

Измерение диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей на стандартном образце СО-3

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, г. Москва, ул. Твардовского д. 8, Технопарк «Строгино»,

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье обосновывается возможность определения диаграммы направленности контактных пьезоэлектрических преобразователей на стандартном образце СО-3 при регистрации поля, отраженного от вогнутой цилиндрической поверхности образца. Показаны преимущества в сравнении с использованием стандартного образца СО-2. Приведены численные и модельные результаты расчета диаграмм направленности. При переходе к сферической симметрии становится возможным определение любого сечения трехмерной диаграммы направленности.

PACS: 43.58.+z

Введение

Один из основных элементов любого ультразвукового дефектоскопа это пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), с помощью которого происходит излучение ультразвуковых импульсов в объект контроля и прием эхосигналов отраженных от дефектов. Использование дефектоскопа для неразрушающего контроля предполагает следование утвержденной методике контроля. Одним из важных вопросов методики является описание требований к параметрам используемых ПЭП. Ключевыми параметрами ПЭП, которые указываются в методиках, являются эхоимпульсная чувствительность, эффективная рабочая частота, угол ввода, ширина основного лепестка диаграммы направленности и другие. Процедура поверки ПЭП как средства измерений требует определения его параметров по методике определенной в ГОСТ 23702-90 «Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний» [1] и, аналогично, в европейском стандарте EN 12668-2 [2].

Для решения задачи оперативного определения параметров ПЭП возникает необходимость иметь аппаратуру и стандартные образцы. Для паспортизации ПЭП в России разработаны системы «Авгур 2.2» и «Авгур 4.4» [3], в которых диаграмма направленности

определяется по пространственному спектру поля, отраженного от отверстия бокового сверления диаметром 6 мм при сканировании ПЭП по поверхности стандартного образца СО-2 из комплекта КОУ-2 [4]. Однако, для измерения стрелы преобразователя, времени задержки в призме и параметров импульсной характеристики используется стандартный образец СО-3, имеющий форму полуцилиндра радиусом 55 мм или его аналог. Использование двух стандартных образцов для определения параметров ПЭП усложняет процедуру проведения измерений.

В системе калибровки «Авгур 5.4», разработанной в НПЦ «ЭХО+» в 2007 году в качестве единственного образца для определения параметров ПЭП предложен образец СО-3 [5]. Определение параметров ПЭП на одном стандартном образце СО-3 позволяет ускорить и упростить процедуру калибровки. Кроме того, преимущества калибровки ПЭП только на стандартном образце СО-3 следующие:

- так как измерения проводятся после 110 мм пробега колебаний в образце, то влияние реверберационного шума практически отсутствует;
- отсутствие импульсов обегания/соскальзывания, возникающих на отверстии диаметром 6 мм для сдвиговых волн и сложно различимых трансформированных импульсов для продольных волн, что делает процедуру выбора сигнала для обработки более простой;
- по указанной выше причине на образце СО-3 можно легко калибровать ПЭП с использованием сложных сигналов или радиосигналов из многих периодов;
- можно уменьшить размеры области сканирования и снизить требования к постоянству акустического контакта, поскольку область сканирования, в пределах которой регистрируются эхосигналы, составляет величину сопоставимую с размером пьезоэлемента;
- в соответствии со стандартами импульсная и спектральная характеристика пьезопреобразователя должны регистрироваться от отражателя большой площади (в требованиях EN-12668 указан образец с полуцилиндрической поверхностью радиусом, в полтора раза превышающим длину ближней зоны);
- для больших углов диаграммы направленности (более 70 градусов) калибровка на СО-3 позволяет получить истинную диаграмму направленности, в отличие от образца СО-2, поскольку практически отсутствует различие в путях распространения волн, существующее для различных углов диаграммы направленности в стандартном образце СО-2 [6]; кроме того, при калибровке на

СО-2 принципиально не могут быть зарегистрированы все составляющие диаграммы направленности, например в случае раздельно-совмещенных ПЭП с углом ввода, превышающим 75 градусов.

- при переходе к сферической симметрии на образце полусферической формы возможно определение полной трехмерной диаграммы направленности ПЭП и точное определение точки ввода ультразвука; кроме того, образец с полусферическим дном позволяет снять ограничение на ширину пьезоэлемента 20 мм, обусловленное шириной образцов СО-2 и СО-3.

В статье обосновывается возможность определения диаграммы направленности контактных пьезоэлектрических преобразователей на образце СО-3 при регистрации поля, отраженного от вогнутой цилиндрической поверхности образца при излучении и приеме ультразвуковых колебаний ПЭП с пластиной конечных размеров. Приведены численные и модельные результаты расчета диаграмм направленности.

