

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

© 2024 г. А.Е. Базулин^{1*}, Е.Г. Базулин¹, А.Х. Вopilкин¹, С.А. Кокорев¹, С.В. Ромашкин¹, Д.С. Тихонов¹

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

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

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

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

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

© 2024 А.Е. Bazulin^{1*}, E.G. Bazulin¹, A.H. Vopilkin¹, S.A. Korolev¹, S.V. Romashkin¹, D.S. Tikhonov¹

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

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

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

DOI: 10.31857/S0130308224040061

1. ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

2. РАСЧЕТ ЦФА—АРД

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1. Расчет поля от ПДО

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2. Учет затухания в призме и объекте контроля

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

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

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

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

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

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

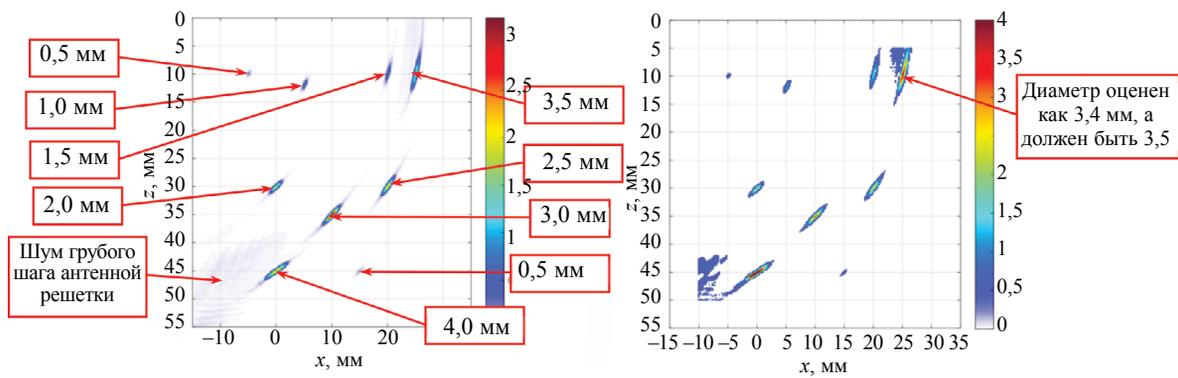


Рис. 1. ЦФА-изображение $I(x_p, z_p)$ (а) и АРД-изображение $d(x_p, z_p)$ (б) при расчете ЦФА—АРД-массива $A(x_p, z_p, d_i)$.

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

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

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

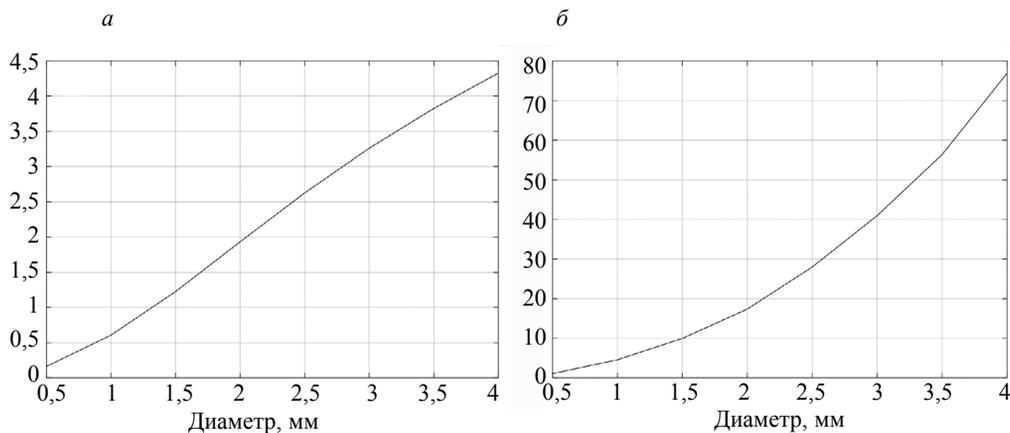


Рис. 2. График амплитуды индикации ЦФА-изображения $I(x_p, z_p)$ при расчете ЦФА—АРД-массива $A(x_p, z_p, d_i)$ (а) и при расчете ЦФА—АРД-массива $A_{IA}(x_p, z_p, d_i)$ (б).

