

**СОДЕРЖАНИЕ****Акустические методы**

- Е.Г. Базулин, И.В. Евсеев.** Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле..... 3
- Е.Г. Базулин, А.Х. Вopilкин, Д.С. Тихонов.** Определение координат отражателей в плоскости, перпендикулярной сварному соединению, по эхосигналам, измеренным преобразователями по схеме TOFD ..... 17
- Н.П. Алешин, Н.В. Крысько, С.В. Скрынников, А.Г. Кусый.** Исследование выявляемости поверхностных плоскостных дефектов ультразвуковым методом с применением волн Рэлея ..... 26

**Тепловые методы**

- С.В. Дубинский, Е.А. Казьмин, И.Е. Ковалев, А.Б. Корнилов, Г.А. Корнилов, В.М. Костенко, А.А. Чернявский.** Развитие вибротермографии как метода неразрушающего контроля изделий из полимерных конструкционных материалов с использованием принудительных механических вибраций ..... 35
- Г.Т. Весала, В.С. Гали, А. Виджая Лакшми, Р.Б. Найк.** Сочетание вручную построенных признаков и признаков глубоких сетей для автоматического обнаружения дефектов в процессе визуализации квадратичной частотно-модулированной тепловой волны ..... 46

**Радиоволновые методы**

- А.И. Казьмин, П.А. Федюнин, Д.П. Федюнин.** Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн ..... 57



## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ PLANE WAVE IMAGING В УЛЬТРАЗВУКОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

© 2021 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, И.В. Евсеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,  
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

<sup>2</sup>Московский Энергетический Институт (НИИ),  
Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

\*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 30.11.2020; после доработки 22.03.2021

Принять к публикации 09.04.2021

Восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировка антенной (ЦФА) наряду с такими достоинствами, как высокая разрешающая способность на всей области восстановления изображения отражателей, возможностью получать изображения с учетом отражения и трансформации типа волны от границ объекта контроля, имеет несколько недостатков: большой объем измеренных эхосигналов, большое время восстановления изображения и недостаточно высокая энергия ультразвуковых волн, вводимых в объект контроля. Метод Plane Wave Imaging (PWI) позволяет совместить преимущества технологии фазированных антенных решеток (ФАР) и ЦФА-технологии. В режиме PWI при излучении плоской волны работают все элементы антенной решетки (АР) (как в ФАР-режиме), что позволяет увеличить вводимую в объект контроля энергию, а регистрируются эхосигналы всеми элементами АР (как в режиме ЦФА). Изображения отражателей восстанавливаются методом комбинационного SAFT. Для получения изображения можно использовать число излученных плоских волн меньше количества элементов антенной решетки, что уменьшает объем измеренных эхосигналов. Перевод расчетов в область пространственных секторов позволяет повысить скорость восстановления изображения отражателей. Модельные эксперименты показали положительные и отрицательные стороны получения изображений отражателей методом PWI по сравнению с методом ЦФА как для случая использования призмы, так и без призмы.

*Ключевые слова:* ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной, Plane Wave Imaging.

DOI: 10.31857/S0130308221060014

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о внутренней структуре промышленных объектов является актуальной проблемой и относится к классу обратных задач рассеяния, которая состоит в определении количественных характеристик несплошностей на основе наблюдения за рассеянным облучающим полем. Для неразрушающего контроля важнейшей задачей является классификация обнаруженных отражателей, определение их размеров и координат залегания. Полученная информация может быть использована специалистами по прочностным расчетам для оценки эксплуатационного ресурса объекта контроля.

В настоящее время широко используется технология ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезоэлектрических антенных решеток (АР), излучающих и принимающих волны в исследуемом объекте. Широкое применение в практике УЗК нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей.

Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC) [4]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется выстрел, а набор эхосигналов по всем выстрелам будем называть залп. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей. Однако метод ЦФА имеет недостатки, а первый заключается в том, что регистрируется большой объем эхосигналов, который растет квадратично количеству ее элементов  $N_e$ . Для линейной 32-элементной АР количество измеренных эхосигналов (залп) равно  $N_e^2 =$

= 1024, а для 64-элементной — уже 4096. Вторым недостатком ЦФА — это небольшая акустическая энергия, которая вводится в объект контроля каждым элементом АР без фокусировки. Третий недостаток — большое время обработки восстановления изображения по эхосигналам методом C-SAFТ во временной области. Отметим еще одно обстоятельство — для повышения скорости сканирования при автоматизированном контроле очень важным параметром является скорость регистрации эхосигналов, так как восстановить изображение отражателей можно на этапе подготовки оператором протокола контроля. Предположим, что цикл измерения эхосигналов в режиме FMC равен 600 мкс. Если нужно проводить измерения эхосигналов с шагом 2 мм, то скорость сканирования будет достаточно высокой — около 50 мм/мкс. Но есть еще одна проблема — при непрерывном, а не шаговом, движении антенной решетки целесообразно проводить регистрацию всех выстрелов в «точке», то есть на интервале, меньшем хотя бы четверти длины волны. Если перемещать антенную решетку со скоростью 50 мм/мкс, то при упомянутом времени одного такта измерения эхосигналов залпа «размажется» примерно на 1 мм, что соизмеримо с длиной продольной волны. Для измерения в «точке» скорость сканирования придется уменьшить в 4 раза, снизив ее до 13 мм/с. Это невысокая скорость проведения контроля. Решить задачу учета измерений выстрелов не в одной точке можно и на этапе восстановления изображения, усложнив алгоритм расчета задержек, рассчитывая их для каждого положения решетки при измерении эхосигналов выстрела. Поэтому задача уменьшения времени регистрации эхосигналов и повышение скорости восстановления качественного изображения отражателей является актуальной проблемой.

В статье [6] приведен краткий обзор методов повышения скорости регистрации эхосигналов с помощью АР, поэтому сразу перейдем к рассмотрению режима Plane Wave Imaging (PWI) [7—9], который был разработан для регистрации эхосигналов АР с большим количеством элементов. В объект контроля (ОК) (как и в ФАР-технологии) всеми элементами АР излучаются плоская волна с заданным углом, а регистрация эхосигналов происходит (как в режиме FMC) всеми элементами АР. По эхосигналам измеренного выстрела восстанавливается изображение отражателей. Для повышения качества изображения в ОК последовательно излучается несколько плоских волн  $N_{pw}$ , и все парциальные изображения суммируются. Режим PWI обладает рядом достоинств. Так как для регистрации можно использовать порядка 10 плоских волн ( $N_{pw} = 10$ ), то скорость регистрации эхосигналов повышается тем больше, в сравнении с режимом FMC, чем больше число элементов в АР. Для режима FMC для  $N_e = 64$  число измеренных эхосигналов равно  $N_e^2 = 4096$ , а для режима PWI —  $N_e N_{pw} = 640$ , и скорость их регистрации возрастет в 6,4 раза. Для АР из 128 элементов выигрыш будет еще больше. Так как плоская волна формируется всеми элементами АР, то акустическая энергия, передаваемая в среду, будет больше чем для режима FMC. Поэтому режим PWI более помехозащищен при работе с ОК с большим поглощением.

Для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным как в режиме FMC, так и в режиме PWI, расчеты из временной области можно перенести в область пространственных частот [9, 10]. Так как в этом случае основной операцией становится преобразование Фурье, которое можно выполнить по технологии быстрого преобразования Фурье, то скорость восстановления изображения может быть значительно повышена.

## 2. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ

### 2.1. Режим FMC

Для простоты будем рассматривать задачу в двумерном случае. Для описания геометрии задачи введем систему координат  $(x, z)$ , в которой будут проводиться расчеты, и систему координат  $(x_r, z_r)$ , связанную с АР и линией, по которой она может сканировать. Система координат  $(x_r, z_r)$  удалена от центра  $(x, z)$  на расстояние  $R$  и может быть еще повернута на произвольный угол  $\alpha$ . Мы ограничимся случаем  $\alpha = 0$ . Отражатели могут находиться в области  $\mathbf{r} \in S$  (рис. 1). АР на рис. 1 схематически показана с протектором. Отметим, что она может быть смещена по оси  $x_r$ . Излучающей элемент АР описывается вектором  $\mathbf{r}_p$ , а принимающий элемент —  $\mathbf{r}_r$ . В режиме FMC первый элемент АР в точке  $\mathbf{r}_{t,1}$  излучает зондирующий сигнал (показан полукругностями красного цвета), а все элементы антенной решетки принимают эхосигналы (полукругностями зеленого цвета). Набор измеренных эхосигналов называется первым выстрелом. Эта процедура повторяется для всех элементов АР. Облучение отражателей, отмеченных на рис. 1 звездами разных цветов, в целом равноправно, так как на них падает «цилиндрическая» волна, что учитывается в алгоритме восстановления.



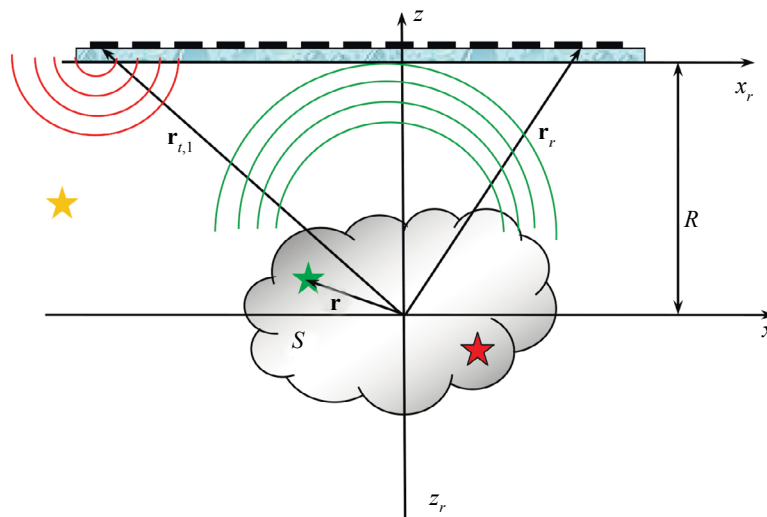


Рис. 1. Описание режима FMC без призмы.

Как упоминалось ранее, измеренные  $N_e^2$  эхосигналов могут иметь очень большой объем (больше 5 Мбайт). Их передача между модулями ЦФА-дефектоскопа может потребовать значительного времени, что уменьшит скорость сканирования АР и, следовательно, скорость проведения контроля. А низкая скорость контроля может нести угрозу для оператора при контроле оборудования атомных электростанций, где время нахождения в условиях повышенной радиации должно быть минимизировано. Высокая скорость регистрации эхосигналов очень важна и в медицинской диагностике, в которой используются АР с числом элементов 128 и более. Желательно провести измерения эхосигналов пока внутренние органы не изменили своего положения в силу естественных процессов, происходящих в живом организме.

## 2.2. Режим PWI

Описание геометрии измерений в режиме PWI совпадает с описанной в разделе 2.1. В объект контроля (ОК) (как и в ФАР-технологии) всеми элементами АР излучается плоская волна с волновым вектором  $\mathbf{k}_p$ , которая на рис. 2 показана прямыми линиями красного цвета [4, 8, 9]. Регистрация эхосигналов (схематически показаны полуокружностями зеленого цвета) первого выстрела происходит (как в режиме FMC) всеми элементами АР. Для повышения качества изображения в ОК

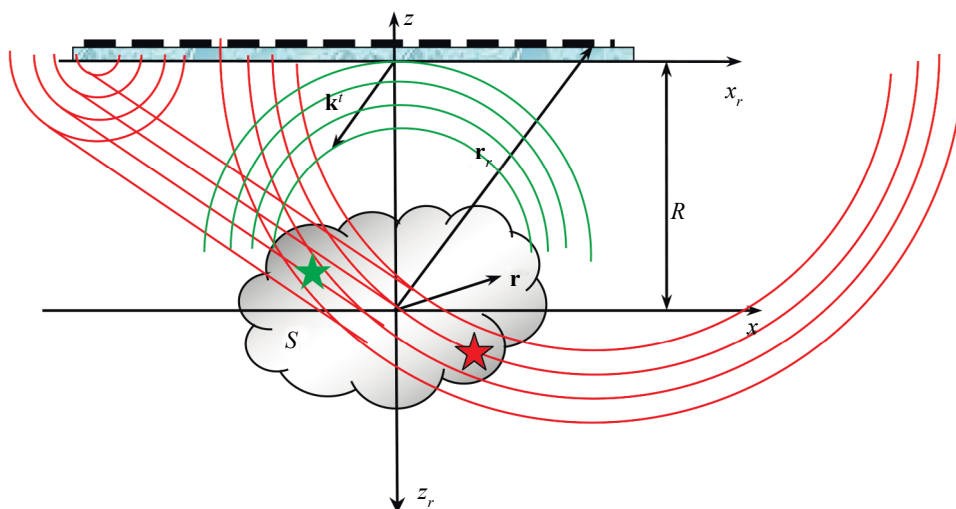


Рис. 2. Описание режима PWI без призмы.

последовательно излучаются несколько плоских волн  $N_{pw}$ , то есть регистрируются  $N_{pw}$  выстрелов. Так как плоская волна формируется в ограниченном объеме пространства и происходит обязательное излучение краевых волн, то у режима PWI есть свои ограничения. Рассмотрим отражатели, расположенные, как описано в разделе 2.1, в удаленных местах области  $S$ . Для данного угла ввода только отражатель, отмеченный звездой зеленого цвета, будет освещен плоской волной, а отражатель, отмеченный звездой красного цвета с границей черного цвета, будет освещен «цилиндрической» краевой волной. Поэтому, в отличие от режима FMC, изображение этих двух отражателей будет формироваться по-разному — отражатель справа будет восстановлен расфокусированным и смещенным от своего истинного положения. По этой причине для режима PWI очень важным является выбор ОВИ, в которой могут находиться отражатели, и набора углов плоских волн, который не обязательно должен быть эквидистантным.

В заключении это раздела можно сделать вывод, что работа в режиме PWI объединяет в себе лучшие стороны ФАР- и ЦФА-технологии. Излучение происходит всеми элементами АР (как в ФАР-режиме), что обеспечивает ввод в объект контроля большой энергии. По зарегистрированным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом C-SAFT, что позволяет получать изображение с высоким разрешением в пределах всей ОВИ и без смещения бликов от их истинных положений [3].

### 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

#### 3.1. Во временной области (корреляционный и DAS)

По измеренным эхосигналам  $p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t)$  изображение отражателей во временной области можно восстановить методом C-SAFT [11]:

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; as) = \int_{S_i} \int_{S_r} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p; as) + t_{max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_p, \quad (1)$$

где  $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_i; as)$  — время пробега импульса от излучателя до точки  $\mathbf{r}_i$  и к приемнику для заданной акустической схемы  $as$ ;  $t_{max}$  — время нарастания импульса;  $S_i$  и  $S_r$  — области излучения и приема. Под акустической схемой, которую обозначим как  $as$ , будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до приемника при отражении от неровных границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Обычно эхосигналы  $p(\mathbf{r}_p, t)$  из действительного формата с помощью преобразования Гильберта переводят в комплексный формат. В зарубежной литературе используются термины Delay And Sum (DAS) [12] или Total Focusing Method (TFM) [4].

Для расчета времени пробега импульса по лучевой траектории можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [13] или методом трассировки [14]. Оба этих метода имеют свои достоинства и недостатки. Отметим только, что расчет траекторий по принципу Ферма для случая неровных границ ОК может привести к наличию нескольких максимумов целевой функции в виде времени распространения импульса вдоль луча, то есть к нескольким траекториям, по которым может распространяться импульс. А это, в свою очередь, сильно усложнит и замедлит программную реализацию расчета времени задержки на основе принцип Ферма.

Если АР перемещается  $N_w$  раз по поверхности объекта контроля, регистрируя эхосигналы в режиме двойного сканирования в каждой точке, то такой режим назовем режимом тройного сканирования. Когерентная сумма парциальных изображений, восстановленных для каждого положения АР согласно (1), позволит получить объединенное (итоговое) изображение отражателей с более высокой фронтальной разрешающей способностью, например, за счет когерентного сложения по формуле:

$$I(\mathbf{r}_i; as) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as) \right|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}_w$  — вектор, определяющий положение АР на поверхности объекта контроля.

Расчет по формуле (1), даже в случае, если задержки  $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_i; as)$  уже рассчитаны, требует большого количества операций. Однако эти расчеты хорошо распараллеливаются и для их ускоре-

ния можно воспользоваться технологией NVIDIA CUDA™ [15] или перевести расчеты на аппаратный уровень с помощью технологии ПЛИС [16].

Расчет задержек для режима FMC и PWI для однородных изотропных сред с установкой AP на призму достаточно простая задача и рассмотрена во множестве работ [9, 17] как для случая применения принципа Ферма, так и для случая использования принципа трассировки.

### 3.2. В частотной области

Для случая изотропной среды, в которой звук распространяется со скоростью  $c$ , в гармоническом варианте при работе на частоте  $f$  облучающее поле  $p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f)$ , рассеянное  $p(\mathbf{r}_r, f)$  поле и коэффициент рассеяния  $\varepsilon(\mathbf{r})$  связаны уравнением Липмана—Швингера [18, 19], которое в приближении Борна  $p(\mathbf{r}, f) \ll p_i(\mathbf{r}, f)$  имеет вид:

$$p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, f) = \int_S G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r, f) \varepsilon(\mathbf{r}) p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f) d\mathbf{r}. \tag{3}$$

Так как двумерный спектр функции Грина отличен от нуля на окружности радиусом  $k = \sqrt{k_x^2 + k_z^2}$  (окружность показана пунктирной линией на рис. 3) [18], где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda = c/f$  — длина волны, то интегральное уравнение можно решить, переведя расчеты в спектральную плоскость  $(k_x, k_z)$ . Понятно, что от гармонического варианта расчета можно перейти к импульсному и обратно с помощью преобразования Фурье.

Так как при расчетах в спектральном пространстве широко используется преобразования Фурье, выполняемое по технологии быстрого преобразования Фурье, то эти методы могут существенно превосходить в скорости метод обработки во временной области (раздел 3.1).

#### 3.2.1. Режим PWI

На рис. 3 спектр неизвестной функции  $\varepsilon(\mathbf{r})$  обозначен как  $\varepsilon(\mathbf{k})$ , где  $\mathfrak{F}_{xz}$  — двумерное прямое преобразование Фурье. Если в формуле для случая изотропной среды будем считать, что  $p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f) = 1$  (случай пассивной локации), то получается формула двумерной свертки, которая, с учетом свойств спектра функции Грина  $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r, f)$ , позволяет найти значение спектра функции  $\varepsilon(\mathbf{r})$  на окружности радиуса  $k$  по спектру измеренного поля  $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{k}_p, f)$ . Учитывая, что падающее поле имеет вид плоской волны с волновым вектором  $\mathbf{k}_i$ :

$$p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f) = e^{-i\mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}, \tag{4}$$

согласно теореме смещения для преобразования Фурье, область спектра в виде окружности (показана на рис. 3 сплошной линией) сдвинется в спектральном пространстве на  $\mathbf{k}_i$ . Учитывая, что

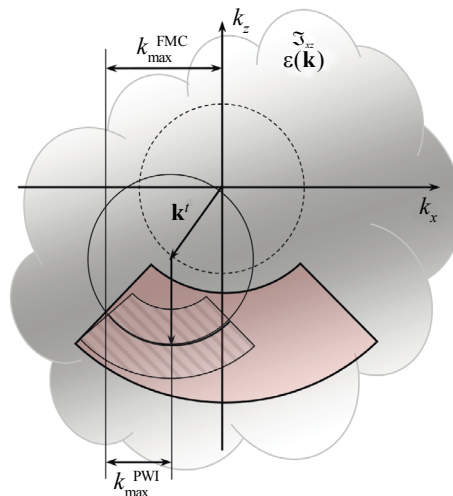


Рис. 3. Обработка в частотной области экосигналов, измеренных в режиме PWI и FMC.

регистрация эхосигналов проводится по одной стороне объекта контроля, элемент АР обладает диаграммой направленности и размеры АР ограничены, удастся получить информацию только о функции  $\varepsilon(\mathbf{k})$  на части окружности, показанной на рис. 3 сплошной толстой линией. Используя  $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{k}_r, f)$  в диапазоне частот  $\Delta f$ , определяемым в первую очередь свойствами АР, можно восстановить спектр неизвестной функции  $\varepsilon(\mathbf{r})$  в пределах сектора (заштрихованная область на рис. 3).

И, наконец, если использовать несколько плоских волн с разными углами наклона, то, используя метод ПСП, можно получить информацию о  $\varepsilon(\mathbf{k})$  в области, схематически показанной на рис. 3 частью кольца красного цвета, с границей, показанной утолщенной линией. Применив к восстановленному спектру операцию обратного двумерного преобразования Фурье  $\mathfrak{F}_{xz}^{-1}$ , можно получить оценку  $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r})$  искомой функции  $\varepsilon(\mathbf{r})$ . Понятно, что чем больше область, в которой удастся восстановить информацию о  $\varepsilon(\mathbf{k})$ , тем точнее оценка изображения отражателя. Для этого нужно пользоваться АР очень больших размеров, элементы которой излучают  $\delta$ -подобные импульсы и имеют равномерную диаграмму направленности. Но и в этом случае удастся восстановить только спектр  $\varepsilon(\mathbf{r})$  только в нижнем полупространстве  $(k_x, k_z)$ .

### 3.2.2. Режим FMC

Если в формулу (3) подставить падающее поле в виде:

$$p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f) = G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f), \quad (5)$$

то выполнив двумерное преобразование Фурье  $\mathfrak{F}_{xz}^{-1}$  по координатам  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{r}_r$ , можно свести задачу к задаче, решенной в разделе 3.2.1:

$$p(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_i, f) = \mathfrak{F}_{xz}^{-1}(p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, f)). \quad (6)$$

Из формулы видно, что мы получили информацию об амплитуде зарегистрированных плоских волн с волновым вектором  $\mathbf{k}_i$  для набора падающих плоских волн  $\mathbf{k}_r$ . То есть в режиме РWІ мы излучаем плоскую волну под выбранным углом, а в режиме FMC с помощью формулы (6) мы получаем подобный набор, но при излучении каждым элементом АР цилиндрической волны.

Поэтому область спектра  $\varepsilon(\mathbf{k})$ , о котором мы получим информацию, будет примерно совпадать с аналогичной областью при выборе нужного диапазона углов в режиме РWІ. Для случая малого уровня шума восстановленные изображения отражателей будут близки для регистрации эхосигналов в режиме РWІ и режиме FMC.

### 3.2.3. Проблема интерполяции

Так как спектр измеренной голограммы определяется на части окружности (см. рис. 3), то для выполнения быстрого двумерного обратного преобразования Фурье нужно рассчитывать спектр в узлах прямоугольной сетки. Интерполяция по ближайшему соседу может приводить к появлению в изображении отражателя ложных бликов большой амплитуды. В статье [20] предложено использовать интерполяцию по четырехточечному шаблону, что более чем на 12 дБ уменьшает уровень интерполяционного шума.

Отметим важный момент! Так как для режима FMC информация по набору падающих плоских волн получается в результате двумерного преобразования Фурье согласно (6), то при грубом шаге между элементами АР (больше чем половина длины волны в ОК) из-за эффекта перекрытия спектров шум интерполяции может иметь высокий уровень. В режиме РWІ плоская волна под заданным направлением формируется реально, поэтому максимальная пространственная частота спектра  $k_{\max}^{\text{PWІ}}$  будет меньше, чем  $k_{\max}^{\text{FMC}}$ , что приведет к уменьшению уровня шума интерполяции из-за уменьшения эффекта перекрытия спектров.

## 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», разработанный и изготавливаемый «Научно-производственным центром неразрушающего контроля «ЭХО+» [21].

### 4.1. Образец Т-Б-39-60-Пл №19200

Образец представляет из себя плексигласовый параллелепипед толщиной 60 мм, в котором сделано шесть боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 1,5 мм, как показано на рис. 4. Для регистрации эхосигналов использовалась АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента 0,55×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм). Эхосигналы для уменьшения уровня белого шума измерялись 25 раз для дальнейшего усреднения.

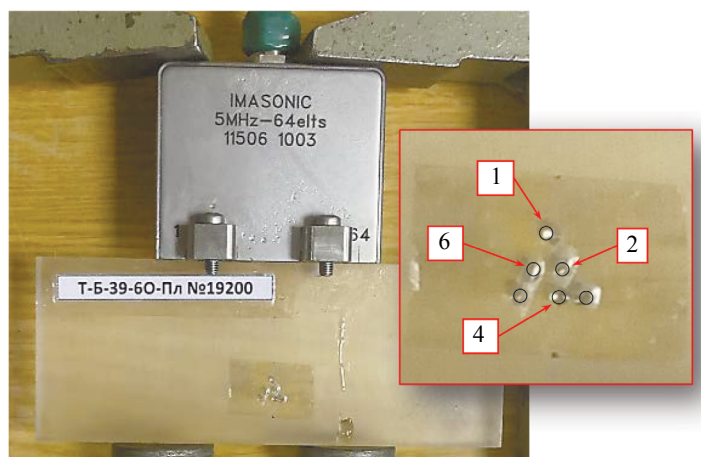


Рис. 4. Фотография образца и используемой АР.

#### 4.1.1. Восстановление изображения во временной области

##### 4.1.1.1. Режим FMC

Коэффициент усиления был равен 45 дБ. На рис. 5а показано ЦФА-изображение, восстановленное по эхосигналам без усреднений. На изображение линиями черного цвета наброшена маска шести БЦО. Блики пяти БЦО уверенно обнаруживаются. Блик 4-го отверстия еле различим, так как он затенен другими БЦО. На изображении, из-за высокого затухания звука в плексигласе, заметен белый шум амплитудой около -20 дБ. Перерасеивание импульсов между БЦО приводит к появлению ложных бликов, с амплитудой порядка -14 дБ. Восстановление ЦФА-изображение по усредненным эхосигналам позволило уменьшить уровень белого шума изображения более, чем на 12 дБ (рис. 5б).

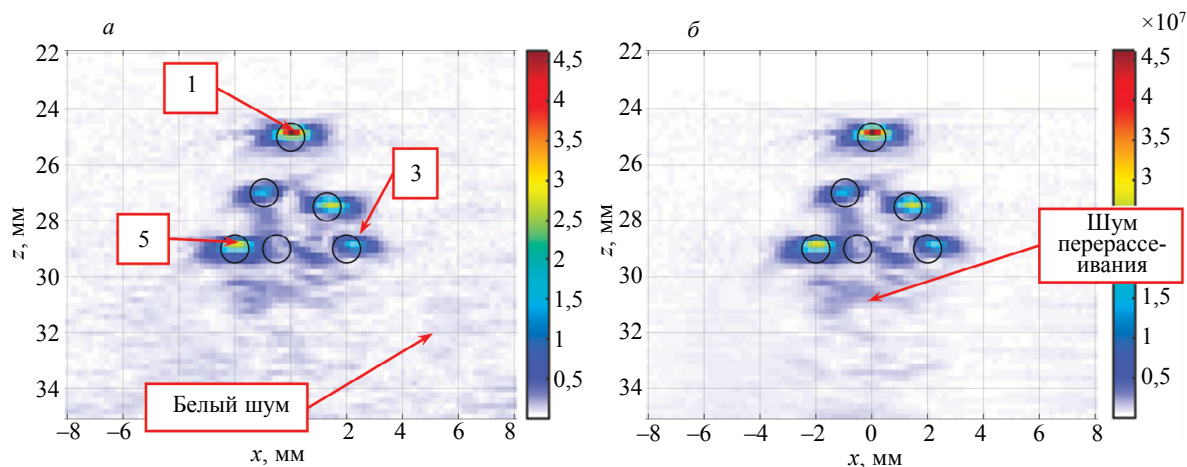


Рис. 5. ЦФА-изображение:  
а — без усреднений эхосигналов; б — с усреднением 25 эхосигналов.

#### 4.1.1.2. Режим PWI

Так как режим PWI позволяет вводить больше энергии в объект контроля, то PWI-C-SAFT-изображение, полученное по эхосигналам без усреднений (рис. 6а), практически не отличаются от ЦФА-изображения, полученного с усреднением 25 залпов эхосигналов (см. рис. 5б). Коэффициент усиления был уменьшен до 30 дБ. Это привело к тому, что изображение, восстановленное по 25 усредненным залпам (см. рис. 6а), неотличимо от изображения без усреднения эхосигналов. Для измерения эхосигналов использовалась 21 плоская волна с углами от  $-20$  до  $20$  град с шагом в  $2$  град. Учитывая, что в режиме PWI использовалась 21 плоская волна для измерения одного залпа вместо измерения 25 залпов из 64 выстрелов в режиме FMC, то суммарный выигрыш в скорости регистрации эхосигналов для восстановления практически одинаковых изображений (рис. 5б и рис. 6а) достигает значения 76!

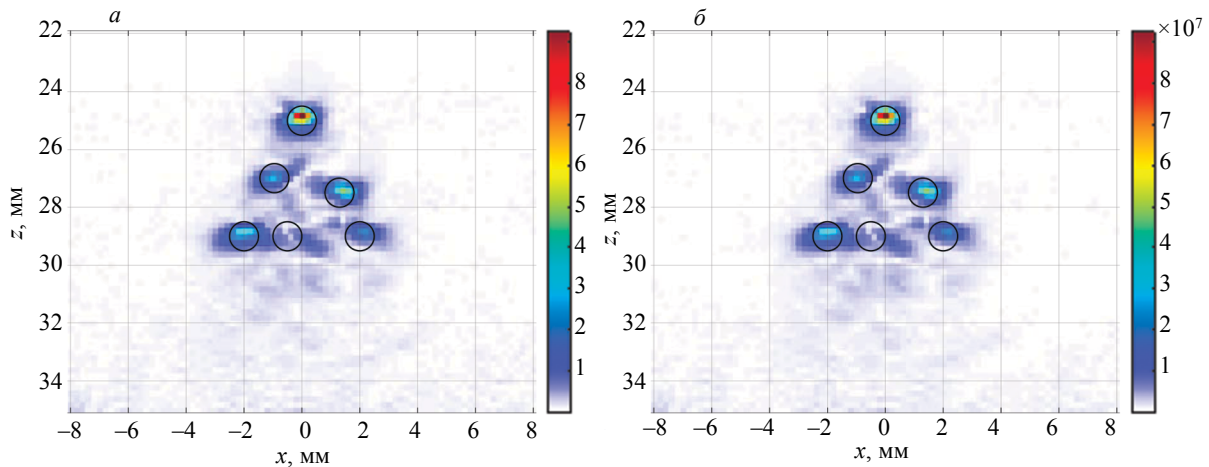


Рис. 6. PWI-C-SAFT-изображение:  
а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям.

Если использовать 13 плоских волн с углами падения от  $-24$  до  $24$  град через  $4$  град, то время регистрации эхосигналов, по которым было получено изображение на рис. 5б, уменьшится в 123 раза. Использование 7 плоских волн с углами падения от  $-24$  до  $24$  град через  $8$  град позволит повысить скорость регистрации эхосигналов в 228 раз. Восстановленные PWI-C-SAFT-изображения будут очень близки к ЦФА-изображению на рис. 5б. Так, возник лишь шум амплитудой  $-20$  дБ и  $-25$  дБ, а разрешающая способность и амплитуды бликов изменились несущественно.

### 4.1.2. Восстановление изображения методом ПСП

#### 4.1.2.1. Режим FMC

На рис. 7а показано FMC-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу (раздел 3.2.3). Амплитуда бликов шума интерполяции соизмерима с амплитудой бликов БЦО с номерами 4, 5 и 6. На рис. 7б показано FMC-ПСП-изображение при интерполяции по четырем взвешенным точкам, что уменьшило амплитуду ложных бликов более, чем на 25 дБ. Изображение на рис. 7б очень близко к изображению на рис. 5б или рис. 6а. Восстановления FMC-ПСП-изображения происходило быстрее примерно в пять раз по сравнению с восстановлением ЦФА-изображения.

#### 4.1.2.2. Режим PWI

На рис. 8а приведено PWI-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу, а рис. 8б — при интерполяции по четырем взвешенным точкам. Шум интерполяции практически одинаков на этих изображениях по причине, рассмотренной в разделе 3.2.3. PWI-ПСП-изображения близки к ЦФА-изображению при интерполяции по четырем точкам (см. рис. 7б).

## 4.2. Образец СО-1

Для восстановления изображения восьми пронумерованных боковых цилиндрических отверстий в образце СО-1 (рис. 9) использовалась та же АР, что и в разделе 4.1. Эхосигналы для уменьшения уровня белого шума измерялись 25 раз для дальнейшего усреднения.



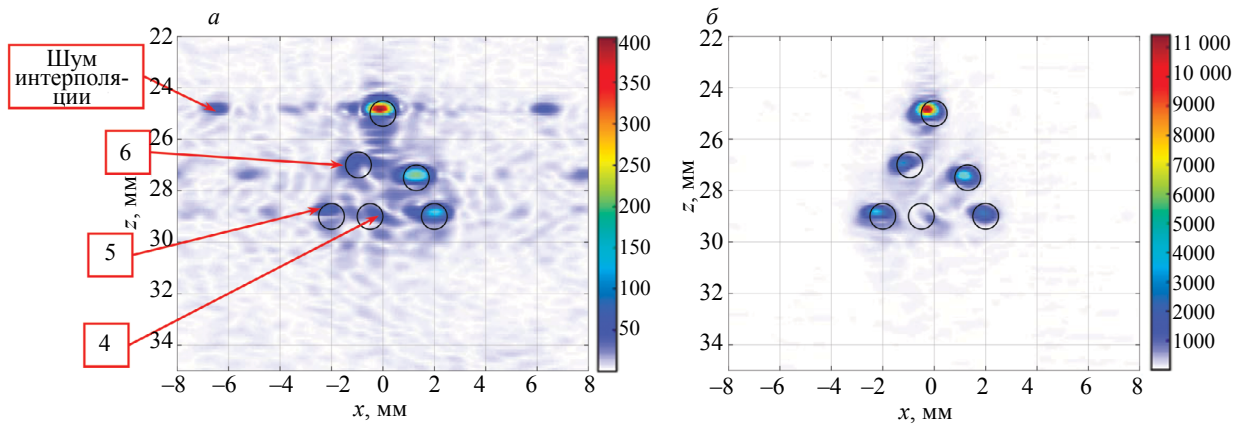


Рис. 7. FMC-ПСП-изображение с интерполяцией: *a* — по ближайшему соседу; *б* — по четырем взвешенным точкам.

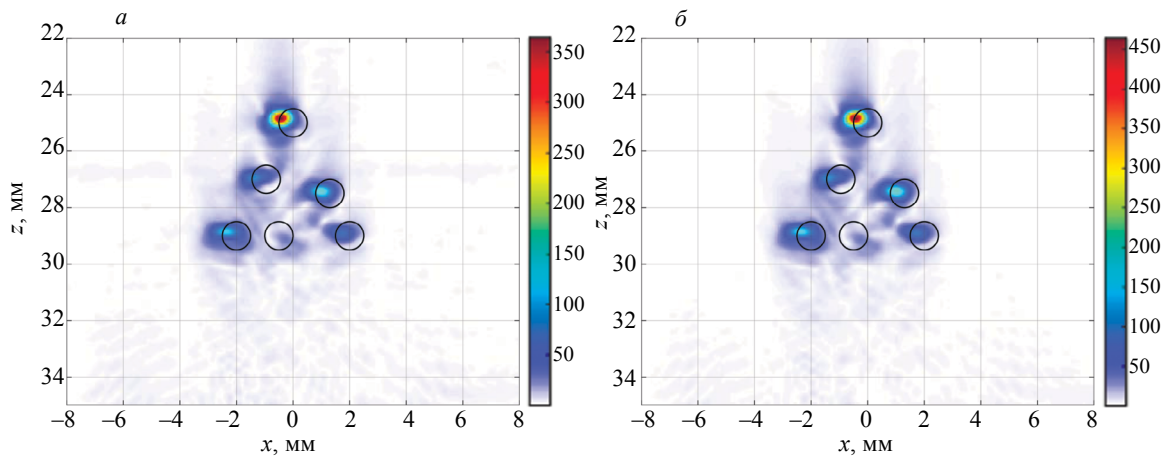


Рис. 8. PWI-ПСП-изображение с интерполяцией: *a* — по ближайшему соседу; *б* — по четырем взвешенным точкам.

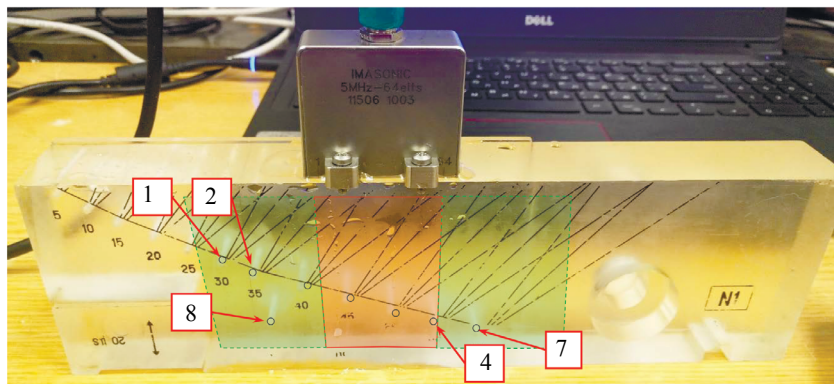


Рис. 9. Фотография образца СО-1 и используемой АР.

#### 4.2.1. Восстановление изображения во времени

##### 4.2.1.1. Режим FMC

На рис. 10а показано ЦФА-изображение, восстановленное по экосигналам без усреднения. На изображение линиями черного цвета наброшена маска БЦО на прямом луче и при отражении от дна. Блики всех БЦО за исключением седьмого уверенно обнаруживаются на прямом луче. Блик БЦО 7

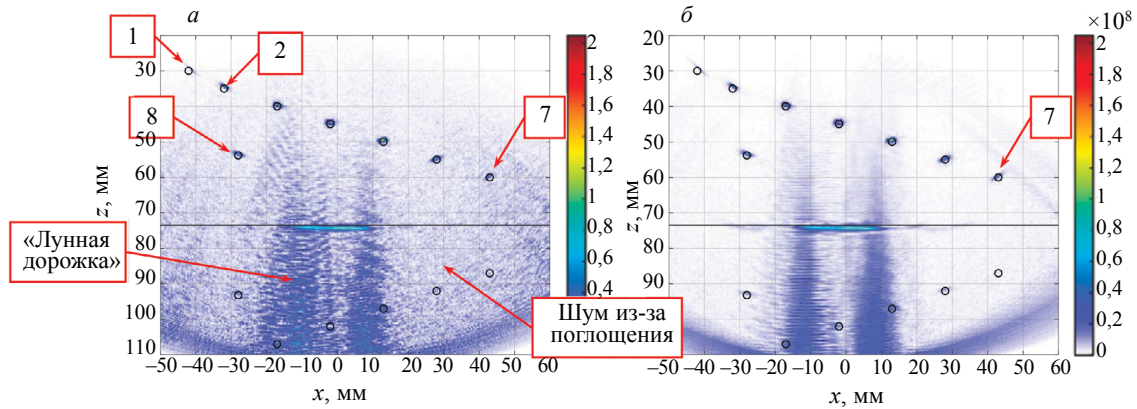


Рис. 10. ЦФА-изображение:  
 а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям.