Построение функции Грина образца СО-3

Основная идея обоснования возможности использования образца СО-3 для определения диаграммы направленности ПЭП заключается в доказательстве того, что измерение эхосигналов отраженных от цилиндрической поверхности эквивалентно измерениям от точечного рассеивателя расположенного на нулевой глубине. Для этого нужно проанализировать поле излученное, отраженное от цилиндрической границы и принятое ПЭП при сканировании по плоской поверхности образца СО-3.

Рассмотрим случай, когда идеальный точечный излучатель ультразвука расположен в точке x_i на плоской поверхности образца СО-3 и рассчитаем поле, отраженное от цилиндрической поверхности радиуса R обратно на плоскость в точке x_r . Эскиз образца и обозначения приведены на Рис. 1. Будем предполагать, что излучение происходит в гармоническом режиме на частоте f , через c_l и c_t обозначим скорости звука продольной и поперечной волн. Волновое число для соответствующей скорости звука равно $k = 2\pi / \lambda$, где $\lambda = c / f$ длина волны. Для практики ультразвуковой дефектоскопии характерны ПЭП с шириной основного лепестка диаграммы направленности не более 15°. Так как для углов падения на плоскость меньше 15 градусов коэффициент отражения меняется менее чем на 10% [7], то для упрощения будем рассматривать скалярный вариант задачи, а границы образца будем считать абсолютно мягкими. Через \vec{r}_{is} обозначим вектор, который соединяет

Рис. 1

точку расположения излучателя с точкой на цилиндрической поверхности образца, а через \vec{r}_{sr} вектор от точки цилиндрической поверхности до точки приема отраженного ультразвукового поля.

Координаты точки на цилиндрической поверхности можно задать в виде выражения $\vec{r} = (R \cos \alpha, R \sin \alpha)$, где $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$, R радиус образца СО-3 равный 55 мм.

Тогда поле на поверхности цилиндра можно описать, опуская множитель $\frac{1}{4\pi}$, в виде сферической волны

$$s(r_{ts}) = \frac{e^{ikr_{ts}}}{r_{ts}}, \quad (1)$$

$$\text{где } r_{ts} = \sqrt{(x_t - R \cos \alpha)^2 + (R \sin \alpha)^2}.$$

Так как в большинстве практических случаев ультразвукового контроля $\lambda \ll R$, например, для частот порядка 2,5 МГц и излучения продольных волн в сталь $\frac{R}{\lambda} \approx 20$, то справедливо применить приближение Кирхгофа [8] для расчета поля в точке x_r ,

$$G(x_t, x_r, k) = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} s(r_{ts}) \frac{e^{ikr_{sr}}}{r_{sr}} d\alpha.$$

$$\text{где } r_{sr} = \sqrt{(x_r - R \cos \alpha)^2 + (R \sin \alpha)^2}.$$

Знак минус в данном выражении обусловлен отражением от абсолютно мягкой границы. Данное выражение с учетом (1) можно переписать в виде

$$G(x_t, x_r, k) = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e^{ik(r_{ts} + r_{sr})}}{r_{ts} r_{sr}} d\alpha. \quad (2)$$

Очевидно, что данное выражение достигает максимума при $x_t = x_r = 0$. В этом случае фаза экспоненты постоянна и максимальное значение поля на плоской поверхности равно

$$G_{\max} = G(x_t = 0, x_r = 0, k) = -\pi \frac{e^{ik2R}}{R^2}.$$

Случай нахождения точечного излучателя в центре образца СО-3

Будем считать, что излучатель находится в центре плоской поверхности образца СО-3, то есть $x_t = 0$. В этом случае выражение (2) можно переписать в виде

$$G(x_t = 0, x_r, k) = -\frac{e^{ikR}}{R} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e^{ikr_{sr}}}{r_{sr}} d\alpha. \quad (3)$$

Рассмотрим отраженное от донной поверхности поле вблизи центра плоской поверхности образца СО-3, то есть будем считать что $x_r \ll R$. В этом случае выражение для расчета модуля вектора \vec{r}_{sr} существенно упростится при разложении его в ряд Тейлора

$$r_{sr} = \sqrt{(x_r - R \cos \alpha)^2 + (R \sin \alpha)^2} \approx R + x_r \sin \alpha.$$

