

И.Н. ЕРМОЛОВ, А.Х. ВОПИЛКИН, В.Г. БАДАЛЯН

# РАСЧЕТЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

(КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК)



Издано ООО НПЦ НК «ЭХО+»

Москва – 2004

**И.Н. ЕРМОЛОВ, А.Х. ВОПИЛКИН, В.Г. БАДАЛЯН**

# **РАСЧЕТЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

**(КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК)**

**Издано ООО НПЦ НК «ЭХО+»**

**Москва – 2004**

**Ермолов Игорь Николаевич**, профессор, доктор технических наук  
**Вопилкин Алексей Харитонович**, профессор, доктор технических наук  
**Бадалян Владимир Григорьевич**, кандидат физико-математических наук

НПЦ «ЭХО+» М.: 2004 г.

В справочнике приведены формулы, таблицы и графики, позволяющие выполнять инженерные расчеты при разработке методик ультразвукового контроля и при проектировании преобразователей.

© Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х.,  
Бадалян В.Г., 2004 г.

## Введение

Справочник предназначен для специалистов по ультразвуковому контролю, имеющих квалификацию не ниже второго уровня (инженеров, научных работников и специалистов-практиков), разрабатывающих методики контроля и преобразователи. Собранные в книге формулы, графики и таблицы помогут выполнять несложные расчеты. Определения понятий, выводы формул и сложные формулы не даются. Их можно найти в литературе [3, 5]. В то же время преследовалась цель последовательного, логичного изложения материала.

Основное внимание уделено физическим вопросам контроля. Характеристики приборов и методики контроля конкретных изделий можно найти в [1, 3, 4, 6]. Из методов подробно рассмотрен эхометод, поскольку он находит наибольшее применение. О других методах — см. в [3 - 6]. Контролируемый материал — прежде всего углеродистая сталь. Некоторые сведения приводятся также для алюминия или дюралюмина.

Использование формул и графиков поясняют примеры, в которых свойства веществ взяты из таблиц справочника. Если свойства даны с разбросом, применяются средние значения. Приведен список обозначений и сокращений, встречающихся неоднократно.

Величины выражены СИ. В пространственно-временных задачах применяются более удобные производные единицы: для времени — мкс, для частоты — МГц, для расстояний — мм.

Прототипом данной книги является справочник [2]. В данном издании исправлены замеченные ошибки, изменены неудачные фрагменты, исключены материалы, не нашедшие практического применения и введены некоторые дополнительные материалы, например, по измерению коэффициента затухания, расчету амплитуд эхосигналов от угловых отражателей, измерению координат дефектов, акустической голографии.

Авторы благодарны всем сделавшим замечания и предложения по книге [2] и надеются получить предложения по улучшению данной книги. Авторы особенно благодарны доктору технических наук В. Н. Данилову. Без его блестящих теоретических работ невозможно было написание многих фрагментов справочника.

Главы 1 - 7 написаны И. Н. Ермоловым, глава 8 - В. Г. Бадалянном и А. Х. Вовпилкиным.



## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- АРД диаграмма – графическое изображение зависимости амплитуды сигнала от расстояния до дефекта и его диаметра
- K1, K2 (другое обозначение V1, V2) – международные стандартные образцы
- ОК – объект контроля
- РС – раздельно-совмещенный (преобразователь)
- СО – стандартный образец
- ПЭВМ – портативная ЭВМ
- ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь
- ЭВМ – электронная вычислительная машина
- ЭМА – электромагнитно-акустический (преобразователь)
- УЗ – ультразвук, ультразвуковой
- УЗД – УЗ дефектоскопия
- $a, A$  – изменяющаяся при колебаниях величина и ее амплитуда
- $a$  – радиус пьезоэлемента преобразователя
- $A$  – коэффициент вида дефекта
- $b$  – радиус или полуширина отражателя
- $c$  – скорость звука
- $C$  – емкость пьезоэлемента
- $d$  – диаметр отражателя (диска, сферы, цилиндра)
- $D$  – коэффициент прозрачности, диаметр преобразователя
- $\bar{D}$  – средний размер кристаллитов
- $e$  – пьезоконстанта
- $E$  – напряженность электрического поля
- $f$  – частота колебаний
- $F$  – фокальное расстояние
- $G$  – коэффициент, характеризующий угловой эффект
- $h$  – глубина углового отражателя (риски, зарубки)
- расстояние от отражателя до поверхности ввода
- толщина пьезопластины, слоя
- $H$  – толщина стенки ОК
- $I$  – функция поля преобразователя
- $J$  – интенсивность акустической волны
- $J_0, (J_1)$  – функция Бесселя нулевого (первого) порядка
- $k$  – волновое число
- $K$  – коэффициент двойного преобразования
- $l$  – индекс для продольной волны
- $L$  – размер пьезоэлемента преобразователя
- $n$  – число периодов колебаний в импульсе
- коэффициент раскрытия диаграммы направленности
- коэффициент преломления
- $N$  – протяженность ближней зоны

- $O$  – точка выхода (ввода)  
 $p, P$  – акустическое давление и его амплитудное значение  
 $Q$  – добротность колебательной системы  
 $r$  – расстояние  
 $R$  – коэффициент отражения  
     – радиус кривизны поверхности  
 $s$  – площадь плоского отражателя,  
     – индекс для поверхностной волны  
 $S$  – площадь пьезоэлемента преобразователя  
 $t$  – время, температура  
     – индекс для поперечной волны  
 $tg\delta$  – тангенс угла потерь  
 $T$  – период колебаний  
 $u, U$  – смещение частиц при колебании и амплитуда смещения  
 $x$  – расстояние вдоль оси прямого преобразователя  
 $x, y$  – координаты отражателя  
 $X, Z$  – координаты преобразователя на поверхности ОК  
 $X$  – аргумент функции  
 $z$  – удельное волновое сопротивление (характеристический импеданс)  
 $Z$  – комплексное электрическое сопротивление  
 $\alpha$  – угол ввода  
 $\beta$  – угол падения, угол призмы  
     – коэффициент электромеханической связи  
 $\gamma$  – угол отражения  
 $\delta$  – коэффициент затухания  
 $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная  
 $\theta$  – угол между направлением волны и нормалью к поверхности  
     – угол между осью и лучом диаграммы направленности  
 $\lambda$  – длина волны  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона  
 $\rho$  – плотность материала  
 $\tau$  – длительность импульса  
 $\varphi$  – угол падения на донную поверхность ОК  
     – дифракционное ослабление донного сигнала  
 $\omega$  – круговая (циклическая) частота  
 $\langle \rangle$  – относительная величина, выраженная в децибелах

# 1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

## 1.1. Волны и импульсы

В УЗ дефектоскопии обычно применяют частоты от 0,5 до 15 МГц (длина продольной волны в стали 0,4...12 мм) и амплитудой смещения  $10^{-11} \dots 10^{-4}$  мм. В качестве изменяющейся при колебаниях величины используем смещение частиц из положения равновесия  $u$  и акустическое давление  $p$  (для жидких сред и условно также для твердых сред). Акустическое напряжение (замещающее акустическое давление для твердой среды), возникающее в стали на частоте 2 МГц –  $10 \dots 10^8$  Па. Интенсивность волн равна

$$J = P^2 / (2\rho c) = 0,5 \rho c \omega^2 U^2.$$

$U$  и  $P$  – амплитудные значения смещения и давления. Интенсивность используемых при контроле волн весьма мала: менее  $10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup> в месте излучения УЗ. При контроле регистрируют не интенсивность, а амплитуду волн.

Обычно измеряют ослабление амплитуды  $A'$  относительно амплитуды возбужденных в ОК колебаний (зондирующего импульса)  $A_0$ . Для этого применяют логарифмические единицы – децибелы (дБ). Выражения в дБ (когда это нужно подчеркнуть) будем выделять угловыми скобками  $\langle \rangle$ :

$$\langle A'/A_0 \rangle = 20 \lg A'/A_0. \quad (1.1)$$

Поскольку  $A' < A_0$ , получаются отрицательные дБ, однако в УЗ дефектоскопии знак минус принято опускать. На рис. 1.1 приведена номограмма перевода относительных единиц в дБ и обратно.