из-за его большого удаления от АР слабо различим, так как его амплитуда превышает уровень шума примерно на 6 дБ. Усиление в 50 дБ увеличило амплитуду синфазной помехи между приемными каналами дефектоскопа, в результате чего на изображении появился шум, названный «лунная дорожка». Уровень белого шума ЦФА-изображение, восстановленное по усредненным эхосигналам, уменьшился более, чем на 12 дБ (рис. 10б), что позволило уверенно обнаружить БЦО номер 7. Более того, стали заметны блики БЦО, сформированные на однократно отраженных от дна лучах.

#### 4.2.1.2. Режим PWI

На рис. 11а показано изображение, восстановленное по эхосигналам без усреднений, а на рис. 11б — с усреднением. Оба изображения принципиально отличаются друг от друга, так как режим PWI позволяет вводить больше энергии в объект контроля. А так как уровень усиления был уменьшен на 15 дБ, то при сравнении с рис. 10а видно, что амплитуда «лунной дорожки» уменьшилась более, чем на 25 дБ. Так как PWI-C-SAFT-изображение восстановлено при излучении 21 плоской волны с углом падения от  $-20$  до  $20$  град с шагом 2 град, а FMC-изображение при излучении 64 выстрелов и 25 измерениях для усреднения, то это привело к ускорению регистрации эхосигналов в режиме PWI в 76 раз, так же как и в разделе 4.1.1.2. Блики БЦО, сформированные эхосигналами, однократно отраженными от дна (см. рис. 11а), не удастся обнаружить, так как их амплитуда сравнима с уровнем шума из-за поглощения, но после усреднения эхосигналов на изображении на рис. 11б эти блики хорошо заметны из-за повышения отношения сигнал/шум.

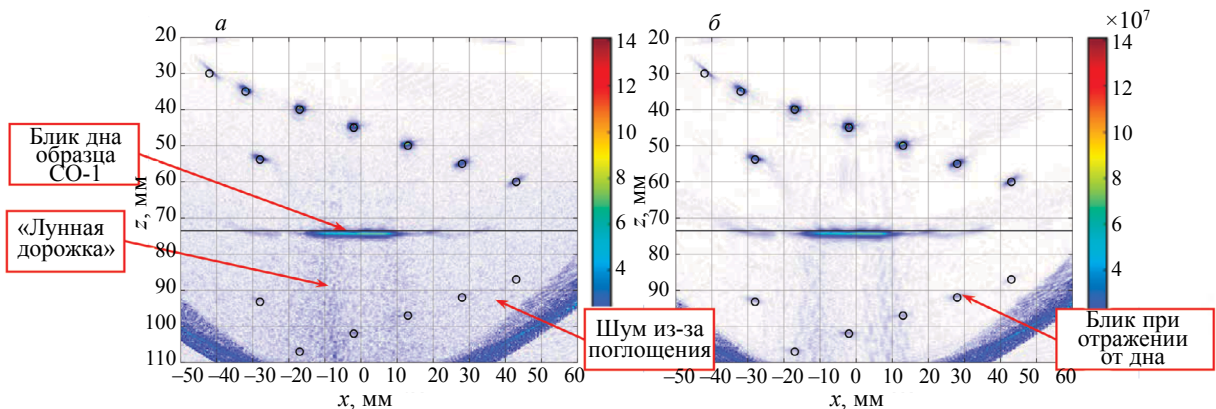


Рис. 11. PWI-C-SAFT-изображение:  
 а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям.

#### 4.2.2. Восстановление изображения методом ПСП

В отличие от модельного эксперимента, описанного в разделе 4.1, когда все БЦО были в пределах активной апертуры АР, в данном модельном эксперименте БЦО с номерами 1, 2, 7 и 8 находятся вне пределов апертуры АР, показанной квадратом с полупрозрачной заливкой красного цвета (см. рис. 9).



При восстановлении ПСП-изображения блики БЦО с номерами 1, 2, 8 и 7 будут зеркально отражены относительно вертикальных линий границы апертуры. Для устранения этого эффекта можно увеличить количество элементов АР до 192, добавив эхосигналы из нулей слева и справа 64 нуля. Увеличенная апертура на рис. 9 показана двумя прямоугольниками с полупрозрачной заливкой зеленого цвета.

#### 4.2.2.1. Режим FMC

На рис. 12а приведено FMC-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу. На изображении присутствуют многократно повторяющиеся по горизонтали ложные блики, появившиеся из-за грубого шага элементов АР (см. раздел 3.2.3), которым было дано название «пунктирный шум» (рис. 12). «Пунктирный шум» затрудняет определение количества несплошностей в ОК. На рис. 12б приведено FMC-ПСП-изображение при интерполяции по четырем взвешенным точкам. Однако из-за грубого шага элементов АР «пунктирный шум» подавить не удалось.

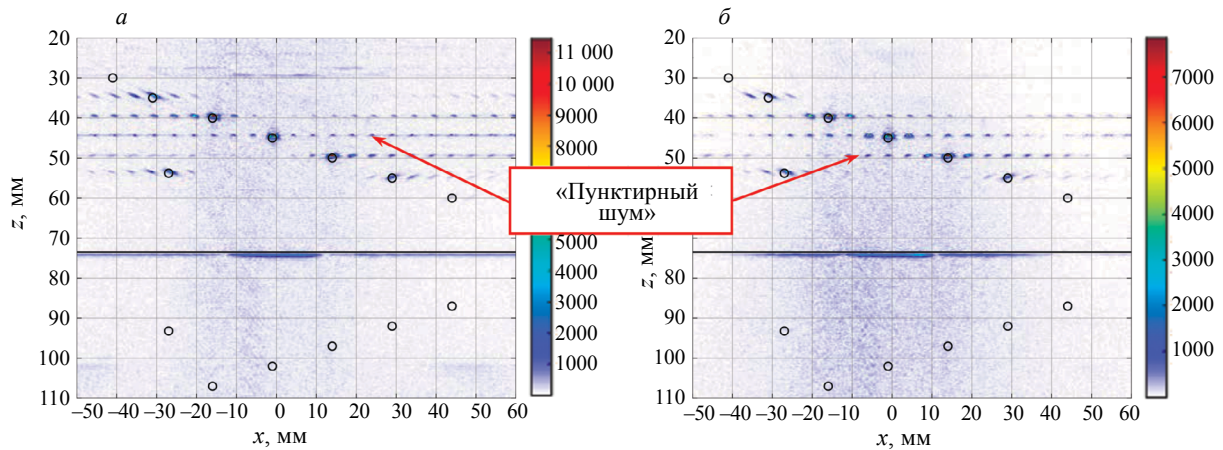


Рис. 12. FMC-ПСП-изображение с интерполяцией:  
а — по ближайшему соседу; б — по четырем взвешенным точкам.

#### 4.2.2.2. Режим PWI

На рис. 13а приведено PWI-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу, а на рис. 13б — при интерполяции по четырем точкам. Как видно, разница между шумом интерполяции этих двух изображений мала (см. раздел 4.1.2.2). На обоих изображениях блики БЦО с номерами 6 и 8 имеют маленькую амплитуду, а блики БЦО с номерами 1 и 7 вообще не видны, так как находятся вне области сканирования плоскими волнами с углами от  $-20$  до  $20$  град. Для восстановления бликов БЦО с номерами 1 и 7 нужно увеличить диапазон углов излучения плоских волн от  $-40$  до  $40$  град, но это приведет к уменьшению скорости регистрации эхосигналов.

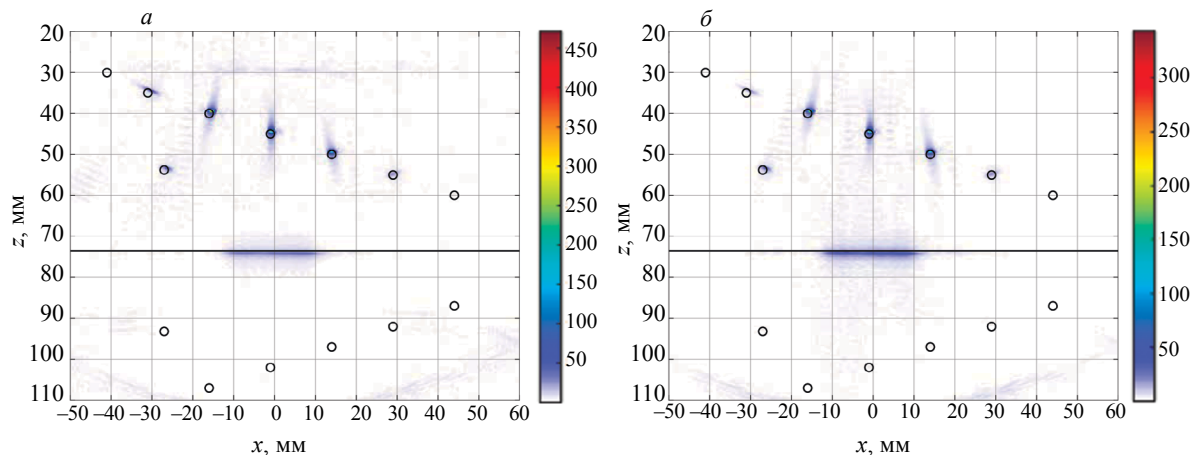


Рис. 13. PWI-ПСП-изображение с интерполяцией:  
а — по ближайшему соседу; б — по четырем взвешенным точкам.

### 4.3. Образец СО-НК-036 №3 («кораблик»)

В образце из стали Ст20 толщиной 60 мм со стороны грани с углом наклона 30 град сделано четыре пронумерованных плоскодонных цилиндрических отверстия (ПДО), диаметром 1 мм, с глубиной залегания 2, 10, 20 и 40 мм (рис. 14). На рис. 14 все четыре ПДО схематически показаны линиями желтого цвета. Для контроля использовалась АР с частотой 5 МГц и 32 элементами, размером 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Сканирование по оси  $x$  проводилось 67 раз с шагом 1,14 мм. Призма в начальном положении  $-96$  мм показана на рис. 14.

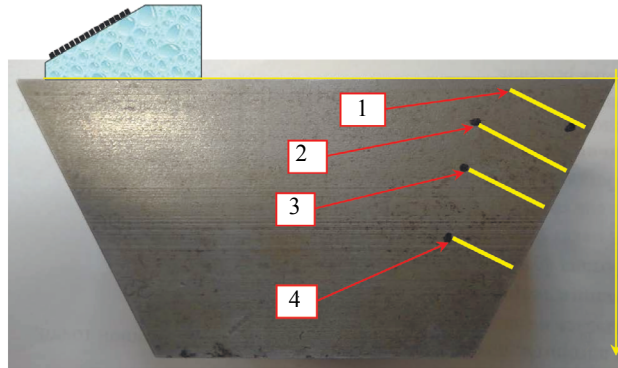


Рис. 14. Фотография образца №3 СО-НК-036 (кораблик).

#### 4.3.1. Восстановление изображения во временной области

На рис. 15 показаны изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования FMC и PWI. В режиме PWI плоские волны генерировались в диапазоне от 30 до 80 град через 2 град. Оба изображения ПДО принципиально отличаются друг от друга. Однако блики ПДО на рис. 15а сфокусированы лучше по причине наличия краевой волны и ограниченной области формирования плоской волны (см. раздел 2.2). Так как АР состоит из 32 элементов и усреднения эхосигналов не проводилось, то увеличение скорости регистрации эхосигналов в режиме PWI по сравнению с FMC не так заметно, как в разделах 4.1.1.2 и 4.2.1.2.

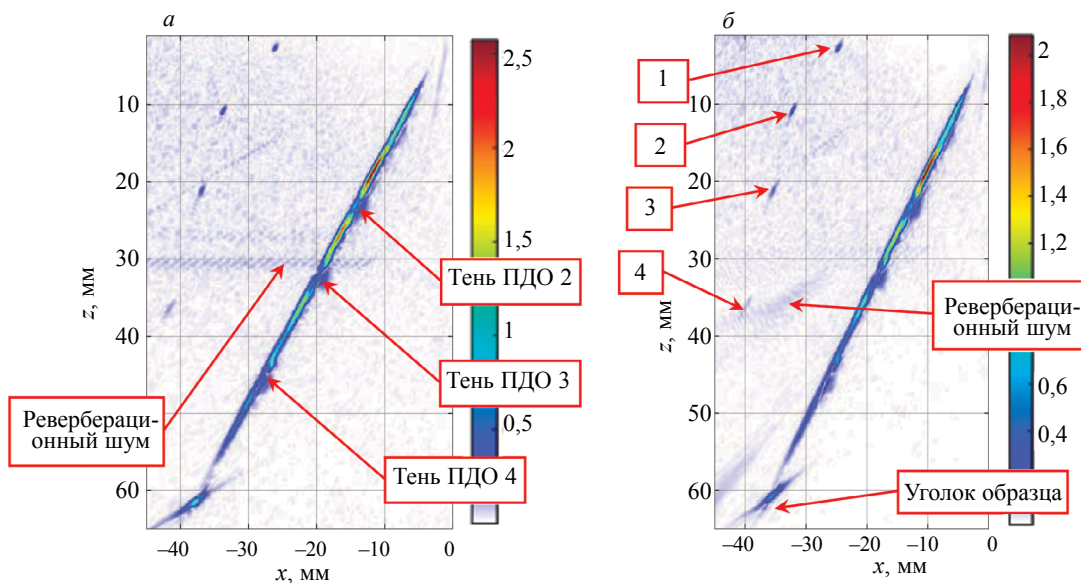


Рис. 15. Изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования: а — FMC; б — PWI.

На рис. 16а приведено FMC-C-SAFT-изображение самого глубокого ПДО номер 4, для начального положения призмы на ОК, а на рис. 16б — PWI-C-SAFT-изображение. На каждый рисунок линиями черного цвета наброшена маска ПДО. На рис. 16а отношение сигнал/шум около 2 дБ, а на рис. 16б из-за свойства PWI вводить большее, по сравнению с режимом FMC, количество энергии в ОК, отношение сигнал/шум около 6 дБ, что позволяет считать блик ПДО 4 обнаруженным.

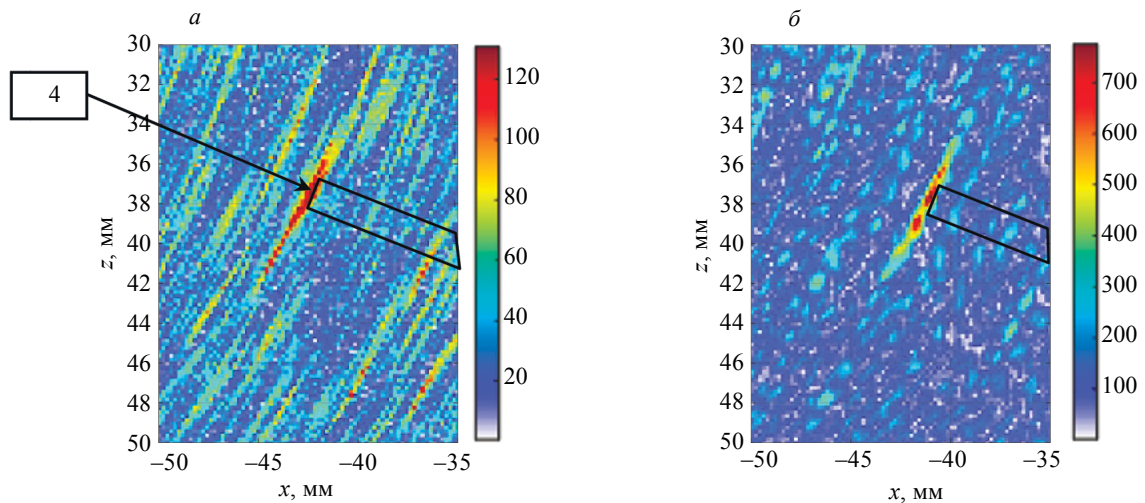


Рис. 16. Изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в положении -96 мм в режиме: а — FMC; б — PWI.

Следует обратить внимание на то, что амплитуда блика ПДО на рис. 16б оказалась модулированной. Это можно объяснить тем, что при увеличении глубины залегания отражателей в эту область будет приходить всего нескольких плоских волн (см. рис. 2). Излучая плоские волны с шагом по углу 1 или 0,5 град, можно получить блик ПДО без модуляции (как на рис. 16а). В этом случае отношение сигнал/шум возрастет еще больше, но в два или четыре раза уменьшится скорость регистрации эхосигналов. По этой же причине блики ПДО на рис. 15б уменьшают амплитуду быстрее, чем на рис. 15а при увеличении глубины залегания отражателя. Чем больше размер АР, тем меньше будет сказываться этот эффект на качестве PWI-изображения. Эту особенность работы в режиме PWI нужно учитывать при разработке методик.

## 5. ВЫВОДЫ

По результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать несколько выводов.

1. При использовании 64-элементной АР без призмы для восстановления изображения БЦО в образце Т-Б-39-60-Пл №19200 можно ограничиться восемью плоскими волнами, то есть повысить скорость регистрации в восемь раз. Эффективность применения режима PWI для ускорения регистрации эхосигналов тем выше, чем больше элементов в АР.

2. Восстановление изображений БЦО в образце СО-1 в спектральном пространстве не такое эффективное, как для образца Т-Б-39-60-Пл №19200. Это связано с двумя причинами: нарушение теоремы Котельникова и из-за того, что размеры ОВИ в два раза больше апертуры АР. В статьях часто проводятся изображения отражателей в металле с использованием призмы с нулевым углом наклона. Алгоритм (3) в этом случае легко модифицируется [9]. Так как использовалось 21 плоская волна, то скорость регистрации возросла в три раза.

3. Применение технологии PWI не повысило отношение сигнал/шум при работе с образцом СО-НК-036 №3 («кораблик») при регистрации эхосигналов 32-элементной АР на призме. При тройном сканировании качество изображений, восстановленных по эхосигналам, измеренным в режиме PWI и FMC, примерно одинаково. Только при обработке эхосигналов для положения 2 можно утверждать, что PWI повысило примерно на 3 дБ отношение сигнал/шум (см. рис. 16). Использование 25 плоских волн не позволило значительно увеличить скорость регистрации эхосигналов.

4. Эффективность применения технологии PWI снижается при уменьшении количества элементов АР и для области ОВИ, существенно превышающей размеры АР.

## 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: 26.11.2020).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int. 2006. V. 39. № 7. P. 525—541.
5. Парфенов В.И., Голованов Д.Ю. Обнаружение дискретных разреженных сигналов с частотой дискретизации, не превышающей частоту Найквиста // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 6. Режим доступа: URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/1/text.pdf> (дата обращения: 09.12.2018).
6. Авагян В.К., Базулин Е.Г. Увеличение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решёткой с применением технологии множественного доступа с кодовым разделением // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 3—16.
7. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., Benech N., Fink M. Coherent planewave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2009. V. 56. P. 489—506. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1067
8. Jeune L. Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion // Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris. 2016. P. 119.
9. Merabet L., Robert S., Prada C. Comparative study of 2D ultrasound imaging methods in the f-k domain and evaluation of their performances in a realistic NDT configuration // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2019. V. 66. № 4. P. 772—788. DOI: 10.1063/1.5031654
10. Dolmatov D.O., Sednev D.A., Bulavinov A.N. et al. Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography of Layered Inhomogeneous Media Using Matrix Antenna Arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 499—506. [Долматов Д.О., Седнев Д.А., Булавинов А.Н., Пинчук Р.В. Применение алгоритма расчета в частотной области в ультразвуковой томографии с использованием матричных фазированных антенных решеток и компенсацией непараллельности поверхности объекта контроля относительно плоскости сканирования // Дефектоскопия. 2019. № 7. С. 12—19.]
11. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
12. Taki H., Taki K., Sakamoto T., Yamakawa M., Shiina T., Kudo M., Sato T. High range resolution ultrasonographic vascular imaging using frequency domain interferometry with the Capon method // IEEE Trans. Med. Imaging. 2012. V. 31. № 2. P. 417—429.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
14. Базулин Е.Г. Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 11—25.
15. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/technologies/cuda-x/> (дата обращения: 21.11.2020).
16. Угрюмов Е.П. Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы. Гл. 7. / Цифровая схемотехника. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2. БХВ-Петербург, 2004. С. 357.
17. Базулин Е.Г. Контроль заварок Ду800 антенными решетками методом тройного сканирования // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 30—41.
18. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
19. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. Журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
20. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Коколев С.А. Применение линейной интерполяции для повышения качества изображений дефектов, получаемых методом проекции в спектральном пространстве, при ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 3—21.
21. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 21.11.2020).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ СВАРНОМУ СОЕДИНЕНИЮ, ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПО СХЕМЕ TOFD

© 2021 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, А.Х. Вовилкин<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 25.01.2021; после доработки 19.03.2021  
Принята к публикации 29.03.2021

Метод TOFD, широко используемый в ультразвуковой дефектоскопии, позволяет по фазе эхосигналов отличать трещину от объемного отражателя и с высокой точностью определять ее высоту. Однако метод TOFD без сканирования пьезопреобразователями поперек сварного соединения не позволяет определить смещение отражателя от центра шва, что очень важно при оценке результатов контроля. Используемые для этого сканирующие устройства имеют сложную конструкцию, цена их выше, чем у одномерных сканирующих устройств, и, главное, — значительно возрастает время контроля. Если использовать эхосигналы, отраженные от дна объекта контроля с учетом смены типа волны, то по множеству парциальных изображений, восстановленных методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА), можно получить объединенное изображение отражателя. Если использовать эхосигналы, измеренные в совмещенном режиме для каждого пьезопреобразователя, то можно оценить смещение отражателя поперек сварного соединения с точностью  $\pm 1,5$  мм. Численные и модельные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода.

*Ключевые слова:* Time of Flight Diffraction (TOFD), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM).

**DOI:** 10.31857/S0130308221060026

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для современной промышленности Российской Федерации характерна эксплуатация технически сложных объектов и систем, таких как атомные электростанции, нефтехимические производства, системы транспортировки нефти и газа и т.д. Аварии на этих объектах могут привести к катастрофам, которые могут сопровождаться не только колоссальными финансовыми потерями, но и человеческими жертвами [1]. Большое значение в обеспечении надежной работы таких объектов имеет периодический контроль их состояния при эксплуатационном обслуживании. Особенно это важно, когда срок эксплуатации промышленного объекта близок к завершению. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля (УЗК) позволяют решать задачу определения типа отражателя, его координат и размеров и поэтому широко используются при проведении эксплуатационного контроля.

В 1970-х годах для контроля сварных соединений объектов атомной энергетики был разработан метод Time of Flight Diffraction (TOFD)[2]. Неоспоримым достоинством TOFD являются [3—5]: высокая скорость проведения контроля на продольной волне двумя пьезопреобразователями (ПЭП), перемещаемыми вдоль сварного соединения (перпендикулярное сканирование), небольшой объем памяти компьютера для хранения измеренных эхосигналов и высокая точность определения высоты трещины. Так, в статье [6], посвященной контролю турбин с использованием ПЭП с частотой 4 МГц, достигнутая погрешность измерения высоты трещин равна  $\pm 0,31$  мм, что составляет примерно четверть длины волны. А возможность проанализировать фазу рассеянных импульсов может помочь определить тип обнаруженного отражателя. Метод TOFD имеет и недостатки: при наличии шума обнаружить эхосигналы и определить их фазы становится проблематичным, невозможно локализовать отражатель в направлении, поперечном сварному соединению. Для этого нужно провести дополнительные измерения со сканированием ПЭП поперек сварного соединения и восстановить изображение отражателей методом Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) [7, 8], что уменьшает скорость проведения контроля и усложняет конструкцию сканирующего устройства.

Таким образом, разработка алгоритма, позволяющего оценить по измеренным TOFD-эхосигналам без сканирования поперек сварного соединения не только высоту трещины, но и ее смещение относительно центра сварного соединения, является актуальной задачей.



## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ СВАРНОМУ СОЕДИНЕНИЮ

На рис. 1 показаны два ПЭП, расположенные с разных сторон от сварного соединения, на расстоянии  $b$  друг от друга. Эхосигналы, измеренные в совмещенном режиме, будем обозначать как измеренные по N- и P-каналам. Классические TOFD-эхосигналы, когда излучение и прием происходят разными ПЭП, будем считать измеренными по NP-каналу. Обычно в режиме TOFD измерения эхосигналов происходят только при перемещении ПЭП вдоль оси  $y$ , которая перпендикулярна плоскости рисунка (перпендикулярное сканирование).

### 2.1. Восстановление изображения отражателей методом SAFT

Изображение отражателей в плоскости  $xz$  можно восстановить методом SAFT по эхосигналам  $p(x, t)$ , измеренным при сканировании двумя ПЭП вдоль оси  $x$  по формуле:

$$\hat{\varepsilon}_{SAFT}(\mathbf{r}_i; as) = \int_{A_x} p(x, t - t_{del}(x, \mathbf{r}_i, x + b; as) + t_{max}) dx, \quad (1)$$

где  $A_x$  — области сканирования вдоль оси  $x$ ;  $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i) \in S_i$  — координаты точки области восстановления изображения отражателей  $S_i$  (ОВИ);  $b$  — постоянное расстояние между излучателем и приемником;  $t_{del}(x, \mathbf{r}_i, x + b; as)$  — время пробега импульса от точки излучения  $x$  до точки  $\mathbf{r}_i$  и до точки приема  $x + b$  для заданной акустической схемы  $as$ ;  $t_{max}$  — время нарастания импульса зондирующего импульса. На рис. 1 ОВИ отмечена полупрозрачным прямоугольником красного цвета.

Под акустической схемой, которую обозначим как  $as$ , будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса с учетом трансформации типа волны при отражении его от границ объекта контроля. Для описания акустических схем будем пользоваться следующим правилом: буква  $d$  обозначает отражение от дефекта; тип волны после отражения от границ будем обозначать буквами  $L$  (продольная) и  $T$  (поперечная). Последовательная запись типов волны и событий будет определять акустическую схему. Подобный способ обозначения акустических схем используется в программе CIVA [9], предназначенной для моделирования результатов неразрушающего контроля, в частности, ультразвукового. Например, акустическая схема  $LLdLT$  описывает ситуацию, когда при излучении продольная волна при отражении от дна не меняет тип, а при приеме продольная волна, отражаясь от дна, трансформируется в поперечную.

### 2.2. Замена механического сканирования на работу с множеством изображений, восстановленных на разных акустических схемах

Однокоординатное сканирование вдоль оси  $y$  в режиме TOFD не сможет дать ответа на вопрос: «С какой стороны сварного соединения находится отражатель УЗ волн?». Это связано с тем, что если область сканирования состоит из одной точки, то изображение точечного отражателя, восстанавливаемое по формуле (1) по акустической схеме  $LdL$ , трансформируется в эллипс (рис. 2). Иными словами, дифрагированные сигналы на продольной волне, пришедшие от рассеивателей, находящихся на эллипсе (показан зеленым цветом<sup>1</sup> на рис. 1), имеют одинаковое время задержки. Если звездой зеленого цвета отмечено положение отражателя, то эхосигналы от него и от отражателей, показанных звездами красного цвета, будут иметь одинаковые времена задержек, но будут отличаться по амплитуде и по форме. На рис. 1 линиями разных цветов схематично показаны фрагменты эллипсов для разных акустических схем, название которых указано в выносках. Если восстановить изображения по формуле (1) с учетом трансформации типов волн и при отражении от дна объекта контроля, то множество эллипсов должно пересекаться в месте расположения отражателя. Парциальные изображения на разных акустических схемах, а их — 36 для случая с однократным отражением от дна с учетом трансформации типа волны, можно объединить как сумму или медиану модулей по формулам:

<sup>1</sup>Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

$$\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{N_{as}} |\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n)|, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i) = M_{\delta=1}^{N_{as}} (T(|\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n), l|)), \text{ где } l = \langle |\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n) \rangle, \quad (3)$$

где  $M$  — операция медианы для  $N_{as}$  парциальных изображений,  $T$  — операция отсечки по уровню  $l$ , равному среднему значению парциального изображения. Следует отметить, что получение объединенного изображения по формуле (3) эффективно при наличии точечных отражателей, к которым можно отнести края трещин.

Если в распоряжении имеются эхосигналы, измеренные по N- и P-каналам, то количество акустических схем для трех каналов увеличивается до 108. Отметим, что в классическом режиме TOFD не предполагается измерения дополнительных эхосигналов по N- и P-каналам. Из парциальных изображений  $\hat{\mathbf{e}}_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $\hat{\mathbf{e}}_P(\mathbf{r}_i)$  и  $\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i)$ , восстановленных по формуле (3), можно сформировать объединенное изображение для оценки смещения отражателя относительно оси  $x$ :

$$\hat{\mathbf{e}}(\mathbf{r}_i) = M (T(|\hat{\mathbf{e}}_N(\mathbf{r}_i), l|), T(|\hat{\mathbf{e}}_P(\mathbf{r}_i), l|), T(|\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i), l|)). \quad (4)$$

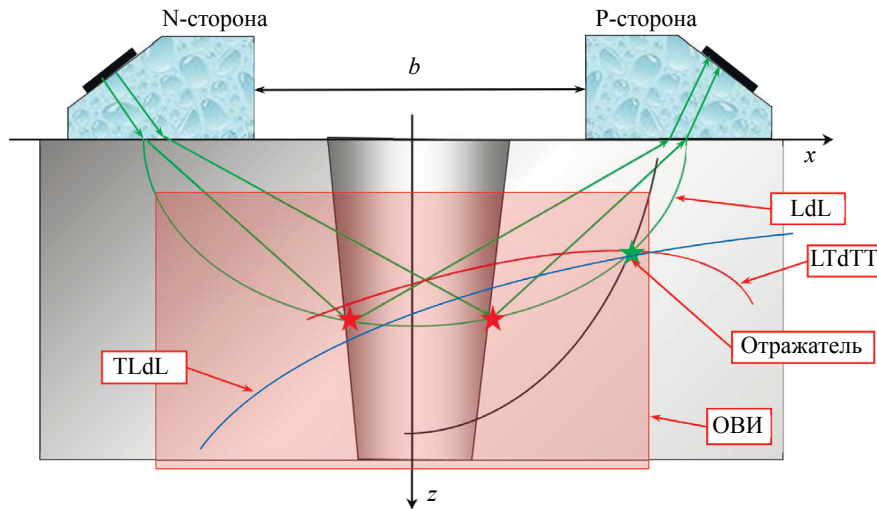


Рис. 1. Схема регистрации эхосигналов методом TOFD.

Таким образом, идея получить информацию о координатах отражателя поперек сварного соединения по TOFD-эхосигналам заключается в замене сканирования ПЭП вдоль оси  $x$  на получение объединенного изображения по многим парциальным изображениям на разных акустических схемах по N-, P- и NP-каналам.

Эффективность работы такого метода связана с формой диаграммы направленности ПЭП — чем шире диаграмма направленности, тем больше амплитуда импульсов поперечной волны при преломлении на границе «призма—объект контроля». Поэтому целесообразно использовать ПЭП с рабочей частотой 5 МГц и с размерами пьезоэлемента 3 мм и менее.

Из-за разных значений коэффициента отражения от границ объекта контроля, из-за разных значений коэффициента преломления на границе «призма—объект контроля» и обратно не каждая акустическая схема будет информативна — амплитуда эхосигналов для некоторых акустических схем будет пренебрежимо малой. Поэтому важным методическим вопросом является выбор оптимального списка акустических схем, и, конечно, он будет меньше максимального значения 36 для каждого из каналов. Дополнительно для уменьшения уровня ложных бликов изображения отражателей в данной работе был применен следующий прием: для каждой акустической схемы каждого канала рассчитывалась амплитуда точечного отражателя во всех точках ОВИ. Полученные маски  $M_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $M_P(\mathbf{r}_i)$  и  $M_{NP}(\mathbf{r}_i)$  умножались на соответствующие парциальные изображения в формуле (3).

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовались эхосигналы, рассчитанные программой CIVIA 2020 [9].

#### 3.1. Описание модели численного эксперимента

Моделировалась ситуация, когда объект контроля толщиной 50 мм обладает свойствами стали марки 20, ПЭП работают на частоте 5 МГц, а призмы «сделаны» из рексолита и имеют угол наклона 21,5 град, стрелу 6 мм и расстояние пробег по призме 4 мм. Расстояние между передними гранями призм равно 120 мм. Рассчитывались эхосигналы для N-, P- и NP-канала, рассеянные трещиной высотой 5 мм с центром в точке (5, 25) мм на прямом луче и при однократном отражении от дна с учетом трансформации типа волны при отражении. Объединение парциальных изображений трех каналов в виде суммы (формула (2)) не позволило получить изображение, пригодное для анализа, поэтому в дальнейшем объединение происходило с помощью операции медиана (формула (3)).

#### 3.2. Использование ПЭП с одним пьезоэлементом

На рис. 2 представлено два из тридцати шести парциальных SAFT-изображений для NP-канала, восстановленных по формуле (1) по акустическим схемам LdL (а) и TdTТ (б). Пиктограммы этих схем показаны в правом верхнем углу каждого изображения. Зеленым цветом обозначены лучи на продольной волне, а красным — на поперечной. Видно, что в обеих случаях эллипсоидальные блики проходят через края трещины, которая показана линией красного цвета. Из-за умножения на маску  $M_{NP}(\mathbf{r}_i)$  эллипсоидальный блик уменьшает свою амплитуду при приближении к краям ОВИ.

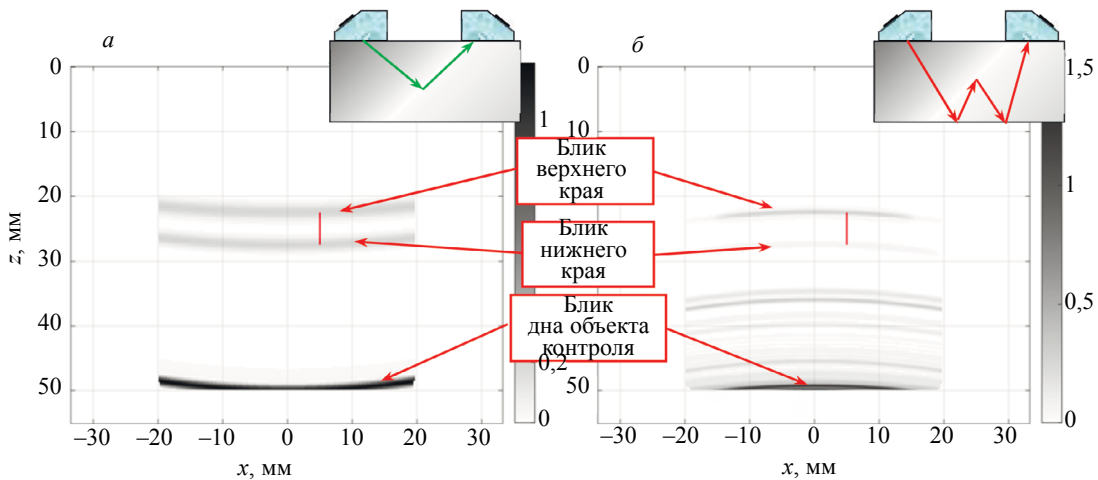


Рис. 2. Парциальные изображения акустических схем LdL (а), TdTТ (б) и схематическое представление лучей акустических схем.

На рис. 3а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения для P-, N- и NP-каналов соответственно. Видно, что определить смещение бликов краев трещины можно по изображениям N- и P-каналов. Изображение, полученное по эхосигналам NP-канала, имеет симметричный вид относительно оси  $x$  и не позволяет определить смещение трещины. Тем не менее на рис. 3в есть блики, соответствующие краям трещины. На рис. 3г показан результат объединения по формуле (4) изображений по трем каналам  $\hat{\epsilon}_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $\hat{\epsilon}_P(\mathbf{r}_i)$  и  $\hat{\epsilon}_{NP}(\mathbf{r}_i)$ . В его формировании участвуют 108 парциальных изображений (по 36 изображений для N-, P- и NP-каналов). Объединенное изображение недостаточно высокого качества, но позволяет определить (с точностью  $\pm 0,5$  мм) с какой стороны от центра сварного соединения находится трещина. Если подобные расчеты провести при наличии еще одной трещины, то количество ложных бликов возрастает, и это затруднит идентификацию как бликов вершин трещин, так и их смещений по оси  $x$ .



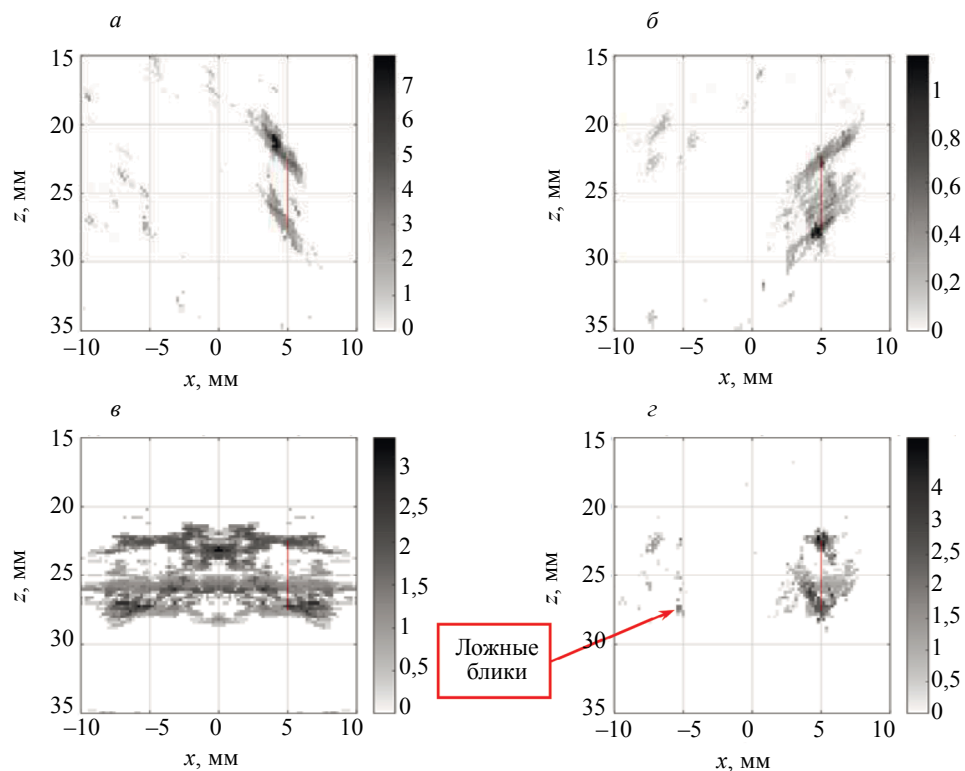


Рис. 3. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а—в), объединенное по формуле (4) изображение (з).

