

ТЕОРИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-АМПЛИТУДНОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

Развернутая модель ультразвукового поля эхо-канала

В. Ф. ДАВИДЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено графоаналитическое исследование энергетических и геометрических свойств модели ультразвукового поля эхо-канала (УПЭК), успешное благодаря относительно простой функциональной связи между тремя безразмерными переменными, учитываемыми все исходные физические величины, раздельно для сред без затухания (p, x, y) и с затуханием звука (q, u, v). Полученные математические уравнения моделей УПЭК для идеальных и реальных сред имеют параметрический характер, позволяющий решать прямую и обратную задачи дефектометрии. Впервые сделана важная поправка в уравнениях УПЭК через учет диаграммы направленности поля. Введены новые единицы измерения базовых параметров амплитуды эхо-сигналов, дальности отражателей и затухания звука. Впервые применены частные производные от амплитуды эхо-сигнала по размеру эквивалентного отражателя в качестве меры чувствительности УПЭК – $\partial q/\partial v = B$, и по дальности отражателя в качестве меры ослабления УПЭК – $\partial q/\partial u = G$. Сформулировано условие точности ультразвуковой эхо-амплитудной (УЭА)-дефектометрии как максимизация чувствительностей трех родов: $\partial B_1/\partial u$, $\partial B_2/\partial v$ и $\partial B_3/\partial q$, обеспечивающая оптимальное выделение полезных эхо-сигналов, максимально точное измерение размеров эквивалентных отражателей и съем наиболее достоверных результатов дефектометрии при ручном сканировании объекта контроля. Впервые выявлена локальность чувствительностей трех родов, выражающаяся экстремальным характером изменения их величин. Выявлена взаимосвязь между дискретностью измерения базовой амплитуды эхо-сигналов и шириной огибающих трех родов чувствительностей, характеризующей погрешности операций УЭА-дефектометрии. Установлен главный измеряемый параметр УЭА-дефектометрии, аналогом которого можно считать современную временную регулировку чувствительности (ВРЧ) и обоснованы возможные разновидности АРД-диаграмм для практической УЭА-дефектометрии. Библиогр. 4, табл. 9, рис. 27.

К л ю ч е в ы е с л о в а : ультразвуковое поле эхо-канала, ультразвуковая эхо-амплитудная дефектометрия, чувствительность трех родов, базовая амплитуда эхо-сигнала, базовая дальность отражателя, эквивалентный отражатель, комплексная базовая амплитуда, обобщенный размер эквивалентного отражателя

Более десяти лет назад появились первые публикации [1, 2] по УЭА-дефектометрии на основе новой теории, получивший название элементарная неволновая теория поля (ЭНТП). Главная особенность новой теории заключается в том, что под интеграл полного акустического давления на идеальный плоский диск («эквивалентный» отражатель звука) впервые введено вероятностное уравнение диаграммы направленности УЗ преобразователя. В результате получено решение интеграла амплитуды эхо-сигнала в виде параметрического уравнения

УПЭК, связывающего три безразмерные переменные – функцию, аргумент и параметр, которые могут меняться местами и назначениями.

Разнообразие математических решений параметрического уравнения и их графических выражений для усиления логического восприятия моделей УПЭК представлено табл. 1–9, составленными однотипно по три из математической и графической модели в одной таблице.

Рассмотренная в данной статье теория УЭА-дефектометрии представлена в международных научных журналах [3, 4].

Исходные физические величины и параметры УПЭК

Физические переменные	Параметры, единицы измерения	Понятия, определения, обозначения
Площадь «эквивалентного» отражателя (ЭО)	Площадь, мм ²	Условный дисковый отражатель на месте реального дефекта определяет параметры эхо-сигнала (амплитуду и задержку), эквивалентным условиям УЭА дефектометрии, S ;
Амплитуда базового опорного эхо-сигнала	Полная высота экрана на M пикселей	Максимальная амплитуда эхо-сигнала от dna клиновидного образца, достигаемая регулируемой коэффициентом усиления: $Q = 1 = 0$ дБ



Продолжение

Амплитуда эхо-сигнала от реального дефекта	Отрицательные децибелы, -дБ	Амплитуда эхо-сигнала, измеряемая по цифровому дисплею с фиксированным шагом дискретности $-\Delta D$ (дБ) по формуле: $A = m\Delta D$ (-дБ)
Дальность реального дефекта	Расстояние до центра дефекта по лучу УПЭК, или дальность ЭО, мм	Расстояние, определяемое произведением скорости распространения ультразвука в ОК на половину задержки эхо-сигнала от реального дефекта: $r = CT/2$ (мм)
Коэффициент затухания ультразвука в материале объекта контроля (ОК)	Обратная величина базовой дальности пробега звукового импульса L_6 , 1/мм	В качестве базовой дальности пробега эхо-сигнала принята дальность ЭО, на которой амплитуда эхо-сигнала ослабевает на 21...23 (-дБ), откуда коэффициент затухания определяется как $\delta = 1/L_6$ (1/мм)
Длина УЗ в материале ОК	Расстояние, мм	Путь пробега волны за период колебаний излучателя звука, равный $\lambda = C/f$ (мм)
Размер пьезоэлемента	Диаметр, мм	Предпочтительным при использовании поперечных волн считаются величины $df \approx 24...30$ мм·МГц, $f = 2...5$ МГц, откуда $d = 6...12$ мм