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

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

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

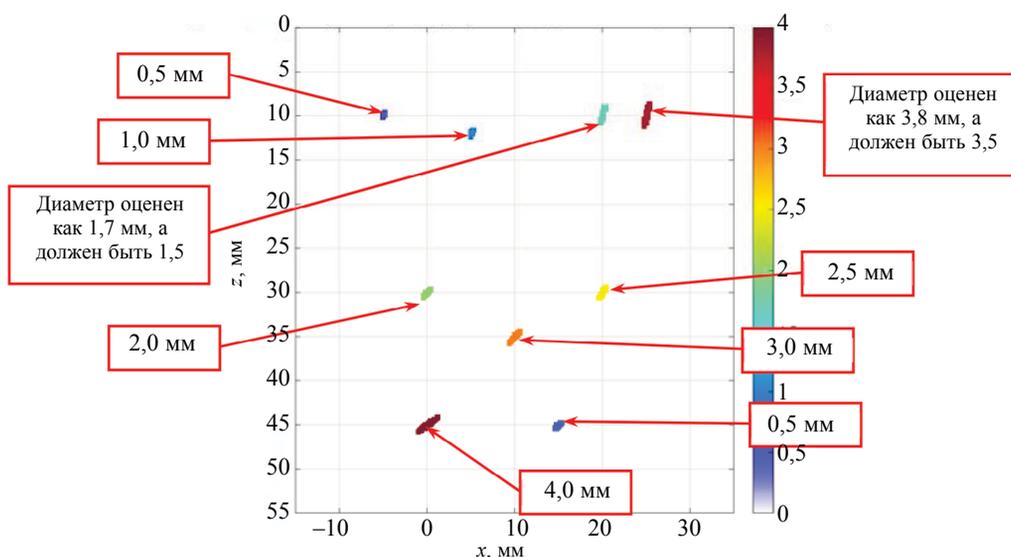


Рис. 3. АРД-изображение $d(x_p, z_p)$ при расчете ЦФА—АРД-массива $A_{IA}(x_p, z_p, d_p)$.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

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

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

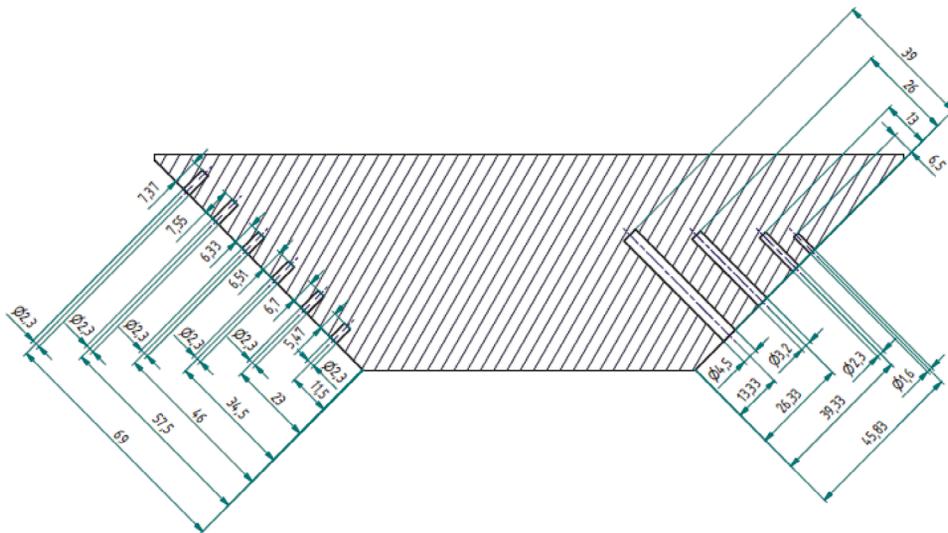


Рис. 4. Эскиз образца с ПДО на разных глубинах и с разными диаметрами.