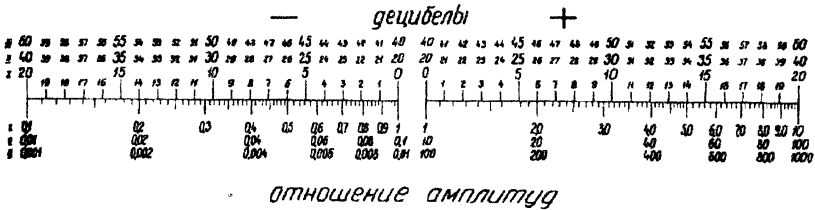


Рис. 1.1. Шкалы перевода относительных величин в децибелы. Парно используют шкалы I-I', II-II', III-III'.

### Пример 1.1.

Как отношение амплитуд  $A'/A_0 = 0,045$  выражается в дБ?

Находим деление 0,045 на нижней шкале II' (рис. 1.1). Против него на верхней шкале II находим:  $\langle A'/A_0 \rangle = 26,9$  дБ со знаком минус, но его не указываем.

В УЗД применяют не непрерывные колебания, а радиочастотные импульсы. Форма их близка к колоколообразной. Такой импульс, соответствующий плоской волне распространяющейся вдоль оси  $x$ , описывается формулой

$$a = A \exp \left\{ - \left[ \gamma^2 \omega^2 (t - t_0)^2 \right] + j \omega (t - t_0) \right\}$$

Здесь  $t_0$  – время, соответствующее максимуму амплитуды,  $\gamma$  – показатель длительности импульса. Иногда вместо него применяют число  $n$  колебаний с амплитудами, превышающими 0,1 (20 дБ) от максимального значения:

$$n = 0,483\gamma. \quad (1.2)$$

Пример 1.2.

Импульс состоит из четырех периодов колебаний; найти  $\gamma$ .

Из формулы (1.2) находим:

$$\gamma = 0,483 / n = 0,483 / 4 = 0,12.$$

Величину  $\tau = nT$  называют длительностью импульса, а  $c\tau$  – его пространственной длительностью. В дальнейшем используются понятия тонкого слоя и протяженной среды. Среду называют протяженной, если путь импульса в ней больше  $c\tau$ . Среду, толщина которой  $h < c\tau/2$ , называют тонким слоем. В нем происходит интерференция в результате многократного отражения импульса от границ слоя.

### 1.2. Типы волн

Для контроля применяют разные типы (моды) волн, отличающиеся направлением колебаний частиц, скоростью распространения и другими признаками (табл. 1.1). В таблице указан самый доступный способ возбуждения многих типов волн: наклонным преобразователем за счет трансформации на границе призма – ОК первоначально возбуждаемой продольной волны. Волны всех типов возбуждает ЭМА преобразователь.

Скорости волн различных типов в табл. 1.1 выражены через скорость продольной волны  $c_l$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ , который связан с отношением скоростей поперечной  $c_t$  и продольной  $c_l$  волн:

$$\nu = \frac{0,5 - (c_t/c_l)^2}{1 - (c_t/c_l)^2}, \quad (1.4)$$

Поперечные волны, распространяющиеся наклонно к какой-либо поверхности (например, поверхности ввода), разделяют на волны с направлением колебаний, параллельным этой поверхности (их называют горизонтально поляризованными, *SH*, *TH*) и волны с направлением колебаний перпендикулярным этой поверхности (их называют вертикально поляризованными, *SV*, *TV*). Они по-разному отражаются от поверхностей и структурных неоднородностей.

Амплитуда рэлеевской поверхностной волны имеет максимум на поверхности и уменьшается в 10 раз на глубине около  $\lambda_s$  – длины поверхностной волны. Это видно по кривой ослабления сквозного сигнала 1 на рис. 1.2. Осцилляции отраженного сигнала 2 объясняются интерференцией сигналов, отраженных от грани и кончика риски. Рэлеевская волна распространяется на большие расстояния (порядка 1 м), следуя изгибам поверхности, как бы "облизывая" ее. На выпуклой поверхности скорость ее немного увеличивается, а на вогнутой – уменьшается, но одновременно растет затухание.

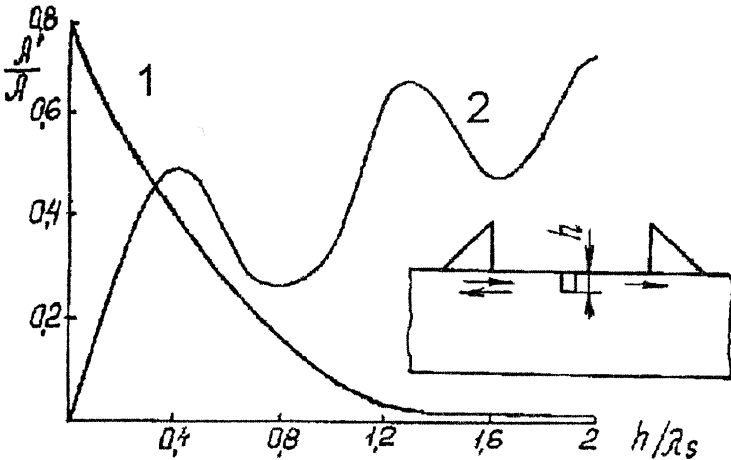


Рис. 1.2. Амплитуды эхо- (2) и теневого (1) сигналов рэлеевских волн в зависимости от глубины риски  $h$  (в длинах волн  $\lambda_s$ ).

Головную волну можно представить как идущий от излучателя пучок лучей продольных волн. Максимальную амплитуду имеет луч под углом скольжения (угол к поверхности)  $12...15^\circ$ . Амплитуда луча, идущего вдоль поверхности, очень мала. Волна быстро убывает с расстоянием вследствие порождения поперечной волны, распространяющейся под углом, равным третьему критическому. Достигая нижней поверхности ОК, поперечная волна возбуждает там головную волну, которую также используют для контроля.

В соответствии с этим изменяется чувствительность к дефектам (рис. 1.3,в). Головная волна практически не чувствительна к неровностям поверхности и поверхностным дефектам глубиной  $0,5$  мм и менее. Она имеет максимум чувствительности на глубине  $4 \dots 10$  мм в зависимости от расстояния  $l$  от преобразователя ( $l = -10 \dots +50$  мм, знак минус означает, что передняя грань преобразователя находится левее отражателя). Используются излучатель и приемник, расположенные один за другим (схема тандем, рис. 1.3,а). Схема с преобразователями, расположенными рядом (дуэт, рис. 1.3,б) обеспечивает лучшую чувствительность в узкой области вблизи точки пересечения центральных лучей излучателя и приемника.

Таблица 1.1.

Типы волн в твердом теле		Скорость	Способ возбуждения	Основное применение
Среда	Тип, название	Характеристика колебаний	Скорость	Основное применение
Безрабочное твердое тело	Продольная	В направлении распространения	$c_l$	Прямые или наклонные ПЭП с $\beta < \beta'$
	Поперечная	Перпендикулярно направлению распространения	$c_t = c_l \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \approx 0,55c_l$	Дефектоскопия сварных соединений
	Поверхностная (Рэлея)	Эллиптические у поверхности	$c_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1+\nu} c_l \approx 0,93c_l \approx 0,51c_l$	Контроль на поверхности
Головная	То же; порождает поперечную	$c_l$	Наклонным ПЭП с $\beta = \beta'$	Контроль под поверхностью
Пластина толщиной h	Нормальная в пластине	Изгиб со сдвигом	$c_{ps0} \rightarrow 0$ при $h/\lambda \rightarrow 0$	Контроль листов и труб толщиной до 3...5 мм
	(Лэмба)	Продольные с изменением поперечных размеров	$c_{ps0} = \frac{\sqrt{1-2\nu}}{1-\nu} \approx 0,9c_l$ при $h/\lambda \ll 1$	Наклонным ПЭП с углом, рассчитанным по
Стержень диаметром d	Нормальная в стержневой	Изгиб со сдвигом	$c_{bs0} \rightarrow 0$ при $d/\lambda \rightarrow 0$	Контроль проволоки, стержней, рельсов
	Стержневая	Продольные с изменением поперечных размеров	$c_{bs0} = c_l \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}} \approx 0,86c_l$ при $d/\lambda \ll 1$	дисперсионным кривым