При реальном контроле может возникнуть ситуация, когда толщина объекта контроля известна с некоторой точностью. Проведенные численные эксперименты показали, что предложенный метод сохраняет работоспособность, если толщина образца задана с ошибкой меньше, чем  $\pm 1$  мм.

Заменив ПЭП на антенную решетку из  $N_e$  элементов, по ЦФА-изображению, восстановленному по эхосигналам NP-канала, можно будет уверенно определить координаты краев трещины [10]. Но это потребует использования более сложной многоканальной аппаратуры и приведет к резкому увеличению объема измеренных эхосигналов — в каждой точке санирования вместо одного TOFD-эхосигнала придется измерить  $N_e \times N_e$  эхосигналов в режиме двойного сканирования, в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC).

#### 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа серии «АВГУР 5.2», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [11].

Эффективность объединения парциальных изображений зависит не только от точности определения толщины объекта контроля и скорости продольной волны в нем, но и от точности определения таких параметров призмы, как угол наклона, скорость продольной волны, стрела и расстояние пробега в призме. Поэтому для повышения эффективности предложенного алгоритма была разработана и использована процедура калибровки призмы и ПЭП, основанная на способе калибровки призмы и антенной решетки, изложенной в статье [12].

##### 4.1. Придонная модель трещин

Объект контроля представлял собой пластину толщиной 25 мм из стали марки 20 с моделями различных отражателей. Эхосигналы от придонного паза высотой 2,5 мм, шириной 0,3 мм и длиной 20 мм, смещенного на расстояние  $-20$  мм по оси  $x$ , регистрировались двумя ПЭП с частотой 5 МГц и с пьезопластиной диаметром 3 мм, установленные на рексолитовые призмы с углом наклона 17,5 град. Апертура сканирования  $A_x$  излучающего ПЭП была равна 120 мм с началом в

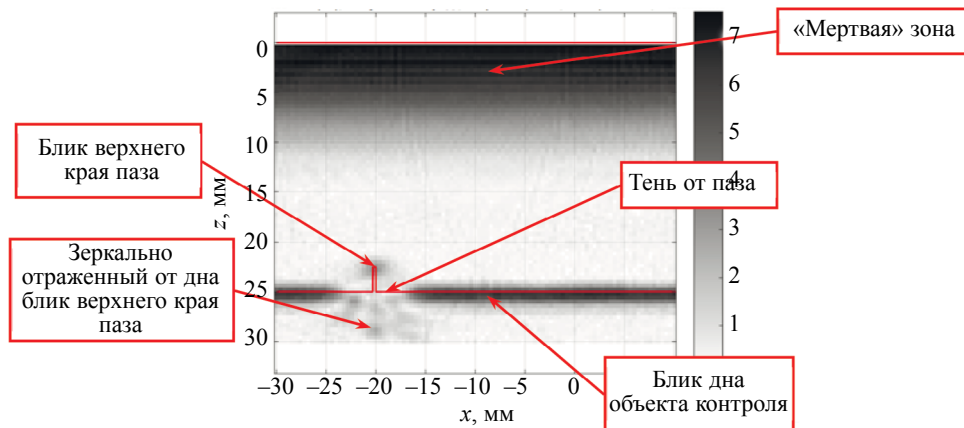


Рис. 4. SAFT-изображения придонного паза высотой 2,5 мм (NP-канал).

точке  $-110$  мм. Шаг сканирования был равен  $0,31$  мм. Приемный ПЭП был смещен относительно излучающего ПЭП на расстояние  $b = 68$  мм, измеряемое между передними гранями призм.

#### 4.1.1. Получение изображения методом SAFT при сканировании вдоль оси $x$

Для восстановления качественного изображения отражателей в плоскости  $xz$  необходимо зарегистрировать эхосигналы при сканировании ПЭП вдоль оси  $x$  и обработать их методом SAFT. На рис. 4 показано SAFT-изображение паза, восстановленное по эхосигналам NP-канала. Линиями красного цвета на изображения нанесены контуры границ объекта контроля и паза. По SAFT-изображению можно определить местоположение придонного паза и оценить его высоту, но достигается это ценой сканирования вдоль оси  $x$ . Следует обратить внимание на «мертвую» зону [13], которая сформирована импульсом головной волны.

#### 4.1.2. Получение изображения объединением различных акустических схем

На рис. 5а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения соответственно для Р-, N- и NP-каналов для случая размещения излучателя в точке  $-70,3$  мм, а приемника — в точке  $-2,3$  мм. Линией красного цвета показана граница образца и придонный паз. Видно, что блик паза, координата которого по оси  $x$  равна  $-20$  мм, хорошо сформировался только по N-каналу, так как центр между ПЭП расположен в точке  $-36,3$  мм. По изображению NP-канала виден только ложный блик и дно образца. Однако на объединенном по формуле (4) изображении (рис. 5г) можно уверенно указать на блик паза. Точность определения смещения отражателя можно оценить как  $\pm 1,5$  мм. Так как высота трещины определяется по TOFD-эхосигналам, то невысокая точность определения высоты паза по изображению на рис. 5г не является принципиальным недостатком предлагаемого метода. В эхосигналах N- и Р-каналов присутствует реверберационный шум и нужно принять меры для его уменьшения. В данной статье измерялся образец реверберационного шума для каждого ПЭП и вычитался из эхосигналов, измеренных по N- и Р-каналам [14].

На рис. 6а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения для Р-, N- и NP-каналов для случая размещения излучателя в точке  $-33,1$  мм, а приемника — в точке  $34,9$  мм, так что центр между ПЭП расположен в точке  $-0,9$  мм. Видно, что блик паза хорошо сформировался на изображениях по Р- и NP-каналам. На объединенном по формуле (4) изображении (рис. 6г) можно идентифицировать блик паза. Точность определения смещения отражателя можно оценить как  $\pm 1,5$  мм.

Рассмотрим теперь случай, когда изображения восстанавливались с использованием эхосигналов для трех положений ПЭП: к эхосигналам для двух выше рассмотренных случаев добавлены эхосигналы, измеренные при размещении излучателя в точке  $-51,7$  мм, а приемника —  $16,3$  мм. На рис. 7а—в показаны изображения по трем каналам, а на рис. 7г — объединенное по формуле (4) изображение, на котором виден всего один блик, соответствующий придонному пазу. Один блик, но с плохим разрешением, виден и по изображению NP-канала.

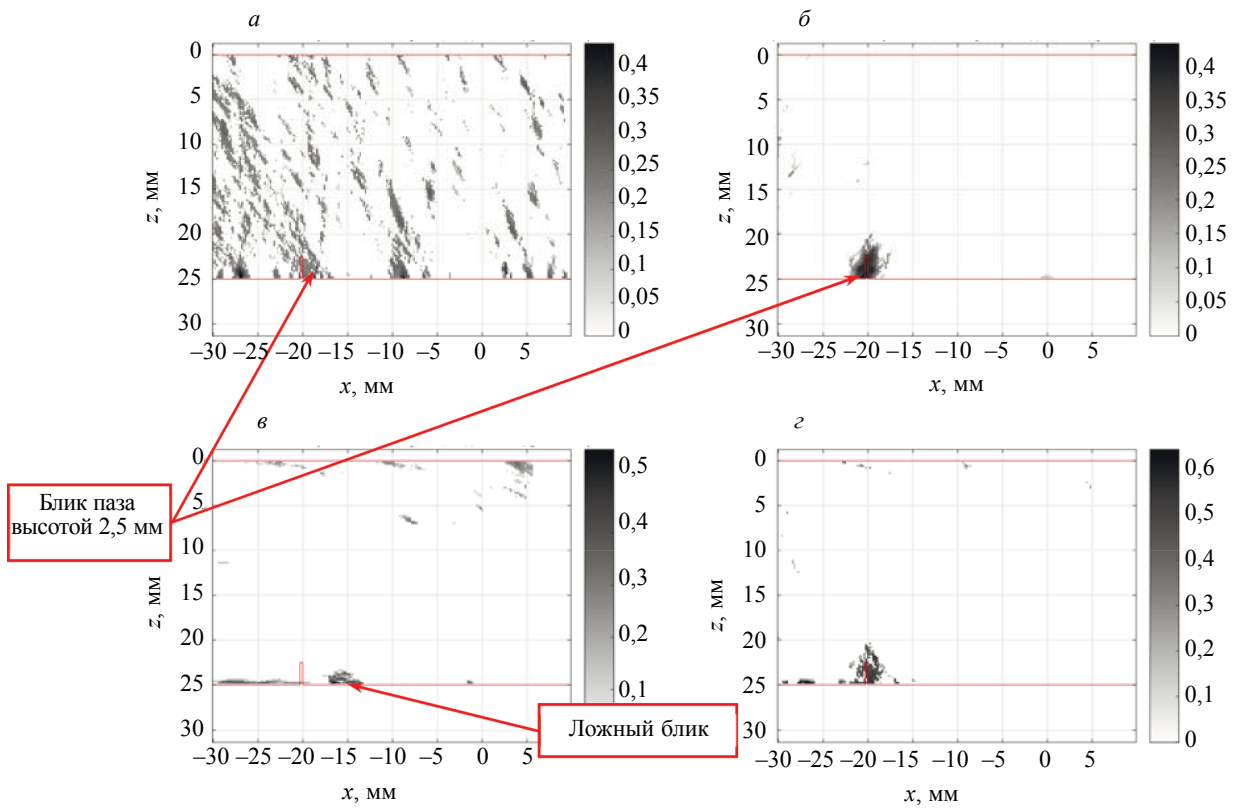


Рис. 5. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а–в), объединенное по формуле (4) изображение (г) (координата излучателя –70,3 мм, приемника –2,3 мм).

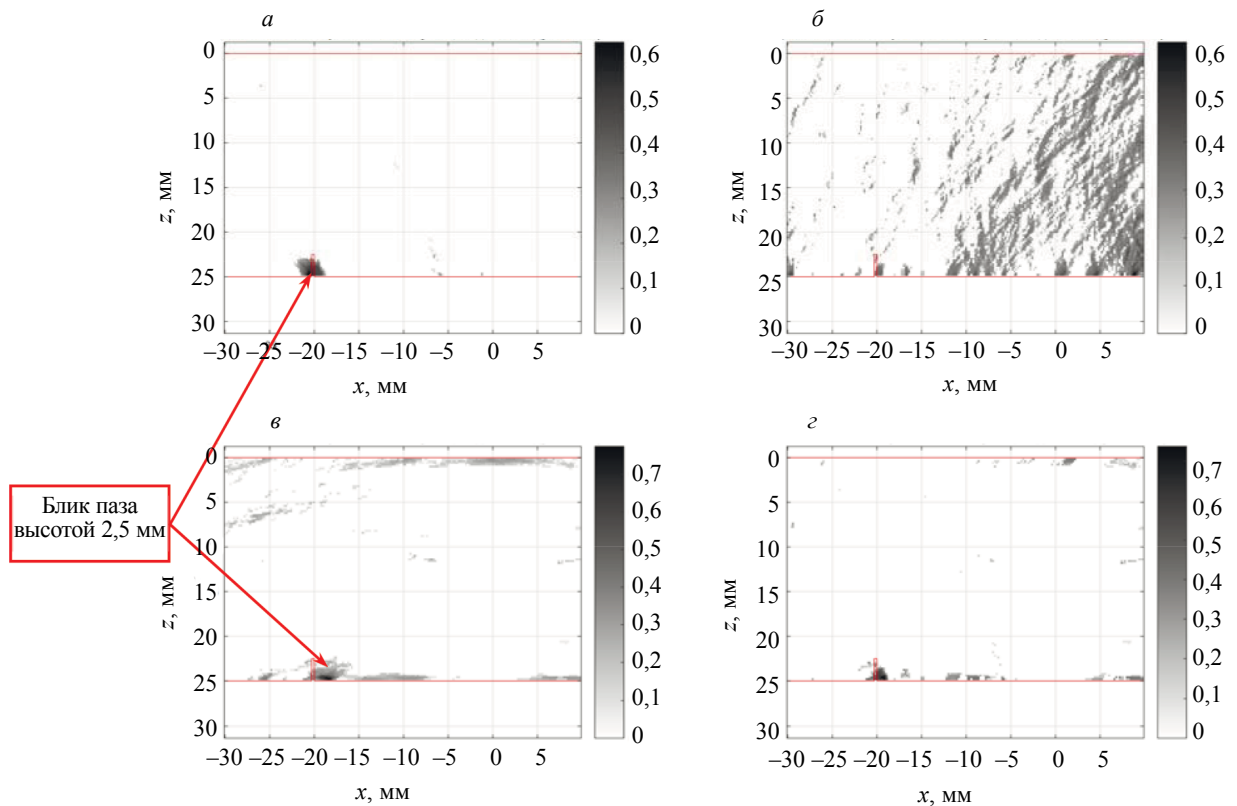


Рис. 6. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а–в), объединенное по формуле (4) изображение (г) (координата излучателя –33,1 мм, приемника 34,9 мм).

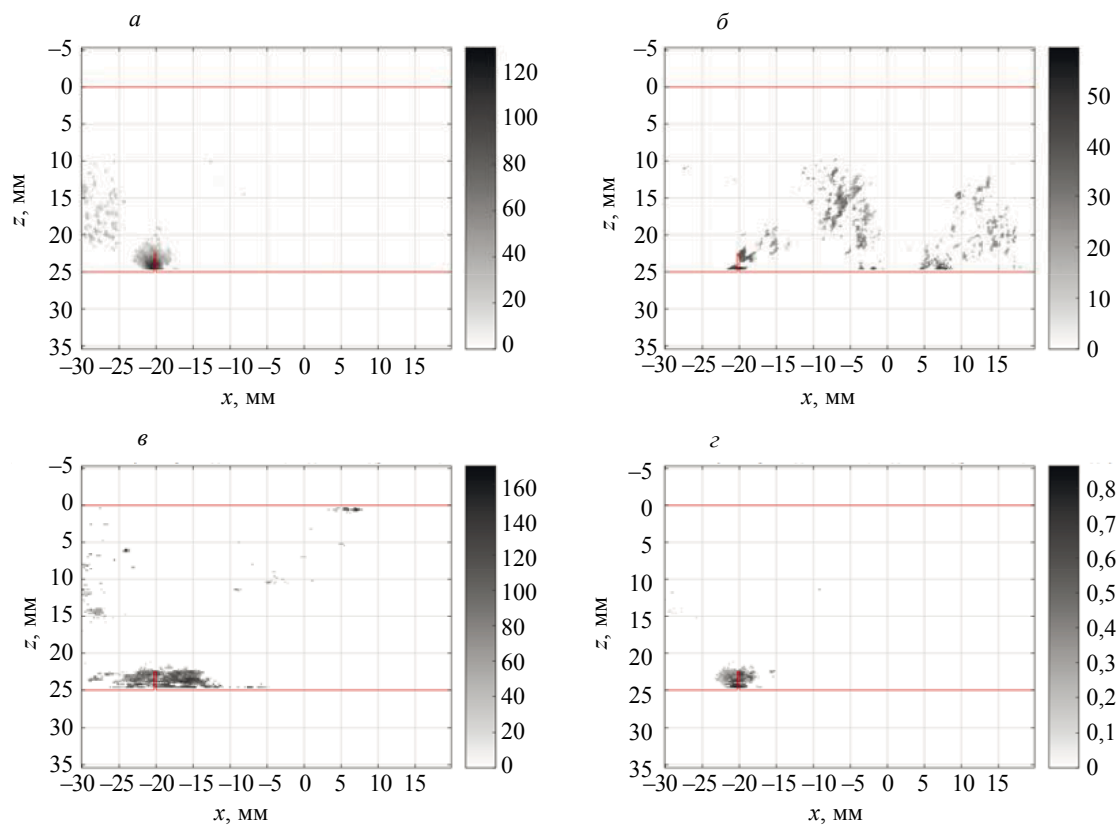


Рис. 7. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а—в), объединенное по формуле (4) изображение (г). Для расчета использовались эхосигналы, измеренные в трех положениях ПЭП.

Качество изображений было бы выше, если использовались не 3 эхосигнала по каждому каналу, а 9 эхосигналов при перекрестной работе, например, первый ПЭП по N-каналу излучил зондирующий импульс, а третий ПЭП зарегистрировал эхосигнал. Однако такой режим скорее характерен для работы антенной решетки в режиме двойного сканирования [10].

## 5. ВЫВОДЫ

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

Предложенный метод позволяет заменить механическое санирование двумя ПЭП вдоль оси  $x$  на формирование по формулам (3) и (4) SAFT-изображения при объединении 108 парциальных изображений для одного положения ПЭП. В отличие от классического метода TOFD, предложенный метод предполагает использование эхосигналов, когда ПЭП работают в совмещенном режиме.

В численных экспериментах предложенный метод показал хороший результат и позволил определить сдвиг отражателя относительно середины образца с точностью  $\pm 0,5$  мм без сканирования вдоль оси  $x$ .

В модельных экспериментах предложенный метод позволил определить координаты придонного паза высотой 2,5 мм относительно середины образца с точностью  $\pm 1,5$  мм. Такое уменьшение точности по сравнению с численным экспериментом можно объяснить присутствием остатков реверберационного шума в совмещенных каналах и ошибками при задании таких параметров контроля, как толщина образца, скорость продольной и поперечной волны в нем, расстояние между ПЭП.

При создании методики для контроля конкретного объекта качество объединенного изображения можно повысить за счет определения оптимального списка акустических схем по каждому каналу.

Повысить качество объединенного изображения можно при использовании двух двухэлементных ПЭП или использовании четырех ПЭП, по два ПЭП с каждой стороны шва. В этом случае можно обойтись без дополнительных N- и P-каналов и работать с эхосигналами только по NP-каналу. Еще большее увеличение числа ПЭП позволит повысить качество объединенного изображения (см. рис. 7). Но такой способ регистрации эхосигналов будет больше напоминать работу с антенными решетками в режиме FMC.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная\\_катастрофа\\_под\\_Уфой](https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой) (дата обращения: 25.12.2020).
2. *Silk M.G., Lidington B.H.* The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth // *Non-Destructive Testing*. 1975. V. 8. June. P. 146—151.
3. ISO 16828:2012. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод как метод для обнаружения и оценки размеров несплошностей, 2012.
4. ISO 10863:2011. Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Применение дифракционно-временного метода (TOFD), 2011.
5. *Ермолов И.Н.* Дифракционно-временной метод контроля // *В мире НК*. 2001. № 2 (12). С. 7—11.
6. *Натх С.К., Баласубраманиам К., Кришнамурти С.В., Нарайна Б.Х.* Определение размеров выходящих на поверхность трещин методом TOFD // *В мире НК*. 2007. № 3 (37). С. 10—15.
7. *Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D.* SAFT — the Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing // *NDT International*. 1986. V. 19. P. 163—167.
8. *Mooshofer H., Boehm R., Heinrich W., Fendt K., Goldammer M., Kolk K., Vrana J.* Amplitude-based Defect Sizing of SAFT-Results - From Imaging to Quantitative Measurement / Conference: 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018). At: Gothenburg, Sweden. V. 12.
9. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 07.01.2021).
10. *Базулин Е.Г.* Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопровода типа Ду800. Часть 2. Повышение качества изображения, сравнение с результатами рентгеновского контроля // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 12—24.
11. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 07.01.2021).
12. *Базулин Е.Г.* Калибровка ультразвуковой антенной решетки, установленной на призму // *Дефектоскопия*. 2014. № 4. С. 50—63.
13. *Moles M., Robertson L., Sinclair T.* Developments in time-of-flight diffraction (TOFD) / 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa. 2012.
14. *Bazulin E. G.* Reducing the Level of Weakly Changing Noise by the Decorrelation Method during Ultrasonic Monitoring Using Antenna Arrays // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 4. P. 310—317. [*Базулин Е.Г.* Уменьшение уровня слабо меняющихся помех методом декорреляции при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 14—21.]

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛН РЭЛЕЯ

© 2021 г. Н.П. Алешин<sup>1,2,\*</sup>, Н.В. Крысько<sup>1,2,\*\*</sup>, С.В. Скрынников<sup>3,\*\*\*</sup>, А.Г. Кусый<sup>1,2,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</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, стр. 1

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

<sup>3</sup>ПАО «Газпром», Россия 117997 Москва, ул. Наметкина, 16, ГСП-7

E-mail: \*aleshin@bmstu.ru; \*\*kryskonv@bmstu.ru; \*\*\*S.Skrynnikov@adm.gazprom.ru;

\*\*\*\*andrei.k.166@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021; после доработки 26.04.2021

Принято к публикации 27.04.2021

Рассмотрены вопросы выявления поверхностных эксплуатационных плоскостных дефектов ультразвуковым методом неразрушающего контроля с применением поверхностных волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем. В работе представлены экспериментальные исследования выявляемости плоскостных дефектов, которые имитировались искусственным отражателем типа «паз» с различным раскрытием, глубиной и углом наклона. Построены зависимости амплитуды сигнала от перечисленных параметров и оценен их характер. Определены оптимальные амплитудные модели для построения кривых вероятности выявления дефектов (PoD). Сделан вывод о минимальных размерах плоскостного дефекта эксплуатационного типа, выявляемого рассматриваемым методом с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 %.

*Ключевые слова:* поверхностные дефекты, коррозия, трещина, ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, вероятность выявления дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308221060038

### ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации существует и продолжает развиваться большое количество объектов трубопроводного транспорта. Анализ литературных данных, например, материалов статей [1—4], показывает, что на этих объектах среди дефектов металла эксплуатационного происхождения наибольшую часть обычно составляют поверхностные коррозионные повреждения, возникающие под воздействием продукта или внешней среды. Такие дефекты можно разделить на плоскостные, например, стресс-коррозионные трещины, и объемные — местная коррозия (питинги, свищи и т.д.) [5]. Для обеспечения длительной безопасной эксплуатации оборудования, трубопроводов, других сооружений в настоящее время актуально развитие технологий диагностирования с применением методов ультразвуковой дефектоскопии.

Рассеяние ультразвуковых волн на объемных дефектах происходит в более широком диапазоне углов по сравнению с рассеянием на аналогичных по апертуре плоскостных дефектах. Соответственно, амплитуда сигнала от объемного дефекта чаще всего существенно меньше той, которая принималась бы в этом же направлении от плоскостного дефекта при его оптимальной ориентации. В работе [6] проведено исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем. В настоящей статье рассматривается применение волн Рэлея, возбуждаемых аналогичным образом, для обеспечения выявляемости плоскостных дефектов в зависимости от глубины, ширины раскрытия и угла наклона, а также возможность классификации дефектов на плоскостные и объемные по результатам такого контроля.

В качестве модели плоскостного дефекта, выходящего на поверхность, используется поверхностный паз, выполненный электроэрозийным способом. Известно, что такие дефекты можно выявлять с помощью волны Рэлея [7]. В работах [8—10] исследовалось взаимодействие поверхностных волн с несовершенствами поверхности типа «щель», «полуцилиндрическая выемка» и «клин», были получены зависимости коэффициента прохождения и отражения от размеров указанных моделей дефектов. Однако для практического применения полученных решений существуют ограничения, связанные с тем, что при возбуждении волны Рэлея пьезопреобразователем, для обеспечения акустического контакта, поверхность металла необходимо смачивать жидкостью,



которая в процессе проведения контроля неизбежно попадает в область между передней гранью преобразователя и выявляемым дефектом. При этом ультразвуковые волны, не достигнув дефекта, частично проникают в жидкость, рассеиваются на ее неоднородностях, и в результате на преобразователь приходят множественные шумы, которые могут полностью экранировать сигнал от дефекта.

Известно, что от создающего шумы неоднородного слоя контактирующей жидкости можно избавиться, если для ввода ультразвука в металл вместо пьезопреобразователей использовать электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП). Например, применительно к толщинометрии такой опыт описан в работах [11, 12]. Известен также опыт использования ЭМАП для наклонного ввода в металл объемных волн [13] и волн Релея [14, 15].

В связи с вышесказанным представляется интерес использовать релеевские волны, возбуждаемые ЭМАП, для выявления выходящих на поверхность металла плоскостных дефектов. Данный вариант ультразвукового контроля требует дополнительных исследований, т. к. в литературных данных не удалось обнаружить достоверную информацию о зависимости параметров принимаемого сигнала от глубины, ширины и угла наклона локального плоскостного дефекта коррозионного происхождения.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили с использованием конфигурируемого блока дефектоскопической электроники Sonaflex [16], к которому был подключен ЭМАП, излучающий релеевские волны, с центральной частотой 1 МГц. Для позиционирования ЭМАП на образце с искусственными дефектами применялось то же устройство, что и в работе [6].

Исследования проведены на образцах трех типов из низкоуглеродистой стали при чистоте поверхности образцов не хуже, чем Rz 20. В образцах электроэрозионным способом выполнены пазы, имитирующие плоскостные дефекты:

образцы первого типа с вертикальными пазами раскрытием 0,15 мм, глубиной 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 мм — для оценки влияния глубины паза на амплитуду эхосигнала;

образцы второго типа с вертикальными пазами глубиной 0,5 мм, раскрытием 0,15; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 мм — для оценки влияния раскрытия паза на амплитуду эхосигнала;

образцы третьего типа с пазами раскрытием 0,15 мм, глубиной 0,5 мм, углом наклона к поверхности образца 15; 30; 45; 60; 75; 90° — для оценки влияния этого угла на амплитуду эхосигнала; на данных образцах измерения проводили с двух сторон: при наклоне пазов в сторону преобразователя и от него.

Выбор минимальных значений раскрытия и глубины пазов выполнен в соответствии с уровнями чувствительности, при которых должно обеспечиваться выявление дефектов. Максимальные значения глубины пазов определены так, чтобы она несколько превышала расчетную глубину проникновения волны Релея в металл на используемой частоте. Наконец, угол наклона пазов выбран максимально широким — от практически параллельных поверхности образцов до перпендикулярных ей.

Фотография одного из образцов с вертикальными пазами показана на рис. 1.



Рис. 1. Фотография образца с поверхностными пазами.

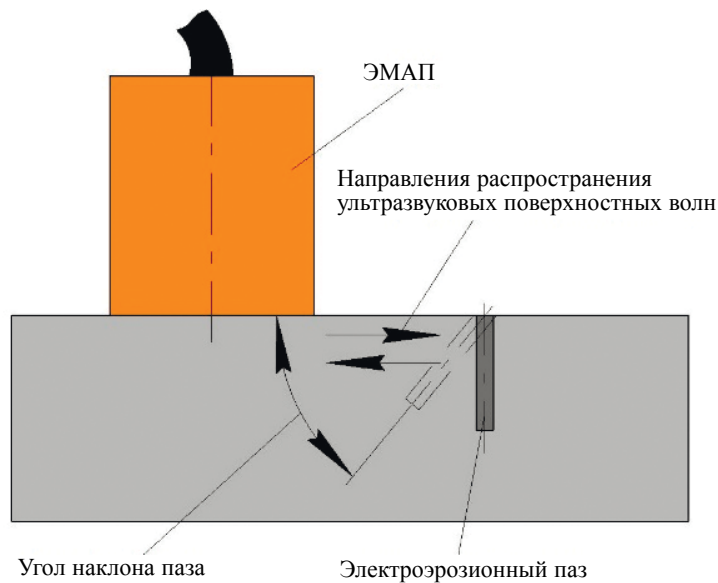


Рис. 2. Схема измерения. Установка ЭМАП на образец.

Схема излучения—приема волны Релея с помощью ЭМАП показана на рис. 2. С целью исключения влияния затухания на результаты измерений расстояние от передней грани ЭМАП до паза вдоль поверхности образца выбиралось постоянным, причем оно было минимальным настолько, чтобы отраженный от паза сигнал уверенно разрешался на А-скане от зондирующего импульса. С учетом изменения ширины раскрытия пазов разница между временем прихода эхосигналов от различных пазов не превышала 1 мкс.

Основной объем измерений выполнен при непосредственном контакте ЭМАП с поверхностью образцов, причем акустическая ось преобразователя ориентировалась перпендикулярно плоскости поверхности вертикальных пазов. Однако дополнительно было исследовано влияние угла поворота ЭМАП относительно дефекта и величины зазора между преобразователем и поверхностью объекта контроля на амплитуду регистрируемого эхосигнала от пазов. Эти последние серии измерений выполнены на образце с пазом глубиной 1 мм и раскрытием 0,15 мм.

Для определения влияния угла поворота ЭМАП поворачивался в оснастке относительно своей оси с шагом в  $1^\circ$ . При каждом повороте производилась фиксация уровня амплитуды эхосигнала. Поворот ЭМАП осуществлялся до тех пор, пока уровень амплитуды эхосигнала не понижался до уровня шумов.

Для определения влияния величины зазора ЭМАП поднимался в оснастке относительно поверхности исследуемого образца с шагом 0,1 мм. При каждом подъеме производилась фиксация уровня амплитуды эхосигнала. Подъем ЭМАП осуществлялся до тех пор, пока уровень амплитуды эхосигнала не понижался до уровня шумов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения уровня шумов было произведено 50 измерений на бездефектном участке образцов. Для данной выборки определялось наилучшее распределение по информационному критерию Акаике и Байесовскому критерию [17]. В результате наиболее подходящим распределением оказалось нормальное. За уровень шумов был принят 95 % квантиль нормального распределения, который при выбранной настройке оборудования составил  $-41,6$  дБ. При этом вероятность ложного срабатывания не превышает 5 % [6].

Зависимость амплитуды эхосигнала от угла поворота преобразователя представлена на рис. 3а, из которого видно, что поворот преобразователя на  $10,8^\circ$  приводил к падению амплитуды эхосигнала на 6 дБ. Зависимость соотношения амплитуды эхосигнала от зазора между ЭМАП и поверхностью объекта контроля представлена на рис. 3б: увеличение зазора между ЭМАП и поверхностью объекта контроля на 1,27 мм приводило к падению амплитуды эхосигнала на 6 дБ.



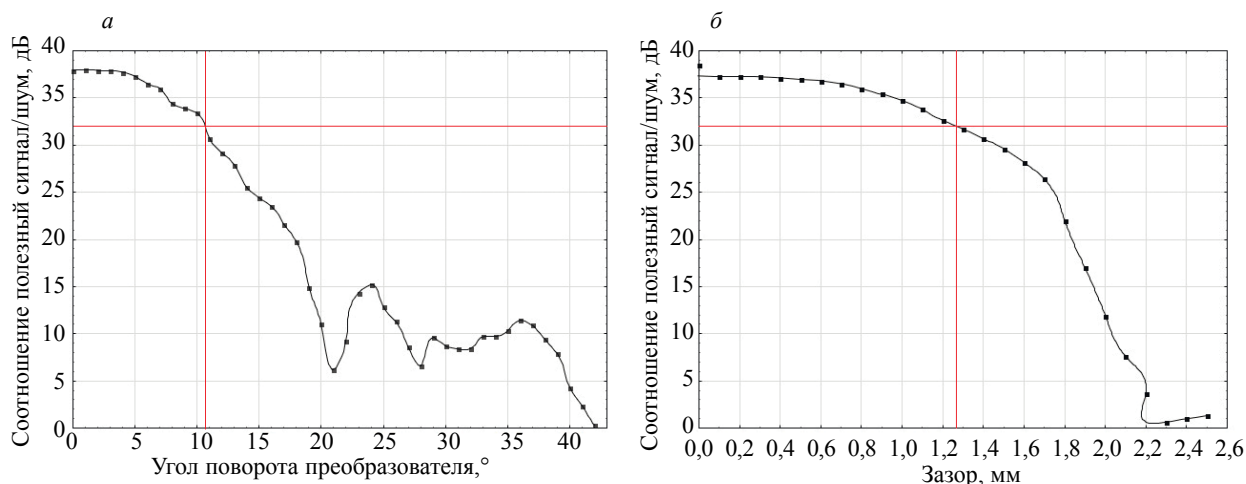


Рис. 3. Зависимость соотношения амплитуды сигнала относительно уровня шумов от: угла поворота преобразователя (а), зазора между ЭМАП и поверхностью объекта контроля (б).

При этом небольшие углы поворота ЭМАП в пределах до 3—4° и небольшие зазоры до 0,2—0,3 мм практически не сказывались на амплитуде принимаемого экосигнала.

Этот вывод важен для практического использования ЭМАП, поскольку очевидно, что при контроле реальных изделий исключить люфты и малые отклонения преобразователя от расчетного положения практически невозможно.

Далее рассмотрим влияние значения глубины пазов на амплитуды принимаемых сигналов. Из рис. 4а видно, что зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины поверхностного паза линейная, если глубина паза не превышает ориентировочно 1,0 мм. При дальнейшем увеличении глубины паза амплитуда сигнала выходит в насыщение, поскольку глубина проникновения релейской волны в металл обычно ограничена длиной волны. На рис. 4б представлена линейная зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины поверхностного паза для значений глубин, меньших 1,0 мм. Рассчитанный коэффициент корреляции  $r^2$  составляет 0,87, что соответствует сильной линейной зависимости.

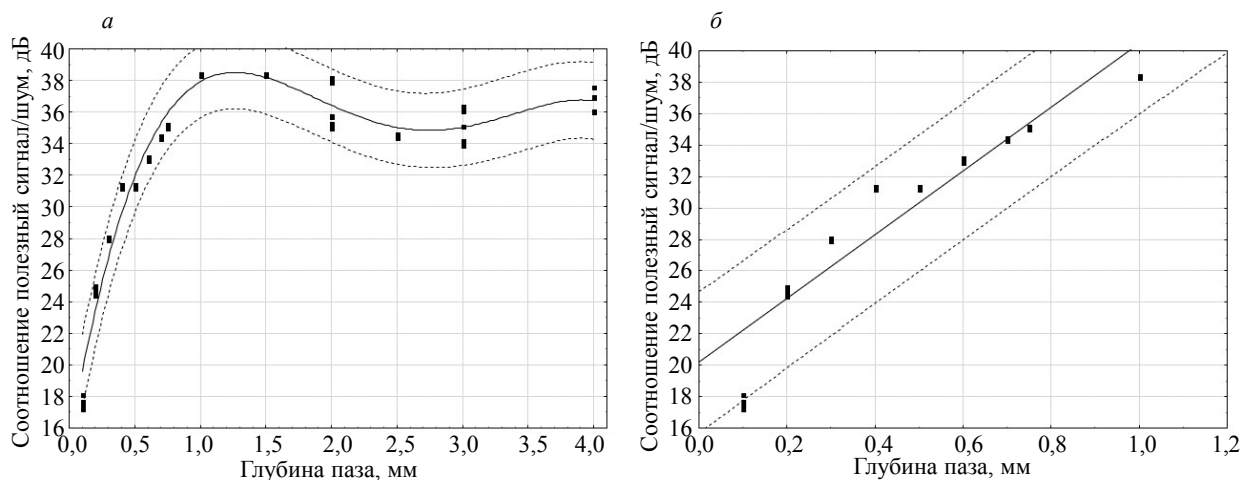


Рис. 4. Отношение амплитуда сигнала/уровень шумов при изменении глубины паза: полный диапазон глубин (а), диапазон глубин до 1,0 мм (б).

На рис. 5 представлены результаты измерения отношения амплитуды экосигнала к уровню шумов при изменении ширины паза. Видно, что в данном случае какая-либо зависимость не про-

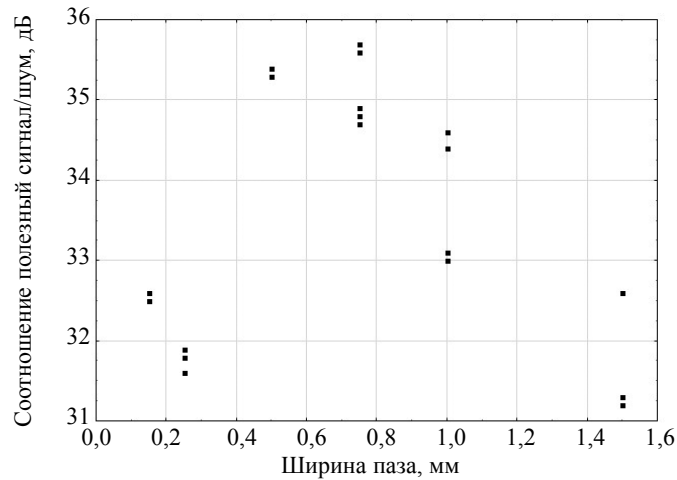


Рис. 5. Отношение амплитуда сигнала/уровень шумов при изменении ширины паза.

смачивается, что подтверждает известный факт о том, что для трещин (пазов) достаточно большого раскрытия, например, от 0,15 мм, как в рассматриваемых экспериментах, ширина раскрытия дефекта не оказывает существенного влияния на амплитуду ультразвукового эхосигнала.

Зависимости соотношения амплитуды эхосигнала относительно уровня шумов от угла наклона паза показаны на рис. 6. Анализ этих данных показал, что имеет место сильная линейная зависимость амплитуды сигнала от угла наклона паза: коэффициент корреляции  $r^2$  равен 0,81 для углов наклона от 15 до 90° (рис. 6а) и равен 0,73 для углов наклона от 90 до 165° (рис. 6б).

