



К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА ДЕФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АРД-ДИАГРАММ

Г. Г. ЛУЦЕНКО

Исследуется влияние погрешностей исходных данных, полученных при непосредственном измерении, на точность определения эквивалентного диаметра дефекта при использовании прямых пьезоэлектрических преобразователей и АРД-диаграмм Крауткремера. Исследование базируется на численном анализе дифференциальных свойств АРД-диаграмм.

Studied was the effect of errors in the source data generated by direct measurement on the accuracy of determination of the equivalent diameter of a defect in the case of using direct piezo-electric transducers and the Krautkremer isothermal dendrite transformation diagrams. The studies were based on a numerical analysis of differential properties and the isothermal dendrite transformation diagrams.

Использование АРД-диаграмм (в качестве одного из приемов дефектометрии) описано в [1–3], а также в ряде нормативных документов. Эффективность использования АРД-диаграмм основана на том, что изменяющиеся от эксперимента к эксперименту параметры среды (скорость продольных волн) и пьезоэлектрического преобразователя (рабочая частота, диаметр или площадь излучающей поверхности) входят в обобщенные (нормированные) переменные g , x , от которых зависит амплитуда эхо-сигнала A , выраженная в децибеллах. Сама же функция $A(g, x)$, где $g = d/D$ — отношение диаметров дефекта и пьезопреобразователя (ПЭП) и $x = \lg(r/R)$ — логарифм отношения расстояния по лучу к длине ближней зоны ($R = D^2f/4c$), остается неизменной при вариации параметров измерительного эксперимента. При измерении исходных для расчета данных, как-то: амплитуды, частоты, расстояния, скорости звука неизбежны погрешности, приводящие в итоге к ошибке в определении эквивалентного диаметра дефекта. Ясно, что величина результирующей ошибки зависит от свойств функции $A(g, x)$ (или от дифференциальных свойств соответствующей ей поверхности). Изучение этих свойств для различных областей аргументов, соответствующих ближней, дальней и промежуточной зонам в поле ПЭП, а также оценка величины погрешности в зависимости от допусков на точность измерения исходных данных является предметом данной работы. При этом мы будем основываться на АРД-диаграммах Крауткремера, применяя для их исследования как аналитические, так и численные методы.

Вычисление погрешности измерения эквивалентного диаметра дефекта. Рассмотрим более детально процедуру измерения. Основному измерению предшествует калибровочный эксперимент, устраняющий неопределенность сквозного коэффициента передачи электроакустического тракта. Будем предполагать, что калибровка проводится по величине донного эхо-сигнала с использованием соответствующей кривой Крауткремера $A_b(x)$. Тогда нетрудно получить следующее выражение для приведенной амплитуды A эхо-сигнала от дефекта через непосредственно измеренные амплитуды эхо-сигналов — донного A_{b1} и от дефекта A_1 :

$$A = A_1 - (A_{b1} - A_b(x_H)) + 2(\alpha r - \alpha_1 H)20\lg(e). \quad (1)$$

Амплитуда A_b определяется по донной кривой АРД-диаграмм Крауткремера при $x = x_H = 4c_1H/D^2f$. Здесь мы рассматриваем общий случай, когда параметры материала образца при калибровке (скорость звука c_1 и коэффициент поглощения a_1) отличаются от параметров материала детали (c , a).

По приведенной амплитуде A и рассчитанному обобщенному расстоянию $x = \lg(4cr/D^2f)$ находят эквивалентный диаметр дефекта. При этом в явной или неявной форме используется зависимость, обратная функции АРД-диаграмм: $g(A, x)$, так что

$$d = Dg(A, x). \quad (2)$$

Остановимся на способах задания зависимостей $A(g, x)$ и $g(A, x)$. Как правило, зависимость $A(g, x)$ задана в виде набора графиков, параметром которых является аргумент g , принимающий значения из дискретного набора в интервале от 0,05 до 1. С ростом обобщенного расстояния графики асимптотически переходят в прямые линии, которые соответствуют закону обратных квадратов для амплитуд эхо-сигналов в дальней зоне в среде без потерь. Граница дальней зоны весьма условна. С достаточной для практики точностью можно принять в качестве граничного значение $x = 1$ ($r/R = 10$). В области $x > 1$ (и в указанном диапазоне аргумента g) справедливы энергетические соображения, в соответствии с которыми амплитуда эхо-сигнала пропорциональна площади отражателя (или квадрату диаметра). Из этого следует, что в координатах (u, x) , где $u = 40 \lg(g)$, поверхность $A(u, x)$ в указанных пределах представляет собою плоскость и определяется по формуле:

$$A = B + u - 40(x - 1). \quad (3)$$

Константа B выбирается так, чтобы согласовать эту плоскость со значениями АРД-диаграмм при $x = 1$ (или при другом значении, которое принято в качестве границы дальней зоны). Соответственно, обратная зависимость определяется простыми соотношениями:

$$u = A + 40(x - 1) - B, \quad g = 10^{u/40}. \quad (4)$$



АРД-диаграмма донного сигнала в рассматриваемой области представляет собой прямую линию вида:

$$A_b(x) = B_b - 20(x - 1).$$

При уменьшении x (в области $x < 1$) линейность связи приведенной амплитуды с аргументами u , x утрачивается, однако зависимость $A(u)$ при любом $x = \text{const}$ остается монотонной, лишь постепенно отклоняясь от линейной. Это позволяет подобрать для каждого значения $x = \text{const}$ полином $P_1(u)$, достаточно точно описывающий зависимость $A(u)$, и полином $P_2(A)$, описывающий обратную зависимость $u(A)$. Таким образом, АРД-диаграммы $A(u, x)$ и обратные АРД-диаграммы $u(A, x)$ можно описать таблицами полиномиальных коэффициентов на некотором дискретном наборе значений обобщенного расстояния x . Такое представление обратных АРД-диаграмм оказалось удобным для вычисления погрешности измерения эквивалентного диаметра отражателя.

Остановимся на факторах, обуславливающих эту погрешность. Исходные величины, необходимые для расчета эквивалентного диаметра отражателя, определяются измерением. Из их числа выделим расстояния r , H и скорости c , c_1 . В современных дефектоскопах они могут быть измерены с весьма малой относительной погрешностью и поэтому не являются определяющими при формировании погрешности измерения эквивалентного диаметра. В дальнейшем в интересах краткости изложения будем предполагать эти величины точно известными. Значительно более существенными и трудно устранимыми являются ошибки при измерении амплитуд эхо-сигналов A_1 и A_{b1} , вызванные разбросом условий контакта (неодинаковость степени прижима, свойств контактной жидкости, шероховатости поверхностей контрольного образца и детали), а также конструктивным несовершенством ПЭП. Существенную роль играет неточность определения коэффициентов поглощения. Она приводит к тем большим ошибкам, чем больше расстояние до дефекта. Наконец, неточность определения рабочей частоты приводит к неверному вычислению нормированного расстояния и, вследствие этого, к ошибке в определении эквивалентного диаметра. Ошибки при вычислениях (например, ошибки интерполяции) здесь не рассматриваются, так как они могут быть низведены до приемлемо малых значений.

Переходя к количественным соотношениям, будем предполагать, что ошибки не слишком велики, так что в приводимых ниже выражениях дифференциалы можно заменить конечными приращениями. Учитывая приведенные выше формулы для обобщенных переменных x и u , нетрудно установить, что относительная погрешность вычисления эквивалентного диаметра отражателя: $\delta d/d = 0,025\delta u$.

Определяя δu через дифференциал функции $u(A, x)$, находим

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial A} \delta A \right). \quad (5)$$

Учитывая формулу для обобщенного расстояния, получаем: $\delta x = -\delta f/f$. Из формулы (1) для приведенной амплитуды следует:

$$\delta A = \delta A_1 - \delta A_{b1} + \frac{\partial A_b}{\partial x} \frac{\delta f}{f} + (r\delta\alpha - H\delta\alpha_1) 40 \lg(e). \quad (6)$$

После подстановки в (5), получаем:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(- \left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\delta f}{f} + \frac{\partial u}{\partial A} \delta A \right). \quad (7)$$

Здесь величина

$$\delta A' = \delta A_1 - \delta A_{b1} + (r\delta\alpha - H\delta\alpha_1) 40 \lg(e). \quad (8)$$

определяет погрешность измерения приведенной амплитуды, вызванную ошибками при непосредственном измерении амплитуд эхо-сигналов и при измерении поглощения звука в материалах детали и контрольного образца. В состав $\delta A'$ можно ввести также погрешность, возникающую вследствие того, что в ближней зоне кривые АРД проходят по-разному в зависимости от формы и длительности импульсного сигнала [1].

