется в результате интерференции нескольких составляющих. При падении поперечной волны на донную поверхность образца под третьим критическим углом основной вклад вносят зеркальное отражение от зарубки (рассчитывается методом мнимого источника) и боковая (или головная) волна, которая возбуждается на донной поверхности и отражается от вертикальной грани зарубки (рис. 9). Если поперечная волна падает под третьим критическим углом на вертикальную грань зарубки, то вклад в результирующий сигнал дает уже боковая волна, возникающая на этой грани. Также формируются сигналы, дифрагированные на ребрах зарубки. Результат интерференции этих сигналов зависит от размеров и ориентации зарубки, а также от угла ввода УЗ волн, что и объясняет вид зависимости на рис. 8. Для сегментного отражателя ситуация аналогичная. В настоящее время влияние дифракционных эффектов на формирование результирующих сигналов представляются очевидными. Однако в 70-х годах прошлого века исследование этих эффектов только началось.

Наклеп, который образуется на поверхности металла при изготовлении зарубки ударом бойка специальной формы или вдавливанием твердотельного индентора (см., например, [34]), изменяет акустические свойства материала. Также сложно обеспечить требования к размерам, ориентации и шероховатости вертикальной грани. В некоторых источниках предлагается изготавливать зарубку на прецизионных станках в заводских условиях. Однако, как указано выше,

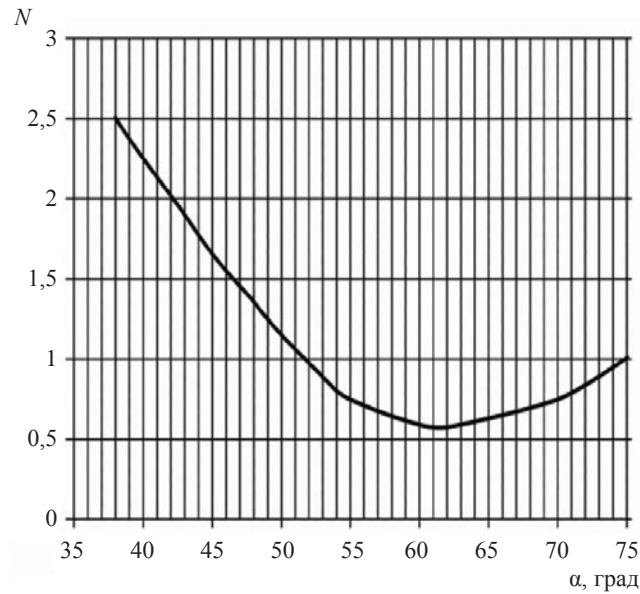


Рис. 8. Поправка к предельной чувствительности при использовании зарубки [17].

при этом акустические характеристики образцов, в т.ч. скорость УЗ волн, практически всегда отличаются от характеристик контролируемого материала.

Итак, угловой и сегментный отражатели также имеют ограничения по обеспечению необходимой точности ориентации и размерам, а также по возможному изменению свойств материала при их изготовлении. Поэтому актуален вопрос: можно ли использовать более простой отражатель?

В связи с этим вернемся к настройке по БЦО. Во-первых, протяженные сверления различной ориентации легко изготовить и калибровать, в т.ч. в производственных условиях. При этом акустические свойства материала образца практически не нарушаются, и это очевидное преимущество такого отражателя перед зарубкой. Во-вторых, на цилиндре диаграмма (индикатриса) рассеяния в зоне зеркального отражения практически круговая, и интенсивность дифрагированной волны, падающей вдоль цилиндра на пересечение цилиндр—дно, меньше, чем на зарубке. В-третьих, у БЦО или вертикального сверления отсутствуют торцы и боковые ребра, т.е. результирующий сигнал формируется проще, чем на зарубке или отверстии с плоским дном.

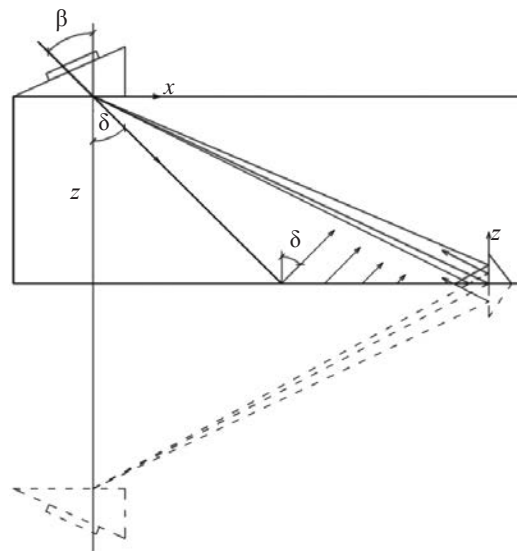


Рис. 9. Схема расчета экосигнала от зарубки [33].

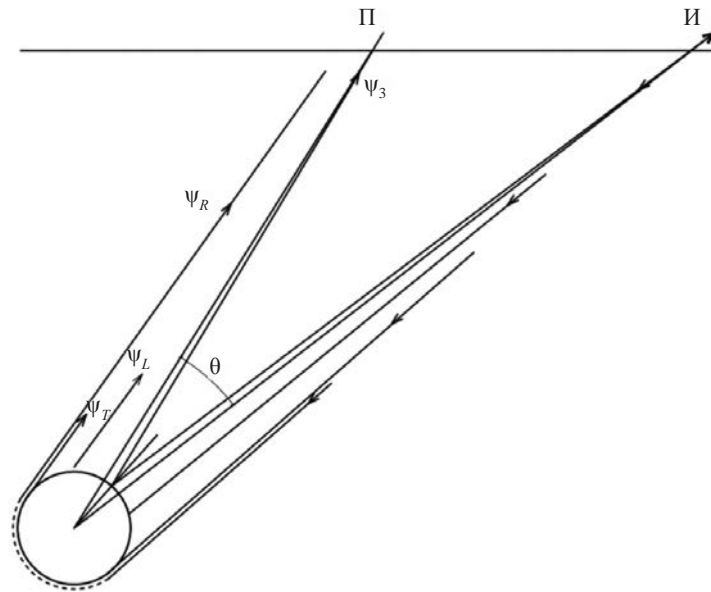


Рис. 10. Зеркальное отражение и огибание БЦО поперечными волнами.

Некоторое время назад, согласно статье [35], считалось, что БЦО малых диаметров не следует использовать для настройки чувствительности УЗ контроля, поскольку амплитуда принимаемого сигнала осциллирует при изменении диаметра цилиндра. Однако в работах [36, 37] показано, что эти осцилляции возникают, только если сигналы, зеркально отраженные от поверхности сверления, интерферируют с огибающими его сигналами (рис. 10), причем, согласно [38], время задержки огибающего сигнала вычисляется по формуле:

$$\delta_d = 2b_{\text{БЦО}} \left\{ \frac{\cos \frac{\Delta}{2}}{c_T} + \frac{\pi}{2c_R} \left( 1 - \frac{\Delta}{180} \right) \right\}, \tag{5}$$

где  $2b_{\text{БЦО}}$  — диаметр БЦО;  $\Delta$  — угол между направлением на источник и приемник УЗ волн (в градусах);  $c_T$  и  $c_R$  — скорости поперечной волны и волны Релея.

В настоящее время длительность УЗ импульсов на частотах 2,5 МГц и выше не превышает 1-2 мкс. При этом из (5) следует, что указанные сигналы практически всегда разрешаются во времени и не искажают друг друга при озвучивании БЦО диаметром от 2 мм поперечной волной, а амплитуда каждого из них монотонно меняется при изменении диаметра сверления. Например, амплитуда зеркально отраженного сигнала изменяется по закону [24]:

$$A_{\text{БЦО}} \sim \frac{(b_{\text{БЦО}})^{\frac{1}{2}}}{\lambda r^{\frac{3}{2}}}. \tag{6}$$

Эта зависимость взята за основу при настройке чувствительности по БЦО диаметром 6 мм в образце СО-2, согласно введенным проф. А.К. Гурвичем SKH-диаграммам, связывающим эквивалентную площадь дефекта с его выявляемостью сигнала изменяется по закону [1, 29].

Пример оценки по (6) — кривая синего цвета на рис. 7. Поскольку зависимость (6) более пологая, чем в (3) для сверления с плоским дном, то точность настройки чувствительности по сквозному сверлению может быть ниже, чем по отверстию с плоским дном. Однако для БЦО небольшого диаметра (например,  $d_{\text{БЦО}} = 2b_{\text{БЦО}} = 2$  мм) при контроле малых толщин, когда расстояния  $r$  невелики, из (3) и (6) следует, что зависимость  $A(r)$  остается достаточно крутой для обеспечения точности настройки чувствительности в пределах 1 дБ.

Таким образом, простота изготовления и проверки параметров БЦО позволяют больше ориентироваться на этот отражатель. Именно БЦО рекомендуют в зарубежных стандартах [39, 40] для построения кривых «расстояние—амплитуда» (DAS-кривых). Однако следует помнить, что

при разбраковке дефектов по эквивалентной площади чувствительность контроля необходимо пересчитывать с учетом соотношения амплитуд в (3) и (6).

Отметим, что задержку времени  $\delta_d$  между зеркально отраженным и наиболее существенным огибающим БЦО сигналами можно использовать для проверки и настройки шкалы глубиномера и шкалы времени [36, 38]. Например, для совмещенной схемы ввода поперечной волны наклонным УЗ преобразователем, т.е. при  $\Delta = 0$ , из (5) получим:

$$\delta_d = E \cdot b_{\text{БЦО}}, \quad (7)$$

где  $b_{\text{БЦО}}$  задается в миллиметрах;  $\delta_d$  — в микросекундах. Постоянный коэффициент может быть несколько уточнен для каждого конкретного материала. Если диаметр сверления задан с погрешностью 0,1 мм, то интервал времени определяется из (7) с погрешностью не более 0,1 мкс.

Рассмотрим также вертикальный цилиндрический отражатель, например, сквозное отверстие. Согласно [24, 41], амплитуда  $A_{\text{BC}}$  зеркально отраженного от него сигнала, принимаемого наклонным совмещенным преобразователем с углом ввода  $\alpha$ , определяется соотношением:

$$A_{\text{BC}} \sim \frac{N_{\text{BC}} (b_{\text{БЦО}})^{\frac{1}{2}}}{\sin \alpha \lambda r^{\frac{3}{2}}}, \quad (8)$$

где коэффициент  $N_{\text{BC}}/\sin \alpha$  аналогично коэффициенту  $N$  для зарубки в (4) учитывает возможное влияние донной поверхности. Используя (8) совместно с (3), можно пересчитать чувствительность при настройке по вертикальному сверлению по сравнению с настройкой по сверлению с плоским дном.

Заметим, что вертикальное сверление универсально в том смысле, что его пересечение с поверхностями образца имитирует дефекты, выходящие на поверхность изделий, а центральная часть — внутренние дефекты. Поэтому одно и то же сверление можно использовать на прямом и отраженном луче, в схеме «тандем», в «хордовой» или любой другой схеме, в которой плоскости ввода и/или вывода УЗ волн не совпадают с плоскостью рис. 6 (см., например, [1, 42, 43]). Следует только помнить, что БЦО в образце СО-2 озвучивается перпендикулярно оси цилиндра, т.е. имеет место двухмерная задача рассеяния УЗ волн на цилиндрической полости, а для вертикального сверления реализуется 3D-рассеяние: направления озвучивания не перпендикулярны оси цилиндра [44, 45], и может потребоваться корректировка расчета рассеянных сигналов.

Также отметим, что, как показано в [38, 45], амплитуда сигнала от сверления в широком диапазоне углов и свойств материалов пропорциональна углу наклона оси цилиндра. Это дает возможность снизить влияние наклонов оси сверления на результаты настройки параметров УЗ контроля. Например, чувствительность можно настраивать по полусумме амплитуд эхосигналов  $A_1$  и  $A_2$ , принимаемых от сверления с противоположных направлений, как на рис. 11:

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2}. \quad (9)$$

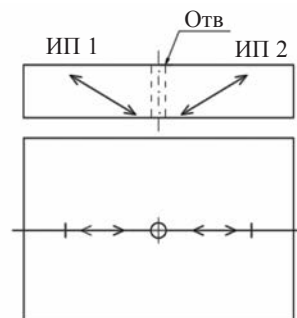


Рис. 11. К настройке чувствительности по вертикальному сверлению.



Величина  $A$  с погрешностью менее  $\pm 0,75$  дБ равна номинальной амплитуде эхосигнала от цилиндрического сверления, выполненного строго вертикально.

Из изложенного очевидно, что метрологическое обеспечение ультразвукового контроля при использовании сверлений различного направления в образцах реализовать значительно проще, чем для других отражателей, рассмотренных в настоящем разделе. Представляется целесообразным более широко использовать данные отражатели, в том числе вертикальные сверления, при пересмотре действующего стандарта [17].

### ПАЗЫ В НАСТРОЕЧНЫХ ОБРАЗЦАХ

Завершая приведенный обзор, необходимо рассмотреть использование пазов в качестве отражателей. Выше они упоминались в связи с проверкой разрешающей способности системы преобразователь—дефектоскоп по образцам СО-1 и V1. Рассмотрим этот отражатель с другой точки зрения. Точнее, далее говорить о пазе как об отражателе не совсем корректно, поскольку речь больше пойдет о дифракционных эффектах, например, дифракционно-временного метода (ДВМ или TOFD — Time-of-Flight Diffraction) [6, 46]. В стандартах, в том числе зарубежных, действующих ориентировочно с 1998 года, например, в [47], рассеянный на острие паза сигнал используется для настройки диапазона развертки. При этом оговаривается раскрытие паза, например, 0,2 мм, и угол между гранями в острие —  $60^\circ$  (рис. 12). Но что представляет собой это острие и как изготовить паз, чтобы выполнить требования к его геометрической форме?

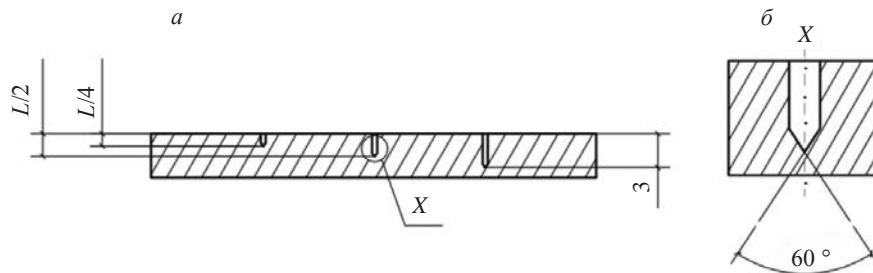


Рис. 12. Фрагмент настроенного образца с пазами, согласно [47]: общий вид (а); регламентированная форма паза (б).

Очевидно, при фрезеровании торец паза имеет естественное закругление. Его диаметр можно уменьшить, если изготавливать паз электроэрозионным способом. Но и в этом случае торец имеет вид полуцилиндра (рис. 13).

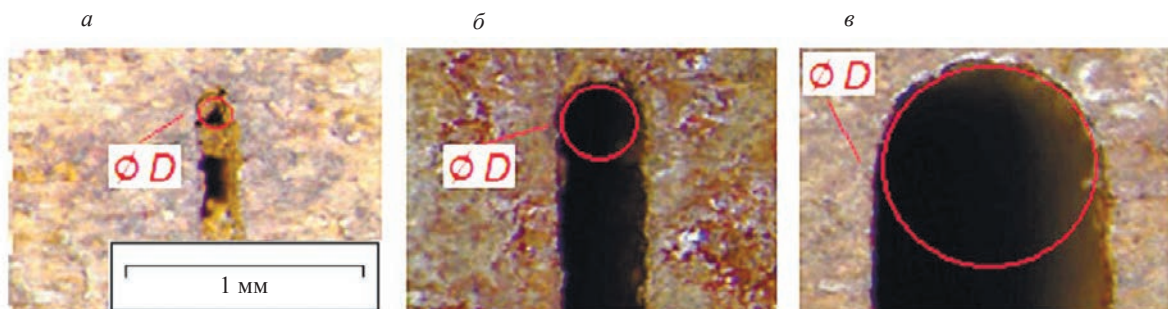


Рис. 13. Макрошлифы пазов раскрытием 0,14 (а), 0,4 (б), 1,0 (в), выполненных электроэрозионным способом [48].

В TOFD главная анализируемая характеристика — не амплитуда сигналов, а время их приема. При раскрытии паза в доли миллиметра это время можно фиксировать в пределах ориентировочно 0,1 мкс, что достаточно для измерения координат острия в стали или алюминии с точностью в пределах 0,6 мм для продольной волны или 0,3 мм для поперечной. Иная ситуация имеет место при анализе амплитуд сигналов от пазов. На частоте 5—10 МГц диаметр закругления электроэрозионного паза близок к 0,4 длины волны. Экспериментальные результаты свиде-



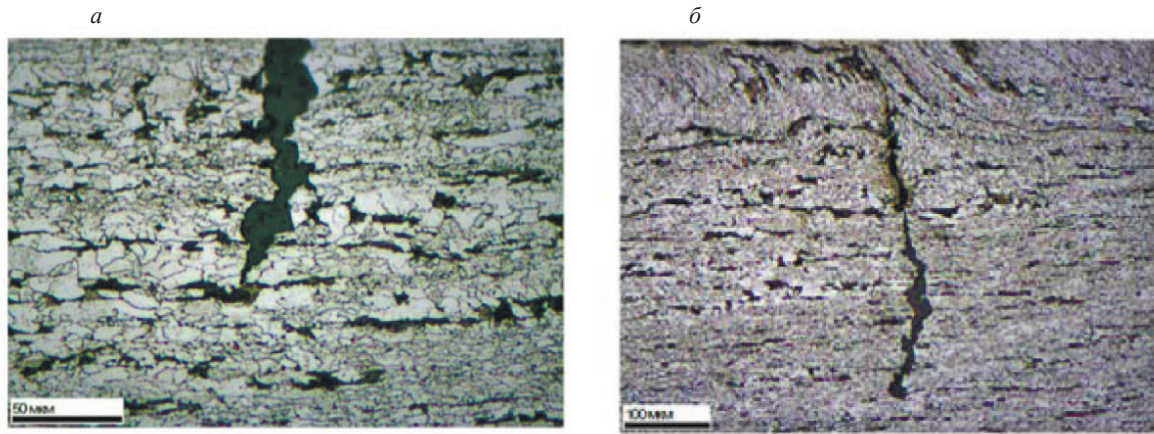


Рис. 14. Трещины в сечении стенки трубы [49, 50]. Масштаб: 1 см : 50 мкм (а); 1 см : 100 мкм (б).

тельствуют о том, что угловые зависимости амплитуд сигналов, рассеянных на таких закруглениях, аналогичны рассеянию на БЦО, а не на острие полуплоскости, имитирующей трещину [48]. Поэтому амплитуду сигнала, рассеянного торцом паза, даже при минимально достижимом его раскрытии нельзя использовать для оценки наличия или отсутствия острия у реального дефекта. Причина становится очевидной, если сравнить рис. 13 с рис. 14, на котором в аналогичном масштабе показаны микрошлифы стальных образцов с трещинами: раскрытие трещин существенно меньше даже при самом малом раскрытии пазов.

Также отметим, что в стандартах [6, 47] пазы (пропилы) предлагается завершать сверлением малого диаметра. Согласно изложенному выше, такие сверления диаметром не более 2 мм позволяют задавать время приема сигналов, огибающих пропилов, с точностью в пределах 0,1 мм. Однако при этом УЗ волны огибают сверления по механизму, аналогичному приведенному на рис. 10 для объемного дефекта. Поэтому, как и для рис. 12 и рис. 13, амплитуда регистрируемых сигналов не соответствует амплитуде сигналов, огибающих острие трещин.

Представляется целесообразным учесть изложенные особенности рассеяния УЗ волн на пазах при очередном пересмотре стандарта [17].

### О МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФЕКТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СКАНИРОВАНИЯ

Далее рассмотрим перспективы использования различных искусственных отражателей для настройки параметров УЗ контроля с учетом автоматизации сканирования, цифровой обработки сигналов и представления информации о дефектах в сечениях изделий. Один пример был приведен при иллюстрации возможности измерения толщины изделия по В-скану. На рис. 15 приведен другой пример изображения сечения металла: S-скан стыкового сварного шва толщиной 9 мм, полученный фазированной антенной решеткой (ФАР) с углами ввода в диапазоне 45—70°. При наложении этого изображения на разделку кромок видно, что сигналы 1-1 и 1-2 на прямом и отраженном лучах получены от несплавления 1, а сигнал 2 — на прямом луче от шлакового включения 2.

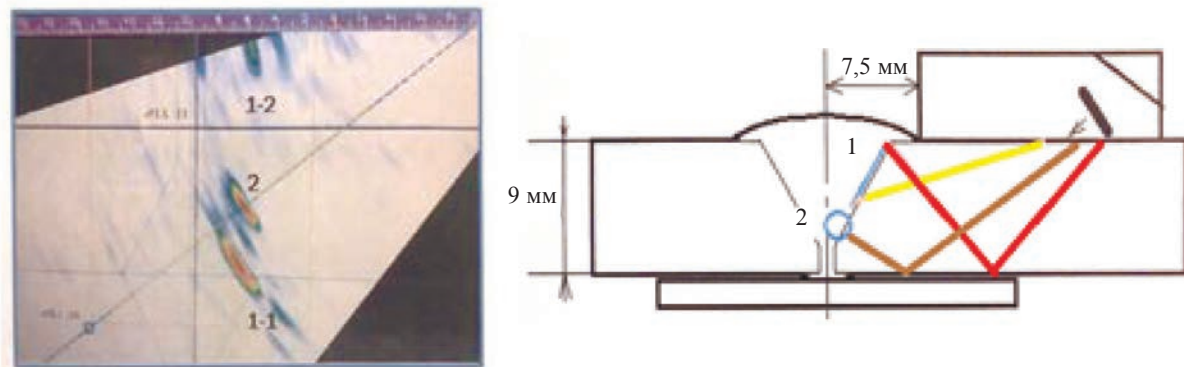


Рис. 15. S-скан сварного шва.

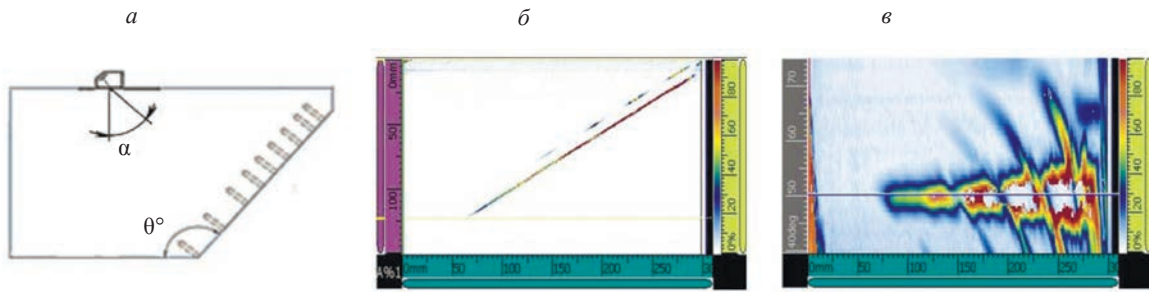


Рис. 16. Результат сканирования образца с плоскдонными отверстиями: схема расположения плоскдонных отверстий (а); В-скан (б); С-скан (в) [58].

Традиционно считается, что амплитуда сигнала от плоскостного дефекта должна быть больше, чем от объемного с аналогичной апертурой. На рис. 15 максимальная амплитуда соответствует красному цвету, т.е. соотношение амплитуд — обратное. Очевидно, причина в том, что несплавление озвучивается неоптимальным образом.

В связи с этим вернемся к рассмотрению искусственных дефектов в образцах для настройки параметров УЗ контроля. При построении АРД-диаграмм «вручную» преобразователь путем небольших смещений и поворотов выставляется так, чтобы амплитуда эхосигнала от плоского дна на рис. 6а принимала максимально возможное значение. Однако при автоматизированном контроле часто нет возможности искать максимальную амплитуду сигнала от каждого дефекта. На рис. 16 приведен пример В- и С-сканов отверстий с плоским дном при автоматизированном перемещении преобразователя по поверхности настроечного образца. Теперь максимальное значение амплитуды для каждого отражателя, как минимум, не очевидно.

С одной стороны, при контроле сварных швов допускаются определенные отклонения параметров контроля от номинальных значений [8, 17, 50—52]. Но с другой стороны, на практике такие отклонения могут оказаться весьма существенными [53—55]. В работах [56, 57] показано, что при допустимом изменении частоты УЗ волн в пределах  $\pm 10\%$  или угла ввода на  $\pm 3^\circ$ , амплитуда сигнала от сверлений с плоским дном измеряется до  $\pm 2$  дБ в первом случае и до  $\pm 3,5$  дБ во втором (рис. 17). Таким образом, даже в традиционном эхометоде возможны ошибки в два раза и более при настройке чувствительности и далее — при измерении эквивалентной площади дефектов.

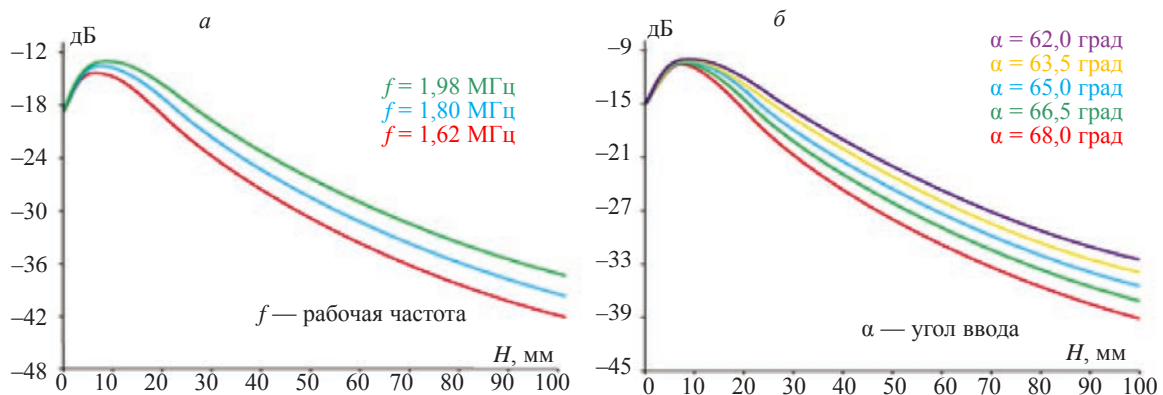


Рис. 17. Влияние частоты (а) и угла ввода (б) на параметры АРД-диаграмм [56].

Аналогично и для зарубки: при смещении преобразователя от расчетного положения на 1-2 мм амплитуда принимаемого сигнала может измениться на 6 дБ, т.е. измеренная эквивалентная площадь может отличаться от расчетной в 2 раза. Но именно такая ситуация имеет место при сканировании изделий в автоматизированном режиме: перемещая преобразователь вдоль сварного шва, оператор как правило озвучивает дефект в «неоптимальном» направлении.

Если по условиям эксплуатации объекта в обязательном порядке требуется повысить точность локализации дефектов, то детальное сканирование с дублированием в автоматизирован-

ном или ручном режимах может быть экономически оправдано. Однако при этом производительность контроля может снизиться в разы. Чаще нет возможности повторять сканирование. Это имеет место, например, при диагностировании сварных швов магистральных трубопроводов, резервуаров и т.д. Поэтому необходимо оценивать дефекты в условиях, когда акустические изображения, полученные при одном цикле сканирования, не обеспечивают измерение максимальных значений амплитуд сигналов. Также важно, что по мере развития технологии УЗ дефектоскопии необходимо повышать степень автоматизации расшифровки изображений [9]. Поэтому поставленные вопросы представляются актуальными для дальнейшего развития дефектоскопии в целом и в частности — применяемых методик и технологии УЗ контроля.

Наиболее простая ситуация возникает, если при следующем цикле обследования выявляются новые сигналы, которые можно интерпретировать как сигналы от дефектов, возникших в изделии в междиagnostический период. В этом случае амплитуда имеет вспомогательное значение. Более важен сам факт возникновения дефекта. Необходимо определить, это механическое повреждение, трещина или коррозия. Если тип дефекта определен, то можно анализировать причину его появления и скорость развития, планировать срок и условия продолжения эксплуатации или срок вывода объекта в ремонт.

Более сложный случай, если при обследовании выявляется изменение параметров ранее обнаруженных сигналов, например, возросла амплитуда или условная протяженность. Впрочем, возможно изменение и в сторону уменьшения. Тогда для принятия каких-либо решений необходимо определить, насколько существенно обнаруженное изменение, укладывается ли оно в пределы погрешности измерений. Поясним это на примере, разработанном согласно [8] для привязки размера дефекта в изделии к сроку, в течение которого может продолжаться эксплуатация объекта (рис. 18). По осям отложены размеры дефекта, измеренные при УЗ контроле, кривая 1 задает предельно допустимые размеры дефектов, и введены области сроков безопасной эксплуатации: 2 — на конец срока оценки; 3, 4, 5 — на 1, 2 и 4 года соответственно. Видно, что в данном случае разница в высоте дефектов, переводящих их из одной категории в другую, составляет 2 мм. Но из того же источника [8] известно, что погрешность измерения высоты дефекта (или глубины залегания его острия в сварном шве) близка к длине УЗ волны. Следовательно, для поперечной волны на частоте 2,5 МГц, т.е. при длине волны в стали 1,2 мм, погрешность измерения высоты дефекта составит, как минимум,  $\pm 1,2$  мм. Например, если измеренная высота дефекта составила 5,5 мм при условной протяженности 50 мм, то из рис. 18 следует, что изделие с дефектом может эксплуатироваться до 2 лет. Однако с учетом указанной погрешности высота дефекта находится в диапазоне от 4,3 до 6,7 мм. Следовательно, допустимый срок эксплуатации изделия должен быть снижен до 1 года. Измерив координаты острия дефекта с меньшей погрешностью, можно было бы более точно выполнить оценку срока безопасной эксплуатации объект, или задать меньшие коэффициенты запаса.

