

## **Использование ультразвукового дефектоскопа с фазированной антенной решеткой для регистрации эхосигналов с целью восстановления изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве**

*Е.Г. Базулин, А.Е. Базулин, С.А. Коколев, Т.М. Гурьева*

Рассмотрен метод автоматизированного у.з. контроля, основанный на использовании ФАР-дефектоскопа для регистрации эхосигналов с последующим восстановлением изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве в трехмерном режиме (3D-ПСП). Специальная настройка ФАР-дефектоскопа позволяет имитировать работу множества одноэлементных преобразователей с разными углами ввода. Такой подход позволяет получать изображения отражателей с высокой разрешающей способностью и высоким отношением сигнал/шум на глубине более 100 мм. Рассмотрена процедура калибровки антенной решетки на призме, работающей в режиме имитации нескольких пьезопреобразователей с различными углами ввода. Представлены результаты контроля фрагмента заготовки опоры дивертора ИТЭР при получении изображений классическим методом ФАР и с применением трехмерной обработки, демонстрирующие эффективность разработанной технологии контроля.

*Ключевые слова:* у.з. неразрушающий контроль, метод проекции в спектральном пространстве (ПСП), FT-SAFT, трехмерная обработка (3D-ПСП), фазированная решетка (ФАР).

### **Введение**

Применение когерентных методов обработки эхосигналов позволяет проводить у.з. контроль толстостенных объектов с высокой разрешающей способностью и высоким отношением сигнал/шум [1]. Так как научно-производственный центр «НПЦ «ЭХО+» специализируется на разработке систем у.з. контроля с когерентной обработкой эхосигналов, то заказчиком (ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова) была поставлена задача разработать методику АУЗК заготовок опор дивертора международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) с использованием 16-канального ФАР-дефектоскопа «HarfangVEO». Заготовка опоры представляет собой биметаллический образец со сварным соединением, выполненным методом горячего изостатического прессования (ГИП-соединение) с габаритными размерами до 400×400×400 мм. Для изготовления верхней части опоры используют аустенитную сталь марки ХМ19, нижней – аустенитную сталь марки 316L. Глубина залегания ГИП-соединения около 130 мм. Требования к разрешающей способности и чувствительности достаточно высокие – недопустимым является отражатель, эквивалентный плоскодонному отражателю

диаметром 2 мм. Также требуется определять площадь несплавления. При использовании 16-канального дефектоскопа в классическом ФАР-режиме получить на такой глубине фронтальную разрешающую способность порядка 3 мм невозможно. Решить эту задачу можно настроив ФАР-дефектоскоп так, чтобы антенная решетка работала как несколько фокусирующих преобразователей с разными углами ввода и обеспечив продольно-поперечного сканирование и последующую трехмерную когерентную обработку. Чтобы получить изображения отражателей, эхосигналы, измеренные для каждого фокусирующего преобразователя, можно обработать методом трехмерной проекции в спектральном пространстве [1]. Предложенная технология дает возможность повысить разрешающую способность, как в основной, так и в дополнительной плоскости антенной решетки.

В [2] предложена сходная технология получения и обработки эхосигналов методом SAFT, в которой используют простое качание луча антенной решеткой (без фокусировки), сканирующей по поверхности объекта контроля без призмы. Такой подход приводит к увеличению количества углов ввода в сравнении с применением режима фокусировки и, следовательно, к увеличению времени на обработку эхосигналов. Кроме того, не рассматривается трехмерная обработка эхосигналов и не решается проблема калибровки антенных решеток.

В данной статье рассмотрена технология контроля, основанная на использовании ФАР-дефектоскопа для регистрации эхосигналов с последующим восстановлением изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве в трехмерном режиме (3D-ПСП). Специальная настройка ФАР-дефектоскопа позволяет имитировать работу множества одноэлементных преобразователей с разными углами ввода. Такой подход позволяет получать изображения отражателей с высокой разрешающей способностью и высоким отношением сигнал/шум на глубине более 100 мм. Рассмотрена процедура калибровки антенной решетки на призме, работающей в режиме имитации нескольких пьезопреобразователей с различными углами ввода. Представлены результаты контроля фрагмента заготовки опоры дивертора ИТЭР при получении изображений классическим методом ФАР и с применением трехмерной обработки, демонстрирующие эффективность разработанной технологии контроля.

#### Метод проекции в спектральном пространстве

Обратная задача рассеивания [3, 4] заключается в том, чтобы по известным источникам поля  $q(\mathbf{r}_i, f)$  в области  $S_i$ , измеряя принятое поле  $p(\mathbf{r}_r, f)$  в области  $S_r$ , найти функцию  $\varepsilon(\mathbf{r})$ , описывающую отражающие свойства неоднородности в области  $S$  (рис.1). Интегральная форма уравнения рассеяния (уравнение Липпмана – Швингера) на частоте  $f$  записывается как

$$p(\mathbf{r}_r, f) = p_i(\mathbf{r}_r, f) + \int_S g(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}, f) \varepsilon(\mathbf{r}) p(\mathbf{r}, f) d\mathbf{r}, \quad \mathbf{r} \in S, \mathbf{r}_r \in R^3. \quad (1)$$

Сложность решения этой задачи заключается в том, что помимо определения искомого параметра неоднородностей  $\varepsilon(\mathbf{r})$  требуется «попутно» определять полное поле  $p(\mathbf{r}, f)$  во всей области восстановления изображения (ОВИ), что делает задачу нелинейной. Поэтому в практике у.з. контроля обычно используется Борновское приближение, когда амплитуда рассеянного поля полагается много меньше амплитуды падающего поля, то есть  $p(\mathbf{r}, f) \ll p_i(\mathbf{r}, f)$ . Со строго математической точки зрения это условие на практике выполняется далеко не всегда, но переход от нелинейной задачи к линейной задаче позволяет разработать алгоритм ее решения, реализуемый в практике неразрушающего контроля. При регистрации эхосигналов в совмещенном режиме уравнение (1) можно существенно упростить и записать в виде свертки

$$p(\mathbf{r}_r, f) = \int_S G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r, f) \varepsilon(\mathbf{r}) p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r, f) d\mathbf{r} = \int_S G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r, f)^2 \varepsilon(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (2)$$

Искомую функцию  $\varepsilon(\mathbf{r})$  называют рассеивающим потенциалом.

### 1.1. Метод 2D-ПСП

Решение уравнения (2) для работы в совмещенном режиме регистрации данных основано на обобщенной теореме о проекциях [5]. Рассмотрим сначала двумерный вариант решения задачи, когда звук распространяется в однородной среде. Скорости звука при излучении и приеме разные. Будем предполагать, что при работе в гармоническом режиме на частоте  $f$  рассеянное поле измеряется вдоль оси  $x_r$ , повернутой на угол  $\alpha$  в системе координат  $xz$  так, как это показано на рис. 1. Расстояние от оси  $x_r$  до центра системы координат  $xz$  обозначим  $R$ .