Справедливость данного разложения r_{sr} следует и из простых геометрических построений, представленных на Рис. 2. Такое разложение r_{sr} по малым значениям x_r , в предположении, что $r_{sr} \approx R$ в знаменателе выражения, позволяет записать выражение (3) в простом виде

$$G(x_t = 0, x_r, k) = -\frac{e^{i2kR}}{R^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{ikx_r \sin \alpha} d\alpha.$$

Интеграл в данной формуле с точностью до пределов интегрирования и множителя $1/\pi$ совпадает с определением функции Бесселя нулевого порядка [9], что позволяет окончательно записать

$$G(x_t = 0, x_r, k) = G_{\max} J_0(kx_r). \quad (4)$$

Первый нуль функции $G(x_t = 0, x_r, k)$ будет находиться в точке $x_r \approx \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda}{2}$, что равно предельному разрешению по Рэлею для системы получения когерентного изображения.

Случай произвольного расположения точечного излучателя на образце СО-3

Будем считать, что излучатель находится в произвольной точке плоской поверхности, но для упрощения допустим, что $x_t \ll R$ и рассмотрим отраженное от дна поле

вблизи центра плоской поверхности образца СО-3, то есть будем считать что и $x_r \ll R$. В этом случае расчет модуля векторов \vec{r}_{ts} и \vec{r}_{sr} можно упростить

$$r_{ts} \approx R + x_t \sin \alpha, \quad r_{sr} \approx R + x_r \sin \alpha.$$

В результате можно упростить формулу (2) расчета поля на плоской поверхности образца СО-3

$$G(x_t, x_r, k) = -\frac{e^{i2kR}}{R^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{ik(x_t+x_r)\sin\alpha} d\alpha = \frac{G_{\max}}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{ik(x_t+x_r)\sin\alpha} d\alpha = G_{\max} J_0(k(x_t+x_r)). \quad (5)$$

Видно, что функция (5) отличается от рассмотренной в предыдущем разделе (4) тем, что достигает максимума в точке $x_r = -x_t$, что очевидно в рамках теории геометрической оптики. Сохраняя все предположения предыдущего раздела, можно рассчитать вид функции Грина для импульсного режима излучения в полосе частот (f_{\min}, f_{\max}) в виде

$$G(x_t, x_r) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} G(x_t, x_r, k) df, \quad \text{где } k = \frac{2\pi f}{c}.$$

Очевидно, что функция $G(x_t, x_r)$ также достигает максимума в точке $x_r = -x_t$.

Случай работы ПЭП в совмещенном режиме

Предположим, что ПЭП, находящийся в точке x_p при излучении ультразвуковой волны на частоте f создает на плоской поверхности образца СО-3 нормальную составляющую тензора напряжений $\sigma_z(x_t - x_p, k)$. Это позволяет заменить реальный ПЭП множеством источников и приемников размещенных на поверхности образца СО-3. Характерный вид «эквивалентной пластины» $\sigma_z(x_t - x_p, k)$ представлен на Рис. 3. Далее символом Δ будем обозначать полуширину данной «эквивалентной пластины».

Как известно [10], преобразование Фурье от функции $\sigma_z(x_t, k)$ по пространственной координате x позволяет получить спектр плоских волн, пришедших из области дальнего поля и, следовательно, рассчитать диаграмму направленности преобразователя на излучение, которую обозначим через угловую зависимость $\Theta(\alpha, k)$, то есть

$$\Theta(\alpha, k) = \tilde{\sigma}_z(k_x, k) = \tilde{\mathfrak{I}}_x(\sigma_z(x_t, k)),$$

где $\alpha = \arcsin(k_x/k)$, а $k_x \in (-k, k)$ – проекция волнового числа на ось x .

Рассмотрим более подробно полученный результат, принимая во внимание выкладки, полученные в предыдущих разделах. Поле на цилиндрической поверхности образца можно записать в виде суперпозиции полей от элементарных площадок, излучающих сферические волны

$$s(r_{ts}, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) \frac{e^{ikr_{ts}}}{r_{ts}} dx_t$$

или в зависимости от координаты x_p размещения преобразователя и угла α

$$s(x_p, \alpha, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) \frac{e^{ik\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} dx_t.$$

Тогда поле на плоской поверхности образца СО-3, после отражения от цилиндрической поверхности, можно записать как

$$s'(x_r, k) = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} s(x_p, \alpha, k) \frac{e^{ik\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} d\alpha.$$

Далее, в предположении полной обратимости процесса излучения и приёма, напряжение на выходе преобразователя без учета постоянного коэффициента, после интегрирования поля на плоской поверхности образца СО-3 в пределах «пятна» $(-\Delta, \Delta)$, можно представить в виде

$$U(x_p, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) s'(x_r, k) dx_r. \quad (6)$$

То есть, задача определения диаграммы направленности преобразователя заключается в расчёте по измеренному напряжению $U(x_p, k)$ распределения нормальной составляющей тензора напряженности $\sigma_z(x_p)$ при сканировании преобразователем по плоской поверхности образца СО-3 в совмещенном режиме. Для определения неизвестного $\sigma_z(x_p)$ необходимо решить интегральное уравнение (6). Рассмотрим более подробно полученный результат.