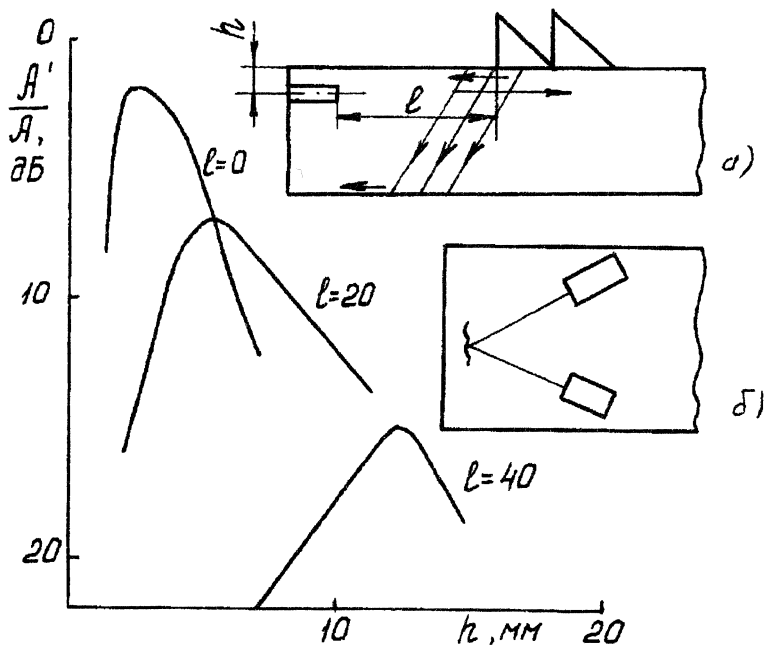


Рис. 1.3. Возбуждение и прием головной волны по схемам тандем (а) и дуэт (б). Отражение (для схемы тандем) от плоскодонного отверстия в зависимости от глубины залегания (в).

При распространении волн в пластинах колебания охватывают все сечение. Разные моды этих волн отличаются распределением колебаний по толщине. Имеются узловые плоскости, где напряжения равны нулю и совпадающие с ними дефекты типа расслоений выявляются плохо.

Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн не зависят от частоты. Скорости волн в пластинах и стержнях зависят от отношения толщины ОК к длине волны (дисперсия скоростей). На рис. 1.5 приведена система дисперсионных кривых для фазовых скоростей волн в пластинах. Сплошные кривые – для антисимметричных мод (а), а штриховые – симметричных (s). Нулевые моды переходят при увеличении толщины в поверхностную волну, остальные – в поперечную. Фазовые скорости позволяют рассчитать длину волны  $\lambda_p = c_p / f$  и определяют условия возбуждения волны.

#### Пример 1.3

Найти углы наклона призмы (оргстекло,  $c_n = 2,7 \text{ мм/мкс}$ ) преобразователя для возбуждения всех возможных мод волн в листе из стали толщиной 1 мм на частоте 2,5 МГц.

По формуле (1.4) найдем коэффициент Пуассона

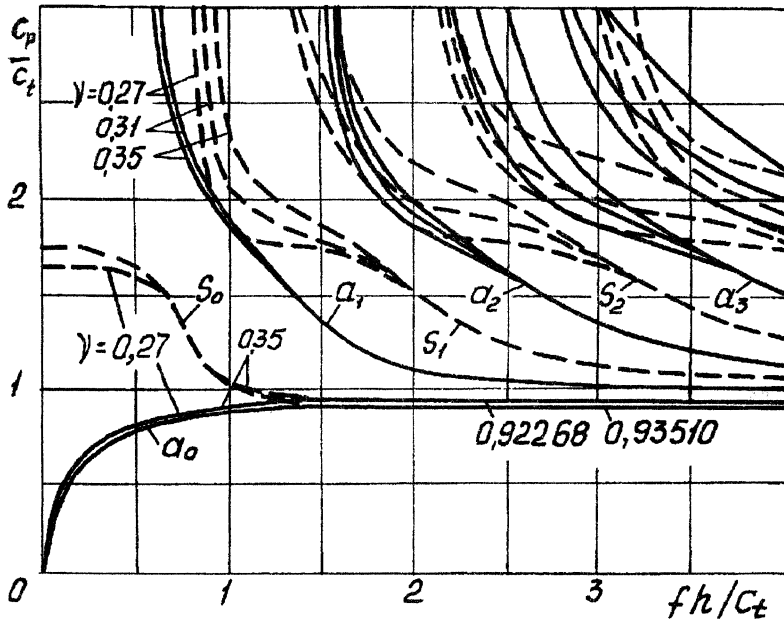


Рис. 1.5. Дисперсия фазовых скоростей волн в пластинах.

$$\nu = \frac{0,5 - (3,23 / 5,92)^2}{1 - (3,23 / 5,92)^2} = 0,288$$

Кривые для  $\nu = 0,29$  лежат между кривыми с  $\nu = 0,27$  и  $\nu = 0,31$  на рис. 1.5. Значение параметра, отложенного на оси абсцисс:

$$fh/c_t = 2,5 \cdot 1/3,23 = 0,774.$$

Этому значению соответствуют три моды. Для каждой из них находим сначала  $c_p/c_t$ , затем  $c_p$ , потом по формуле  $\beta = \arcsin c_p/c_n$  угол призмы  $\beta$ :

Моды	$c_p/c_t$	$c_p$ , мм/мкс	$\beta$ , °
Нулевая антисимметричная	0,85	2,76	76,2
Нулевая симметричная	1,5	4,85	33,8
Первая антисимметричная	2,4	7,75	20,4

Скорость распространения импульса вдоль пластины определяет групповая скорость  $c_g$ , которая связана с  $c_p$  формулой:

$$\frac{1}{c_g} = \frac{1}{c_p} - \frac{f}{c_p^2} \cdot \frac{dc_p}{df}.$$

При  $fh/c_t \rightarrow 0$  для моды  $s_0$  величина  $dc_p/df = 0$  и  $c_g = c_p$ . В табл. 1.1 для тонких пластины и стержня приведены скорости именно этих мод.



## 2. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕД

### 2.1. Скорость звука

Скорости распространения продольных  $c_l$  и поперечных  $c_t$  волн, плотность  $\rho$ , а также удельное волновое сопротивление для продольных волн  $z_l = \rho c_l$  в некоторых материалах приведены в табл. 2.1. Таблица составлена по литературным источникам на основе наиболее точных и достоверных измерений. У сплавов и иных веществ с переменным составом указаны пределы изменения акустических свойств.

Изменение скорости  $c$  с температурой  $t$  определяет формула

$$c = c_0 + K_c(t - t_0),$$

где  $c_0$  – скорость при исходной температуре  $t_0$ . Температурный коэффициент скорости  $K_c$  у газов положительный (у воздуха  $+0,6\text{ м/с}\cdot\text{град}$ ), у жидкостей отрицательный (например, у спирта  $-7$ ), однако у воды аномальный ( $+2,5$ ), у твердых тел – отрицательный (для продольных и поперечных волн в металлах  $-0,4\dots -1$ , у органического стекла  $-3$ ).

### 2.2. Затухание

Затухание волн при распространении определяют через коэффициент затухания  $\delta$ , входящий в формулу

$$A = A_0 e^{-\delta r},$$

где  $A$  – амплитуда в точке измерения,  $r$  – расстояние, проходимое волной,  $A_0$  – амплитуда волны, прошедшей это расстояние, без учета затухания. Реже используется механическая добротность  $Q_M$ , которая связана с  $\delta$ :

$$\delta = \pi / \lambda Q_M.$$

Измеряют  $\delta$  в 1/м. Чтобы подчеркнуть, что он входит в показатель степени числа Непера  $e = 2,7183\dots$ , часто пишут Нп/м или Нп/мм. Когда отношение амплитуд измеряют в децибелах, пользуются  $\langle \delta \rangle$  в дБ/мм:

$$\langle \delta \rangle = 20 \delta \cdot \lg e = 8,686 \delta \quad (2.1)$$

Тогда  $\langle A/A_0 \rangle = \langle \delta \rangle r$ .

Для жидкостей и газов  $\delta$  пропорционально квадрату частоты

$$\delta = \delta' f^2.$$

Значения  $\delta'$  для некоторых веществ указаны в табл. 2.2. Там же приведен температурный коэффициент  $K_\delta$  для вычисления изменения коэффициента затухания с температурой по формуле:

$$\delta = \delta_0 [1 + K_\delta(t - t_0)],$$

где  $\delta_0$  – коэффициент затухания при исходной температуре  $t_0$ .