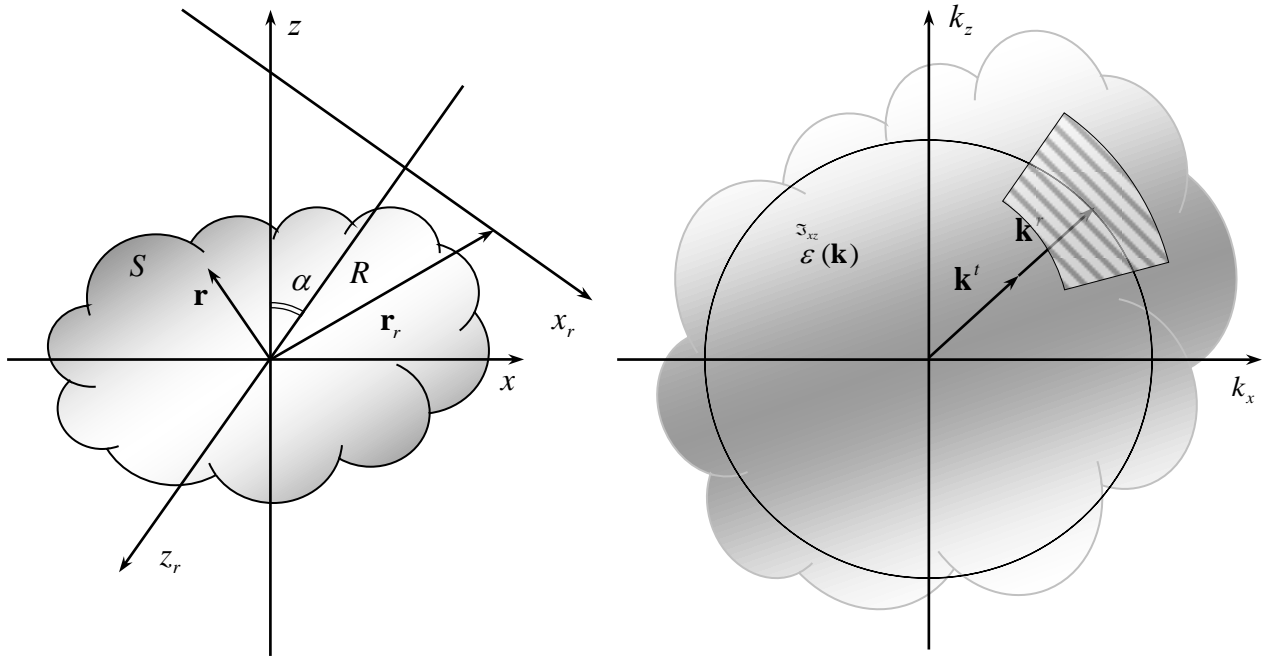


Рис. 1. К объяснению алгоритма 2D-ПСП:

$a$  – геометрия проведения измерений в совмещенном режиме;  $b$  – структура данных в спектральном пространстве.

Суть метода 2D-ПСП заключается в том, что измеряют рассеянное поле  $p(\mathbf{r}, f, \alpha)$  и вычисляется его спектр  $\mathfrak{F}_x(p(\mathbf{r}, f, \alpha))$ . Оператор проекции  $\mathfrak{P}$  переносит значения функции  $\mathfrak{F}_x(p(\mathbf{r}, f, \alpha))$  из точки  $(k_x^r, 0)$  в точку  $(k_x^r, k_z^r) = (k_x^r, \sqrt{(k^r)^2 - (k_x^r)^2})$ , то есть одномерная функция трансформируется в двумерную. Волновое число  $k^r = k' + k^r$  равно сумме волновых чисел  $k' = 2\pi f / c'$  на частоте  $f$  при излучении в среду со скоростью звука  $c'$  и соответствует  $k^r = 2\pi f / c^r$  при приеме волны со скоростью звука  $c^r$ . Такой подход позволяет по одному набору эхосигналов восстановить три изображения при: излучении и приеме продольных волн; излучении и приеме поперечных волн; трансформации типа волны на отражателе. Спектры в области пространственных частот для совместной обработки измерений **по всем ракурсам** должны быть приведены к единой системе координат  $(k_x, k_z)$  с помощью матрицы поворота:

$$\begin{cases} k_x = k_x^r \sin \alpha_j + k_z^r \cos \alpha_j \\ k_z = -k_x^r \cos \alpha_j + k_z^r \sin \alpha_j \end{cases} \quad (3)$$

То есть, по измеренной голограмме  $p(\mathbf{r}, f)$  можно рассчитать часть двумерного спектра неизвестной функции  $\varepsilon(\mathbf{r})$  на окружности радиусом  $k^r = k' + k^r$ . Одночастотный многогра-

курсный метод 2D-ПСП для восстановления изображения дефектов при регистрации рассеянного поля для  $N_\alpha$  ракурсов на частоте  $f$  можно записать:

$$\begin{aligned}\varepsilon(\mathbf{r}, f) &= \mathfrak{F}_{xz}^{-1} \left( \sum_{j=1}^{N_\alpha} \varepsilon_{\alpha_j}(k_x, k_z) \right) \\ \varepsilon_{\alpha_j}(k_x, k_z) &= \mathfrak{F}_{xz}(\tilde{p}(k_x^{tr}, f, \alpha_j)) \\ \tilde{p}(k_x^{tr}, f, \alpha_j) &= e^{ik_z^R} \mathfrak{F}_x(p(\mathbf{r}, f, \alpha_j))\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\tilde{p}(k_x^{tr}, f, \alpha_j)$  – спектр рассеянного поля, пересчитанного на линию  $x_r$  для ракурса  $\alpha_j$ ;

$\mathfrak{F}_x$  – оператор прямого преобразования Фурье;  $\mathfrak{F}_{xz}^{-1}$  – оператор обратного двумерного преобразования Фурье.

Очевидно, что восстановленное изображение тем ближе соответствует форме границы отражателя, чем большую часть спектра  $\varepsilon(\mathbf{k})$  удастся восстановить (см. заштрихованную область на рис.1). Для этих целей эффективно использование многочастотного режима, когда суммируются изображения, восстановленные на  $N_f$  частотах в некотором диапазоне частот  $\Delta f = (f_{\min}, f_{\max})$

$$\varepsilon(\mathbf{r}, \Delta f) = \sum_{n=1}^{N_f} \varepsilon(\mathbf{r}, f_n). \quad (5)$$

Как правило, анализируется модуль комплексной функции  $\varepsilon(\mathbf{r}, \Delta f)$ , который в дальнейшем и будет называться изображением отражателей

$$I(\mathbf{r}) = |\varepsilon(\mathbf{r}, \Delta f)|. \quad (6)$$

Обычно в практике у.з. контроля имеется возможность провести измерения поля  $p(\mathbf{r}, f, \alpha)$  только по поверхности объекта контроля, то есть по одному ракурсу  $\alpha = 0$ . В этом случае от окружности останется сегмент шириной определяемой максимальным и минимальным углами диаграммы направленности преобразователя (см. верхний сегмент на рис.1). Если проведены измерения поля  $p_n(\mathbf{r}, f, \alpha = 0)$   $N$  преобразователями с разными углами ввода или с разными эффективными частотами, то итоговое изображение можно получить как сумму комплексных изображений, полученных каждым преобразователем

$$I(\mathbf{r}) = \left| \sum_{n=1}^N \varepsilon_n(\mathbf{r}, \Delta f) \right| \quad (7)$$