Начнем с упрощения выражения для поля на плоской поверхности

$$s'(x_r, k) = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left\{ \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) \frac{e^{ik\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} dx_t \right\} \frac{e^{ik\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} d\alpha.$$

Изменив порядок интегрирования, получим следующее выражение

$$s'(x_r, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) \left\{ - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e^{ik\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_t - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} \frac{e^{ik\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}}}{\sqrt{(x_r - R\cos\alpha)^2 + (R\sin\alpha)^2}} d\alpha \right\} dx_t.$$

Выражение в фигурных скобках равно ранее рассчитанному $G(x_t, x_r, k)$, что позволяет записать

$$s'(x_r, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) G(x_t, x_r, k) dx_t.$$

Следовательно, напряжение на выходе преобразователя можно представить как

$$U(x_p, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) \left\{ \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_t - x_p, k) G(x_t, x_r, k) dx_t \right\} dx_r,$$

или

$$U(x_p, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) \sigma_z(x_t - x_p, k) G(x_t, x_r, k) dx_t dx_r. \quad (7)$$

Данное выражение можно существенно упростить, если учесть то обстоятельство, что функция $G(x_t, x_r, k)$ имеет вид функции Бесселя нулевого порядка (4). В этом случае $G(x_t, x_r, k)$ можно рассматривать как пространственный фильтр в полосе частот $[-k, k]$ и считать $G(x_t, x_r, k) \approx \delta(x_t + x_r)$, где δ - функция Дирака. Такое приближение справедливо для большинства ПЭП используемых в практике ультразвукового контроля и позволяет существенно упростить формулу (7)

$$U(x_p, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) \sigma_z(x_t - x_p, k) \delta(x_t + x_r) dx_t dx_r.$$

Проинтегрировав данное выражение по x_t и, применив фильтрующее свойство δ -функции, можно записать

$$U(x_p, k) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) \sigma_z(-x_r - x_p, k) dx_r.$$

Таким образом, можно сделать важный вывод, что при оговорённых выше допущениях, напряжение на выходе преобразователя $U(x_p, k)$ подобно формуле свёртки распределения нормальной составляющей тензора напряженности $\sigma_z(x)$ со своей копией. С физической точки зрения данная формула соответствует ситуации, когда «эквивалентная пластина» представляется как излучатель и приёмник, развёрнутые зеркально и перемещающиеся навстречу друг другу относительно центра симметрии образца.

Преобразование Фурье функции $U(x_p, k)$ по координате x_p рассчитывается как

$$\int_{-\infty}^{\infty} U(x_p, k) e^{ix_p k_x} dx_p = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x_r - x_p, k) \sigma_z(-x_r - x_p, k) dx_r \right\} e^{ix_p k_x} dx_p. \quad (8)$$

После замены переменных $x'_r = x_r - x_p$, умножения подынтегрального выражения на единицу в виде $e^{\frac{ix'_r k_x}{2}} e^{-\frac{ix'_r k_x}{2}} = 1$ и перегруппировки под знаком интеграла можно записать правую часть выражения (8) как

$$\mathfrak{F}_x(U(x_p, k)) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x'_r, k) e^{-\frac{ix'_r k_x}{2}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_z(-x'_r - 2x_p, k) e^{\frac{ik_x(2x_p + x'_r)}{2}} dx_p \right\} dx'_r.$$

После новой замены переменных $x'_p = x'_r + 2x_p$ и $x_p = \frac{x'_p - x'_r}{2}$ формула примет вид

$$\mathfrak{F}_x(U(x_p, k)) = \frac{1}{2} \int_{-\Delta}^{\Delta} \sigma_z(x'_r, k) e^{-\frac{ix'_r k_x}{2}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_z(-x'_p) e^{\frac{ix'_p k_x}{2}} dx'_p \right\} dx'_r.$$

В фигурных скобках записано преобразование Фурье

$$\sigma_z^*\left(\frac{k_x}{2}, k\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_z(-x'_p, k) e^{ix'_p \frac{k_x}{2}} dx'_p,$$