Формула (7) определяет относительную погрешность как случайную величину, линейно зависящую от других случайных величин, являющихся результатами непосредственных измерений. Среднеквадратичное значение случайной относительной погрешности вычисляется по обычным правилам математической статистики с учетом средних значений (смещений) и дисперсий результатов непосредственных измерений, которые в данном случае можно считать статистически независимыми. Если предположить, что оценка значения рабочей частоты является несмещенной, то эффективную относительную погрешность измерения эквивалентного диаметра следует определять по формуле:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \frac{\langle \delta f'^2 \rangle}{f^2} + \left(\frac{\partial u}{\partial A} \right)^2 \langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (9)$$

Треугольные скобки означают статистическое усреднение. Величина среднеквадратичной погрешности измерения приведенной амплитуды $\langle \delta A'^2 \rangle$ зависит от методики проведения измерений и в общем случае, когда для калибровки используется специальный образец, материал которого не совпадает с материалом детали, будет

$$\begin{aligned} \langle \delta A'^2 \rangle = & (\langle \delta A_1 \rangle - \langle \delta A_{b1} \rangle + (r \langle \delta\alpha \rangle - \\ & - H \langle \delta\alpha_1 \rangle) (40 \lg(e)))^2 + \\ & + \sigma_{A1}^2 + \sigma_{Ab1}^2 + (r^2 \sigma_\alpha^2 + Y \sigma_{\alpha1}^2) (40 \lg(e))^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь через σ^2 обозначена дисперсия соответствующей величины. Смещения оценок амплитуд эхо-сигналов при измерении и при калибровке $\langle \delta A_1 \rangle$, $\langle \delta A_{b1} \rangle$ обусловлены, в частности, состоянием поверхностей контакта. Если возможно провести калибровку по донному сигналу на самой детали, то погрешность может быть снижена, так как на одной и той же поверхности контакта разность $\langle \delta A_1 \rangle - \langle \delta A_{b1} \rangle$ может быть значительно



снижена. Влияние погрешности измерения коэффициента поглощения также уменьшается:

$$\langle \delta A'^2 \rangle = (\langle \delta A_1 \rangle - \langle \delta A_{b1} \rangle)^2 + \sigma_{A1}^2 + \sigma_{Ab1}^2 + \langle \delta \alpha^2 \rangle (r - H)^2 (40 \lg(e))^2. \quad (11)$$

Таким образом, методику калибровки по донному сигналу на самой детали (если она возможна) следует признать предпочтительной.

Более детальный анализ погрешности определения приведенной амплитуды требует конкретизации методики измерения коэффициентов поглощения, условий проведения измерения амплитуд и конструктивных особенностей ПЭП. Ниже, для получения численных оценок относительной погрешности измерения эквивалентного диаметра мы задавали среднеквадратичную погрешность измерения приведенной амплитуды в целом.

Результаты численных расчетов. Формула (9) позволяет оценить относительную среднеквадратическую погрешность измерения эквивалентного диаметра отражателя. Если расстояния при калибровке и при измерении относятся к дальней зоне, то $du/dA = 1$, $du/dx = 40$, $dA_b/dx = -20$. Тогда

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \sqrt{400 \frac{\langle \delta f^2 \rangle}{f^2} + \langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (12)$$

Эта простая формула позволяет получить следующие оценки. При допуске на отклонение рабочей частоты от номинального значения $\pm 10\%$ замена действительного значения частоты номинальным значением может привести к погрешности порядка $\pm 5\%$. Если при этом условии принять, что суммарная погрешность определения приведенной амплитуды $\delta A'$ изменяется от 1 до 6 дБ, то среднеквадратическая погрешность измерения эквивалентного диаметра будет пробегать значения от 5,6 до 16%. Значению результирующей погрешности 10% соответствует $\delta A' = 3,5$ дБ.