В отличие от преобразователей для ручного контроля, которые должны иметь как можно более узкую диаграмму направленности, преобразователи, используемые для регистрации эхосигналов с целью дальнейшего восстановления изображения отражателей мето-

дом ПСП, должны иметь как можно более широкую диаграмму направленности в основной плоскости  $xz$ . Это позволяет получить информацию о спектре рассеивающего потенциала  $\varepsilon(\mathbf{r})$  в большей области спектрального пространства и, следовательно, восстановить изображение отражателя с более высокой фронтальной разрешающей способностью. Поэтому при изготовлении преобразователей для эффективной работы метода 2D-ПСП целесообразно использовать пьезоэлементы размерами  $4 \times 12$  мм, которые на частоте 2,5 МГц имеют ширину диаграммы направленности в основной плоскости по уровню минус 20 дБ около  $30^\circ$ . В дополнительной плоскости  $xy$  диаграмма направленности будет такая же, как у обычного преобразователя. Преобразователи с таким пьезоэлементом предназначены для восстановления изображения отражателей методом 2D-ПСП.

## 1.2. Метод 3D-ПСП

Переход к трехмерной обработке методом проекции в спектральном пространстве (3D-ПСП) осуществляется за счет увеличения размерности преобразований Фурье и учета третьей координаты волнового вектора вдоль оси  $y$ . Оператор проекции  $\mathfrak{P}$  в трехмерном варианте переносит значения двумерного спектра функции  $p(\mathbf{r}, f, \alpha)$  из точки  $(k_x^{tr}, k_y^{tr}, 0)$  в точку  $(k_x^{tr}, k_y^{tr}, k_z^{tr}) = (k_x^{tr}, k_y^{tr}, \sqrt{(k^{tr})^2 - (k_x^{tr})^2 - (k_y^{tr})^2})$  на сфере Эвальда, то есть двумерная функция трансформируется в трехмерную. Вместо формулы (4) для расчёта изображения на частоте  $f$  нужно воспользоваться формулой:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{r}, f) &= \mathfrak{F}_{xyz}^{-1} \left( \sum_{j=1}^{N_\alpha} \mathfrak{F}_{xyz} \varepsilon_{\alpha_j}(k_x, k_y, k_z) \right) \\ \mathfrak{F}_{xyz} \varepsilon_{\alpha_j}(k_x, k_y, k_z) &= \mathfrak{P}(\mathfrak{F}_{xy} p(k_x^{tr}, k_y^{tr}, f, \alpha_j)) \\ \mathfrak{F}_{xy} p(k_x^{tr}, k_y^{tr}, f, \alpha_j) &= e^{ik_z^{tr} R} \mathfrak{F}_{xy}(p(\mathbf{r}, f, \alpha_j)) \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathfrak{F}_{xyz}^{-1}$  – оператор обратного трехмерного преобразования Фурье. Если измерения поля проводить несколькими преобразователями с разными углами ввода, то итоговое изображение можно получить по формуле подобной (7).

Для эффективной работы метода 3D-ПСП ширина диаграммы направленности должна быть достаточно широкой и в дополнительной плоскости  $xy$ . Однако изготовление таких преобразователей вызывает трудности. Использование круглых пьезоэлементов диаметром менее 6 мм ведет к потере чувствительности. Лучший выход из этого положения – создать преобразователь, тем или иным образом фокусирующий поле на поверхность объекта контроля. Сфокусировать поле под заданным углом можно, используя ФАР-дефектоскопы с антенными решетками или матрицами. Такое объединение возможностей ФАР-

дефектоскопов с возможностями существующих систем серии «АВГУР» когерентного восстановления изображения отражателей может оказаться очень многообещающим для контроля толстостенных объектов.

#### Фазированная антенная решетка как набор преобразователей

### 1.3. Антенная решетка как набор преобразователей с разными углами ввода

Как упоминалось выше в рамках выполняемой работы перед НПЦ «ЭХО+» была поставлена задача использовать для регистрации эхосигналов ФАР-дефектоскоп «HarfangVEO», имеющий 16 каналов для фазирования. Если настроить дефектоскоп в режиме качания луча в диапазоне от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$  с выбором закона фокусировки по глубине 2 мм (ближе не позволяет используемый ФАР-дефектоскоп), то в каждой точке пространственной апертуры можно провести измерения, эквивалентные полученным 15-ю одноэлементными фокусирующими преобразователями (рис. 2). Фокусировка выполняется с целью – предельно увеличить ширину диаграммы направленности. Если просканировать антенной решеткой по поверхности объекта контроля, то можно сформировать несколько наборов эхосигналов  $p_{\alpha_n}(x, y, t)$ , восстановить парциальные изображения отражателей по формуле (7) и когерентно сложить их для получения итогового изображения.

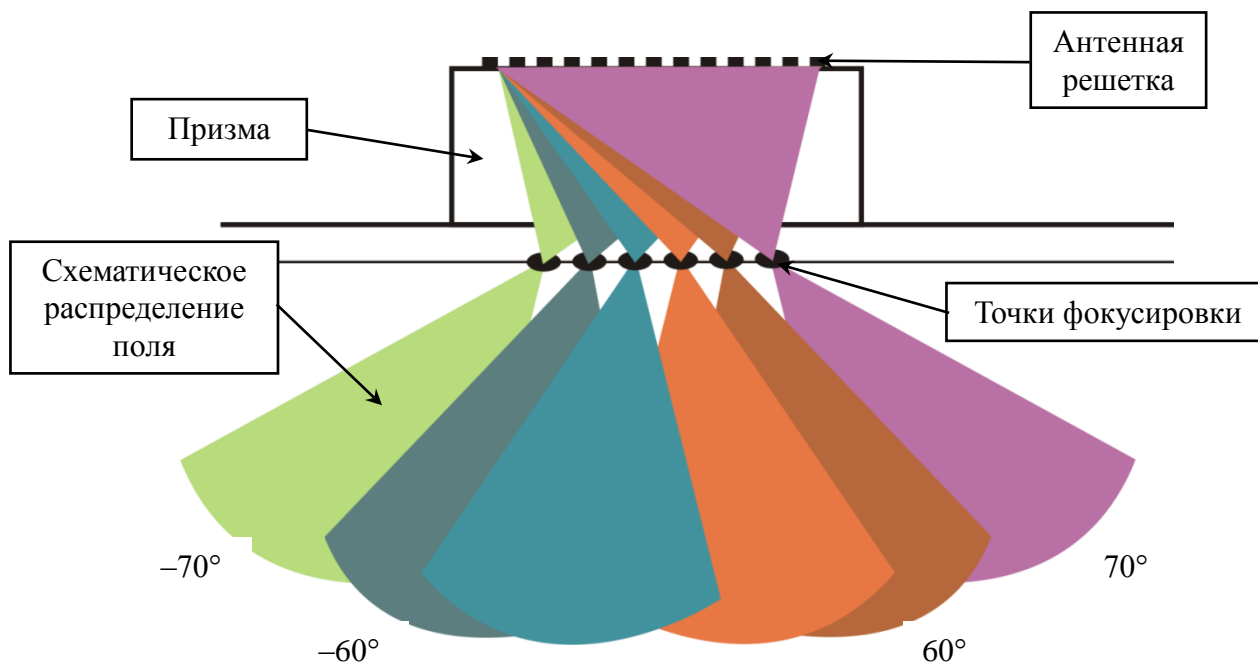


Рис. 2. Схематическое изображение поля при фокусировке на глубину 2 мм для имитации работы нескольких одноэлементных преобразователей.