Для твердых материалов коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\delta = \delta_n + \delta_p.$$

Коэффициент  $\delta_n$  чаще всего пропорционален частоте: отношение  $\delta_n/f$  равно для продольных волн для стали 0,1...1,5 Нп/МГц·м; для алюминия 0,05...0,06; для магния 0,1.

Коэффициент  $\delta_p = 0$  для аморфных веществ (стекло, однородные пластмассы). Для поликристаллических веществ (в том числе металлов)  $\delta_p$  увеличивается с ростом упругой анизотропии, среднего размера кристаллитов  $\bar{D}$  и частоты:  $\delta \sim f^n$  ( $n = 2 \dots 4$ ). В области  $\lambda/\bar{D} = 4 \dots 10$  значение  $\delta_p \sim \bar{D}f^2$ , а при  $\lambda > 10\bar{D}$  значение  $\delta_p \sim \bar{D}^3 f^4$ . Например, в этой области в малоуглеродистой стали для продольных и поперечных волн:

$$\delta_l = 0,12f + 20\bar{D}^3 f^4; \quad (2.2)$$

$$\delta_t = 0,1f + 105\bar{D}^3 f^4. \quad (2.3)$$

Здесь  $\bar{D}$  – в мм,  $f$  – в МГц,  $\delta$  – в Нп/м.

Значения коэффициентов затухания в зависимости от частоты для железа с очень малым содержанием углерода приведено на графике рис. 2.1, а для волн в жидкости и продольных волн в некоторых твердых телах на частоте 2,5 МГц – в табл. 2.1. Используя приведенные выше закономерности, по этим значениям можно приближенно рассчитать коэффициенты затухания для других частот.

#### Пример 2.1.

Рассчитать коэффициент затухания для железа со средней величиной зерна 0,05 мм на частоте 5 МГц.

Согласно формулам (2.2) и (2.3)

$$\delta_l = 0,12 \cdot 5 + 20 \cdot 0,05^3 \cdot 5^4 = 2,16 \text{ Нп/м} = 0,00216 \text{ Нп/мм};$$

$$\delta_t = 0,1 \cdot 5 + 105 \cdot 0,05^3 \cdot 5^4 = 8,7 \text{ Нп/м} = 0,0087 \text{ Нп/мм}.$$

Значение  $\delta_t$  совпадает с найденным по рис. 2.1 (верхняя штриховая кривая). Значение  $\delta_t$  по рисунку определить невозможно в виду мелкости масштаба.

#### Пример 2.2.

Определить коэффициент затухания в Нп/мм в органическом стекле на частоте  $f = 7$  МГц.

Согласно таблице 2.1 для органического стекла на частоте 2,5 МГц значение коэффициента затухания равно 20 – 30 Нп/мм. Принимаем среднее значение 25 Нп/м = 0,025 Нп/мм. В пластмассах коэффициент затухания пропорционален частоте, поэтому для частоты 7 МГц коэффициент затухания равен

$$\delta_l = 0,025 \cdot 7/2,5 = 0,07 \text{ Нп/мм}.$$

### **2.3. Измерение скорости**

Ниже рассмотрены способы измерения скорости звука с помощью универсального ультразвукового дефектоскопа или (только для продольных волн) толщиномера. Если дефектоскоп (например, УД2-12) имеет блок измерения времени пробега ультразвукового импульса (обычно в мкс), желательно иметь образец с известным временем пробега УЗ на определенной базе.

Если дефектоскоп такого блока не имеет, то необходим образец с известной толщиной и скоростью звука.

Скорость продольных волн.

1. Измерить штангенциркулем или микрометром толщину  $h$  или путь УЗ в ОК  $r$ .

2. Настроить прибор (не имеющий блока измерения времени) на правильное измерение толщины  $h_0$  образца с известной толщиной и скоростью звука  $c_0$ .

3. Прибором, настроенным на измерение скорости звука  $c_0$ , измерить толщину ОК  $r$ . Эта величина будет отличаться от истинной толщины ОК, поскольку прибор настроен не на скорость звука в ОК.

4. Рассчитать искомую скорость звука в ОК по формуле

$$c = r/t = c_0 r / r_0. \quad (2.4)$$

Если прибор имеет блок измерения времени, то действия по пп. 2 – 4 заменяют на:

2'. Настроить прибор на правильное измерение времени пробега. Для этого регулировать начало отсчета времени, добиваясь правильного значения времени пробега УЗ через заданную базу, например, использовать СО-2, в котором при высоте 59 мм время прохождения продольных волн 20 мкс.

3'. Измерить время пробега  $t$  УЗ через ОК.

4'. Рассчитать искомую скорость звука в ОК:  $c = r/t$ . Если измерение выполняют по донному сигналу ОК толщиной  $h$ , то  $c = 2h/t$ .

Для повышения точности измерения скорости звука рекомендуется:

а) Длину базы выбирать возможно большей, измерять ее с погрешностью не более 0,1%, шероховатость поверхности ввода должна быть не хуже  $R_a = 2$  мкм, непараллельность поверхностей – не хуже 0,05.

б) Использовать для измерений интервал не между зондирующим импульсом и донным сигналом, а между эхосигналами от двух отражателей на разном расстоянии, принимаемых при неизменном положении преобразователя, например, интервал между первым и вторым донным сигналами. Благодаря этому исключается погрешность от пробега УЗ в протекторе ПЭП и слое контактирующей жидкости. При невозможности выполнить эту рекомендацию принять меры к стабилизации акустического контакта и применять преобразователь без протектора. Если измерение выполняется по двум эхосигналам, отпадает необходимость в образце с известным временем пробега базы для настройки прибора с блоком измерения времени. В этом случае за  $t$  принимается разность времен пробега до двух отражателей.

Таблица 2.1.

Вещество	Акустические свойства веществ				
	Скорость волн с, 10 <sup>3</sup> м/с		Плот- ность, $\rho$ 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Волновое сопротив- ление z, 10 <sup>6</sup> Па·с/м	Коэффициент затухания на 2,5 МГц $\delta$ , Нп/м
	продоль- ных	попереч- ных			
<b>МЕТАЛЛЫ</b>					
Алюминий	6,36	3,13	2,7	17,2	0,1...1
Бериллий	12,8	8,6	1,82	23,3	-
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8...9	30...34	-
Вольфрам	5,32	2,77	19,3	102,7	-
Дюралюмин	6,2...6,4	3...3,2	2,7...2,8	19...20	0,1...1
Железо	5,92	3,23	7,8	46,3	0,2...5
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	36...40	-
Магний	5,74	3,1	1,74	9,98	0,1...2
Медь	4,72	2,4	8,9	42	2,5...20
Никель	5,7	3,0	8,9	50,7	-
Олово	3,32	1,65	7,3	24,2	-
Ртуть	1,45	-	13,6	19,7	0,34
Свинец	2,16	0,87	11,4	24,6	-
Серебро	3,65	1,65	10,5	38,3	-
Сталь: углеро- дистая	5,90...5,94	3,22...3,25	7,7...7,9	45,9...46,3	0,1...10
аустенитная	5,77...6,14	3,2...3,31	7,6...8	44...48	0,3...40
Титан	6,1	3,13	4,5	27,5	-
Титановые сплавы ВТ,ОТ	6,05...6,3	3,1...3,3	4,5...4,7	27...29	-
Цинк	4,17	2,41	7,1	29,6	-
Чугун	3,5...5,6	2,2...3,2	7,2...7,6	26...42	0,3...50
<b>НЕМЕТАЛЛЫ</b>					
Бетон	2,1...5,2	-	1,8...2,8	6...9,5	-
Кварц плавл.	5,95	3,75	2,2	13,1	0,31
Полистирол	2,35	1,13	1,06	2,5	10...13
Резина	1,4...2,3	-	0,9...1,6	2...3	30...60
Стекло оконн.	5,1...6,2	3,1...3,6	2,1...2,6	11...15	0,4...0,7
Стекло орган.	2,7...2,75	1,12...1,13	1,17...1,19	3,0...3,3	20...30
Текстолит	2,4...2,8	1,1...1,4	2,3...2,5	6...6,4	80...120
Фарфор	5,2...6,8	3,1...4	2,3...2,6	15...20	0,1...0,4
Фторопласт	1,35	-	2,2	30	160
Эбонит	2,4	-	1,2	2,9	90
ЭД-5 с 0%	2,3	1,15	1,2	2,8	100
воль- 20%	2,1	-	1,4	2,9	130
фра- 50%	1,8	-	2,2	4	250
мом 80%	1,4	-	3,8	5,3	800
<b>ЖИДКОСТИ, ГАЗЫ</b>					
Вода	1,49	-	0,998	1,49	0,156
Глицерин	1,92	-	1,27	2,43	10,6
Масло: автол	1,7	-	0,9	1,6	-
Трансформат.	1,4	-	0,9	1,3	0,8
Спирт этил.	1,18	-	0,79	0,93	0,34
Воздух	0,33	-	0,0013	0,00043	10...12

Таблица 2.2.