Если расстояние при калибровке соответствует ближней зоне ($x < 0$, $r < R$), то можно приближенно принять $dA_b/dx = 0$. В этом случае:

$$\frac{\delta d}{d} \approx 0,025 \sqrt{1600 \frac{\langle \delta f^2 \rangle}{f^2} + \langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (13)$$

Погрешность за счет неточного определения частоты увеличивается и приводит при сформулированном выше условии к значению $\pm 10\%$. При изменении $\delta A'$ от 1 до 6 дБ результирующая ошибка принимает значения от 10,3 до 18%.

В случае, когда дефект находится в ближней или промежуточной зоне, значения производных, входящих в формулу (9) и характеризующих дифференциальные свойства АРД-поверхности, должны быть определены численно. В соответствии со способом задания функции $u(A, x)$, который описан выше, частная производная du/dA вычислялась как производная от полинома, а частные производные du/dx и dA_b/dx находились как конечно-разностные производные.

Рассмотрим несколько характерных вариантов расчета, позволяющих оценить влияние различных факторов. Предположим, что рабочая частота определена точно. Тогда, как следует из формулы (9), относительная погрешность пропорциональна производной du/dA , среднеквадратичной погрешности измерения приведенной амплитуды и не зависит от расстояния до дна при калибровке:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(\frac{du}{dA} \right) \sqrt{\langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (14)$$

Распределение погрешности на плоскости аргументов $g = d/D$ и $x = \lg(r/R)$, которые соответствуют общепринятым масштабам при изображении АРД-диаграмм, показано линиями уровня на рис. 1 для $\langle \delta A'^2 \rangle = 1$ дБ.

Как видно из рис. 1, наибольшая погрешность возникает при измерении относительно больших диаметров ($d/D > 0,3$), если дефект находится в промежуточной зоне.

Рассмотрим гипотетический альтернативный случай, когда $\langle \delta A'^2 \rangle = 0$ и погрешность обусловлена лишь неточностью задания рабочей частоты. В этом случае относительная погрешность измере-

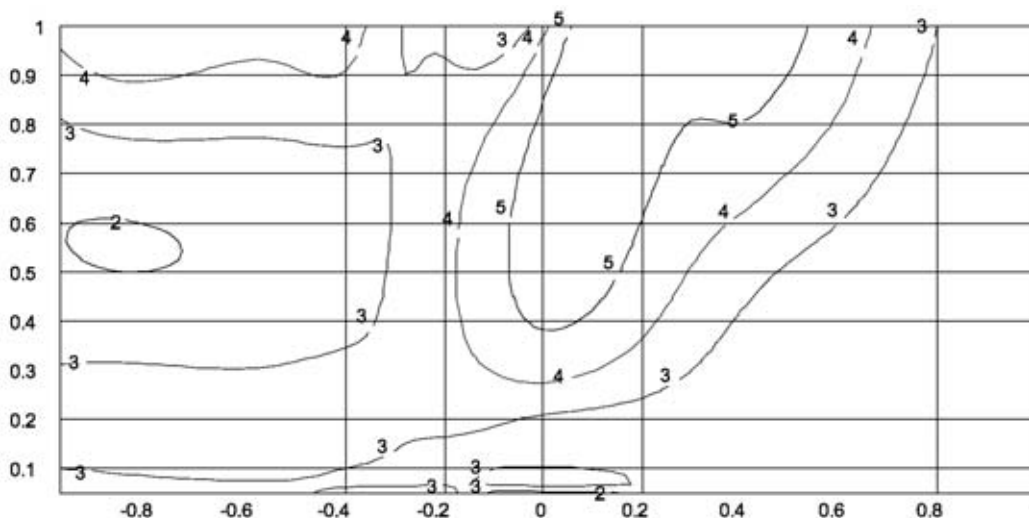


Рис. 1. Распределение относительной погрешности при неточном определении только приведенной амплитуды в процентах