Для того, чтобы все парциальные изображения, полученные каждым одноэлементным «преобразователем» с номером  $n$ , когерентно сложились, необходимо определить координаты эквивалентного точечного преобразователя  $(x_n, z_n)$  и время коррекции  $t_n$  для каждого угла качания  $\alpha_n$ . При этом точность калибровки должна быть не хуже, чем  $\lambda/8$  ( $\lambda$  – длина волны), что для стали на частоте 5 МГц соответствует примерно 0,15 мм. Процесс поиска  $(x_n, z_n)$  и  $t_n$  с означенной точностью будем называть калибровкой антенной решетки как набора одноэлементных преобразователей.

#### 1.4. Калибровка антенной решетки как набора преобразователей

Двухэтапная процедура калибровки антенной решетки как набора преобразователей заключается в следующем. На первом этапе антенная решетка, настроенная так, как сказано в п. 3.1, перемещается по поверхности образца для регистрации эхосигналов  $p_{\alpha_n}(x, t)$ , отраженных от отверстия бокового сверления диаметром  $d_{SDH}$  с центром в точке  $(0, z_{SDH})$ . Для калибровки можно использовать, например, эхосигналы, отраженные от отверстия диаметром 6 мм на глубине 15 мм в образце СО-2, в котором скорость звука известна и равна  $c_0$ . На втором этапе для каждого угла ввода  $\alpha_n$  рассчитывается оценка принятого набора эхосигнала  $\hat{p}_{\alpha_n}(x, t; \nu)$ , где  $\nu = (x_n, z_n, t_n)$ , в предположении, что точечный отражатель имеет координаты  $(0, z_{SDH})$ , а прием и излучение происходят в точке с координатами  $(x_n, z_n)$  относительно передней грани призмы, на которую установлена антенная решетка. Степень соответствия оценки  $\hat{p}_{\alpha_n}(x, t; \nu)$  и реальных измерений  $p_{\alpha_n}(x, t)$  можно описывать целевой функцией следующего вида

$$D_c(\nu) = \frac{1}{\left| \iint p_{\alpha_n}(x, t + \frac{d_{SDH}}{c_0}) \hat{p}^*(x, t; \nu) dt dx \right|}, \quad (9)$$

где знак\* означает операцию комплексного сопряжения. Предварительно измеренные эхосигналы и их оценка переводятся в комплексный формат с помощью преобразования Гильберта. Провести оценку поля точечного преобразователя при отражении от точечного отражателя можно по формуле:

$$\hat{p}(x, t; \nu = (x_n, z_n, t_n)) = \Theta(\alpha_n, \Delta\alpha) \frac{s(t - \frac{2r}{c_0} - t_n)}{r}, \quad r = \sqrt{(x + x_n)^2 + (z_{SDH} - z_n)^2}, \quad (10)$$

где  $\Theta(\alpha_n, \Delta\alpha)$  – гауссоподобная диаграмма направленности с углом ввода  $\alpha_n$  и половиной ширины диаграммы направленности  $\Delta\alpha$  по уровню 0,1. Те значения вектора  $\nu$ , которые доставляют минимум выражению



$$D_c(v) \rightarrow \min_v \quad (11)$$

будут считаться результатом калибровки. Выполнив аналогичную процедуру для всех углов ввода антенной решетки  $\alpha_n$ , можно определить все координаты  $(x_n, z_n)$  эквивалентных точечных пьезоэлементов относительно передней грани преобразователя и их время коррекции  $t_n$ .

На рис. 3 показан результат калибровки антенной решетки PE5.0M32T0.8P (5 МГц, 32 элемента, шаг между элементами 0,8 мм) на призме из плексигласа с нулевым углом наклона в режиме качания луча в диапазоне от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$  с фокусировкой на глубину 2 мм. Толщина призмы была выбрана равной 40 мм для того, чтобы импульсы отражения в призме не формировали бликов на глубине контроля равной примерно 120 мм. Исходные точки (ромбики) определяли как точки фокусировки на глубине 2 мм с углами ввода от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Результат определения координат  $(x_n, z_n)$  эквивалентных точечных преобразователей по итогам калибровки показан квадратиками. Видно, что отклонение координат  $(x_n, z_n)$  от исходных точек может составлять несколько миллиметров по оси  $x$ , и до 0,2 мм по оси  $z$ .

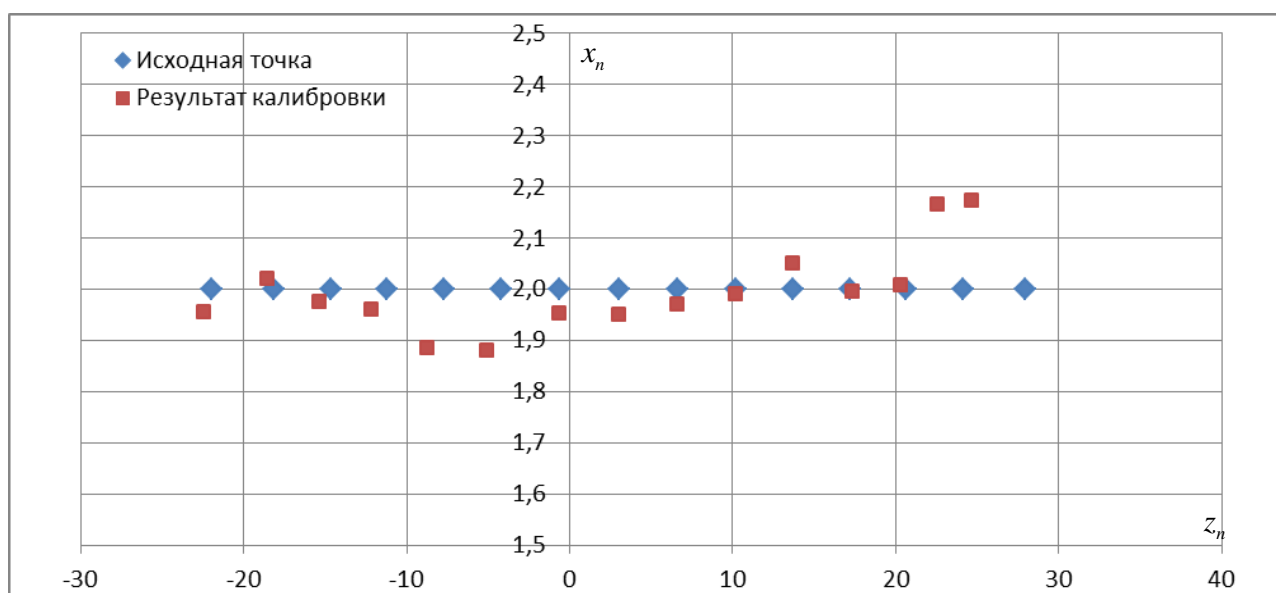


Рис. 3. Результат определения координат  $(x_n, z_n)$  эквивалентных точечных преобразователей по итогам калибровки фазированной антенной решетки как набора 15-ти одноэлементных преобразователей с углами ввода от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

На рис. 4. показан результат расчета времени коррекции  $t_n$ . По оси ординат отложены углы наклона, а по оси абсцисс – время коррекции. Исходные точки (ромбики) определяли как время пробега по лучу от центра антенной решетки до точек фокусировки на глубине 2 мм для углов ввода от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Результат определения времени кор-

рекции  $t_n$  показан квадратиками. Разница между исходными значениями и найденными решениями может достигать 1 мкс.