Затухание ультразвука в некоторых жидкостях и газах				
Вещество	Температура $t$ , °C	Частота $f$ , МГц	$\delta'$ , $\text{Нп} \cdot \text{с}^2 / \text{м} = 10^6 \text{ Нп} / \text{МГц}^2 \cdot \text{мм}$	$K_\delta$ , 1/град
Вода	20	0,1...250	25	-0,031
Глицерин	20...27	0,15...4	2500	-0,069
Масло трансформаторное	20	1...5	1300	-0,035
Ртуть	20...25	0,5...1000	61	-0,015
Воздух	20	1,1...1,4	17500	-

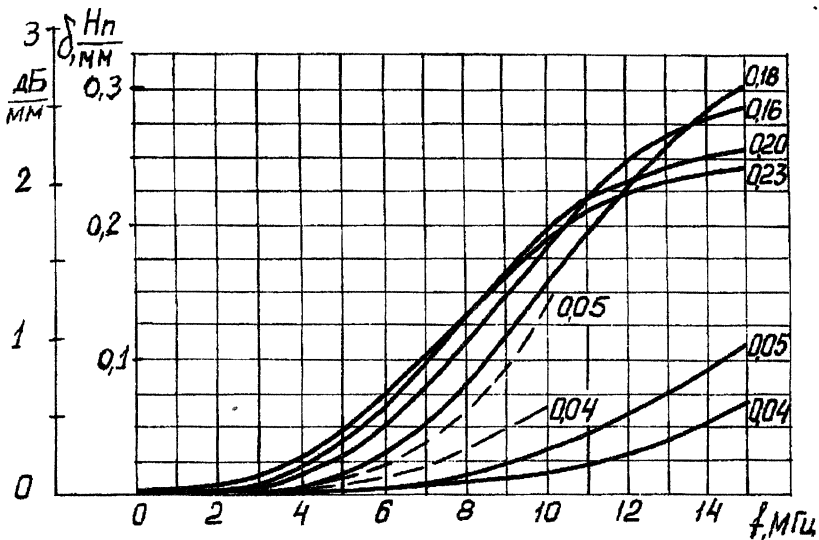


Рис. 2.1. Коэффициент затухания продольных (—) и поперечных (---) волн в железе-армко; указан средний размер зерна в мм.

в) Выбрать базы для ОК и образца такими, чтобы время пробега в них УЗ были близкими. Это уменьшит погрешность от глубиномера.

г) Измерения выполнять на возможно более высокой частоте, высоту эхосигналов, по которым выполняют измерения, поддерживать постоянной, измерения вести по переднему фронту на одинаковой высоте (5 ... 10 мм) от линии разветвки.

При соблюдении указанных рекомендаций погрешность может быть снижена с (2 ... 5)% до 0,5 ... 1% при толщине ОК 50 мм и более.

### Пример 2.3.

Измерить скорость продольных волн в пластмассе с помощью дефектоскопа или толщиномера. Оценить погрешность измерения.

Измерение штангенциркулем толщины ОК дало  $r = 5,6$  мм. Поскольку толщина ОК невелика, в качестве средства измерения выбираем толщиномер, а в качестве образца с известной скоростью звука – стальной образец толщиной (измерена штангенциркулем) 12,1 мм, для которого отсчет толщины (без предварительной настройки прибора) близок к отсчету для пластмассового ОК. Скорость звука в стальном образце (измеренная лазерным способом), равна  $c_0 = 5,926$  мм/мкс.

Регулируя параметр “скорость” толщиномера добиваемся точного измерения толщины стального образца:  $12,1 \pm 0,1$  мм. Измерение на ОК дали отсчет толщины  $r_0 = 13,1 \pm 0,1$  мм. По формуле (2.4) рассчитываем скорость звука в ОК:

$$c = 5,926 \cdot 5,6 / 13,1 = 2,53 \text{ мм/мкс.}$$

Оценим максимальную погрешность измерения. Из (2.4) следует

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta c_0}{c_0} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta r_0}{r_0} = \frac{0,1}{12,1} + \frac{0,1}{5,6} + \frac{0,1}{13,1} = 3,4\%.$$

Здесь учтено, что погрешность от вариации значения скорости звука в стали определяется не точностью измерения ее лазерным или другим способом, а точностью настройки толщиномера на эту скорость. Погрешность можно уменьшить увеличением толщины образца пластмассы.

### Скорость поперечных волн.

При наличии прямых преобразователей поперечных волн можно применять способ измерения, описанный в предыдущем случае, но такие преобразователи в комплект дефектоскопа обычно не входят. Рекомендуемый способ рассчитан на использование наклонных ПЭП и дефектоскопа без блока измерения времени.

1. С помощью прямого преобразователя настроить дефектоскоп по образцу с известной скоростью звука  $c_0$ , как в п. 2 для продольных волн.

2. Подключить к дефектоскопу два одинаковых наклонных преобразователя для излучения и приема поперечных волн с углом ввода  $\alpha$  около  $44 - 50^\circ$ .

3. Смазать рабочие поверхности преобразователей контактирующей жидкостью (маслом) и сложить (рис. 2.2,а) таким образом, чтобы получить максимальную амплитуду прошедшего сигнала.

4. Измерить дефектоскопом, настроенным на скорость звука  $c_0$ , путь в призмах  $r_n$ .

5. С помощью одного или обоих наклонных преобразователей получить максимальный эхосигнал от какого-либо отражателя в ОК. При работе по совмещенной схеме это может быть отражение от двугранного угла (рис. 2.2,б) или от цилиндрического отверстия (рис. 2.2,в). При контроле двумя преобразователями это отражение от дна ОК (рис. 2.2,д). Измерениями

и расчетами определить путь УЗ в ОК  $r$ . Например, для схемы контроля рис 2.5, в положение  $l$  преобразователя соответствует путь

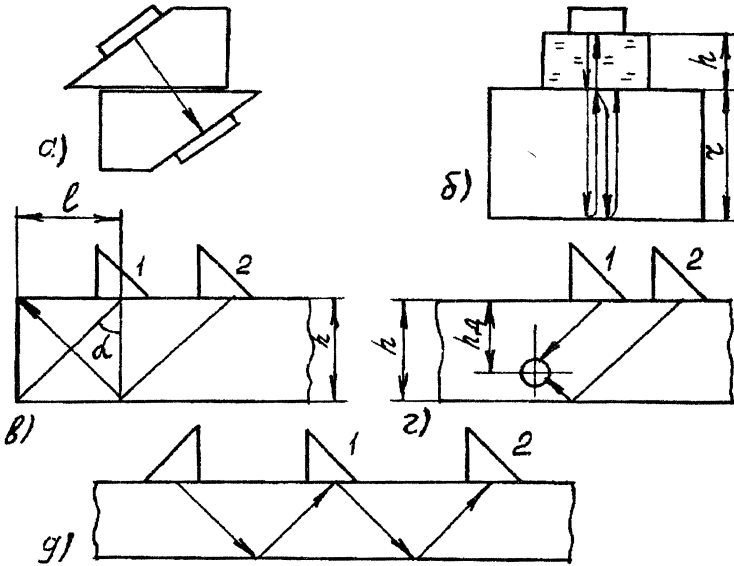


Рис. 2.2. Способы измерения скорости и затухания упругих волн.

$$r = \sqrt{h^2 + l^2} = h / \cos \alpha,$$

где  $h$  – глубина расположения отражателя,  $l$  – расстояние от преобразователя до отражателя вдоль поверхности,  $\alpha$  – угол ввода;  $l$  или  $\alpha$  нужно брать для положения преобразователя, соответствующего максимуму эхосигнала.

6. Измерить дефектоскопом, настроенным на скорость звука  $c_0$  путь ультразвука  $r_0$  в контролируемом материале.