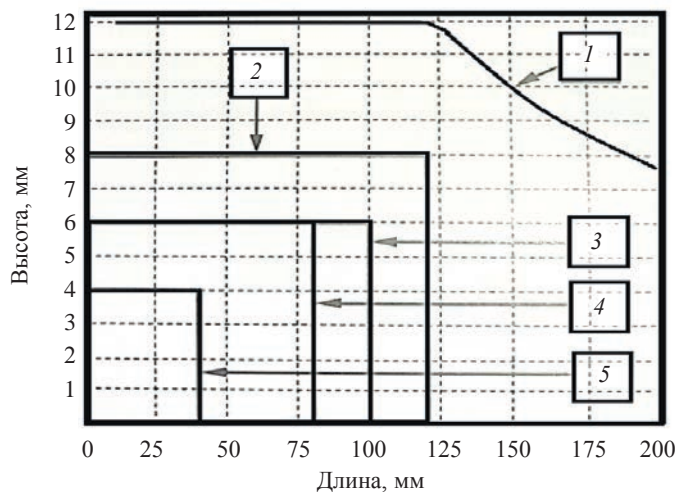


Рис. 18. Диаграмма допускаемых размеров дефектов.

На рис. 19а, б приведен еще один пример из сборника [8]: В- и D-сканы одного и того же выявленного дефекта, т.е. его УЗ изображения в поперечном сечении сварного шва и в сечении вдоль оси шва. Из изображения микрошлифа на рис. 19в следует, что обнаружена трещина. Однако необходимо обратить внимание на то, что по вертикальной оси В- и D-сканов шкала



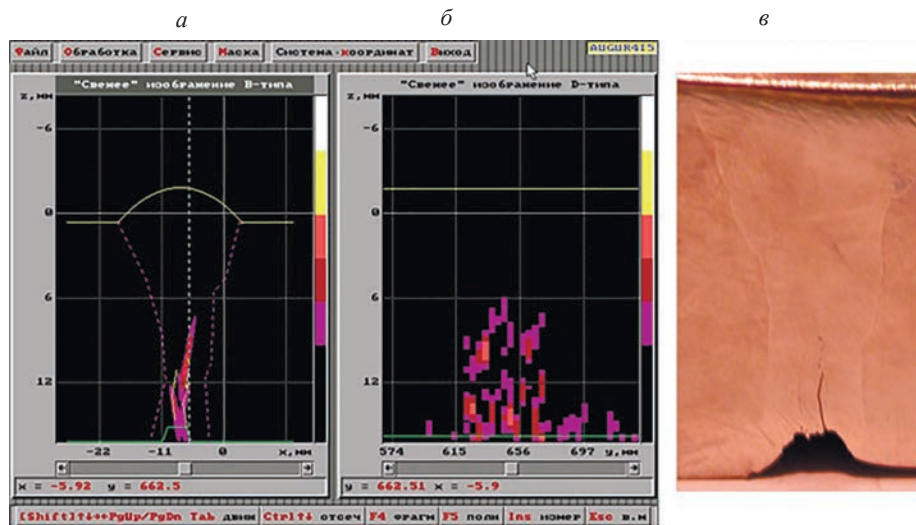


Рис. 19. В- и D- сканы в сравнении с микрошлифом реальной трещины [8].

построена с шагом 6 мм. Возникает вопрос: на каком участке D-скана и с какой точностью измерена его высота? Ведь если сместить преобразователь на несколько миллиметров вдоль оси сварного шва, то при оценке высоты дефекта можно ошибиться на  $\pm 2$  мм относительно изображения, показанного В-скане слева. При этом амплитуда сигнала от дефекта может как увеличиться, так и уменьшиться, что приведет к неопределенности в оценке срока безопасной эксплуатации объекта по диаграмме на рис. 18. Поэтому, как указано выше, при анализе изображений дефектов в сечении изделий следует иметь в виду, что амплитуда принимаемых сигналов — важный, но не единственный, а иногда и не основной параметр, который необходимо анализировать при измерении размеров и разбраковке дефектов.

С одной стороны, приведенные акустические изображения дефектов иллюстрируют то существенное движение вперед, которое произошло в УЗ дефектоскопии с начала 21 века. Действительно, разработаны и внедрены в производство технологии УЗ дефектоскопии, позволяющие визуализировать положение дефектов в сечении изделий и сварных швов. С другой стороны, представляется, что в настоящее время метрологическое обеспечение УЗ методов контроля, в частности вопросы точности измерений параметров дефектов по получаемым изображениям, отстают от самих этих технологий. Например, возникает актуальный вопрос о том, как правильно настраивать параметры автоматизированного УЗ контроля, когда выявление и разбраковка дефектов проводится в рамках непрерывного цикла измерений [9]. По-видимому, требуются дополнительные технологические приемы, которые позволят уточнить параметры выявляемых дефектов.

Приведем примеры из смежных областей науки и техники. Например, хорошо известно, что дельфины (афалины) применяют эхолокацию для ориентирования, поиска, общения в воде. Исследователи, работающие в данной области, полагают, что дельфины используют четыре различных способа озвучивания объектов на разных частотах, с разных направлений и с разными диаграммами направленности на излучении и приеме. В результате формируется четырехмерное изображение окружающей среды, включая три пространственные координаты и спектральный состав принимаемых сигналов. Это дает возможность, например, различать два шара из одинаковых материалов, диаметры которых отличаются на 2-3 %, или два одинаковых по форме предмета с разницей плотности 10 % [13].

Другой пример — УЗИ-сканирование при медицинском обследовании мягких тканей человека [14]. Обычно используются частоты в диапазоне от 1 МГц (длина волны — 1,5 мм) до 6 МГц (длина волны 0,4 мм). Однако для измерения толщины отдельных структур, например, оболочек органов или кожных покровов, частота может быть повышена до 12 МГц, что соответствует длине волны 0,2 мм. Применяется несколько приемов, в том числе сравнение результатов озвучивания органов с различных направлений. В результате специалисты фиксируют размеры объектов ориентировочно от 0,2 мм.

Имеется несколько существенных отличий в условиях эхолокации в приведенных примерах и в УЗ дефектоскопии. Во-первых, в жидкости отсутствует поперечная волна, и поэтому количество помех акустического происхождения меньше, чем при обследовании упругих сред. Во-вторых, для указанных областей применения УЗ локации выявление трещин и измерение

кривизны в острие объекта не является характерной задачей. Наконец, и для дельфинов, и в медицине важное значение имеет экзогенность внутренней структуры обследуемого «органа»: однородна ли она, выделяются ли в ней дополнительные элементы. В УЗ дефектоскопии внутренняя структура трещины или шлакового включения обычно не представляет интереса.

Но подчеркнем, что наиболее важной общей особенностью приведенных примеров, которая может быть важна для УЗ дефектоскопии, является то, что наблюдаемые объекты оцениваются только по результатам сравнения акустических изображений, получаемых по разным каналам или с разных направлений и после их сравнения с «нормой». При этом амплитуда принимаемых сигналов — важный, но не основной анализируемый параметр.

Развитие УЗ дефектоскопии в целом также идет в этом направлении. Примером являются технологии, использующие многоэлементные системы с синтезированной апертурой — цифровой фокусировкой антенной решеткой (ЦФА) [59, 60]. В зарубежной практике за аналогичными системами закрепилась аббревиатура FMC/TFM (Full Matrix Capture / Total Focusing Method — полноматричный захват в сочетании с методом полной фокусировки) [61]. Эти методы основаны на том, что каждый из элементов антенной решетки (или некоторая группа элементов) излучает УЗ волны, и каждый элемент решетки (или некоторая группа элементов) принимает сигналы, рассеивающиеся на дефекте. Габаритные размеры антенной решетки обычно составляют единицы сантиметров, т.е. дефекты протяженностью или высотой в единицы миллиметров озвучиваются с разных сторон, а программное обеспечение «собирает» все рассеянные сигналы с учетом их амплитуд, фаз и сдвига во времени приема.

На рис. 20 иллюстрируется акустическое изображение БЦО диаметром от 1 мм, полученное методом FMC/TFM. Координаты сверлений можно определить в пределах 1 мм. Аналогичные изображения объемных дефектов можно найти в [8, 59] и других источниках. Но возникает вопрос: как выглядят акустические изображения плоскостных дефектов? Возможный ответ приведен, например, в [62]. Используя специальные алгоритмы обработки на основе метода ЦФА, авторы получили акустические изображения щели, раскрытием менее 1 мм, глубиной 4 мм в образце толщиной 17 мм из стали Ст20 в сравнении с изображением БЦО диаметром 1,5 мм — рис. 21.

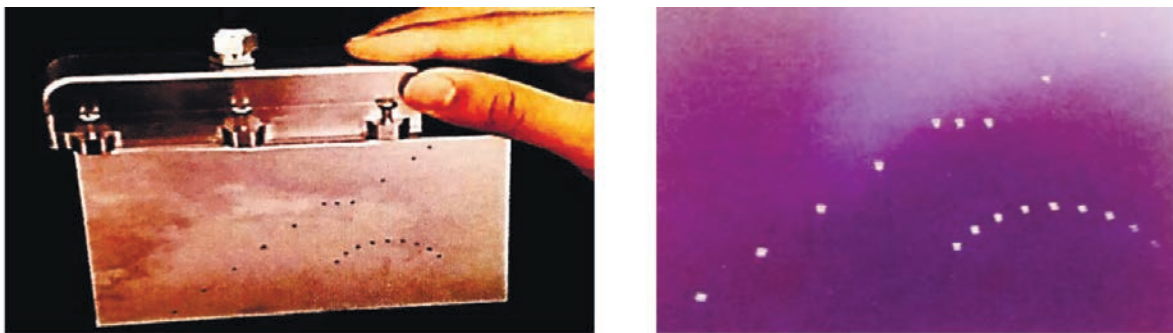


Рис. 20. Выявление БЦО в стальном образце с применением FMC/TFM [61].

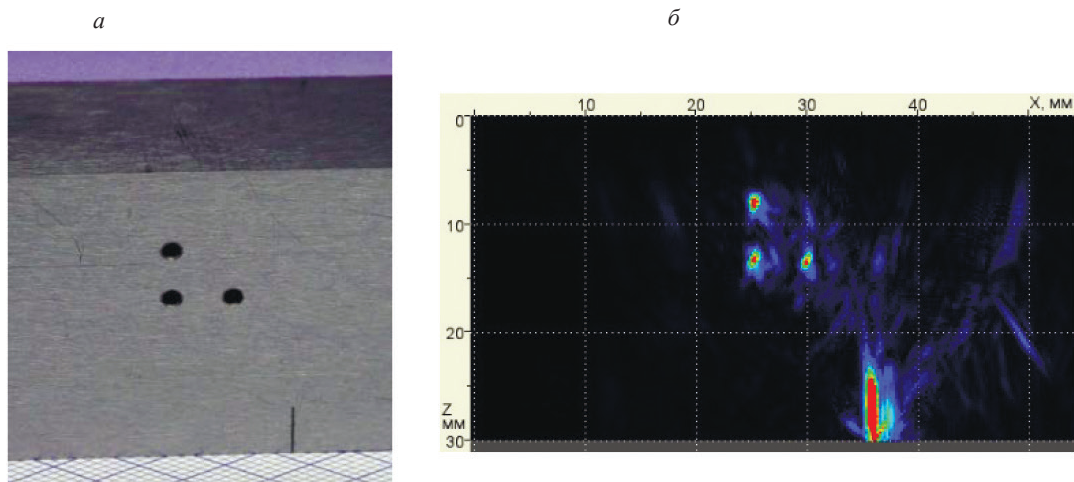


Рис. 21. Выявление БЦО диаметром 1,5 мм и вертикального паза глубиной 4 мм с применением ЦФА [5].



На таких томограммах изображение плоскостного дефекта (паза) можно соотнести с его фактической формой. Эффект усиливается, если одновременно фиксировать изображение дефекта в перпендикулярном сечении, как на рис. 19а, б. Однако по изображениям на рис. 15, 19, 21 раскрытие и координаты «острия» реального или «искусственного» дефекта можно только оценить в пределах 2-3 мм в зависимости от уровня чувствительности, на котором выполняется измерение. Это естественное ограничение связано с соотношением длины УЗ волны, длительности импульса и достижимой разрешающей способностью. Более того, изображение реальных трещин на томограммах по сравнению с изображениями искусственных дефектов (пазов) может дополнительно расширяться в связи с рассеянием УЗ волн на шероховатой поверхности дефекта, наклоненного по отношению к поверхностям изделия [5, 63].

Таким образом, в настоящее время вряд ли можно считать, что погрешность измерения раскрытия плоскостных дефектов по УЗ томограммам достаточно мала, чтобы уверенно оценивать координаты острия и раскрытие плоскостных дефектов с погрешностью менее миллиметра. Фактически решение о раскрытии трещины принимается на основе экспертной оценки после обучения специалиста (или автоматизированной системы) с использованием баз данных изображений искусственных и реальных трещин и других дефектов. Для того, чтобы в полной мере использовать информацию, которую в настоящее время позволяют получать В-, С-, D- и др. сканы, необходимо разрабатывать и накапливать цифровые модели изделий, сварных швов и настроечных образцов с искусственными и реальными дефектами разного типа и без них. Для автоматизации измерения раскрытия и габаритов дефектов по их акустическим изображениям, необходимо учитывать:

- размеры и ориентацию искусственных дефектов (пазов, сверлений);
- форму образа дефекта на акустических изображениях с учетом озвучивания дефекта с разных направлений.

Также представляется целесообразным анализировать спектр принимаемых сигналов. Амплитуда сигналов на акустических изображениях также важна, но существенно меньше, чем это было при анализе А-сканов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Образцы (меры) СО-2, СО-3 и аналогичные, а также настроечные образцы с искусственными дефектами предназначены для определения предельно достижимых характеристик оборудования для ультразвукового контроля и для настройки этого оборудования.

2. В зависимости от области применения и вида контролируемых изделий при настройке параметров УЗ контроля применяются настроечные образцы с искусственными и/или естественными дефектами. Такие «дефекты» только условно можно называть традиционным словом «отражатель», поскольку часто основной вклад в регистрируемые сигналы вносят дифракционные эффекты.

3. Среди искусственных дефектов («отражателей») наибольшее распространение в отечественной практике имеют донная поверхность (плоская и цилиндрическая), сверления с плоским дном, БЦО (боковые цилиндрические отверстия), угловые отражатели («зарубки»). В зарубежной практике в большей степени применяются пазы. Также пазы и БЦО используются при контроле с использованием ультразвукового дифракционно-временного метода TOFD.

4. Вертикальные сверления при настройке используются редко, достоинства этого отражателя при работе эхометодом недооценены. Между тем, меры и настроечные образцы с искусственными дефектами («отражателями») в виде сверлений наиболее просто изготовить и подтвердить их метрологические характеристики. Используя простые технологические приемы, можно существенно снизить влияние случайных отклонений ориентации сверлений и акустических свойств материала на результаты настройки параметров УЗ контроля. Представляется целесообразным рекомендовать расширить применение цилиндрических сверлений различной ориентации, а также пазов, при очередном пересмотре стандартов по ультразвуковому контролю.

5. На современном этапе развития УЗ дефектоскопии термин «моделирование дефектов» целесообразно понимать не в традиционном ранее смысле: «какие модели искусственных дефектов лучше всего использовать», а в том смысле, что методики и технология настройки оборудования и способы обработки получаемой информации, включая применение настроечных образцов, должны позволять идентифицировать дефект и измерять его параметры с точностью, необходимой для расчета прочности, устойчивости, остаточного ресурса, других эксплуатационных характеристик объекта. Технология УЗ контроля должна обеспечивать измерение размеров, формы и ориентации дефектов. Для достижения этой цели необходимо обучение (специалистов и/или автоматизированных систем) с использованием цифровых «двойников»

настроечных образцов с дефектами, которые можно получить, например, применяя цифровую фокусировку антенной решетки (ЦФА или FMC/TFM).

6. С учетом современных трендов построения оборудования неразрушающего контроля и сформированных задач автоматической интерпретации измерительной информации с целью определения типа дефектов структуры (несплошностей) и их геометрических параметров, общая схема системы неразрушающего контроля (дефектоскопии) и условий выполнения технологических операций, в том числе в составе работ по диагностированию технически сложных систем, приведена на рис. 22, согласно [9, 64]. В рамках этой схемы необходимо обеспечивать валидацию (подтверждение соответствия заданным требованиям) цифровых моделей дефектов и объекта контроля, верификацию (апробацию) методик контроля, выполнение работ по контролю с автоматизацией различных операций. В состав таких операций могут входить (все или некоторые): калибровка и настройка оборудования путем выявления искусственных и/или реальных дефектов в настроечных образцах, сканирование, передача и запись первичных результатов, расшифровка получаемых акустических изображений, разбраковка каждого выявленного дефекта и изделия в целом, архивирование данных.

7. Принятие решения о размерах, форме, ориентации дефектов, выявленных по акустическим изображениям, приведенным на рис. 15, 16, 19 — 21, или аналогичным, полученных с использованием других методов визуализации, должно проводиться на основании сравнения акустического изображения дефектов в контролируемом изделии с «цифровыми двойниками» настроечного образца с искусственными и/или реальными дефектами и соответствующей нормативно-технической документацией. Аналогично — для получения информации о развивающихся дефектах. При этом следует помнить о возможных ограничениях на точность измерения величины раскрытия и координат дефекта в пределах 2-3 мм в зависимости от установленного уровня чувствительности. Это естественное ограничение связано с соотношением длины УЗ волны, длительности импульса и достижимой разрешающей способностью.

8. В настоящее время оценка параметров дефектов по В-, С-, D- и др. сканам выполняется на экспертном уровне высококвалифицированными специалистами. Для автоматизации этого процесса необходимо накопить представительную выборку акустических изображений («цифровых двойников») настроечных образцов и контролируемых изделий с дефектами и без них.

9. Необходимо разработать единые подходы к аттестации цифровых двойников настроечных образцов с дефектами и без них [9]. Если эту операцию проводить на оборудовании какой-либо одной фирмы, то может оказаться невозможным просмотр и анализ этих результатов на



Рис. 22. Общая схема выполнения работ по контролю качества [9, 64].

другом оборудовании. Поэтому целесообразно переходить на единый стандарт представления данных, получаемых при УЗ контроле. Например, известен формат DICONDE (Digital Imaging and Communication in NDE — Цифровая визуализация и связь в неразрушающем исследовании материалов) [6, 65]. Однако он разработан по аналогии с используемым в медицине форматом DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine — Цифровая визуализация и связь в медицине), который в первую очередь ориентирован на работу с плоскими изображениями. Для УЗ дефектоскопии этого недостаточно, поскольку необходимо хранить все виды сканов, в т.ч. А-сканы, которые неактуальны для радиографии. Возможно, лучшим решением было бы использование других предложения, например, [66], если это позволит универсальным образом, совместимым с оборудованием разных производителей, описывать весь набор информации, необходимой для получения, обработки, хранения, архивирования, передачи и приема акустических изображений отражателей, настроечных образцов и контролируемых изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х., Воцанов А.К., Ермолов И.Н., Гурвич А.К. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. С. 456.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 3. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2008. С. 864.
3. Krautkramer Josef & Herbert. Werkstoffprüfung mit Ultrachall. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1986. (И. и Г. Крауткремер. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. Пер. с нем. Под ред. В.Н. Волченко. М.: Металлургия, 1991. С. 752.)
4. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Кононов Д.А., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. Ультразвуковая дефектometрия металлов с применением голографических методов / Под ред. А.Х. Вopilкина. М.: Машиностроение, 2008. С. 368.
5. Интернет ресурс: <https://acsys.ru/vozmozhnosti-otsenki-kharactera-nesploshnosti-metalla-ultrazvukovym-tomografom/>. Дата обращения 18.12.2023.
6. Гинзел Э. TOFD. Дифракционно-временной метод ультразвуковой дефектоскопии. М.: ДПК Пресс, 2021. С. 312. (Ed. Ginzel. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.)
7. Ginzel E. Phased Array Ultrasonic Technology. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. С. 348.
8. Ультразвуковая дефектometрия. 30 лет: Юбилейный сборник трудов ООО «НПЦ «Эхо+» / Под ред. А.Х. Вopilкина. М.: Изд. дом «Спектр», 2020. С. 216.
9. Gogolinskiy K., Syasko V. Metrological Assurance and Standardization of Advanced Tools and Technologies for nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0) // Research in Nondestructive Evaluation. 2020. № 31. С. 325—339. <https://doi.org/10.1080/09349847.2020.1841863>
10. Syasko V., Gogolinskiy K. From NDT to Condition Monitoring // Development Trends in Digital Economy. null. 2020. No. 23. P. 4—8. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-4-8>
11. Могильнер Л.Ю., Неганов Д.А., Скуридин Н.Н. Обследование металлоконструкций на площадочных объектах магистральных трубопроводов. М.: Техносфера, 2023. С. 440.
12. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Санкт-Петербург: Изд-во Свен, 2014. 312 с.
13. Интернет ресурс: [stena.ee/blog/rfr-eto-rabotaet-eholokatsia-delfinov](https://stena.ee/blog/rfr-eto-rabotaet-eholokatsia-delfinov). Дата обращения 18.12.2023.
14. Интернет ресурс: [evromedcompany.ru/ultrazvuk/rukovodstvo-po-ultrazvuk](https://evromedcompany.ru/ultrazvuk/rukovodstvo-po-ultrazvuk). Дата обращения 18.12.2023.
15. Syas'ko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing // Appl. Sci. 2022. № 12. С. 2364. <https://doi.org/10.3390/app12052364>
16. Ogino T., Kawaguchi T., Yamashita S., Kawajiri S. Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain, cross-correlation, and frequency domain approaches // Soils and Foundations. 2015. No. 55. P. 329—342. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.009>.
17. ГОСТ Р 55724—2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
18. ISO 2400. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 1.
19. ISO 7963. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 2.
20. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 2006. С. 219.
21. Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г. Упругие волны в неоднородной пластине аустенита в модели трансверсальноизотропной среды // Дефектоскопия. 2001. № 7. С. 40—63.
22. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Безсмертный С.П., Могильнер Л.Ю. Влияние анизотропии упругости проката на выявляемость дефектов при ультразвуковом контроле качества сварки труб большого диаметра // Дефектоскопия. 1988. № 6. С. 80—86.



23. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под общей редакцией И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. С. 280.
24. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. С. 240.
25. *Конишина В.Н., Дымкин Г.Я.* Современные подходы к аттестации методик ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2008. № 2. С. 5—14.
26. ГОСТ 8.495—83 Государственная система обеспечения единства измерений. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки.
27. Интернет ресурс: [https://constant-us.com/catalog/nabor\\_kusot\\_180](https://constant-us.com/catalog/nabor_kusot_180)). Дата обращения 15.01.2024.
28. *Могильнер Л.Ю., Временко А.В., Скуридин Н.Н., Придеин О.А.* Применение электромагнитно-акустических толщиномеров при диагностировании металлоконструкций и механо-технологического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 3. С. 315—325.
29. ГОСТ 14782—86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
30. ГОСТ Р ИСО 5577—2009 Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь.
31. *Ермолов И.Н.* Методы ультразвуковой дефектоскопии. Л.—М.: Изд-во Московского горного института, 1966. С. 267.
32. *Краморов Г.А., Евсюков В.Н.* О соотношении площадей плоскодонного и углового отражателей // Дефектоскопия. 1973. № 4. С. 138—140.
33. *Перевалов С.П., Райхман А.З.* Акустический тракт наклонного искателя для отражателя углового типа // Дефектоскопия. Ч. 1. 1979. № 11. С. 5—15. Дефектоскопия. Ч. 2. 1979. № 12. С. 28—36.
34. Интернет ресурс: <https://a3-eng.com/ultrazvukovoj-kontrol>. Дата обращения 22.01.2024.
35. *Голубев А.С.* Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // Дефектоскопия. 1961. № 7. С. 174—180.
36. *Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю.* Анализ упругого поля ультразвуковых волн, рассеянных на цилиндрической полости // Дефектоскопия. 1982. № 12. С. 18—29.
37. *Могильнер Л.Ю.* Применение цилиндрического отражателя для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 27—36.
38. *Могильнер Л.Ю., Смородинский Я.Г.* Ультразвуковой контроль: применение цилиндрического сверления для настройки и поверки оборудования // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 14—20.
39. ASME T-530. Ultrasonic Testing of Welded Joints.
40. ISO 18611. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Sensitivity and range setting.
41. *Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бабалян В.Г.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. (Краткий справочник). М.: ООО НПЦ НК «Эхо+», 2004. С. 109.
42. *Чернов В.С.* Контроль качества сварных стыков труб малых диаметров: рентген или ультразвук // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С. 32—39.
43. Интернет ресурс: Официальный сервер Алтес (ultes.info). Дата обращения 15.03.2024.
44. *Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю.* Настройка чувствительности ультразвукового контроля по вертикальному цилиндрическому отверстию // Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 23—29.
45. *Алешин Н.П., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю.* Изучение дифракции упругой волны на канальных дефектах и рекомендации по повышению их выявляемости // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 4—10.
46. *Silk Maurice G. Dr.* Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. Bristol: Adam Hilger, 1984.
47. ISO 10863. Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD).
48. *Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю., Щипаков Н.А., Кусый А.Г., Тишкин В.В., Дегтярев М.Н.* Об использовании пазов для моделирования трещин при ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 2022. № 2. С. 3—12.
49. *Мельникова А.В., Мишарин Д.А., Богданов Р.И., Ряховских И.В.* Обоснование работоспособности магистральных газопроводов с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением // Коррозия Территория Нефтегаз. 2015. № 2 (31). С. 32—40.
50. *Алешин Н.П., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Кусый А.Г.* Ультразвуковой контроль и комплексное применение методов дефектоскопии при диагностировании магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 13 (1). С. 8—17.
51. *Колесников О.И., Гейт А.В., Голосов П.С.* Границы применимости дифракционно-временного метода контроля на объектах трубопроводного транспорта // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. № 12 (6). С. 560—568.
52. *Могильнер Л.Ю., Кысько Н.В., Идрисов М.Т., Кусый А.Г.* Опыт применения ультразвуковой технологии TOFD при диагностировании РВС // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 13 (5). С. 411—421.
53. РД 34.17.302-97 (ОП 501 ЦД-97) Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения.
54. *Басацкая Л.В., Воронков В.А., Стасеев В.Г.* Эталонирование чувствительности при ультразвуковом контроле // Тяжелое машиностроение. 2000. № 4. С. 24—26.

55. Розина М.В. АРД-диаграммы. Где правда? // В мире неразрушающего контроля. 1999. № 3. С. 28.
56. Данилов В.Н., Воронков В.А. О построении АРД-диаграмм // В мире неразрушающего контроля. 2001. № 2 (12). С. 20—22.
57. Данилов В.Н., Воронков В.А. К вопросу об эталонировании чувствительности ультразвукового контроля с использованием АРД-диаграмм // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 56—60.
58. Могильнер Л.Ю., Крысько Н.В. Рассеяние ультразвуковых волн на дефектах сварных швов и основного материала. Развитие аналитических и прикладных решений // Контроль. Диагностика. 2024. № 3. С. 4—13.
59. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 21—28.
60. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Смородинский Я.Г. Термины ультразвукового контроля с антенными решетками и что они означают // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 31—40.
61. Coulder A. Full Matrix Capture and Total Focusing Method: The Next Evolution in Ultrasonic Testing // Materials Evaluation. 2018. № 76 (5). С. 591—597. (Колдер А. Полномагричный захват и метод полной фокусировки: следующий этап развития ультразвукового контроля // В мире неразрушающего контроля. 2019. № 22 (4). С. 33—37.)
62. Интернет ресурс: <https://acsys.ru/vozmozhnosti-otsenki-kharaktera-nesploshnosti-metalla-ultrazvukovym-tomografom/>. Дата обращения 18.12.2023.
63. Аleshин Н.П., Могильнер Л.Ю., Лисин Ю.В., Крысько Н.В., Придеин О.А., Идрисов М.Т. Особенности обнаружения трещин при ультразвуковом контроле сварных соединений стенки резервуара вертикального стального // Нефтяное хозяйство. 2022. № 1. С. 86—91.
64. Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.S., Kolesnikov A. Synthetic Data Generation for Steel Defect Detection and Classification Using Deep Learning // Symmetry. 2021. No. 13. P. 1176—1176. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13071176>
65. The Value of DICONDE. Koetz, Andrea and Clendening, Sue. s.l.: NDT.net, 2008.
66. Peloquin E. The NDE 4.0 Journey: How Adopting a Universal Open Format Empowers the Whole Industry // e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT Articles & News). Vol. 29 (1). Режим доступа: <https://blog.asnt.org/the-nde-4-0-journey-how-adopting-a-universal-open-format-empowers-the-whole-industry/>. Дата обращения 09.01.2024.