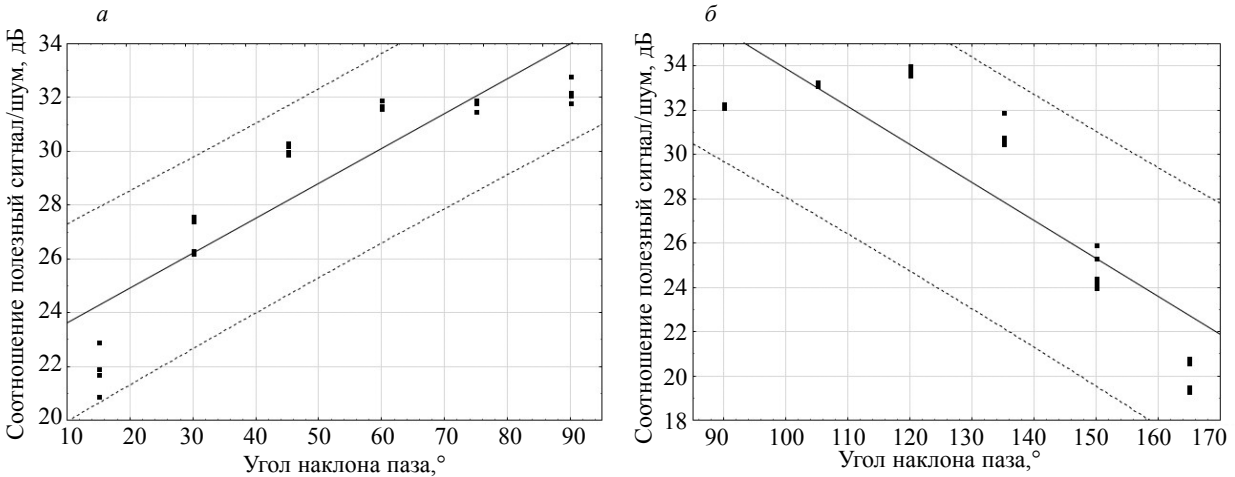


Рис. 6. Отношение амплитуда сигнала/уровень шумов при изменении угла наклона паза: от 15 до 90° (а); от 90 до 165° (б).

Для зависимостей амплитуд сигналов от глубины и наклона паза можно построить кривые вероятности выявления дефектов, основываясь на линейных моделях — кривые PoD (Probability of Detection) [18].

Для этого с учетом определенного уровня шумов и графиков на рис. 4б и 6 необходимо было выбрать наиболее подходящую из четырех моделей:  $\hat{a}$  vs.  $a$ ,  $\hat{a}$  vs.  $\log(a)$ ,  $\log(\hat{a})$  vs.  $a$  или  $\log(\hat{a})$  vs.  $\log(a)$ . Согласно [19], для выбора модели линейной регрессии можно воспользоваться критериями Акаике (AIC) и Байеса (BIC), которые для данного случая вычисляются по формулам:

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k, \quad (1)$$

$$BIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \cdot \ln(n), \quad (2)$$

где  $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  — сумма квадратов ошибок;  $k$  — число параметров модели,  $n$  — объем выборки.

Рассчитанные значения критериев AIC и BIC для зависимостей амплитуды сигналов от глубины и угла наклона паза для различных PoD моделей приведены в табл. 1—3 соответственно.

Таблица 1

**Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от глубины паза**

Модель PoD	AIC	BIC
$\hat{a}$ vs. $a$	71,97	77,39
$\hat{a}$ vs. $\log(a)$	-32,95	-27,53
$\log(\hat{a})$ vs. $a$	-199,77	-194,35
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-282,01	-276,59

Таблица 2

**Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от угла наклона паза от 15 до 90°**

Модель PoD	AIC	BIC
$\hat{a}$ vs. $a$	35,36	39,57
$\hat{a}$ vs. $\log(a)$	-3,2	1,01
$\log(\hat{a})$ vs. $a$	-157,87	-153,67
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-193,87	-189,66

Таблица 3

**Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от угла наклона паза от 90 до 165°**

Модель PoD	AIC	BIC
$\hat{a}$ vs. $a$	64,19	68,39
$\hat{a}$ vs. $\log(a)$	71,92	76,12
$\log(\hat{a})$ vs. $a$	-131,01	-126,81
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-123,46	-119,26

Модель  $\log(\hat{a})$  vs.  $\log(a)$  имеет наименьшие значения AIC и BIC для зависимостей амплитуды сигнала от глубины и угла наклона паза от 15 до 90°. Для зависимости амплитуды сигнала от угла наклона паза от 90 до 165° лучшей моделью по критериям AIC и BIC является  $\log(\hat{a})$  vs.  $a$ .

Кривые PoD для указанных зависимостей были построены в программном обеспечении mh1823 [20] и приведены на рис. 7а—в.

В качестве уровня принятия решений использовано значение отношения полезный сигнал/шум, при котором вероятность ложного срабатывания не превышает 1%. Это соотношение составило 17 дБ для расчетов по глубине паза, 20 дБ для расчетов по углу наклона паза в диапазоне от 15 до 90° и 19 дБ для расчетов по углу наклона паза в диапазоне от 90 до 165°.

Из рис. 7 видно, что с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 % размеры минимального поверхностного паза, имитирующего выходящий на поверхность протяженный плоскостной дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающим рэлеевские волны на частоте 1 МГц, равны: глубина 0.1 мм, минимальный угол наклона 12°, а максимальный — 156°.

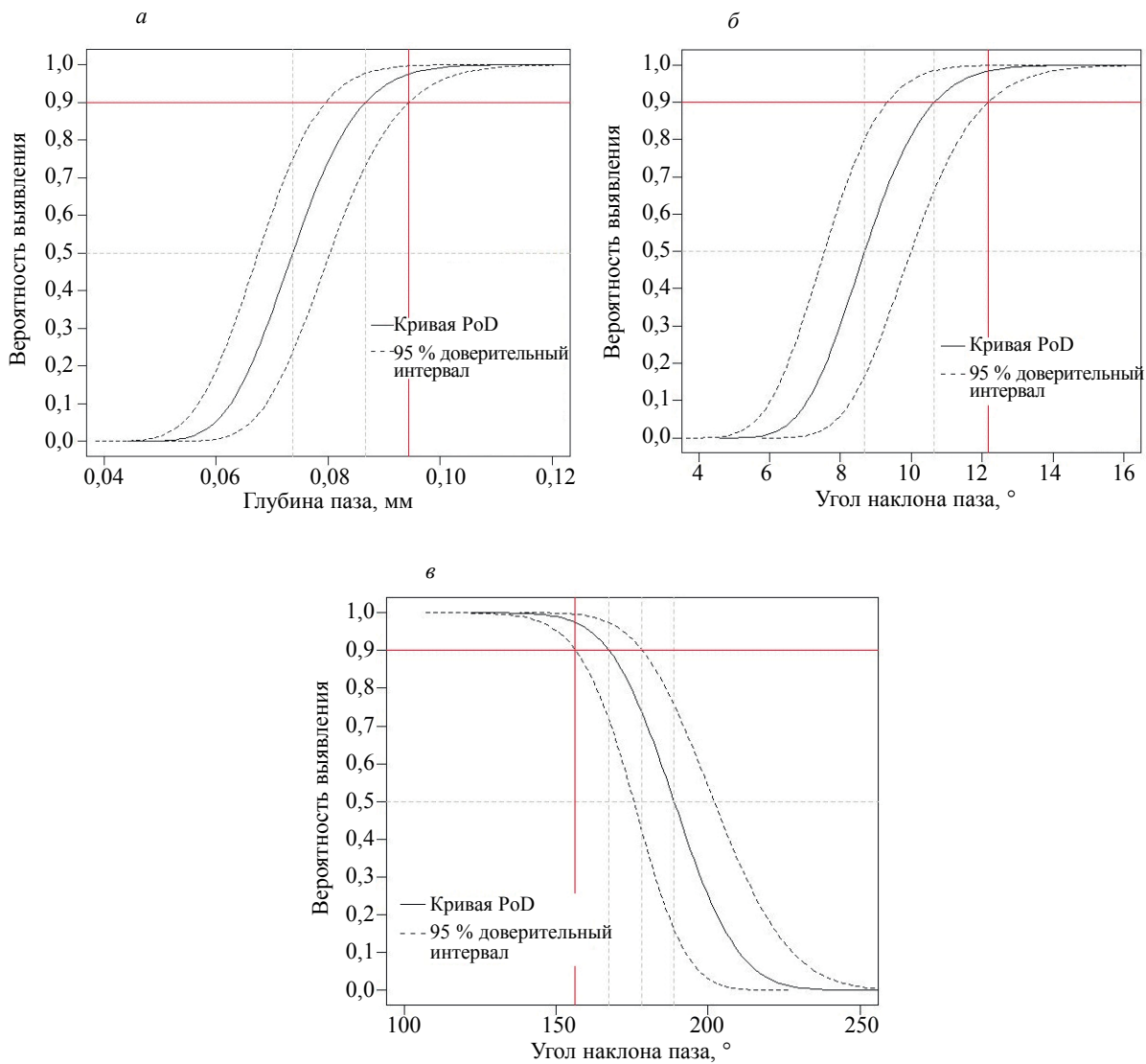


Рис. 7. Кривые вероятности выявления в зависимости от глубины паза (а), от угла наклона паза от 15 до 90° (б) и от наклона паза от 90 до 165° (в).

Имея в виду, что в данном случае скорость релейской волны в стали составляет ориентировочно  $3,0 \cdot 10^3$  м/с, то длина этой волны составляет  $\lambda \approx 3$  мм. Тогда в условиях проведенного эксперимента получим, что с вероятностью не менее 90 % релейская волна, излучаемая электромагнитно-акустическим преобразователем, позволяет уверенно выявлять выходящие на поверхность протяженные плоскостные дефекты глубиной ориентировочно  $0,03\lambda$  или минимальным углом наклона  $12^\circ$ , а максимальным —  $156^\circ$ . При этом монотонные характер роста амплитуды эхосигнала от паза при росте глубины паза позволяет сделать вывод о возможности оценки размера (глубины) паза по амплитуде принятого сигнала. Однако следует иметь в виду, что для такой оценки необходимо предварительно убедиться в том, что оценивается размер (глубина) плоскостного дефекта.

В связи с этим целесообразно сравнить выявляемость плоскостных и объемных дефектов по рассматриваемой схеме. Для этого на рис. 8 обобщены результаты, приведенные в настоящей статье для амплитуд сигналов, отраженных от плоскостных дефектов, и результаты, описанные в работе [6] для амплитуд сигналов, отраженных от объемных дефектов, выходящих на поверхность.

Как и следует ожидать, амплитуда сигналов, отраженных от пазов, больше, чем амплитуда сигналов, отраженных от сверлений аналогичного размера. Однако области амплитудных значений для дефектов этих двух типов перекрывают друг друга приблизительно на 17 дБ. Поэтому

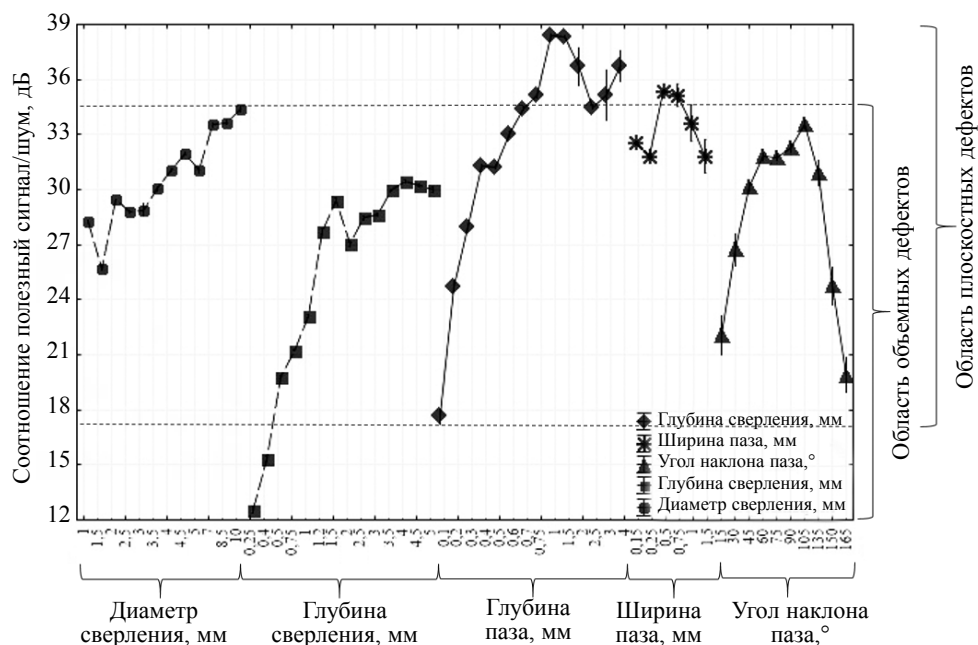


Рис. 8. Обобщенные результаты по всем проделанным измерениям.

попытка классифицировать тип дефекта только по амплитудному признаку приводит к неоднозначности при интерпретации типа дефекта. Для оценки размера (глубины) дефекта по амплитудному признаку необходимо предварительно отнести его к какому-либо конкретному классу: плоскостным или объемным дефектам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование выявляемости поверхностных пазов, имитирующих выходящие на поверхность протяженные плоскостные дефекты, с помощью ЭМАП, излучающего рэлеевские волны. Измерения проведены на специально подготовленных образцах из низкоуглеродистой стали с поверхностными пазами, имеющими переменную глубину и угол наклона при чистоте поверхности образцов не хуже, чем Rz 20.

Определено влияние угла поворота ЭМАП и величина зазора между ЭМАП и поверхностью объекта контроля на амплитуду эхосигнала от поверхностного паза. Установлено, что поворот преобразователя на  $10,8^\circ$  приводит к падению амплитуды эхосигнала на 6 дБ, и увеличение зазора между ЭМАП и поверхностью объекта контроля на 1,27 мм приводит к падению амплитуды эхосигнала на 6 дБ. При этом небольшие углы поворота ЭМАП в пределах до  $3\text{--}4^\circ$  и небольшие зазоры до 0,2—0,3 мм практически не сказывались на амплитуде принимаемого эхосигнала.

Установлено, что при выявлении пазов волной Релея с использованием рассмотренного ЭМАП на частоте 1 МГц между амплитудой принятого сигнала и глубиной паза до 1,0 мм имеет место сильная линейная зависимость с коэффициентом корреляции  $r^2 = 0,87$ . Так же присутствует сильная линейная зависимость между амплитудой принятого сигнала и углом наклона поверхностного паза в диапазонах от  $15$  до  $90^\circ$  и от  $90$  до  $165^\circ$  с коэффициентами корреляции  $r^2 = 0,81$  и  $r^2 = 0,73$  соответственно.

Используя информационные критерии Акаике (AIC) и Байеса (BIC) для построения кривых вероятности (PoD) выявления плоскостных дефектов типа «паз», установлено, что в условиях проведенных измерений с вероятностью 90 % с доверительным интервалом 95 % минимальный протяженный плоскостной дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающим рэлеевские волны, имеет ориентировочно глубину  $0,03\lambda$  или минимальный угол наклона  $12^\circ$ , а максимальный —  $156^\circ$ . Например, на частоте 1 МГц это соответствует поверхностному пазу глубиной 0,1 мм или минимальным углом наклона  $12^\circ$ , а максимальным —  $156^\circ$ .

Приведенные результаты показывают, что электромагнитно-акустические преобразователи, создающие волну Релея, можно использовать для выявления моделей плоскостных дефектов коррозионного происхождения минимальной глубиной от 0,1 мм. Для получения данных о выявлении реальных дефектов целесообразно провести аналогичное исследование соответствующих образцов металла, например, фрагментов трубопроводов со стресс-коррозионными трещинами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова Д.Г. Дефекты технологических трубопроводов: типология, оценка влияния на эксплуатацию // Промбезопасность-Приуралье. 2012. № 8. С. 24—28.
2. Ерехинский Б.А., Маслаков С.В., Шустов Н.И., Митрофанов А.В., Барышев С.Н., Заряев М.Ю., Кравиц А.В., Егоров С.В. Растрескивание металла задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений // Территория Нефтегаз. 2014. № 2. С. 31—36.
3. Сафина И.С., Каузова П.А., Гуцин Д.А. Оценка технического состояния резервуаров вертикальных стальных // ТехНадзор. 2016. № 3 (112). С. 39—42.
4. Бутусов Д.С., Егоров С.И., Завьялов А.П., Ляпичев Д.М. Коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов / Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. 80 с.
5. Калининченко Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. С. 55.
6. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 13—21.
7. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
8. Викторов И.А. О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. № 3. С. 463—465.
9. Дымкин Г.Я., Максимов А.В. Исследование отражения рэлеевских волн от подповерхностных дефектов // Дефектоскопия. 1988. № 3. С. 93—94.
10. Лохов В.П. Исследование дифракции волн Релея на ребре трещины // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 39—47.
11. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н., Пономарев С.Н., Безлюдько Г.Я., Миховски М., Мирчев Й. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА методом // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 60—80.
12. Могильнер Л.Ю., Временко А.И., 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. Т. 9. № 3. С. 315—325.
13. Луценко Г.Г. К вопросу о наклонном излучении объемных сдвиговых волн электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2001. № 10. С. 36—47.
14. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Могильнер Л.Ю. Оптимизация параметров механизированного ультразвукового контроля протяженных сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 3. С. 574—585.
15. Алешин Н.П., Сыркин М.М., Григорьев М.В., Козлов Д.М. Автоматизированный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГТУ» // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 28—31.
16. Компания Nordinkraft [Электронный ресурс]. <https://nordinkraft.de/sonaflex-ru/> (дата обращения: 26.01.2021).
17. Gouriерoux C., Monfor A. Statistics and Econometric Models. V. 2. Testing, Confidence Regions, Model Selection and Asymptotic Theory, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995. 526 p.
18. [Электронный ресурс] [https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A\(2009\).pdf](https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A(2009).pdf) [дата обращения: 26.01.2021].
19. Gordon Rachel A. Applied statistics for the social and health sciences. New York. USA: Routledge, 2012. 742 p.
20. [Электронный ресурс] <http://statisticalengineering.com/mh1823/> (дата обращения: 26.01.2021).

## РАЗВИТИЕ ВИБРОТЕРМОГРАФИИ КАК МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ

© 2021 г. С.В. Дубинский<sup>1</sup>, Е.А. Казьмин<sup>1</sup>, И.Е. Ковалев<sup>1</sup>, А.Б. Корнилов<sup>1\*</sup>, Г.А. Корнилов<sup>1</sup>, В.М. Костенко<sup>1</sup>, А.А. Чернявский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ» им. проф. Н.Е. Жуковского),

Россия 140180 Московская обл., г. Жуковский, 1

\*E-mail: andrey.kornilov@tsagi.ru

Поступила в редакцию 05.03.2021; после доработки 22.04.2021

Принята к публикации 23.04.2021

Одним из перспективных методов теплового неразрушающего контроля изделий из полимерных конструкционных материалов (ПКМ) является вибротермография, когда тепловое возбуждение объекта производится с помощью механических вибраций звуковой или ультразвуковой частоты, а контроль изменения температурного поля объекта осуществляется методами термографии. В работе рассмотрена методика испытаний и приведены результаты термографических исследований при проведении вибрационных прочностных испытаний изделий из ПКМ с ударными повреждениями.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, стенд, вибротермография, ударное повреждение, вибрация, расслоение, трещина, разрушение, тепловой неразрушающий контроль, термография, испытание, термограмма, термопрофилограмма, активатор, частота, колебание.

DOI: 10.31857/S013030822106004X

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема возникновения и развития дефектов в конструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ), связанных с технологическими несовершенствами и случайными эксплуатационными воздействиями [1—3], требует отработки и внедрения новых методов неразрушающего контроля. В настоящее время получил широкое развитие неразрушающий контроль изделий из ПКМ с использованием методов активной термографии, в рамках которого нагрев контролируемой поверхности осуществляется с помощью различных внешних источников энергетического нагружения. При таком подходе решается широкий круг задач по обнаружению и измерению характеристик дефектов и повреждений различного рода [4, 5].

Однако в ряде случаев необходимо не только обнаружить дефект или повреждение, но и исследовать процесс их возникновения и дальнейшего развития при переменных нагрузках с определением прочностных характеристик изделия. С этой целью получило развитие другое направление активной термографии, когда в качестве энергетического активатора возникающего информационного теплового поля исследуемого объекта выступают термомеханические процессы, происходящие при его прочностных испытаниях. Так, в работах [6—9] приведены результаты таких исследований применительно к прочностным испытаниям изделия на удар, растяжение и изгиб. В этом случае термография приобретает двойное функциональное назначение: во-первых, как пассивный онлайн-контроль развития теплового поля сложной поверхности различных типов образцов для идентификации происхождения и распространения повреждений, во-вторых, как активный неразрушающий метод оценки полученных повреждений после механических воздействий.

Одним из актуальных применений активной термографии, а точнее ее составной части — вибротермографии, является неразрушающий контроль процесса возникновения и развития повреждений при вибрационных механических испытаниях изделий из ПКМ, проходящих при различных параметрах вибраций для оценки характеристик прочности и остаточного ресурса объектов.

Развитие вибротермографии связано с использованием принудительных контактных и бесконтактных акустических вибраций в полосе основных резонансных частот контролируемого объекта [10], когда наиболее эффективно осуществляется тепловая стимуляция изделия с реально имеющимися повреждениями и дополнительно возникающими при нагрузке внутренними дефектами.

Исходя из характерных размеров трещин в образце из ПКМ, резонансные частоты вибраций для эффективного обнаружения таких дефектов должны составлять 10—100 кГц. В то же время

частота механических вибраций, приводящих к резонансу испытуемого изделия, установленного на вибростенде, значительно меньше. Данный диссонанс частот вносит определенные сложности в методику проведения неразрушающего контроля при вибрационных испытаниях. По-видимому, в этом случае должен быть реализован метод на основе синтеза акустических вибраций, создаваемых в ходе прочностных испытаний, и вибраций, наиболее эффективных для обнаружения внутренних дефектов. Дополнительный источник вибрационного нагружения контролируемых изделий должен функционировать в широкой полосе частот колебаний, перекрывающих все резонансные частоты возможных внутренних дефектов. Однако такая система будет достаточно сложной, поскольку потребуются использование нескольких технических средств, функционирующих на различных физических принципах.

В связи с этим, первым шагом исследований стало проведение совместных прочностных и дефектоскопических испытаний с использованием только низкочастотных вибраций, что позволит выявить достоинства и недостатки при корреляции метода прочностных испытаний с методом вибротермографического неразрушающего контроля, а также определить дальнейшие пути развития последнего в части применения дополнительного виброактиватора.

В рамках данной работы были решены следующие задачи:

создание экспериментальной установки вибротермографии изделий из полимерных конструкционных материалов с использованием принудительных механических вибраций;

разработка методики определения теплового поля образца при вибрациях, причем с определением момента его разрушения;

экспериментальные исследования и анализ результатов.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения вибротермографических исследований была создана экспериментальная установка на основе электродинамического стенда ВЭДС-400 (рис. 1), который предназначен для проведения прочностных испытаний изделий на воздействие однокомпонентной гармонической вибрации в вертикальном направлении и испытаний на вибропрочность и виброустойчивость. Вибростенд обеспечивает создание, измерение и автоматическое поддержание вибрационных колебаний в заданном диапазоне частот, ускорений и амплитуд, для чего в различных местах образца установлены вибро- и тензодатчики.

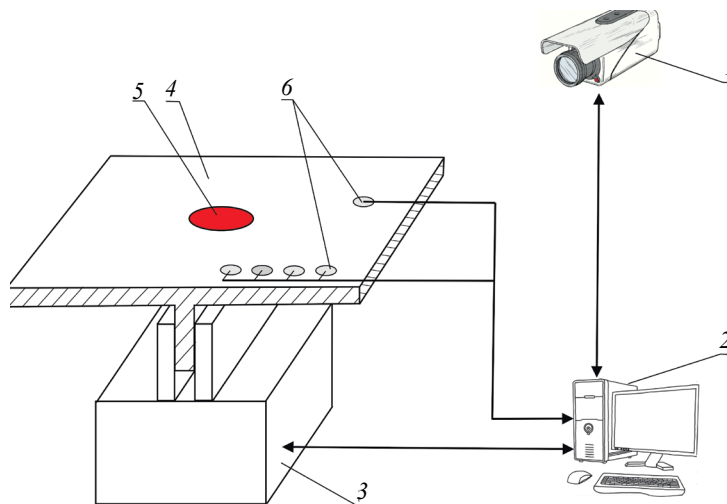


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — тепловизор; 2 — компьютер; 3 — вибростенд; 4 — образец; 5 — место ударного повреждения; 6 — тензо- и вибродатчики.

Объектом исследований являлись углепластиковые соединения «обшивка-стрингер» («Т-образцы»), которые традиционно используются при решении некоторых задач прочности в качестве представительных образцов [11—15]. Обшивка и стрингер Т-образцов состояли из 9 слоев препрега HexPly на основе углеродного волокна (M21/34%/UD194/IMA, верхний индекс «с») и



одного слоя на основе стеклянного волокна (M21/45%/120, верхний индекс «g»), причем с одинаковой схемой укладки ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ). Жгут в корне ребра выполнен из углеродной M21/34%/UD194/IMA. Механические свойства монослоя для этих материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства монослоя материалов

№	Материал	Характеристики				
		Модуль упругости при растяжении $0^\circ$ $E_{11}$ , ГПа	Модуль упругости при растяжении $90^\circ$ $E_{22}$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu_{12}$	Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	Углеволокно M21/34%/UD194/IMA	162,0	9,3	0,33	5,4	1580
2	Стекловолокно M21/45%/120	28,6	8,7	0,33	3,1	1770

Ударные повреждения Т-образов с различной энергией удара производились копром Instron CEAST 9350 с ударником диаметром 25 мм в центр образца по оси стрингера.

Температурное поле Т-образца в процессе вибраций регистрировали тепловизором SC7700M, расположенным над образцом под  $45^\circ$  так, чтобы одновременно визуировать обшивку и ребро стрингера (см. рис. 1). Рабочий спектральный диапазон тепловизора — 3,7—4,8 мкм, частота съемки — до 117 Гц в режиме полного кадра. Охлаждаемая фотоприемная матрица размером 640×512 пкс обеспечивает высокую температурную чувствительность NETD = 0,018 К. Программное обеспечение тепловизора позволяет проводить временную и пространственную цифровую обработку данных на современном уровне.

Достоинством разработанной экспериментальной установки является то обстоятельство, что она обеспечивает синхронность проведения теплового неразрушающего контроля исследуемых образцов с их вибрационными прочностными испытаниями при полном контроле характеристик вибраций соответствующими датчиками.

## 2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для отработки методики вибротермографии использовали Т-образцы с повреждениями от ударов 5 и 20 Дж. На обоих образцах был проведен входной неразрушающий ультразвуковой контроль, который показал наличие дефекта размерами 6×6 мм<sup>2</sup> для образца с ударом 5 Дж и 20×12 мм<sup>2</sup> для образца с ударом 20 Дж.

В ходе виброиспытаний также была осуществлена периодическая проверка на предмет роста дефектов в образцах методом УЗК, однако, как оказалось, для данного типа дефекта этот метод неприменим. Так, у образца с ударным повреждением 5 Дж при наработках порядка  $10^6$  циклов, а у образца с ударным повреждением 20 Дж — порядка  $10^5$  циклов был визуально обнаружен выход трещины на торцы образца, при этом обнаружить изменения размеров дефекта методом УЗК не удалось. Это связано с тем, что дефект от ударного воздействия в рассматриваемом случае распространяется по радиусному переходу «обшивка—стрингер», в котором, в силу его неоднородности и трехмерности, нет возможности проконтролировать изменения методом УЗК ни со стороны обшивки, ни со стороны стрингера из-за наличия тени для ультразвукового сигнала. Это обстоятельство стало одной из причин выбора термографии в качестве перспективного средства неразрушающего контроля дефектов в подобных конструкциях.

В ходе проведения вибротермографии в процессе вибрационных испытаний на образце с повреждением 5 Дж в первую очередь была рассмотрена возможность обнаружения самого повреждения, а на образце с повреждением 20 Дж исследовали процессы возникновения и развития трещины путем анализа временных, амплитудных и пространственных характеристик теплового поля.

Исследования были проведены по типовой методике усталостных испытаний конструктивно-подобных образцов при вибрационном нагружении, моделирующем воздействие акустического шума [16, 17], на электродинамическом вибростенде [15] (см. рис. 1). Образец подвергался воз-

действию узкополосной случайной вибрации с равномерной спектральной плотностью в заданной полосе частот. Ширина полосы выбиралась равной 1/3 октавы со среднегеометрической частотой, соответствующей 1-й резонансной частоте колебаний образца. Измерения показали, что для рассматриваемых образцов частоты резонанса лежали в пределах от  $\sim 302$  до  $\sim 316$  Гц. В связи с этим ширина полосы при испытаниях была принята равной 74 Гц, что соответствует полосе 1/3 октавы со стандартной среднегеометрической частотой 315 Гц. Нагрузка поддерживалась исходя из заданного среднеквадратичного значения деформации 600  $\mu\text{е}$  (мкм/м) по показаниям контрольных тензодатчиков, установленных в зоне максимальных деформаций (см. рис. 1). Испытания останавливались при достижении заданной длительности нагружения или при выявлении видимых повреждений образца или при снижении резонансной частоты образца более, чем на 2 % относительно начального значения.

Исследования по вибротермографии Т-образца из ПКМ с дефектом 5 Дж проводили по типовому временному циклу, включающему измерение тепловых полей до вибраций, в процессе вибраций и после вибраций (рис. 2а). При этом развитие теплового поля образца исследовалось как с включенными, так и с выключенными тензодатчиками для исключения их влияния на тепловое поле дефекта. Температурный сигнал в центре дефекта по отношению к бездефектной области, определяющий возможность обнаружения дефекта, рассчитывался согласно [1]. Как показал эксперимент (рис. 2б), температурный сигнал быстро нарастал на начальном этапе вибраций длительностью  $\sim 100$  с с дальнейшим выходом на установившийся режим, характеризуемый величиной ударного повреждения образца, параметрами упругих колебаний и характером трещины стрингера.

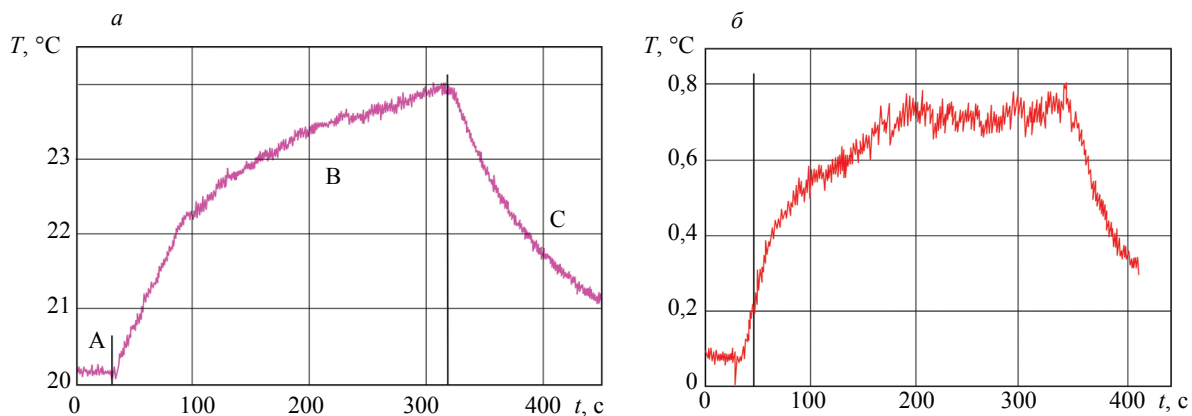


Рис. 2. Изменение температуры в центре образца и динамика температурного сигнала дефекта в процессе типового временного цикла испытаний:

а — изменение температуры в центре образца (А — до вибраций, В — стадия вибраций, С — после вибраций); б — динамика температурного сигнала области повреждения при вибрациях образца.

На полученных в процессе вибраций термограммах, представленных в одной температурной шкале (рис. 3), видно, что происходит плавный, но не однородный нагрев образца по линии стрингера с некоторой концентрацией теплового поля в виде эллипса вокруг зоны удара, а также рост

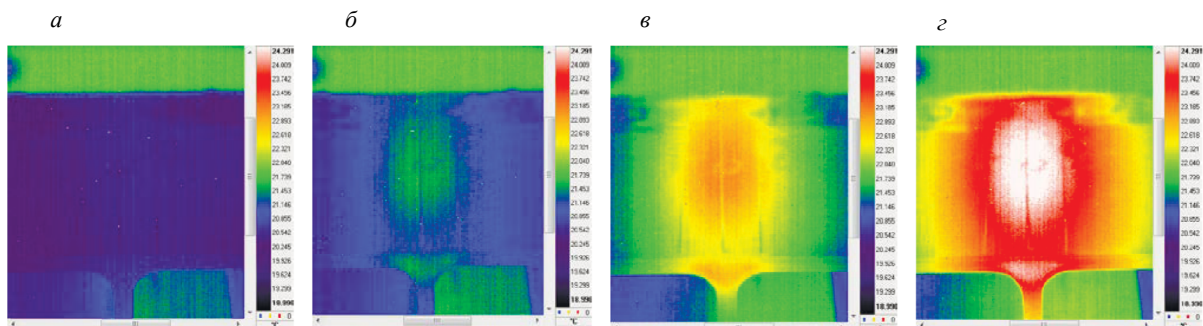


Рис. 3. Термограммы в процессе развития теплового поля при вибрациях образца:

а — до вибраций; б — на  $t = 60$  с; в — на  $t = 180$  с; з — на  $t = 300$  с.

температуры в области соединения стрингера с пластиной («чаши») с увеличением соответствующих площадей нагрева. Температура в центре дефекта при неустановившихся режимах вибраций в разных экспериментах поднималась на 4—5 °С за время ~300 с. При достижении установившегося режима вибронагрева образца по оценкам возможен рост температуры на 6—7 °С по отношению к начальному состоянию (рис. 2а).

Исходя из термомеханических представлений нагрева при вибрациях Т-образца, можно считать, что тепловое поле в центре образца формируется под действием ряда факторов: во-первых, упругих колебаний обшивки относительно стрингера, во-вторых, трения элементов области расслоения ударного повреждения, в-третьих, трения элементов области расслоения трещины стрингера.

Для выявления роли этих факторов был проведен подробный анализ термограмм на начальном участке вибронагрева, при этом форма пятна нагрева области дефекта в зависимости от времени рассматривалась в относительном масштабе, т.е. изображение нормировалось по температуре в диапазоне от минимальной до максимальной в пределах выбранной области анализа (рис. 4). Рассмотрение представленных нормированных термограмм образца показало, что форма пятна нагрева остается неизменной.

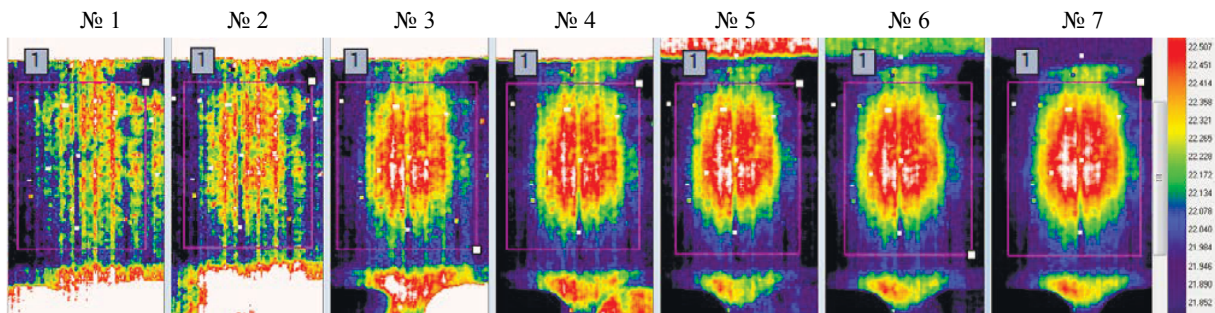


Рис. 4. Нормированные термограммы образца (№ 1 — до вибраций, № 2—№ 7 — при вибрациях с интервалом 10 с).

Таким образом, можно считать, что взаимное соотношение этих факторов в процессе вибронагрева практически не изменяется, а, следовательно, невозможно осуществить отдельную оценку теплового поля каждого определяющего фактора при данной методике исследований на одном образце в отдельном эксперименте.

При обработке исходных данных съемки был использован традиционный метод разностных термограмм. Так, применение разностных термоизображений, полученных при вычитании термограмм в конце и в начале режима вибронагрева, позволило исключить влияние постоянной внешней подсветки и оценить тепловое поле ударного повреждения на поверхности образца за счет использования пороговой обработки термограмм, т.е. выбора значения превышения температуры дефекта над фоном. При этом в зависимости от порогового значения температуры ( $T^*$ ), определяющего достоверность обнаружения, существенно изменяется размер теплового поля ударного повреждения (рис. 5).

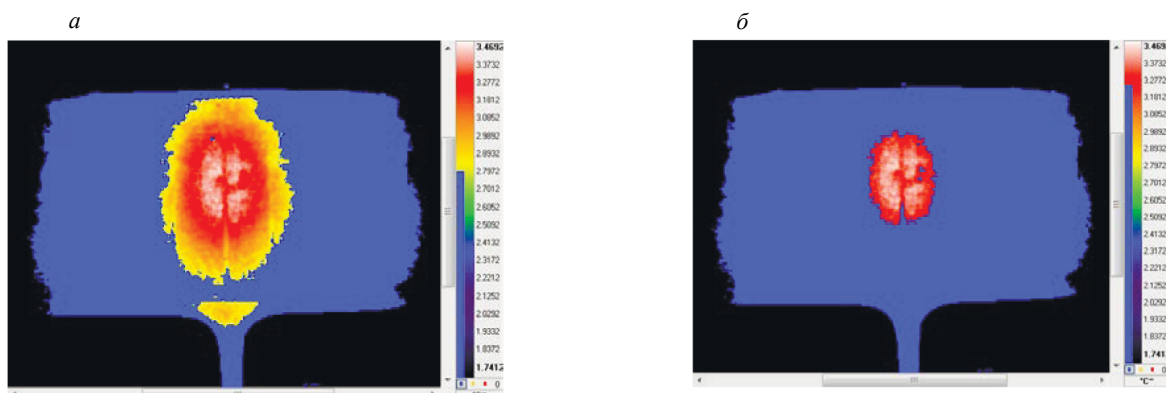


Рис. 5. Термограммы разностного термоизображения на режиме нагрева при различных значениях пороговой температуры ( $T^*$ ):

а — при низком значении; б — при высоком значении.