7. Рассчитать искомую скорость звука по формуле

$$c = c_0 r / (r_0 - r_n).$$

При контроле прибором, который имеет блок измерения времени, используют образец, в котором известно время пробега УЗ. Например, используют образец с вогнутой цилиндрической отражающей поверхностью типа СО-3 (показан на рис. 7.1, б),  $K1$  или  $K2$ . В положении преобразователя, соответствующем максимуму эхосигнала, путь УЗ равен удвоенному радиусу образца  $2R$ , а время пробега:  $t = 2R / c_t$ . Измерения выполняются по пп. 2' – 4' вместо пп. 2 – 4. Контроль ведут одним совмещенным наклонным преобра-

зователем. В качестве отражателя используют двугранный угол или боковое цилиндрическое отверстие.

Погрешность измерения прибором без блока измерения времени 3 ... 5%, а с таким блоком – 1 ... 2%. Для повышения точности измерений до 0,5 ... 1% нужно выполнять рекомендации а) – з) (см. выше). Чтобы выполнить п. б), желательно иметь два отражателя, которые дают эхосигналы при постоянном положении преобразователя. При таком положении их амплитуды могут не достигать максимума, но следует возможно более точно измерить штангенциркулем расстояния от точки ввода преобразователя до отражателей  $r_1$  и  $r_2$ , а затем определить их разность:  $r = r_2 - r_1$ .

#### Пример 2.4.

Измерить скорость поперечных волн в образце рис. 2.2,в из неизвестного материала толщиной  $h = 30$  мм. Дефектоскоп имеет блок измерения времени.

Включим наклонный преобразователь на частоту 2,5 МГц с углом ввода (для стали) 50°. Рассчитаем время пробега в СО-3 ( $R = 55$  мм):  $t = 2R/c_s = 2 \cdot 55/3,23 = 34,06$  мкс. Получим максимальный эхосигнал от СО-3. Регулируем задержку начала отсчета времени дефектоскопа так чтобы время пробега в СО-3 равнялось 34,1 мкс.

Получим максимальный эхосигнал от двугранного угла образца. Измерим дефектоскопом время пробега в образце  $t$  (28,6 мкс) и штангенциркулем измерим расстояние  $l$  (рис. 2.2,в) Пусть оно равно 33,2 мм. Рассчитаем путь УЗ в образце:

$r = \sqrt{h^2 + l^2} = \sqrt{30^2 + 33,2^2} = 44,7$  мм. Импульс проходит этот путь в прямом и обратном направлениях. Скорость распространения поперечных волн равна  $c_s = 2r/t = 2 \cdot 44,7/28,6 = 3,12$  мм/мкс. Скорость близка к значению для алюминия.

### **2.4. Измерение коэффициента затухания**

Рассмотрены способы измерения с применением универсального дефектоскопа. Учитываются поправки на дифракционное расхождение волн и неполное отражение от поверхности ОК – преобразователь.

#### Затухание продольных волн.

**Способ 1.** Предлагаемый способ требует применения акустической задержки в виде цилиндра из оргстекла или полистирола диаметром не менее диаметра преобразователя и высотой  $h = (10...100)$  мм такой, чтобы импульсы многократных отражений в цилиндре не совпадали с первыми двумя донными сигналами в ОК.

1. Измерить скорости звука в ОК  $c$  и задержке  $c_3$ , а также их толщины  $r$  и  $h$ .

2. Подключить к дефектоскопу прямой преобразователь требуемой частоты.

3. Стабильно соединить преобразователь с задержкой и, не прижимая задержку к ОК, измерить амплитуду донного сигнала для противоположного торца задержки  $\langle A_3 \rangle$ .

4. Смазать контактирующей жидкостью поверхности ввода задержки и ОК.



5. Плотно поставить задержку с прижатым преобразователем на ОК (рис. 2.2,б). Зафиксировать всю систему так, чтобы все сигналы на экране дефектоскопа сохраняли свою амплитуду.

6. Измерить амплитуды трех эхосигналов (в дБ):

$\langle A'_3 \rangle$  – сигнал от границы задержка – ОК,

$\langle A_1 \rangle$  – первый донный сигнал ОК,

$\langle A_2 \rangle$  – второй донный сигнал ОК.

7. Рассчитать приведенные пути в ОК и задержке:

$$h' = hc_3 / (cN); \quad r'_1 = (r/N) + h'; \quad r'_2 = (2r/N) + h'.$$

Здесь  $N = a^2 / \lambda$  – длина ближней зоны преобразователя (см. гл. 5),  $a$  – радиус пьезопластины ПЭП,  $\lambda$  – длина волны в ОК.

7. По графику рис. 2.3 определить дифракционное ослабление  $\langle \varphi_1 \rangle$  и  $\langle \varphi_2 \rangle$  для первого и второго донных сигналов по значениям приведенных расстояний. В зависимости от волнового размера пьезоэлемента преобразователя  $ka = 2\pi af / c$  использовать верхнюю, нижнюю кривую или интерполировать интервал между кривыми. Если приведенное расстояние превышает значения, показанные на рис. 2.3, рассчитать дифракционное ослабление по формуле:

$$\langle \varphi \rangle = \langle \pi / 2r' \rangle, \quad (2.5)$$

где  $r'$  равно  $r'_1$  или  $r'_2$ .

8. Рассчитать разности

$$\langle A' \rangle = \langle A'_3 \rangle - \langle A_3 \rangle; \quad \langle A \rangle = \langle A_2 \rangle - \langle A_1 \rangle. \quad (2.6)$$

Эти разности удобно измерять аттенуатором дефектоскопа попарно. Их величина обычно не превосходит 7 ... 12 дБ.

9. Рассчитать коэффициент затухания по формуле:

$$\langle \delta \rangle = [\langle A \rangle - \langle A' \rangle - \langle \varphi_2 \rangle + \langle \varphi_1 \rangle] / (2r). \quad (2.7)$$

Коэффициент затухания  $\delta$  выражается в дБ/мм или дБ/м в зависимости от того, в каких единицах измерено  $r$ .

Для реализации этого способа необходимо, чтобы дефектоскоп имел усилитель с двухполупериодным выпрямлением принимаемых импульсов (прибор УД2-12 этого не имеет) иначе разность  $\langle A' \rangle$  будет измерена неправильно и может даже оказаться отрицательной величиной.

Для повышения точности измерения рекомендуется:

а) Увеличить толщину ОК.

б) Поверхности ввода и донная ОК должны быть плоскими с непараллельностью не более 0,01. Ширина ОК должна быть не менее  $r/2$ , чтобы устранить влияние отражения от боковых поверхностей. Ось преобразователя должна быть направлена строго перпендикулярно поверхности ввода ОК.

При этом достигаются максимумы амплитуд эхосигналов от поверхности ввода и донных.

в) На границах преобразователь задержка и задержка – ОК обеспечить стабильность акустического контакта по всей площади.

з) Для материалов, обычно контролируемых УЗ нужно измерять амплитуды эхосигналов с погрешностью не более 0,2 дБ. Если аттенуатор дефектоскопа имеет цену делений 1 или 2 дБ, следует выполнять разметку экрана прибора в долях дБ.

#### Пример 2.5.

Определить коэффициент затухания продольных волн в образце из стали толщиной  $r = 50$  мм. Акустическая задержка из органического стекла толщиной  $h = 50$  мм. Измерения амплитуд дали значения:  $\langle A_3 \rangle = 61,8$  дБ;  $\langle A_2 \rangle = 60,9$  дБ;  $\langle A_1 \rangle = 83,9$  дБ;  $\langle A_2 \rangle = 90,7$  дБ. Частота  $f = 2,5$  МГц, диаметр преобразователя  $2a = 12$  мм, скорости звука в материале ОК и задержке 5,92 и 2,72 мм/мкс.