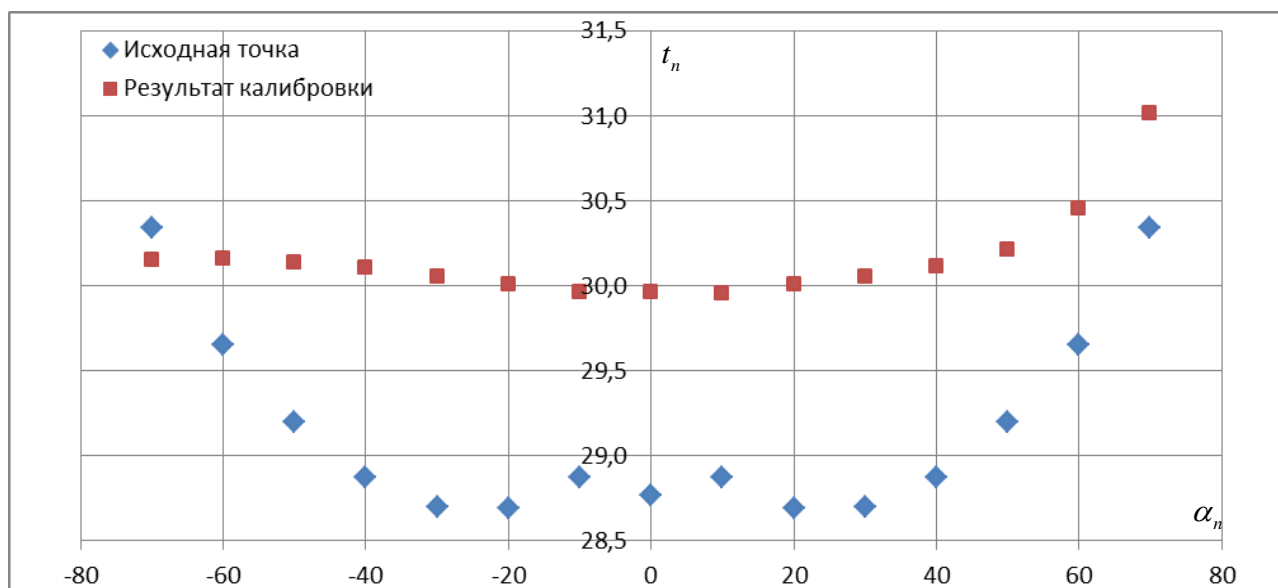


Рис. 4. Результат определения времени коррекции  $t_n$  по итогам калибровки фазированной антенной решетки. По оси ординат отложены углы ввода набора 15-ти одноэлементных преобразователей.

На рис. 5. показано восстановленное изображение границы отверстия бокового сверления диаметром 6 мм по формуле (7), демонстрирующее эффективность разработанного алгоритма калибровки согласно (11). Линией белого цвета на изображение наброшена маска отверстия. Широкий диапазон углов ввода позволил восстановить изображение верхней половины границы отверстия.

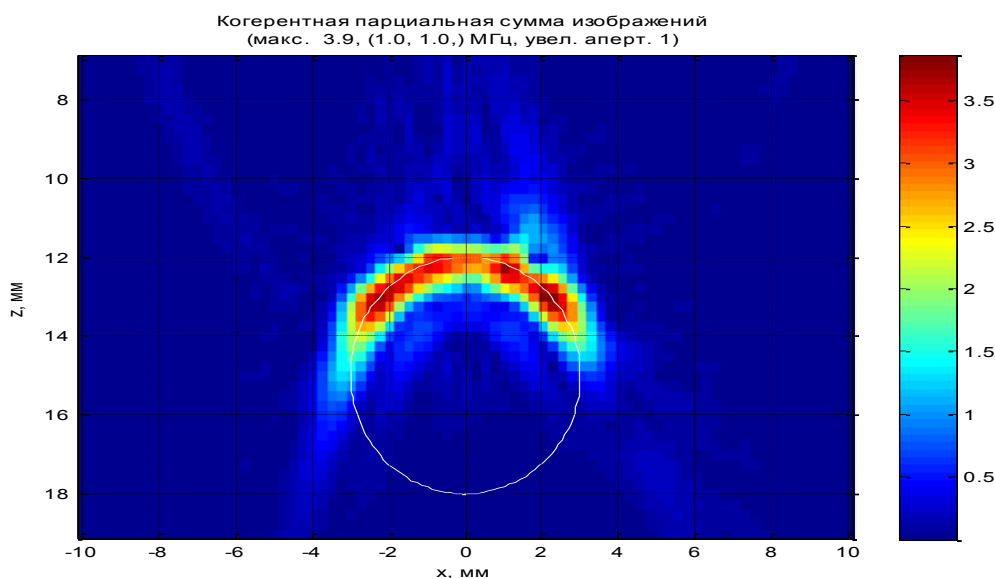


Рис. 5. Результат восстановления границы отверстия бокового сверления диаметром 6 мм по итогам калибровки по формуле (7).

## Контроль фрагмента заготовки опоры дивертора вакуумной камеры ИТЭР

### 1.5. Описание объекта контроля

Образец на рис. 6 представляет собой фрагмент заготовки опоры дивертора, в котором заложены следующие отражатели:

два плоскостонных отверстия диаметром 2 мм (обозначены выносками 7 и 8);

шесть закладок в форме дисков диаметром:

5 мм, толщиной 0,6 мм, заполненные вольфрамом (обозначены выносками 4–6);

3 мм, толщиной 1,1 мм, заполненные окисью алюминия (обозначены выносками 1–3).

Образец предназначен для проверки работы методики и настройки чувствительности аппаратуры.