#### REFERENCES

1. Aleshin N.P., White V.E., Vopilkin A.H., Voshchanov A.K., Ermolov I.N., Gurvich A.K. Methods of acoustic control of metals. M.: Mashinostroenie, 1989. С. 456.
2. Non-destructive testing: Reference book in 8 volumes / Under general editorship of V.V. Klyuev. V. 3. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Ultrasonic control. Moscow: Mashinostroenie, 2008. С. 864.
3. Krautkramer Josef & Herbert. Werkstoffprüfung mit Ultrachall. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1986. (J. & G. Krautkramer. Ultrasonic Inspection of Materials. Reference book; per. from German. Under edition of V.N. Volchenko. M.: Metallurgy, 1991. С. 752.)
4. Badalyan V.G., Bazulin E.G., Vopilkin A.H., Kononov D.A., Samarin P.F., Tikhonov D.S. Ultrasonic defectometry of metals with application of holographic methods / Ed. by A.H. Vopilkin. Moscow: Mashinostroenie, 2008. С. 368.
5. Internet resource: <https://acsys.ru/vozmozhnosti-otsenki-kharaktera-nesploshnosti-metalla-ultrazvukovym-tomografom/>. Date of circulation 18.12.2023.
6. Ginzel E. TOFD. Diffraction-time method of ultrasonic flaw detection. M.: DPK Press, 2021. P. 312. (Ed. Ginzel. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.)
7. Ginzel E. Phased Array Ultrasonic Technology. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. С. 348.
8. Ultrasonic defectometry. 30 years.: Anniversary Proceedings of LLC “NPC “Echo+” / Edited by A.H. Vopilkin. M.: Izd. Dom «Spektr», 2020. С. 216.
9. Gogolinskiy K., Syasko V. Metrological Assurance and Standardisation of Advanced Tools and Technologies for nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0) // Research in Nondestructive Evaluation. 2020. No. 31. P. 325—339. <https://doi.org/10.1080/09349847.2020.1841863>
10. Syasko V., Gogolinskiy K. From NDT to Condition Monitoring // Development Trends in Digital Economy. null. 2020. No. 23. P. 4—8. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-4-8>
11. Mogilner L. Yu., Neganov D.A., Skuridin N.N. Metal structures inspection at the site facilities of the main pipelines. M.: Technosphere, 2023. P. 440.
12. Kretov E.F. Ultrasonic defectoscopy in power engineering. Saint-Petersburg: Sven Publishing House, 2014. 312 p.
13. Internet resource: [stena.ee/blog/rfr-eto-rabotaet-eholokatsia-delfinov](https://stena.ee/blog/rfr-eto-rabotaet-eholokatsia-delfinov). Date of circulation 18.12.2023.
14. Internet resource: [evromedcompany.ru/ultrazvuk/rukovodstvo-po-ultrazvuk](https://evromedcompany.ru/ultrazvuk/rukovodstvo-po-ultrazvuk). Date of circulation 18.12.2023.
15. Syas'ko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing // Appl. Sci. Sci. 2022. № 12. С. 2364. <https://doi.org/10.3390/app12052364>



16. *Ogino T., Kawaguchi T., Yamashita S., Kawajiri S.* Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain, cross-correlation, and frequency domain approaches // *Soils and Foundations*. 2015. No. 55. P. 329—342. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.009>
17. GOST P 55724—2013. Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods.
18. ISO 2400. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 1.
19. ISO 7963. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 2.
20. *Muravyev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L.* Sound velocity and structure of steels and alloys. Novosibirsk: Nauka, 2006. С. 219.
21. *Rinkevich A.B., Smorodinsky Ya.G.* Elastic waves in an inhomogeneous plate of austenite in the model of a transversally isotropic medium (in Russian) // *Defectoscopya*. 2001. No. 7. P. 40—63.
22. *Alyoshin N.P., Baranov V.Yu., Bezsmertnyi S.P., Mogilner L.Yu.* Influence of the rolling elasticity anisotropy on the defects detectability at the ultrasonic quality control of the large-diameter pipes welding (in Russian) // *Defectoscopya*. 1988. No. 6. P. 80—86.
23. Ultrasonic piezoelectric transducers for nondestructive testing. Under general editorship of I.N. Ermolov. M.: Mashinostroenie, 1986. P. 280.
24. *Ermolov I.N.* Theory and practice of ultrasonic control. M.: Mashinostroenie, 1981. P. 240.
25. *Konshina V.N., Dymkin G.Ya.* Modern approaches to the certification of the ultrasonic control methods (in Russian) // *Defectoscopya*. 2008. No. 2. P. 5—14.
26. GOST 8.495—83 State system for ensuring uniformity of measurements. Ultrasonic contact thickness gauges. Methods and means of verification.
27. Internet resource: [https://constanta-us.com/catalog/nabor\\_kusot\\_180](https://constanta-us.com/catalog/nabor_kusot_180)). Date of circulation 15.01.2024.
28. *Mogilner L.Yu., Vremenko A.V., Skuridin N.N., Pridein O.A.* Application of electromagnetic-acoustic thickness gauges in diagnostics of metal structures and mechanical-technological equipment // *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*. 2019. No. 3. P. 315—325.
29. GOST 14782—86. Non-destructive control. Welded joints. Ultrasonic methods.
30. GOST R ISO 5577—2009 Non-destructive testing. Ultrasonic control. Vocabulary.
31. *Ermolov I.N.* Methods of ultrasonic flaw detection. L.-M.: Izd-vo of the Moscow Mining Institute, 1966. P. 267.
32. *Kramorov G.A., Evsyukov V.N.* About the ratio of the areas of the flat-bottom and angular reflectors (in Russian) // *Defectoscopya*. 1973. No. 4. P. 138—140.
33. *Perevalov S.P., Raikhman A.Z.* Acoustic tract of an inclined seeker for an angular type reflector // *Defectoscopya*. Part 1. 1979. No. 11. P. 5—15. *Defectoscopya*. Part 2. 1979. No. 12. P. 28—36.
34. Internet resource: <https://a3-eng.com/ultrazvukovoj-kontrol>. Date of circulation 22.01.2024.
35. *Golubev A.S.* Reflection of plane waves from a cylindrical defect // *Defectoscopya*. 1961. No. 7. P. 174—180.
36. *Alyoshin N.P., Mogilner L.Yu.* Elastic field analysis of the ultrasonic waves scattered on a cylindrical cavity (in Russian) // *Defectoscopya*. 1982. No. 12. P. 18—29.
37. *Mogilner L.Yu.* Application of the cylindrical reflector for sensitivity adjustment at ultrasonic inspection (in Russian) // *Defectoscopya*. 2018. No. 7. P. 27—36.
38. *Mogilner L.Yu., Smorodinsky Y.G.* Ultrasonic control: application of the cylindrical drilling for adjustment and verification of the equipment (in Russian) // *Defectoscopya*. 2018. No. 9. P. 14—20.
39. ASME T-530. Ultrasonic Testing of Welded Joints.
40. ISO 18611. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Sensitivity and range setting.
41. *Ermolov I.N., Vopilkin A.H., Badalyan V.G.* Calculations in ultrasonic flaw detection. (Brief reference book). M.: OOO NPC NK «Echo+». 2004. P. 109.
42. *Chernov V.S.* Quality control of the welded pipe joints of small diameters: X-ray or ultrasound // *In the world of non-destructive testing*. 2002. No. 2 (16). P. 32—39.
43. Internet resource: Official server of Altes ([ultes.info](http://ultes.info)). Date of address 15.03.2024.
44. *Alyoshin N.P., Baranov V.Yu., Lezhava A.G., Mogilner L.Yu.* Adjustment of sensitivity of ultrasonic control by a vertical cylindrical hole // *Defectoscopya*. 1989. No. 10. P. 23—29.
45. *Alyoshin N.P., Lezhava A.G., Mogilner L.Yu.* Study of Elastic Wave Diffraction on Channel Defects and Recommendations to Increase Their Detectability // *Defectoscopya*. 1986. No. 11. P. 4—10.
46. *Silk Maurice G. Dr.* Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing. Bristol: Adam Hilger, 1984.
47. ISO 10863. Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD).
48. *Alyoshin N.P., Mogilner L.Yu., Shchipakov N.A., Kusyy A.G., Tishkin V.V., Degtyarev M.N.* About the use of grooves for crack modelling at ultrasonic flaw detection (in Russian) // *Defectoscopya*. 2022. No. 2. P. 3—12.
49. *Melnikova A.V., Misharin D.A., Bogdanov R.I., Ryakhovskikh I.V.* Justification of serviceability of main gas pipelines with stress corrosion cracking defects // *Corrosion Territory Neftegaz*. 2015. No. 2 (31). P. 32—40.
50. *Alyoshin N.P., Krysko N.V., Shchipakov N.A., Kusyy A.G.* Ultrasonic control and complex application of defectoscopy methods in diagnostics of main pipelines // *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*. 2023. No. 13 (1). P. 8—17.

51. *Kolesnikov O. I., Gait A. V., Golosov P. S.* Boundaries of applicability of the diffraction-time method of control at the pipeline transport objects // Science and technology of pipeline transport of oil and oil products. 2022. No. 12 (6). P. 560—568.
52. *Mogilner L. Yu.* Experience of application of the TOFD ultrasonic technology in diagnostics of the RVS // Science and technology of oil and oil products pipeline transport. 2023. No. 13 (5). P. 411—421.
53. RD 34.17.302-97 (OP 501 CD-97) Steam and hot water boilers. Steam and hot water pipelines, vessels. Welded joints. Quality control. Ultrasonic control. Basic provisions.
54. *Basatskaya L.V., Voronkov V.A., Staseev V.G.* Sensitivity etalonisation at ultrasonic control (in Russian) // Heavy Engineering. 2000. No. 4. P. 24—26.
55. *Rozina M.V.* ARD-diagrams. Where is the truth? // In the world of nondestructive testing. 1999. No. 3. P. 28.
56. *Danilov V.N., Voronkov V.A.* About the construction of the ARD-diagrams (in Russian) // In the world of nondestructive testing. 2001. No. 2 (12). P. 20—22.
57. *Danilov V.N., Voronkov V.A.* To the question about the reference of ultrasonic control sensitivity using the ARD-diagrams (in Russian) // Defectoscopya. 2001. No. 1. P. 56—60.
58. *Mogilner L. Yu., Krysko N.V.* Scattering of ultrasonic waves on the defects of the welds and the base material. Development of the analytical and applied solutions // Control. Diagnostics. 2024. No. 3. P. 4—13.
59. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Ultrasonic tomography of the metal structures by the method of the antenna array digital focusing (in Russian) // Defectoscopya. 2011. No. 1. P. 21—28.
60. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., Smorodinsky Ya.G.* Terms of ultrasonic control with antenna arrays and what they mean // Defectoscopya. 2018. No. 9. P. 31—40.
61. *Coulder A.* Full Matrix Capture and Total Focusing Method: The Next Evolution in Ultrasonic Testing // Materials Evaluation. 2018. № 76 (5). C. 591—597. (*Coulder A.* Full Matrix Capture and Total Focusing Method: The Next Evolution in Ultrasonic Testing // In the World of Non-Destructive Testing. 2019. No. 22 (4). P. 33—37.)
62. Internet resource: <https://acsys.ru/vozmozhnosti-otsenki-kharactera-nesploshnosti-metalla-ultrazvukovym-tomografom/>. Date of circulation 18.12.2023.
63. *Alyoshin N.P., Mogilner L. Yu., Lisin Yu.V., Krysko N.V., Pridein O.A., Idrisov M.T.* Features of crack detection at ultrasonic inspection of welded joints of vertical steel tank wall // Oil industry. 2022. No. 1. P. 86—91.
64. *Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.S., Kolesnikov A.* Synthetic Data Generation for Steel Defect Detection and Classification Using Deep Learning // Symmetry. 2021. No. 13. P. 1176—1176. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13071176>
65. The Value of DICONDE. Koetz, Andrea and Clendening, Sue. s.l.: NDT.net, 2008.
66. *Peloquin E.* The NDE 4.0 Journey: How Adopting a Universal Open Format Empowers the Whole Industry // e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT Articles & News). V. 29 (1). Access mode: <https://blog.asnt.org/the-nde-4-0-journey-how-adopting-a-universal-open-format-empowers-the-whole-industry/> Date of access 09.01.2024.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ОСНОВЕ ЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

© 2024 г. В.Н. Беркович<sup>1,2,3,\*</sup>, С.И. Буйло<sup>2,\*\*</sup>, Б.И. Буйло<sup>4,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Донской казачий государственный институт пищевых технологий и бизнеса (ДКГТПТиБ) филиал  
Московского государственного университета технологий  
и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Россия  
344007 Ростов-на-Дону, ул. Семашко, 55

<sup>2</sup> Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича  
Южного федерального университета (ЮФУ), Россия 344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8А

<sup>3</sup> Ростовский филиал Российской таможенной академии (РТА),  
Россия 344007 Ростов-на-Дону, пр-т Буденновский, 10

<sup>4</sup> Российский университет транспорта (МИИТ),  
Россия 127055 Москва, ул. Образцова, 9  
E-mail: \*vberkovich@mail.ru; \*\*sibuilo@yandex.ru; \*\*\*builobi@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.2024; после доработки 25.03.2024

Принята к публикации 19.04.2024

Рассмотрена задача о стохастических колебаниях, возбуждаемых внутренним дефектом в окрестности свободной границы упругого массивного тела в стадии предразрушения. Исследование основано на результатах метода инвариантов в теории акустической эмиссии (АЭ), согласно которому статистическое распределение значений параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) от дефекта подчиняется условию устойчивости при нахождении тела в одной и той же стадии предразрушения. Построена математическая модель нестационарного волнового поля смещений в упругом массивном теле и изучены вопросы корректности ее применения. Проблема сводится к исследованию некоторого граничного интегрального уравнения в специальных классах стохастических процессов. Поставлена задача восстановления по сигналам АЭ и описания характера случайного процесса излучения дефекта на свободной границе тела. Приведены данные численного анализа.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, автокорреляция, граничное интегральное уравнение, интегральное преобразование, математическая модель, корректность, неразрушающий контроль, коэффициенты интенсивности напряжений, предразрушающее состояние, случайный процесс, эргодичность.

## AMPLITUDE RECONSTRUCTION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS ON THE BASE OF ITS MATHEMATICAL MODELING AS A STOCHASTIC PROCESS

© 2024 V.N. Berkovich<sup>1,2,3,\*</sup>, S. I. Builo<sup>2,\*\*</sup>, B. I. Builo<sup>4,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Don Cossack State Institute of Food Industry and Business, Rostov branch of Razumovsky  
Moscow State University of Technologies and Management (First Cossack University),  
Semashko str., 55, Rostov-on-Don 344007 Russia

<sup>2</sup> Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science,  
Southern Federal University (SFU), Milchakova str., 8A, Rostov-on-Don 344090 Russia

<sup>3</sup> Rostov Branch of the Russian Customs Academy (RCA),  
Budenovskiy ave., 10, Rostov-on-Don 344007 Russia

<sup>4</sup> Russian University of Transport (RTU), Obratsova str., 9, Moscow 127055 Russia  
E-mail: \*vberkovich@mail.ru; \*\*sibuilo@yandex.ru; \*\*\*builobi@mail.ru

The problem of random oscillations generated by inner defect within the neighborhood of the boundary of the elastic massive body under the pre-failure stage is considered. The investigation is based on results of the invariants' method in acoustic emission (AE) theory consisting in the stability conditions of the mean of statistic distribution parameters of signal characteristics under the same pre-failure stage. The mathematical model of arising wave process of displacement oscillations in the massive body is constructed and the correctness of its using is studied. The problem in question is reduced to the investigation of a boundary integral equation in special stochastic process classes. The task of reconstructing from AE signals and describing the nature of the random process of defect radiation at the free boundary of the body is set. Some numerical are presented.

*Keywords:* acoustic emission, autocorrelation, boundary integral equation, ergodicity, integral transform, correctness, mathematical model, nondestructive testing, pre-failure stage, stochastic process, stress intensity coefficient.

DOI: 10.31857/S0130308224040031

В последнее время метод акустической эмиссии (АЭ) как метод неразрушающего контроля имеет разнообразные применения в различных областях механики и неразрушающего контроля при решении вопросов техногенной безопасности в режиме реального времени, включая анализ прочности элементов машиностроительных конструкций, объектов промышленного и гражданского строительства, геофизических объектов и др. [1—12]. Комплексное применение различных физико-математических подходов обеспечивает вполне удовлетворительную достоверность метода АЭ по косвенным информативным признакам стадий предразрушения исследуемого материала, содержащего развивающиеся дефекты различного происхождения [1, 2, 7—12]. Вместе с тем следует отметить, что результаты вышеупомянутых работ не позволяют производить прямые оценки механических характеристик напряженно-деформируемого состояния материала. В этих работах отмечаются лишь перспективы получения этих прямых оценок, которые, безусловно, могут повысить достоверность результатов АЭ диагностики. Поэтому вышеуказанная проблема является по-прежнему актуальной, поскольку оказывается многофакторной, междисциплинарной и требует для своего решения привлечения не только современных экспериментальных, но и современных аналитических методов физики, механики, математики.

Одним из аналитических подходов к исследованию отмеченной выше проблемы является использование метода математического моделирования волнового процесса в материале исследуемого объекта для получения дополнительной информации о взаимосвязи параметров сигналов АЭ на свободной поверхности объекта с параметрами излучения дефекта. Данный метод был реализован нами в работах [13, 14] и др. в рамках классической постановки краевой задачи динамической теории упругости, но лишь для модели детерминированного процесса. Одновременно с этим изменения микроструктуры материала эксплуатируемых объектов порождают волновой процесс, который, как известно, имеет стохастический характер, что вносит существенные сложности в математическое описание и поэтому в существующих математических моделях указанного процесса пока не находил должного отражения.

Целью работы является разработка метода повышения достоверности результатов АЭ на основе построения соответствующей физико-математической модели волнового процесса внутри массивного тела с учетом стохастического характера этого процесса, исследование вопросов корректности применения указанной модели, а также анализа взаимосвязи между параметрами акустического излучения дефекта и характеристиками прочности материала внутри упругого тела с откликом его свободной поверхности.

Сформулированная проблема связана с постановкой и решением одного из классов задач динамической теории упругости [15], позволяющих осуществить восстановление амплитуд излучения дефекта и дать оценку характеристик прочности упругого материала на основе анализа сигналов АЭ на свободной поверхности. В настоящей работе развивается подход, основанный на использовании метода граничных интегральных уравнений, учитывающих стохастический характер процесса АЭ. Указанный подход основан на построении корректной математической модели стохастического волнового поля смещений в диагностируемом объекте и использует нижеисследующие теоретико-экспериментальные результаты и предположения.

1. Изменение амплитуд волнового поля колебаний, порождаемого дефектом, излучающим сигналы АЭ в массивном теле, будем считать процессом с независимыми приращениями при отсутствии последствия.

2. Статистические законы распределения параметров сигналов АЭ от дефекта подчиняются условию инвариантности во времени при нахождении тела в одной и той же стадии предразрушения [16]. Это дает основания утверждать, что такой же инвариантностью будут обладать также и законы распределения параметров волнового поля колебаний, порождаемого излучающим дефектом в массивном теле в анализируемом промежутке времени, следовательно, и характеристики прочности материала в окрестности излучающего дефекта.

3. Предположения 1 и 2, согласно современной теории случайных процессов, позволяют утверждать, что в пределах одной и той же стадии предразрушения для любых фиксированных моментов времени  $s \leq t$  любые семейства конечномерных распределений волновых полей смещений можно рассматривать как случайные процессы, для которых среднестатистические значения интересующих параметров в последующие (будущие) моменты времени  $t$  близки к возможным значениям этих параметров в текущий (настоящий) момент  $s \leq t$  при условии, что измерения в эти моменты времени осуществляются с помощью одних и тех же измерительных средств.

4. Развитие дефекта (при отсутствии вблизи него других неоднородностей) происходит в направлении свободной границы рассматриваемого тела, поэтому максимальная концентрация напряжений, а, следовательно, и максимальная интенсивность излучения сигналов АЭ, будут наблюдаться в конечной точке дефекта, ближайшей к границе [1, 16]. Эта интенсивность существенно затухает вдоль берегов дефекта к конечной точке, удаленной от границы.



5. Моделируемый стохастический процесс АЭ обладает свойством эргодичности, т.е. осреднение исследуемых параметров процесса по времени совпадает с осреднением этих же параметров по множеству возможных реализаций.

В рамках одного и того же предразрушающего состояния условие 3 означает, что параметры сигналов стохастического процесса АЭ могут быть моделированы функциями случайного процесса  $\zeta_t$  с ограниченными среднестатистическими характеристиками, который подчиняется условиям  $\zeta_t = E(\zeta_t | F_t)$ ,  $\tau \leq t$ , где  $E$  — условное математическое ожидание,  $F_t$  — вероятностная мера к моменту времени  $t$ . Случайные функции с такими свойствами называют мартингалами [17]. Аппарат их исследования, свойства и приложения при анализе случайных процессов в различных областях экономики и естественных наук достаточно хорошо известны. В частности, эти функции могут рассматриваться как элементы известного в математике функционального пространства средней ограниченной осцилляции ВМО (Bounded Mean Oscillation) [18, 19], имеющие важные приложения в стохастическом анализе.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Учитывая сказанное выше, будем рассматривать задачу о нестационарных колебаниях антиплоского сдвига упругого полупространства  $\Omega$ , моделирующего массивное тело и возбуждаемого источниками случайных колебаний на границах внутреннего линейного дефекта (рис. 1), моделируемого конечным излучающим линейным разрезом  $J$ .

Нестационарные колебания смещений можно моделировать случайной функцией  $\zeta_t(x, y)$ , имеющей спектральное представление:

$$\zeta_t(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-it\omega} dZ(x, y, \omega). \quad (1)$$

Справедливость указанного спектрального представления установлена в [19] и показывает, каким образом случайная функция времени  $\zeta_t(x, y)$  складывается из элементарных случайных гармонических колебаний  $e^{-it\omega} dZ(x, y, \omega)$  с круговой частотой  $\omega$  и элементарных случайных комплексных амплитуд  $dZ$ .

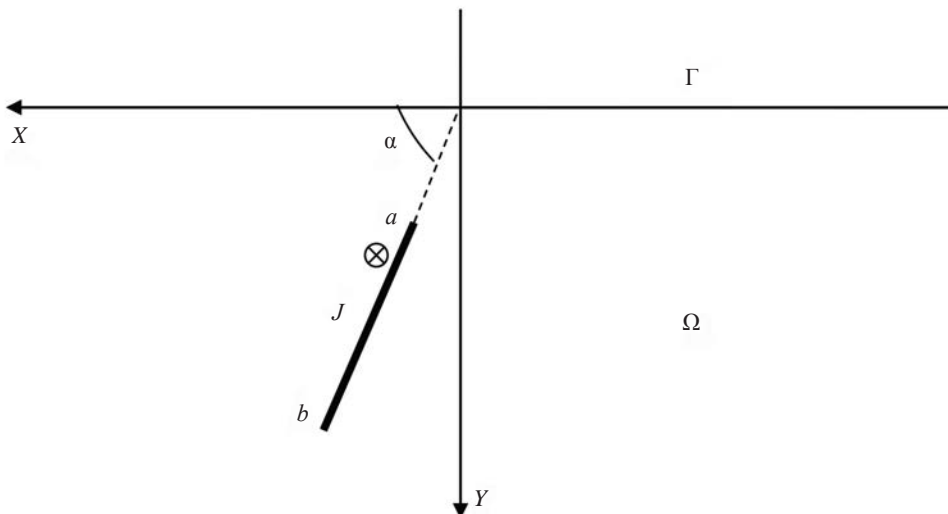


Рис. 1. Массивное тело с излучающим дефектом  $J$ , порождающим нестационарный колебательный процесс;  $\otimes$  — колебания смещений перпендикулярны плоскости чертежа.

Постановка описанной выше проблемы в рамках динамической теории упругости в условиях антиплоской деформации приводит к следующей смешанной начально-краевой задаче для волнового уравнения относительно случайных смещений пространственного сдвига  $U(x, y, t)$  в области  $\Omega$  с разрезом  $J$ :



$$c^2 \Delta U - \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad c = \sqrt{\mu D^{-1}}; .$$

$$U \Big|_{t \leq 0} = \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{t \leq 0} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0; \quad (2)$$

$$U \Big|_{J^\pm} = f(r, \zeta_t), \quad (x, y) \in J^\pm, \quad t > 0;$$

$$U \rightarrow 0, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty, \quad t \rightarrow \infty,$$

где  $\mu$ ,  $D$  — модуль сдвига и плотность материала упругого тела соответственно;  $c$  — скорость распространения волн сдвига в массивном теле;  $n$  — внешняя нормаль к границе;  $f(r, \zeta)$  — случайная функция, которая предполагается аналитической по  $\zeta$ , моделирующая источники нестационарных колебаний, распределенных по границам  $J^\pm$  разреза  $J$ ;  $\zeta_t$  — случайный процесс, стартующий при  $t = 0$  из точки разреза  $J$ , ближайшей к свободной границе  $\Gamma$ , с мгновенным излучением упругих волн. В условиях возникновения случайных колебаний поставим задачу: установить взаимосвязь между характеристиками волнового поля смещений на границе  $\Gamma$  свободной поверхности  $\Omega$  и параметрами излучения дефекта  $J$ .

Представление (1) дает основания воспользоваться для решения задачи (2) техникой интегрального преобразования Лапласа по времени  $t$ . Параметр преобразования Лапласа  $p$  можно выбрать в виде  $\text{Re } p \geq 0$ , а изображение по Лапласу случайной функции  $f(r, \zeta_t)$  на берегах — в виде  $\tilde{f}(r, \zeta_t)$ . В дальнейшем верхняя волна над функцией означает ее изображение по Лапласу. В случае  $\text{Re } p = 0$  ( $p = -i\omega c^{-1}$ ) будем также предполагать выполнение принципа излучения в форме Зоммерфельда ( $n$  — внешняя нормаль к границе волнового фронта):

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial n} - ik\tilde{U} = O\left(\frac{1}{\sqrt{r}}\right), \quad r \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Метод решения граничной задачи (2) с помощью преобразования Лапласа основан на ее сведении к некоторому граничному интегральному уравнению, которое далее исследуется. Для этого используем функцию Грина, которая строится методами интегральных преобразований, удовлетворяет уравнению и первому граничному условию (2), условию (3) и, согласно [14], имеет вид ( $k = pc^{-1}$ ):

$$\tilde{G}_p(x, y | \xi, \eta) = K_0(\kappa R^-) + K_0(\kappa R^+), \quad R^\pm = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y \mp \eta)^2},$$

где  $(x, y)$  — точка «наблюдения»;  $K_\nu(z)$  — функции Макдональда [20]. В рассматриваемом случае будем использовать интегральное представление регулярного решения уравнения Гельмгольца [21], имеющее вид:

$$\tilde{U}(x, y, p) = \int_{\partial\Omega_R} \left\{ \tilde{q}_p(\xi, \eta) \tilde{G}_p(x, y | \xi, \eta) - \tilde{u}_p(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \tilde{G}_p(x, y | \xi, \eta) \right\} dl, \quad (x, y) \in \Omega_R. \quad (4)$$

В указанном представлении  $\tilde{u}_p = [\tilde{U}]_J$ ,  $\tilde{q}_p = \mu^{-1} [\tilde{\sigma}_{z\varphi}]_J$  — скачки на разрезе  $J$  комплексных амплитуд смещений и безразмерных напряжений сдвига в изображениях по Лапласу. Замкнутый контур  $\partial\Omega_R = J \cup \Gamma_R \cup C_R$  содержит излучающий разрез  $J$  внутри полуокружности  $C_R$ , содержащей линейную часть  $\Gamma_R$  свободной границы  $\Gamma$ . Устремим  $R \rightarrow \infty$  в последнем равенстве, учитывая достаточно быстрое убывание на бесконечности по пространственным координатам изображений по Лапласу смещений, а также условие излучения Зоммерфельда (3). С учетом асимптотического поведения подынтегральных функций в (4) на контуре  $\partial\Omega_R$  приходим к следующему выражению образов Лапласа комплексных амплитуд смещений  $\tilde{U}$  полупространства  $\Omega$  в форме криволинейного интеграла по «правому» берегу разреза  $J^+$ :

$$\tilde{U}(x, y, p) = \int_{J^+} \left\{ \tilde{q}_p(\xi, \eta) \tilde{G}_p(x, y | \xi, \eta) - \tilde{u}_p(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \tilde{G}_p(x, y | \xi, \eta) \right\} dl, \quad (x, y) \in \Omega. \quad (5)$$

Устремим в равенстве (5) точку «наблюдения»  $(x, y)$  на берег разреза  $J^+$  и перейдем к локальным координатам  $r, \rho$  вдоль берегов разреза с начальной точкой на свободной границе  $\Gamma$ . Тогда на основе использования техники интегрального преобразования Конторовича—Лебедева [21] и осуществления предельного перехода указанная задача сводится к следующему вспомогательному граничному интегральному уравнению (ГИУ) относительно изображения по Лапласу случайных скачков безразмерных напряжений  $\tilde{q}_p(\rho)$ :

$$\int_a^b k(r, \rho, p) \tilde{q}_p(\rho) d\rho = \tilde{f}_p(r), \quad a < r < b;$$

$$k(r, \rho, p) = \frac{1}{\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} I_{-iz}(\kappa \rho) K_{-iz}(\kappa r) K(z) z dz, \quad \kappa = pc^{-1}, \quad \operatorname{Re} p \geq 0; \quad (6)$$

$$\tilde{f}_p(r) = \frac{1}{2} \{ \tilde{f}_p^+(r) + \tilde{f}_p^-(r) \}, \quad \tilde{f}_p^\pm(r) = \int_0^{\infty} f(r, \zeta_t) \exp(-pt) dt;$$

$$K(z) = (z^2 + \delta^2)^{-1} z \operatorname{cth} \alpha z,$$

где  $I_{-iz}(\kappa \rho), K_{-iz}(\kappa r)$  — модифицированные функции Бесселя [21], функции  $\tilde{f}_p^\pm(r)$  достаточно быстро убывают на разрезе  $J$  при  $r \rightarrow b$ , согласно начальному предположению 4. Функция  $K(z)$  — четна, мероморфна в комплексной плоскости  $z$ , имеет в ней нули и полюса с конечной плотностью распределения. При этом  $K(z) > 0, z \in R^1$  и обладает асимптотикой  $K(z) = O(|z|^{-1}), \delta > 0$  — вспомогательный параметр, позволяющий корректно построить решение ГИУ (6). Далее в построенном решении будем считать  $\delta \rightarrow 0$ . В окрестности действительной оси существует полоса  $\Pi$  регулярности функции  $K(z)$ .