Безразмерные переменные для математического описания УПЭК

Формулы перехода от размерных величин к безразмерным	Понятия, определения
В среде без затухания звука	
$p = A/Q = m/M = 1,222^{-D}$ $x = r\lambda/d^2 = r/n\lambda = r/L_{np}$ $y = \sqrt{S} / d$ $L_{np} = n\lambda$	Базовая относительная амплитуда эхо-сигнала Относительная дальность ЭО Относительная величина ЭО Предельная дальность УПЭК, мм
В реальных средах	
$q = ngp = 1,122^{-D}$ $u = ngx = \delta r = r/L_6$ $v = ngy = \delta\sqrt{nS} = \sqrt{nS} / L_6$ $z = v / u = y / x = d\sqrt{S} / \lambda r = \sqrt{nS} / r$	Базовая относительная амплитуда эхо-сигнала Базовая относительная дальность ЭО Масштабный размер ЭО Обобщенный комплексный параметр ЭО

Новые безразмерные параметры УПЭК

Параметры УПЭК	Понятия, определения
$n = d^2/\lambda^2$ $g = \delta\lambda = \lambda/L_6$ $ng = n\lambda/L_6 = L_{np}/L_6$	Динамический диапазон активной площади преобразователя Удельное затухание звука или затухание на длине одной волны Доля ослабления УПЭК в идеальной среде от базового затухания 21...23 (-дБ/1) (масштаб ослабления УПЭК)
$q = 10^{-D/20} = e^{-D/8.686} = 1,122^{-D}$	Связи между относительной мерой амплитуды эхо-сигналов и децибельной мерой D (-дБ) (тождественные выражения связи);
$G = \partial q / \partial u$	Ослабление базовой амплитуды эхо-сигналов, вызванное увеличением дальности отражателей (ослабление УПЭК)
$B = \partial q / \partial v$	Прирост базовой амплитуды эхо-сигналов, вызванный приростом размеров ЭО (чувствительность УПЭК)

Промежуточный вывод: пять исходных физических переменных и два параметра заменены двумя совокупностями по три безразмерных переменных для идеальной и реальной сред.



Построение физико-математической модели УПЭК

Вероятностная модель диаграммы направленности поля

Круглый преобразователь с площадью $S_0 = \pi d^2/4$ разбит на элементарные излучатели площадью $\lambda^2/4$, количество которых равно $\pi d^2/\lambda^2 = \pi n$. Каждый такой излучатель имеет круговую диаграмму направленности $\Phi(\varphi) = \cos \varphi$. Поэтому излучение зондирующих импульсов и прием эхо-сигналов в УПЭК описаны как плотности вероятностей событий, состоящих в совместном излучении–приеме сигналов от πn независимых источников в разных направлениях. Распределение этих плотностей вероятности интерпретированы как ДН преобразователя в режиме излучения–приема:

$$\begin{aligned} \Phi^2(\varphi) &= (\cos\varphi)^{2\pi n} = (1+\operatorname{tg}^2\varphi)^{-\pi n} = (1+a^2/r^2)^{-\pi n} = \\ &= (1+nS/\pi nr)^{-\pi n} \approx \exp(-nS/r^2) = \quad (1) \\ &= \exp(-y^2/x^2) = \exp(-v^2/u^2). \end{aligned}$$

При условии, что $\pi n \geq 10^2$, ошибка замены функций не более 0,1 %.

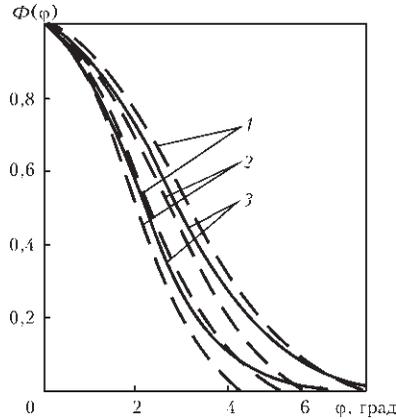


Рис. 1. Сравнение графиков ДН, построенных на разных моделях формирования УПЭК

Углы раскрытия φ для двух диапазонов активной площади преобразователей $n_1 = 60, n_2 = 80$ при различных формулах ДН: 1 – $\Phi^2(\varphi) = (\sin X/X)^2$, 2 – $\Phi^2(\varphi) = \exp(-nS/r^2) = \exp(-y^2/x^2)$ при $X = (kd)\sin\varphi = (\pi d/\lambda)\sin\varphi$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Амплитудно-размерная модель УПЭК в идеальной среде

Таблица 1

Математические модели	Графические модели
<p>Относительная амплитуда эхо-сигнала в УПЭК от ЭО с площадью S на дальности r определяется интегралом:</p> $\begin{aligned} p &= A/Q = \\ &= ik/2\pi \int_S e^{ikr} (\cos\varphi/r) (\cos\varphi)^{2\pi n} \partial S = \\ &= 1/\lambda r \int_S \exp(-nS/r^2) \partial S = \\ &= (r\lambda d^2) [\exp(-nS/r^2)]_0^S = (r\lambda d^2) \times \\ &\quad \times [1 - \exp(-nS/r^2)] = \\ &= x [1 - \exp(-y^2/x^2)]; \quad (2) \end{aligned}$ <ul style="list-style-type: none"> • максимумы: $\partial p/\partial x = 0; p = 0,714x;$ • перегибы: $\partial^2 p/\partial x^2 = 0; p = 0,393x.$ 	<p>Рис. 2. Амплитудная модель УПЭК в идеальной среде</p>
<p>Ослабление амплитуды эхо-сигналов в УПЭК в зависимости от дальности отражателей:</p> $\frac{\partial(\ln p)}{\partial x} = G = -17,37 \left\{ \frac{y^2/x^2}{[\exp(y^2/x^2) - 1] - 0,5} \right\} / x \text{ (дБ/1)} \quad (3)$ <p>с учетом того, что известный предел $\lim_{k \rightarrow 0} [k/(e^k - 1)] = 1$, где $k = y^2/x^2$. Показатель ослабления УПЭК на достаточно больших расстояниях ($x \geq 4$) равен $G = -8,686/x \approx 1,5 \dots 2,0$ –дБ/1.</p>	<p>Рис. 3. Ослабление амплитуды УПЭК от дальности отражателей</p>