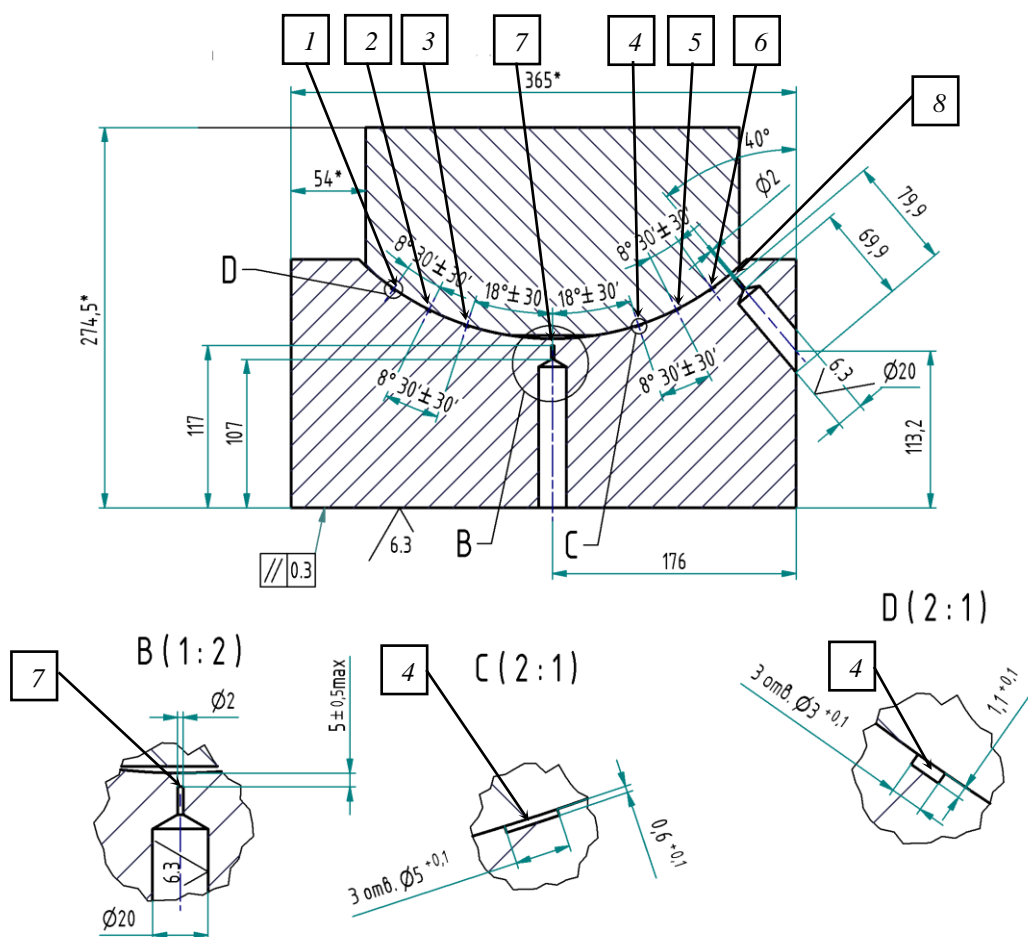


Рис. 6. Чертеж настроечного образца.

### 1.6. Описание проведения измерений

Схема проведения контроля образца и ориентация системы координат представлена на рис. 7 и определена разработанной методикой. Антенная решетка размещается так, что ее основная плоскость совпадает с плоскостью  $xy$ . Для обеспечения прозвучиваемости ста процентов площади ГИП-соединения используют продольно-поперечное сканирование в плоскости  $xy$  с помощью автоматизированного сканирующего устройства. При проведении измерений антенную решетку перемещают сканером и системой управления, входящих в состав дефектоскопа «Фазус» [6] компании «Тестрон».

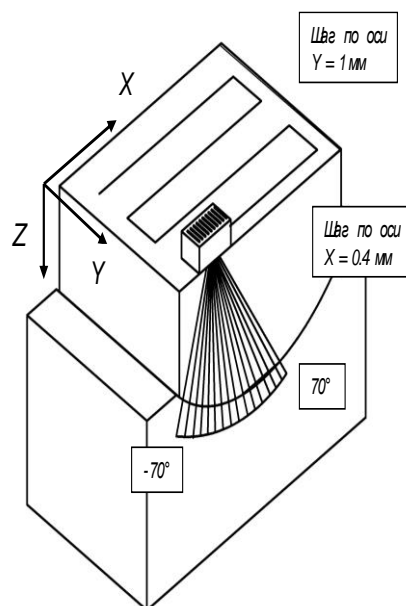


Рис. 7. Схема сканирования при проведении контроля.

### 1.7. Анализ экспериментальных данных

На рис. 8. приведены изображения отражателей в настроечном образце, полученные с применением ФАР-дефектоскопа и методом 3D-ПСП, а также представлен слой, в котором располагаются центры заложенных отражателей. На изображении, полученном методом 3D-ПСП, уровень фонового и реверберационного шумов уменьшился более чем на 10 дБ, в сравнении с изображением, полученным тем же ФАР-дефектоскопом в режиме качания луча. Фронтальная разрешающая способность в основной плоскости возросла более чем в четыре раза.

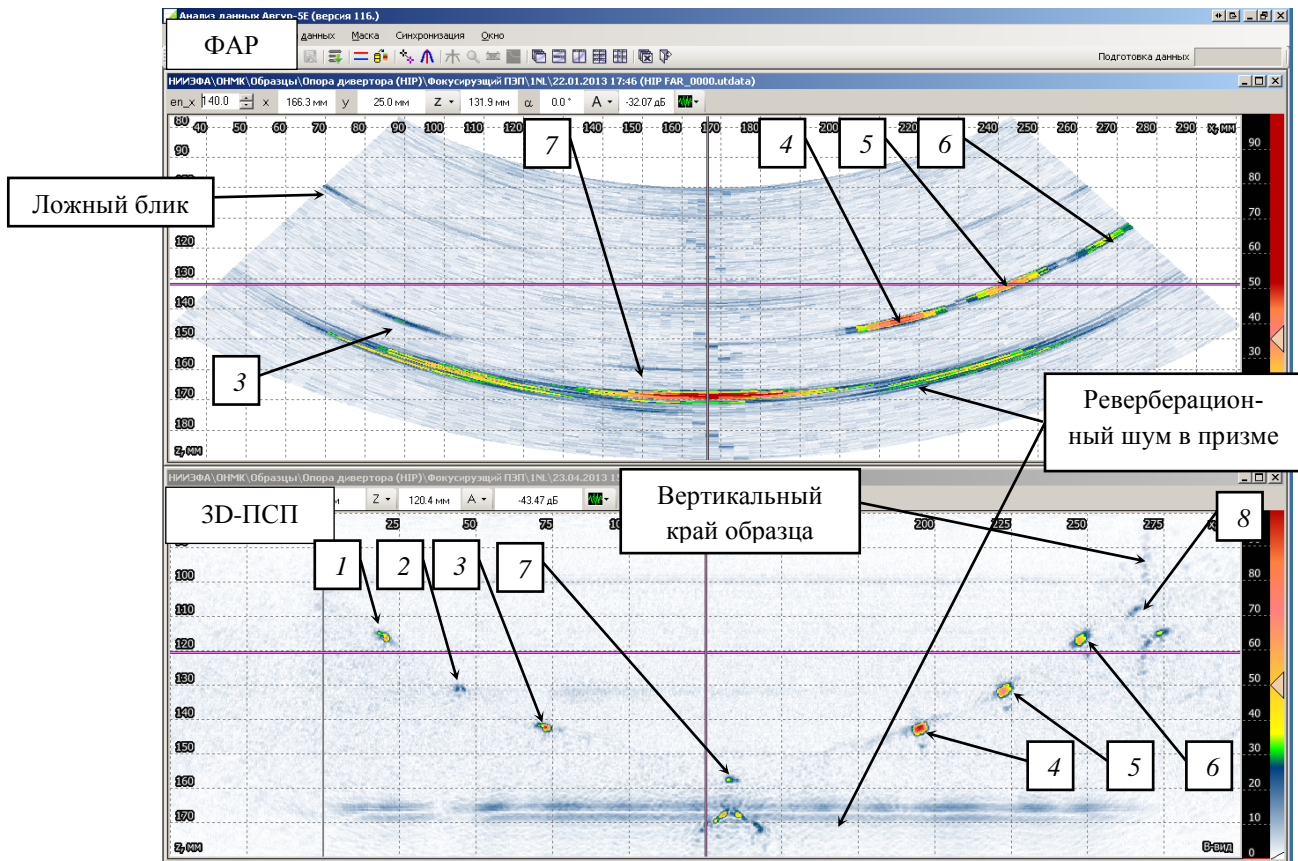


Рис. 8. Изображения, полученные ФАР-дефектоскопом в режиме качания луча (вверху) и методом 3D-ПСП (внизу).