где знак * означает комплексное сопряжение. С учетом замены $x''_r = -x'_r$ и без коэффициентов, запишем правую часть выражения (8) в следующем виде

$$\mathfrak{F}_x(U(x_p, k)) = \sigma_z^*\left(\frac{k_x}{2}, k\right) \int_{-\Delta}^{\Delta} -\sigma_z(-x''_r, k) e^{ix''_r \frac{k_x}{2}} dx''_r = -\sigma_z^*\left(\frac{k_x}{2}, k\right) \sigma_z^*\left(\frac{k_x}{2}, k\right) = -\sigma_z^*\left(\frac{k_x}{2}, k\right)^2.$$

Таким образом, квадрат диаграммы направленности $\Theta^2(\alpha, k)$, то есть диаграмму направленности излучения/приема для волнового числа k без учета постоянных коэффициентов можно рассчитать с помощью преобразования Фурье измеренной амплитуды эхосигналов $U(x_p, k)$

$$\Theta^2(\alpha, k) = \left| \mathfrak{F}_x(U(x_p, k)) \right|,$$

где $\alpha = \arcsin(k_x / 2k)$, а $k_x \in (-k, k)$.

Импульсную диаграмму направленности $\Theta^2(\alpha)$ можно рассчитать, разложив каждый принятый на пространственной апертуре эхосигнал в ряд Фурье для диапазона частот (k_{\min}, k_{\max}) , соответствующей рабочей полосе частот преобразователя. После чего все рассчитанные парциальные диаграммы направленности $\Theta^2(\alpha, k)$ нужно просуммировать

$$\Theta^2(\alpha) = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \Theta^2(\alpha, k) dk.$$

Приведенные выше рассуждения позволяют утверждать следующее:

- проведение в совмещенном режиме измерений донного эхосигнала $U(x_p, k)$ при сканировании преобразователем по плоской поверхности образца СО-3 позволяет получить свертку функции распределения нормальной составляющей тензора напряжения $\sigma_z(x, k)$ с самой собой; геометрически это соответствует замене образца СО-3 на точечный отражатель в центре системы координат xz так, как это показано Рис. 3;
- пространственное преобразование Фурье функции $U(x_p, k)$ позволяет рассчитать квадрат диаграммы направленности излучения преобразователя $\Theta^2(\alpha, k)$.

Расчет трехмерной диаграммы направленности

Переход к сферической симметрии позволяет обосновать и возможность определения произвольного сечения трехмерной диаграммы направленности ПЭП при регистрации поля, рассеянного донной поверхностью полусферического образца (Рис. 4). В данной статье мы не будем анализировать данную возможность, отметим лишь, что от одномерного преобразования Фурье функции $U(x_p, k)$ выполняется переход к двумерному преобразованию Фурье функции $U(x_p, y_p, k)$ и несколько усложняются формулы для пересчета произвольного сечения диаграммы направленности в координаты отсчетов двумерного спектра голограмм.

Рис. 4

Численный эксперимент

Для проверки сделанных выводов были проведены численные эксперименты. Прямая задача излучения и рассеяния в скалярном приближении в двумерном варианте решалась методом конечных элементов. Пьезопластина шириной 12 мм и размещалась на призме с углом наклона 40 градусов. Предполагалось, что призма находится на поверхности образца СО-3 со скоростью звука 3,2 мм/мкс, плотностью 7 г/см³ или на поверхности образца СО-2 с теми же параметрами. Эффективная частота излученного импульса составляла около 1 МГц, ширина полосы пропускания по уровню половинной энергии составляла порядка 0,7 МГц. Скорость звука и плотность призмы приравнены скорости звука и плотности в образце для исключения влияния зависимости коэффициента прохождения от угла падения на границу раздела двух сред. Затухание во всех средах кроме пьезопластины задано пренебрежимо малым во избежание влияния затухания на диаграмму направленности. Для

«регистрации» эхосигналов моделировалось перемещение по плоской поверхности образцов призмы с пьезопластиной, затем по указанному выше алгоритму рассчитывалась импульсная диаграмма направленности излучения/приема.

Результаты расчета сравнивались между собой, а также с аналитическим выражением для диаграммы направленности прямоугольной пьезопластины в непрерывном режиме излучения [11]:

$$\Theta^2(k, \alpha) = \left(\frac{\sin(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \right)^2,$$

где k , волновое число для центральной частоты, a – эффективный размер пластины в основной плоскости. До уровня порядка 50% от максимума диаграмма, полученная по аналитическому выражению должна с хорошей точностью совпадать импульсной диаграммой направленности, рассчитанной по эхосигналам.