Продолжение табл. 1

Равносигнальным силовым линиям УПЭК $p = \text{const}$ на разных дальностях x соответствуют определенные размеры ЭО y , определяемые из амплитудного уравнения (2):

$$y = \pm x \sqrt{-\ln(1 - p/x)}, \quad (4)$$

• конус ближней зоны УПЭК $y = \pm 1,12x$;

• угол раскрытия ближней зоны

$$\text{tg}\varphi = \pm 0,63\lambda / d; \quad (5)$$

• длина ближней зоны УПЭК

$$r_{\text{бли}} = 0,89\sqrt{nS}. \quad (6)$$

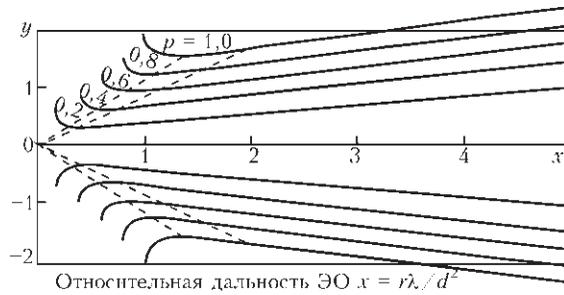


Рис. 4. Размерная модель УПЭК в идеальной среде

Модель чувствительности УПЭК в идеальной среде

Особенности распределения чувствительностей УПЭК по трем независимым переменным

Таблица 2

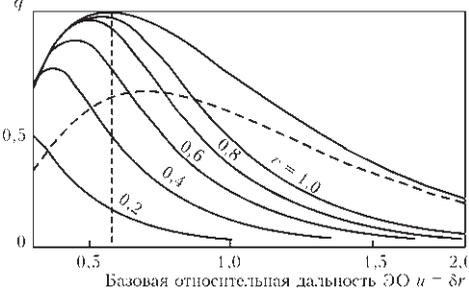
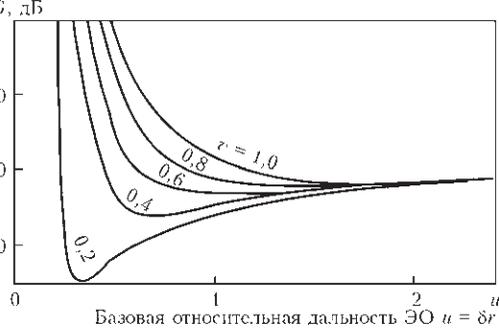
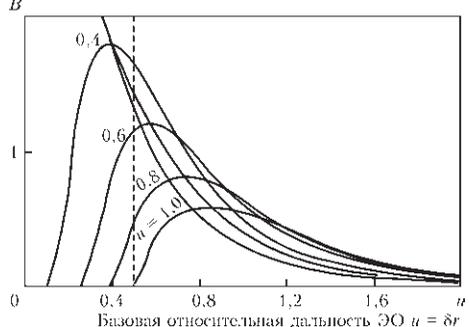
Математические модели	Графические модели
<p>Чувствительность УПЭК к размерам ЭО (основное понятие):</p> $\frac{\partial p}{\partial y} = B = 2(y/x)\exp(-y^2/x^2). \quad (7)$ <p>Изменение чувствительности УПЭК 1-го рода от дальности:</p> $\frac{\partial B_1}{\partial x} = -2(z/x)(1-2z^2)\exp(-z^2).$ <p>Максимум $\frac{\partial B_1}{\partial x}$ соответствует оптимальному значению:</p> $z_{\text{opt}} = y/x = \sqrt{nS} / r = \sqrt{0,5}. \quad (8)$	<p>Рис. 5. Распределение чувствительности УПЭК 1-го рода по дальности отражателей</p>
<p>Изменение чувствительности УПЭК 2-го рода от размеров ЭО для их разных дальностей:</p> $\frac{\partial B_2}{\partial y} = 2(y/x)\exp(-y^2/x^2). \quad (9)$ <p>Условие максимума чувствительности УПЭК 2-го рода к размерам ЭО:</p> $\frac{\partial B_2}{\partial y} = (2/x)(1-2z^2)\exp(-z^2) = 0$ <p>соответствует оптимальному значению: $z_{\text{opt}} = y/x = \sqrt{nS} / r = \sqrt{0,5}$.</p>	<p>Рис. 6. Распределение чувствительности УПЭК 2-го рода по размерам ЭО</p>
<p>Чувствительность УПЭК 3-го рода к размерам ЭО для базовых амплитуд эхо-сигналов:</p> $\frac{\partial B_3}{\partial p} = (1 - p/x)\sqrt{-\ln(1 - p/x)}. \quad (10)$ <p>Условие максимума чувствительности УПЭК 3-го рода к базовым амплитудам эхо-сигналов:</p> $\frac{\partial B_3}{\partial p} = -2\ln(1 - p/x) - 1 = 0,$ <p>что соответствует оптимальному значению:</p> $p_{\text{opt}} = P/Qx = 0,394. \quad (11)$	<p>Рис. 7. Распределение чувствительности УПЭК 3-го рода по амплитудам базовых эхо-сигналов</p>