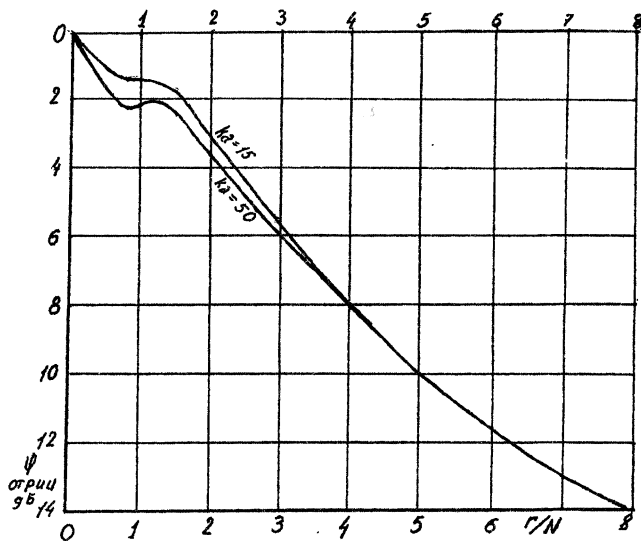


Рис. 2.3. Дифракционное ослабление донного сигнала

Рассчитаем приведенные расстояния:

$$N = a^2 f / c = 6^2 \cdot 2,5 / 5,92 = 15,2 \text{ мм};$$

$$h' = hc_3 / (cN) = 50 \cdot 2,72 / (5,92 \cdot 15,2) = 1,51;$$

$$r'_1 = r / N + h' = 50 / 15,2 + 1,51 = 4,8;$$

$$r'_2 = 2r / N + h' = 2 \cdot 50 / 15,2 + 1,51 = 8,1.$$

Определим дифракционное ослабление. Рассчитаем волновой размер  $ka = 2\pi f / c = 2\pi \cdot 2,5 / 5,9 = 15,9$ . Следует пользоваться верхней кривой рис. 2.3, впрочем

для найденных приведенных расстояний кривая не расщепляется. Для первого донного сигнала используем рис. 2.3, а для второго – формулу (2,5):

$$\langle \varphi_1 \rangle = 9,8 \text{ дБ}; \quad \langle \varphi_2 \rangle = \langle \pi/2 \cdot 8,1 \rangle = \langle 0,194 \rangle = 14,2 \text{ дБ}.$$

Выполняем расчет по формулам (2.6) и (2,7):

$$61,8 - 60,9 = 0,9; \quad 90,7 - 83,9 = 6,8; \\ (6,8 - 0,9 - 14,2 + 9,8)/(2 \cdot 50) = 0,015 \text{ дБ/мм}.$$

## Способ 2.

Между преобразователем и ОК вводится задержка из жидкости (иммерсионный контакт) или эластичного материала с небольшим затуханием и волновым сопротивлением близким к контактной жидкости, например, из животного сала. Последний вариант предпочтительнее, так как не требует принятия мер для предотвращения вытекания жидкости. Как и в способе 1 выполняется измерение первого и второго донных сигналов в плоскопараллельном ОК и коэффициент затухания рассчитывается по формуле

$$\langle \delta \rangle = [(A_2) - (A_1) - \langle \varphi_2 \rangle + \langle \varphi_1 \rangle - \langle R \rangle] / (2r) \quad (2.8)$$

Обозначения те же, что и в способе 1.

Способ 2 удобен тем, что при иммерсионном контакте между задержкой и ОК отсутствует тонкий контактный слой неопределенной толщины. В случае животного сала контактный слой также практически отсутствует ввиду близости волновых сопротивлений сала и контактной жидкости (воды, масла). С учетом этого коэффициент отражения от границы задержка – ОК рассчитывается по формуле

$$R = \left| \frac{z_3 - z}{z_3 + z} \right|, \quad (2.9)$$

где  $z$  и  $z_3$  – волновые сопротивления материалов ОК и задержки.

Меры по повышению точности – те же, что для способа 1.

### Пример 2.6.

Определить коэффициент затухания продольных волн в образце из стали толщиной  $r = 30$  мм. Акустическая задержка из сала толщиной  $h = 30$  мм со скоростью звука  $c_3 = 1,43$  мм/мкс, плотностью  $\rho_3 = 0,91 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  волновое сопротивление  $z_3 = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ . Отметим, что волновое сопротивление контактной жидкости воды 1,49, а машинного масла 1,3 – 1,6 (в одинаковых единицах), то есть очень близки к  $z_3$ .

Установим преобразователь с акустической задержкой на поверхность ОК, смазанную маслом. Принимаем меры к тому, чтобы направить ось преобразователя перпендикулярно поверхности ОК. При этом одновременно достигаются максимумы эхосигнала от поверхности ввода ОК, первого и второго донных сигналов. Предположим, что измерения амплитуд дали значения  $\langle A_1 \rangle = 53,2$  дБ и  $\langle A_2 \rangle = 61,5$  дБ.

Рассчитаем коэффициент отражения

$$R = \left| \frac{1,3 - 46,3}{1,3 + 46,3} \right| = 0,945; \quad \langle R \rangle = 0,49 \approx 0,5 \text{ дБ}.$$

Рассчитаем приведенные расстояния:

$$N = a^2 f / c = 6^2 \cdot 2,5 / 5,92 = 15,2 \text{ мм};$$

$$h' = hc_3 / (cN) = 30 \cdot 1,43 / (5,92 \cdot 15,2) = 0,48;$$

$$r'_1 = r/N + h' = 30/15,2 + 0,48 = 2,45,$$

$$r'_2 = 2r/N + h' = 2 \cdot 30/15,2 + 0,48 = 4,4.$$

Определим дифракционное ослабление по кривой рис. 2.3.

$$\langle \varphi_1 \rangle = 4,6 \text{ дБ}, \quad \langle \varphi_2 \rangle = 9,0 \text{ дБ}.$$

Рассчитаем коэффициент затухания

$$\langle \delta \rangle = [61,5 - 53,2 - 9,0 + 4,6 - 0,5] / (2 \cdot 30) = 0,057 \text{ дБ/мм}.$$

### Затухание поперечных волн.

Как и в случае измерения скорости, рекомендуется способ, основанный на применении наклонных ПЭП.

1. Подключить к дефектоскопу один или два ПЭП с углами ввода  $\alpha \approx 45^\circ$ . Определить угол ввода (см. п. 7.1)

2. Получить максимальный эхосигнал, применяя схемы, как на рис. 2.2,в или 2.2,д, позиция 1, и измерить его амплитуду  $\langle A_1 \rangle$ .

3. Переместить ПЭП в позицию 2 (для схемы, рис. 2.2,д переместить только один ПЭП), получить максимальный эхосигнал, а затем сдвинуть ПЭП в положение, которое должно соответствовать максимуму эхосигнала для угла ввода данного ПЭП, определенного по позиции 1. Для ОК с большим затуханием это положение будет соответствовать несколько большему расстоянию от отражателя, а для ОК с небольшим затуханием оба положения будут совпадать. Измерить амплитуду эхосигнала  $\langle A_2 \rangle$ .

4. Измерить и рассчитать пути УЗ излучатель – отражатель – приемник  $r_1$  и  $r_2$  для позиций ПЭП 1 и 2 ( $r_2 > r_1$ ). Для рис. 2.2,в и 2.2,д расчет ведут по формулам

$$r_1 = h / \cos \alpha; \quad r_2 = 2r_1,$$

где  $h$  — толщина ОК,  $\alpha$  — угол ввода преобразователя.

5. Рассчитать приведенные пути

$$r'^1_1 = \sqrt{\left( r_1 + nr_p \right) \left( r_1 + n \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} r_p \right)} / N$$

и

$$r'^1_2 = \sqrt{\left( r_2 + nr_p \right) \left( r_2 + n \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} r_p \right)} / N$$

Здесь  $r_n$  — средний путь в призме преобразователя,  $n = c_n / c_t$  — отношение скорости продольных волн в призме преобразователя и скорости поперечных волн в ОК,  $\beta$  — угол призмы (угол падения),  $N$  — протяженность ближней зоны для наклонного преобразователя:

$$N = \frac{Sf \cos \alpha}{\pi c_t \cos \beta},$$

где  $S$  — площадь пьезопластины преобразователя.

5. Рассчитать дифракционное ослабление  $\langle \varphi_1 \rangle$  и  $\langle \varphi_2 \rangle$  для первого и второго сигналов по формуле (2.5) или по рис. 2.3.

6. Рассчитать коэффициент затухания  $\delta$ , по формуле:

$$\langle \delta_t \rangle = \left[ \langle A_2 \rangle - \langle A_1 \rangle - \langle \varphi_2 \rangle + \langle \varphi_1 \rangle \right] / [2(r_2 - r_1)] \quad (2.10)$$

Основная погрешность измерения описанным способом (1 – 2 дБ) связана с изменением качества акустического контакта в позициях 1 и 2 ПЭП, поэтому необходимо принять все меры для его стабилизации: обработать поверхность ввода с чистотой не хуже  $R_z = 20$  мкм, прижимать к ней ПЭП с постоянной силой, усреднять результаты многократных измерений.