Помимо традиционных подходов впервые был использован метод анализа «шумовых» термограмм (рис. 6), когда информационным параметром является не температура, а ее среднеквадратическое отклонение от среднего значения, что существенно расширило рамки анализа результатов и позволило, в частности, исключить паразитное влияние включенных тензодатчиков на тепловое поле повреждения за счет того, что шум электрического нагрева тензодатчиков существенно меньше теплового шума, создаваемого при механическом трении элементов расслоения области дефекта. При этом стабильно и четко локализуется область расслоения ударного повреждения (см. рис. 5).

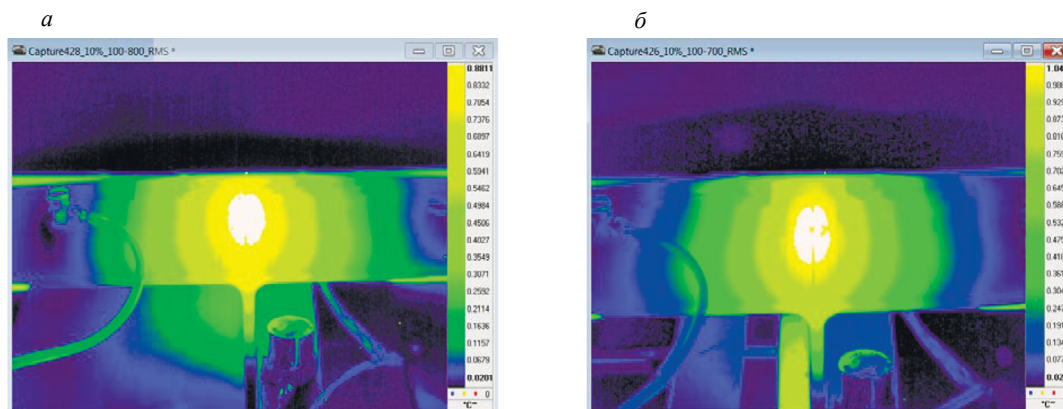


Рис. 6. «Шумовые» термограммы образца на временном интервале нагрева при вибрациях:  
*a* — с включенными тензодатчиками; *б* — с выключенными тензодатчиками.

Временное развитие «шумовых» термограмм на этапе охлаждения образца после вибраций (рис. 7) показывает существенное изменение качества и информативности термоизображений в зависимости от исследуемых временных интервалов (количества анализируемых изображений) и обеспечивает возможность надежного обнаружения ударного повреждения. Расчеты показали, что при «шумовом» температурном сигнале  $\Delta t = 0,0467^\circ\text{C}$  и среднеквадратическом отклонении  $\sigma_{\text{ш}} = 0,0026^\circ\text{C}$  отношение сигнал/шум для дефекта 5 Дж составляет  $s/\text{ш} = 18$  (см. рис. 7, термограмма № 6).

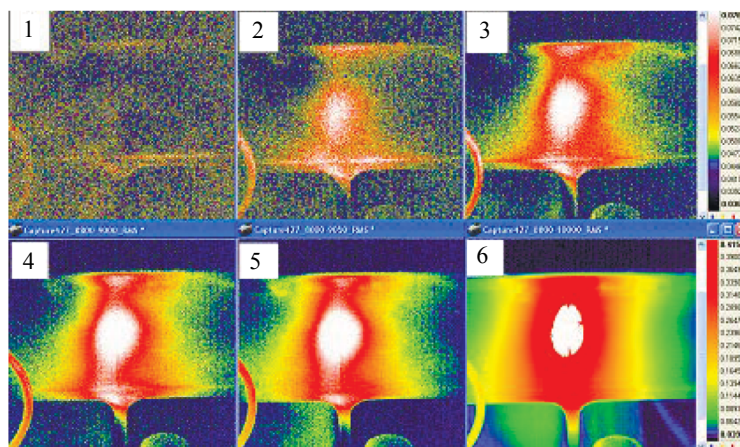


Рис. 7. Развитие «шумовых» термограмм образца с включенными тензодатчиками после выключения вибрации по временным интервалам: 2 с (1); 4 с (2); 6 с (3); 8 с (4); 10 с (5); 48 с (6).

Таким образом, разработанный подход позволяет в процессе вибрационных испытаний определять амплитудные, временные и пространственные характеристики теплового поля Т-образца, формируемого за счет различных факторов, и уверенно обнаруживать тепловое поле слабого ударного повреждения, визуально незаметного на поверхности изделия.



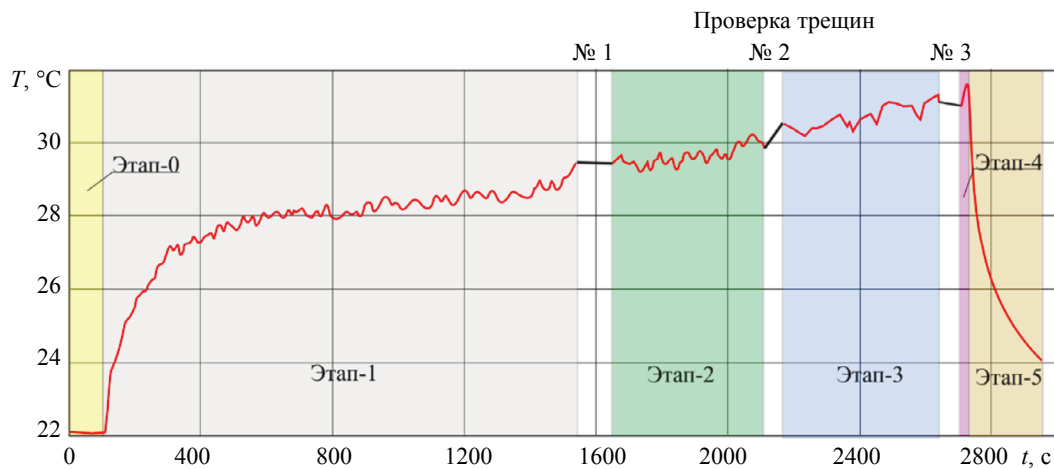


Рис. 8. Временной цикл вибротермографии образца с дефектом 20 Дж.

На втором этапе проведена вибротермография Т-образца с дефектом 20 Дж, при этом основной акцент исследований был направлен на обнаружение момента страгивания трещины. В связи с этим в цикле виброиспытаний были предусмотрены промежуточные проверки образца на наличие трещин № 1, № 2 и № 3 (рис. 8) методом УЗК. После включения вибраций температура дефекта в течение 300 с достаточно быстро растет от 22 до 27 °С. Затем скорость нагрева при вибрациях существенно уменьшается, и происходит медленный монотонный рост температуры с 28 до 31 °С за время от  $T_1=500$  до  $T_2=2500$  с, т.е. за время  $\approx 33$  мин.

При анализе временной цикл виброиспытаний был условно разбит на 6 этапов: 0 — до включения вибраций; 1 — до проверки трещин № 1; 2 — между проверками № 1 и № 2; 3 — между проверками № 2 и № 3; 4 — после проверки № 3 до выключения вибраций; 5 — охлаждение после выключения вибраций.

На термограмме и термопрофилограмме (рис. 9а, б), зарегистрированной до включения вибраций, хорошо видны яркие тепловые поля 3-х включенных тензодатчиков (ТД1, ТД2, ТД3). Температура датчиков № 1 и № 2 примерно на 3 °С выше температуры окружающего фона. Дефекта 20 Дж в центре образца до приложения вибронагрузки не видно. Зависимости изменения максимальных температур тензодатчиков по областям 1, 2, 3; дефекта 20 Дж — по области 4 и Т-зоны на пересечении ребер стрингера и пластины — по области 5 (рис. 9в) показывают непрерывный монотонный рост температуры при вибрациях за исключением перерывов на проверку наличия трещин, когда происходит скачкообразное уменьшение температуры по области 5 за счет смачивания водой Т-области с помощью кисточки. Скорость нагрева датчика № 1 при вибрациях существенно меньше, чем у других датчиков и дефекта.

На этапах № 1, № 2 и № 3 при почти установившихся режимах вибраций и незначительном изменении температуры Т-образца (на температурных «полочках») эффективной процедурой

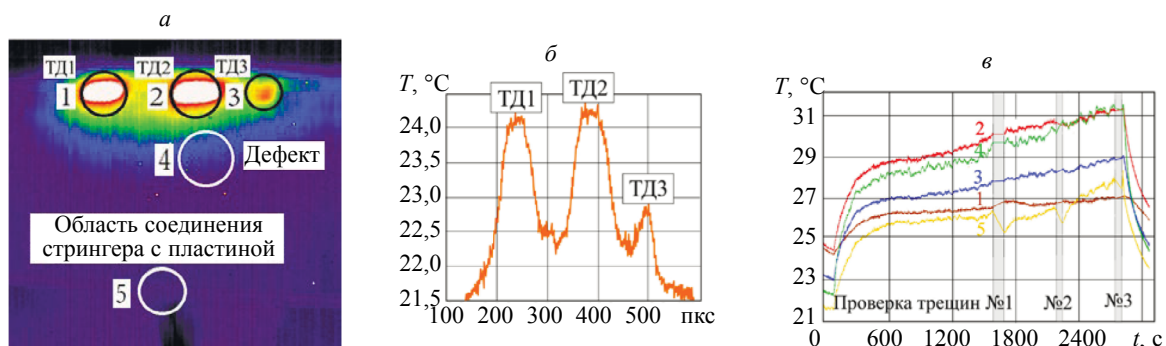


Рис. 9. Термограмма образца, термопрофилограмма в области установки датчиков до вибраций и динамика изменения температур по областям при вибрациях:

а — термограмма с указанием областей в районе датчиков (1—3), дефекта (4) и соединения стрингера с пластиной (5); б — термопрофилограмма; в — динамика изменения температур по областям 1—5.

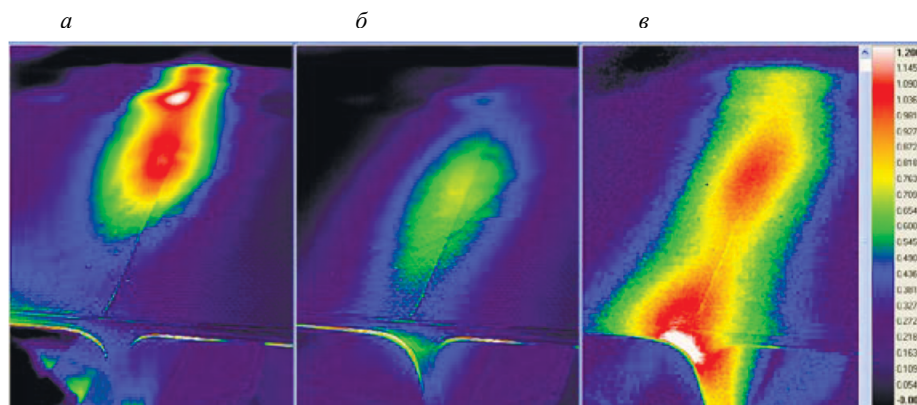


Рис. 10. Разностные термограммы для температурных «полочек» на различных этапах вибраций:  
а — этап № 1; б — этап № 2; в — этап № 3.

обработки термоизображений является вычитание термограмм, усредненных на конечном и начальном участках «полочки» (рис. 10). Так, при анализе было замечено, что в конце температурной «полочки» этапа-1 имеет место отличие теплового поля образца от середины «полочки» за счет дополнительного прогрева при вибрациях дефекта 20 Дж, тензодатчика ТД2 и дальней от тепловизора области образца от датчика ТД2 до края образца, находящейся левее оси стрингера (см. рис. 10). Возможно, это говорит о начале расслоения стрингера на этапе № 1 на дальней от наблюдателя стороне образца. На ближней визируемой тепловизором Т-области («чаше») никаких изменений температуры на этапе № 1 не зафиксировано.

Из разностной термограммы, рассчитанной на этапе № 2 (рис. 10б), видно, что на временном отрезке в 300 с незначительные изменения теплового поля произошли в области дефекта 20 Дж, связанные с его расширением в сторону визируемой Т-зоны до места соединения стрингера с ближним к наблюдателю краем пластины. Следует отметить, что в конце этапа № 2 в ближней Т-зоне образца происходит очень слабое изменение теплового поля, к тому же нелокализованное, как на этапе № 3, когда разностная термограмма однозначно подтверждает наличие аномального теплового поля в месте соединения ребра стрингера с пластиной (рис. 10в).

Преимуществом процедуры вычитания термограмм является то обстоятельство, что, во-первых, если исходные термограммы представлены в шкале 21—30 °С, то разностные термограммы — в шкале 0—(0,6—1,5) °С, что существенно повышает разрешающую способность термоизображений по температуре, и, во-вторых, исключается искажающее действие постоянных внешних факторов при регистрации изменений в тепловом поле образца.

«Шумовые» термограммы, рассчитанные по пятиминутным интервалам (по 300 кадрам) в конце этапов № 1, № 2 и № 3 (рис. 11), также показывают, что, во-первых, на этапе № 1

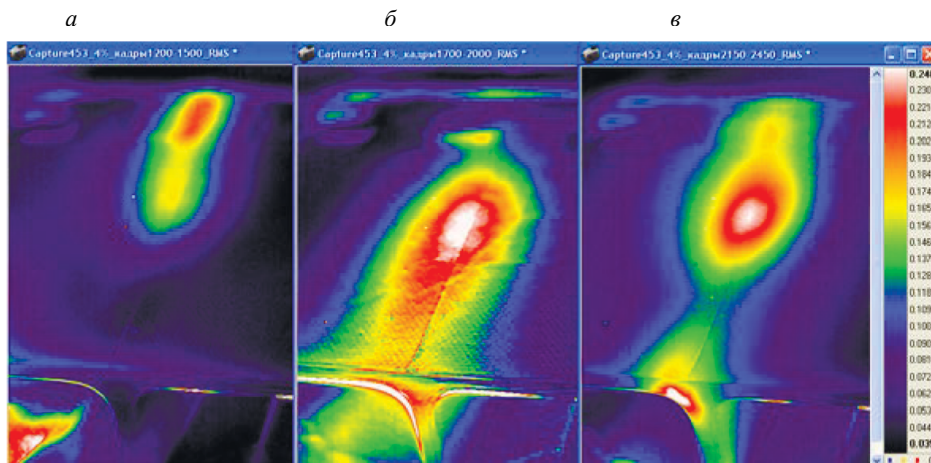


Рис. 11. «Шумовые» термограммы на этапах 1, 2 и 3 по пятиминутным интервалам:  
а — этап № 1; б — этап № 2; в — этап № 3.

(рис. 11а) выявляется развитие теплового поля от дефекта 20 Дж через тензодатчик № 2 к дальнему краю пластины и не обнаруживается развитие теплового поля трещины на видимом ребре стрингера. Во-вторых, на этапе № 2 (рис. 11б) происходит развитие температурного поля в области от дефекта 20 Дж до ближнего края пластины и в области соединения ребер стрингера и пластины (особенно в левой части Т-зоны). В-третьих, на этапе № 3 (рис. 11в) обнаруживается яркое шумовое изображение теплового поля трещины в левой части соединения стрингера с обшивкой.

Временное развитие разностных термограмм на этапе № 3 по отношению к исходному кадру № 53250 в конце первой четверти этого этапа (рис. 12б), рассчитанных для кадров 57250, 59250 и 61250, что соответствует интервалам времени: 160, 240 и 320 с, показывает, как в процессе вибраций плавно увеличивается тепловой контраст области трещины (рис. 12а) и плавно возрастает разброс максимальной и минимальной температур для точек в области соединения стрингера с пластиной (рис. 12б).

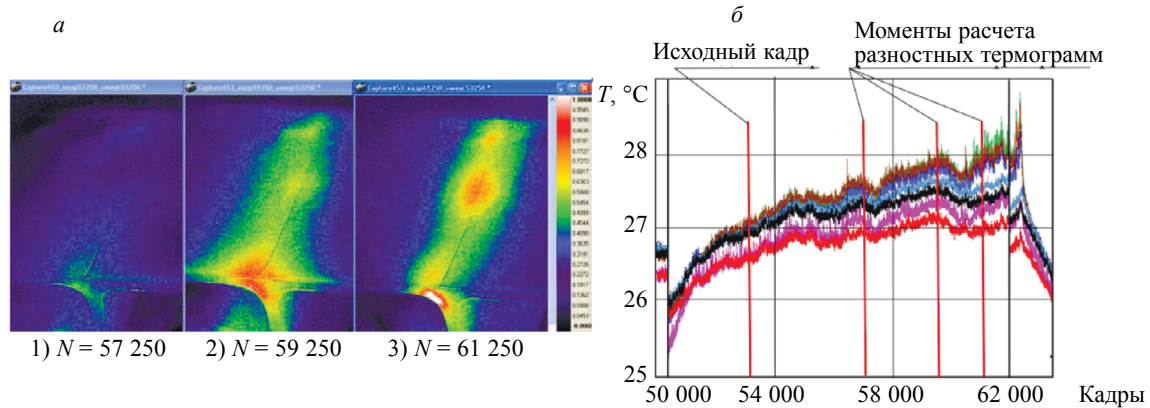


Рис. 12. Развитие разностных термограмм и динамика температуры в точках соединения стрингера с пластиной при возникновении трещины на ребре стрингера на этапе № 3:  
а — развитие разностных термограмм; б — динамика температуры.

На рис. 13 приведено сравнение термограмм и термопрофилограмм области соединения обшивки со стрингером без трещины в начале этапа № 3 и с трещиной в конце этапа № 4. Видно четкое различие форм тепловых полей (рис. 13 а, б) и характера температурных профилей (рис. 13в), проходящих через зону соединения (1 и 2).

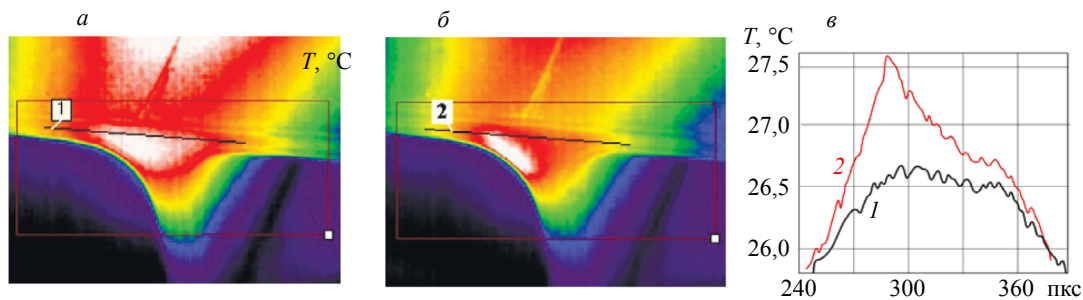


Рис. 13. Термограммы и термопрофилограммы образца до и после появления трещины:  
а — термограмма до появления трещины; б — термограмма после появления трещины; в — термопрофилограммы по направлениям 1 и 2.

«Шумовые» термограммы (рис. 14), рассчитанные в конце режима вибраций (а) и после выключения вибраций (б), показывают хорошее качество дефектоскопии трещины на торце стрингера и полосы расслоения стрингера. Различие термограмм объясняется тем, что при вибрациях (а) дефект 20 Дж сильно «шумит» по температуре за счет механического трения зон расслоения материала, а после выключения вибраций (б) трение слоев и соответствующий тепловой шум пропадают и изображение дефекта 20 Дж становится практически незаметным.



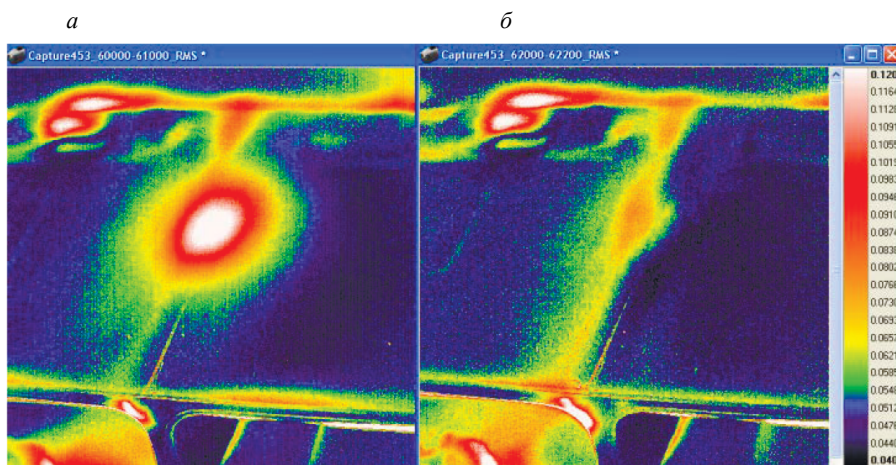


Рис. 14. «Шумовые» термограммы в конце вибраций и после выключения вибраций:  
*а* — в конце вибраций; *б* — после выключения.

Следовательно, в результате обработки разностных и «шумовых» термограмм было показано, что решение задачи обнаружения момента возникновения трещины в процессе виброиспытаний удалось осуществить не напрямую по исходным термоизображениям из-за очень малой толщины трещины и недостаточной разрешающей способности объектива тепловизора, а косвенным путем за счет анализа временного и пространственного изменения теплового поля в области трещины на стрингере.

Таким образом, неразрушающий контроль изделий из ПКМ с дефектами типа «расслоение» с использованием метода активной термографии, основанного на механических вибрациях конструкции с целью энергетической стимуляции дефектов, представляет одно из перспективных направлений. В рамках такого подхода в процессе вибрационных прочностных испытаний изделия появляется возможность синхронной совместной оценки теплофизических характеристик и остаточного эксплуатационного ресурса поврежденной конструкции, что очень важно при эксплуатации авиационной техники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепловой неразрушающий контроль при вибрационных прочностных испытаниях обеспечивает эффективное обнаружение ударных повреждений 5—20 Дж и областей расслоения на Т-образце из ПКМ.

При вибрациях Т-образца на резонансной частоте происходит нагрев центральной зоны вокруг линии стрингера за счет упругих колебаний образца, механического трения области расслоения ударного повреждения и нагрев зоны расслоения стрингера.

Величина нагрева при вибрациях составляет 3—8 °С в зависимости от энергии ударных повреждений 5—20 Дж, параметров вибрационных колебаний и времени вибраций от 5 до 50 мин.

В месте соединения ребер стрингера и обшивки отмечена характерная зона трапецевидной формы («чаша») с повышенной на 5—6 °С температурой за счет вибраций.

Существенное влияние включенных тензодатчиков на тепловое поле дефекта происходит только со стороны расположения датчиков и небольшое влияние — в центре образца; температура датчика с наибольшим влиянием возрастает при вибрациях от 24 до 31 °С.

Усредненные, разностные и «шумовые» термограммы позволяют существенно улучшить информативность изображений и уменьшить их зашумленность. При этом в «шумовых» термограммах отсутствует искажающее влияние включенных тензодатчиков на изображение дефекта.

При дальнейших исследованиях необходимо модернизировать схему крепления тензодатчиков без изменения поверхностных свойств образца и без влияния датчиков на тепловое поле образца, например, крепление с нижней стороны с помощью теплоизолирующих прокладок.

Для существенного улучшения процесса обнаружения момента зарождения и развития трещины на ребре стрингера при вибрационных испытаниях необходимо осуществлять выбор объектива с учетом взаимного расположения тепловизора и образца.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №19-29-13008.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В., Божевалов Д.Г., Соколов Ю.С., Метелкин Е.С., Миколайчук Ю.А., Шапкин В.С. Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий. М.: Техносфера, 2018. 506 с.
2. Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Сафонов А.А., Абаимов С.Г., Розин Н.В., Федулов Б.Н. Метод расчетного определения прочностных свойств конструкций с учетом образования микро и макропор при вакуумной инфузии // Композиты и наноструктуры. 2016. Т. 8. № 3. С. 151—159.
3. Dubinskii S., Feygenbaum Y., Senik V., Metelkin E. A study of accidental impact scenarios for composite wing damage tolerance evaluation // The Aeronautical Journal. 2019. 123 (1268). P. 1724—1739.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2013. 542 с.
5. Chernyshev S.L., Zichenkov M.Ch., Golovan V.I., Zaitsev A.M., Kaz'min E.A., Kovalev I.E., Kornilov A.B., Kornilov G.A., Smotrov A.V., Chernyavskii A.A., Shustrov A.O. Features of Thermal Nondestructive Testing of Impact Damage to Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 9. P. 706—717. [Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Голован В.И., Зайцев А.М., Казьмин Е.А., Ковалев И.Е., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Смотров А.В., Чернявский А.А., Шустров А.О. Особенности теплового неразрушающего контроля ударных повреждений изделий из полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 28—39.]
6. Meola C., Boccardi S., Boffa N.D., Ricci F., Carlomagno G.M. Infrared thermography to evaluate impact damaging of composites / ECCM16 — 16th European conference on composite materials, Seville, Spain, 22—26 June, 2014.
7. Meola C., Boccardi S., Carlomagno G.M., Boffa N.D., Ricci F., Simeoli G., Russo P. Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography / 16<sup>th</sup> National Conference on Non Destructive Testing, Monitoring and Diagnostics, Milan, 21—23 October, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.10.004>
8. Roche J.-M., Balageas D., Lamboul B., Bai G., Passilly F., Mavel A., Grail G. Passive and active thermography for in situ damage monitoring in woven composites during mechanical testing. ONERA. QNDE, 2012, DENVER, U.S.A., 15—20.07.2012. <https://www.researchgate.net/publication/234006960>
9. Meola C., Boccardi S., Carlomagno G.M. Infrared thermography for online monitoring of glass/epoxy under impact and quasi-static bending // Applied Sciences. 2018. No. 8. P. 301.
10. Xiao Y, White R.G., Aglietti G.S. An experimental characterization of the acoustic fatigue endurance of GLARE and comparison with that of CFRP // Composite Structures. 2005. V. 68. P. 455—470.
11. Xiao Y, White R.G., Aglietti G.S. Comparison of structural response and fatigue endurance of aircraft flap-like box structures subjected to acoustic loading // Journal Acoustical Society of America. 2005. V. 117 (5). P. 2820—2834.
12. Dubinskii S., Fedulov B., Feygenbaum Y., Gvozdev S., Metelkin E. Experimental evaluation of surface damage relaxation effect in carbon-fiber reinforced epoxy panels impacted into stringer // Composites Part B. 2019. V. 176. Article 107258.
13. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Dubinskii S.V., Burleigh D., Shpilnoi V.Yu., Derusova D.A., Zhvyrbliia V.Yu. Nondestructive testing of composite T-joints by TNDT and other methods // Polymer Testing. 2021. V. 94. P. 107012.
14. Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Голубев А.Ю., Денисов С.Л., Костенко В.М., Жаренов И.А. Расчетно-экспериментальное исследование влияния виброакустических нагрузок на прочность композитного соединения // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 4. С. 460—470.
15. Методика испытания авиационных конструкций при акустическом нагружении. РДК. Т. III. Кн. 4. Вып. 9. 1981.
16. ESDU Committee, Methods of Testing for Endurance of Structural Elements Using Simulated Acoustic Loading, London, ESDU 93027, UK, 1993.
17. Solodov I., Dillenz A., Kreuzbruck M. A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission // Journal of applied physics. 2017. V. 121. P. 245101. DOI: 10.1063/1.4985286

## СОЧЕТАНИЕ ВРУЧНУЮ ПОСТРОЕННЫХ ПРИЗНАКОВ И ПРИЗНАКОВ ГЛУБОКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КВАДРАТИЧНОЙ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОЙ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ

© 2021 г. Г.Т. Весала<sup>1,\*</sup>, В.С. Гали<sup>1</sup>, А. Виджая Лакшми<sup>1</sup>, Р.Б. Найк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр инфракрасной визуализации, Образовательный фонд Конеру Лакшмайя, Ваддесварам, Андхра-Прадеш, Индия.

<sup>2</sup>Военно-морская исследовательская лаборатория материаловедения, Амбернат, округ Тхане, Махараштра, Индия

\*E-mail: gopitilak7@gmail.com

Поступила в редакцию 27.02.2021; после доработки 26.03.2021

Принята к публикации 02.04.2021

Последние достижения в области неразрушающего контроля и оценки надежности в совокупности с машинным обучением, искусственным интеллектом и интернетом вещей как ключевых инструментов идеи об индустрией 4.0 достигли четвертой промышленной революции. Тем не менее активная термография (АТ) — это бесконтактный, безопасный, экономичный и широко используемый метод неразрушающего контроля для поиска подземных аномалий. При АТ автоматическое обнаружение дефектов подразумевает локализацию объекта и семантическую сегментацию термограммах. В этой статье представлена сеть объединения признаков, которая соединяет глобальные признаки, полученные с помощью глубокой нейронной сети (ГНС), с глубокими признаками, полученными с помощью сверточной нейронной сети (СНС). Набор вручную построенных статистических и частотных характеристик тепловых профилей во временной области передается подсети ГНС, тогда как подсеть СНС получает тепловые профили в сети объединения признаков. Эксперименты проводились на образце армированного углеродным волокном полимера (углеполимера) с просверленными отверстиями с плоским дном, возбуждаемым квадратично-частотно-модулированным оптическим импульсом. Экспериментальные результаты показали, что объединение признаков улучшило возможность обнаружения дефектов по сравнению с локальными сетями за счет значительного увеличения отношения сигнал / шум, точности и F-меры.

*Ключевые слова:* NDT 4.0, визуализация квадратичной частотно-модулированной тепловой волны, объединение признаков, 1D-СНС, ГНС, признаки во временной и частотной областях, полимер, армированный углеродным волокном.

**DOI:** 10.31857/S0130308221060051

### ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная автоматизация в недавнем прошлом позволила отрасли производить продукцию по индивидуальному заказу с высоким качеством и надежностью. Цифровизация, искусственный интеллект и интернет вещей стали ключевыми движущими силами нынешней промышленной революции, индустрии 4.0. Однако для специализированных изделий требуется оценка качества и анализ целостности с помощью неразрушающего контроля (НК) без нарушения их будущей функциональности. Тем не менее неразрушающий контроль, как область знаний и набор методик, эволюционировал вместе с индустриализацией — от использования только органов чувств к цифровизации и созданию сетей. NDT 4.0 — это настоящая революция в области неразрушающего контроля, основанная на искусственном интеллекте, машинном обучении, 5G и квантовых технологиях [1].

Но возможности бесконтактного, безопасного и экономичного контроля позволяет рекомендовать активную инфракрасную термографию (АТ) как хорошо известный и широко распространенный метод неразрушающего контроля, при котором анализируется тепловая карта исследуемого образца в условиях внешнего воздействия. Возбуждение с высокой пиковой мощностью в течение короткого времени при импульсной термографии (ИТ) [2] и периодическое возбуждение с низкой пиковой мощностью в течение длительного времени при синхронной термографии (СТ) [3] являются традиционными и широко используемыми механизмами стимуляции при ИКТ. Благодаря комбинации импульсного воздействия при ИТ и фазовой обработки при СТ, к традиционным подходам АТ позже была причислена импульсная фазовая термография (ИФТ) [4]. В последние два десятилетия при визуализации частотно-модулированной тепловой волны (ВЧМТВ) оптический импульс с низкой пиковой мощностью модулируется полосой низких частот [5], чтобы преодолеть ограничения традиционных методов стимуляции (высокая пиковая мощность и увеличенное время экспериментов) и улучшить детектирование дефектов и разрешение по глубине. С другой стороны,

квадратичная версия ВЧМТВ (КВЧМТВ) обеспечивает улучшенное разрешение по глубине и обнаружение более глубоких дефектов, чем ее линейный аналог [6]. Однако в АТ были разработаны различные методы для обработки захваченного теплового отклика [2—8].

Абсолютный тепловой контраст, восстановление теплового сигнала (ВТС), термография главных компонент (ТГК) и фаза преобразования Фурье — это обычно используемые методы обработки в традиционной термографии [2]. С другой стороны, сжатие импульсов (СИ) и Z-преобразование с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-ЗП) стали удобны при обработке в процессе ВЧМТВ и КВЧМТВ, с улучшенным разрешением по глубине и количественной оценкой глубины, поддерживаемыми аналитическими моделями, представленными в [7, 8]. Однако для эффективного обнаружения и определения характеристик дефектов требуется опытный специалист в области АТ, что приводит к значительно меньшему количеству человеческих ошибок при наблюдении за массивами данных обработки результатов термографии. Следовательно, недавние достижения в NDT 4.0 служат подтверждением успешного применения различных алгоритмов машинного обучения в АТ с целью избежать вмешательства человека и обеспечить автоматическое обнаружение дефектов [9—22].

Машинное обучение стало использоваться в АТ в начале 2000-х годов за счет использования искусственных нейронных сетей (ИНС), многослойного персептрона (МСП) и метода опорных векторов (МОВ) для автоматического контроля и описания дефектов. Авторы извлекали из тепловых профилей характеристики, такие как максимальный тепловой контраст и время его появления [9], кривые теплового контраста [10], коэффициенты ВТС [11], главные компоненты [12] и фазовые кривые [13], чтобы обучать свои модели. Совсем недавно автоматический контроль дефектов состоял из локализации объекта, классификации и семантической сегментации термограмм, которые могут быть получены с помощью таких архитектур глубоких нейронных сетей с ядрами двухмерной сверточной нейронной сети (СНС), известных в ИТ, как Yolo-Net и U-Net [14—17]. Однако это непростой подход с точки зрения использования термограмм по двум причинам: первая — это термограммы, на которые влияет неоднородное излучение и эффекты неоднородной излучательной способности, а вторая — выбор тестовых термограмм для обнаружения дефектов [18].

В отличие от моделей 2D-СНС, в СТ вводится двухпоточная модель СНС со структурой 1D-СНС для контроля дефектов путем сравнения сходства между тепловыми профилями бездефектных и дефектных областей [18]. В недавнем прошлом в КВЧМТВ предлагались ИНС, дерево решений и одноклассовые модели автоматического обнаружения и описания дефектов на основе использования тепловых профилей [19, 20, 27]. Помимо автоматического контроля дефектов, в АТ недавно были введены автокодировщики и генеративно-сопоставительные сети как модели сжатия и увеличения термографических данных соответственно [21, 22]. Однако модели глубоких нейронных сетей в ВЧМТВ с использованием одномерных СНС или моделей на основе долгой краткосрочной памяти (ДКСП) еще не обсуждались.

В данной статье представлена глобальная сеть объединения признаков в КВЧМТВ для автоматической составной проверки, которая объединяет локальные характеристики, извлеченные из модели СНС, и глобальные характеристики, извлеченные из моделей ГНС. Локальные характеристики, извлеченные из обработанных тепловых профилей с использованием модели СНС, и глобальные характеристики, извлеченные с помощью ГНС, где ГНС содержит несколько статистических характеристик во временной области и частотных характеристик тепловых профилей. Углеполимер с искусственно просверленными отверстиями с плоским дном различных размеров на разной глубине. Температурные профили из дефектной и бездефектной области вместе с их характеристиками (статистическая во временной области и частотная область) выбираются случайным образом для подготовки обучающего набора. Обученные модели тестируются на тепловом отклике всего образца для классификации и визуализации дефектов. Значительное улучшение было отмечено при автоматическом контроле дефектов с использованием модели объединения признаков по сравнению с локальными моделями.

## СЕТЬ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРИЗНАКОВ

**Глубокая нейронная сеть (ГНС).** Искусственные нейронные сети (ИНС) с мелкой архитектурой использовались для автоматического обнаружения дефектов в инфракрасной термографии [9—13]. Простая модель ИНС состоит из трех уровней: входного слоя, скрытого слоя и выходного слоя с несколькими нейронами в каждом слое для обучения целевой функции. ИНС с более чем тремя скрытыми слоями считается глубокой нейронной сетью (ГНС). Параметры выборки входных данных определяют количество нейронов во входном слое. Несколько скрытых слоев позво-

ляют сети изучать сложные отношения, используя количество нейронов в каждом скрытом слое, и каждый вывод скрытого слоя нелинейно преобразуется с использованием функций нелинейной активации, таких как сигмоид, гиперболический тангенс, ReLU и т.д. Все нейроны в каждом скрытом слое полностью связаны с нейронами в предыдущем и следующем скрытых слоях. Количество меток выборки определяет нейроны в выходном слое. Для заданных входных данных  $x$  выход произвольного скрытого слоя задается как

$$f(x) = \varphi(w'_{ij}x + b^l), \quad (1)$$

где  $w_{ij}$  — весовая коэффициент между  $i$ -м нейроном в скрытом слое и  $j$ -й нейронной ячейкой в скрытом слое  $l$ ,  $b$  определяет смещение нейронов в скрытом слое  $l$ ,  $f(x)$  — выход скрытого слоя  $l$ ,  $\varphi$  представляет собой функцию активации. Слой исключений широко используется между скрытыми слоями, чтобы пропустить несколько нейронов в скрытых слоях для управления переобученной сетью [25]. Последний выходной слой и последние скрытые слои связаны с софтмакс-слоем. Для вычисления ошибки проводится сравнение между окончательным выводом слоя классификации и желаемым выводом. Вычисленная ошибка обратно распространяется на предыдущие уровни для обновления параметров до первого уровня в текущей итерации с заданным пакетом данных. Процесс повторяется с новыми данными на следующей итерации, пока ошибка на выходе не станет ниже порогового значения.

**Сверточная нейронная сеть.** Последние успехи в области глубокого обучения со сверточными нейронными сетями привлек внимание исследователей АТ, и различные предварительно обученные модели доступных сверточных нейронных сетей (СНС) были введены посредством трансферного обучения для автоматического обнаружения дефектов [14—17]. Однако типичная СНС состоит из двух элементов: сети извлечения признаков и полносвязной нейронной сети (ПНС). Сеть извлечения признаков представляет собой комбинацию сверточных слоев и слоев подвыборки с нелинейными функциями активации. Сверточный слой содержит несколько ядер свертки с разными весами, которые скользят по функциям предыдущего слоя и используют операцию свертки. Операции свертки с разными ядрами приводят к локальным связям и распределению веса между предыдущим и текущим слоями. Кроме того, количество выходных функций в сверточном слое уменьшается путем сканирования прямоугольной оконной матрицей со статистическим параметром. Как правило, максимальные и средние значения в окне выбираются в качестве операций объединения, т.е. более конкретно, широко используются максимальные значения. Полносвязная сеть подключается в конце к сети извлечения признаков. Он состоит из скрытых слоев с нейронами, подобными ГНС, но на входе — карта признаков, извлеченная из сети извлечения признаков. Последний слой и последний скрытый уровень ПНС подключаются к софтмакс-слою для классификации.