Для восстановления требуемой взаимосвязи между волновым полем смещений на границе  $\Gamma$  свободной поверхности  $\Omega$  и параметрами излучения дефекта  $J$  в соотношении (5) необходимо определить безразмерные скачки амплитуд напряжений  $\tilde{q}_p(\rho)$  в образах Лапласа на дефекте  $J$ . Согласно [14], общее решение (6) может быть записано в виде:

$$\rho \tilde{q}_p(\rho) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_2} F_p(z) K^{-1}(z) I_{-iz}(\kappa \rho) z dz + \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_2} \left\{ \tilde{\xi}_p^{(1)}(z) I_{-iz}(\kappa \rho) I_{-iz}^{-1}(\kappa b) \right\} \frac{z dz}{K_-(z)} +$$

$$+ \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_2} \left\{ \tilde{\xi}_p^{(2)}(z) K_{-iz}(\kappa \rho) K_{-iz}^{-1}(\kappa a) \right\} \frac{z dz}{K_-(z)};$$

$$F_p(z) = \int_a^b \tilde{f}_p(\rho) K_{-iz}(\kappa \rho) \frac{d\rho}{\rho}, \quad K(z) = K_+(z) K_-(z); \quad (7)$$

$$\sup_{z \in \Gamma} |\tilde{\xi}_p^{(i)}(z) z^\sigma| < \infty, \quad 3/2 < \sigma < 2, \quad \lim_{|z| \rightarrow \infty} |\tilde{\xi}_p^{(i)}(z) z^\sigma| = 0, \quad \Gamma_{1,2} \in \Pi \quad (\Gamma_2 \succ \Gamma \succ \Gamma_1);$$

$$\kappa = pc^{-1}, \quad \operatorname{Re} p \geq 0 \quad (i = 1, 2).$$

При этом  $\tilde{\xi}_p^{(i)}(z), i = 1, 2$  — есть изображения Лапласа от любых реализаций случайных функций  $\xi^{(i)}(z)$  и находятся из некоторой системы интегральных уравнений, допускающей точное решение [22]. Функции  $K_\pm(z)$ , как результат факторизации функции  $K(z)$ , являются аналитическими в полуплоскостях  $\operatorname{Im} z > 0, \operatorname{Im} z < 0$  комплексной плоскости  $z$  соответственно. Детальный анализ позволяет установить наличие у решения  $\tilde{q}_p$  степенных особенностей вида:

$$\tilde{q}_p(r) = A(p)(r-a)^{-\gamma}(b-r)^{-\gamma} [1 + O(r-a)(b-r)], \quad \gamma = 0,5; \quad (8)$$

$$a < r < b, \quad |A(p)| \leq \text{const},$$

что в рамках линейной механики разрушения соответствует наличию концентрации напряжений в граничных точках дефекта  $J$ . Появление степенной особенности вида (8) связано с расходимостью интегралов, содержащих функции  $\xi_p^{(i)}(z)$  в случае  $\rho \rightarrow a$ ,  $\rho \rightarrow b$ . При этом первый интеграл расходится при  $\rho \rightarrow b$ , а второй интеграл — при  $\rho \rightarrow a$ . Для получения асимптотики (8) используются равномерные асимптотические представления произведений  $K_{-iz}(\kappa\rho)K_{-iz}(\kappa a)$ ,  $I_{-iz}(\kappa\rho)I_{-iz}(\kappa b)$  модифицированных функций Бесселя при больших значениях аргумента [14] в выражении решения (7), а множители произведения  $K(z) = K_+(z)K_-(z)$  в результате факторизации относительно контура интегрирования  $\Gamma_2$  выражаются в форме отношения  $\Gamma$ -функций Эйлера [20], содержащих угол  $\alpha$  наклона дефекта  $J$  к оси  $OX$ . Тогда при вычислении контурного интеграла по  $\Gamma_2$  степенные особенности решения (8) в конечных точках дефекта  $J$  выделяются в явном виде.

Использование таблиц обратных интегральных преобразований Лапласа позволяют получить ГИУ и его решение в оригиналах, которые аналогичны построенным в [22], но ввиду их громоздкости в данной работе не приводятся.

*Замечание 1.1.* Рассмотрение в данной работе случая антиплоской деформации не вполне соответствует природе явления АЭ, поскольку вносит дополнительную трансляционную симметрию в направлении пространственной координаты  $z$ , перпендикулярной плоскости чертежа на рис. 1. Однако, как показывают исследования [22], переход к случаю плосконапряженного состояния в детерминированном случае не вносит существенных изменений в качественный результат, но привносит существенные математические сложности в описание процесса. Поэтому авторы на данном этапе решили ограничиться рассмотрением случая антиплоской деформации в целях простоты описания полученных в работе результатов.

*Замечание 1.2.* АЭ как поток импульсов, излучаемых ближайшей к границе тела вершиной линейного дефекта, вообще говоря, может порождать колебания границ дефекта лишь в малой окрестности этой вершины. Размещение источников колебаний смещений на границах дефекта с быстро убывающей амплитудой вдоль его берегов к концу, удаленному от свободной границы, является, в данном случае, лишь упрощающим элементом математического моделирования. Указанное обстоятельство позволяет рассматривать предлагаемую математическую модель в предположении когерентности и усредненной интенсивности источников излучения на берегах разреза, равной  $f(r, \zeta_j)$ . В дальнейшем будем полагать, что скачки амплитуд смещений на разрезе  $[U]_J = 0$ . При этом ГИУ (6) будет иметь тот же вид.

Уравнение вида, аналогичного (6), детально исследовано в работах [18, 22], где изучены вопросы его однозначной разрешимости, указан вид общего решения и установлено соотношение корректности между образами Лапласа любых реализаций случайных функций смещений  $f_p$  и скачка напряжений  $\tilde{q}_p$  в классах, отражающих согласованность этих механических характеристик с конечным потоком упругой энергии через разрез  $J$  и свободную поверхность  $\Gamma$ .

## 2. АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Описанные выше результаты позволяют провести анализ вопросов корректности использования предлагаемой математической модели в рамках постановки исходной начально-краевой задачи (2). Пусть в этой задаче функция  $f(r, \zeta_j)$  источника колебаний на отрезке  $J$  обладает конечной дисперсией как случайная функция времени  $t$ , а по геометрической координате  $r$  порождает конечный поток упругой энергии через отрезок  $J$  как детерминированная функция. Тогда можно утверждать, что существует единственное решение  $U(x, y, t)$  задачи (2) как случайная функция  $t$ , обладающая конечной дисперсией. Как детерминированная функция геометрических координат  $(x, y)$ , она порождает конечный поток энергии через отрезок  $J$  и свободную поверхность  $\Gamma$  упругого массивного тела.

Доказательство сформулированного результата достаточно громоздко и выходит за рамки данной статьи. Отметим лишь, что при анализе свойств решения начально-краевой задачи предварительно используются описанные выше результаты по исследованию вопросов разрешимости ГИУ (7) в изображениях по Лапласу. Затем обратным преобразованием Лапласа осуществляется переход к оригиналам  $U(x, y, t)$ , которые оказываются в математических классах функций средней ограниченной осцилляции как случайных функций времени. Смещения  $U(x, y, t)$  как детерминированные функции геометрических координат  $(x, y)$ , учитывая свойства их гладкости, оказываются принадлежащими энергетическим функциональным пространствам Соболева—Слободецкого [22], которые являются отражением указанных выше

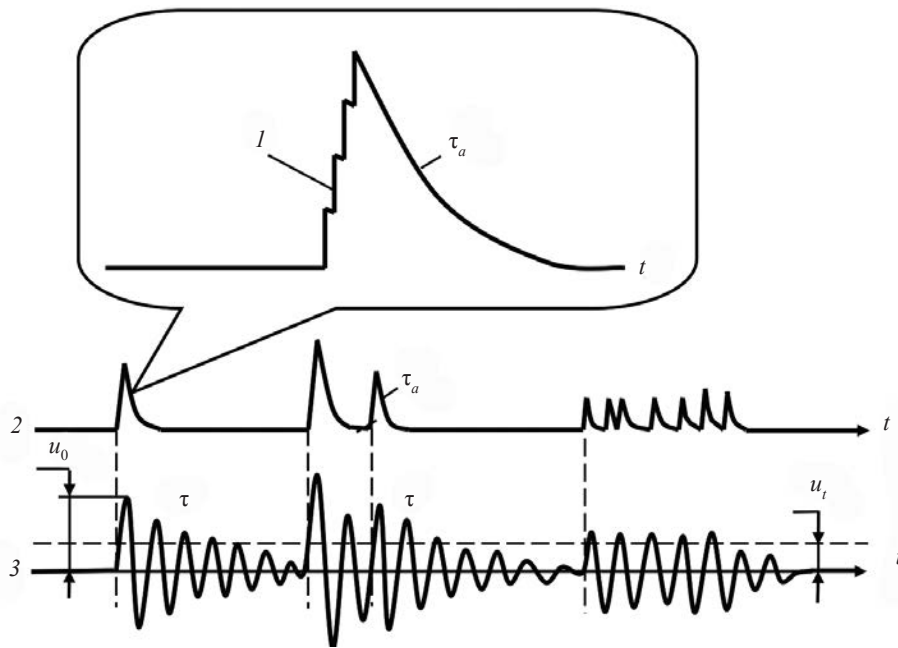


Рис. 2. Акт АЭ микротрещины и его регистрация приемной аппаратурой:

1 — тонкая структура акта излучения АЭ; 2 — поток излученных актов АЭ; 3 — поток регистрируемых радиоимпульсов АЭ;  $\tau_a$ ,  $\tau$  — постоянные времени актов излучения и регистрируемых радиоимпульсов АЭ.

свойств этих функций. Математическое соотношение корректности при этом выражается в терминах этих пространств и позволяет установить единственность решения (7) для ГИУ (6).

Полученным выше результатам, в частности, удовлетворяет также и случай, рассмотренный в настоящей работе, когда амплитуда смещений  $f(\rho, \zeta_r)$  на излучающем сигналы АЭ дефекте  $J$  лишь кусочно-дифференцируема (рис. 2) [1].

*Замечание 2.1.* Изображенный на рис. 2 механизм излучения приводит в рамках линейной механики к необходимости рассмотрения модели реализаций случайной функции смещений на дефекте  $f(r, \zeta_r)$  в форме линейной комбинации пилообразных импульсов АЭ в зависимости от

времени, задаваемых функцией  $\sum_{k=1}^N A_k(r)h_k(t)$ , где  $A_k(r)$ ,  $a < r < b$  — распределение их амплитуд, затухающее вдоль дефекта  $J$  к нижней точке  $r = b$ , а функция времени  $h_k(t)$  имеет вид ( $0 < \alpha < 1$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N$ ):

$$h_k(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_k \\ h_k + c_k / (t - t_k)^\alpha, & t > t_k \end{cases}$$

В результате вычислений их трансформант Лапласа получаем следующую асимптотику  $\tilde{f}_p(\rho)$ ,  $\tilde{\xi}_p^{(i)}(z) = Cp^{-1}[1 + o(p)]$ ,  $p \rightarrow 0$  ввиду наличия в выражениях  $\tilde{\xi}_p^{(i)}(z)$  вронскианов от функций  $K_{-iz}(\kappa r)$ ,  $I_{-iz}(\kappa r)$ ,  $\kappa = pc^{-1}$  [21]. Вышеуказанные оценки, а также ограниченность произведений  $K_{-iz}(\kappa r)K_{-iz}^{-1}(\kappa a)$ ,  $I_{-iz}(\kappa r)I_{-iz}^{-1}(\kappa b)$  при  $\kappa = pc^{-1} \rightarrow 0$ , обеспечивают существование всех пределов в равенстве (11). Рассмотрение случая, когда  $h_k(t)$  являются функциями Хевисайда

$h_k = H(t - t_k) = \begin{cases} 0, & t \leq t_k \\ 1, & t > t_k \end{cases}$ , приводит к тем же результатам. Указанные рассуждения являются

математическим обоснованием достоверности результатов, использующих метод осреднения по времени при вычислении различных устойчивых среднестатистических характеристик для небольшого числа реализаций на основе проведения непосредственных экспериментальных измерений.

### 3. СВЯЗЬ СИГНАЛОВ АЭ С ОТКЛИКОМ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для анализа задачи восстановления взаимосвязи между параметрами сигналов АЭ от дефекта и откликом свободной поверхности тела следует в представлении (5) амплитуд смещений устремить точку «наблюдения»  $(x, y)$  на свободную поверхность  $\Gamma$ . Тогда с учетом граничных условий для функции Грина  $G$  и предположениях о когерентности и равной интенсивности источников излучения АЭ на берегах дефекта (см. *Замечание 2*) получим следующее, вытекающее из (5), представление случайных амплитуд смещений свободной поверхности в изображениях по Лапласу:

$$\tilde{U}^*(x, y, p) = \int_J \{ \tilde{q}_p(\xi, \eta) G_p(x, 0 | \xi, \eta) \} dl, \quad (x, 0) \in \Gamma, \quad (\xi, \eta) \in J. \quad (9)$$

В формуле (9) скачки образов амплитуд напряжений  $\tilde{q}_p$  выражаются через образы амплитуды смещений  $f_p$  на дефекте  $J$ . Для восстановления  $f_p$  по амплитудам откликов  $\tilde{U}^*$  свободной поверхности  $\Gamma$  можно воспользоваться известным методом наименьших квадратов, как это показано в [13]. Восстановленные этим методом амплитуды сигналов АЭ на дефекте  $J$  позволяют восстановить в изображениях по Лапласу также и амплитуды скачков напряжений  $\tilde{q}(p)$  на дефекте  $J$  с помощью соотношения (7).

Тогда можно утверждать, что в оригиналах по Лапласу соотношение (9) будет устанавливать аналитическую взаимосвязь между волновым полем смещений на границе  $\Gamma$  свободной поверхности массивного тела и параметрами излучения дефекта  $J$ .

В силу соотношения (1) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) смещений свободной поверхности является спектральной функцией  $\tilde{U}(x, y, p)$  случайного процесса (1), которая будет удовлетворять ГИУ (6), изученному в работах [14, 18], с сохранением его корректной разрешимости ГИУ при значении параметра  $p = -i\omega$  обратного преобразования Лапласа в (3).

На рис. 3 показана рассчитанная на основе формулы (9) спектральная функция амплитуд  $A$  смещений свободной поверхности, представленная амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) ее отклика на сигналы АЭ от линейного дефекта  $J$  в зависимости от угла наклона  $\alpha$  и длины  $l$  дефекта  $J$ .

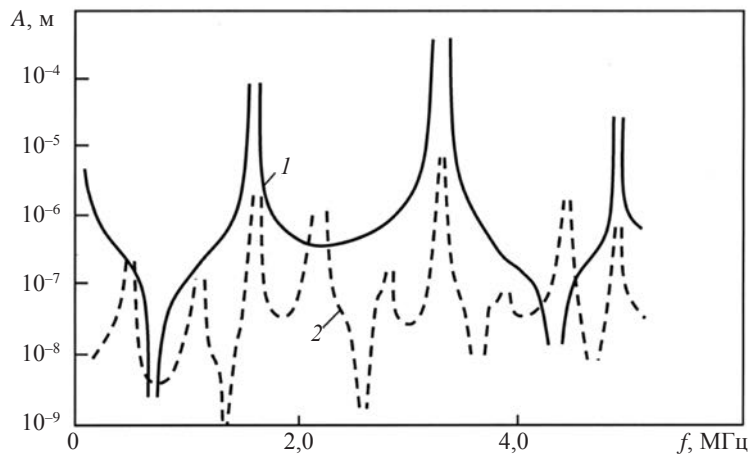


Рис. 3. АЧХ смещений свободной поверхности от сигналов АЭ дефекта: 1 —  $\alpha = 1^\circ$ ,  $l = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м; 2 —  $\alpha = 45^\circ$ ,  $l = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м; материал — Сталь 20.

Расчет производился для выбранной реализации случайного процесса со смещениями  $U = 10^{-5}$  м на дефекте.

Соотношение (1) позволяет восстановить случайное поле смещений  $U(x, y, t)$  свободной поверхности  $\Gamma$  в следующем виде:

$$U(x, y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(x, y, -i\omega) e^{-i\omega t} d\omega,$$

где случайная функция  $\tilde{U}(x, y, p)$  определяется формулами (7), (9) на основе решения (7) ГИУ (6).



В рассматриваемой задаче для восстановления осредненных характеристик изучаемого случайного процесса предлагается несколько другой подход. Согласно предположению 3, в рассматриваемой модели можно строго доказать [22], что случайные смещения  $U(x, y, t)$ , как функции времени  $t$ , являются мартингалом. Тогда для любой точки  $(x, y)$  случайная функция  $|U(x, y, t)|$  также является мартингалом [18]. Существование предела  $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T K_U(x, y, \tau) d\tau = 0$  (условие Слуцкого [23]) для автокорреляционной функции  $K_U(x, y, \tau)$  стохастического волнового процесса для любой точки  $(x, y)$  случайного поля является достаточным условием эргодичности рассматриваемого мартингала. Это означает, что осреднение  $|U_k(x, y, t)|$  для любой реализации случайной функции  $U(x, y, t) \geq 0$  по времени  $\bar{U}_k(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_k(x, y, t) dt$  совпадает с ее статистическим средним  $E[U]$  по множеству их реализаций («ансамблю») с вероятностью, равной 1, и существует единственный предел:

$$\Pr \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_k(x, y, t) dt = E[U] \right\} = 1, \quad (10)$$

не зависящий от выбора реализации  $U_k(x, y, t)$ , где  $\Pr$  — символ вероятности;  $E$  — символ математического ожидания (статистического осреднения по «ансамблю» реализаций). Но тогда из свойств преобразования Лапласа [24], связанных с оператором осреднения [25] по времени, а также из [26], с вероятностью, равной 1, вытекает следующая формула:

$$\bar{U}(x, y) = E[U] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_k(x, y, t) dt = \lim_{p \rightarrow 0} p \tilde{U}_k(x, y, p). \quad (11)$$

Верхнее подчеркивание  $\bar{U}(x, y)$ , как принято в теоретической статистике, означает величину, среднестатистическую по всем реализациям, а  $\tilde{U}_k(x, y, p)$  — преобразование Лапласа от любой реализации случайного процесса динамических упругих смещений. Используя асимптотическое свойство функции  $p \tilde{K}_U(x, y, p) = o(p |\ln^2 p|)$ ,  $p \rightarrow 0$ , получаемое с помощью соотношений (10), (11), можно доказать выполнение условия Слуцкого, указанного выше и обеспечивающего эргодичность изучаемого случайного процесса в данной математической модели.

**Замечание 3.1.** Отметим, что точное выполнение условия Слуцкого [23] и равенства (11) имеют место лишь в рамках предлагаемой математической модели изучаемого процесса, рассматриваемого при  $t \rightarrow \infty$ . В реальной ситуации для  $t \gg 1$  следует считать, что вышеуказанные соотношения выполняются приближенно до наступления процесса разрушения.

Формула (11) может быть использована для вычислений как среднестатистических характеристик регистрируемых сигналов АЭ, так и механических характеристик материала, позволяющих более точно диагностировать стадии предразрушения.

В качестве примера рассмотрим случай, когда излучающий дефект представлен внутренней трещиной в процессе выхода на границу свободной поверхности  $\Gamma$ . Ранее этот случай был проанализирован нами лишь в условиях установившихся колебаний [14].

Анализ формул (11) показывает, что для оценки осредненных значений физических характеристик АЭ в условиях стохастических упругих колебаний можно использовать результаты, ранее полученные нами на основе формального рассмотрения математической модели процесса в условиях установившихся колебаний [14].

На рис. 4 представлены полученные зависимости среднестатистических значений модулей амплитуд  $A$  отклика свободной поверхности  $\Gamma$  от расстояния от точки предполагаемого выхода  $O$  вершины трещины  $J$  на свободную границу  $\Gamma$  до точки  $x$  наблюдения на границе  $\Gamma$ .

Рассмотрение ГИУ (6) и результаты анализа его решения позволяют аналогичным образом оценивать и осредненные механические характеристики контролируемого материала, в частности, осредненный по времени среднестатистический скачок напряжений  $\bar{q}(\rho)$  на дефекте с помощью соотношения (7). Согласно результатам анализа корректной разрешимости и соотношениям (7), (8), (11), можно рассчитать и среднестатистический коэффициент интенсивности напряжений как одну из важных характеристик в линейной механике разрушения материала [27]. Среднестатистические коэффициенты интенсивности  $\bar{K}_a$ ,  $\bar{K}_b$  имеют следующий вид:

в верхней точке  $J$  дефекта  $\rho = a$  в окрестности границы  $\Gamma$ :

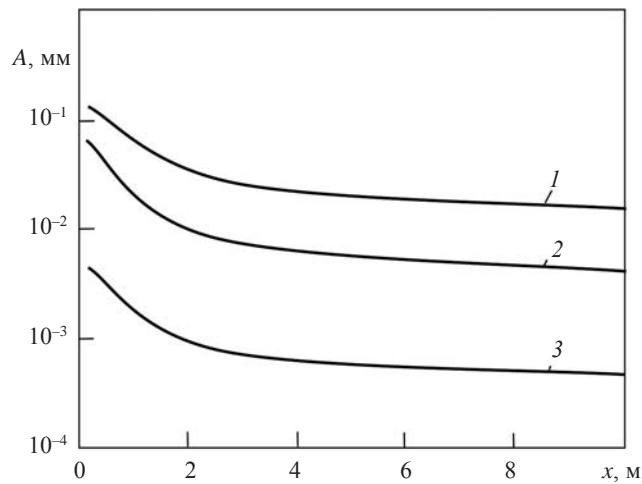


Рис. 4. Среднестатистическая амплитуда отклика свободной поверхности:  
 1 —  $\alpha = 1^\circ, f = 1,0 \text{ МГц}, l = 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 —  $\alpha = 45^\circ, f = 1,0 \text{ МГц}, l = 10^{-4} \text{ м}$ ; 3 —  $\alpha = 45^\circ, f = 1,0 \text{ МГц}, l = 10^{-6} \text{ м}$ .

$$\bar{K}_a = \lim_{\rho \rightarrow a} [\bar{q}(\rho)\sqrt{\rho - a}] = \lim_{\rho \rightarrow a} \left[ \lim_{p \rightarrow 0} p\tilde{q}_p(\rho)\sqrt{\rho - a} \right]; \tag{12}$$

в нижней точке дефекта  $\rho = b$ , удаленной от границы  $\Gamma$ :

$$\bar{K}_b = \lim_{\rho \rightarrow b} [\bar{q}(\rho)\sqrt{\rho - b}] = \lim_{\rho \rightarrow b} \left[ \lim_{p \rightarrow 0} p\tilde{q}_p(\rho)\sqrt{\rho - b} \right]. \tag{13}$$

Трансформанты Лапласа скачков напряжений  $\tilde{q}_p$  в (12), (13) с помощью (10) и метода работы [13] выражаются через трансформанты реализаций  $\tilde{U}(x, 0, p)$  смещений, регистрируемых на свободной поверхности  $\Gamma$ .

На рис. 5 показаны кривые осредненных коэффициентов интенсивности напряжений  $\bar{K}_a, \bar{K}_b$ . При этом максимальная средняя интенсивность напряжений имеет место в случаях, когда направление выхода дефекта в процессе его развития составляет угол  $\alpha = \pi/2$  со свободной поверхностью  $\Gamma$ , что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

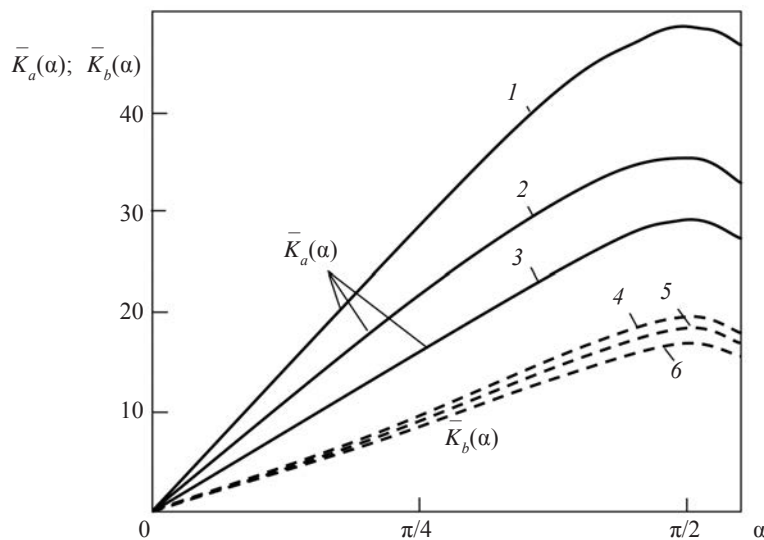


Рис. 5. Зависимость осредненных коэффициентов интенсивности напряжений  $\bar{K}_a(\alpha)$  (непрерывная кривая) и  $\bar{K}_b(\alpha)$  (штриховая линия) от длины  $l$  линейного дефекта  $J$  и угла наклона  $\alpha$  к свободной поверхности:  
 1 и 6 —  $l = 2,2 \text{ мм}$ ; 2 и 5 —  $l = 1,6 \text{ мм}$ ; 3 и 4 —  $l = 1,2 \text{ мм}$ .

## ОСНОВНЫЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель волнового поля в упругом полупространстве, моделирующим массивное упругое тело, возбуждаемое линейным дефектом, излучающим сигналы АЭ в предположении стохастического характера процесса, что более адекватно отражает сущность этого физического явления.

2. Показано, что на основе метода интегральных преобразований проблема анализа стохастического волнового поля может быть сведена к анализу некоторого граничного интегрального уравнения (ГИУ) на конечном линейном разрезе, моделирующем излучающий дефект. Приведены результаты, устанавливающие корректность применения предложенной математической модели для описания рассматриваемого процесса.

3. Предложенная модель позволяет установить аналитические соотношения связи параметров отклика свободной поверхности упругого полупространства с параметрами излучения сигналов АЭ от линейного дефекта. Получено аналитическое соотношение связи вышеуказанных параметров со среднестатистическими характеристиками напряженно-деформированного состояния (НДС), материала в окрестности дефекта, включая и коэффициент интенсивности напряжений, играющий важную роль в линейной механике разрушения. Эти результаты дают основания утверждать, что при рассмотрении явления АЭ как случайный процесс, вычисление среднестатистических характеристик НДС для всего «ансамбля» различных реализаций можно заменить вычислением их устойчивых усреднений по времени в рамках небольшого количества реализаций случайной последовательности актов АЭ. Это существенно упрощает и ускоряет процесс диагностики прочности.

Таким образом, предложенный подход позволяет повысить оперативность и достоверность результатов метода АЭ диагностики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 184 с.
2. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
3. Буйло С.И., Буйло Б.И., Чебаков М.И. Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 37—44.
4. Иванов В.И. Актуальные проблемы акустико-эмиссионного диагностирования / Всерос. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021). Санкт-Петербург: Изд-во «Свен», 2021. С. 3—4.
5. Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солodчук А.А. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 5. С. 1066—1092.
6. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // PNRPU Mechanics Bulletin. 2019. № 1. P. 173—183.
7. Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemann V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // Russian Journal of Non-destructive Testing. 2019. V. 55. No. 9. P. 631—638.
8. Lobanov D. S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // Procedia Structural Integrity. 2019. V. 18. P. 347—352.
9. Савельев В.Н., Махмудов Х.Ф. Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в натуральных условиях // Журнал технической физики. 2020. Вып. 1. С. 143—147.
10. Иншаков Д.В., Кузнецов К.А. Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов методом акустической импульсной рефлектометрии на опасных производственных объектах // Наука и техника. 2019. № 12. С. 24—29.
11. Параев В.А., Лебедев Д.В. Связь силового и акустико-эмиссионного критерия для определения концентрации напряжений в зоне дефекта. Методика экспериментального определения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины / Всерос. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021). Санкт-Петербург: Изд-во «Свен», 2021. С. 119.
12. Кхун Х.Х., Башков О.В. Разработка методики идентификации развивающихся повреждений на основе метода акустической эмиссии / Всерос. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021). Санкт-Петербург: Изд-во «Свен», 2021. С. 127—128.
13. Беркович В.Н., Буйло С.И. Восстановление амплитуд излучения дефекта по сигналам акустической эмиссии на свободной границе массивного тела // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 18—23.

14. Беркович В.Н. Акустическое излучение в упругой среде от внутреннего дефекта с изломом // Междун. научн.-иссл. журнал. 2018. № 3. С. 11—14.
15. Ватульян А.О., Соловьев А.Н. Прямые и обратные задачи для однородных и неоднородных упругих и электроупругих тел. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. 175 с.
16. Буילו С.И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 18—23.
17. Gettoore R.K., Sharpe M.J. Conformal martingales // *Inventiones Mathematicae*. 1972. V. 16. P. 271—308.
18. Беркович В.Н. Нестационарная смешанная задача динамики неоднородно упругой клиновидной среды // Экологический вестник научных центров ЧЭС. Краснодар. 2005. № 3. С. 14—20.
19. Гихман И.И., Скороход А.В. Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1977. 564 с.
20. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Т. 2. Серия «Справочная математическая библиотека». М.: Наука, 1969. 343 с.
21. Лебедев Н.Н. Специальные функции их приложения. М.—Л.: Физматгиз, 1963. 358 с.
22. Беркович В.Н., Буילו С.И. Реконструкция амплитуды излучения дефекта по сигналам акустической эмиссии в условиях плоского напряженного состояния // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 40—50.
23. Гасников А.В., Горбунов Э.А., Гуз С.А., Черноусова Е.О., Ширококов М.Г., Шульгин Е.В. Лекции по случайным процессам. М.: МФТИ, 2019. 285 с.
24. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.: Наука, 1974. 542 с.
25. Грибенников Е.А. Метод усреднения в прикладных задачах. М.: Наука. Главное изд-во физ.-мат. лит., 1986. 255 с.
26. Винер Н. Интеграл Фурье и некоторые его приложения. М.: Наука. Государственное изд-во физ.-мат. лит., 1963. 256 с.
27. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1974. 416 с.