Рис. 5

Результаты расчета – нормированные на максимум диаграммы направленности представлены на Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение двух диаграмм в пределах основного лепестка (20° - 60°) составляет 1,5 %, разница в ширине диаграмм направленности по уровню 50% и 10% составляет около 1 градуса. Разница в значениях при углах ниже 5° объясняется влиянием реверберационных шумов, которые при калибровке реальных наклонных ПЭП устраняется с помощью пространственной фильтрации набора эхосигналов. Таким образом, проведенные с помощью конечноэлементных моделей расчеты позволяют считать, что диаграммы направленности, рассчитанные по измерениям поля на образцах СО-2 и СО-3, совпадают с точностью не хуже одного градуса.

Диаграмма направленности реального ПЭП

Сравнение экспериментально полученных диаграмм направленности ПЭП по измеренным эхосигналам на образцах СО-2 и СО-3 проводилось с помощью системы калибровки пьезоэлектрических преобразователей «Авгур 5.4». Сравнение диаграмм направленности, рассчитанных для ПЭП типа П-121-1,8-45 (частота 1,8 МГц, угол ввода 45 градусов) показано на Рис. 6. К диаграммам на эффективной частоте для сглаживания было применено усреднение по пяти точкам. Отклонение угла ввода, определенного при обработке эхосигналов от СО-2 и СО-3 составило 0,5 градуса, среднеквадратическое отклонение двух диаграмм направленности в диапазоне 20-70 градусов составляет около 3%.

Рис. 6

Выводы

В статье обосновывается возможность замены стандартного образца СО-2 на стандартный образец СО-3 или полусферический стандартный образец для определения диаграммы направленности ПЭП. Для этого построена функция Грина стандартного образца СО-3 и показано, что при указанных далее допущениях пространственное преобразование Фурье поля, измеренного на поверхности СО-3 позволяет рассчитать диаграмму направленности ПЭП, работающего в совмещенном режиме. Допущения в принятой модели:

- не рассмотрено влияние зависимости коэффициента прозрачности по энергии от угла падения на границу «призма/образец»;
- не учтено влияние трансформации типов волн при отражении волны от сферической части образца СО-3, считая, что половина основного лепестка не превышает 15° ;
- в данной статье не учтено то обстоятельство, что в практике ультразвуковой дефектоскопии под диаграммой направленности понимается экспериментально определенная зависимость амплитуды эхосигнала от положения ПЭП относительно конкретного ненаправленного отражателя, что не соответствует понятию диаграммы направленности, как углового распределения спектра плоских волн измеренного поля. Приведению в соответствие двух этих определений будет посвящена отдельная статья.

Сравнение модельных и экспериментальных диаграмм направленностей ПЭП полученных на образцах СО-2 и СО-3, продемонстрировало справедливость сделанных выводов и возможность внести в методику калибровки ПЭП на системе «Авгур 5.4» применение единственного образца СО-3.

В заключение, авторы выражают благодарность Голубеву А.С. за помощь в проведении численных экспериментов методом конечных элементов.