В АТ контроль дефектов осуществляется с помощью 2D-моделей СНС. Yanpeng [20] представил двухпоточковую архитектуру СНС с одномерными ядрами СНС для прогнозирования сходства между парой характеристик теплового профиля, извлеченных с помощью операции 1D СНС. Точно так же извлечение признаков из временного теплового профиля  $x$  с использованием одномерной свертки с последующей нелинейной активацией дается выражением:

$$f_k^l = \varphi\left(\sum_{i=1}^{N_{l-1}} (w_{ik}^{l-1} \cdot x_i^{l-1} + b_k^l)\right), \quad (2)$$

где  $x_i^{l-1}$  — это выход  $i$ -го нейрона на уровне  $l-1$ ,  $w_{ik}^{l-1}$  — это ядро от  $i$ -го нейрона в слое  $l-1$  до  $k$ -го нейрона на слое  $l$ ,  $b_k^l$  определяет смещение  $k$ -го нейрона на слое  $l$ ,  $\varphi$  представляет функцию активации,  $f(x)$  — выходной сигнал сверточного слоя  $l$ . Размер объектов, извлеченных из  $l$ -го сверточного слоя, уменьшается с помощью объединяющего слоя и передается в ПНС. Последний скрытый слой и выходной слой ПНС подключены к софтмакс-слою, и градиенты, сгенерированные путем сравнения с желаемым выходом, передаются обратно на последний слой свертки в текущей итерации с заданным пакетом данных. Процесс повторяется с новым пакетом данных на следующей итерации до тех пор, пока ошибка вывода не станет ниже порогового значения.

**Сеть объединения признаков.** В вышеотмеченной литературе были проанализированы глобальные характеристики, извлекаемые нейронной сетью из вручную построенных признаков, и локальные характеристики, извлекаемые из модели СНС автоматического контроля дефектов [9—22]. Влияние на возможность обнаружения дефектов в обоих случаях еще не проанализировано. Однако недавние исследования доказали значительное улучшение процесса классификации сигналов при мониторинге состояний конструкций и классификации биомедицинских сигналов за счет объединения построенных вручную и глубоких признаков [23, 24]. Следовательно, в

Таблица 1

Параметры сети слияния функций

Слой	СНС		ГНС	
1	Входной слой	$1 \times 625$	Входной слой	10
2	Сверточный слой	$n = 20, k = 1 \times 11$	Скрытый слой 1 + Дропаут	20, 0,2
3	Пулинговый слой	$P = 5$	Скрытый слой 2 + Дропаут	40, 0,2
4	Сверточный слой	$n = 40, k = 1 \times 7$	Скрытый слой 3 + Дропаут	80, 0,2
5	Объединение	$P = 5$	Скрытый слой 4	160
6	Сверточный слой	$n = 60, k = 1 \times 3$	Дропаут	0,5
7	Получение глобального среднего			
8	Слой объединения			
9	Дропаут		0,5	
10	Софтмакс		1 (2 класса)	

настоящем исследовании представлена сеть объединения признаков в КВЧМТВ для автоматического контроля дефектов подповерхностных несплошностей в композитном образце. Подробная информация о сети объединения признаков представлена в табл. 1.

Предлагаемая глобальная архитектура состоит из локальных моделей СНС и ГНС, как показано на рис. 1. Модель СНС построена с входным слоем, тремя уровнями свертки с одномерной структурой, двумя уровнями максимального объединения, за которыми следует один глобальный средний слой объединения с временным тепловым профилем в качестве входного сигнала. Модель ГНС состоит из входного слоя, нескольких скрытых слоев и слоев регуляризации со статистическими характеристиками временной области и характеристиками частотной области теплового профиля в качестве входных данных. Выходные характеристики СНС и ГНС объединяются с помощью слоя слияния. Объединенные элементы проходят через слой регуляризации и, наконец, передаются на выходной софтмакс-слой. Сеть объединения параметров обучается так же, как и две локальные сети, которые итеративно реализуют прямое и обратное распространение. Для набора обучающих данных  $D = \{T, T', y\}$  из  $N$  тепловых профилей  $X \in R^{N \times 1 \times M}$  и вручную созданных статистических и частотных характеристик во временной области  $X \in R^{N \times 1 \times k}$  с соответствующими метками  $y \in R^{N \times 1}$ , прямое распространение на итерации  $i$  определяется выражением:

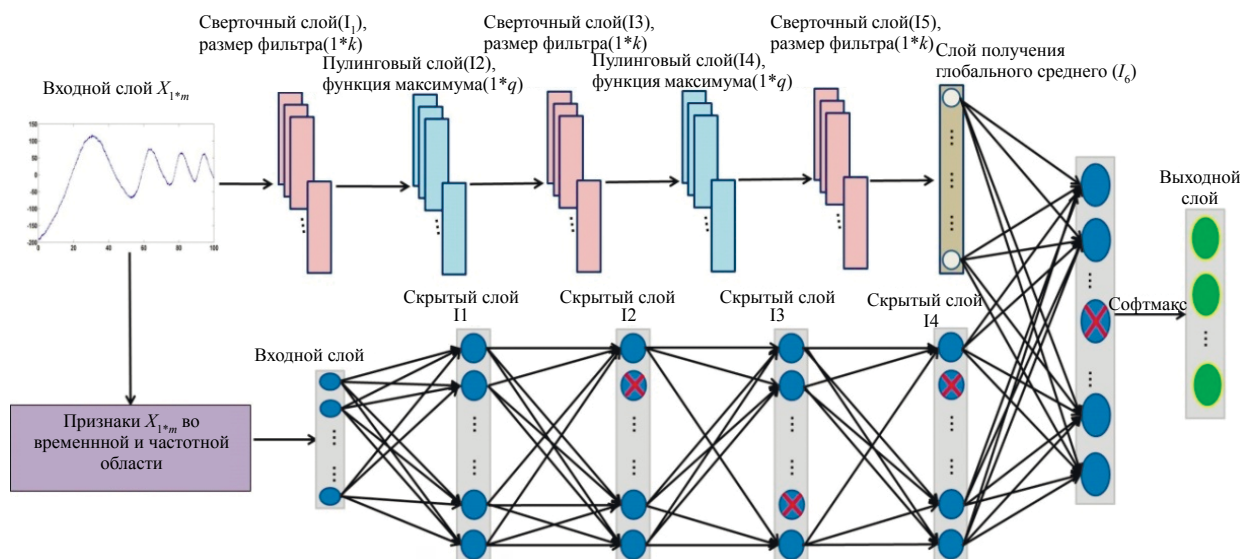


Рис. 1. Схема предложенной сети объединения признаков.



$$f(t, t') = \varphi_{l-1} \left( \varphi_{c, l-2} \left( \dots \varphi_{c, 1} \left( t, \theta_{c, 1}^i \right), \theta_{c, l-2}^i \right), \varphi_{d, l-2} \left( \dots \varphi_{d, 1} \left( t', \theta_{d, 1}^i \right), \theta_{d, l-2}^i \right), \theta_{l-1}^i \right), \quad (3)$$

где  $\theta_{c, n}$ ,  $\theta_{d, n}$  и  $\varphi_{c, n}$ ,  $\varphi_{d, n}$  для  $n = 1, 2, \dots, l-1$  представляют собой параметры обучения операции на каждом слое локальных моделей СНС и ГНС на тепловом профиле  $t$  и его параметрах  $t'$  соответственно. Результат классификации  $y'$  на софтмакс-слое определяется по:

$$y' = \frac{e^{f_i(t, t', \theta_i^j, p)}}{\sum_{j=1}^p e^{f_i(t, t', \theta_i^j, j)}}. \quad (4)$$

Параметры обучения сети объединения признаков обобщаются как  $\theta'$ , и функция потерь, рассчитываемая путем сравнения полученного результата с метками, определяется как

$$L(y', y) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N y_i \ln(y'_i). \quad (5)$$

Задача обнаружения дефектов моделируется как задача двоичной классификации. Следовательно, учитывается функция потерь бинарной кросс-энтропии. Исходя из слоя объединения, потери распределяются обратно на каждый уровень локальных сетей, а обучаемые параметры локальных сетей оптимизируются для каждого пакета в обучающем наборе данных  $D$ . На рис. 2 представлена пошаговая методика предложенной сети объединения признаков.

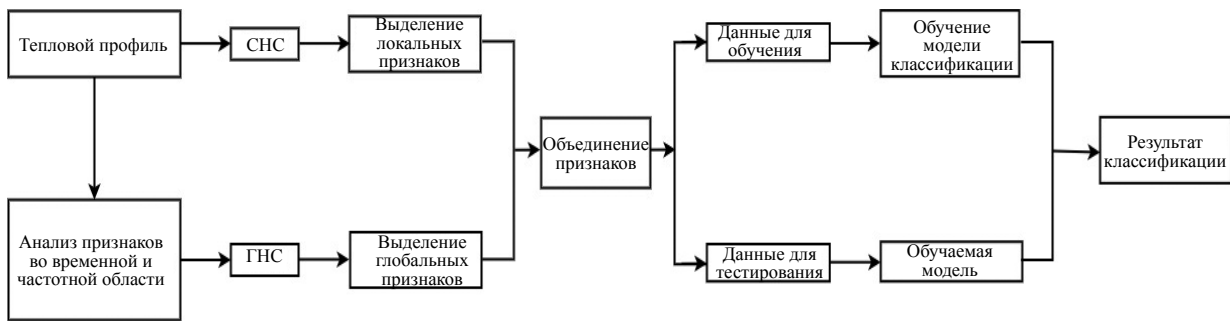


Рис. 2. Схема работы предложенной сети объединения признаков.

## ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

**Матриалы и экспериментальная работа.** Временная тепловая оценка профилей пикселей в области дефекта в композитных структурах представляет различные параметры, такие как затухание и временные задержки в зависимости от глубины и геометрических размеров дефектов. Однако тепловые профили подвергаются процессу обработки, анализируется соответствующий параметр контраста, при этом на обнаружение более глубоких и мелких дефектов влияет низкий контраст и другие неоднородные эффекты, включая шум в тепловых данных. В данном случае возможность обнаружения дефектов сетью объединения признаков для еще более глубоких дефектов анализируется с использованием образца из углеполимера с искусственно просверленными отверстиями с плоским дном различных размеров на разной глубине в виде дефектов расслоения. Принципиальная схема, фото (в оптическом диапазоне) переднего и заднего вида тестового образца представлены на рис. 3а—в. Передняя поверхность тестового образца покрыта черной эмалевой краской с коэффициентом излучения 0,96 для получения однородного коэффициента излучения во время экспериментов [2].

Испытуемый образец помещают перед комплектом галогенных ламп мощностью 1 кВт каждая на расстоянии 80 см. Две галогенные лампы испускают квадратичный частотно-модулированный оптический импульс, имеющий развертку по частоте от 0,01 до 0,1 Гц в течение 100 с, как показано на рис. 3г, смещение постоянного тока добавляется к возбуждению, чтобы избежать фазы охлаждения [6]. Соответствующие тепловые карты поверхности объекта записываются со скоростью 25 кадров в секунду в течение 100 с с помощью тепловизора FLIR A655SC, работаю-

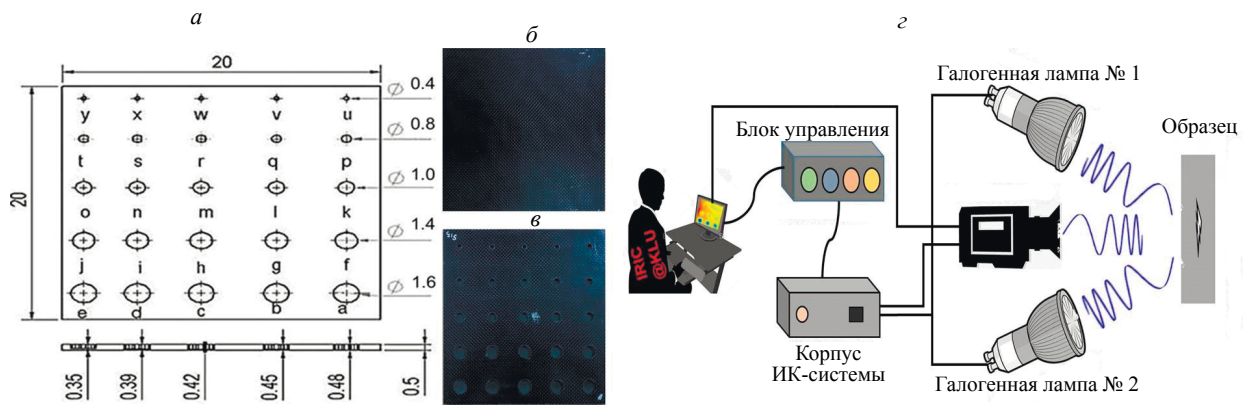


Рис. 3. Принципиальная схема (а) (размеры в см); вид спереди (б); вид сзади образца из углеполимера (в) и общая схема экспериментальной установки для визуализации квадратично частотно модулированной тепловой волны (КВЧМТВ)(с).

шего в спектральном диапазоне от 7,5 до 14 мкм с чувствительностью 30 мк. Тепловые данные включали 2500 термограмм с пространственным разрешением 640×480 пикселей.

**Предобработка данных и их подготовка.** Интересующая область выбирается из наблюдаемой, чтобы исключить ненужный фон и выделить тепловой отклик тестового образца. Урезанные данные охватывают тепловой отклик тестового образца с пространственным разрешением 315×317 пикселей на всех термограммах. Наблюдается средний рост каждого пиксельного профиля в поле зрения из-за смещения постоянного тока, добавляемого к импульсу, и соответствующая методика полиномиальной аппроксимации удаляет его. Кроме того, динамический компонент каждого временного теплового профиля извлекается путем вычитания из него среднего. Необработанные и динамические тепловые профили до и после выравнивания представлены на рис. 4. Далее у каждого динамического теплового профиля уменьшается дискретизация с прореживанием, равным 4, для уменьшения входной длины признака для сети объединения признаков [18]. Тепловой отклик с пониженной дискретизацией включает 625 точек выборки. Следовательно, каждый временной тепловой профиль связан с бинарным слоем, указывающим, принадлежит ли профиль области дефекта или бездефектной области. Температурные профили бездефектной области и области дефекта обозначаются метками «0» и «1». Помеченные данные означают, что из 99855 тепловых профилей 6045 относятся к дефектным областям, а 93810 профилей относятся к бездефектной.

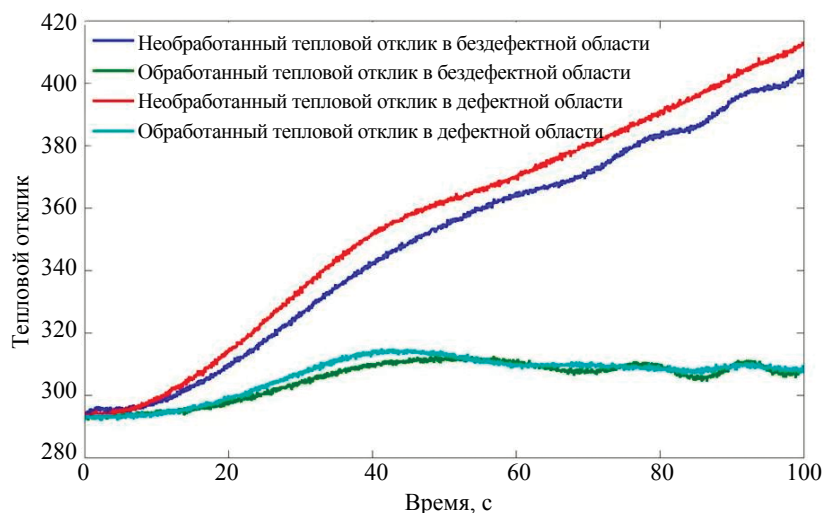


Рис. 4. Необработанные и динамические временные тепловые профили в бездефектной и дефектной областях образца.

Трехмерный тепловой отклик преобразуется в двумерный вектор путем размещения каждой пиксельной тепловой карты в строку и соответствующей ему эволюции во времени в столбцах вместе с соответствующими метками. Параллельно с этим из каждого теплового профиля выделяется несколько характеристик для обучения предлагаемой сети объединения признаков. Совсем недавно объединение статистических признаков во временной области и комбинация характеристик сигналов во временной и частотной областях повысило эффективность классификации сигналов в различных приложениях [23, 24]. В данном случае из тепловых профилей выделяется несколько статистических и частотных характеристик во временной области. Характеристики временной области включают минимум, максимум, размах, стандартное отклонение, асимметрию и эксцесс тепловых профилей, тогда как характеристики частотной области включают четырехфазные компоненты, полученные из фазы преобразования Фурье. В табл. 2 представлен список выбранных вручную признаков для объединения с локальными характеристиками тепловых профилей, полученных из модели СНС. Далее был подготовлен набор обучающих данных с тепловыми профилями и характеристиками, включающий 10000 образцов с соотношением 1: 4 тепловых профилей дефектной и бездефектной областей. Каждый пиксельный профиль всего тестового образца и их соответствующие характеристики остаются в качестве данных тестирования.

Таблица 2

Выбранные параметры во временной и частотной областях

№ п/п	Параметр	Формула	№ п/п	Параметр	Формула
1	Минимум	$T_{\min} = \min T_i $	4	Стандартное отклонение	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}$
2	Максимум	$T_{\max} = \max T_i $	5	Ассиметрия	$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3$
3	Размах	$T_{p-p} = T_{\max} - T_{\min}$	6	Эксцесс	$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^4$
7—10	Признаки в частотной области (Фаза)			$\varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(T(x, \omega))}{\text{Re}(T(x, \omega))} \right)$	

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Обучение и валидация.** Эффективность обучения сети объединения признаков анализируется путем одновременной передачи тепловых профилей и построенных вручную признаков в локальные сети. Моделирование проводилось с использованием четырехъядерного процессора AMD A10 с тактовой частотой 3,5 ГГц, поддерживаемом графикой AMD Radeon R7 3 ГБ, внутренней памятью 6 ГБ и твердотельным накопителем на 256 ГБ. Перед инициализацией сетей данные обучения и тестирования нормализуются как предварительный этап машинного обучения. Сети, инициализированные с помощью инициализации веса Ксавье с нулевым смещением [26], обучены на 500 итерациях обратного распространения с размером пакета 64. Adam со скоростью обучения 0,00015 используется в качестве оптимизатора для обучения сетей.

Обучающие данные 10 тысяч тепловых профилей, соответствующих вручную построенным признакам, и соответствующие метки сначала перетасовываются, нормализуются и передаются в СНС, ГНС и сети объединения признаков. 20% данных обучения разделяются для оценки модели сразу после обучения каждой эпохи. Потеря при валидации, показанная на рис. 5, представляет эффективность обучения каждой сети. Замечено, что модель ГНС достигает глобальных минимумов за меньшее количество итераций, тогда как потеря при валидации СНС и сетей объединения признаков медленно уменьшается. Кроме того, объединение признаков приводит к быстрой сходимости глобальной модели по сравнению с ее локальными сетями. Время обучения, указанное для глобальной модели, аналогично СНС, которое составляет 6,5 с, тогда как ГНС занимает 0,3 с для обучения эпохи (включая прямое и обратное распространение).

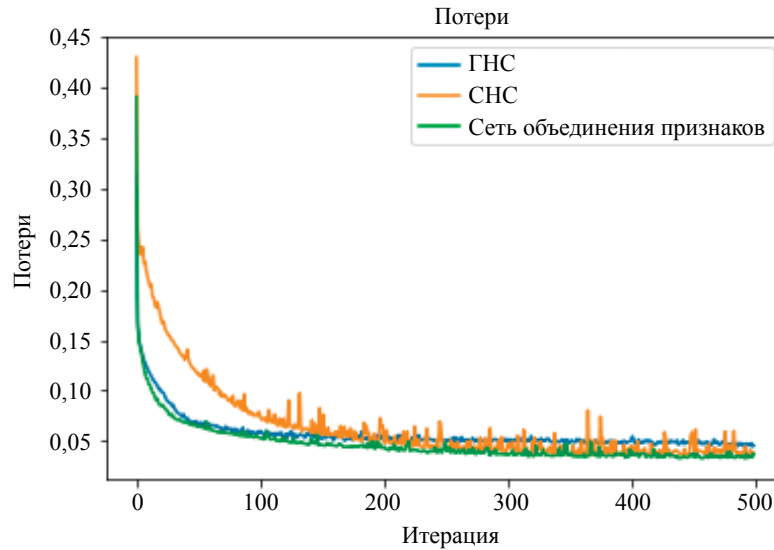


Рис. 5. Сравнение кривых потерь между ГНС, СНС и сетью объединения признаков.

**Автоматическое обнаружение дефектов.** Обученная модель тестируется на полном тепловом отклике образца и его построенными вручную признаками. Окончательный результат классификации —  $y' \in R^{N \times 1}$ , который преобразуется в 2D, чтобы предоставить результаты автоматического контроля дефектов. На рис. 6а—в показан результат обнаружения дефектов с использованием ГНС, СНС и сетями объединения признаков. Можно отметить, что в случае использования моделей ГНС и СНС имеет место большее количество ложных дефектов, а именно, профили бездефектных областей расцениваются как дефектные и, при этом, меньшее количество пропущенных дефектов. Это связано с неоднородными эффектами, связанными с особенностями временной области, влияющими на производительность ГНС, и хорошо известен факт, что фаза преодолевает эти неоднородные эффекты.

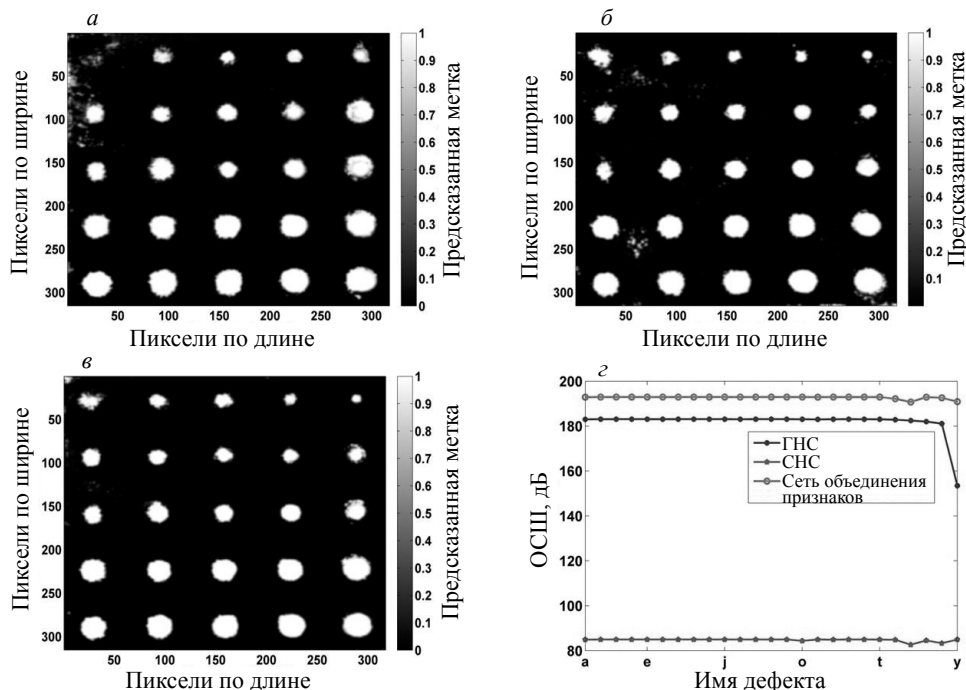


Рис. 6. Сравнение способности обнаружения дефектов используя: а — ГНС; б — СНС; в — сеть объединения признаков (цветная полоса обозначает предсказанные метки).

Кроме того, сеть объединения признаков обеспечивает эффективное обнаружение более глубоких и мелких дефектов. Однако наблюдается превышение в количестве более глубоких дефектов, что связано с неоднородными тепловыми эффектами, имеющими место во временной эволюции теплового профиля отдельных областей. С другой стороны, время тестирования для сети объединения признаков составляет 26,73 с, что меньше, чем у СНС, где ГНС занимает 2,15 с для классификации признаков. Эффективность автоматического контроля дефектов посредством предлагаемой методики подтверждается с использованием показателей термографии и машинного обучения. Отношение сигнал/шум (ОСШ) — широко используемая мера оценки качества в АТ. ОСШ определяется балансом между средней ( $\mu$ ) разницей в дефектной области и бездефектной области и стандартным отклонением ( $\sigma$ ) бездефектной области, приведенным в уравнениях (6), а наблюдаемые отношения сигнал / шум представлены на рис. 6г.

$$SNR(db) = 20 \cdot \log \left( \frac{\mu_{\text{дефект}} - \mu_{\text{бездефект}}}{\sigma_{\text{бездефект}}} \right). \quad (6)$$

По рисунку можно предположить, что модель ГНС и сеть объединения признаков обладают высоким ОСШ по сравнению с архитектурой СНС из-за заметно низкого стандартного отклонения в бездефектной области. Стандартное отклонение, зарегистрированное в бездефектной области для ГНС, СНС и сети объединения признаков, составляет  $1,0584 \times 10^{-4}$ , 0,0143 и  $6,4660 \times 10^{-5}$  соответственно. Небольшое стандартное отклонение дает право полагать, что сеть предсказала вероятность того, что тепловые профили бездефектной области очень близки к целевой метке 0. А также очень малы отклонения в предсказанных вероятностях. Это, в свою очередь, приводит к тому, что сеть объединения признаков классифицирует тепловые профили бездефектных и дефектных областей, несмотря на наличие других важных параметров.

Кроме того, предлагаемая методика проверяется с использованием нескольких показателей машинного обучения, таких как точность тестирования, F-мера и площадь под кривой рабочих характеристик приемника (ППК). Высокое значение полноты и низкая точность приводят к слишком большому количеству ложных срабатываний в задачах классификации, и баланс этих двух параметров увеличивает эксплуатационные затраты. Следовательно, рассматривается F-мера, которая задается как баланс между этими двумя показателями [24]. Помимо точности и F-меры, кривые ППК демонстрируют способность классификатора анализировать термические профили, соответствующие дефектным и бездефектным областям. ППК рассматривается между показателем ложноположительных результатов и истинно положительными результатами. Точность, полнота и F-мера математически выражаются в уравнениях (7)—(9), а в табл. 3 представлены рассматриваемые параметры классификации. Сравнение показателей эффективности показывает, что предлагаемая сеть объединения признаков обеспечивает более высокую точность тестирования, полноту и F-меру, чем локальные модели.

Таблица 3

## Сравнение показателей эффективности предлагаемой сети объединения признаков с архитектурами ГНС и СНС

Показатель		ГНС	ГНС	Сеть объединения признаков
Точность испытания, %		94,82	96,03	<b>96,87</b>
F-мера	Отсутствие дефекта	0,97	0,98	0,98
	Дефект	0,70	0,75	<b>0,79</b>
ППК, %		96,64	97,65	<b>98,14</b>

$$\text{Точность} = \frac{\text{Истинно положительная оценка (ИП)}}{\text{Истинно положительная оценка} + \text{Ложно положительная оценка (ЛП)}}; \quad (7)$$

$$\text{Полнота} = \frac{\text{Истинно положительная оценка (ИП)}}{\text{Истинно положительная оценка} + \text{Ложно отрицательная оценка (ЛО)}}; \quad (8)$$

$$F1\text{-мера} = \frac{(2 \times \text{точность} \times \text{полнота})}{(\text{точность} + \text{полнота})} \quad (9)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет КВЧМТВ-сеть объединения признаков для автоматического контроля дефектов в составном образце. Построенные вручную признаки, извлеченные из тепловых профилей, передаются в ГНС, который извлекает глобальные характеристики тепловых профилей, объединенные с глубокими характеристиками тепловых профилей, извлеченных из СНС. Экспериментальная проверка композитного образца из углепластика с искусственными плоскодонными отверстиями подтвердила значительное улучшение способности обнаруживать дефекты в сети объединения признаков по сравнению с локальными моделями ГНС и СНС. Следует отметить, что особенности временной области, обусловленные изменениями временного теплового профиля (амплитуда), снижают точность классификации ГНС, где не рекомендуется анализ на основе амплитуды в инфракрасной термографии из-за его чувствительности к неоднородностям и другим шумам в тепловом отклике. Кроме того, хорошие результаты классификация достигаются за счет объединения построенных вручную признаков с признаками глубокой сети в сеть объединения признаков. Показатели производительности также подтверждают, что сеть Fusion Fusion можно реализовать даже на экономичном оборудовании.

Работа частично поддержана грантом совета по военно-морским исследования (Индия), № гранта NRB-423/MAT/18-19.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vrana Johannes*. NDE 4.0: The Fourth Revolution in Non-Destructive Evaluation: Digital Twin, Semantics, Interfaces, Networking, Feedback, New Markets and Integration into the Industrial Internet of Things. 2019.
2. *Chung Yoonjae, Ranjit Shrestha, Seungju Lee, Wontae Kim*. Thermographic Inspection of Internal Defects in Steel Structures: Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography // *Sensors* 20. 2020. No. 21. P. 6015.
3. *Razani Marjan, Parkhimchyk Artur, Tabatabaei Nima*. Lock-in thermography using a cellphone attachment infrared camera // *Aip Advances*. 2018. V. 8. No. 3. P. 035305.
4. *D'Accardi E., Palano F., Tamborrino R., Palumbo D., Tati A., Terzi R., Galietti U.* Pulsed phase thermography approach for the characterization of delaminations in cfrp and comparison to phased array ultrasonic testing // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. No. 1. P. 20.
5. *Ghali V.S., Mulaveesala R.* Frequency modulated thermal wave imaging techniques for non-destructive testing // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010. V. 52. No. 9. P. 475—480.
6. *Subbarao Ghali Venkata, Mulaveesala Ravibabu*. Quadratic frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive testing // *Progress In Electromagnetics Research*. 2012. V. 26. P. 11—22.
7. *Subhani Shaik, Gampa V.P., Chandra Sekhar Yadav, Ghali Venkata Subbarao*. Defect characterization using pulse compression-based quadratic frequency modulated thermal wave imaging // *IET Science, Measurement & Technology*. 2020. V. 14. Is. 2. P. 165—172.
8. *Subhani Sk., Suresh B., Ghali V.S.* Quantitative subsurface analysis using non stationary thermal wave imaging // *Infra. Phy. & Tech*. 2018. V. 88. P. 41—47.
9. *Bison P.G., Bressan C., Di Sarno R., Grinzato E., Marinetti S., Manduchi G.* Thermal NDE of delaminations in plastic materials by neural network processing // *In QIRT*. 1995. V. 94. P. 214—219.
10. *Darabi Akbar, Maldague Xavier*. Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE // *Ndt & E International*. 2002. V. 35. No. 3. P. 165—175.
11. *Benitez Hernan, Ibarra-Castanedo Clemente, Loaiza Humberto, Caicedo Eduardo, Bendada Abdelhakim, Maldague Xavier*. Defect quantification with thermographic signal reconstruction and artificial neural networks // *In Proceedings of 8th Conference on Quantitative Infrared Thermography*. Padova, Italy. 2006. V. 2. P. 6.
12. *Benítez Hernán D., Loaiza Humberto, Caicedo Eduardo, Ibarra-Castanedo Clemente, Bendada AbdelHakim, Maldague Xavier*. Defect characterization in infrared non-destructive testing with learning machines // *NDT & E International*. 2009. V. 42. No. 7. P. 630—643.
13. *Maldague Xavier, Largouët Yves, Couturier Jean-Pierre*. A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments // *Revue générale de thermique*. 1998. 37.8. P. 704—717.
14. *Numan Saeed, King Nelson, Said Zafar, Omar Mohammed A.* Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning // *Infrared Physics and Technology*. 2019. V. 102. P. 103048.



15. *Fang Q., Nguyen B.D., Ibarra Castanedo C., Duan Y., Maldague, X.* Automatic defect detection in infrared thermography by deep learning algorithm / In *Thermosense: Thermal Infrared Applications XLII*, 2020. V. 11409.
16. *Luo Q., Gao B., Woo W.L., Yang Y.* Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection // *NDT & E International*. 2019. V. 108. P. 102164.
17. *Oliveira B.C.F., Seibert A.A., Borges V.K., Albertazzi A., Schmitt R.H.* Employing a U-net convolutional neural network for segmenting impact damages in optical lock-in thermography images of CFRP plates // *Non-destructive Testing and Evaluation*. 2020. P. 1—19.
18. *Cao Yanpeng, Dong Yafei, Cao Yanlong, Yang Jiangxin, Yang Michael Ying.* Two-stream convolutional neural network for non-destructive subsurface defect detection via similarity comparison of lock-in thermography signals // *NDT&E International*. 2020. June. V. 112. P. 102246.
19. *Lakshmi A. Vijaya, Tilak V. Gopi, Parvez Muzammil M., Subhani S.K., Ghali V.S.* Artificial neural networks based quantitative evaluation of subsurface anomalies in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // *Infrared Physics and Technology*. 2019. V. 97. P. 108—115.
20. *Lakshmi A. Vijaya, Ghali V.S., Subhani Sk., Balaji Naik R.* Automated quantitative subsurface evaluation of fiber reinforced polymers // *Infrared Physics & Technology*. 2020. V. 110. P. 103456.
21. *Kaur K., Mulaveesala R., Mishra P.* Constrained Autoencoder based Pulse Compressed Thermal Wave Imaging for Sub-surface Defect Detection // *IEEE Sensors Journal*. Doi: 10.1109/JSEN.2021.3056394
22. *Kaixin Liu, Li Yingjie, Yang Jianguo, Liu Yi, Yao Yuan.* Generative Principal Component Thermography for Enhanced Defect Detection and Analysis // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020.
23. *Li Hongmei, Huang Jinying, Ji Shuwei.* Bearing fault diagnosis with a feature fusion method based on an ensemble convolutional neural network and deep neural network // *Sensors*. 2019. V. 19. No. 9. P. 2034.
24. *Fajardo Jose Manuel, Gomez Orlando, Prieto Flavio.* EMG hand gesture classification using handcrafted and deep features // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2021. V. 63. P. 102210.
25. *Srivastava Nitish, Hinton Geoffrey, Krizhevsky Alex, Sutskever Ilya, Salakhutdinov Ruslan.* Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // *The journal of machine learning research*. 2014. V. 15. No. 1. P. 1929—1958.
26. *Glorot Xavier, Bengio Yoshua.* Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // *Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics*. P. 249—256. *JMLR Workshop and Conference Proceedings*, 2010.
27. *Tilak V. Gopi, Ghali V.S., Lakshmi A. Vijaya, Suresh B., Naik R.B.* Proximity based automatic defect detection in quadratic frequency modulated thermal wave imaging // *Infrared Physics & Technology*. 2021. V. 114. P. 103674.

## КОНТРОЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТОЛЩИНЫ АНИЗОТРОПНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

© 2021 г. А.И. Казьмин<sup>1,\*</sup>, П.А. Федюнин<sup>1,\*\*</sup>, Д.П. Федюнин<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
Россия 394064 Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А  
E-mail: \*alek-kazmin@yandex.ru; \*\*Fpa1969@yandex.ru; \*\*\*jr.fedyunin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.04.2021; после доработки 04.05.2021

Принята к публикации 11.05.2021

Широкое распространение анизотропных композиционных диэлектрических покрытий, работающих в диапазоне СВЧ, в различных наукоемких сферах обусловило поиск и выбор эффективных методов радиоволнового неразрушающего контроля их электрофизических параметров. Существующие подходы, основанные на оценке коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн, обладают низкой точностью и достоверностью при оценке компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости и толщины подобных покрытий, не учитывают их частотную дисперсию и размещение на металлической подложке. В настоящей работе предложен оригинальный метод локального контроля компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости, с учетом их частотной дисперсии, а также толщины анизотропных диэлектрических покрытий на металлической подложке с использованием радиальных поверхностных электромагнитных волн СВЧ-диапазона. Метод основан на решении обратных задач по определению компонент тензора диэлектрической проницаемости и толщины покрытий по частотной и угловой зависимостям коэффициента ослабления поля радиальной поверхностной электромагнитной волны, возбуждаемой в исследуемом образце. Проведенные численные и натурные эксперименты показали, что при полосе частот измерений 9—13,5 ГГц погрешности оценок коэффициентов анизотропии составляют не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95. Обоснован и введен статистический предел разрешения величины анизотропии диэлектрической проницаемости, что позволяет оценить метод в возможности различения двух близких значений любой пары компонент тензора диэлектрической проницаемости. Численные и натурные эксперименты показали, что метод может обеспечить их оценку при отличии друг от друга в 0,2—0,3 % и менее в полосе частот 9—13,5 ГГц.

*Ключевые слова:* анизотропное диэлектрическое покрытие, тензор комплексной диэлектрической проницаемости, коэффициент анизотропии, частотная дисперсия, неразрушающий контроль, радиальная поверхностная электромагнитная волна, коэффициент ослабления поля, обратная задача.

DOI: 10.31857/S0130308221060063

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с практическими потребностями в новых материалах и создаваемых на их основе покрытиях, работающих в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), во многих наукоемких сферах, в том числе микроэлектронной, аэрокосмической, машиностроительной и др., появляется много новых типов композиционных материалов с широким спектром значений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей и с различной внутренней структурой [1—6]. В отдельное важнейшее самостоятельное направление, связанное с повышением обороноспособности государства, выделяются разработки перспективных типов радиопоглощающих покрытий, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности современных образцов вооружения, военной и специальной техники [1—3].

Одним из способов создания тонких, легких и устойчивых к внешним воздействиям покрытий, работающих в широкой полосе частот, является реализация их в виде неоднородных композиционных структур, которые состоят из полимерной основы (матрицы) и соответствующего наполнителя. Для СВЧ-покрытий в роли наполнителя могут выступать [4—6] стекловолокно, ткани из полиэфирных волокон и т.д., а для радиопоглощающих покрытий используются [1—3] углеродные нанотрубки, проводящие частицы нанометрового размера и др.