Развернутая модель УПЭК в реальной среде

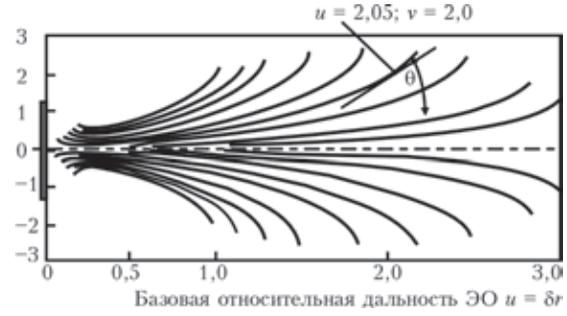
Амплитудная (энергетическая) модель УПЭК

Таблица 3

Математические модели	Графические модели
<p>Ослабление амплитуды эхо-сигнала от преобразователя к дефекту и обратно учитывается множителем $e^{-2\delta r}$:</p> $q = h \exp(-2\delta n g x) [1 - \exp(-v^2/x^2)].$ <p>Максимум огибающей ослабленной УПЭК равен $0,5e^{-1}$, поэтому нормированная по максимуму амплитудная модель УПЭК в реальной среде имеет с введением новых безразмерных переменных следующий вид:</p> $q = 2u \exp(1-2u) [1 - \exp(-v^2/u^2)]. \quad (12)$	 <p>Рис. 8. Амплитудная модель УПЭК в реальной среде</p>
<p>Градиент ослабления амплитуды эхо-сигналов в реальной среде</p> $\frac{\partial q}{\partial u} = G = 2 \exp(1-2u) [1 - 2u - (1-2u + 2v^2/u^2) \exp(v^2/u^2)]. \quad (13)$ <p>Условие минимумов изгибов линий ослабления в ближней зоне УПЭК:</p> $(v^2/u^2) [\exp(v^2/u^2) - 1] = 0,5 - u \quad (14)$ <p>используется для графоаналитического анализа структуры ближней зоны УПЭК (рис. 9). Ослабление УПЭК при $u \geq 2$ стремится к уровню: $G \approx -8,686 (1/u + 2) \approx 20 \dots 22$ -дБ/1.</p>	 <p>Рис. 9. Градиент ослабления амплитуды УПЭК в реальной среде</p>
<p>Перегибы силовых линий УПЭК в точках наилучшего выделения ЭО:</p> $\frac{\partial^2 q}{\partial u^2} = 4(v/u) \exp(1-2u - v^2/u^2). \quad (15)$ <p>Максимум чувствительности УПЭК к выделению полезных сигналов: $\frac{\partial^2 q}{\partial u^2} = u^3 + 0,5u^2 - v^2 = 0$, откуда $v = u_{\text{opt}} \sqrt{u_{\text{opt}} + 0,5}$. (16)</p> <p>Это условие, подставленное в формулу амплитудной модели УПЭК:</p> $q = 2u(e^{1-2u} - e^{0,5-3u}), \quad (17)$ <p>изображено вертикальными штриховыми линиями на рис. 8 и 10.</p>	 <p>Рис. 10. Модель оптимального выделения полезных сигналов в УПЭК</p>

Геометрическая модель УПЭК в реальной среде

Таблица 4

Математические модели	Графические модели
<p>Размерная модель УПЭК образуется из амплитудной модели преобразованием уравнения (12) относительно масштабного размера эквивалентного отражателя v для равносигнальных линий q:</p> $v = \pm u \sqrt{-\ln(1 - qe^{2u-1} / 2u)} \quad (18)$ <p>и выражается графически в виде потока расходящихся упругих равносигнальных силовых линий (рис. 11.)</p>	 <p>Рис. 11. Размерная физико-математическая модель УПЭК в реальной среде</p>



Продолжение табл. 4

На рис. 4 и 11 видно сильное влияние затухания звука на кривизну равносигнальных силовых линий, которые расходятся под сопротивлением среды. В ближней зоне УПЭК наблюдаются минимумы равносигнальных силовых линий, образующие рупор сжатия поля, очерченный штриховой линией на рис. 12. Структура ближней зоны УПЭК исследуется через производную $\partial q/\partial u = 0$ с помощью уравнения (14), рассмотренного далее.

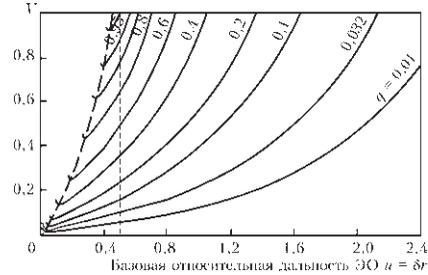


Рис. 12. Фрагмент размерной модели УПЭК в реальной среде

Пределы по дальности для каждой равносигнальной линии УПЭК для заданного уровня q определяются из условия:

$$qe^{2u-1} = 2u. \quad (19)$$

Это уравнение решается наложением прямой $y_1 = 2u$ и кривых:

$$y_2 = 1 - \ln(q/2u), \quad (20)$$

представленных на рис. 13, где сверху вниз:

$q = 0,1; 0,5; 1,0$.