## REFERENCES

1. Builo S.I. Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2017. 184 p.
2. Ivanov V.I., Barat V.A. Acoustic emission diagnostics. M.: Spektr, 2017. 368 p.
3. Builo S.I., Builo B.I., Chebakov M.I. Probabilistic-Information Approach to Assessing the Reliability of the Results of the Acoustic-Emission Method of Testing and Diagnostics // *Defectoscopya*. 2021. No. 5. P. 37—44.
4. Ivanov V.I. Actual problems of acoustic emission diagnostics / All-Russian conference with the international participation of “Actual problems of the acoustic emission method” (APMAE-2021). St. Petersburg. Sven Publishing House, 2021. P. 37—44.
5. Senkevich Yu.I., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Solodchuk A.A. Methodology for identifying informative features in geoaoustic emission signals // *Proceedings of SPIIRAN*. 2019. V. 18. No. 5. P. 1066—1092.
6. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. № 1. P. 173—183.
7. Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemann V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2019. V. 55. No. 9. P. 631—638.
8. Lobanov D.S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // *Procedia Structural Integrity*. 2019. V. 18. P. 347—352.
9. Saveliev V.N., Makhmudov H.F. Investigation of the acoustic properties of heterogeneous rocks and concrete lining in field conditions // *Journal of Technical Physics*. 2020. Is. 1. P. 143—147.
10. Inshakov D.V., Kuznetsov K.A. Diagnostics of the technical condition of heat exchangers by the method of acoustic pulse reflectometry at hazardous production facilities // *Science and Technology*. 2019. No. 12. P. 24—29.
11. Panaev V.A., Lebedev D.V. Connection of the power and acoustic emission criteria for determining the stress concentration in the defect zone. The method of experimental determination of the stress intensity coefficient at the crack tip / All-Russian conference with the international participation of “Actual problems of the acoustic emission method” (APMAE-2021). St. Petersburg: Sven Publishing House, 2021. P. 119.
12. Khun H.H., Bashkov O.V. Development of a technique for identifying developing damages based on the acoustic emission method / All-Russian conference with the international participation of “Actual problems of the acoustic emission method” (APMAE-2021). Saint-Petersburg: Sven publishing house, 2021. P. 127—128.



13. *Berkovich V.N., Builo S.I.*, Reconstructing the Amplitude of Radiation of a Defect Based on Acoustic Emission Signals at the Free Boundary of a Massive Body // *Defectoscopya*. 2019. No. 4. P. 18—23.
  14. *Berkovich V.N.* Acoustic radiation in an elastic medium from an internal defect with a fracture // *International Scientific Research Journal*. 2018. No. 3. P. 11—14.
  15. *Vatulyan A.O., Solovyov A.N.* Direct and inverse problems for homogeneous and inhomogeneous elastic and electroelastic bodies. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2008. 175 p.
  16. *Builo S.I.* On the Information Value of the Method of Invariants of Acoustic-Emission Signals in the Diagnostics of Pre-Failure State in Materials // *Defectoscopya*. 2018. No. 4. P. 18—23.
  17. *Gettoore R.K., Sharpe M.J.* Conformal martingales // *Inventiones Mathematicae*. 1972. V. 16. P. 271—308.
  18. *Berkovich V.N.* Nonstationary mixed problem of dynamics of inhomogeneously elastic wedge-shaped medium // *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. Krasnodar. 2005. No. 3. P. 14—20.
  19. *Gihman I.I., Skorokhod A.V.* Introduction to the theory of random processes. Moscow: Nauka, 1977. 564 p.
  20. *Bateman H., Erdelyi A.* Higher Transcendental Functions. V. 2. New York — Toronto — London: McGraw-Hill Dook Company. Inc., 1953. 342 p.
  21. *Lebedev N.N.* Special functions of their application. M.—L.: Fizmatgiz, 1963. 358 p.
  22. *Berkovich V.N., Builo S.I.*, Reconstructing Defect Radiation Amplitude Based on Acoustic Emission Signals under Conditions of a Plane Stress State // *Defectoscopya*. 2020. No. 4. P. 40—50.
  23. *Gasnikov A.V., Gorbunov E.A., Guz S.A., Chernousova E.O., Shirobokov M.G., Shulgin E.V.* Lectures on random processes. Moscow: MIPT, 2019. 285 p.
  24. *Ditkin V.A., Prudnikov A.P.* Integral transformations and operational calculus. M.: Nauka, 1974. 542 p.
  25. *Grebennikov E.A.* Averaging method in applied problems. M.: Nauka. The main edition of phys.-mat. lit., 1986. 255 p.
  26. *Wiener N.* The Fourier Integral and Certain of Its Applications. Cambridge. 1933.
  27. *Parton V.Z., Morozov E.M.* Mechanics of elastic-plastic destruction. M.: Nauka. The main edition of phys.-mat. lit., 1974. 416 p.
-

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЗРАЧНОСТЕЙ В СЧЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛОГОВОГО АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА ИСХОДНЫХ СИГНАЛОВ

© 2024 г. В.А. Удод<sup>1,\*</sup>, С.Э. Воробейчиков<sup>1,\*\*</sup>, С.П. Осипов<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 36

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: \*pr.udod@mail.ru; \*\*sev@mail.tsu.ru; \*\*\*osip1809@rambler.ru

Поступила в редакцию 12.04.2024; после доработки 02.05.2024

Принята к публикации 03.05.2024

Приведена математическая модель радиационных прозрачностей в счетной реализации метода дуальных энергий на основе аналоговой дискриминации исходных сигналов. Обобщенная математическая модель радиационных прозрачностей в анализируемой реализации метода дуальных энергий базируется на аналоговом разделении исходных электрических сигналов с детектора рентгеновского излучения по амплитуде на низкоэнергетические и высокоэнергетические сигналы с последующим счетом этих сигналов. Аналоговое разделение выходных сигналов детектора рентгеновского излучения по амплитуде осуществляется с помощью двухканального амплитудного анализатора. Предложенная модель учитывает максимальную энергию рентгеновских фотонов, порог энергии для разделения сигналов на низкоэнергетические и высокоэнергетические сигналы, материалы и размеры чувствительных к радиации элементов детекторов, параметры объектов контроля. Модель может быть использована для проведения исследований по влиянию шумов, обусловленных квантовой природой рентгеновского излучения, на качество идентификации ослабляющего материала, например, по эффективному атомному номеру, применительно к рассматриваемой реализации метода дуальных энергий, а также для обоснованного выбора параметров соответствующих двухэнергетических систем цифровой радиологии и рентгеновской компьютерной томографии.

*Ключевые слова:* рентгеновское излучение, досмотровый контроль, цифровая радиология, счетный режим регистрации, амплитудный анализатор, атомный номер, распознавание материалов, метод дуальных энергий.

## MATHEMATICAL MODELING OF RADIATION TRANSPARENCIES IN THE COUNTABLE IMPLEMENTATION OF THE DUAL ENERGY METHOD BASED ON ANALOG AMPLITUDE ANALYSIS OF ORIGINAL SIGNALS

© 2024 V.A. Udod<sup>1,\*</sup>, S.E. Vorobeychikov<sup>1,\*\*</sup>, S.P. Osipov<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, 634050, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Ave., 30, 634050, Tomsk, Russia

E-mail: \*pr.udod@mail.ru; \*\*sev@mail.tsu.ru; \*\*\*osip1809@rambler.ru

A mathematical model of radiation transparency in the computational implementation of the dual energy method based on analog discrimination of the original signals is given. The generalized mathematical model of radiation transparency in the analyzed implementation of the dual energy method is based on the analog separation of the initial electrical signals from the X-ray detector by amplitude into low-energy and high-energy signals with subsequent counting of these signals. Analog separation of the output signals of the X-ray detector by amplitude is carried out using a two-channel amplitude analyzer. The proposed model takes into account the maximum energy of X-ray photons, the energy threshold for separating signals into low-energy and high-energy signals, materials and sizes of radiation-sensitive detector elements, and parameters of control objects. The model can be used to conduct research on the influence of noise caused by the quantum nature of X-ray radiation on the quality of identification of the attenuating material, for example, by effective atomic number, in relation to the considered implementation of the dual energy method, as well as for a reasonable choice of parameters of the corresponding dual-energy digital radiography systems and X-ray computed tomography.

*Keywords:* X-ray radiation, inspection control, digital radiography, counting registration mode, amplitude analyzer, atomic number, material recognition, dual energy method.

DOI: 10.31857/S0130308224040049

### ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе общественного развития для обеспечения комплексной транспортной и экономической безопасности при перевозке пассажиров, товаров, перемещении транспортных средств, почтовых и багажных отправок все более активную роль играет рентгеновский

досмотровый контроль [1—8], целями которого является обнаружение и распознавание запрещенных веществ, материалов и предметов. Номенклатура технических систем (комплексов), используемых для этих целей, является достаточно большой. В настоящее время сканирующие системы цифровой рентгенографии (ССЦР) продолжают лидировать среди технических средств таможенного и досмотрового контроля как по охвату объектов контроля, так и по его эффективности [1, 2, 9—11].

Формирование цифровых рентгенографических изображений в ССЦР сводится к сканированию объекта контроля (ОК) узким (коллимированным) веерным пучком рентгеновского излучения, которое в последствии регистрируется коллимированной линейкой (одномерным матричным массивом) детекторов [2, 9].

В настоящее время широко применяются багажные и транспортные системы досмотрового контроля, дополненные функцией распознавания материала ОК и их структурных фрагментов методом дуальных энергий (МДЭ) [1, 2, 10, 11]. Отмеченная функция существенно повышает информативную способность систем досмотрового контроля. В качестве параметра распознавания материала используют эффективный атомный номер материала (ЭАН) либо некоторую функцию от него [12—14]. На формальном уровне одновременные оценки ЭАН материала ОК и его массовой толщины являются решением системы двух неких нелинейных уравнений, формируемых для условно низких и условно высоких энергий рентгеновских фотонов [3, 5, 12, 13]. Левые и правые части упомянутых уравнений могут характеризовать те или иные параметры ослабления условно низкоэнергетических и условно высокоэнергетических рентгеновских фотонов. В качестве параметров, характеризующих ослабление рентгеновских фотонов объектом контроля, могут выступать, например, радиационные прозрачности ОК для условно низкоэнергетических и условно высокоэнергетических рентгеновских фотонов [9].

Всю совокупность технических реализаций МДЭ можно разделить по способу получения первичной информации об ослаблении рентгеновских фотонов условно «низкой» энергии и условно «высокой» энергии и по способу обработки первичной информации. К классическому способу получения первичной информации в МДЭ относится раздельное сканирование ОК узкими пучками рентгеновского излучения с «низкой» и «высокой» максимальными энергиями [15]. Этот способ отличается достаточно низкой производительностью и пригоден для источников рентгеновского излучения непрерывного действия. Для импульсных источников рентгеновского излучения, допускающих чередование импульсов с «низкой» и «высокой» максимальной энергией, реализация классического метода сводится к однократному сканированию ОК [16]. Одним из недостатков такого подхода является зависимость производительности контроля от частоты следования импульсов рентгеновского излучения. Более быстродействующий способ получения первичной информации в МДЭ связан с однократным сканированием ОК узким пучком рентгеновских фотонов с регистрацией их сэндвич-детекторами (передний детектор + ослабляющий фильтр + задний детектор), которые осуществляют мягкую селекцию (разделение) рентгеновских фотонов при их регистрации на фотоны с условно «низкой» энергией (первый детектор) и с условно «высокой» энергией (второй детектор) [15, 17—20].

Еще один подход к реализации МДЭ, связанный с однократным сканированием ОК узким пучком рентгеновского излучения и формированием первичной дуальной информации, базируется на аналоговом разделении по амплитуде электрических сигналов с выхода усилителя детектора на сигналы условно «низкой» энергии и условно «высокой» энергии. Указанная трансформация аналоговых сигналов для каждого отдельного элемента линейного детектора осуществляется с помощью специальных устройств — двухканальных амплитудных анализаторов. Отмеченный подход к формированию первичной дуальной информации в информационном отношении имеет потенциальное преимущество, в частности, по сравнению со схемой, где используются сэндвич-детекторы. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, в сэндвич-детекторе принципиально возможно «диффузное перемешивание» низко- и высокоэнергетической частей спектра излучения, а именно — высокоэнергетический фотон может поглотиться в переднем детекторе и, напротив, низкоэнергетический фотон, пусть и с малой вероятностью, может поглотиться в заднем детекторе. Это приводит к определенному искажению информации. Во-вторых, наличие промежуточного фильтра между передним и задним детекторами приводит к тому, что часть излучения просто поглощается без регистрации, что также приводит к потере информации.

Сформулируем цель наших исследований. Для теоретической оценки потенциальных возможностей схемы реализации МДЭ с двухканальными амплитудными анализаторами необходимо внести соответствующие усовершенствования, обусловленные введением этих элементов в схему ССЦР, в математические модели формирования исходной дуальной информации [19, 20] с учетом аналогового разделения электрических сигналов на сигналы, ассоциированные с фотонами с условно «низкой» энергией и условно «высокой» энергией. Далее отмеченные ус-

вершенствованные модели исходной дуальной информации должны быть трансформированы в математические модели радиационных прозрачностей ОК для сигналов с условно «низкой» энергией рентгеновских фотонов и условно «высокой» энергией рентгеновских фотонов.

На первом этапе приведем описание математической модели исходной дуальной информации для линейного детектора рентгеновского излучения, элементы которого сопряжены с двухканальными амплитудными анализаторами и счетчиками импульсов.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ С ДЕТЕКТОРА, СОДЕРЖАЩЕГО ДВУХКАНАЛЬНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ АНАЛИЗАТОР

Для построения математической модели предположим, что используется ССЦР, содержащая линейку идентичных детекторов, каждый из которых сопряжен с двухканальным аналоговым амплитудным анализатором. Предположим также, что аналоговые сигналы с выходов двухканального аналогового амплитудного анализатора поступают на вход счетного устройства (счетчика импульсов). Амплитудный анализатор осуществляет аналоговую селекцию исходных импульсов по энергии. Схема формирования выходных цифровых сигналов для отдельного детектора из линейки приведена на рис. 1.

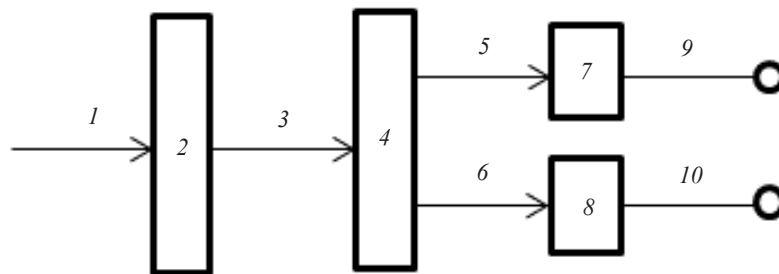


Рис. 1. Схема формирования цифровых сигналов для отдельного детектора из линейки, сопряженного с двухканальным аналоговым амплитудным анализатором:

1 — поток квантов рентгеновского излучения, падающих на детектор; 2 — детектор излучения; 3 — поток электрических импульсов на выходе детектора; 4 — аналоговый амплитудный анализатор; 5 — поток низкоэнергетических электрических импульсов; 6 — поток высокоэнергетических электрических импульсов; 7, 8 — устройство регистрации (счетчик импульсов); 9 — низкоэнергетический цифровой сигнал; 10 — высокоэнергетический цифровой сигнал.

Из аналитических соотношений, приведенных в [21, 22], и анализа схемы, изображенной на рис. 1, вытекает, что при наличии ОК число электрических импульсов  $N_L(H)$  с канала амплитудного анализатора, ассоциированного с условно «низкой» энергией фотонов, и число электрических импульсов  $N_H(H)$  с канала амплитудного анализатора, ассоциированного с условно «высокой» энергией фотонов, оцениваются по формулам:

$$N_L(H) = [\overline{N_L}(H) + \Phi_L(H)]; \quad N_H(H) = [\overline{N_H}(H) + \Phi_H(H)]; \quad (1)$$

$$\overline{N_L}(H) = C_{id} \int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE; \quad (2)$$

$$\overline{N_H}(H) = C_{id} \int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE. \quad (3)$$

Здесь  $[\arg]$  — целая часть аргумента  $\arg$ ;  $\overline{N_L}(H)$ ,  $\overline{N_H}(H)$  — средние значения цифровых сигналов  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$ ;  $H$  — толщина ОК, см;  $\Phi_L(H)$ ,  $\Phi_H(H)$  — шумы, обусловленные квантовой природой рентгеновского излучения, со средними значениями  $\overline{\Phi_L}(H)$ ,  $\overline{\Phi_H}(H)$  и дисперсиями  $\sigma^2(\Phi_L(H))$ ,  $\sigma^2(\Phi_H(H))$ , оцениваемыми по формулам:

$$\overline{\Phi_L}(H) = 0, \quad \overline{\Phi_H}(H) = 0; \quad (4)$$

$$\sigma^2(\Phi_L(H)) = \sigma^2(N_L(H)) = C_{id} \int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE; \quad (5)$$



$$\sigma^2(\Phi_H(H)) = \sigma^2(N_H(H)) = C_{id} \int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE, \quad (6)$$

где  $C_{id} = C_{id0}T$  — параметр, характеризующий систему контроля, а

$$C_{id0} = \frac{\Psi(\Omega_{det})}{F^2} S \quad (7)$$

— вероятность попадания фотона, излученного источником, на фронтальную поверхность элемента детектора при отсутствии ОК;  $\Omega_{det}$  — вектор направление луча фотонов от источника на центр фронтальной поверхности детектора;  $\Psi(\Omega)$  — распределение числа фотонов, излучаемых источником по направлениям  $\Omega$ ;  $S$  — площадь эффективной фронтальной поверхности чувствительного к радиации элемента детектора;  $T$  — время формирования аналогового сигнала;  $F$  — расстояние от центра фокусного пятна источника излучения до центра фронтальной поверхности детектора;  $E_{max}$  — максимальная энергия рентгеновских фотонов, МэВ;  $E_{thr}$  — энергетический эквивалент порога аналогового амплитудного анализатора  $U_{thr} = \gamma_c E_{thr}$ , установленного в анализаторе для разделения суммарного потока электрических импульсов на промежуточном выходе детектора на потоки аналоговых сигналов с условно «низкой» и «высокой» энергией, попадающих на соответствующие счетчики импульсов, на выходе которых и оценивается число фотонов  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$ , зарегистрированных на промежутке  $[0, T]$ , с условно «низкой» и «высокой» энергией;  $\gamma_c$  — коэффициент преобразования энергии рентгеновских фотонов, зарегистрированных детектором, в электрический заряд, Кл/МэВ;  $g(E, E_{max}) = dN/dE$  — нормированное распределение числа фотонов по энергии,  $1/(МэВ \cdot с)$ ;  $m(E, Z)$  — массовый коэффициент ослабления (МКО) гамма-излучения с энергией  $E$  для материала ОК,  $см^2/г$ ;  $Z$  — эффективный атомный номер материала ОК;  $\rho$  — плотность материала ОК,  $г/см^3$ ;  $\rho H$  — массовая толщина ОК,  $г/см^2$ ;

$$\varepsilon(E) = 1 - \exp(-m(E, Z_{det})\rho_{det} H_{det}) \quad (8)$$

— эффективность регистрации детектором гамма-квантов с энергией  $E$ ;  $Z_{det}$ ,  $\rho_{det}$ ,  $H_{det}$  — атомный номер, плотность и толщина радиационно-чувствительного элемента детектора.

Напомним, что итоговые цифровые сигналы  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$  имеют следующий физический смысл:  $N_L(H)$  — количество рентгеновских фотонов из энергетического диапазона  $[0, E_{thr}]$ , регистрируемых детектором за время  $T$  при наличии ОК толщиной  $H$ ;  $N_H(H)$  — количество рентгеновских фотонов из энергетического диапазона  $(E_{thr}, E_{max}]$ , регистрируемых детектором за время  $T$  при наличии ОК толщиной  $H$ . Соответственно при этом:  $\bar{N}_L(H)$  — среднее значение цифрового сигнала  $N_L(H)$ ;  $\bar{N}_H(H)$  — среднее значение цифрового сигнала  $N_H(H)$ .

Средние значения и дисперсии цифровых сигналов  $N_L(0)$  и  $N_H(0)$  в случае отсутствия ОК находятся из формул (2), (3), (7), (8) с помощью подстановки  $H = 0$ .

Набор выражений (1)—(8) является усовершенствованием математической модели процесса формирования цифровых сигналов  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$  с учетом аналогового разделения исходных электрических сигналов с детектора рентгеновского излучения по амплитуде на условно низкоэнергетические и условно высокоэнергетические импульсы с последующим счетом этих импульсов. Аналоговое разделение выходных сигналов детектора рентгеновского излучения по амплитуде осуществляется с помощью двухканального амплитудного анализатора.

Отмеченная предложенная модель формирования исходной дуальной информации позволяет получить сведения о различии ослабления рентгеновского излучения в двух энергетических диапазонах, поэтому может служить основой для уточнения математической модели оценки радиационных прозрачностей ОК [20] применительно к аналоговому разделению исходных (первичных) сигналов с детектора фотонов по амплитуде на условно низкоэнергетические и условно высокоэнергетические сигналы (импульсы) с последующим их счетом.

## ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПРИБОРНОЙ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗИРУЕМОГО ВАРИАНТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

Радиационная прозрачность объекта контроля является одним из параметров, характеризующих процесс ослабления гамма- или рентгеновского излучения. Традиционно это понятие связывают с вероятностью прохождения фотонами ОК без взаимодействия [9, 23, 24]. Так как оценка радиационной прозрачности применительно к МДЭ зависит от режима регистрации рентгеновских фотонов, параметров радиационно-чувствительных элементов детекторов и варианта энергетической селекции, то такую оценку логично называть приборной. Приборная

оценка радиационной прозрачности ОК по определению равна отношению цифрового сигнала с детектора, расположенного за ОК, к цифровому сигналу в случае отсутствия объекта при одних и тех же условиях измерения. Используя данное определение и математическую модель цифровых сигналов с детектора для рассматриваемого варианта энергетической селекции, можно получить соответствующие формулы для приборной оценки радиационных прозрачностей  $d_L, d_H$  для фотонов с условно «низкой» и с условно «высокой» энергией. Упомянутые формулы выглядят следующим образом:

$$d_L = \frac{N_L(H)}{N_L(0)} = \frac{\overline{N_L(H)} + \Phi_L(H)}{\overline{N_L(0)} + \Phi_L(0)}; \tag{9}$$

$$d_H = \frac{N_H(H)}{N_H(0)} = \frac{\overline{N_H(H)} + \Phi_H(H)}{\overline{N_H(0)} + \Phi_H(0)}. \tag{10}$$

Для оценки итоговых цифровых сигналов  $N_L(0)$  и  $N_H(0)$ , ассоциированных с условно «низкой» энергией и с условно «высокой» энергией, на практике можно использовать их выборочные средние значения, которые оцениваются экспериментально по выборкам большого объема. Для выборок большого объема и соблюдения неравенств  $N_L(0) \gg 1$  и  $N_H(0) \gg 1$  дисперсиями выборочных средних  $\overline{N_L(0)}$  и  $\overline{N_H(0)}$  допустимо пренебречь. Условия  $\overline{N_L(0)} \gg 1$  и  $\overline{N_H(0)} \gg 1$  необходимы для предотвращения так называемого «квантового голодания». Из сказанного выше следует, что

$$N_L(0) \approx \overline{N_L(0)}, \quad N_H(0) \approx \overline{N_H(0)}. \tag{11}$$

Формула (11) эквивалентна следующей:

$$\Phi_L(0) \approx 0, \quad \Phi_H(0) \approx 0. \tag{12}$$

Выражения (9), (10) с учетом (11), (12) примут вид:

$$d_L \approx \frac{N_L(H)}{N_L(0)} = \frac{\overline{N_L(H)} + \Phi_L(H)}{\overline{N_L(0)}} = \frac{\overline{N_L(H)}}{\overline{N_L(0)}} + \frac{\Phi_L(H)}{\overline{N_L(0)}} = d_{iL} + \Phi_{dL}; \tag{13}$$

$$d_H \approx \frac{N_H(H)}{N_H(0)} = \frac{\overline{N_H(H)} + \Phi_H(H)}{\overline{N_H(0)}} = \frac{\overline{N_H(H)}}{\overline{N_H(0)}} + \frac{\Phi_H(H)}{\overline{N_H(0)}} = d_{iH} + \Phi_{dH}, \tag{14}$$

где  $d_{iL}$  и  $d_{iH}$  — средние значения приборных оценок радиационных прозрачностей ОК для фотонов с условно «низкой» и с условно «высокой» энергией;  $\Phi_{dL}$  и  $\Phi_{dH}$  — шумы приборных оценок радиационных прозрачностей ОК, обусловленные квантовой природой рентгеновского излучения, для цифровых сигналов, ассоциированных с условно «низкой» и с условно «высокой» энергией рентгеновских фотонов.

Поясним физический смысл величин  $d_L, d_{iL}$  в (13) и  $d_H, d_{iH}$  в (14). Под  $d_L, d_{iL}$  будем понимать экспериментальную и теоретическую приборные оценки радиационных прозрачностей ОК для цифровых сигналов, ассоциированных с условно «низкой» энергией, а под  $d_H, d_{iH}$  — экспериментальную и теоретическую приборные оценки радиационных прозрачностей ОК для цифровых сигналов, ассоциированных с условно «высокой» энергией.

Для проведения анализа влияния параметров излучения, детектора и ОК на величину и точность приборных оценок радиационных прозрачностей ОК, а также последующего определения информативных параметров рассматриваемой реализации МДЭ, необходима развернутая аналитическая запись соответствующих уравнений связи. Упомянутые уравнения связи выводятся из формул (2), (13) и (3), (14):

$$d_{iL} = \frac{\int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE}{\int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \varepsilon(E) dE}; \tag{15}$$

$$d_{IH} = \frac{\int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE}{\int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \varepsilon(E) dE}. \quad (16)$$

Из анализа уравнений (15) и (16) теоретическим приборным оценкам радиационных прозрачностей можно придать следующий теоретиковероятностный смысл:  $d_{IL}$  — вероятность того, что фотон из энергетического диапазона  $[0, E_{thr}]$ , испущенный источником в сторону детектора, пройдет через ОК без взаимодействия и будет зарегистрирован детектором;  $d_{IH}$  — вероятность того, что фотон из энергетического диапазона  $(E_{thr}, E_{max}]$ , испущенный источником в сторону детектора, пройдет через ОК без взаимодействия и будет зарегистрирован детектором.

Развернутые выражения для вычисления средних значений шумов  $\bar{\Phi}_{dL}$ ,  $\bar{\Phi}_{dH}$  и дисперсий шумов  $\sigma^2\Phi_{dL}$ ,  $\sigma^2\Phi_{dH}$  приборных оценок радиационных прозрачностей выводятся из формул (2)—(7), (13), (14) и выглядят следующим образом:

$$\bar{\Phi}_{dL} = 0; \quad \bar{\Phi}_{dH} = 0; \quad (17)$$

$$\sigma^2(\Phi_{dL}) = \frac{\sigma^2[\Phi_L(H)]}{[\bar{N}_L(0)]^2} = \frac{\int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE}{C_{id} \left[ \int_0^{E_{thr}} g(E, E_{max}) \varepsilon(E) dE \right]^2}; \quad (18)$$

$$\sigma^2(\Phi_{dH}) = \frac{\sigma^2[\Phi_H(H)]}{[\bar{N}_H(0)]^2} = \frac{\int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E) dE}{C_{id} \left[ \int_{E_{thr}}^{E_{max}} g(E, E_{max}) \varepsilon(E) dE \right]^2}. \quad (19)$$

Совокупность формул (13)—(19) определяет математическую модель приборных оценок радиационных прозрачностей ОК для низко- и высокоэнергетического сигналов для рассматриваемого варианта энергетической селекции. Вместе с тем для полноты описания данной модели целесообразно исследовать статистическую взаимосвязь исследуемых цифровых сигналов, поскольку это имеет существенное значение, в частности, для корректного проведения численных экспериментов на основе этой модели.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НИЗКО- И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СИГНАЛАМИ

Для удобства проведения дальнейших преобразований введем обозначения:

$$G(E, E_{max}; H) = C_{id0} g(E, E_{max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E)$$

— числовой энергетический спектр фотонов излучения, регистрируемых детектором в единицу времени при наличии ОК,  $1/(\text{МэВ} \cdot \text{с})$ ;

$$\lambda = \int_0^{E_{max}} G(E, E_{max}; H) dE$$

— интенсивность потока импульсов на выходе элемента детектора при наличии ОК,  $1/\text{с}$ ;

$$f(E) = \frac{G(E, E_{\max}; H)}{\int_0^{E_{\max}} G(E, E_{\max}; H) dE} = \frac{g(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z)\rho H)\varepsilon(E)}{\int_0^{E_{\max}} g(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z)\rho H)\varepsilon(E) dE} \quad (20)$$

— плотность распределения энергии зарегистрированного детектором фотона излучения при наличии ОК;

$$A_i = \gamma_c E_{ab}(E_i) \quad (21)$$

— амплитуда электрического импульса, соответствующая поглощенной энергии  $E_{ab}(E_i)$  зарегистрированного детектором в момент времени  $t_i$  фотона с энергией  $E_i$ .

Далее ограничимся случаем, когда каждый из отдельных детекторов линейки представляет собой детектор полного поглощения, что в физическом отношении вполне оправдано из соображений полноты использования падающего на детектор излучения. Тогда

$$\varepsilon(E) = 1; \quad E_{ab}(E_i) = E_i.$$

Соответственно при этом формулы (20) и (21) преобразуются к виду:

$$f(E) = \frac{g(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z)\rho H)}{\int_0^{E_{\max}} g(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) dE};$$

$$A_i = \gamma_c E_i. \quad (22)$$

Для исследования статистической взаимосвязи между низко- и высокоэнергетическими сигналами целесообразно проанализировать сам процесс на выходе детектора, поскольку именно из него в последующем и формируются эти сигналы.

Согласно [25—27], процесс на выходе детектора излучения представляет собой случайный поток электрических импульсов, который может быть описан следующим образом:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - t_i), \quad (23)$$

здесь  $N$  — случайное число импульсов на выходе детектора на промежутке измерения (регистрации) излучения  $[0, T]$ ;  $\delta(t)$  — дельта-функция Дирака.

Величины в правой части (23) имеют следующий теоретикопровероятностный смысл [26, 27]:  $N$  — случайная величина, которая распределена по Пуассону с параметром  $L$ ,  $L = \lambda T$ ;  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) — последовательность амплитуд электрических импульсов, которые являются взаимно независимыми случайными величинами с одинаковым распределением; последовательность времен  $\{t_i\}$  образует пуассоновский поток событий с интенсивностью  $\lambda$ .