Учитывая отличие свойств диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий и, соответственно, различные подходы к измерению их электрофизических и геометрических параметров (ЭФП), в данной статье основное внимание будет уделено СВЧ-диэлектрическим покрытиям (ДП) на основе неоднородных композиционных структур. ДП данного типа могут обладать анизотропией комплексной диэлектрической проницаемости, которая в общем случае описывается тензором диагонального вида:

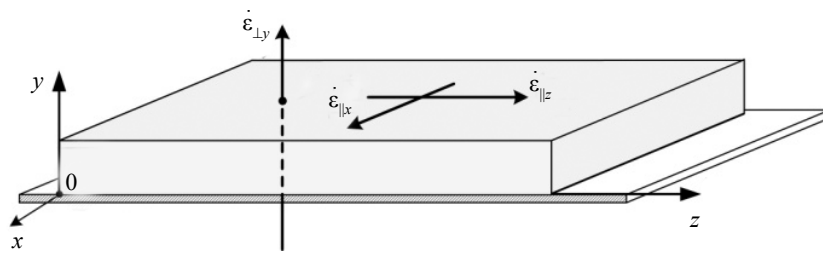


Рис. 1. Компоненты тензора (1).

$$\overset{\cdot}{\underline{\underline{\epsilon}}} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{\parallel x} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\epsilon}_{\perp y} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_{\parallel z} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}_{\parallel x} = \epsilon'_{\parallel x} - j\epsilon''_{\parallel x}$  и  $\dot{\epsilon}_{\parallel z} = \epsilon'_{\parallel z} - j\epsilon''_{\parallel z}$  — тангенциальные составляющие тензора комплексной диэлектрической проницаемости (в плоскости покрытия),  $\dot{\epsilon}_{\perp y} = \epsilon'_{\perp y} - j\epsilon''_{\perp y}$  — нормальная составляющая тензора комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 1).

При этом существуют три основных случая диэлектрической анизотропии искусственных композиционных материалов, соответствующих следующим соотношениям между элементами тензора (1) [4]: двухосная анизотропия  $\dot{\epsilon}_{\parallel x} \neq \dot{\epsilon}_{\perp y} \neq \dot{\epsilon}_{\parallel z}$ , одноосная анизотропия  $\dot{\epsilon}_{\parallel x} \approx \dot{\epsilon}_{\parallel z} \neq \dot{\epsilon}_{\perp y}$  и материалы с малыми значениями анизотропии, близкие к изотропным  $\dot{\epsilon}_{\parallel x} \approx \dot{\epsilon}_{\perp y} \approx \dot{\epsilon}_{\parallel z}$ .

В качестве основного аспекта применения подобных ДП и радиопоглощающих покрытий (в частности) на практике выступает получение объективных данных по их ЭФГП, которыми они будут обладать при размещении на металлической подложке. Исходя из этого, в процессе проектирования изготавливаются образцы ДП различного размера со свойствами, приближенными к тем, которые они будут иметь на реальном объекте. В ходе испытаний на эффективность производится оценка их ЭФГП, к которым относятся компоненты тензора (1)  $\overset{\cdot}{\underline{\underline{\epsilon}}}$  и толщина покрытия  $t_{\text{п}}$ .

Промышленные композиционные СВЧ-материалы, применяемые для производства СВЧ-устройств, в основном обладают одноосной анизотропией, и практически все предлагаемые методы контроля их диэлектрической анизотропии опираются на это допущение (условие). Помимо этого не учитывается возможная частотная дисперсия компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1). Вместе с тем при создании новых типов экспериментальных образцов композиционных СВЧ-материалов, в т.ч. радиопоглощающих покрытий, требуются все более точные, достоверные и объективные данные по их ЭФГП с учетом их возможных комбинаций и частотной дисперсии. Кроме того, должна обеспечиваться высокая локальность контроля, позволяющая оценить, как меняются параметры по поверхности образца.

Таким образом, разработка новых методов локального контроля ЭФГП диэлектрических покрытий с анизотропией комплексной диэлектрической проницаемости является актуальной научной задачей.

Для измерения компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) используется ряд СВЧ-методов контроля: резонаторные методы, методы закрытой линии передачи (волноводные и коаксиальные), методы коаксиального пробника, а также методы свободного пространства [4—17].

Оценке компонент тензора диэлектрической проницаемости (1) с помощью резонаторных методов и закрытых линий передачи (волноводные и коаксиальные) посвящено значительное число работ [4—11]. Поскольку представленные методы являются разрушающими и требуют специально подготовленных образцов — эти методы в настоящей статье рассматриваться не будут.

Для контроля ЭФГП диэлектрических материалов широкое распространение получили методы свободного пространства, основанные на одновременном измерении комплексных коэффициентов отражения  $R(f, \dot{\epsilon}_{\text{п}}, \dot{\mu}_{\text{п}}, t_{\text{п}})$  и прохождения  $T(f, \dot{\epsilon}_{\text{п}}, \dot{\mu}_{\text{п}}, t_{\text{п}})$ , где  $f$  — частота зондирующего сигнала, с последующим пересчетом их в значения комплексной диэлектрической  $\dot{\epsilon}_{\text{п}}$  и магнитной  $\dot{\mu}_{\text{п}}$  проницаемостей, а также толщины  $t_{\text{п}}$ . Чаще всего данные методы реализуются на основе векторных анализаторов электрических цепей и апертурных антенн [13, 14].

Между тем, несмотря на широкое распространение данных методов, вопросы разработки электродинамических моделей совместных измерений компонент тензора диэлектрической проницаемости (1) и толщины анизотропных ДП проработаны недостаточно. Обычно в публикациях приводятся лишь упоминания о том, что можно учесть анизотропию, но конкретных подходов к измерению не приводится [12—14].

В [15, 16] представлен метод свободного пространства, обеспечивающий оценку компонент тензора (1) для специально подготовленного кругового образца ДП определенного размера на металлической подложке. При этом для оценки компонент тензора (1) требуется высокоточное снятие угловых зависимостей коэффициента отражения образца при его различных положениях, с последующим решением обратной задачи, что снижает достоверность и точность проводимых измерений.

В [17] представлен метод свободного пространства с использованием волн круговой поляризации. Различие поперечных составляющих ( $\epsilon_{\parallel x}$  и  $\epsilon_{\parallel z}$ ) приводит к тому, что прошедшая или отраженная волна приобретает эллиптическую поляризацию, по параметрам которой судят о величине анизотропии материала (среды). Учитывая то, что антенны круговой поляризации имеют эллиптичность не выше 0,98, на выходе имеется небольшой паразитный сигнал, ограничивающий чувствительность и точность измерений, а для реализации метода требуются данные по толщине образца.

Кроме того, в методах свободного пространства используются апертурные антенны с размерами раскрыва, превышающими рабочую длину волны. Это обеспечивает определение ЭФГП образца в целом и не позволяет осуществлять их локальный контроль. В некоторых решениях используются фокусирующие системы в виде специальных диафрагм и диэлектрических линз, но все же локальность контроля при этом незначительная [13, 14]. Помимо этого, исследуемый образец и держатель образца должны быть размещены между двумя рупорными антеннами. В связи с этим особое внимание уделяется форме образца и его расположению в пространстве.

Таким образом, следует отметить, что подходы, обеспечивающие одновременный контроль компонент тензора (1) при двухосной анизотропии ДП с учетом их частотной дисперсии, а также толщины образца ДП при одностороннем подходе с учетом размещения его на металлической подложке, практически не прорабатывались.

В [18—20] на основе эффектов взаимодействия поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ) СВЧ-диапазона, возбуждаемых непосредственно в исследуемых образцах, разработан ряд методов контроля ЭФГП и дефектов различных типов материалов, а также покрытий на их основе. Информативным параметром в представленных методах выступает частотная зависимость действительной части комплексного коэффициента ослабления (КО) поля ПЭМВ по нормали к поверхности покрытия  $\alpha'(f_k, \dot{\epsilon}_n, \dot{\mu}_n, t_n)$ , которая определяется методом зонда в широкой полосе частот с определенным дискретным шагом [18—20]:

$$\alpha'(f_k, \dot{\epsilon}_n, \dot{\mu}_n, t_n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{E_j(f_k)}{E_{j+1}(f_k)} \right], \quad (2)$$

где  $E_j$  и  $E_{j+1}$  — значения напряженности электрического поля ПЭМВ, измеренные по нормали к поверхности покрытия (по оси  $Y$ ) в точках измерений  $y$  и  $y + s$ ,  $s$  — расстояние между точками измерений,  $J$  — количество точек измерения,  $k = 1, \dots, K$  — количество частот измерений.

В этом случае представляется перспективным исследование возможности использования в информативных целях ПЭМВ СВЧ диапазона для контроля диэлектрической проницаемости и толщины образцов ДП с анизотропией диэлектрической проницаемости.

Таким образом, целью статьи является разработка метода локального контроля компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости с учетом их частотной дисперсии и толщины анизотропных ДП с двухосной анизотропией на металлической подложке в едином цикле измерения, с использованием поверхностных электромагнитных волн СВЧ-диапазона, обеспечивающего повышение точности и достоверности их оценки.

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФГП АНИЗОТРОПНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Исходя из вида тензора (1), вектор ЭФГП диэлектрических покрытий с двухосной анизотропией диэлектрической проницаемости целесообразно представить семикомпонентным:  $\xi_n = \{\epsilon'_{\parallel x}, \epsilon''_{\parallel x}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon''_{\perp y}, \epsilon'_{\parallel z}, \epsilon''_{\parallel z}, t_n\}$ . Величину анизотропии компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) целесообразно характеризовать коэффициентами анизотропии [4, 5]:

две пары коэффициентов, характеризующих отличие между собой тангенциальных ( $\epsilon'_{\parallel x}, \epsilon''_{\parallel x}, \epsilon'_{\parallel z}, \epsilon''_{\parallel z}$ ) и нормальной ( $\epsilon'_{\perp y}, \epsilon''_{\perp y}$ ) компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости (1) —  $\mathfrak{G}_{\epsilon'}^{xy}, \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{xy}, \mathfrak{G}_{\epsilon'}^{zy}, \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{zy}$ , и пара коэффициентов, характеризующих различие тангенциальных составляющих ( $\epsilon'_{\parallel x}, \epsilon''_{\parallel x}$  и  $\epsilon'_{\parallel z}, \epsilon''_{\parallel z}$ ) —  $\mathfrak{G}_{\epsilon'}^{xz}, \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{xz}$ :

$$\mathfrak{G}_{\epsilon'}^{xy} = \left| 1 - \frac{\epsilon'_{\parallel x}}{\epsilon'_{\perp y}} \right|; \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{xy} = \left| 1 - \frac{\epsilon''_{\parallel x}}{\epsilon''_{\perp y}} \right|; \mathfrak{G}_{\epsilon'}^{zy} = \left| 1 - \frac{\epsilon'_{\parallel z}}{\epsilon'_{\perp y}} \right|; \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{zy} = \left| 1 - \frac{\epsilon''_{\parallel z}}{\epsilon''_{\perp y}} \right|; \mathfrak{G}_{\epsilon'}^{xz} = \left| 1 - \frac{\epsilon'_{\parallel z}}{\epsilon'_{\parallel x}} \right|; \mathfrak{G}_{\epsilon''}^{xz} = \left| 1 - \frac{\epsilon''_{\parallel z}}{\epsilon''_{\parallel x}} \right|. \quad (3)$$

Предлагаемый метод оценки компонент тензора (1) и коэффициентов анизотропии (3) базируется на особенностях распространения радиальной ПЭМВ в исследуемом образце анизотропного ДП и принципах многочастотного метода ПЭМВ [18—20]. Рассмотрим качественные теоретические предпосылки метода. Проанализируем составляющие поля плоской ПЭМВ типа  $E$  (4.1) и радиальной ПЭМВ (4.2) над однородным ДП, которые имеют следующий вид [21]:

$$\begin{cases} \dot{H}_y = A e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} e^{-j\dot{\gamma}z} \\ \dot{E}_x = (\dot{\gamma} / \omega \epsilon_0) A e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} e^{-j\dot{\gamma}z} \\ \dot{E}_z = (j\dot{\alpha} / \omega \epsilon_0) A e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} e^{-j\dot{\gamma}z} \end{cases}; \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \dot{H}_\varphi = A e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} H_1^{(2)}(-j\dot{\gamma}r) \\ \dot{E}_r = A(\dot{\alpha}(f_k, \xi_n) / j\omega \epsilon_0) e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} H_1^{(2)}(-j\dot{\gamma}r), \\ \dot{E}_y = A(\dot{\gamma} / \epsilon_0) e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y} H_0^{(2)}(-j\dot{\gamma}r), \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $H_0^{(2)}$  — функция Ханкеля 2 рода нулевого порядка;  $H_1^{(2)}$  — функция Ханкеля 2 рода первого порядка,  $\dot{\alpha}(f, \xi_n)$  — комплексный коэффициент ослабления поля ПЭМВ,  $\xi_n$  — вектор ЭФГП однородного диэлектрического покрытия;  $\dot{\gamma} = \alpha_3 - j\beta$  — продольная постоянная распространения,  $\alpha_3$  — коэффициент затухания,  $\beta$  — коэффициент фазы;  $\omega$  — круговая частота;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $j$  — мнимая единица,  $f$  — текущая частота.

Анализ составляющих поля ПЭМВ над однородным ДП показывает, что у радиальной ПЭМВ (4.2) распределение поля вдоль оси  $y$  (по нормали к поверхности покрытия) такое же, как и у соответствующей плоской ПЭМВ (4.1), и определяется экспоненциальным множителем  $e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y}$  с параметром в виде комплексного КО  $\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)$ , который в свою очередь зависит от вектора ЭФГП диэлектрического покрытия  $\xi_n$ .

С учетом того, что тангенциальная составляющая диэлектрической проницаемости тензора (1) на осях поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  распадается на две различные компоненты  $\epsilon'_{\parallel x} \neq \epsilon'_{\parallel z}$ , КО поля радиальной ПЭМВ  $\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)$  и экспоненциальный множитель  $e^{-\dot{\alpha}(f_k, \xi_n)y}$  также будут отличаться на них соответственно. При этом КО поля радиальной ПЭМВ на осях поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  —  $\dot{\alpha}^x(f_k)$  и  $\dot{\alpha}^z(f_k)$  принимают экстремальные значения и фактически являются максимальным и минимальным (минимальным/максимальным) значениями. Таким образом, анализируя КО по окружности вокруг центра возбуждения радиальной ПЭМВ, можно оценить поперечную анизотропию диэлектрического покрытия.

Геометрия исследуемой задачи приведена на рис. 2. Для экспериментального возбуждения радиальной ПЭМВ в исследуемых анизотропных ДП использовали круглый волновод с волной  $E_{01}$ , имеющей осевую симметрию.

С учетом неопределенностей в измерении КО, которые включают шум в измерительной системе, погрешности ее калибровки и другие составляющие, обнаружение максимального и минимального значений КО при малых величинах  $\dot{\epsilon}'_{\parallel x}$  и  $\dot{\epsilon}'_{\parallel z}$  становится затруднительным. Для компенсации данных неопределенностей измерений следует проводить измерения КО в широкой полосе частот на нескольких частотах [18—20].

Исходя из этого, на первом этапе проводят измерение КО  $\alpha'(f_k, i \cdot \Delta\theta)$ , где  $i = 1, \dots, n$ , по окружности относительно центра возбуждения радиальной ПЭМВ с шагом по углу  $\Delta\theta$  на  $K$  дискретных частотах в каждой точке измерений. Поиск экстремальных значений  $\alpha'_{\text{ср}}^x$  и  $\alpha'_{\text{ср}}^z$  осуществляется из полученной угловой зависимости усредненных значений КО в каждой точке измерений:

$$\alpha'_{\text{ср}}(i \cdot \Delta\theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \alpha'(f_k, i \cdot \Delta\theta), \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

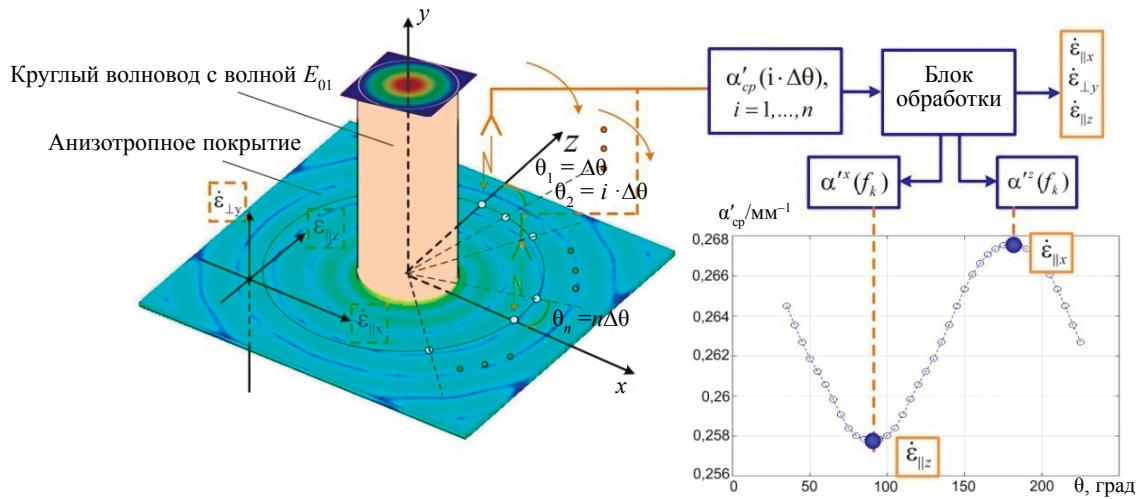


Рис. 2. Геометрия исследуемой задачи.

Таким образом, в результате сканирования анизотропного ДП по окружности оценивают наличие поперечной анизотропии (в плоскости ДП). Для количественной оценки составляющих вектора ЭФГП анизотропного ДП разработан алгоритм обработки КО на поперечных осях анизотропии  $x$  и  $z$  —  $\alpha'^x(f_k)$  и  $\alpha'^z(f_k)$ .

С учетом наличия двух направлений поперечной анизотропии ДП  $x$  и  $z$ , вектор его ЭФГП  $\xi_n = \{\varepsilon'_{\parallel x}, \varepsilon''_{\parallel x}, \varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, \varepsilon'_{\parallel z}, \varepsilon''_{\parallel z}, t_n\}$  был разделен на два подвектора  $\xi_n^x = \{\varepsilon'_{\parallel x}, \varepsilon''_{\parallel x}, \varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, t_n\}$  и  $\xi_n^z = \{\varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, \varepsilon'_{\parallel z}, \varepsilon''_{\parallel z}, t_n\}$ . В результате, коэффициент ослабления ПЭМВ на осях поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  обозначили в виде  $\alpha'^x(f_k, \xi_n^x)$  и  $\alpha'^z(f_k, \xi_n^z)$  соответственно. По частотной зависимости коэффициента ослабления  $\alpha'_3(f_k, \xi_n)$  находятся компоненты  $\dot{\varepsilon}_{\parallel x}$  и  $\dot{\varepsilon}_{\perp y}$ , а по зависимости  $\alpha'_3(f_k, \xi_n)$  — компоненты  $\dot{\varepsilon}_{\parallel z}$  и  $\dot{\varepsilon}_{\perp y}$ .

Структура алгоритмов определения векторов  $\xi_n^x = \{\varepsilon'_{\parallel x}, \varepsilon''_{\parallel x}, \varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, t_n\}$  и  $\xi_n^z = \{\varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, \varepsilon'_{\parallel z}, \varepsilon''_{\parallel z}, t_n\}$  из частотных зависимостей  $\alpha'^x(f_k, \xi_n^x)$  и  $\alpha'^z(f_k, \xi_n^z)$  аналогична. Исходя из этого, рассмотрим алгоритм их обработки без привязки к конкретной оси поперечной анизотропии путем введения обозначения  $\alpha''(f_k, \xi_n^r)$ ,  $r = x, z$ .

Экспериментальные значения КО  $\alpha''_3(f_k, \xi_n)$  на соответствующей поперечной оси анизотропии можно представить как сумму теоретических значений  $\alpha''_T(f_k, \xi_n)$  и функции определяющей неопределенности измерения  $n(f_k)$  [18, 19]:

$$\alpha''_3(f_k, \xi_n) = \alpha''_T(f_k, \xi_n) + n(f_k); \quad r = x, z; \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (6)$$

Функция  $n(f_k)$  представляет собой шум, воздействующий на  $k$ -измерение КО, обусловленный как инструментальной и методической погрешностями при контроле, так и достоверностью электродинамической модели измерения коэффициента ослабления ПЭМВ. Она была представлена как аддитивный некоррелированный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием  $m[n(f_k)] = 0$  и заданным уровнем дисперсии  $\sigma_k^2 = m[n^2(f_k)] = N_0 / 2$ , где  $N_0$  — общая мощность шума, присутствующего в измерении.

Алгоритм обработки результатов измерений КО базируется на основном положении теории оценок — информация о значениях компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости  $\bar{\varepsilon}$  и толщине  $t_n$  анизотропного ДП заключена в совместной плотности распределения вероятностей результатов измерений КО на нескольких частотах, которая достигает своего максимального значения на истинных значениях компонент тензора диэлектрической проницаемости  $\bar{\varepsilon}$  и толщины  $t_n$  контролируемого ДП. В этом случае средние квадраты ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon'}^{xy} - \mathcal{G}_{\varepsilon'}^{xy}|^2$ ,  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon''}^{xy} - \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{xy}|^2$ ,  $\Delta_{\varepsilon'}^{zy} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon'}^{zy} - \mathcal{G}_{\varepsilon'}^{zy}|^2$ ,  $\Delta_{\varepsilon''}^{zy} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon''}^{zy} - \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{zy}|^2$ ,  $\Delta_{\varepsilon'}^{xz} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon'}^{xz} - \mathcal{G}_{\varepsilon'}^{xz}|^2$ ,  $\Delta_{\varepsilon''}^{xz} = |\hat{\mathcal{G}}_{\varepsilon''}^{xz} - \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{xz}|^2$  оценки коэффициентов анизотропии  $\mathcal{G}_{\varepsilon'}^{xy}, \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{xy}, \mathcal{G}_{\varepsilon'}^{zy}, \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{zy}, \mathcal{G}_{\varepsilon'}^{xz}, \mathcal{G}_{\varepsilon''}^{xz}$  достигают минимального значения.

Согласно [18, 19], функцию логарифмического правдоподобия для оценки максимального значения совместной плотности распределения вероятностей результатов измерения КО на  $K$ -частотах можно представить в следующем виде:



$$L(\mathbf{A}_3^r; \xi_n^r) = -K \ln(\sqrt{\pi N_0}) - \frac{K}{N_0} |\mathbf{A}_3^r - \mathbf{A}_T^r|^2, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}_3^r$  и  $\mathbf{A}_T^r$  — вектор-столбцы полученных экспериментально и теоретических значений коэффициентов ослабления со следующими компонентами:

$$\mathbf{A}_3^r = [\alpha_3^r(f_1), \alpha_3^r(f_2), \dots, \alpha_3^r(f_k)]^T,$$

$$\mathbf{A}_T^r = [\dot{\alpha}_T^r(f_1, \xi_n^r), \dot{\alpha}_T^r(f_2, \xi_n^r), \dots, \dot{\alpha}_T^r(f_k, \xi_n^r)]^T,$$

где  $\alpha_3^r(f_k)$  — действительная часть экспериментальных КО поля ПЭМВ соответствующей оси поперечной анизотропии;  $\dot{\alpha}_T^r(f_k, \xi_n^r)$  — теоретические комплексные значения КО поля ПЭМВ по соответствующей оси поперечной анизотропии;  $r = x, z$ .

Согласно [18,19], мнимые части  $\alpha^{rr}(f, \xi_n^r)$ , где  $r = x, z$ , экспериментальных комплексных КО были включены в функцию логарифмического правдоподобия (7) в качестве дополнительного параметра оптимизации. Функциональную зависимость мнимой части  $\alpha^{rr}(f, \xi_n^r)$  комплексного КО представили в виде параметрической функции, задаваемой в виде многочлена:

$$\alpha^{rr}(f, \Phi_\alpha^r) = \sum_{i=0}^n a_{n-i}^r f^i, \quad r = x, z, \quad (8)$$

где  $a_{n-i}^r$  — параметры, которые фактически представляют собой коэффициенты регрессии данной функциональной зависимости КО,  $f$  — текущая частота измерения.

В такой постановке данные коэффициенты необходимы только для обеспечения максимума функции логарифмического правдоподобия (7). Параметры  $a_{n-i}^r$  объединили в вектор параметрических коэффициентов функциональных зависимостей (8) мнимой части коэффициента ослабления  $\Phi_\alpha^r = \{a_{n-i}^r\}$ ,  $i = 0, \dots, n$ ,  $r = x, z$ .

Тогда вектор экспериментальных КО в (7) примет вид:

$$\mathbf{A}_3^r = [\alpha_3^r(f_1) - \alpha^{rr}(f_1, \Phi_\alpha^r), \alpha_3^r(f_2) - j\alpha^{rr}(f_2, \Phi_\alpha^r), \dots, \alpha_3^r(f_k) - j\alpha^{rr}(f_k, \Phi_\alpha^r)]^T.$$

Проведенные исследования показали, что для СВЧ-материалов с плавным законом дисперсии диэлектрической проницаемости для приемлемой точности оценки составляющих вектора  $\xi_n$  и обеспечения максимума функции логарифмического правдоподобия (7) в многочлене (8) достаточно 2-3 членов.

Максимум совместной плотности распределения вероятностей результатов измерений КО на  $K$ -частотах достигается при значениях составляющих вектора ЭФГП исследуемого ДП  $\xi_n^r$ , которые обеспечивают максимум логарифмической функции правдоподобия (7). С учетом того, что первое слагаемое (7) не зависит от вектора  $\xi_n^r$ , функционал для оценки  $\xi_n^r$  можно представить в следующем виде:

$$\hat{\xi}_n^r = \arg \min_{\xi_n^r} \{Z(\xi_n^r)\}, \quad (9)$$

где

$$Z(\xi_n^r) = \frac{1}{K} |\mathbf{A}_3^r - \mathbf{A}_T^r|^2, \quad r = x, z. \quad (10)$$

В случае, если частотной дисперсией компонента тензора диэлектрической проницаемости (1) исследуемого ДП невозможно пренебречь, вводится операция параметризации. Для учета частотной дисперсии, описываемой гладкими функциями, выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости наиболее целесообразно представить в виде параметрических функций, задаваемых в виде многочленов:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{\parallel x}(f) &= \sum_{l_1=0}^{m_1} a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'_{\parallel x}} f^{l_1}; \quad \varepsilon''_{\parallel x}(f) = \sum_{l_2=0}^{m_2} a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''_{\parallel x}} f^{l_2}; \quad \varepsilon'_{\perp y}(f) = \sum_{l_3=0}^{m_3} a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}} f^{l_3}; \\ \varepsilon''_{\perp y}(f) &= \sum_{l_4=0}^{m_4} a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}} f^{l_4}; \quad \varepsilon'_{\parallel z}(f) = \sum_{l_5=0}^{m_5} a_{m_5-l_5}^{\varepsilon'_{\parallel z}} f^{l_5}; \quad \varepsilon''_{\parallel z}(f) = \sum_{l_6=0}^{m_6} a_{m_6-l_6}^{\varepsilon''_{\parallel z}} f^{l_6}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $l_1 = 0, \dots, m_1$ ;  $l_2 = 0, \dots, m_2$ ;  $l_3 = 0, \dots, m_3$ ;  $l_4 = 0, \dots, m_4$ ;  $l_5 = 0, \dots, m_5$ ;  $l_6 = 0, \dots, m_6$ ;  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$  — число членов в соответствующем многочлене;  $f$  — текущая частота.

С учетом наличия двух осей поперечной анизотропии  $x$  и  $z$ , параметры  $a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'_{\parallel x}}, a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''_{\parallel x}}, a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}}, a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}}, a_{m_5-l_5}^{\varepsilon'_{\parallel z}}, a_{m_6-l_6}^{\varepsilon''_{\parallel z}}$  и толщина ДП  $t_{\Pi}$  объединяются в два подвектора  $\xi_{\Pi}^{rx} = \{a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'_{\parallel x}}, a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''_{\parallel x}}, a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}}, a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}}, t_{\Pi}\}$ ,  $\xi_{\Pi}^{rz} = \{a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}}, a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}}, a_{m_5-l_5}^{\varepsilon'_{\parallel z}}, a_{m_6-l_6}^{\varepsilon''_{\parallel z}}, t_{\Pi}\}$ , осуществляется переход от векторов  $\xi_{\Pi}^x, \xi_{\Pi}^z$  к векторам  $\xi_{\Pi}^{rx}$  и  $\xi_{\Pi}^{rz}$ :

$$\xi_{\Pi}^x = \{\varepsilon'_{\parallel x}, \varepsilon''_{\parallel x}, \varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, t_{\Pi}\} \rightarrow \xi_{\Pi}^{rx} = \{a_{m_1-l_1}^{\varepsilon'_{\parallel x}}, a_{m_2-l_2}^{\varepsilon''_{\parallel x}}, a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}}, a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}}, t_{\Pi}\}, \quad (12)$$

$$\xi_{\Pi}^z = \{\varepsilon'_{\perp y}, \varepsilon''_{\perp y}, \varepsilon'_{\parallel z}, \varepsilon''_{\parallel z}, t_{\Pi}\} \rightarrow \xi_{\Pi}^{rz} = \{a_{m_3-l_3}^{\varepsilon'_{\perp y}}, a_{m_4-l_4}^{\varepsilon''_{\perp y}}, a_{m_5-l_5}^{\varepsilon'_{\parallel z}}, a_{m_6-l_6}^{\varepsilon''_{\parallel z}}, t_{\Pi}\}, \quad (13)$$

и все дальнейшие операции по минимизации функционала (9) выполняются с использованием данных векторов. Таким образом, в результате его минимизации определяются коэффициенты многочленов (11) или фактически конкретный вид зависимости соответствующего компонента тензора комплексной диэлектрической проницаемости.

Согласно замен (12, 13) и представления мнимой части комплексного коэффициента ослабления в виде (8) функционал оценки  $\xi_{\Pi}^r$  (9) исследуемого анизотропного ДП с частотной дисперсией на каждой из осей поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  примет вид:

$$\hat{\xi}_{\Pi}^{rr} = \arg \min_{\xi_{\Pi}^r, \Phi_{\alpha}^r} \{Z(\xi_{\Pi}^r, \Phi_{\alpha}^r)\}, \quad (14)$$

где

$$Z(\xi_{\Pi}^r, \Phi_{\alpha}^r) = \frac{1}{K} |\mathbf{A}_{\text{э}}^{rr} - \mathbf{A}_{\text{т}}^{rr}|^2, \quad r = x, z, \quad (15)$$

где  $\mathbf{A}_{\text{э}}^{rr}$  и  $\mathbf{A}_{\text{т}}^{rr}$  — вектор-столбцы, со следующими компонентами:

$$\mathbf{A}_{\text{э}}^{rr} = [\alpha_{\text{э}}^{rr}(f_1) - j\alpha_{\text{э}}^{rr}(f_1, \Phi_{\alpha}^r), \quad \alpha_{\text{э}}^{rr}(f_2) - j\alpha_{\text{э}}^{rr}(f_2, \Phi_{\alpha}^r), \dots, \alpha_{\text{э}}^{rr}(f_K) - j\alpha_{\text{э}}^{rr}(f_K, \Phi_{\alpha}^r)]^T,$$

$$\mathbf{A}_{\text{т}}^{rr} = [\dot{\alpha}_{\text{т}}^r(f_1, \xi_{\Pi}^{rr}), \quad \dot{\alpha}_{\text{т}}^r(f_2, \xi_{\Pi}^{rr}), \dots, \dot{\alpha}_{\text{т}}^r(f_K, \xi_{\Pi}^{rr})]^T.$$

Поиск минимумов функционалов (9) и (14) проводится численно в заданном диапазоне изменения величин компонентов векторов  $\mathbf{A}_{\text{э}}^r$  и  $\mathbf{A}_{\text{т}}^r$  или  $\mathbf{A}_{\text{э}}^{rr}$  и  $\mathbf{A}_{\text{т}}^{rr}$  в случае учета частотной дисперсии.

Численную оптимизацию функционалов (9) и (14) проводили с помощью алгоритма роя частиц, реализованного в виде функции «particleswarm» приложения Global Search пакета Matlab.

Без учета частотной дисперсии, с учетом дополнительного вектора  $\Phi_{\alpha}^r$  с двумя составляющими, параметризация функционала (9) осуществляется по 8 переменным, а с учетом частотной дисперсии и введением параметризаций (12,13) — по 12 переменным. Для составляющих векторов  $\xi_{\Pi}^r, \xi_{\Pi}^{rx}$  и  $\Phi_{\alpha}^r$  границы верхнего и нижнего диапазона их изменения при оптимизации были установлены на 30 % от номинальных значений. Параметры алгоритма роя частиц, обеспечивающие гарантированное нахождение глобального минимума целевых функций (9, 14), следующие: ‘SwarmSize’—3500, ‘InertiaRange’—[0.01,0.999], ‘InitialSwarmSpan’—1000, ‘SelfAdjustmentWeight’— $1 \cdot 10^{-20}$ , ‘SocialAdjustment Weight’—1,2. Среднее время минимизации целевых функций (8, 14) составляет не более 1-1,5 мин на компьютере с процессором типа intel core i5 с тактовой частотой 2,33 ГГц и 4 Гбайт оперативной памяти.

Теоретические значения комплексных коэффициентов ослабления  $\dot{\alpha}_{\text{т}}^r(f_k, \xi_{\Pi}^r)$  при минимизации функционалов (9) и (14) для каждой из осей поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  определяются путем решения дисперсионного уравнения:

$$D[\dot{\alpha}_{\text{т}}^r(f_1, \xi_{\Pi}^r); f_k] = 0, \quad r = x, z, \quad k = 1, \dots, K. \quad (16)$$

Расчетная схема составления дисперсионного уравнения (16) методом «поперечного резонанса» приведена на рис. 3.

Особенность составления дисперсионного уравнения в данном случае заключается в том, что поперечное волновое число в слое анизотропного ДП  $\dot{q}$  зависит одновременно как от тангенциальной составляющей диэлектрической проницаемости  $\dot{\varepsilon}_{\parallel}$ , так и от нормальной компоненты  $\dot{\varepsilon}_{\perp}$  в виде их отношения:  $\dot{\varepsilon}_{\parallel} / \dot{\varepsilon}_{\perp}$ .

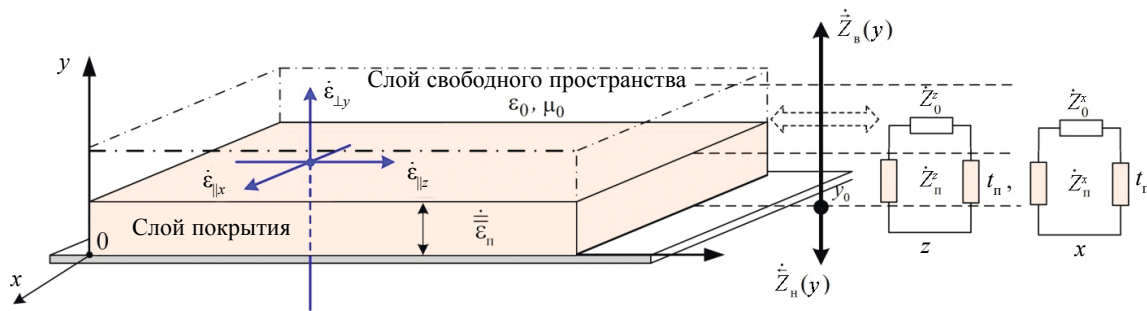


Рис. 3. Расчетная схема составления дисперсионного уравнения.

Уравнение «поперечного резонанса» для составления дисперсионного уравнения (16) имеет следующий вид [22, 23]:

$$\dot{Z}_b^r(y) + \dot{Z}_n^r(y) = 0 \quad \text{при } \forall y, \quad r = x, z, \quad (17)$$

где  $\dot{Z}_b^r(y)$ ,  $\dot{Z}_n^r(y)$  — эквивалентные характеристические сопротивления «вверх» и «вниз» относительно произвольного опорного сечения  $y_0$  (для удобства математических преобразований выбрано сечение  $y_0$  между слоем покрытия и металлической подложкой).

Толщина рассматриваемых СВЧ-композиционных ДП на практике составляет обычно от 0,2 мм и более, что намного больше поверхностного слоя в металле, поэтому принято, что  $\dot{Z}_n^r(y) \approx 0$ , а  $\dot{Z}_b^r(y)$  определяются по рекуррентной формуле трансформации волновых сопротивлений [22—25]:

$$\dot{Z}_b^r \equiv \dot{Z}^r(\pi_0) = \dot{Z}_n^r \frac{\dot{Z}_0^r + j\dot{Z}_n^r \operatorname{tg}(q^r t_n)}{\dot{Z}_n^r + j\dot{Z}_0^r \operatorname{tg}(q^r t_n)}, \quad (18)$$

где  $\dot{Z}^r(\pi_0)$  — эквивалентное характеристическое сопротивление анизотропного слоя и слоя над ним (слой «свободное пространство»);  $\dot{Z}_0^r, \dot{Z}_n^r$  — характеристические сопротивления на границе раздела между слоем анизотропного ДП и свободным пространством и в слое ДП для поперечных осей анизотропии  $x$  и  $z$  соответственно.

Выражения для  $\dot{Z}_0^r$  и  $\dot{Z}_n^r$  имеют следующий вид [22—25]:

$$\dot{Z}_0^r = -j \frac{\dot{\alpha}_T^r(f_k, \xi_n^r)}{\omega \varepsilon_0}; \quad \dot{Z}_n^r = \frac{q^r}{\omega \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'')}, \quad r = x, z, \quad (19)$$

где  $\dot{\alpha}_T^r(f_k, \xi_n^r)$  — теоретические комплексные КО ПЭМВ для поперечных осей анизотропии  $x$  и  $z$ ;  $q^r$  — комплексное поперечное волновое число в слое ДП,  $r = x, z$ , при этом  $q^x = \sqrt{\varepsilon_x' / \varepsilon_y' \sqrt{k_0^2 \varepsilon_y' - k_0^2 - \dot{\alpha}_T^{x2}(f_k, \xi_n^x)}}$ , а  $q^z = \sqrt{\varepsilon_z' / \varepsilon_y' \sqrt{k_0^2 \varepsilon_y' - k_0^2 - \dot{\alpha}_T^{z2}(f_k, \xi_n^z)}}$ ,  $k_0$  — волновое число свободного пространства,  $k_0 = 2\pi f / c$ ,  $c$  — скорость ЭМВ в свободном пространстве,  $j$  — мнимая единица.