С помощью рис. 11 и 13 строится геометрическая граница УПЭК откладыванием на равносигнальных линиях рис. 11 их пределов по дальности, взятых из рис. 13.

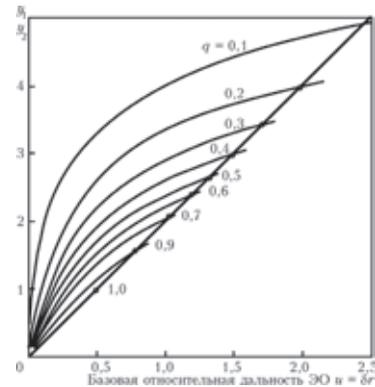


Рис. 13. Пределы по дальности равносигнальных силовых линий УПЭК

Графоаналитические решения уравнений (14) и (16)

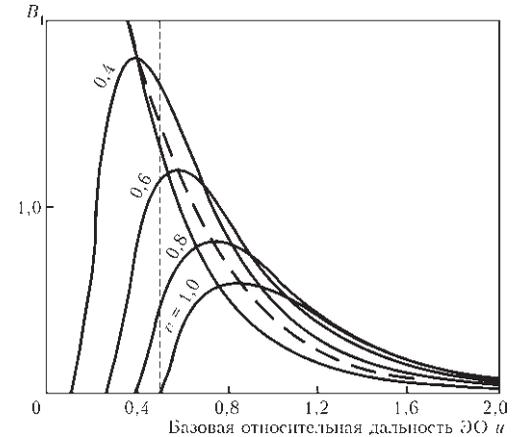
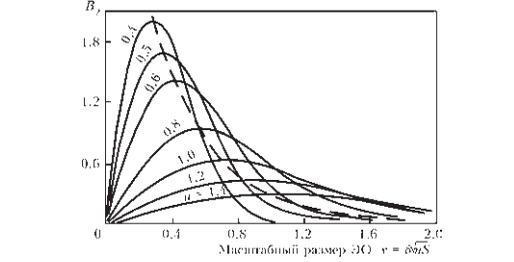
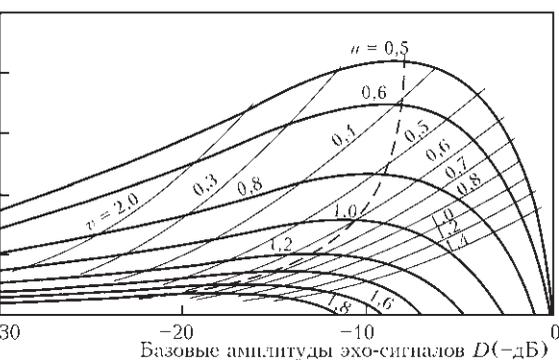
Таблица 5

Математические модели	Графические модели
<p>Уравнение (14) решается графоаналитическим разбиением на два уравнения:</p> $y_1 = 0,5 - u, \quad (21, a)$ $y_2 = z/(e^z - 1), \quad (21, б)$ <p>где уравнение (21, б) заменяется семейством простых линейных уравнений при $v = \text{const}$ (рис. 14): $y_3 = 1,15u/v - 0,5$, исходящих из точки $(0; -0,5)$. Сравнение уравнений (21, а) и (21, б) дает решение в виде $1,15u/v = 1 - u$. (22)</p> <p>Отсюда безразмерная длина ближней зоны</p> $u = v/(1,15 + v); \quad (23)$ <p>размерная длина ближней зоны</p> $r_6 = (1,15 / \sqrt{nS} + \delta)^{-1}. \quad (24)$	<p>Рис. 14. Графическая схема решения уравнения (14)</p>
<p>Условие максимума чувствительности УПЭК (16) преобразуется в уравнение: $\sqrt{nS} = r_{\text{opt}} \sqrt{\delta r_{\text{opt}}} + 0,5$, (25) связывающее между собой обобщенный размер ЭО с оптимальной дальностью при известных начальных условиях: параметре преобразователя $n = d^2/\lambda^2$ и коэффициенте затухания звука δ в материале ОК. Непрямое уравнение (25) графически строится в виде номограммы (рис. 15), которая, при экспериментальном выделении максимальной амплитуды эхо-сигнала от ЭО используется для определения коэффициентов затухания звука в точке пересечения координат обобщенного размера ЭО и оптимальной дальности.</p>	<p>Рис. 15. Номограмма для экспериментального определения коэффициентов затухания звука в УПЭК</p>