На выходе двухканального амплитудного анализатора формируются низко-  $Z_L(t)$  и высокоэнергетический  $Z_H(t)$  потоки электрических импульсов:

$$Z_L(t) = \sum_{i=1}^N A_i I\{A_i \leq A_{\text{thr}}\} \delta(t - t_i);$$

$$Z_H(t) = \sum_{i=1}^N A_i I\{A_i > A_{\text{thr}}\} \delta(t - t_i).$$

Здесь  $I\{A_i \leq A_{\text{thr}}\}$  и  $I\{A_i > A_{\text{thr}}\}$  — индикаторы событий  $\{A_i \leq A_{\text{thr}}\}$  и  $\{A_i > A_{\text{thr}}\}$  соответственно.

Сформированные на выходе амплитудного анализатора в течение промежутка времени  $[0, T]$  импульсы подсчитываются на соответствующих устройствах. При этом различие в амплитудах импульсов не принимается во внимание (игнорируется).

Формально данная процедура регистрации излучения может быть описана следующим образом. Сначала потоки  $Z_L(t)$  и  $Z_H(t)$  путем замены в них множителей  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) на 1 преобразуются в потоки  $\hat{Z}_L(t)$  и  $\hat{Z}_H(t)$  соответственно:



$$\hat{Z}_L(t) = \sum_{i=1}^N I\{A_i \leq A_{\text{thr}}\} \delta(t-t_i);$$

$$\hat{Z}_H(t) = \sum_{i=1}^N I\{A_i > A_{\text{thr}}\} \delta(t-t_i).$$

Затем потоки  $\hat{Z}_L(t)$  и  $\hat{Z}_H(t)$  интегрируются на промежутке  $[0, T]$ , в результате чего и получаются низко- и высокоэнергетический цифровые сигналы:

$$N_L(H) = \int_0^T \hat{Z}_L(t) dt = \sum_{i=1}^N I\{A_i \leq A_{\text{thr}}\}; \quad (24)$$

$$N_H(H) = \int_0^T \hat{Z}_H(t) dt = \sum_{i=1}^N I\{A_i > A_{\text{thr}}\}. \quad (25)$$

Из (24), (25) следует, что в теоретикопроцентном отношении низко- и высокоэнергетический цифровые сигналы представляют собой суммы случайного числа случайных слагаемых.

С учетом равенства  $A_{\text{thr}} = \gamma_c E_{\text{thr}}$  и (22) формулы (24) и (25) примут вид:

$$N_L(H) = \sum_{i=1}^N I\{E_i \leq E_{\text{thr}}\}; \quad (26)$$

$$N_H(H) = \sum_{i=1}^N I\{E_i > E_{\text{thr}}\}. \quad (27)$$

Для краткости описания последующих выкладок введем дополнительные обозначения:

$$X = N_L(H); \quad Y = N_H(H); \quad (28)$$

$$X_i = I\{E_i \leq E_{\text{thr}}\} = \begin{cases} 1, & E_i \leq E_{\text{thr}} \\ 0, & E_i > E_{\text{thr}} \end{cases} = \begin{cases} 1, & 0 \leq E_i \leq E_{\text{thr}} \\ 0, & E_{\text{thr}} < E_i \leq E_{\text{max}} \end{cases}; \quad (29)$$

$$Y_i = I\{E_i > E_{\text{thr}}\} = \begin{cases} 1, & E_i > E_{\text{thr}} \\ 0, & E_i \leq E_{\text{thr}} \end{cases} = \begin{cases} 1, & E_{\text{thr}} < E_i \leq E_{\text{max}} \\ 0, & 0 \leq E_i \leq E_{\text{thr}} \end{cases}; \quad (30)$$

$$p = \int_0^{E_{\text{thr}}} f(E) dE$$

— вероятность того, что при наличии ОК энергия, зарегистрированного детектором кванта, находится в низкоэнергетическом диапазоне  $[0, E_{\text{thr}}]$ ;

$$q = 1 - p = \int_{E_{\text{thr}}}^{E_{\text{max}}} f(E) dE$$

— вероятность того, что при наличии ОК энергия зарегистрированного детектором кванта находится в высокоэнергетическом диапазоне  $(E_{\text{thr}}, E_{\text{max}}]$ .

Из (26) — (30) получаем:

$$X = \sum_{i=1}^N X_i; \quad Y = \sum_{i=1}^N Y_i. \quad (31)$$

Таким образом, задача выявления статистической взаимосвязи между сигналами  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$  свелась к эквивалентной задаче — выявлению указанной взаимосвязи между случайными величинами  $X$  и  $Y$ , описываемыми формулами (29), (30) и (31).

Отметим очевидные, но важные свойства случайных величин  $X_i, Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ :

$$X_i + Y_i = 1 (i = 1, 2, \dots, N); \quad X_i Y_i = 0 (i = 1, 2, \dots, N).$$

Наряду с этим, вследствие независимости как процессов испускания отдельных фотонов источником излучения, так и процессов их прохождения через вещество, для данных случайных величин будут также справедливы и следующие свойства:

- $X_i Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$  не зависят от  $N$ ;
  - $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  не зависят от  $Y_j (j = 1, 2, \dots, N)$  при  $i \neq j$ ;
  - $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  независимы друг от друга и имеют одинаковое распределение;
  - $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$  независимы друг от друга и имеют одинаковое распределение.
- Закон распределения  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$  имеет вид:

$$P\{X_i = 0\} = q; P\{X_i = 1\} = p. \quad (32)$$

Закон распределения  $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$  имеет вид:

$$P\{Y_i = 0\} = p; P\{Y_i = 1\} = q. \quad (33)$$

Из свойств анализируемых случайных величин  $X_i, Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , законов распределения (32), (33) и теорем из [28, 29] следует, что случайные величины  $X$  и  $Y$  распределены по Пуассону с параметрами  $L_L$  и  $L_H$ :

$$L_L = \lambda T p; \quad L_H = \lambda T q.$$

В [30] сформулирована и доказана теорема о независимости потоков, формируемых в результате вероятностного раздвоения пуассоновского потока. Из данной теоремы, в частности, следует, что рассматриваемые нами случайные величины  $X$  и  $Y$  являются независимыми.

Таким образом, из результатов проведенных исследований вытекает, что низкоэнергетический цифровой сигнал  $N_L(H)$  и высокоэнергетический цифровой сигнал  $N_H(H)$  являются независимыми случайными величинами, распределенными по Пуассону с параметрами  $L_L$  и  $L_H$  соответственно. При этом очевидно, что  $L_L = \bar{N}_L(H)$ ,  $L_H = \bar{N}_H(H)$  (в чем также легко убедиться, учитывая формулы, описывающие параметры  $L_L, L_H, \lambda, T, p, q$ ). Заметим также, учитывая (13) и (14), что из независимости сигналов  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$  следует независимость приборных оценок радиационных прозрачностей  $d_L$  и  $d_H$  равно как и шумов  $\Phi_{dL}$  и  $\Phi_{dH}$ . Что же касается законов распределения прозрачностей  $d_L$  и  $d_H$  (шумов  $\Phi_{dL}$  и  $\Phi_{dH}$ ), то в соответствии с (13) и (14) они будут однозначно определяться по известным законам распределения сигналов  $N_L(H)$  и  $N_H(H)$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена одна из схем реализации метода дуальных энергий, заключающаяся в однократном сканировании объекта контроля узким пучком рентгеновского излучения с аналоговой энергетической селекцией регистрируемых фотонов с помощью двухканального аналогового амплитудного анализатора с последующим счетом электрических импульсов с элемента детектора. При этом на выходе одного из каналов каждого амплитудного анализатора, дополненного счетчиком импульсов, формируется низкоэнергетический цифровой сигнал, а на выходе другого — высокоэнергетический цифровой сигнал. Представлена и исследована математическая модель формирования дуальных цифровых сигналов для анализируемой реализации метода дуальных энергий. На ее основе построена математическая модель приборных оценок радиационных прозрачностей объекта контроля, соответствующих условно «низкой» и условно «высокой» энергии рентгеновского излучения.

Модели могут быть использованы для проведения исследований по влиянию шумов, обусловленных квантовой природой рентгеновского излучения, на качество идентификации ослабляющего материала, например, по эффективному атомному номеру, применительно к рассматриваемой реализации метода дуальных энергий, а также для обоснованного выбора параметров соответствующих двухэнергетических систем цифровой радиографии и рентгеновской компьютерной томографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan S.U., Khan I.U., Ullah I., Saif N., Ullah I. A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: image enhancement and noise reduction // *Journal of X-ray Science and Technology*. 2020. V. 28. No. 3. P. 481—505. <https://doi.org/10.3233/XST-200663>
2. Yalçın O., Reyhancan I.A. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2022. V. 1040. Article ID 167265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167265>
3. Chang C.H., Ni Y.C., Tseng S.P. Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2021. V. 29. No. 2. P. 317—330. <https://doi.org/10.3233/xst-200790>
4. Yim C.W., Hong S.G. A MCNP simulation for a new dual-energy dual-beam X-ray inspection method using multi-angle Compton scattering to determine the effective atomic number of explosives // *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. V. 195. Article ID 110084. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110084>
5. Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // *NDT & E International*. 2018. V. 94. P. 120—125. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.01.002>
6. Cordova A. Technologies for primary screening in aviation security // *Journal of Transportation Security*. 2022. V. 15. No. 3-4. P. 141—159. <https://doi.org/10.1007/s12198-022-00248-8>
7. Linardatos D., Koukou V., Martini N., Konstantinidis A., Bakas A., Fountos G., Valais I., Michail C. On the response of a micro non-destructive testing X-ray detector // *Materials*. 2021. V. 14. P. 888. <https://doi.org/10.3390/ma14040888>
8. Vukadinovic D., Anderson D. X-ray baggage screening and AI, EUR 31123 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. <http://dx.doi.org/10.2760/46363>
9. Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080058> [Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 33—56.]
10. Kayalvizhi R., Malarvizhi S., Topkar A., Vijayakumar P. Raw data processing techniques for material classification of objects in dual energy X-ray baggage inspection systems // *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. V. 193. Article ID 109512. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109512>
11. Mamchur D., Peksa J., Le Clainche S., Vinuesa R. Application and advances in radiographic and novel technologies used for non-intrusive object inspection // *Sensors*. 2022. V. 22. No. 6. Article ID 2121. <https://doi.org/10.3390/s22062121>
12. Alvarez R.E. Invertibility of the dual energy x-ray data transform // *Medical Physics*. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. <https://doi.org/10.1002/mp.13255>
13. Osipov S., Chakhlov S., Udod V., Usachev E., Schetinkin S., Kamysheva E. Estimation of the effective mass thickness and effective atomic number of the test object material by the dual energy method // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. V. 168. Article ID 108543. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108543>
14. Zhang Y., Kong W., Li D., Liu X. On using XMC R-CNN model for contraband detection within X-ray baggage security images // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. V. 2020. Article ID 1823034. <https://doi.org/10.1155/2020/1823034>
15. Огородников С.А. Распознавание материалов при радиационном таможенном контроле на базе линейного ускорителя электронов / Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург. 2002. 121 с.
16. Свистунов Ю.А., Ворогушин М.Ф., Петрунин В.И., Сидоров А.В., Гавриш Ю.Н., Фиалковский А.М. Развитие работ по созданию рентгеновских и ядерно-физических инспекционных комплексов в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова // *Problems of atomic science and technology*. 2006. No 3. P. 171—173.
17. Заявка 2458408. Европейское патентное ведомство, МПК G01V 5/00. Dual-energy X-ray body scanning device and image processing method. Chen Xue Liang, Chen Li, Huo Mei Chun, Yang Li Rui, Dong Ming Wen, Kong Wei Wu, Yang XiaoYue, Xue Kai, Li Yong Qing, Li Guang Qing, Zhao Lei; BEIJING ZHONGDUN ANMIN ANALYSIS TECHNOLOGY CO LTD, FIRST RES INST OF MINISTRY OF PUBLIC SECURITY OF P R C. № 11167491. Заявл. 25.05.2011. Опубл. 30.05.2012.
18. Fredenberg E. Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2018. V. 878. P. 74—87. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.044>
19. Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu. Algorithm for Evaluating Errors in Recognition of Materials in X-Ray Testing System Containing X-Ray Sandwich Detectors // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 1. P. 46—56. <https://doi.org/10.1134/S1061830922010065>

[Удод В.А., Осипов С.П., Назаренко С.Ю. Алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 40—51.]

20. Udod V.A., Vorobeichikov S.E., Nazarenko S.Y. Mathematical models of radiation transparency of test objects when using sandwich X-ray radiation detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 161—170. <https://doi.org/10.1134/S1061830920020096> [Удод В.А., Воробейчиков С.Э., Назаренко С.Ю. Математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 31—41.]

21. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. <https://doi.org/10.1134/S1061830918080077> [Удод В.А., Осипов С.П., Ван Я. Оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 50—65.]

22. Марчук Г.И., Орлов В.В. К теории сопряженных функций / В кн.: Нейтронная физика. Сб. статей. Под ред. П.А. Крупчинского. М.: Атомиздат, 1961. С. 30—45.

23. Гавриш Ю.Н., Бердников Я.А., Спиринов Д.О., Передерий А.Н., Сафонов М.В., Романов И.В. Программный комплекс для восстановления интроскопических изображений с использованием метода дуальной энергии // Problems of atomic science and technology. 2010. № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). P. 123—125.

24. Rogers T.W., Jaccard N., Griffin L.D. A deep learning framework for the automated inspection of complex dual-energy x-ray cargo imagery. — Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) II // International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10187. No. Article 101870L.

25. Горбунов В.И., Покровский А.В. Радиометрические системы радиационного контроля. М.: Атомиздат, 1979. 224 с.

26. Тарасов Г.П. Статистические методы обработки информации в системах измерения ионизирующего излучения. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.

27. Solodushkin V.I., Udod V.A., Klimenov V.A., Temnik A.K. Optimal evaluation of radiometric signal intensity for the count-time radiation recording mode // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. V. 48. No. 9. P. 505—510. [Солодушкин В.И., Удод В.А., Клименов В.А., Темник А.К. Оптимальная оценка интенсивности радиометрического сигнала для счетно-временного режима регистрации излучения // Дефектоскопия. 2012. № 9. С. 3—9.]

28. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. Издание второе. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. 368 с.

29. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 480 с.

30. Цициашвили Г.Ш. Пуассоновские потоки в системе с повторным обслуживанием // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 4 (37). С. 83—88.

## REFERENCES

1. Khan S.U., Khan I.U., Ullah I., Saif N., Ullah I. A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: image enhancement and noise reduction // Journal of X-ray Science and Technology. 2020. V. 28. No. 3. P. 481—505. <https://doi.org/10.3233/XST-200663>

2. Yalçın O., Reyhancan I.A. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. V. 1040. P. 167265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167265>. EDN: HMLQTK.

3. Chang C.H., Ni Y.C., Tseng S.P. Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray // Journal of X-Ray Science and Technology. 2021. V. 29. No. 2. P. 317—330. <https://doi.org/10.3233/xst-200790>

4. Yim C.W., Hong S.G. A MCNP simulation for a new dual-energy dual-beam X-ray inspection method using multi-angle Compton scattering to determine the effective atomic number of explosives // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 195. P. 110084. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110084>. EDN: QTOMYF.

5. Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // NDT & E International. 2018. V. 94. P. 120—125. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.01.002>

6. Cordova A. Technologies for primary screening in aviation security // Journal of Transportation Security. 2022. V. 15. No. 3—4. P. 141—159. <https://doi.org/10.1007/s12198-022-00248-8>

7. Linardatos D., Koukou V., Martini N., Konstantinidis A., Bakas A., Fountos G., Valais I., Michail C. On the response of a micro non-destructive testing X-ray detector // Materials. 2021. 14. P. 888. <https://doi.org/10.3390/ma14040888>



8. *Vukadinovic D., Anderson D.* X-ray baggage screening and AI, EUR 31123 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. <http://dx.doi.org/10.2760/46363>
9. *Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y.* Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080058>. EDN: XPBBAH.
10. *Kayalvizhi R., Malarvizhi S., Topkar A., Vijayakumar P.* Raw data processing techniques for material classification of objects in dual energy X-ray baggage inspection systems // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 193. P. 109512. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109512>. EDN: TVVVTB.
11. *Mamchur D., Peksa J., Le Clainche S., Vinuesa R.* Application and advances in radiographic and novel technologies used for non-intrusive object inspection // Sensors. 2022. V. 22. No. 6. P. 2121. <https://doi.org/10.3390/s22062121>. EDN: HKXRET.
12. *Alvarez R.E.* Invertibility of the dual energy x-ray data transform // Medical Physics. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. <https://doi.org/10.1002/mp.13255>
13. *Osipov S., Chakhlov S., Udod V., Usachev E., Schetinkin S., Kamysheva E.* Estimation of the effective mass thickness and effective atomic number of the test object material by the dual energy method // Radiation Physics and Chemistry. 2020. V. 168. P. 108543. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108543>. EDN: XJMSTU.
14. *Zhang Y., Kong W., Li D., Liu X.* On using XMC R-CNN model for contraband detection within X-ray baggage security images // Mathematical Problems in Engineering. 2020. V. 2020. P. 1823034. <https://doi.org/10.1155/2020/1823034>. EDN: KEUNDA.
15. *Ogorodnikov S.A.* Recognition of materials during radiation customs control based on a linear electron accelerator / Dis. ... Cand. tech. Sci. Saint Petersburg. 2002. 121 p.
16. *Svistunov Yu.A., Vorogushin M.F., Petrunin V.I., Sidorov A.V., Gavrish Yu.N., Fialkovsky A.M.* Development of work on the creation of X-ray and nuclear physics inspection complexes at NIEFA named after D.V. Efremova // Problems of atomic science and technology. 2006. No 3. P. 171—173.
17. *Chen Xue Liang, Chen Li, Huo Mei Chun, Yang Li Rui, Dong Ming Wen, Kong Wei Wu, Yang Xiao Yue, Xue Kai, Li Yong Qing, Li Guang Qing, Zhao Lei.* European Patent Office Appl. #2458408. MPKG01V 5/00. Dual-energy X-ray body scanning device and image processing method, Beijing Zhongdun Anmin Analysis Technology Co. Ltd., First Res of Ministry of Public Security of PRC no. 11167491, declared May 25, 2011, publ. May 30, 2012.
18. *Fredenberg E.* Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 878. P. 74—87. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.044>
19. *Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu.* Algorithm for Evaluating Errors in Recognition of Materials in X-Ray Testing System Containing X-Ray Sandwich Detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 1. P. 46—56. <https://doi.org/10.1134/S1061830922010065>. EDN: JQWDYU.
20. *Udod V.A., Vorobeichikov S.E., Nazarenko S.Y.* Mathematical models of radiation transparency of test objects when using sandwich X-ray radiation detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 161—170. <https://doi.org/10.1134/S1061830920020096>. EDN: NFCCTR.
21. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. <https://doi.org/10.1134/S1061830918080077>. EDN: WTNFBC.
22. *Marchuk G.I., Orlov V.V.* On the theory of conjugate functions. In the book: Neutron physics. Sat. articles. Ed. P.A. Krupchinsky. M.: Atomizdat, 1961. P. 30—45.
23. *Gavrish Yu.N., Berdnikov Ya.A., Spirin D.O., Perederiy A.N., Safonov M.V., Romanov I.V.* Software package for restoration of introsopic images using the dual energy method // Problems of atomic science and technology. 2010. No. 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). P. 123—125.
24. *Rogers T.W., Jaccard N., Griffin L.D.* A deep learning framework for the automated inspection of complex dual-energy x-ray cargo imagery. — Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) II // International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10187. P. 101870L. <https://doi.org/10.1117/12.2262662>
25. *Gorbunov V.I., Pokrovsky A.V.* Radiometric radiation monitoring systems. M.: Atomizdat, 1979. 224 p.
26. *Tarasov G.P.* Statistical methods of information processing in systems for measuring ionizing radiation. M.: Atomizdat, 1980. 208 p.
27. *Solodushkin V.I., Udod V.A., Klimenov V.A., Temnik A.K.* Optimal evaluation of radiometric signal intensity for the count-time radiation recording mode // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. V. 48. No. 9. P. 505—510. <https://doi.org/10.1134/S1061830912090070>. EDN: RGBSON.
28. *Ventzel E.S., Ovcharov L.A.* Probability theory. Second edition. M.: Science. Main editorial office of Phys.-Math. lit., 1973. 368 p.
29. *Ventzel E.S., Ovcharov L.A.* Probability theory and its engineering applications. M.: Science. Main editorial office of Phys.-Math. lit., 1988. 480 p.
30. *Tsitsiashvili G.Sh.* Poisson flows in systems with retrieval queues // Bulletin of Tomsk State University. Management, computing and information science. 2016. No. 4 (37). P. 83—88. <https://doi.org/10.17223/19988605/37/9>. EDN: XDCCZT.

## ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТРЕЩИН В ГАЗОТУРБИННЫХ ЛОПАТКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ

© 2024 г. А.О. Чулков<sup>1,\*</sup>, В.П. Вавилов<sup>1</sup>, О.М. Жуков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

<sup>2</sup>ПАО «ОДК-Сатурн»,

Россия 152903 Рыбинск, пр-т Ленина, 163

E-mail: \*chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024; после доработки 03.05.2024

Принята к публикации 06.05.2024

Описаны результаты неразрушающего контроля лопатки турбины из жаропрочного сплава с керамическим покрытием методом теплового контроля с ультразвуковой (УЗ) стимуляцией. Цель исследования заключалась в определении возможностей метода по обнаружению трещин в лопатке турбины и ее керамическом покрытии. Обработку термограмм проводили методом анализа главных компонент, который позволяет «подчеркнуть» дефектные отметки. Полученные данные показали хорошее соответствие результатам капиллярного неразрушающего контроля при значительно меньшем времени проведения испытания. Продемонстрирована особенность теплового контроля с ультразвуковой стимуляцией при обнаружении сомкнутых трещин керамического покрытия и трудновыявляемых подповерхностных трещин.

*Ключевые слова:* тепловой контроль, ультразвуковая стимуляция, ультразвуковая инфракрасная термография, дефект, трещина, лопатка турбины.

## THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF CRACKS IN TURBINE BLADES BY USING ULTRASONIC STIMULATION

© 2024 A.O. Chulkov<sup>1,\*</sup>, V.P. Vavilov<sup>1</sup>, O.M. Zhukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia 634050 Tomsk, Lenin Av., 30

<sup>2</sup>UEC-Saturn PJSC,

Russia 152903 Rybinsk, Lenin Av., 163

E-mail: \*chulkovao@tpu.ru

The results of nondestructive testing (NDT) of a turbine blade made of a heat resistant alloy with a ceramic coating were obtained by using ultrasonic infrared (IR) thermography. The purpose of the study was to determine possibilities of this NDT technique in detecting cracks in the blade and the coating. Image processing was performed by using principal component analysis, which allows to underline defect indications in IR images. The obtained test results were in a good accordance with the results obtained by means of penetrants with a considerably shorter inspection time. Potentials of IR ultrasonic thermography in the detection of “kissing” cracks and cracks located in difficult to reach sites was demonstrated.

*Keywords:* thermal testing, ultrasonic stimulation, ultrasonic infrared thermography, defect, crack, turbine blade.

DOI: 10.31857/S0130308224040052

### ВВЕДЕНИЕ

Использование механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты для стимуляции тепловыделения дефектов в комбинации с регистрацией тепловых полей с помощью инфракрасных (ИК) камер было предложено в 1970-х годах Хеннеке и др. [1]. Соответствующий способ неразрушающего контроля (НК) в зарубежной литературе получил несколько названий: ультразвуковая ИК-термография, акустическая термография, термоакустика с использованием упругих волн, вибротермография, а также метод VibroIR (торговая марка) [1–7]. В России такой способ называют тепловым контролем с ультразвуковой стимуляцией или термоакустическим контролем [8, 9]. Несмотря на различия в названиях, во всех случаях стимуляцию тепловыделения дефектов осуществляют механическими колебаниями со звуковой или УЗ частотой с помощью источника, прижимаемого к поверхности объекта контроля. Такие колебания приводят к локальному повышению температуры в зонах дефектов вследствие преобразования механической энергии в тепловую в результате внутреннего трения, пластической деформации,

механического гистерезиса и эффекта термоупругости. Механизмы повышения температуры в зоне дефектов при термоакустическом контроле до сих пор составляют предмет дискуссии [4, 8—15].

Характерными особенностями метода являются:

- проведение испытаний в реальном времени и на сравнительно большой площади вокруг точки УЗ стимуляции (до  $0,25 \text{ м}^2$ ) [10];
- отсутствие нагрева бездефектной области материала в ходе испытаний, что повышает вероятность обнаружения малых дефектов, генерирующих слабые температурные сигналы;
- возможность избирательного обнаружения трудно выявляемых другими способами «спящих» дефектов, в которых возникает интенсивное выделение тепла;
- прямая зависимость предельных размеров и глубины выявляемых дефектов от мощности УЗ стимуляции; однако повышение мощности стимуляции может привести к повреждению объектов контроля в точке ввода ультразвуковых колебаний.

УЗ возбуждение при реализации термоакустического метода может быть непрерывным, модулированным или импульсным, в соответствии с чем различают синхронный и импульсный режимы, а также ультразвуковую стимуляцию с использованием меняющейся частоты акустического сигнала [1, 10, 11, 14, 15].

В 1990-х годах Фавро и др. из Университета Уэйна (США) опубликовали результаты исследований по выявлению трещин в металлических образцах при импульсном УЗ возбуждении [5, 6]. В качестве источника УЗ стимуляции был использован излучатель фирмы Branson, генерировавший импульсы мощностью до 1 кВт и длительностью от 30 до 200 мс на несущей частоте 20 кГц. Ультразвук вводили в объект контроля через иммерсионную пасту и волновод в виде стального диска диаметром 13 мм.

В Национальной Ливерморской лаборатории (США) термоакустический контроль был использован для контроля качества сварных швов в изделиях сложной геометрической формы [7]. Дефектные швы характеризовались специфическими температурными сигнатурами, возникавшими под действием УЗ импульсов мощностью до 300 кВт и длительностью 100 мс (при несущей частоте 30 кГц). Преимуществом данного метода контроля была слабая зависимость результатов от положения точки УЗ возбуждения, а недостатком — возможность инициации новых дефектов в результате ввода столь мощного ультразвука. Теми же исследователями было выполнено сравнение возможностей радиографии, классического УЗ контроля и теплового контроля с ультразвуковой стимуляцией при выявлении дефектов в панели космического челнока, которая была выполнена из 36-слойного углепластикового композита, покрытого карбидом кремния.

Исследователи из Университета Айовы (США) применили широкодиапазонное УЗ возбуждение сравнительно низкой мощности с плавающей несущей частотой [16—18]. Результаты исследований показали, что УЗ стимуляция низкой мощности способна обеспечить регистрируемые изменения температуры благодаря эффекту внутреннего трения в микронеоднородностях (при температурной чувствительности тепловизоров до 20 мК). Использование качающейся несущей частоты акустического сигнала позволило определить резонансные частоты различных дефектов.

Следуя этой концепции, Солодов и Буссе из Штуттгартского Университета (Германия) выдвинули идею локального резонанса дефектов с целью повышения чувствительности термоакустического метода при использовании маломощных УЗ излучателей [19]. При возникновении локального резонанса акустическая энергия эффективно преобразуется дефектом в тепловую энергию. Аналогичная методика была предложена Паем и Адамсом в 1981 г. при обнаружении сдвиговых трещин в стекло- и углепластиковых композитах путем возбуждения резонансных вибраций [20].

Для проведения НК термоакустическим методом наиболее широко используют мощные УЗ преобразователи, работающие на определенной частоте (от 22 до 100 кГц). Этому способствует коммерческая доступность и удобство эксплуатации соответствующих УЗ излучателей. В стандартных испытаниях волновод УЗ преобразователя прижимают к объекту контроля с определенным усилием. Однако такой контакт может быть нестабильным в процессе ввода колебаний, что может приводить к получению плохо воспроизводимых температурных откликов дефектов. Для преодоления этого недостатка используют оснастки, надежно закрепляющие объект контроля и удерживающие излучатель УЗ колебаний.

В качестве УЗ преобразователей для задач термоакустического НК применяют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) или магнитострикционные преобразователи (МП) [21]. Применение МП в качестве источника УЗ стимуляции позволяет преобразовывать до нескольких киловатт электрической мощности аппаратуры с выходным сигналом фиксированной частоты около 22 кГц. Пьезоэлектрические преобразователи, используемые в термоакустиче-



ском контроле, также имеют свою резонансную частоту, в пределах которой их использование становится максимально эффективным.

В Томском политехническом университете (ТПУ) исследования по тепловому контролю с УЗ стимуляцией были начаты в 2010 г. на базе магнитоупругих [9, 22] и первоначально были связаны с НК ударных повреждений углепластиковых и углерод-углеродных композитов, в том числе в комбинации с классическим тепловым контролем [11, 13, 14, 21—23]. В частности, было определено, что мощность, выделяющаяся в зонах ударного повреждения в углепластике, составляет несколько десятков мВт [23].

В последние годы исследования ТПУ были сосредоточены на обнаружении трещин в керамических покрытиях и лопатках турбин, а также оценке возможностей термоакустического контроля применительно к лопаткам, изготовленным из композитов. В настоящей статье приведены результаты термоакустического контроля лопатки турбины, полученные с использованием МП.

### ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ

На рис. 1 показана лопатка с наработкой в составе турбины ГТД, выполненная из жаропрочного никелевого сплава с керамическим покрытием. Лопатка прошла капиллярный контроль, обнаруживший ряд выходящих на поверхность трещин. Целью термоакустического контроля было подтверждение результатов капиллярного контроля и выявление возможных трещин в пере лопатки, находящихся под керамическим покрытием.