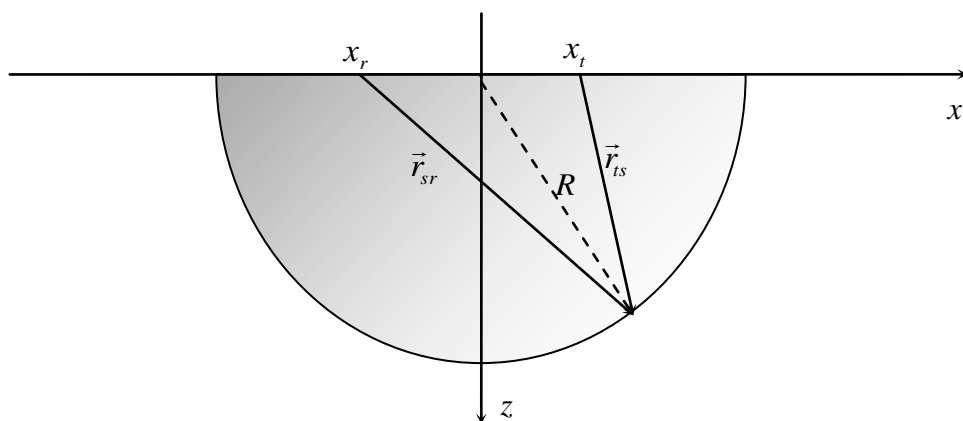


Рис. 1

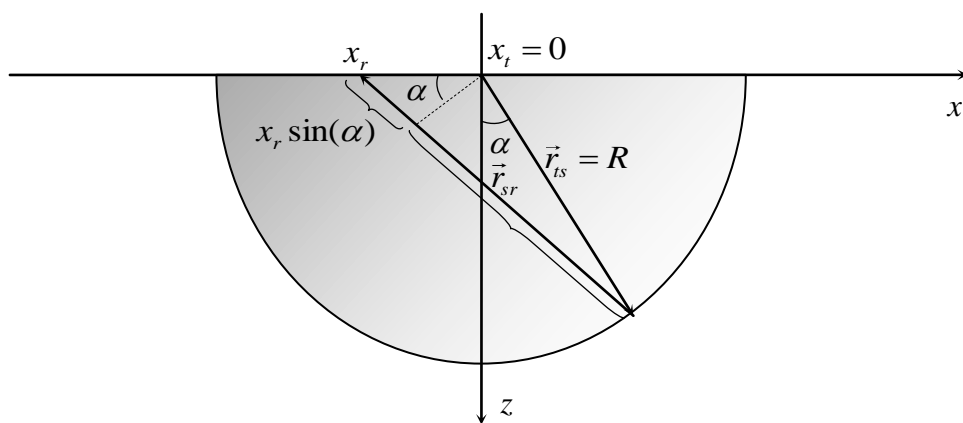


Рис. 2

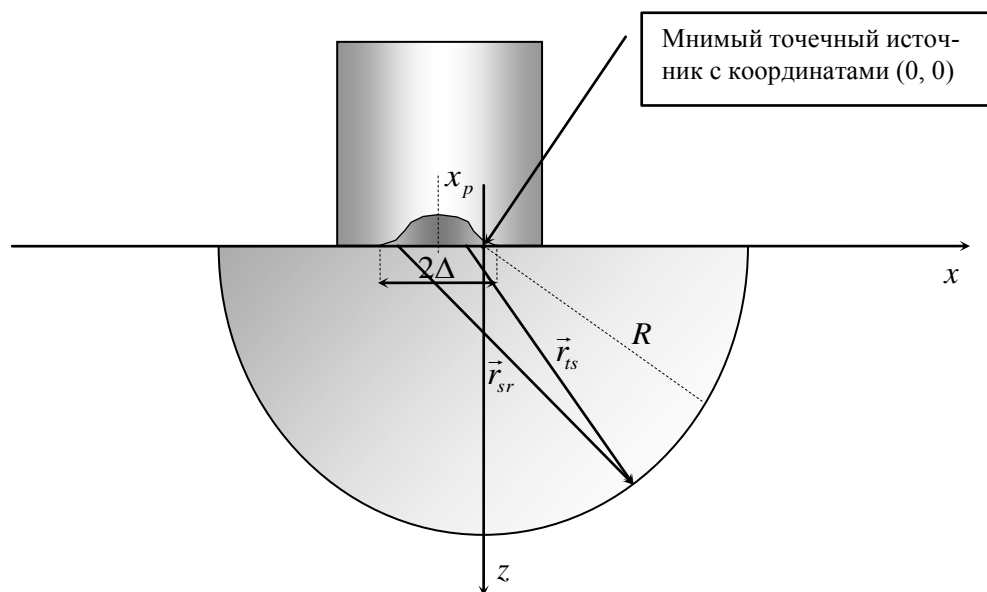


Рис. 3



Рис. 4

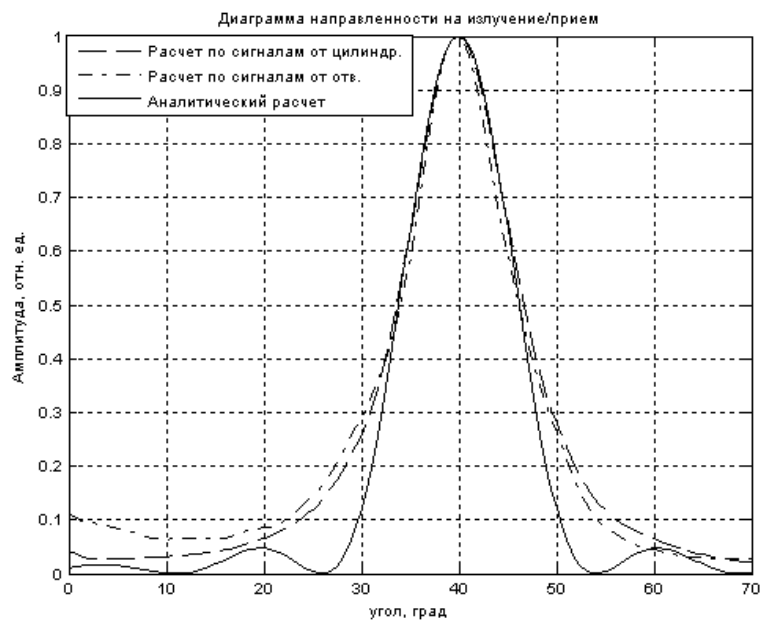


Рис. 5

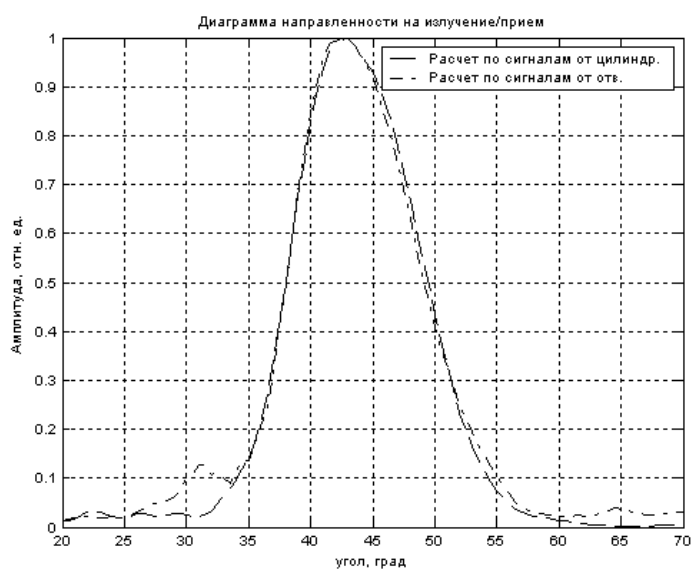


Рис. 6

Подрисуночные надписи

Рис. 1 Эскиз образца СО-3 и обозначения.

Рис. 2 Случай нахождения излучателя в центре образца. Объяснение приближенного расчета модуля вектора r_{sr} .

Рис. 3 Пояснения к расчету поля пластины ПЭП с «эквивалентной пластиной» размерами 2Δ .

Рис. 4 Эскиз полуцилиндрического образца СОП-СФ-55.

Рис. 5 Сопоставление диаграмм направленности по результатам конечноэлементного моделирования. Пунктиром показана импульсная диаграмма направленности, рассчитанная по эхосигналам от цилиндрической поверхности, штрихпунктирной линией показана диаграмма направленности, рассчитанная по эхосигналам от отверстия, сплошной линией показан аналитический расчет диаграммы направленности для частоты 1 МГц.

Рис. 6 Экспериментально определенные диаграммы направленности для ПЭП типа П-121-1,8-45. Пунктиром показана диаграмма направленности, рассчитанная по эхосигналам от цилиндрической поверхности, штрихпунктирной линией показана диаграмма направленности, рассчитанная по эхосигналам от отверстия.

Список литературы

- 1 ГОСТ 23702-90. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.