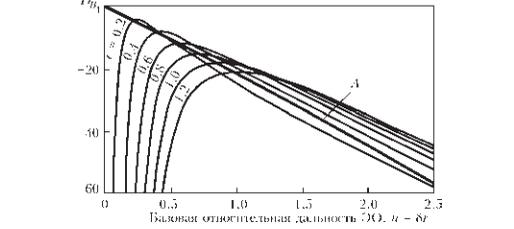
Модели локальной чувствительности УПЭК

Таблица 6

Математические модели	Графические модели
<p>Локальная чувствительность УПЭК на заданных дальностях ЭО:</p> $\partial B_1 / \partial u = -4(v/u)(1/u + 2 - 2v^2/u_3) \times \exp(1 - 2u - v^2/u^2) = 0. \quad (26)$ <p>Условие максимума чувствительности УПЭК 1-го рода на оптимальной дальности отражателя:</p> $u_{opt}^3 + 0,5u_{opt}^2 - v^2 = 0. \quad (27)$ <p>Решение кубического уравнения:</p> $v/u_{opt} = (1/2)^{1/3} \{ [v + (v^2 - 1/54)^{1/2}]^{1/3} + [v - (v^2 - 1/54)^{1/2}]^{1/3} \}, \quad (28)$ <p>где $\sqrt{1/54} < v < u^{3/2}$; $v_{min} = 0,136$.</p> <p>Абсолютный размер минимального отражателя (порог обнаружения):</p> $S_{min} = v_{min}^2 / n\delta^2 \approx (1...2) \text{ мм}^2. \quad (29)$	 <p>Рис. 16. Локальная чувствительность УПЭК 1-го рода на заданных дальностях ЭО</p>
<p>Локальная чувствительность УПЭК 2-го рода к заданным размерам ЭО:</p> $\partial B_2 / \partial v = 4(v/u) \exp(1 - 2u - v^2/u^2). \quad (30)$ <p>Условие максимума чувствительности УПЭК 2-го рода:</p> $\partial^2 B_2 / \partial v^2 = (1 - 2v^2/u^2) = 0.$ <p>Оптимальный размер эквивалентного отражателя в физических единицах измерения:</p> $S_{opt} = 0,5(\lambda r/d)^2 \text{ мм}^2. \quad (31)$	 <p>Рис. 17. Локальная чувствительность УПЭК 2-го рода к заданным размерам ЭО</p>
<p>Локальная чувствительность УПЭК 3-го рода к базовым амплитудам эхо-сигналов:</p> $\partial B_3 / \partial q = (4e^{1-2u})(1 - qe^{2u-1} / 2u) \times \sqrt{-\ln(1 - qe^{2u-1} / 2u)}. \quad (32)$ <p>Условие максимума чувствительности УПЭК 3-го рода:</p> $-\ln(1 - q_k) + 0,5 = 0, \text{ где } q_k = qe^{2u-1} / 2u \quad (33)$ <p>– комплексная базовая амплитуда (КБА).</p> <p>Оптимальная величина комплексной базовой амплитуды эхо-сигнала:</p> $q_k = 1 - e^{-0,5} \approx 0,394. \quad (34)$	 <p>Рис. 18. Локальная чувствительность УПЭК 3-го рода к амплитудам эхо-сигналов</p>

Модели ослабления локальных максимумов чувствительности УПЭК 3-х родов

Таблица 7

Математические модели	Графические модели
<p>Локальные максимумы чувствительности УПЭК 1-го рода для дальностей ЭО:</p> $B_{1max} = 6,6e^{-3u} \sqrt{u + 0,5}. \quad (35)$ <p>Ослабление максимумов чувствительности УПЭК 1-го рода:</p> $\partial(\ln B_{1max}) / \partial u = G_1 = -8,686(6u + 2) / (2u + 1) \text{ -дБ/1}. \quad (36)$ <p>При $u = 0,8...1,2$</p> $G_1 = 23...25 \text{ -дБ/1}.$	 <p>Рис. 19. Ослабление локальных максимумов чувствительности УПЭК 1-го рода (линия А)</p>



Продолжение табл. 7

Локальные максимумы чувствительности УПЭК 2-го рода для размеров ЭО с учетом того, что $v_{opt} = u / \sqrt{2}$:

$$B_{2max} = 4,67e^{-2,83v}. \quad (37)$$

Ослабление максимумов чувствительности УПЭК 2-го рода:

$$\partial(\ln B_{2max}) / \partial v = G_2 = 24,58 \text{ -дБ/1}. \quad (38)$$

Градиент ослабления (затухания) чувствительности УПЭК 2-го рода G_2 – постоянная величина (линия А на рис. 20).

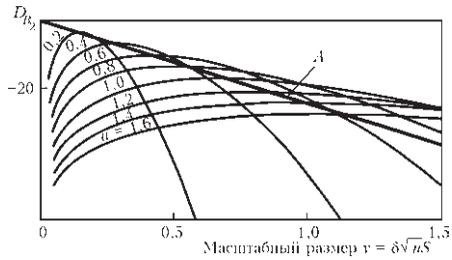


Рис. 20. Ослабление локальных максимумов чувствительности УПЭК 2-го рода

Локальные максимумы чувствительности УПЭК 3-го рода для комплексных базовых амплитуд на разных дальностях при $q_{kmax} = 0,394$:

$$B_{3max} = 4e^{1-2u}(1-q_k) \times \sqrt{-\ln(1-q_k)} = 4,66e^{-2u}.$$

Ослабление максимумов чувствительности УПЭК 3-го рода:

$$\partial(B_{3max}) / \partial u = G_3 = 17,38, \text{ -дБ/1}. \quad (39)$$

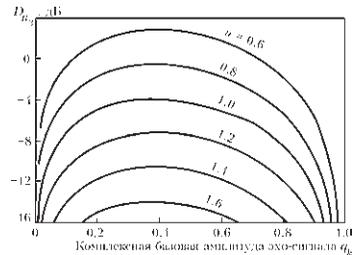


Рис. 21. Ослабление локальных максимумов чувствительности УПЭК 3-го рода

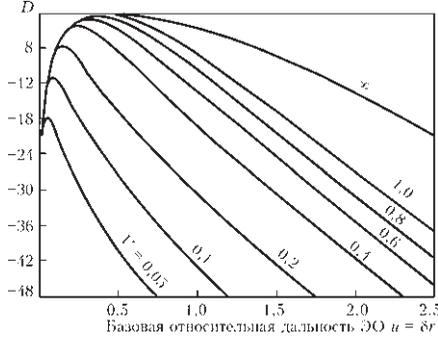
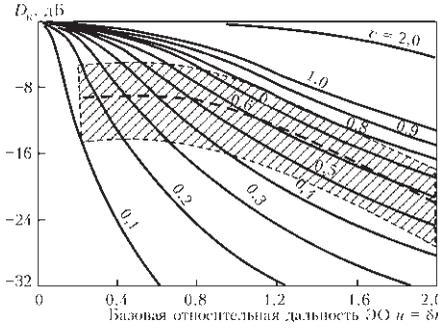
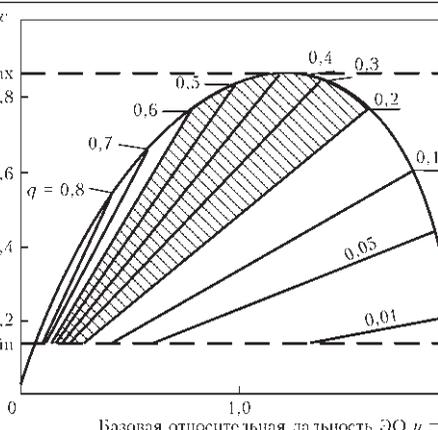
Комплексные чувствительности УПЭК 3-х родов для решения трех основных задач дефектометрии

Таблица 8

Задачи УЭА дефектометрии	Схемы решения задачи
<p>Условие максимума амплитуды эхо-сигнала от ЭО решает задачу оптимального стробирования эхо-сигналов с помощью корня кубического уравнения (28) для фиксированных размеров эквивалентных отражателей:</p> $v/u_{opt} = (1/2)^{1/3} \{ [v+(v^2-1/54)^{1/2}]^{1/3} + [v-(v^2-1/54)^{1/2}]^{1/3} \}.$ <p>Штриховыми линиями выделены оптимальные ширины стробов с чувствительностью на 10 % ниже максимума B_1.</p>	<p>Рис. 22. Обобщенная номограмма для оптимального выделения эхо-сигналов</p>
<p>Чувствительность УПЭК 2-го рода влияет на погрешность измерения размеров отражателей через шаги дискретности измерения амплитуды эхо-сигналов $\Delta q = 1,122^{-\Delta D}$: $\Delta z = 0,5(1-\Delta q^m) = 0,5(1-1,122^{-\Delta D m})$. При нормированной обобщенной чувствительности УПЭК 2-го рода в виде: $B_{2n} = 2,33z \exp(-z^2)$ получены следующие зависимости погрешностей $\Delta z = f(\Delta D)$ при $m = 1$:</p>	<p>Рис. 23. Обобщенная чувствительность УПЭК 2-го рода для определения точности измерения размеров ЭО</p>
<p>Измерение комплексной базовой амплитуды эхо-сигнала проводится с целью получения максимума чувствительности УПЭК 3-го рода по формуле:</p> $B_{3n} = 2,33(1-q_k) \sqrt{-\ln(1-q_k)} \text{ при } 1-q_k = 0,606.$ <p>Благодаря этому повышается достоверность результатов определения размеров ЭО в условиях ручного сканирования объекта контроля.</p>	<p>Рис. 24. Обобщенная нормированная чувствительность УПЭК 3-го рода</p>

Развитие видов АРД-диаграмм

Таблица 9.

Математические модели	Графические модели
<p>Теоретическая АРД-диаграмма (номограмма):</p> $D = 17,37 \{1 + \ln u - 2u + \ln[1 - \exp(-v^2/u^2)]\} \text{ (-дБ)}. \quad (40)$ <p>Равноразмерные линии диаграммы в диапазонах: $0,6 \leq v \leq 1,2$ и $1 \leq u \leq 2,5$ в логарифмическом масштабе имеют незначительную кривизну, что позволяет аппроксимировать их наклонными прямыми:</p> $D = 12 - \gamma T \text{ (-дБ)},$ <p>где γ – коэффициент затухания, дБ/мкс.</p>	 <p>Рис. 25. Теоретическая АРД-диаграмма (номограмма)</p>
<p>Экспериментально-теоретическая АРД-диаграмма по уравнению:</p> $1 - \exp(-v^2/u^2) = qe^{2u-1}/2u = q_k. \quad (41)$ <p>Левая сторона уравнения – теоретическая (-дБ). Правая сторона рассчитывается как комплексная базовая амплитуда D_k (-дБ) с дальностью u в заштрихованной области АРД-диаграммы при условиях:</p> $q_b = 1,1ue^{-2u} \text{ и } q_n = 3,3ue^{-2u}$ <p>для чувствительности УПЭК 3-го рода на уровне 0,9.</p>	 <p>Рис. 26. Экспериментально-теоретическая АРД-диаграмма</p>
<p>Универсальная АРД-диаграмма в виде прямо-угольной сетки, в пределах которой решается обратная задача УЗК:</p> $v = u\sqrt{-\ln(1 - q_k)}, \quad (42)$ <p>где $q_k = 1,122^{-D}e^{2u-1}/2u$ с линейно-графическим преобразованием в семейство наклонных прямых в границах УПЭК.</p> <p>Между прямыми $q_k = 0,2$ и $q_k = 0,6$ – область чувствительности УПЭК 3-го рода на уровне 0,9 (заштрихована на рис. 27).</p> <p>Уравнение границы УПЭК с приведенной чувствительностью $C = 0,5$</p> $v = u\sqrt{-\ln(Cu)}. \quad (43)$	 <p>Рис. 27. Универсальная АРД-диаграмма в виде прямоугольной сетки $v - u$</p>

Выводы

Математическая модель УПЭК построена на основе законов лучевой акустики тракта, вероятностной обратимой модели диаграммы направленности преобразователя и идеальной модели «эквивалентного» отражателя (ЭО).