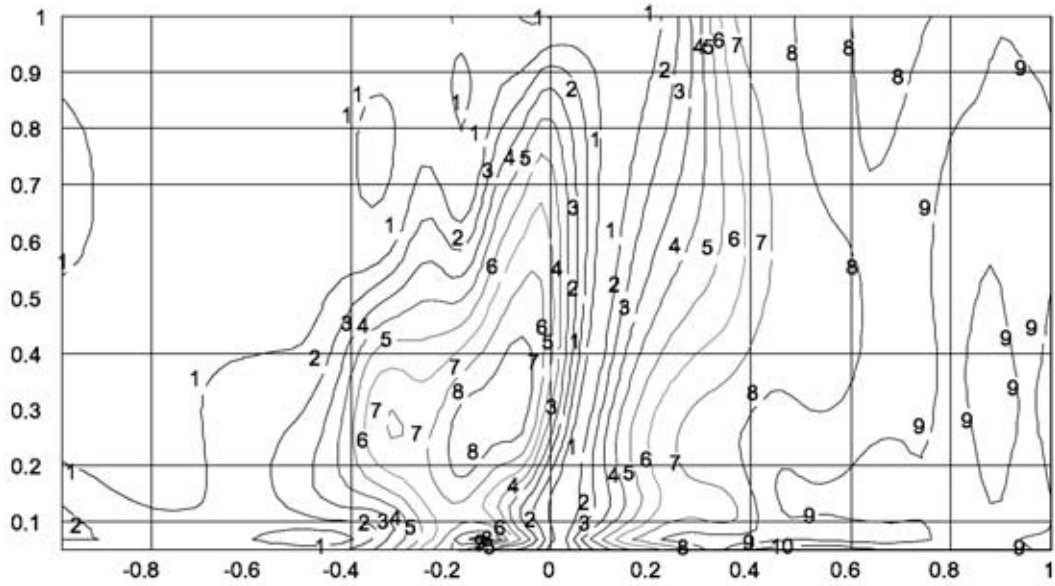


Рис. 2. Распределение относительной погрешности при $x_H = -0,5$ при неточном определении частоты

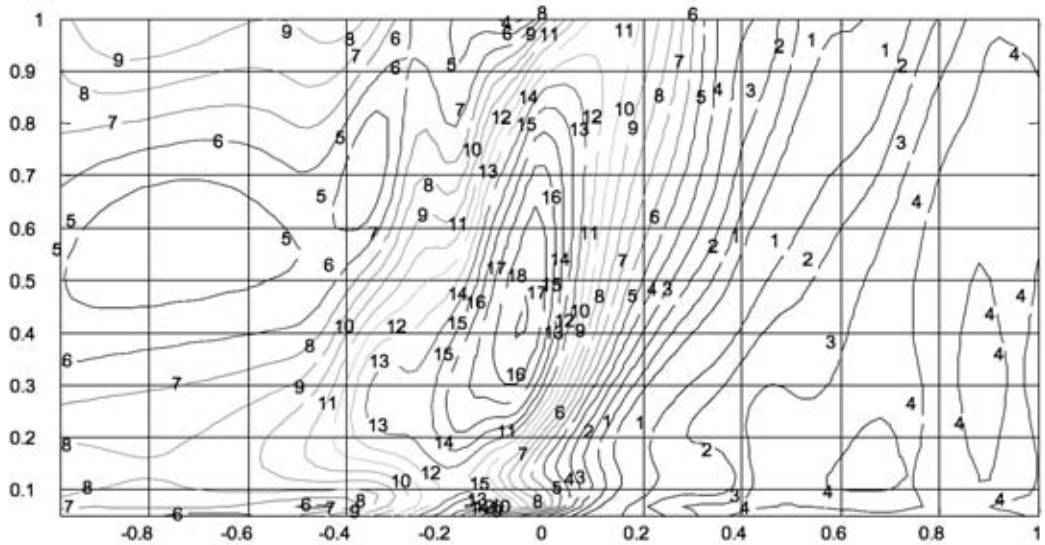


Рис. 3. Распределение относительной погрешности при $x_H = -1$ при неточном определении только частоты