- 2 ЕВРОПЕЙСКИЙ СТАНДАРТ. EN 12668-2:2001. Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи.
- 3 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Бычков И.В., Вопилкин А.Х., Каплун С.М., Ломакин А.В., Пентюк М.В., Рубен Е.А., Тихонов Д.С., Штерн А.М. Компьютерная система для исследования и паспортизации пьезопреобразователей ультразвукового неразрушающего контроля «Авгур 2.2» // Дефектоскопия. 1993. № 2. С. 43-49.
- 4 ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
- 5 Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Система калибровки акустических преобразователей «Авгур 5.4» // Тезисы 7-ой международной конференции НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, Москва, 11-13 марта 2008, С. 113-114.
- 6 Гурвич А.К. Влияние поглощения ультразвука на диаграмму направленности наклонных искателей // Дефектоскопия. 1967. № 1. С. 23-28.
- 7 Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 343 С.
- 8 Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1973. 370 С.
- 9 Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики (3-е изд.). М.: Наука, 1966. 724 С.
- 10 Качанов Е.И., Пигулевский Е.Д., Яричин Е.М. Методы и средства гидроакустической голографии. Л.: Судостроение, 1989. 256 С.
- 11 Неразрушающий контроль: Справочник. в 7 т. под общ. Ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль/И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 С.