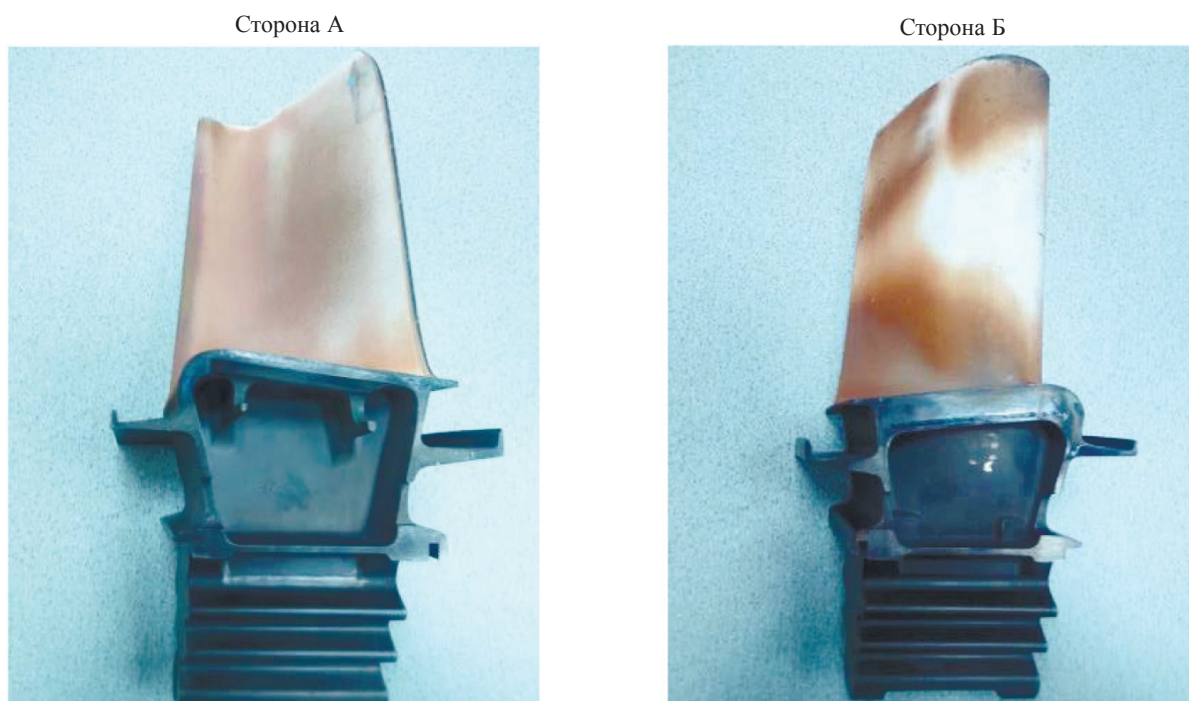


Рис. 1. Лопатка турбины ГТД с керамическим покрытием после наработки.

Турбинная лопатка является особо ответственной деталью, поэтому контролю ее состояния в ходе работы следует уделить особое внимание. В процессе эксплуатации на пере лопатки могут образовываться такие дефекты, как трещины и отслоения керамического покрытия. Наибольшую опасность представляют трещины, поскольку из керамического покрытия они могут распространиться в материал лопатки, что впоследствии может привести к ее разрушению [24].

Выявление трещин капиллярным контролем (набор ЛЮМ1-ОВ) имеет некоторые трудности, поскольку керамическое покрытие изначально имеет пористую структуру, а в процессе эксплуатации в результате температурно-эрозионного воздействия на лопатку поверхность покрытия может становиться грубее.



Таким образом, трещины в керамическом покрытии являются недопустимым дефектом. Выявление трещин традиционным капиллярным методом является длительным процессом. Интерпретация результатов капиллярного контроля так же усложняется вследствие фонового свечения всей поверхности пера лопатки, что подчеркивает интерес к изучению термоакустического метода неразрушающего контроля, исключающего наличие «ложных» засветок.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Типичная экспериментальная установка для термоакустического контроля (см. схему установки на рис. 2) состоит из УЗ преобразователя, который для ввода механических колебаний прижимают к объекту контроля, ИК-камеры, с помощью которой регистрируют температурное поле объекта контроля, и компьютера, на который передают данные для их дальнейшей обработки и анализа качества изделия на наличие дефектов.



Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки термоакустического контроля.

В проведенных исследованиях в качестве источника УЗ стимуляции использовали МП с рабочей частотой 22 кГц и соответствующий генератор с потребляемой мощностью 300 Вт. В качестве ИК-камеры использовали тепловизионный модуль Optiris PI 450 с разрешением 382×288 точек и температурной чувствительностью 40 мК. Управление процедурой контроля и обработку результатов проводили на компьютере с использованием отечественного программного обеспечения ThermoFit Pro (ТПУ).

В результате контроля и обработки данных были получены ИК-термограммы поверхностей лопатки при УЗ стимуляции. Ниже приведены характерные термограммы с расшифровкой наблюдаемых тепловых аномалий, представляющих собой локальные теплые зоны на фоне «холодного» изделия.

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ

На рис. 3 приведены фотография процесса УЗ стимуляции лопатки и соответствующая термограмма. Стимуляцию проводили в течение 10 с при частоте записи термограмм 10 Гц. В результате были выявлены три зоны повышения температуры, которые обозначены Д1, Д2, Д3 и могут быть интерпретированы как дефекты керамического покрытия.

Локальная теплая зона в нижней части пера лопатки (обозначена Ш-шум) соответствует контакту лопатки с подложкой.

Анализ температурных профилей рис. 4 показывает, что зоны Д2 и Д3 ведут себя одинаковым образом, а температура в них возрастает на 2,1—2,3 °С относительно начальной температуры в процессе УЗ стимуляции. Следует отметить, что после выключения работы магнито-стрикционного преобразователя температура в зонах дефектов Д2 и Д3 продолжала незначи-

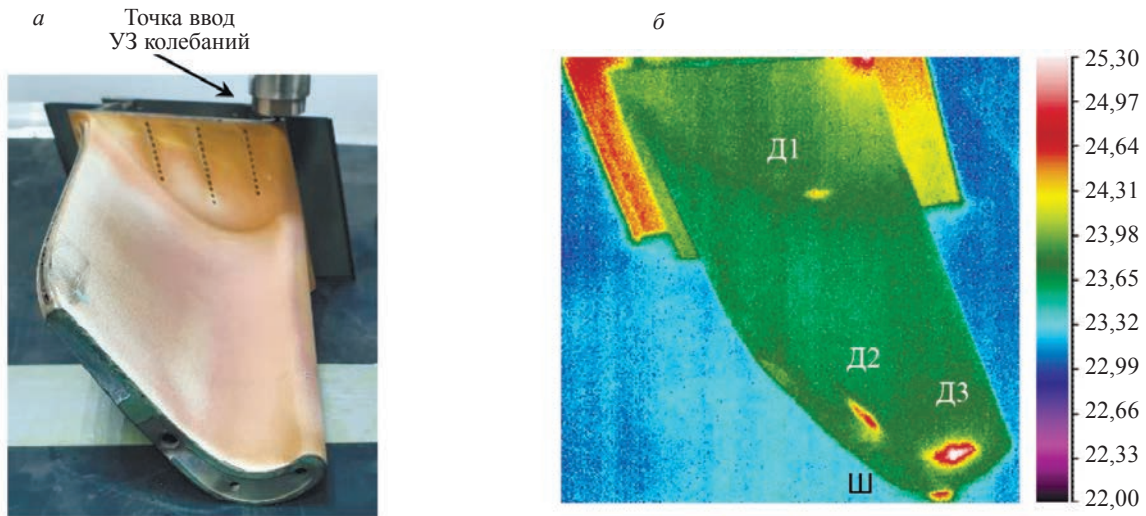


Рис. 3. Результат термоакустического контроля стороны А лопатки турбины (точка ввода УЗ колебаний № 1): лопатка турбины при УЗ стимуляции (а); термограмма лопатки турбины с выраженными температурными аномалиями (б).

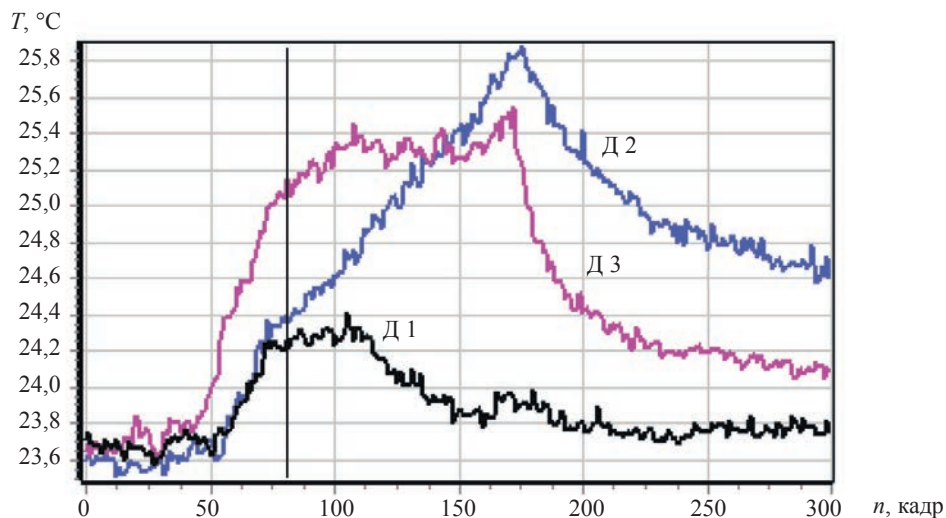


Рис. 4. Изменение температуры во времени в зонах Д1, Д2, Д3 при УЗ стимуляции лопатки турбины в точке № 1.

тельно расти, что может свидетельствовать о «всплывании» температурного сигнала дефекта, расположенного под керамическим покрытием. Подобная задержка температурных сигналов во времени может быть использована для оценки глубины залегания дефекта.

Зона Д1 ведет себя аномально по сравнению с Д2 и Д3, а именно, температура растет и достигает максимума, возрастая на  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  еще в ходе УЗ стимуляции. Затем температура в этой зоне снижается, несмотря на продолжающуюся стимуляцию. Подобное поведение может быть связано с расширением дефекта под действием УЗ колебаний, в результате чего снижается мощность внутреннего трения.

Результаты экспериментов, которые были проведены при контроле лопатки турбины со стороны А при вводе УЗ стимуляции в точку № 2 (длительность стимуляции 20 с), находящуюся в зоне замка лопатки, приведены на рис. 5. На исходной термограмме (см. рис. 5б) отчетливо видны две дефектные зоны Д2 и Д3 на торце пера лопатки. Обработка последовательности термограмм методом анализа главных компонент (АГК) позволила выявить плохо распознаваемую дефектную отметку Д1 (см. рис. 5в). На рис. 5г показаны графики изменения температуры в зонах Д1—Д3 для исходной последовательности термограмм. Видно, что в процессе УЗ стимуляции температура в области Д1 практически не изменяется, в то время как в областях Д2 и Д3 температура возрастает на  $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

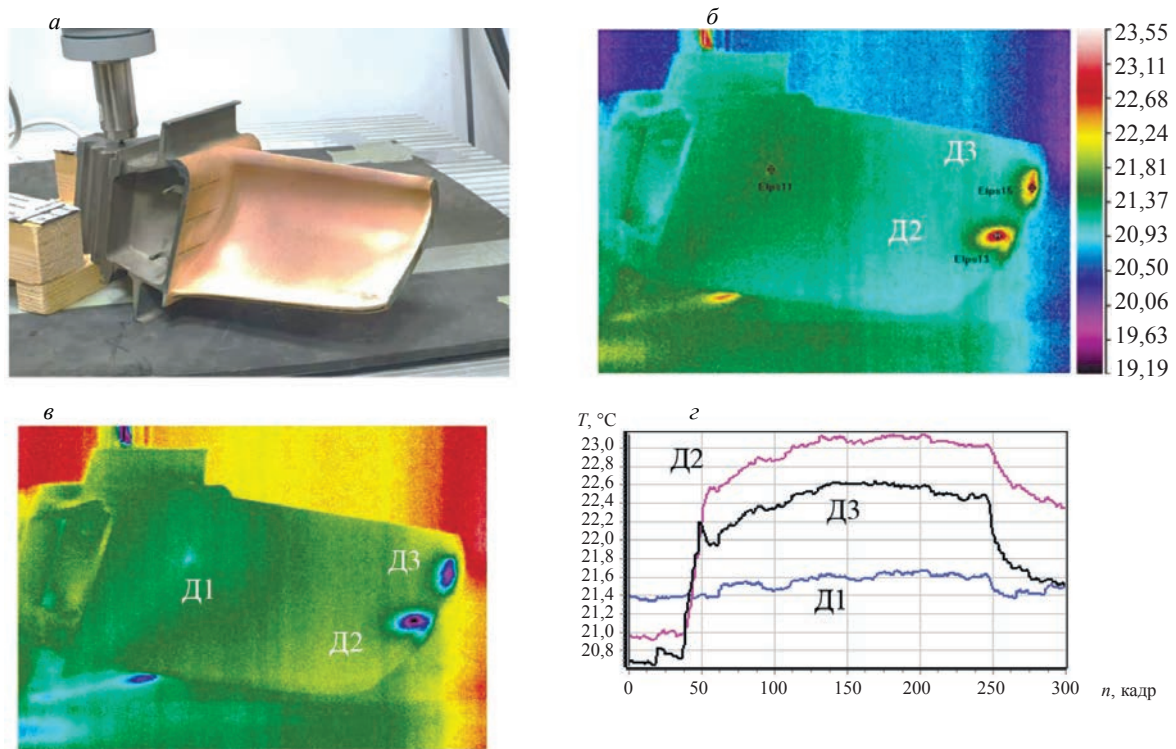


Рис. 5. Результат термоакустического контроля лопатки турбины (сторона А, УЗ стимуляция точки № 2): процесс теплового контроля при УЗ стимуляции точки № 2 (а); оптимальная термограмма исходной последовательности (б); первая компонента (АГК) (в); график изменения температур в зонах дефектов Д1—Д3 (г).

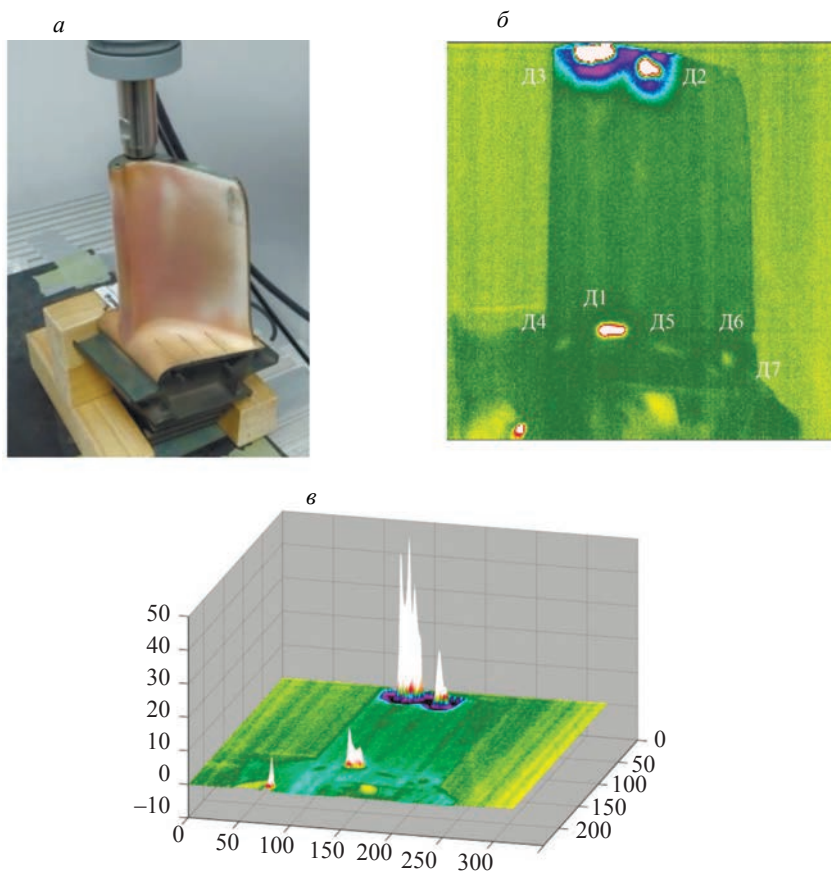


Рис. 6. Результат термоакустического контроля лопатки турбины со стороны А при стимуляции в точке № 3: положение магнитостриктора при вводе УЗ колебаний (а); результат обработки последовательности термограмм методом АГК (б); трехмерное представление карты дефектов лопатки турбины (в).



При вводе УЗ колебаний в торец пера лопатки (точка № 3) при контроле стороны А были обнаружены дефекты Д4—Д7, расположенные в зоне примыкания пера лопатки к полке (см. результаты на рис. 6). Наличие данных дефектов было подтверждено с помощью капиллярного НК (результаты схематично отмечены на рис. 7). Для большей наглядности уровня температурных сигналов в зонах дефектов Д1—Д3 по сравнению с температурными сигналами дефектов Д4—Д7, находящихся в зоне перехода пера лопатки в полку, на рис. 6в приведена термограмма в трехмерном представлении.

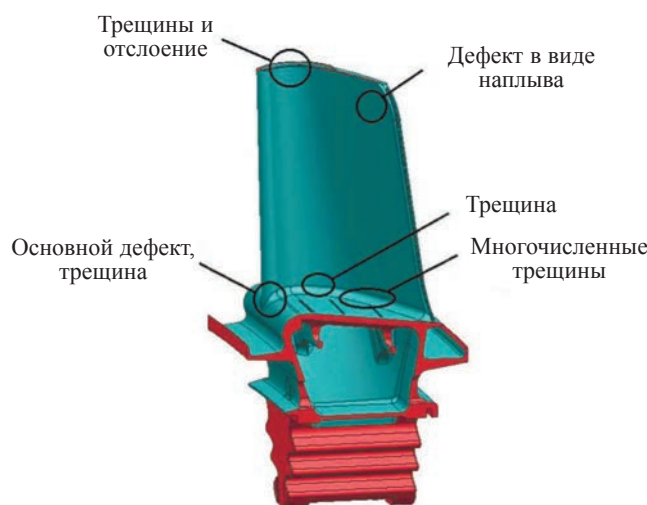


Рис. 7. Результаты обнаружения дефектов методом капиллярного НК.

При термоакустическом контроле лопатки турбины со стороны Б УЗ стимуляцию проводили в точках № 4 (рис. 8) и № 5 (рис. 9). В частности, при стимуляции точки № 4 была выявлена слабая дефектная отметка Д8 с повышением температуры на 0,8 °С (см. рис. 8б). Аналогичная отметка при таком же уровне температурного сигнала проявилась при вводе УЗ в точку № 5 (см. рис. 9), причем, как и в предыдущем случае, существенное улучшение результата испытаний было получено после применения метода АГК. Кроме того, при стимуляции точки № 5, находящейся на торце пера лопатки, и при контроле стороны Б были выявлены температурные аномалии, не подтвержденные результатами капиллярного НК. В частности, обширная зона А1, вероятно, характеризует разогрев колеблющейся кромки пера лопатки и обусловлена малой толщиной стенки пера в районе выходных отверстий вентиляционных каналов. Зона А2 по характеру изменения температуры может быть вызвана внутренним дефектом пера лопатки, в частности, в зоне перегородок вентиляционных каналов.

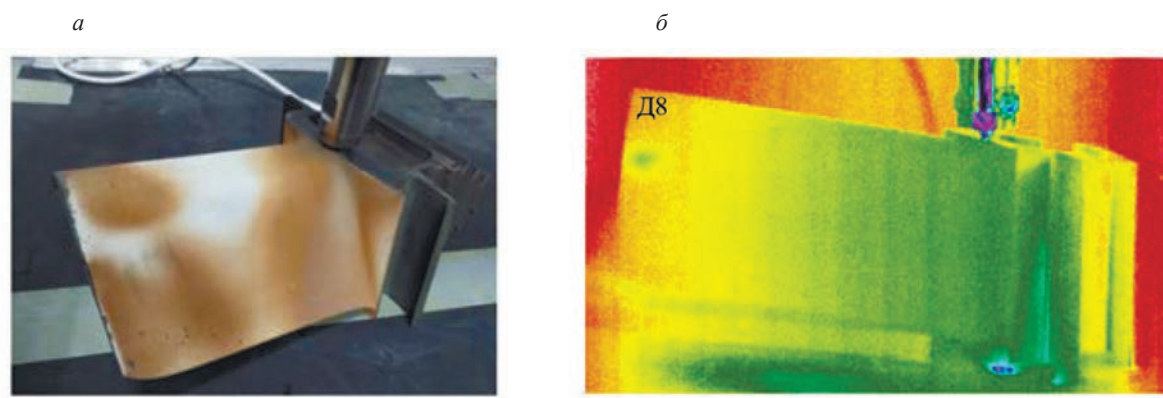


Рис. 8. Результаты термоакустического контроля лопатки турбины со стороны Б при вводе УЗ в точку № 4: ввод УЗ в точку № 4 (а); изображение первой компоненты (АГК) (б).



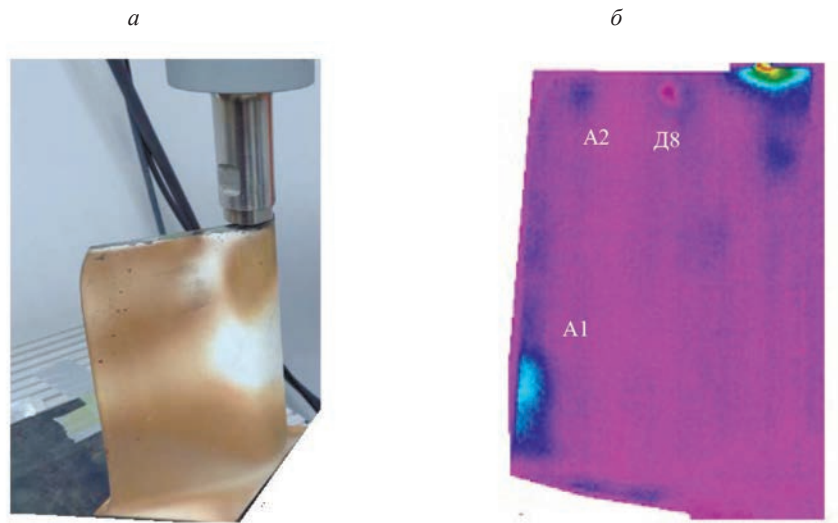


Рис. 9. Результаты термоакустического контроля лопатки турбины (а) со стороны Б при вводе УЗ в точке № 5 (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лопатка турбины из жаропрочного никелевого сплава с керамическим покрытием была проконтролирована с использованием сравнительно нового в отечественной практике теплового контроля с УЗ стимуляцией. Такой метод теплового контроля наиболее пригоден для выявления трещин с раскрытием от 1 мкм и более, а также трещин с нулевым раскрытием, берега которых, соприкасаясь, генерируют тепловую энергию под воздействием УЗ стимуляции.

Результатом контроля явились последовательности термограмм, характеризующие динамику температуры поверхности лопатки турбины при механическом воздействии. Для анализа термограмм использовали известные алгоритмы обработки ИК-изображений, в частности, метод АГК, который позволяет «подчеркнуть» дефектные отметки.

Термоакустический контроль проводили для двух (А и Б) поверхностей пера лопатки. Для стимуляции использовали МП с частотой 22 кГц и электрической мощностью 300 Вт. Большинство дефектов было обнаружено на поверхности А с хорошей корреляцией результатов термоакустического и капиллярного контроля. Следует подчеркнуть высокую производительность теплового контроля с УЗ стимуляцией, время проявления дефектов, которое близко к длительности УЗ стимуляции (нескольких секунд), и визуализации всей контролируемой поверхности пера лопатки турбины. Кроме того, следует иметь в виду парадоксальную особенность термоакустического метода НК, которая состоит в том, что наилучшим образом выявляются трещины, края которых сомкнуты, чем более заметные другими видами НК раскрытые трещины, что связано с большим локальным повышением температуры в сомкнутых трещинах ввиду трения их «берегов».

Наилучшие результаты, с точки зрения количества обнаруженных дефектов, были получены при вводе УЗ стимуляции в торец пера лопатки, однако по ряду причин данная точка не рекомендована для УЗ воздействия. В связи с этим авторами будут проведены дальнейшие исследования, направленные на выбор оптимальной точки УЗ стимуляции при контроле подобного типа лопаток турбин.

При контроле поверхности Б лопатки, для которой результаты капиллярного контроля отсутствовали, были обнаружены зоны слабой генерации тепла, по-видимому, связанные с наличием внутренних дефектов лопатки турбины, либо резонансных явлений тонких стенок пера лопатки. В связи с этим следует подчеркнуть еще одно преимущество исследуемого метода перед капиллярным НК: термоакустический контроль позволяет обнаруживать подповерхностные дефекты, генерирующие тепло под действием УЗ, не выявляемые с помощью пенетрантов, а именно трещины, находящиеся под керамическим покрытием, и трещины, раскрытие которых не выходит на контролируемую поверхность.

Основными недостатками термоакустического контроля, требующими оптимизации перед испытаниями конкретных изделий, являются: 1) зависимость результатов от положения точки ввода УЗ колебаний и обеспечение надежного контакта волновода УЗ излучателя с поверхностью объекта контроля; 2) потенциальная возможность повреждения поверхности объекта

контроля в точке УЗ стимуляции. Оба недостатка могут быть преодолены путем оптимизации системы термоакустического контроля и проведением исследований по определению оптимальной точки ввода ультразвука.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henneke E.G., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. Thermography, An NDI Method for Damage Detection // Journal of Metal. 1979. P. 11—15.
2. Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th., Busse G. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging // Insight. 2007. V. 49. No. 5. P. 272—274.
3. Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L. Thermographic Investigation of High-Power Ultrasonic Heating in Materials // Ultrasonics. 1981. V. 7. P. 159—163.
4. Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The Mechanics of Vibrothermography, Mechanics of Nondestructive Testing / Ed. W.W. Stinchcomb. New York: Plenum Press, 1980. P. 249—276.
5. Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse / Proc. SPIE “Thermosense-XXII”. 2000. V. 4020. P. 182—185.
6. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic Chaos and Sonic Infrared Imaging // Applied Physics Letter. 2002. V. 81. P. 3188—3190.
7. Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory // Proc. SPIE. “Thermosense-XXVI”. 2004. V. 5405. P. 313—321.
8. Литвиненко О.В. Исследование термоакустических эффектов в кремниевых пластинах / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, 2003. 127 с.
9. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Ultrasonic infrared thermography in nondestructive testing: A review // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 4. P. 212—219.
10. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // Proc. SPIE “Thermosense-XXXVI”. 2014. V. 9105. P. 91050J.
11. Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms // Infrared Physics & Technology. 2013. V. 61. P. 101—110.
12. Pieczonka L., Szewdo M., Uhl T. Vibrothermography — Measurement System Development and Testing. Diagnostics and Structural Health Monitoring. 2011. V. 2. Is. 58. P. 61—66.
13. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах // В мире НК. Март 2010. № 1 (47). С. 36—58.
14. Ширяев В.В., Хорев В.С. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции // Контроль. Диагностика. 2011 (спецвыпуск). С. 112—114.
15. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // Proc. of SPIE. 2004. V. 5405. P. 332—335.
16. Holland S.D., Renshaw J. Towards a Viable Strategy for Estimating Vibrothermographic Probability of Detection // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. 2008. V. 27. P. 491—497.
17. Holland S.D. First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. 2007. V. 2. P. 478—483.
18. Hiremath S.R., Mahapatra R., Srinivasan S. Detection of Crack In Metal Plate by Thermo Sonic Wave Based Detection Using FEM // JEST-M. 2012. V. 1. Is. 1. P. 12—18.
19. Solodov I., Busse G. Resonance Ultrasonic Thermography: Highly Efficient Contact and Air-coupled Remote modes // Applied Physics Letters. 2013. V. 102. Is. 6. Id. 061905. 3 p.
20. Pye C.J., Adams R.D. Detection of Damage in Fibre Reinforced Plastics Using Thermal Fields Generated During Resonant Vibration // NDT International. 1981. V. 14. Is. 3. P. 111—118.
21. Ермолов И.Н., Гутис М.Б., Королев М.В. и др. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
22. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // Rus. J. NDT. 2017. V. 53. No. 7. P. 530—538. DOI: 10.1134/S1061830917070099
23. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Quantitative study of local heat sources by Ultrasonic Infrared Thermography: An approach for estimating total energy released by low energy impact damage in C/C composite // Composites Part B: Engineering. V. 165. 15 May 2019. P. 167—173.
24. Naga V., Vakada N.R., Niranjan Kumar I.N., Prasad Katuru B., Madhulata N., Gurajrapu N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine – an overview // Intern. J. of Eng. Res. and Develop. August 2014. V. 10. Is. 8. P. 48—57.

## REFERENCES

1. Henneke E.G., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. Thermography, An NDI method for damage detection // Journal of Metal. 1979. P. 11—15.

2. Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th., Busse G. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging // *Insight*. 2007. V. 49. No. 5. P. 272—274.
3. Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L. Thermographic Investigation of high-power ultrasonic heating in materials // *Ultrasonics*. 1981. V. 7. P. 159—163.
4. Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The Mechanics of Vibrothermography, Mechanics of Nondestructive Testing / Ed. W.W. Stinchcomb. New York: Plenum Press, 1980. P. 249—276.
5. Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse // *Proc. SPIE “Thermosense-XXII”*. 2000. V. 4020. P. 182—185.
6. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic chaos and sonic infrared imaging // *Applied Physics Letter*. 2002. V. 81. P. 3188—3190.
7. Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory / *Proc. SPIE. “Thermosense-XXVI”*. 2004. V. 5405. P. 313—321.
8. Litvinenko O.V. Investigation of thermoacoustic phenomena in silicon samples / PhD thesis, 2003. 127 p. (in Russian).
9. Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Ultrasonic infrared thermography in nondestructive testing: A review // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 4. P. 212—219.
10. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // *Proc. SPIE “Thermosense-XXXVI”*. 2014. V. 9105. P. 91050J.
11. Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms // *Infrared Physics & Technology*. 2013. V. 61. P. 101—110.
12. Pieczonka L., Szwedo M., Uhl T. Vibrothermography – Measurement System Development and Testing. *Diagnostyka — Diagnostics and Structural Health Monitoring*, 2011. V. 2. Is. 58. P. 61—66.
13. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Khorev V.S. Ultrasonic Infrared technique for detecting impact damage and fatigue cracks in metals and composites // *In the NDT World*. March 2010. V. 1 (47). P. 36—58 (in Russian).
14. Shirayev V.V., Khorev V.S. Thermal NDT of impact damage in carbon reinforced plastic by applying ultrasonic stimulation // *Control. Diagnostics*. 2011 (special issue). P. 112—114 (in Russian).
15. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // *Proc. of SPIE*. 2004. V. 5405. P. 332—335.
16. Holland S.D., Uhl C., Renshaw J. Towards a viable strategy for estimating vibrothermographic probability of detection // *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2008. V. 27. P. 491—497.
17. Holland S.D. First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System // *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2007. V. 2. P. 478—483.
18. Hiremath S.R., Mahapatra R., Srinivasan S. Detection of Crack In Metal Plate by Thermo Sonic Wave Based Detection Using FEM // *JEST-M*. 2012. V. 1. Is. 1. P. 12—18.
19. Solodov I., Busse G. Resonance Ultrasonic Thermography: Highly Efficient Contact and Air-coupled Remote modes // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 102. Is. 6. Id. 061905. 3 p.
20. Pye C.J., Adams R.D. Detection of Damage in Fibre Reinforced Plastics Using Thermal Fields Generated During Resonant Vibration // *NDT International*. 1981. V. 14. Is. 3. P. 111—118.
21. Ermolov I.N., Ghitis M.B., Korolev M.V. Ultrasonic transducers for nondestructive testing. Mashinostroyeniye Publisher, Moscow. 1986. 280 p. (in Russian).
22. Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // *Rus. J. NDT*. 2017. V. 53 (7). P. 530—538. DOI: 10.1134/S1061830917070099.
23. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Quantitative study of local heat sources by Ultrasonic Infrared Thermography: An approach for estimating total energy released by low energy impact damage in C/C composite // *Composites Part B: Engineering*. V. 165. 15 May 2019. P. 167—173.
24. Naga V., Vakada N.R., Niranjana Kumar I.N., Prasad Katuru B., Madhulata N., Gurajapura N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine — an overview // *Intern. J. of Eng. Res. and Develop.* August 2014. V. 10. Is. 8. P. 48—57.

## ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ ПО ПАРАМЕТРАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

© 2024 г. Р. А. Соколов<sup>1,\*</sup>, К. Р. Муратов<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: \*falcon.rs@mail.ru; \*\*muratovkr@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024; после доработки 16.04.2024  
Принята к публикации 03.05.2024

Представлены результаты лабораторных исследований конструкционных сталей. Показана возможность применения комплексных параметров, полученных на основе гармонических составляющих петли магнитного гистерезиса для практической оценки временного сопротивления стали. Определение величины комплексного параметра осуществляется при помощи метода разделения диагнозов в пространстве признаков и метода группового учета аргументов. Регистрация петлей магнитного гистерезиса проведена при помощи магнитного структуроскопа DIUS-1.15M. Установлены весовые коэффициенты влияния гармонических составляющих на величину комплексного параметра. Результаты исследования демонстрируют возможность удовлетворительной оценки предела прочности стали по величине комплексного параметра.

*Ключевые слова:* временное сопротивление, петля магнитного гистерезиса, гармонический анализ, методы технической диагностики, термическая обработка.

## ESTIMATION OF THE TIME RESISTANCE OF STEEL BY THE PARAMETERS OF THE HARMONIC SPECTRUM OF THE REMAGNETIZATION CURVE

© 2024 R.A. Sokolov<sup>1,\*</sup>, K.R. Muratov<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen»/ IUT, Russia 625000 Tyumen, Volodarsky str., 38  
E-mail: \*falcon.rs@mail.ru; \*\*muratovkr@tyuiu.ru

The paper presents the results of laboratory studies of structural steels. The possibility of application of complex parameters obtained on the basis of harmonic components of magnetic hysteresis loop for practical estimation of steel time resistance is shown. Determination of the value of the complex parameter is carried out by means of the method of separation of diagnoses in the feature space and the method of group accounting of arguments. Registration of magnetic hysteresis loops is carried out by means of magnetic structuroscope DIUS-1.15M. The weight coefficients of the influence of harmonic components on the value of the complex parameter were determined. The results of the study demonstrate the possibility of satisfactory estimation of the strength of steel by the value of the complex parameter.

*Keywords:* time resistance, magnetic hysteresis loop, harmonic analysis, methods of technical diagnostics, heat treatment.

DOI: 10.31857/S0130308224040068

Одним из свойств стали, по которому судят о надежности и сроке эксплуатации изделия, является временное сопротивление ( $\sigma_b$ ) [1, 2]. Определение ее величины проводят стандартным образом в процессе разрушения образца, имеющего определенную форму и геометрические размеры [2].

Помимо разрушающих методов определения  $\sigma_b$  существуют неразрушающие косвенные методы, например, основанные на регистрации ультразвуковых волн, проходящих через объект контроля [3].

Между пределом прочности материала и твердостью существует связь [7]. Так, в работе [8] была предложена формула, описывающая связь между твердостью группы сталей и их  $\sigma_b$ , а также приведены статистические результаты оценки  $\sigma_b$  по  $H_c$ . Однако относительность установленных связей ограничивает их практическую применимость.

В работе [9] приведены обобщенные простые аналитические зависимости, описывающие связи между твердостями сталей, измеренными по шкалам Бринелля и Роквелла, и их  $\sigma_b$ .

Известны методы [4, 5], основанные на измерении и интерпретации магнитных характеристик вещества. В настоящей работе представлены результаты применения подобного подхода для определения величины временного сопротивления материала.

В качестве анализируемого параметра использовался гармонический спектр петли магнитного гистерезиса, полученный согласно методике, изложенной в [6].



Термическая обработка и размеры образцов из сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С

Марка стали	Термическая обработка	Размеры образцов, мм
09Г2С	Н (930 °С) + ЗВ	58,5×26,0×3,7
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	
Ст3	Н (930 °С) + ЗВ	59,0×29,0×3,8
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	
15ХСНД	Н (930 °С) + ЗВ	59,0×28,0×7,5
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	

Н — нагрев; ЗВ — закалка в воде; О — отпуск

Анализируемые данные были получены на образцах, изготовленных из сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С после термической обработки. Термическая обработка и размеры образцов приведены в табл. 1.

Одноосное растяжение образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50. Скорость перемещения захватов при испытаниях составляла 15 мм/мин.

На рис. 1 представлены результаты, отражающие изменение  $\sigma_b$  исследуемых сталей от температуры термической обработки образцов. Нулевое значение на графиках соответствует состоянию исследуемых образцов после закалки в воде, далее по горизонтальной шкале отложены температуры отпуска.

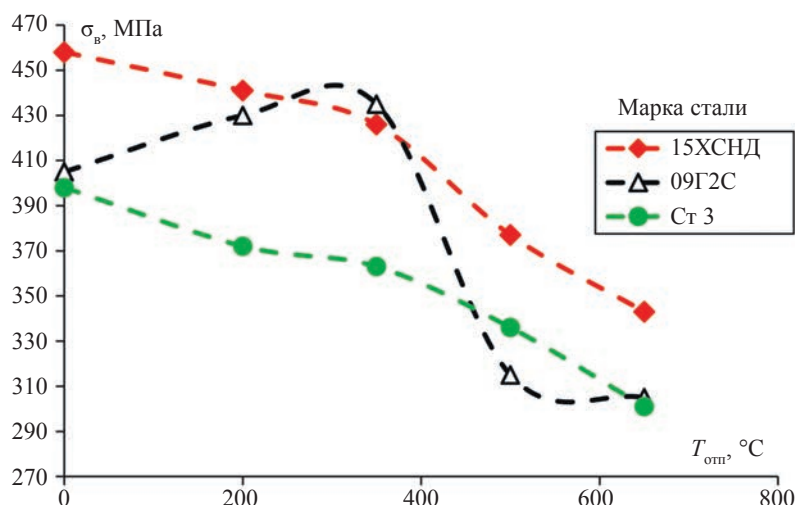


Рис. 1. Зависимость величины предела прочности от термической обработки.

Регистрация петель магнитного гистерезиса проводили при помощи магнитного структурографа АПС DIUS 1.15, реализующего измерения в замкнутой магнитной цепи. Величины маг-

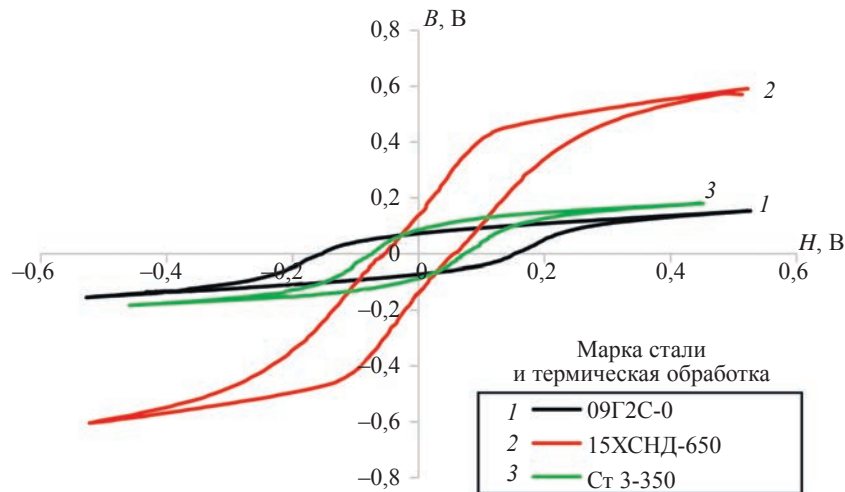


Рис. 2. Петли магнитного гистерезиса полученные на магнитном структуроскопе АПС DIUS 1.15.

нитной индукции и напряженности магнитного поля использованный прибор фиксирует в мВ. Примеры полученных петель магнитного гистерезиса представлены на рис. 2.

На основе метода разделения диагноза в пространстве признаков и метода группового учета аргумента были найдены комплексные параметры  $P_1$  и  $P_2$ , величина которых имеет удовлетворительную корреляцию с  $\sigma_b$  исследуемых материалов (рис. 3).

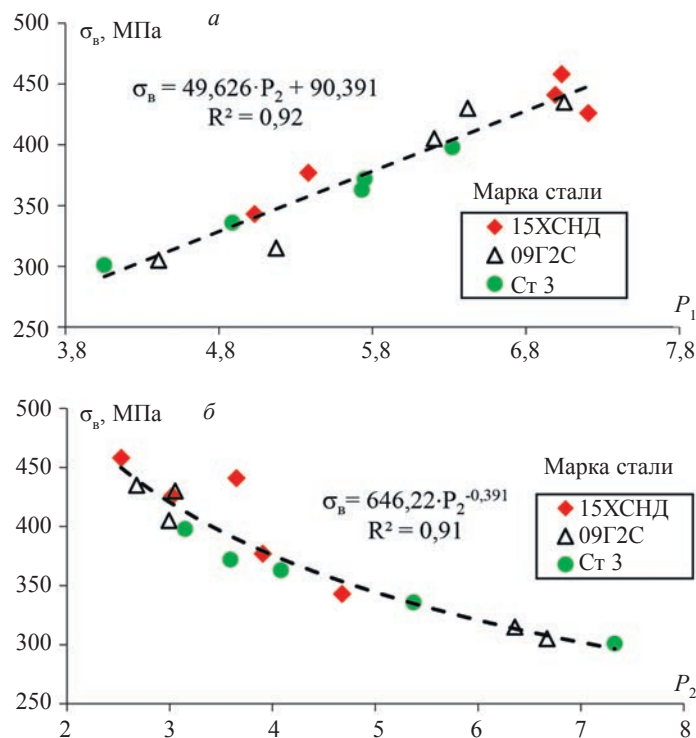


Рис. 3. Зависимость комплексного параметра от величины временного сопротивления исследуемых сталей: комплексный параметр  $P_1$  (а); комплексный параметр  $P_2$  (б).

Анализ представленных данных показывает, что термообработка закалкой в воду, после нагрева исследуемых сталей выше критической температуры  $A_{c3}$ , повышает временное сопротивление в среднем в 1,3 раза по сравнению с образцами, отпущенными при 650 °С. При уве-

личении температур отпуска происходит линейное снижение временного сопротивления сталей до уровня незакаленного состояния. У стали 09Г2С при температурах низкого и среднего отпуска наблюдается рост величины временного сопротивления, что связано с активными процессами преобразования структуры, ростом плотности дислокаций и величины внутренних остаточных напряжений [10].

Приведенные данные показывают, что в практических условиях, в качестве контрольного критерия, возможно использовать комплексный параметр, полученный по спектральным составляющим петли магнитного гистерезиса, который имеет высокую чувствительность к изменению физико-механических свойств стали.

## ВЫВОДЫ

При помощи метода разделения диагнозов в пространстве признаков и метода группового учета аргументов найдены комплексные параметры, включающие в себя несколько гармонических составляющих.

В результате анализа полученных данных о гармонических составляющих и величине предела прочности было установлено, что для комплексного параметра  $P_1$  и временного сопротивления  $\sigma_v$  наблюдается наличие удовлетворительной корреляционной зависимости, описываемой функцией с достоверностью  $R^2 = 0,92$ . При этом относительная ошибка определения временного сопротивления  $\sigma_v$  составляет  $\pm 9,6\%$ . Между комплексным параметром  $P_2$  и временным сопротивлением  $\sigma_v$  наблюдается корреляция, описываемая степенной функцией с достоверностью  $R^2 = 0,91$ . При этом разброс определения временного сопротивления  $\sigma_v$  по комплексному параметру  $P_1$  составляет  $\pm 27$  МПа, для комплексного параметра  $P_2$  эта величина лежит в пределах  $\pm 14$  МПа.

Полученные результаты отражают возможность практического использования комплексного параметра, полученного по спектральным составляющим, петли магнитного гистерезиса для оценки величины временного сопротивления  $\sigma_v$ .

Статья подготовлена за счет средств гранта Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агамиров Л.В. Машиностроение / Энциклопедия. В 40 т. Разд. 2. Материалы в машиностроении. Т. 2-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. М.: Машиностроение, 2010. 851 с.
2. ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: Введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 52 с.
3. Полетика И.М., Егорова Н.М., Куликова О.А., Зуев Л.Б. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 3. С. 37—40.
4. Пономарев Ю.Ф. Закономерности гармонических составляющих намагниченности циклически перемагничиваемых ферромагнитных сердечников и возможности их использования. I. Критерии физического подобия // Дефектоскопия. 1983. № 9. С. 52—62.
5. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2016. Т. 18. № 2. С. 38—49.
6. Соколов Р.А., Муратов К.Р., Новиков В.Ф. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 70—72.
7. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 171 с.
8. Сандомирский С.Г. Анализ связи коэрцитивной силы с временным сопротивлением углеродистых сталей // Сталь. 2016. № 9. С. 62—65.
9. Сандомирский С.Г. Обобщенные корреляционные зависимости между временным сопротивлением сталей и их твердостью // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 11. С. 52—57.
10. Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Ковенский И.М., Муратов К.Р., Венедиктов А.Н., Чаугарова Л.З. Влияние термической обработки на образование соединения MNS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 4. С. 113—126.

## REFERENCES

1. *Agamirov L.V.* Mashinostroenie / Enciklopediya. 40 t. Razd. 2. Materialy v mashinostroenii. T. 2-1. Fiziko-mekhanicheskie svoystva. Ispytaniya metallicheskih materialov (Mechanical Engineering. Encyclopedia. In 40 vol. Section 2. Materials in mechanical engineering. T. 2-1. Physical and mechanical properties. Tests of metallic materials), Moscow: Mashinostroenie, 2010, P. 851.
2. GOST 1497—84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie (Metals. Tensile test methods): Introduced 1986-01-01. Moscow: Izd-vo standards, 1990. P. 52.
3. *Poletika I.M., Egorova N.M., Kulikova O.A., Zuev L.B.* About ultrasonic control of heterogeneity of mechanical properties of hot-rolled steel // Journal of Technical Physics. 2001. T. 71. No. 3. P. 37—40.
4. *Ponomarev Yu.F.* Laws of harmonic components of magnetization of cyclically remagnetized ferromagnetic cores and possibilities of their use. I. Criteria of physical similarity // Defectoscopya. 1983. No. 9. P. 52—62.
5. *Novikov V.F., Neradovsky D.F., Sokolov R.A.* Use of quasi-static magnetic hysteresis loops for steel structure control // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. 2016. T. 18. No. 2. P. 38—49.
6. *Sokolov R.A., Muratov K.R., Novikov V.F.* Application of the spectral characteristics parameters of the remagnetization curve to determine the hardness of a ferromagnetic material // Defectoscopya. 2023. No. 6. P. 70—72.
7. *Markovets M. P.* Determination of Mechanical Properties of Metals by Hardness. M.: Mashinostroenie, 1979. P. 171.
8. *Sandomirsky S.G.* Analysis of the relationship between the coercive force and the time resistance of carbon steels // Steel. 2016. No. 9. P. 62—65.
9. *Sandomirsky S.G.* Generalized correlation dependences between the time resistance of steels and their hardness // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostics of materials. 2017. T. 83. No. 11. P. 52—57.
10. *Sokolov R.A., Novikov V.F., Kovenskij I.M., Muratov K.R., Venediktov A.N., Chaugarova L.Z.* The effect of heat treatment on the formation of MnS compound in low-carbon structural steel 09Mn2Si. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) // Metal Working and Material Science. 2022. V. 24. No. 4. P. 113—126.



## По материалам Уральского научного форума с международным участием, посвященного 300-летию Российской академии наук

В конце апреля в Екатеринбурге прошел Уральский научный форум с международным участием, посвященный 300-летию Российской академии наук. В современной истории это уже третий форум такого формата: первый состоялся в 2012 году и был приурочен к трем датам — 80-летию начала академических исследований в регионе, 30-летию УрО РАН и 20-летию научного Демидовского фонда, второй — через пятилетку, в 2017-м. Нынешнее собрание, соответственно масштабу даты, стало наиболее представительным и вышло далеко за региональные рамки. На него собрались 400 ученых, промышленников и предпринимателей из 14 субъектов РФ, а также пяти дружественных стран. Оба дня мероприятия, проходившего на двух площадках — в актовом зале культурно-выставочного комплекса «Синара-Центр» и Института физики металлов УрО РАН — открылись вручением очередных высоких наград в связи с академическим юбилеем.

Программу форума открыл обзорный доклад вице-президента РАН, председателя ее Уральского отделения академика Виктора Руденко о направлениях деятельности и перспективах УрО РАН.

Собственно научная часть программы форума — это 23 доклада по самому широкому спектру тем. Это огромный объем высокопрофессиональной информации с историей вопроса, свежими результатами, представленный, по возможности, как рекомендовали организаторы, в доступной форме, понятной не только узким специалистам. Председатель Объединенного ученого совета по химическим наукам УрО РАН академик Валерий Чарушин, отметив, что Россия всегда была крупнейшей химической державой, остановился на достижениях уральских химиков-органиков в области тонкого органического синтеза, который по праву называют искусством.

Визитной карточкой научной школы, основанной академиками И.Я. Постовским и О.Н. Чупахиным, стали реакции прямого нуклеофильного замещения водорода — C-H функционализация.

Суперкомпьютерные технологии сегодня — это инструмент обеспечения конкурентоспособности в любой отрасли промышленности, в фундаментальной науке, в бизнесе, в культурной сфере (например, в кинематографе, в анимации), подчеркнул директор Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова, член-корреспондент РАН Владимир Воеводин. В его докладе шла речь о сложных вопросах развития и использования суперкомпьютерных систем с высокой степенью параллелизма, эффективность которых зависит от выбора метода, алгоритма и технологий программирования, структуры программного обеспечения, причем суперкомпьютерная архитектура всегда создается под конкретные задачи.

Нынешняя экспансия вирусов — социально-природная проблема планетарного характера, это стало особенно очевидно после пандемии коронавируса, убежден научный руководитель Института иммунологии и физиологии УрО РАН, президент РНОИ академик Валерий Черешнев.

Докладчик остановился также на проблемах, возникающих в ходе лечения ВИЧ-инфекции и вкладе пермских микробиологов в их решение, и, конечно же, уделил внимание «магическим» датам — 300-летию РАН и недавним 300-летним юбилеям Перми и Екатеринбурга, сделав короткий, но увлекательный экскурс в историю этих городов и биографию одного из их основателей Василия Татищева.

Доклад главного ученого секретаря УрО РАН, зав. отделом материаловедения Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН члена-корреспондента Алексея Макарова был посвящен достижениям уральской школы металловедения, в том числе в области трибологии — науки о процессах трения и изнашивания материалов.

Главный врач Федерального центра нейрохирургии (Тюмень) член-корреспондент Альберт Суфиянов рассказал аудитории о бесценности человеческого мозга — одного из немногих органов, совсем не поддающихся трансплантации. Докладчик подчеркнул: на базе высокотехнологичной нейропрактики, находящейся на стыке тотальной цифровизации, «компьютерного зрения» и искусственного интеллекта, органично развиваются нейронаука и нейрообразование.

Об исследовании закономерностей конвекции, переноса тепла за счет движения жидкостей и газов, доложил заведующий лабораторией турбулентности Института механики сплошных сред УрО РАН (Пермь) доктор физико-математических наук Андрей Сухановский.

Комплексная работа по изучению языков, фольклора и литературы народов Сибири и Дальнего Востока ведется в Институте филологии Сибирского отделения РАН (Новосибирск). Его директор член-корреспондент Игорь Силантьев особо отметил достижения коллектива в области экспериментальной фонетики, где ученым удалось интегрировать методы лингвистики и естественных наук. Работа артикуляционных органов носителей сибирских языков исследуется с помощью томографии, УЗИ и различных датчиков. Развиваются в институте и более традиционные для филологов направления, например, создание различных словарей, собиране и издание фольклорных текстов.

За последние 30 лет современная медицина в общемировом масштабе прибавила всего 6 дополнительных лет к ожидаемой продолжительности здоровой жизни человека, при этом потенциал долголетия гораздо больше, уверен заведующий лабораторией геропротекторных и радиопротекторных технологий Института биологии Коми научного центра УрО РАН член-корреспондент Алексей Москалев.

Москалев с коллегами исследует на модельных организмах молекулярно-генетические механизмы старения, чтобы понять, как можно воздействовать на этот процесс так же эффективно, как и природа.

Президент Свердловского областного Союза промышленников и предпринимателей доктор экономических наук Дмитрий Пумпянский рассказал о становлении трубного производства в России, которая стала мировым лидером в этой отрасли благодаря инвестиционным проектам и научным разработкам, и представил комплекс новых технологий и материалов для металлургии. Разработаны стали с уникально низким содержанием примесей, создан собственный марочник сталей и сплавов, и налажено массовое производство высокопрочных труб, стойких к разрушению при экстремально низких температурах и в агрессивных средах.

По убеждению директора Музея антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН — Кунсткамеры (Санкт-Петербург) члена-корреспондента Андрея Головнева, много лет проработавшего в Институте истории и археологии УрО РАН, Россия должна позиционировать себя как самая северная в мире страна, каковой и является.

В докладе главного научного сотрудника Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта члена-корреспондента РАН Валентина Михайлова рассматривались методы спутниковой радарной интерферометрии, которые применяются для мониторинга смещений над горными выработками, на нефтегазовых месторождениях, в областях землетрясений, на вулканах, оползневых склонах и для решения многих других инженерно-геологических задач.

Директор ФИЦ комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН член-корреспондент Иван Болотов сделал обзорный доклад о происхождении циркумполярного арктического биома, сформировавшегося на рубеже плиоцена и плейстоцена, около 2,6 млн лет назад.

Доклад директора Центра социально-экономических исследований Уральского института управления РАНХиГС члена-корреспондента РАН Евгения Попова был посвящен эконотронике — разделу экономики о динамике развития институтов взаимодействия между экономическими агентами и обществом посредством цифровых технологий.

В докладе заведующего кафедрой кардиологии и кардиохирургии Тюменского государственного медицинского университета члена-корреспондента РАН Сергея Шалаева шла речь о роли патологии и дисфункции почек в реализации сердечно-сосудистых рисков и о «вкладе» самих сердечно-сосудистых заболеваний в добавленную патологию почек. На материале исследований, основанных на наблюдении более тысячи пациентов, оценивались клиническая значимость и возможности профилактики перехода острого повреждения почек в хроническую форму у больных острыми коронарными синдромами.

Директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН доктор химических наук Светлана Рубцова отметила, что ее родной регион известен своими лесами и развитой деревообрабатывающей промышленностью, которая на деле использует лишь 40 % биомассы вырубаемых деревьев. Из древесной зелени, составляющей значительную часть отходов производства, можно выделять полезные вещества с помощью разработанной химиками экологически безопасной технологии. Полученные соединения можно применять при разработке БАДов и косметики, сорбционных и радиопротекторных средств, фармакологических субстанций, препаратов для агрономии, кормовых добавок для животных и птиц.

Об исследованиях и разработках подведомственных организаций рассказала заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси доктор технических наук Татьяна Талако.

Ведущий научный сотрудник Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (Пермь) доктор биологических наук Светлана Заморина посвятила свой доклад возможности использования графена в фототермической терапии рака, при которой в злокачественные клетки внедряется вещество, а оно под действием лазера или инфракрасного излучения нагревается и разрушает окружающие его онкоциты.

Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики оценивает гидрологический режим и водность рек страны с учетом изменений климата, ведет мониторинг прорывоопасности высокогорных озер и уровня воды в Иссык-Куле, исследует гидроэнергетический потенциал различных водотоков, дает рекомендации по селезащите, а также разрабатывает геоинформационные системы и схемы управления подземными водами для питьевого водоснабжения. Эти направления научной работы института кратко представила его сотрудница — заведующая лабораторией горных экосистем кандидат географических наук Гулайым Донбаева.

Главный научный сотрудник Института электрофизики УрО РАН доктор физико-математических наук Владимир Овчинников рассказал об исследовании воздействия на металлы, сплавы и конструкционные материалы мощных пучков заряженных частиц, которые можно генерировать с помощью разрабатываемой в институте ускорительной техники.

Образованная женщина — мощный ресурс для развития любого общества, считает руководитель Отделения общественно-гуманитарных наук Академии наук Республики Узбекистан доктор исторических наук Нодира Мустафаева. Сегодня важное направление в государственной политике этой центральноазиатской страны — достижение гендерного равенства, обеспечение прав, свобод и законных интересов представительниц прекрасного пола.

Непрекращающийся рост использования антибиотиков в мировом животноводстве вызывает серьезную озабоченность из-за успешной адаптации бактерий в организмах животных, констатировала главный научный сотрудник Уральского научно-исследовательского ветеринарного института член-корреспондент Ирина Шкуратова.

Директор Института экологии растений и животных УрО РАН доктор биологических наук Михаил Головатин в своем докладе отметил, что в условиях изменения климата и усиления антропогенного воздействия на природу в Уральском регионе происходит непрерывное изменение видового разнообразия растительного и животного мира.

В первый день собрания в екатеринбургском представительстве ТАСС прошла пресс-конференция с участием зампреда УрО РАН, председателя Объединенного ученого совета по наукам о Земле академика Александра Баряха, директора Института математики и механики академика Николая Лукоянова, директора Института электрофизики УрО РАН члена-корреспондента Станислава Чайковского, академиком Валерия Чарушина и Валерия Черешнева. Они рассказали журналистам о ходе форума, актуальных прикладных исследованиях и разработках в своих областях. Было много вопросов, конференция привлекла живое внимание СМИ и получила хороший резонанс.

Во второй день форума состоялся круглый стол на тему «Историческая правда и коллективная память: механизмы регулирования российской исторической политики», организованный совместно Институтом философии и права УрО РАН и Советом молодых ученых УрО РАН. Он открылся теоретико-методологическим докладом кандидата политологии Натальи Панкевич «Гуманитарное измерение государственного суверенитета: политика памяти и политика ценностей в постсоветском пространстве», в котором она рассмотрела поле возможностей конструирования национальной идентичности стран Восточной Европы и постсоветского пространства (редакция планирует более подробно остановиться на содержании этого доклада в одном из ближайших номеров «НУ»). В выступлении доктора политических наук Оксаны Головашиной ««Память в законе»: нормативное регулирование исторической политики в сети Интернет» речь шла о существующих законодательных практиках регулирования отношения к прошлому, в частности, о том, что сегодня любые высказывания в интернете обладают «презумпцией публичности» и, следовательно, подпадают под соответствующие законодательные нормы. Кандидат юридических наук Валентина Руденко в своем докладе «Историческая правда в системе конституционно-правовых ценностей Российской Федерации» рассмотрела правовое оформление исторической правды, которое эта категория получила в ходе конституционной реформы 2020 г., а также вопросы формирования правовых механизмов защиты исторической правды и противодействия фальсификации истории России. В оживленном обсуждении участники обозначили целый ряд проблем, которые пока не имеют общепринятых ответов и подчеркнули роль экспертного сообщества в их решении.

Подводя итоги собрания, академик Руденко поблагодарил его спонсоров, прежде всего генеральных и официальных — Свердловский областной Союз промышленников и предпринимателей, публичное акционерное общество «Уралкалий», Горный институт УрО РАН, научно-производственное объединение «Аэросфера» (все Пермь), Государственный ракетный центр имени академика Макеева (Миасс), Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН (Екатеринбург), еще два десятка научных учреждений и высокотехнологичных предприятий, живо откликнувшихся на предложение вложиться в мероприятие. Прекрасно поработали над организацией мероприятия сотрудники аппарата Уральского отделения. Эти два насыщенных дня убедительно показали: средства и силы вложены эффективно, хотя в конкретных суммах эффект этот не выражается. По мнению участников, гостей, среди которых было немало экспертов высшей квалификации, уровень многих сообщений соответствовал самой высокой международной планке и иногда даже ее превосходил. Приглашенные студенты, аспиранты, молодые преподаватели, научные работники, представители реального сектора экономики получили отличную возможность приобщиться к этому уровню, поучаствовать в высокопрофессиональных дискуссиях. Ученые разных специализаций стали лучше понимать друг друга, чтобы искать новые общие точки роста. Главная, объединительная формула форума сработала, и она наверняка принесет конкретные плоды, что крайне важно для России в эти сложные времена.

Информация подготовлена по материалам сайта [www.uran.ru](http://www.uran.ru)