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

4.1. ПДО разного диаметра на глубине 22 мм

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

Таблица 1

Результат оценки диаметра ПДО, расположенных на глубине 22 мм

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

4.2. ПДО диаметром 2,3 мм на разных глубинах

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

Таблица 2

Результат оценки диаметра ПДО на разной глубине

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

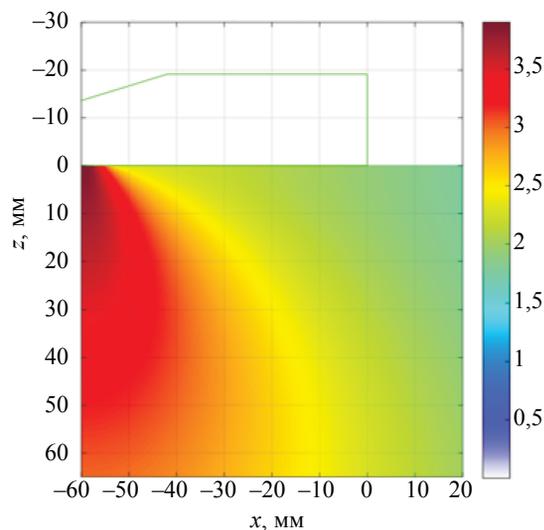


Рис. 5. Вид функции $D(x, z)$, рассчитанный по формуле (5), для коэффициентов затухания продольной волны в призме и материале, равных $(0,2, 0,002) \text{ мм}^{-1}$.

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

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

Таблица 3

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

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

5. ВЫВОДЫ

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

REFERENCES

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

5. RD-25.160.10-KTN-0016-23. Guidance Document. Trunk pipeline transportation of oil and oil products nondestructive testing of welded joints during construction and repair of trunk pipelines. PJSC TRANSNEFT.
6. *Bazulin A.E., Bazulin E.G., Ismailov G.M.* The calculation of DGS diagrams for ultrasound testing systems with the use of phased arrays // Defectoscopyia. 2014. No. 1. P. 37—46.
7. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Assessment of metal non-flaws by ultrasonic flaw detector with digital focusing of antenna array // In the world of non-destructive testing. 2013. No. 2. P. 8—13.
8. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Evaluation of defects in ultrasonic testing by digital focused array technique. The conditions, possibilities, boundaries of the applicability // Testing. Diagnostics. 2017. No. 9. P. 6—18. DOI: 10.14489/td.2017.09.pp.006-018
9. *Golubev A.S.* Reflection of plane waves from a cylindrical defect // Soviet physics. Acoustics. 1961. V. VII. No. 2. P. 174—180.
10. *Danilov V.N.* Calculations of acoustic paths of inclined transducers in ultrasonic flaw detection. Moscow: Publishing House «Spektr», 2021. 182 p.
11. *Yamshchikov V.S., Danilov V.N.* Reflection of longitudinal and transverse elastic-waves from a cylindrical cavity in a half-space // Defectoscopyia. 1984. No. 4. P. 3—11.
12. *Achenbach J.D., Brind R.J., Gubernatis J.E.* High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities // Wave Motion 6. North-Holland. 1982. P. 41—60.
13. Official website of the company EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (circulation date: 25.11.2023).
14. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Pergamon Press, 1970. 808 p.
15. *Bazulin E.G., Kokolev S.A., Golubev A.S.* Application of an ultrasonic antenna array for registering echo signals by the double-scanning method for obtaining flaw images // Defectoscopyia. 2009. No. 2. P. 18—32.
16. *Danilov V.N.* On the calculation of characteristics of Echo signals of transverse and longitudinal waves from reflectors with flat surfaces // Defectoscopyia. 2010. No. 1. P. 34—55.
17. Official website of the company Echoplus. URL: <https://echoplus.ru/> (circulation date: 25.11.2023).
18. GOST R 50.05.14—2019: Conformity assessment system in the field of atomic energy use. Means of ultrasonic testing of basic materials, welded joints and deposited surfaces of equipment and pipelines of nuclear power plants. General requirements. URL: <https://ntcexpert.ru/documents/gost-r-50-05-14-2019.pdf?ysclid=lrhxpks7td424904104> (circulation date: 17.01.2024).