Таким образом, итоговое дисперсионное уравнение для нахождения теоретических комплексных КО анизотропного ДП на металлической подложке для каждой из осей поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  можно представить как

$$D[\dot{\alpha}_T^r(f_k, \xi_n^r); f_k] = 0 \equiv \dot{Z}^r(\pi_0) = 0, \quad r = x, z. \quad (20)$$

Полученные дисперсионные уравнения (20) позволяют для заданной частоты  $f_k$ , значений составляющих тензора (1):  $\varepsilon_x', \varepsilon_x'', \varepsilon_y', \varepsilon_y'', \varepsilon_z', \varepsilon_z''$  и толщины  $t_n$  ДП однозначно определять комплексные коэффициенты ослабления ПЭМВ  $\dot{\alpha}_T^x(f_k, \xi_n^x)$  и  $\dot{\alpha}_T^z(f_k, \xi_n^z)$ .

Таким образом, разработанный метод определения ЭФГП анизотропных ДП с помощью радиальных ПЭМВ включает в себя следующую последовательность действий.

1. Измерение экспериментальных действительных частей коэффициентов ослабления  $\alpha'(f_k, i \cdot \Delta\theta)$ , где  $i = 1, \dots, n$ , по окружности относительно центра возбуждения радиальной ПЭМВ с шагом по углу  $\Delta\theta$  на  $K$  дискретных частотах в каждой точке измерений. Их усреднение в каждой точке окружности по формуле (5) и построение угловой зависимости  $\alpha'_{cp}(i \cdot \Delta\theta)$ .

2. Из полученной угловой зависимости  $\alpha'_{cp}(i \cdot \Delta\theta)$  осуществляется поиск максимального/минимального (минимального/ максимального) значений коэффициентов ослабления  $\alpha'_{cp}$  и  $\alpha'^z_{cp}$ . Если значения  $\alpha'_{cp}$  и  $\alpha'^z_{cp}$  найдены, то принимается решение, что ДП обладает поперечной анизотропией и имеется две поперечные составляющие  $\hat{\xi}_{||}^{lx}$  и  $\hat{\xi}_{||}^{lz}$ .

3. Составление функционалов оценки  $\hat{\xi}_{||}^{lx}$  (9) или  $\hat{\xi}_{||}^{lz}$  (14) и дисперсионного уравнения (20).

4. Решение оптимизационных задач по минимизации функционалов (9) или (14), в ходе которых определяются искомые вектора ЭФГП  $\hat{\xi}_{||}^{lx}$  или  $\hat{\xi}_{||}^{lz}$ .

5. Если экстремальных значений КО  $\alpha'_{cp}$  и  $\alpha'^z_{cp}$  не обнаружено, то принимается решение, что ДП не обладает поперечной анизотропией. При этом также решается оптимизационная задача (9) или (14) для нахождения вектора ЭФГП, содержащего только пять компонентов —  $\hat{\xi}_{||} = \{\epsilon'_{||}, \epsilon''_{||}, \epsilon'_{\perp y}, \epsilon''_{\perp y}, t_{||}\}$ .

### ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА РАЗРЕШЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ АНИЗОТРОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Введем понятие о статистическом пределе разрешения величины анизотропии, т.е. о минимальных значениях коэффициентов анизотропии  $\vartheta_{\epsilon^{xy}}, \vartheta_{\epsilon^{yz}}, \vartheta_{\epsilon^{zy}}, \vartheta_{\epsilon^{xz}}, \vartheta_{\epsilon^{zx}}, \vartheta_{\epsilon^{yz}}$ , которые могут быть выявлены представленным методом.

Методики оценки предела статистического разрешения для любого из коэффициентов  $\vartheta_{\epsilon^{xy}}, \vartheta_{\epsilon^{yz}}, \vartheta_{\epsilon^{zy}}, \vartheta_{\epsilon^{xz}}, \vartheta_{\epsilon^{zx}}, \vartheta_{\epsilon^{yz}}$  аналогичны, поэтому рассмотрим обобщенный коэффициент  $\vartheta$  и, соответственно, обобщенный средний квадрат ошибки их оценки  $\Delta$  без привязки к конкретному коэффициенту.

Среднее значение  $\Delta$  по всем возможным значениям коэффициента анизотропии (задаваемым значениям)  $\vartheta \in \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N\}$  представим [18]:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{\vartheta}_n - \vartheta_n|^2, \quad (21)$$

где  $\hat{\vartheta}_n$  —  $n$ -величина коэффициента анизотропии полученная при минимизации функционала (9) или (14).

Предел статистического разрешения  $\eta$  для полученной оценки  $\Delta$  с учетом заданной доверительной вероятности  $p$ ,  $0 \leq p \leq 1$  представим в следующем виде [18]:

$$\eta = 2\zeta\sqrt{\Delta}, \quad (22)$$

при этом  $\zeta$  определяется путем решения уравнения

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x-\zeta}^{x+\zeta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (23)$$

где  $p$  — вероятность того, что средняя величина коэффициента анизотропии  $\hat{\vartheta}$  лежит в пределах разрешения, около истинной величины коэффициента анизотропии  $\vartheta$ ,  $x$  — стандартизированное значение  $\Delta$ .

Таким образом, фактически предел статистического разрешения, определяемый по выражению (22), является доверительным интервалом оценки величины коэффициента анизотропии  $\hat{\vartheta}$ , полученной при измерении.

### МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Метод реализуется с помощью базового измерительного комплекса (ИК), используемого в предыдущих исследованиях [18—20]. На рис. 4а представлена фотография ИК, на рис. 4б — структурная схема и общая схема проведения эксперимента по оценке ЭФГП диэлектрического покрытия, где цифрами обозначено: 1 — векторный анализатор электрических цепей; 2 — приемная антенна; 3 — механизм перемещения; 4 — электронная вычислительная машина; 5 — антенна возбуждения ПЭМВ (круглый волновод); 6 — металлическая поверхность; 7 — анизотропное диэлектрическое покрытие.

Отличие схемы ИК от базовой [18—20] заключается в использовании в качестве антенны возбуждения радиальной ПЭМВ круглого волновода. Для возможности возбуждения симметричной волны  $E_{01}$  в конструкцию волновода был добавлен штырь, помещенный в центре его поперечного сечения, вдоль оси  $y$ . Несмотря на то, что вдоль фланца волновода возбуждается пространственная волна и в нем могут также возбудиться паразитные типы волн, ошибками измерений, вызванными их влиянием, можно пренебречь, поскольку оценка КО поля ПЭМВ проводилась на малом расстоянии от поверхности (2—2,5 мм).

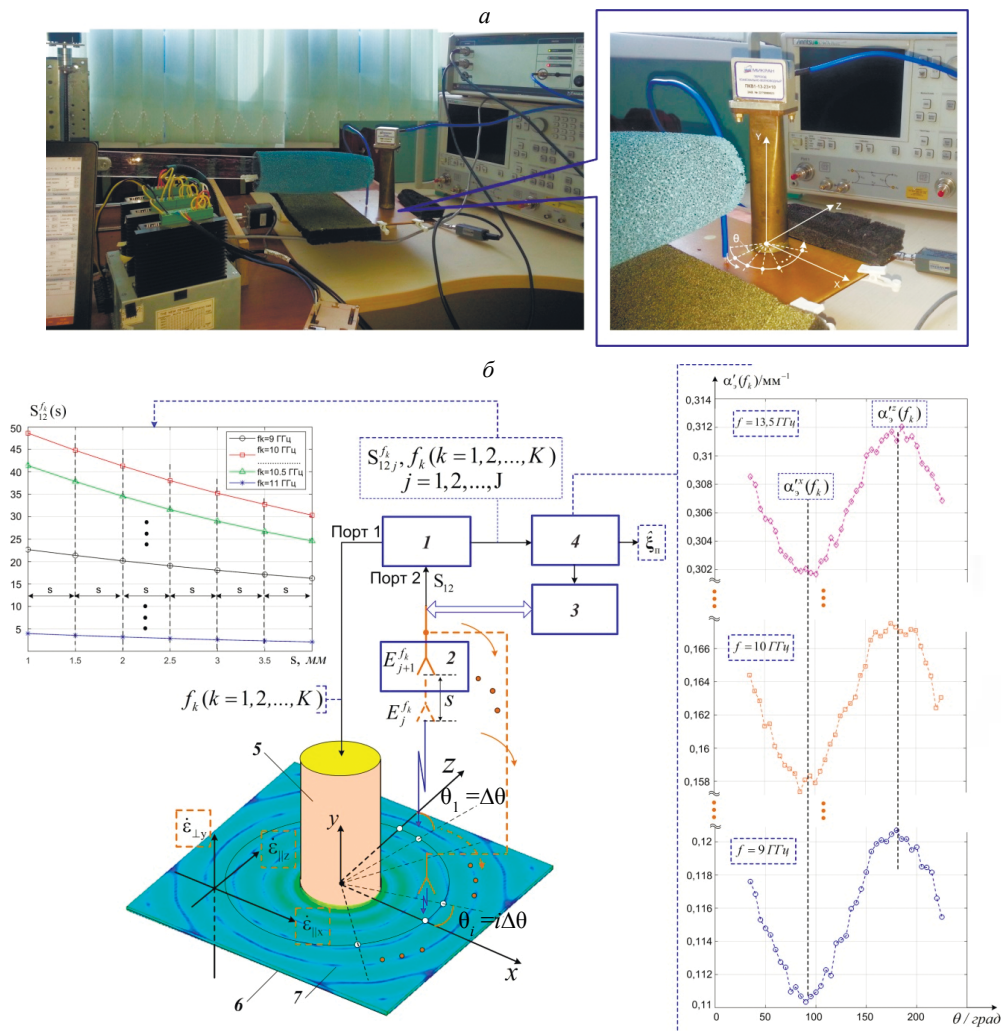


Рис. 4. Фотография (а) и структурная схема (б) ИК, реализующего метод контроля ЭФГП анизотропных диэлектрических покрытий.

Кроме того, система перемещения приемной антенны 3 была запрограммирована для перемещения измерительного зонда 2 по окружности вокруг круглого волновода 5 (рис. 4). Для поиска экстремальных значений  $\alpha'_{cp}{}^x$  и  $\alpha'_{cp}{}^z$  достаточно было исследовать поле ПЭМВ в пределах одной полуокружности.

Оценку действительной части КО поля радиальной ПЭМВ производили по измеренным с помощью векторного анализатора электрических цепей коэффициентам передачи  $S_{12}$ , которые пропорциональны значениям напряженности поля ПЭМВ, по формуле:

$$\alpha'_s(f_k, \xi_n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{1}{s} \ln \left[ \frac{S_{12j}}{S_{12j+1}} \right], \quad (24)$$

где  $s$  — шаг между точками измерений, который составлял 0,5 мм;  $J$  — количество точек измерения (экспериментальные исследования показали, что для приемлемой точности оценок коэффициента ослабления необходимо  $J = 4-5$  точек измерения над поверхностью).

В качестве образцов покрытий для натурных экспериментов были использованы изотропный стандартный образец полиметилметакрилата ( $\epsilon \approx 2,7 - j0,081$ ) и промышленные СВЧ-ламинаты трех различных производителей: Rogers Ro4003C, Arlon 25N, Taconic RF-35 [6].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценки статистического предела оценки коэффициентов анизотропии проведена серия численных экспериментов.

На рис. 5 приведены угловые зависимости действительной части комплексного КО поля радиальной ПЭМВ  $\alpha'(f_k, i \cdot \Delta\theta, \xi_n)$  на частоте  $f_k = 10,5$  ГГц, построенные с шагом по углу  $\Delta\theta = 5$  град, для фиксированных значений  $\epsilon'_{\parallel x} = 5$ ,  $\epsilon'_{\parallel y} = 5$ ,  $\epsilon''_{\parallel x} = \epsilon''_{\parallel y} = \epsilon''_{\parallel z} = 0,028$ , при величине  $\epsilon'_{\parallel z}$ , изменяющейся от 4 до 4,99. Толщина ДП составляла 3 мм. Зависимости были получены путем численного моделирования в системе электродинамического моделирования CST Microwave Studio.

Анализ зависимостей рис. 5 показывает, что КО поля радиальной ПЭМВ достигает максимума на поперечной оси анизотропии  $x$ , на которой  $\epsilon'_{\parallel x} = \epsilon'_{\parallel y} = 5$ , что обусловлено тем, что отношение  $\sqrt{\epsilon'_x / \epsilon'_y}$  в поперечном волновом числе в слое ДП  $\dot{q}^x$  (19) равно единице.

Минимум КО возникает на поперечной оси анизотропии  $z$ , на которой  $\epsilon'_{\parallel z} < \epsilon'_{\parallel y}$  и, соответственно, отношение  $\sqrt{\epsilon'_z / \epsilon'_y}$  в поперечном волновом числе в слое ДП  $\dot{q}^z$  (19) становится меньше единицы. Таким образом, проведенное численное моделирование подтверждает базовые положения разработанного метода по возможности обнаружения поперечной анизотропии и контроля поперечных компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon}_{\parallel x}$  и  $\dot{\epsilon}_{\parallel z}$  соответственно.

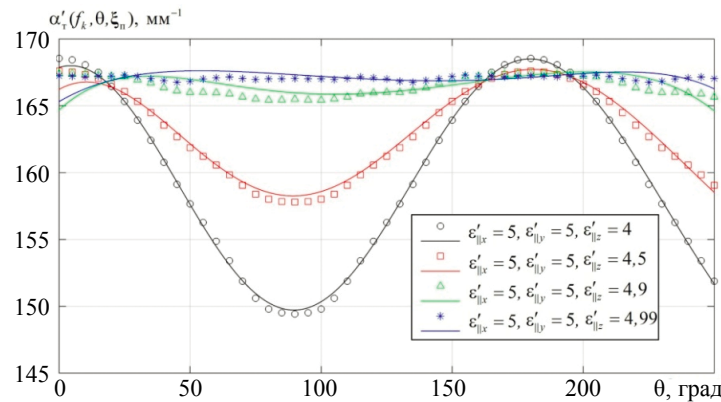


Рис. 5. Угловые зависимости коэффициента ослабления поля радиальной ПЭМВ.

На рис. 6а приведены частотные зависимости действительной  $\alpha'_T(f_k, \xi_n)$  части комплексного КО диэлектрического покрытия на его поперечной оси анизотропии  $x$  при возрастающих значениях тангенциальной составляющей диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_{\parallel x}$  от 4 до 4,99 и фиксированных значениях  $\epsilon'_{\perp y} = 5$ ,  $\epsilon''_{\parallel x} = \epsilon''_{\parallel y} = 0,028$ .

На рис. 6б приведены частотные зависимости мнимой  $\alpha''_T(f_k, \xi_n)$  части КО при возрастающих значениях тангенциальной составляющей диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_{\parallel x}$  от 0,01 до 0,0279 и фиксированных значениях  $\epsilon'_{\perp y} = 5$ ,  $\epsilon'_{\perp x} = 5$ ,  $\epsilon'_{\perp z} = 0,028$ .

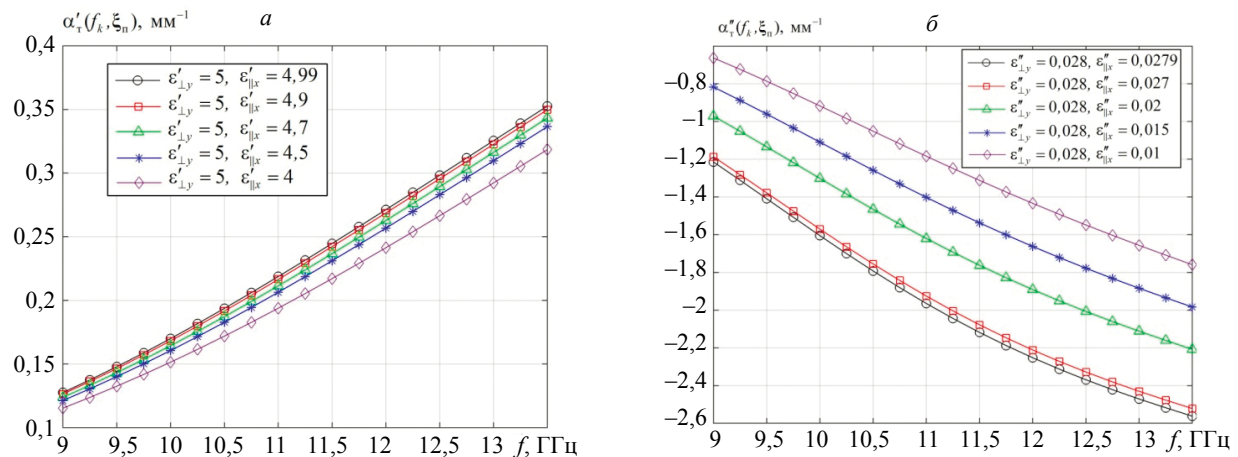


Рис. 6. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КО.



Анализ частотных зависимостей действительной части КО рис. 6а показывает, что даже при небольшом отличии значений нормальной составляющей диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'_{\perp y} = 5$  от тангенциальной составляющей  $\varepsilon'_{\parallel x} = 4,99$  зависимости различаются. Частотные зависимости мнимой части коэффициента ослабления (см. рис. 6б) еще более выражены, они отличаются даже при значениях  $\varepsilon''_{\perp y} = 0,028$  и  $\varepsilon''_{\parallel x} = 0,0279$ .

Таким образом, анализ приведенных зависимостей показывает, что они существенно отличаются для разных величин составляющих тензора диэлектрической проницаемости, что позволяет оценивать их путем решения соответствующей обратной задачи.

Оценку статистического предела разрешения анизотропии проводили для коэффициентов, характеризующих отличие нормальной и тангенциальной составляющих на осях поперечной анизотропии  $x$  и  $z$  —  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}, \mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}, \mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{zy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{zy}$ . Для каждой из приведенных осей поперечной анизотропии оценки предела статистического разрешения аналогичны, поэтому рассмотрим его на примере коэффициентов  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$ .

Для моделирования экспериментальных коэффициентов ослабления  $\alpha_s^{ix}(f_k, \xi_n^x)$  к теоретическим значениям  $\alpha_t^{ix}(f_k, \xi_n^x)$ , на основе модели (6), был добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум со средним квадратическим отклонением (СКО)  $\sigma(\alpha_t^{ix}(f_k, \xi_n^x)) = \sqrt{N_0/2}$ .

На рис. 7 приведены зависимости средних квадратов ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$  оценки коэффициентов анизотропии  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$  при возрастании значений СКО уровня шума, при измерениях коэффициента ослабления на 10 частотах, при увеличении ширины полосы частот измерений:  $\Delta f_1 = 9-9,9$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 100$  МГц),  $\Delta f_2 = 9-10,8$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 200$  МГц),  $\Delta f_3 = 9-12,5$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 350$  МГц) и  $\Delta f_4 = 9-13,5$  ГГц ( $f_{k+1} - f_k = 500$  МГц).

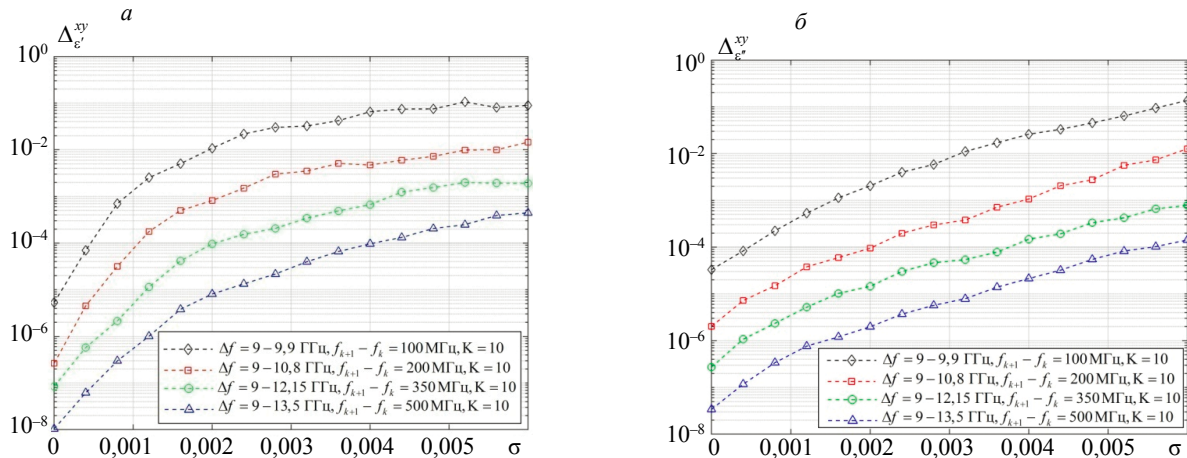


Рис. 7. Зависимости средних квадратов ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$  (а) и  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$  (б) оценки коэффициентов анизотропии  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$  при возрастании значений СКО уровня шума, при увеличении ширины полосы частот измерений.

На рис. 8 приведены зависимости средних квадратов ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$  оценки коэффициентов анизотропии  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$  при возрастании значений СКО уровня шума, при фиксированной ширине полосе частот измерений  $\Delta f = 9-13,5$  ГГц, при увеличении количества частот измерений:  $K_1 = 5$ ,  $K_2 = 10$ ,  $K_3 = 16$ ,  $K_4 = 19$ .

Анализ зависимостей рис. 7 и 8 показывает, что средние квадраты ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$  оценки величин коэффициентов анизотропии  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$  увеличиваются при возрастании СКО уровня шума, уменьшении ширины полосы частот измерений и количества частот измерений. Проведенные численные эксперименты показали, что при ширине полосы частот измерений  $\Delta f = 9-13,5$  ГГц предельный прирост повышения точности обеспечивается при измерениях на 18—22 частотах.

В целом, относительная погрешность оценок коэффициентов анизотропии, при ширине полосы частот измерений  $\Delta f = 9-13,5$  ГГц и СКО уровня шума 0,002—0,003 не превышает 10 % при доверительной вероятности 0,95. Погрешности оценок толщины при этом не превышают 5 % вплоть до значения СКО уровня шума 0,006.

На основании полученных зависимостей оценок средних квадратов ошибок  $\Delta_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\Delta_{\varepsilon''}^{xy}$  оценивали статистический предел разрешения  $\eta \cdot 100$  % коэффициентов анизотропии  $\mathcal{Q}_{\varepsilon'}^{xy}$  и  $\mathcal{Q}_{\varepsilon''}^{xy}$  как функцию от значений доверительной вероятности.

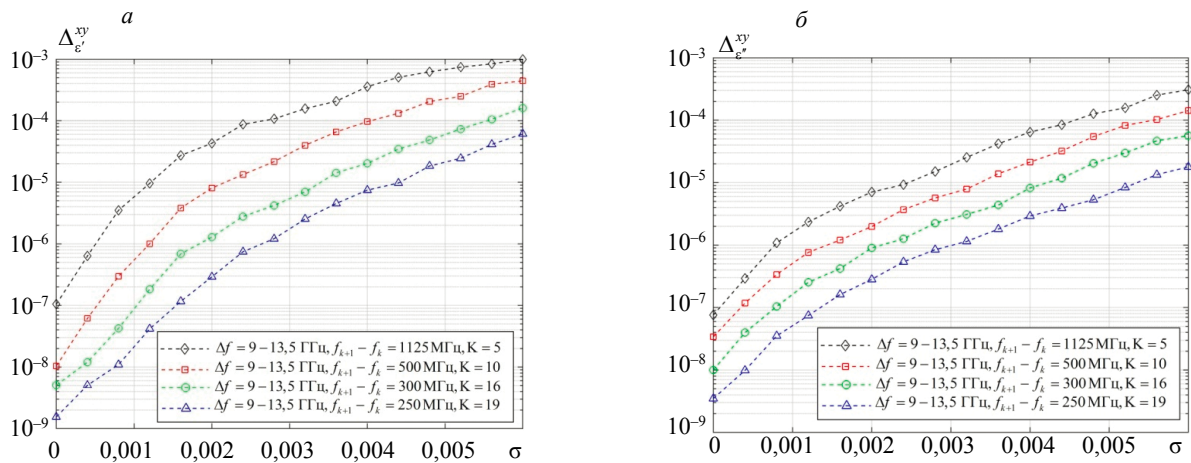


Рис. 8. Зависимости средних квадратов ошибок  $\Delta \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  (а) и  $\Delta \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  (б) оценки коэффициентов анизотропии  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  и  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  при возрастании значений СКО уровня шума, при увеличении количества частот измерений.

На рис. 9 приведены зависимости предела разрешения коэффициентов анизотропии  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  и  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  для СКО уровня шума  $\sigma(\alpha_T^x(f_k, \xi_{\Pi}^x)) = 0,024$  и  $\sigma(\alpha_T^x(f_k, \xi_{\Pi}^x)) = 0,006$ , для ширины полосы частот измерений  $\Delta f = 9\text{—}13,5$  ГГц при измерениях на  $K = 19$  частотах.

Анализ зависимостей рис. 9 показывает, что с увеличением СКО уровня шума разрешение уменьшается для всех значений доверительной вероятности. Это в основном связано с тем, что  $\Delta$  монотонно возрастает при увеличении СКО уровня шума (см. рис. 7, 8). Анализ зависимостей рис. 9 показывает, что при доверительной вероятности 0,95 минимально достижимые значения коэффициента  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  составляют около 0,35 и 3 %, при СКО уровня шума — 0,024 и 0,006 соответственно, а для коэффициента  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  — около 0,3 % и 1,6 % при СКО уровня шума 0,024 и 0,006 соответственно.

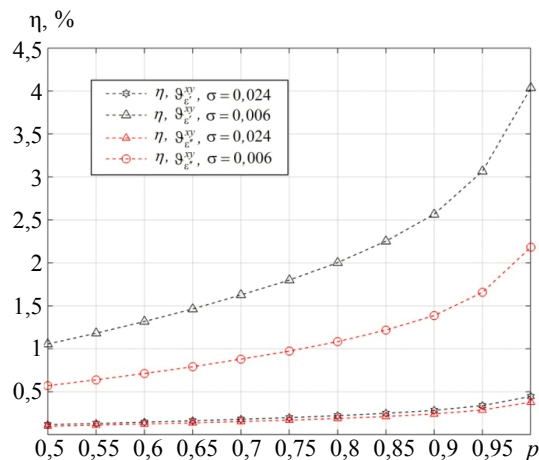


Рис. 9. Зависимость предела разрешения от доверительной вероятности.

Уменьшение СКО уровня шума с 0,006 до 0,024 обеспечивает увеличение разрешения в 8–9 раз. Таким образом, если требуется увеличить разрешение необходимо уменьшать уровень шума в измерительных данных (повышать точности оценок коэффициентов ослабления), либо проводить измерения в более широкой полосе частот измерений с использованием большего количества фиксированных частот. В целом для небольших значений уровня шума разрешения для коэффициентов  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  и  $9 \epsilon_{\epsilon}^{xy}$  сопоставимы между собой.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ЭФГП

Очевидный путь экспериментальной проверки разработанного метода является определение диэлектрической проницаемости четко выраженных изотропных диэлектрических покрытий (кон-

трольных образцов). Исходя из этого, вначале был исследован листовой образец стандартного образца полиметилметакрилата толщиной 1 мм ( $\epsilon \approx 2,7 - j0,081$ ). Для обеспечения разрешения, близкого к статистическому пределу разрешения коэффициентов анизотропии (22), измерение КО поля ПЭМВ проводили в диапазоне частот 9—13,5 ГГц с дискретным шагом по частоте 0,25 ГГц (количество частот  $K=19$ ).

В результате кругового сканирования образца с шагом по углу  $\Delta\theta = 1^\circ$  не отмечено расхождения в угловой зависимости коэффициентов ослабления  $\alpha'_{cp}(f_k, i \cdot \Delta\theta)$  (максимум и минимум отсутствуют), в следствии чего был сделан вывод об отсутствии поперечной анизотропии (в плоскости покрытия). Далее путем минимизации функционала (9) оценивалась нормальная составляющая  $\epsilon_{\perp}$  тензора диэлектрической проницаемости. По результатам измерений не отмечено расхождение величин  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$ , которое превышало бы погрешности измерений. Таким образом, установлено, что материал однороден и не обладает анизотропией. Относительная погрешность оценки действительной части диэлектрической проницаемости материала в исследуемом диапазоне составляет не более 5—7 %.

Далее были исследованы СВЧ-ламинаты различных производителей, расположенные на металлической подложке: Rogers Ro4003C, Arlon 25N, Taconic RF-35 с похожими ЭФГП [6]. Данные материалы являются неоднородными и включают в свой состав базовый полимерный компонент и армирующий наполнитель (стекло, бумага, ткани из полиэфирных волокон и т.д.). Поэтому они обладают более или менее заметной анизотропией диэлектрической проницаемости. При этом следует отметить, что данные производителя, указанные в каталогах, фактически содержат информацию только о величине  $\epsilon'_{\perp}$ , измеренную по стандарту IPC TM 650 2.5.5.5 на фиксированной частоте 10 ГГц.

На первом этапе осуществляли оценку наличия поперечной анизотропии путем поиска экстремальных значений коэффициентов ослабления. По результатам измерений для всех исследуемых образцов, как и в случае однородного материала, экстремальных значений коэффициентов ослабления не обнаружено, что также подтверждает отсутствие поперечной анизотропии.

Далее решали оптимизационную задачу (14), находили оценки  $\epsilon_{\perp}$ ,  $\epsilon_{\parallel}$  и коэффициенты анизотропии  $\mathcal{A}_{\epsilon}^{xy} \cdot 100\%$  и  $\mathcal{A}_{\epsilon}^{yx} \cdot 100\%$  соответственно, а также толщины образцов. Исследуемые материалы, согласно данных каталогов производителей, обладают незначительной частотной дисперсией в диапазоне частот 9—13,5 ГГц. Для повышения точности и достоверности оценок введена параметризация частотных зависимостей  $\epsilon_{\perp}$ ,  $\epsilon_{\parallel}$  на основе (11). Исследования показали, что аппроксимацию достаточно было проводить полиномами с 2 параметрами.

Для уменьшения случайных погрешностей измерения проводились для пяти образцов каждого типа покрытия. Результаты оценок значений  $\epsilon_{\perp}$ ,  $\epsilon_{\parallel}$  исследованных образцов СВЧ-ламинатов на частоте 10 ГГц приведены в табл. 1. Мнимые части  $\epsilon_{\perp}$  и  $\epsilon_{\parallel}$  приведены в виде тангенса угла диэлектрических потерь.

Таблица 1

Результаты измерения ЭФГП СВЧ-ламинатов

Материал	Толщина, мм	$\epsilon'_{\parallel}/\tan \delta$	$\epsilon'_{\perp}/\tan \delta$	$\mathcal{A}_{\epsilon}^{xy} \cdot 100\%$	$\mathcal{A}_{\epsilon}^{yx} \cdot 100\%$	IPC TM 650 2.5.5.5@10 ГГц
Rogers Ro4003C	0,508	3,68/0,0037	3,4/0,0028	7,6	24,3	3,38/0,0027
Arlon 25N	0,51	3,57/0,0041	3,39/0,0033	5,1	19,5	3,38/0,0025
Taconic RF-35	0,5	3,9/0,0049	3,46/0,0038	11,3	22,3	3,5/0,0033

Видно, что для исследуемых образцов отмечается расхождение величин  $\epsilon_{\perp}$  и  $\epsilon_{\parallel}$ , т.е. нормальная и тангенциальная составляющие тензора (1) различаются, но это различие не указано в каталогах производителей. Несмотря на то, что исследуемые образцы позиционируются как обладающие похожими ЭФГП, наблюдается значительное расхождение в величинах  $\epsilon_{\perp}$ . Это, вероятно, обусловлено конкретной технологией, которую использует тот или иной производитель, и используемыми материалами матрицы и наполнителя.

Таким образом, коэффициент анизотропии  $\mathcal{A}_{\epsilon}^{xy} \cdot 100\%$  этих материалов варьируется от 5,1 до 11,3 %, а коэффициент  $\mathcal{A}_{\epsilon}^{yx} \cdot 100\%$  от 19,5 до 24,3 %. Измеренные нормальные значения  $\epsilon'_{\perp}$  и  $\tan \delta$ , полученные с помощью предлагаемого метода на частоте 10 ГГц, незначительно отличаются от значений, приведенных в каталогах, определенных по методу испытаний IPC TM-650 2.5.5.5 (погрешность соответствует допускам, приведенным в каталогах) и с данными, полученными резонаторным методом в [5]. Погрешность оценки толщины покрытий не превышает 5—7 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлены результаты исследования, позволившие обосновать метод неразрушающего контроля компонентов тензора комплексной диэлектрической проницаемости, а также толщины анизотропных диэлектрических покрытий на металлической подложке, с использованием радиальных поверхностных электромагнитных волн СВЧ-диапазона, возбуждаемых в исследуемом образце.

2. Численные и натурные эксперименты показали, что разработанный метод в полосе частот измерений 9—13,5 ГГц обеспечивает оценку коэффициентов анизотропии анизотропных ДП с погрешностью не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95.

3. Введено понятие о статистическом пределе разрешения величины анизотропии, т.е. о минимальных значениях коэффициентов анизотропии, которые могут быть выявлены представленным методом. Численные и натурные эксперименты показали, что метод обеспечивает оценку коэффициентов анизотропии ДП величиной 0,2—0,3 % и менее в полосе частот измерений 9—13,5 ГГц.

5. В направлении дальнейшего развития планируется развитие метода и проведение исследований по контролю анизотропии магнитной проницаемости у магнитодиэлектрических покрытий, в т.ч. с учетом влияния внешнего поля подмагничивания, а также анизотропии электрофизических параметров различных типов метаматериалов.

Работа выполнена в рамках подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук в докторантуре ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагарьков А.Н., Федоренко А.И., Кисель В.Н., Кибец С.Г., Семенов В.Н. Актуальные задачи стелс-технологии [электронный ресурс] / Ин-т теоретической и прикладной электродинамики РАН: офиц. сайт. URL: [http://www.itae.ru/science/topics/№4%20\(стелс\).pdf](http://www.itae.ru/science/topics/№4%20(стелс).pdf) (дата обращения: 29.03.2021).

2. Lagarkov A.N., Matytsin S.M., Rozanov K.N., Sarychev A.K. Dielectric properties of fiber-filled composites // Journal of Applied Physics. 1998. V. 84. No. 7. P. 3806—3814.

3. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 2. С. 196—207.

4. Dankov Plamen I. Experimental Characterization of Positive and Negative Dielectric Constants and Artificial Anisotropy of Meta-materials in the Microwave Range // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1598 (012002). Doi: 10.1088/1742-6596/1598/1/012002

5. Dankov Plamen I. Dielectric Anisotropy of Modern Microwave Substrates, Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications / Edited by Igor Minin. IntechOpen. Published 01 March 2010. Doi: 10.5772/9061

6. Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянов Е. Фольгированные диэлектрики — как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ-диапазонов. Часть 1 // Печатный монтаж. 2013. № 2. С. 156—168.

7. Rautio James C., Arvas Serhend. Measurement of Planar Substrate Uniaxial Anisotropy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009. V. 57. Is. 10. P. 2456—2463. Doi: 10.1109/TMTT.2009.2029030

8. Hyde IV M.W., Havrilla M.J., Bogle A.E. Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Jan. 2016. V. 64. No. 1. P. 239—246. Doi: 10.1109/TMTT.2015.2502242

9. Crowgey B.R., Tuncer Ozgur, Tang Junyan, Rothwell E.J., Shanker B., Kempel L.C., Havrilla M.J. Characterization of Biaxial Anisotropic Material Using a Reduced Aperture Waveguide // Transactions on Instrumentation and Measurement. Oct. 2013. V. 62. No. 10. P. 2739—2750. Doi: 10.1109/TIM.2013.2259752

10. Boybay M.S., Ramahi O.M. Open-Ended Coaxial Line Probes With Negative Permittivity Materials // Transactions on Antennas and Propagation. May 2011. V. 59. No. 5. P. 1765—1769. Doi: 10.1109/TAP.2011.2123056

11. Li Zhen, Haigh Arthur, Soutis Constantinos, Gibson Andrew, Sloan Robin. A Simulation-Assisted Non-destructive Approach for Permittivity Measurement Using an Open-Ended Microwave Waveguide // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. No. 37, 39. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0493-1>

12. Антропов О.С., Дробахин О.О. Повышение разрешающей способности метода фурье-преобразования коэффициента отражения путем экстраполяции спектра на основе принципа минимума длительности // Дефектоскопия. 2009. № 5. С. 72—80.

13. Басков К.М., Политико А.А., Семенов В.Н., Чистяев В.А., Акимов Д.И., Краснолобов И.И. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.12

14. *Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Baskov K.M.* Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // *Measurement Techniques*. 2019. V. 62. No. 2. P. 161—166.
15. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K.* *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. UK: Wiley, 2004. ISBN: 978-0-470-84492-2.
16. *Hashimoto O., Shimizu Y.* Reflecting Rubber Characteristics of Anisotropic Sheets and Measurement of Complex Permittivity Tensor // *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Nov 1986. V. 34. No. 11. P. 1202—1207. Doi: 10.1109/TMTT.1986.1133517
17. *Михнев В.А.* Реконструктивная микроволновая структуроскопия многослойных диэлектрических сред. Минск: ПЧУП «Светоч», 2002. 192 с.
18. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A.* Estimating the Extent of Exfoliation of Dielectric and Magnetodielectric Coatings with Surface Microwaves // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 9. P. 727—741. [*Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Оценка степени отслоения диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий с использованием поверхностных электромагнитных волн СВЧ диапазона // *Дефектоскопия*. 2020. № 9. С. 50—63.]
19. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Контроль электрофизических параметров метаматериалов методом поверхностных электромагнитных волн // *Дефектоскопия*. 2021. № 4. С. 51—67.
20. *Казьмин А.И., Федюнин П.А.* Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны // *Измерительная техника*. 2019. № 9. С. 39—45.
21. *Харвей А.Ф.* *Техника сверхвысоких частот. Т. 1 / Пер. с англ. В.И. Сушкевич. М.: Советское радио, 1965. 783 с.*
22. *Фелсен Л., Маркувиц Н.* *Излучение и рассеяние волн / Под ред. М.Л. Левина. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т.1. 546 с. Т.2. 550 с.*
23. *Valerio Guido, Jackson David R., Galli Alessandro.* Fundamental properties of surface waves in lossless stratified structures // *Proceedings of the Royal Society*. March 2010. V. 466. P. 2447—2469. Doi: org/10.1098/rspa.2009.0664
24. *Chen Zhuozhu, Shen Zhongxiang.* Surface Waves Propagating on Grounded Anisotropic Dielectric Slab // *Applied Sciences*. 2018. No. 8(1). P. 102. Doi:10.3390/app8010102
25. *Бреховских Л. М.* *Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.*