Шесть безразмерных переменных, адекватно описывающих модель УПЭК, разделены для сред без затухания и для сред с затуханием звука, между которыми установлена связь через коэффициент ng , выражающий масштаб ослабления УПЭК в реальной среде по сравнению с идеальной средой.

Установлено, что ослабление УПЭК от дальности отражателей в идеальной среде составляет 1,5...2,0 -дБ/1, а в реальной среде ослабление звука на базовой единице дальности составляет 21...23 -дБ/1, т. е. на ≈ 20 -дБ сильнее из-за совместного влияния расширения фронта импульса и затухания звука.

Исследована динамика чувствительности УПЭК, которая зависит не только от величины переменных, но и от характера взаимосвязи между ними, которая формирует локальные колоколообразные формы огибающих чувствительностей УПЭК 3-х родов с постоянными максимумами в идеальной среде и с ослабевающими максимумами в реальной среде.



Ширины локальных колоколообразных форм огибающих чувствительностей УПЭК 3-х родов на фиксированных уровнях от их максимумов при данной дискретности измерения амплитуды эхо-сигналов используются для оценки погрешностей выделения, измерения и снятия размеров эквивалентных отражателей.

Установлен основной измеряемый параметр УЭА-дефектометрии в виде комплексной базовой амплитуды эхо-сигналов (аналог современной временной регулировки чувствительности), имеющей оптимальное значение $q_{\text{копт}} \approx 0,4$ для максимальной чувствительности УПЭК 3-го рода.

В целом предложенная теория УПЭК себя не исчерпала и может быть продолжена в других

практических направлениях УЭА-дефектометрии на основе дальнейшего физико-математического анализа исходных моделей.

1. Давиденко В. Ф. Об элементарной неволновой теории поля ультразвуковых преобразователей для импульсно-амплитудной дефектометрии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 3. – С. 29–36.
2. Давиденко В. Ф. Новые представления о чувствительности поля – новые возможности повышения точности ультразвуковой эхо-амплитудной дефектометрии // Там же. – 2011. – № 3. – С. 28–34.
3. Davidenko V. F. The metrologic fundamentals of Ultrasonic Echo-Amplitude (UEA) defectometry // Int. J. Microstructure and Properties. – 2013. – 8, № 3. – P. 207–224.
4. Davidenko V. F. Principles of elementary non-wave theory of field of ultrasonic transducers used for pulse-amplitude defectometry // Int. J. Materials and Product Technology. – 2006. – 27, № 3/4. – P. 173–187.

Graphic-analytical study of energy and geometrical properties of the model of ultrasonic field of echo-channel (UFEC) has been performed, which was successful owing to a relatively simple functional link between three dimensionless variables, allowing for all the initial physical quantities (p, x, y), separately for media with and without sound attenuation (q, u, v). Derived mathematical equations of UFEC models for ideal and real media are of parametric nature, allowing solution of the direct and inverse problems of defectometry. A most important correction in UFEC equations, allowing for field directional pattern was made for the first time. New units for measurement of base parameters of echo-signal amplitude, reflector distance and sound attenuation were introduced. Partial derivatives of echo-signal amplitude by the equivalent reflector size were used for the first time as the measure of UFEC sensitivity – $\partial q/\partial v = B$, and by the distance to reflector as a measure of UFEC attenuation – $\partial q/\partial u = G$. Condition of accuracy of ultrasonic echo-amplitude (UEA)-defectometry was defined as maximizing the sensitivity of three kinds: $\partial B/\partial u$, $\partial B/\partial v$ and $\partial B/\partial q$, ensuring optimum separation of useful echo-signals, maximum accurate measurement of dimensions of equivalent reflectors and taking the most valid results of defectometry at manual scanning of the object of control. Local sensitivity of three kinds was detected for the first time, which is expressed in the extreme nature of change of their values. An interrelation was established between the discreteness of measurement of basic amplitude of echo-signals and width of envelopes of three kinds of sensitivities, characterizing UEA-defectometry operation errors. The main measured parameter of UEA-defectometry was established, the analog of which can be regarded to be modern time adjustment of sensitivity; and possible variants of ADD diagrams for practical UEA-defectometry were substantiated. 4 References, 9 Tables, 27 Figures.

Keywords: ultrasonic field of echo-channel, ultrasonic echo-amplitude defectometry, sensitivity of three kinds, basic amplitude of echo-signal, basic distance to reflector, equivalent reflector, complex basic amplitude, generalized size of equivalent reflector

Поступила в редакцию
03.02.2014

НОВАЯ КНИГА

Институт электросваривания імені Є. О. Патона: 80 років / Ред. кол. Б. Є. Патон (голова) та ін. – К.: Академперіодика, 2014. – 400 с.

В сборнике представлены научно-информационные материалы, посвященные основным направлениям развития научно-технической и производственной деятельности Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины на протяжении 80 лет его существования. Освещены основные вехи создания, становления и развития института. Отображены научные достижения в области сварки и родственных технологий, сотрудничество с промышленными предприятиями, международная деятельность. Представлена современная структура института и основные направления исследований и их внедрение в производство.

Рассчитан на широкий круг ученых, преподавателей, аспирантов, студентов вузов, а также исследователей истории развития технических наук.