На рис. 9. представлены увеличенные изображения отражателей 6–8, полученные методом 3D-ПСП, с наложенными контурами объекта контроля (линии красного цвета) и контурами отражателей (линии черного цвета). Все контуры нанесены на изображение в соответствии с чертежом образца. На обоих изображениях видны блики от конуса технологического отверстия диаметром 20 мм, необходимого для обеспечения требуемой глубины залегания плоскодонного отверстия диаметром 2 мм. Отношение сигнал/шум для изображений несплошностей превышает 10 дБ, а разрешающая способность составляет величину порядка 1 мм. На изображении справа видна вертикальная граница верхней части образца. На данных, полученных с помощью ФАР-дефектоскопа, работающего в классическом режиме, эти блики не видны.



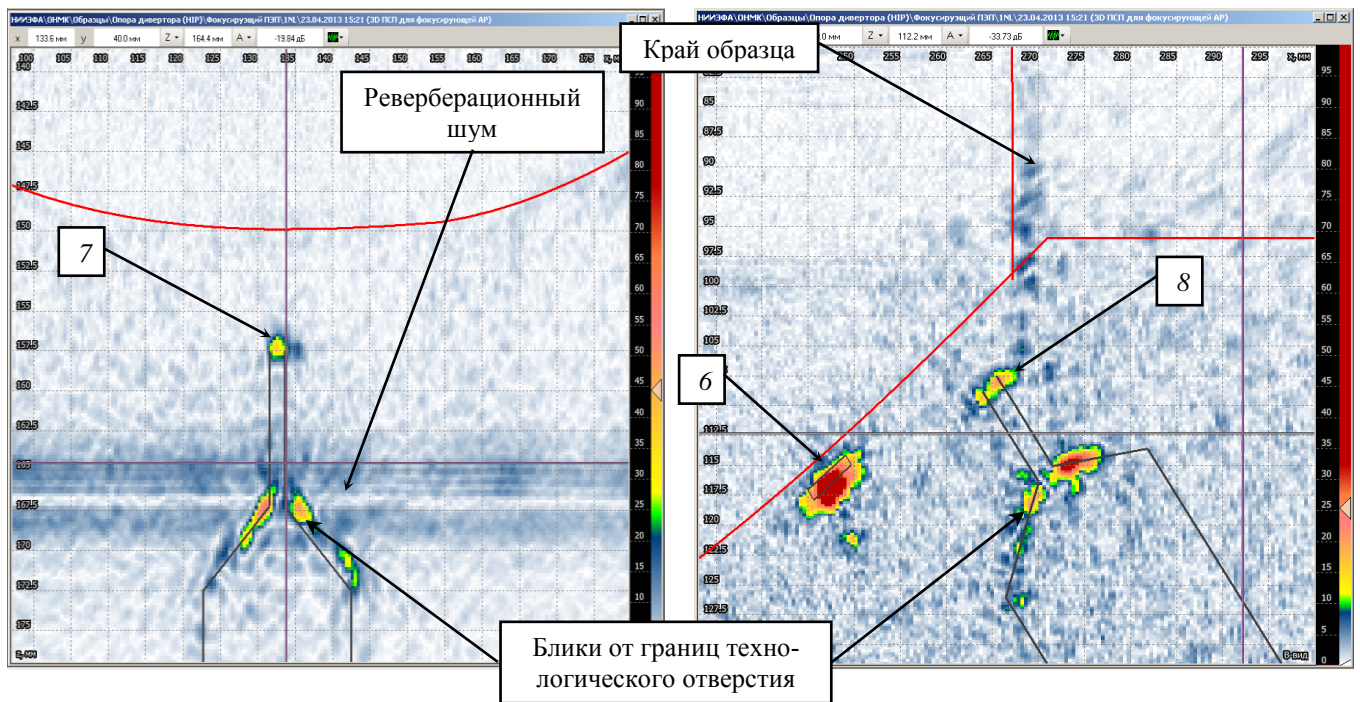


Рис. 9. Увеличенные изображения отражателей с номерами 6–8, полученные методом 3D-ПСП, с наложенными контурами объекта контроля и отражателей.

На рис. 10 представлены увеличенные изображения отражателя 4 диаметром 5 мм, полученные ФАР-дефектоскопом и методом 3D-ПСП. Видно, что фронтальная разрешающая способность в основной плоскости при использовании трехмерной обработки увеличилась в пять раз.

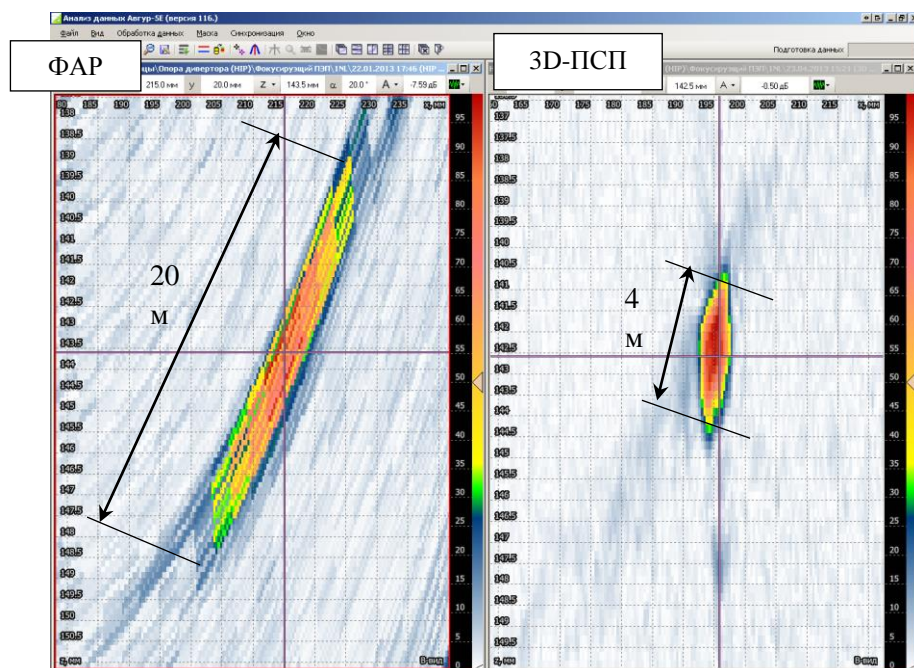


Рис. 10. Увеличенные изображения отражателя 4, полученные ФАР-дефектоскопом и методом 3D-ПСП.