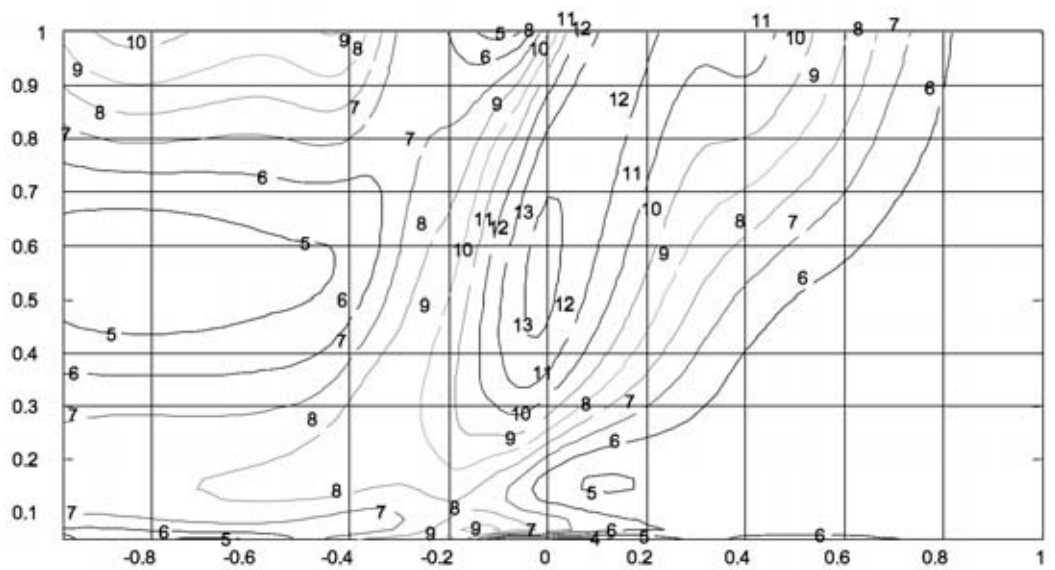


Рис. 4. Распределение относительной погрешности при $x_H = -0,5$ при неточном определении частоты и приведенной амплитуды



ния эквивалентного диаметра пропорциональна относительной погрешности измерения частоты:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left| \frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right| \frac{\sqrt{\langle \delta f^2 \rangle}}{f}. \quad (15)$$

Как видно из формулы (15), она зависит через $\partial A_b / \partial x \big|_{x=x_H}$ от расстояния до дна при калибровке.

Распределения относительной погрешности при $x_H = -0,5$ (ближняя зона) и при $x_H = 1$ (граница дальней зоны) приведены на рис. 2 и 3 для относительной погрешности задания рабочей частоты, равной 10 %.

Наибольшие значения относительной погрешности наблюдаются при измерении средних и малых относительных диаметров в промежуточной зоне. Наблюдается также увеличение погрешности при смещении дефекта в сторону дальней зоны. Сходная картина наблюдается и на рис. 3. Однако в этом случае погрешность измерения эквивалентных диаметров дефектов, лежащих в промежуточной зоне, значительно больше по сравнению с предыдущим случаем. Напротив, погрешность измерения для дефектов, лежащих в дальней зоне, меньше. Приведенные результаты расчетов указывают на важность уточнения рабочей частоты при измерении эквивалентного диаметра дефекта.

На практике мы наблюдаем совместное влияние всех факторов на точность измерения. Ниже приведен пример распределения относительной погрешности для случая, когда $\langle \delta A^2 \rangle = 2$ дБ и неточность определения рабочей частоты составляет 5 %.

Выводы

Представленный выше анализ погрешностей измерения эквивалентного диаметра дефекта на основе АРД-диаграмм прямыми пьезопреобразователями позволяет сделать следующие заключения.

1. Величина относительной погрешности определяется не только ошибками при непосредственном измерении величин, входящих в расчет, но и точкой на АРД-поверхности, к которой относятся измерения, т. е. значением обобщенного расстояния и относительного диаметра, а также значением обобщенного расстояния при калибровке. Оценки погрешностей, полученные для дальней зоны, могут заметно отличаться от погрешностей в ближней и промежуточной зонах.

2. Предпочтительным является вариант калибровки с использованием донного сигнала на самой контролируемой детали (при наличии такой возможности).

3. При проведении измерений целесообразно уточнить рабочую частоту ПЭП по сравнению со значением из ряда номинальных частот.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 480 с.*
2. *Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.*
3. *Алешии Н. П., Белый В. Е., Вопилкин А. Х., Воцапов А. К., Ермолов И. Н., Гурвич А. К. Методы акустического контроля металлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.*

НПФ «Промпрылад»,
Киев

Поступила в редакцию
05.03.2003

Украинский информационный Центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»

сообщает о перенесении сроков проведения

Одинадцатой международной конференции и выставки

«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»
в г. Ялта с 29 сентября–3 октября 2003 г. на **6–10 октября 2003 г.**