Во ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» был проведен рентгенографический контроль фрагмента заготовки опоры дивертора, аналогичный образцу, представленному на рис. 6, но с меньшим диаметром закладок:

2 мм, толщиной 0,6 мм, заполненные окисью алюминия;

2 мм, толщиной 1,1 мм, заполненные вольфрамом.

Так как для обеспечения высокой чувствительности рентгенографического контроля толстостенных объектов необходимо использование линейных ускорителей, образец был сделан толщиной 20 мм. Результаты рентгенографического контроля представлены на рис. 11а, а на рис. 11б – увеличенное изображение отражателей 3 и 4, полученное методом 3D-ПСП в образце, описанном в п. 1.5. Палитра изображения 3D-ПСП изменена на серую, для обеспечения его схожести с результатом рентгенографического контроля. На обоих изображениях различима граница между материалами. Видно, что нижняя часть образца обладает более высоким уровнем структурного шума. Используемый для восстановления изображения метод 3D-ПСП, в отличие от рентгенографического контроля, не позволяет определить, что материалы закладок имеют разную плотность.

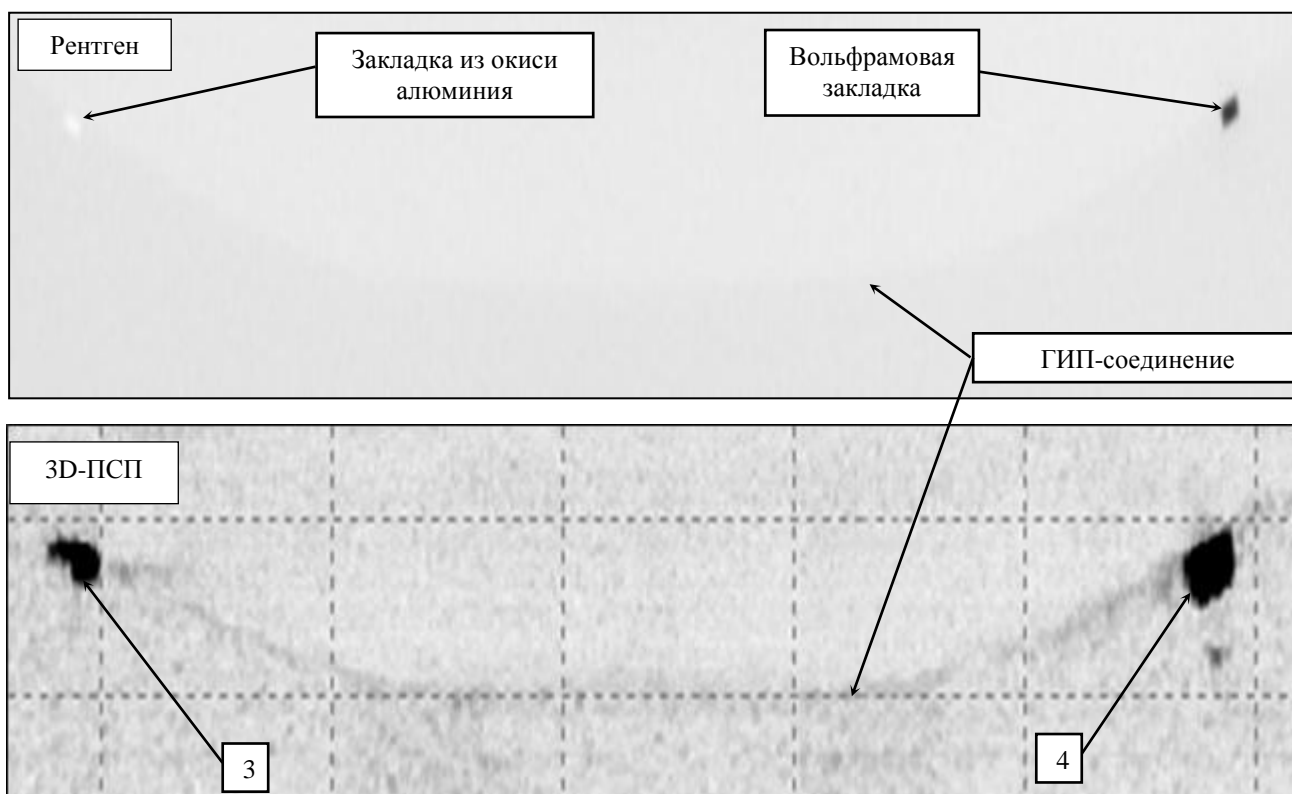


Рис. 11. Результат рентгенографического контроля (а); изображение, полученное методом 3D-ПСП (б).

(подрисовочная приведена в соответствии указанным частям рис.!)

## Выводы

Изображения, полученные описанным в данной статье методом 3D-ПСП по эхосигналам, измеренным с помощью ФАР-дефектоскопов, обладают следующими преимуществами в сравнении с изображениями, получаемыми 16-канальным ФАР-дефектоскопом в режиме качания луча:

фронтальная разрешающая способность в основной плоскости на глубине 140 мм выше в **шесть** раз; при этом проведение контроля при развороте антенной решетки с призмой на 90° позволяет определять протяженность несплошностей по второй координате плоскости с той же точностью;

фронтальная разрешающая способность в дополнительной плоскости на глубине 140 мм выше в **два** раза;

отношение сигнал/шум больше на 10 дБ;

в результате получается единое трехмерное изображение, а не набор секторных сканов, не связанных друг с другом, что упрощает анализ данных оператором.

Разработанная методика для контроля заготовок опор дивертора позволяет: проводить контроль ста процентов площади поверхности ГИП-соединения; выявить с запасом более 12 дБ несплошности с отражающей способностью, эквивалентной отражающей способности плоскодонного отверстия диаметром 2 мм на глубине 140 мм;

определить размеры несплошностей в сварном соединении с точностью  $\pm 1$  мм.

ООО «НПЦ «ЭХО+»

Москва

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию

30 августа 2013 г.

## Литература

---

1. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Коколев С.А., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Применение трехмерной когерентной обработки в ультразвуковом контроле. – Дефектоскопия, 2014, №2, с. 46–65.

2. Boehm R., Brackrock D., Kitze J., Brekow G., Kreutzbruck M. SAFT for crack surface analysis –comparison of modeling and phased array measurements. – NDT in Progress, 5th International Workshop of NDT Experts, 12–14 Oct. 2009, Prague.



- 
3. Буров В.А., Горюнов А.А., Сасковец А.В., Тихонова Т.А. Обратные задачи рассеяния в акустике (обзор). – Акуст. журн., 1986, т. XXXII, № 4, с. 433–449.
  4. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. – М.: Издательство МГУ, 1989. –152 с.
  5. Devaney A.J. Fundamental limitation inverse source and scattering problem in NDT. – Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 1986, v. 5A, p. 303–317.
  6. Информация о дефектоскопе «Фазус»: [http://xrs-test.ru/images/FAZUS\\_2\\_.pdf](http://xrs-test.ru/images/FAZUS_2_.pdf).
-