#### Пример 2.7.

Определить затухание поперечных волн в образце из стали толщиной  $h = 40$  мм. Пятикратные измерения с помощью преобразователя на 2,5 МГц с углом наклона  $50^\circ$  из комплекта "Приз Д5" дали средние значения амплитуд эхосигналов от нижнего и верхнего двугранных углов ОК  $\langle A_1 \rangle = 13$  дБ и  $\langle A_2 \rangle = 24$  дБ.

Для указанного преобразователя площадь пьезопластины 12x16 мм, средний путь в призме  $r_n = 12$  мм, угол призмы  $\beta = 39^\circ$ . Эти значения рассчитаны, исходя из того, что призма сделана из капролона со скоростью продольных волн  $c_n = 2,64$  мм/мкс. Угол рассчитан по формуле

$$\beta = \arcsin(c_n \sin \alpha / c_t) = \arcsin(2,64 \sin 50^\circ / 3,23).$$

Путь в призме определен по измерению времени пробега в призме. Две одинаковые призмы включались по раздельной схеме и складывались, как показано на рис.2.2, таким образом, чтобы достигалась максимальная амплитуда сквозного сигнала. Измеренное время пробега равнялось  $t_n = 9,1$  мкс, отсюда  $r = c_n t_n / 2 = 2,64 \cdot 9,1 / 2 = 12$  мм.

Протяженность ближней зоны равна

$$N = 12 \cdot 16 \cdot 2,5 \cdot \cos 50^\circ / \pi \cdot \cos 39^\circ = 39,3 \text{ мм.}$$

Отношение скоростей звука  $n = c_n / c_t = 2,64 / 3,23 = 0,82$ . Отношение косинусов  $\cos \alpha / \cos \beta = \cos 50^\circ / \cos 39^\circ = 0,83$ . Пути ультразвука в ОК равны  $r_1 = h / \cos \alpha = 40 / \cos 50^\circ = 62$  мм,  $r_2 = 2r_1 = 124$  мм. Приведенные пути

$$r'_1 = \sqrt{(62 + 0,82 \cdot 12)(62 + 0,82 \cdot 0,83 \cdot 12)} / 39,3 = 1,8;$$

$$r'_2 = \sqrt{(124 + 0,82 \cdot 12)(124 + 0,82 \cdot 0,83 \cdot 12)} / 39,3 = 3,4.$$

Соответствующие этим путям значения дифракционного ослабления, согласно рис. 2.3,  $\langle \varphi_1 \rangle = 3,1$  дБ и  $\langle \varphi_2 \rangle = 6,9$  дБ. Рассчитываем затухание по формуле (2.10)

$$\langle \delta_t \rangle = (27 - 13 - 6,9 + 3,1) / (2 \cdot 62) = 0,082 \text{ Нп/мм.}$$

### 3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН

Рассмотрена плоская монохроматическая волна. В конце учтены реальная форма пучка лучей и импульсный характер излучения.

#### 3.1. Граница двух протяженных сред

Падающая на границу двух сред волна частично проходит, частично отражается и может трансформироваться. В твердых телах (рис. 3.1) возникают две (продольная и поперечная) отраженные и две преломленные волны с направлениями по закону синусов:

$$\frac{\sin\beta}{c} = \frac{\sin\gamma_l}{c_l} = \frac{\sin\gamma_t}{c_t} = \frac{\sin\alpha_l}{c_l} = \frac{\sin\alpha_t}{c_t}, \quad (3.1)$$

где  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$  — углы падения, отражения и преломления,  $c$  — скорости волн, индексы  $l$  и  $t$  отмечают параметры продольных и поперечных волн, для нижней среды отмечены знаком штрих ', скорость падающей волны — без индекса. Если одна среда (или обе) жидкая или газообразная, то поперечная волна в ней не существует, и количество волн сокращается. В дальнейшем будем считать, что падающая волна — продольная.

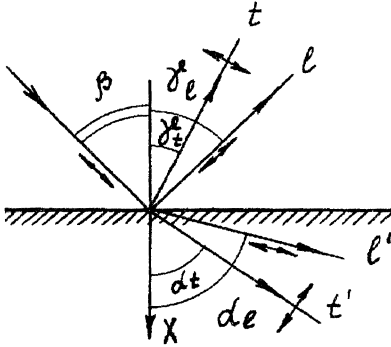


Рис. 3.1. Отражение, преломление и трансформация при падении продольной волны на границу раздела двух твердых сред.

Для каждой отраженной и прошедшей волны их амплитуды определяются коэффициентами отражения и прозрачности  $R$  и  $D$ . Эти коэффициенты

могут быть определены по амплитудам смещения, акустического давления или других переменных величин. Часто используют коэффициенты по потокам энергии, перпендикулярным границе раздела,  $\tilde{R}$  и  $\tilde{D}$  (будем называть "по энергии"). Для перечисленных коэффициентов справедлив ряд общих закономерностей:

Сумма всех коэффициентов отражения и прозрачности по энергии равна 1 (закон сохранения энергии):

$$\tilde{R}_{ll} + \tilde{R}_{lt} + \tilde{D}_{ll} + \tilde{D}_{lt} = 1; \quad (3.2)$$

Коэффициенты отражения по амплитуде однотипной волны с двух сторон от границы равны по модулю и обратны по знаку:

$$R_{ll} = -R_{ll}'; \quad R_{tt} = -R_{tt}'. \quad (3.3)$$

Коэффициент прозрачности по энергии равен произведению коэффициентов по амплитуде в двух направлениях. Например

$$\tilde{D}_{lt} = D_{lt}D_{t'l} = \tilde{D}_{t'l}. \quad (3.4)$$

То же для относится к коэффициентом отражения разнотипных волн.

Закономерность (3.4) очень важна для дефектоскопии, т. к. границу преобразователь (призма) – изделие волна, как правило, проходит дважды.

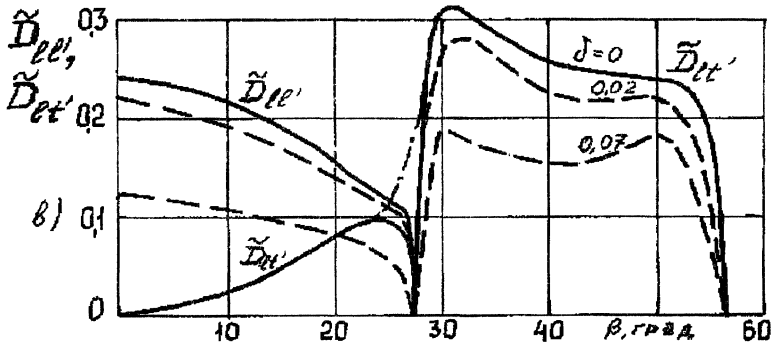


Рис. 3.2. Коэффициенты прозрачности по энергии для границы оргстекло – сталь через тонкий слой жидкости. Штрихпунктирная линия – эксперимент.

Формулы для расчетов коэффициентов при нормальном падении:

$$R = (z' - z)/(z' + z); \quad \tilde{R} = R^2; \quad D = 2z'/(z' + z); \quad \tilde{D} = 4z'z/(z' + z)^2. \quad (3.5)$$

Здесь  $z$  и  $z'$  – волновые сопротивления верхней и нижней сред для продольных волн. Формулы для расчетов коэффициентов при наклонном падении приведены в [2]. Там же показаны кривые коэффициентов прозрачности для границ полистирол – сталь, вода – сталь, органическое стекло – алюминий, вода – алюминий. На рис. 3.2 показаны рассчитанные по этим формулам коэффициенты  $\tilde{D}_{te}$  и  $\tilde{D}_{tt}$  для границы органическое стекло – тонкий слой жидкости – сталь,  $\delta$  – отношение толщины слоя жидкости к длине волны в ней. Для углов в диапазоне 20 – 30 градусов график дополнен экспериментальной кривой для трансформированной поперечной волны.

Углы падения, при которых преломленные волны сливается с поверхностью, называются критическими. Первый критический угол – для продольной, второй – для поперечной волн:

$$\beta' = \arcsin(c_l/c_l'), \quad \beta'' = \arcsin(c_l/c_t').$$

Преломленная волна в этом случае превращается в неоднородную. Она распространяется вдоль границы, фронт ее перпендикулярен границе, амплитуда уменьшается с глубиной. Головная волна относится к неоднородным. Угол падения, при котором образуется поверхностная волна Рэлея (неоднородной не является):

$$\beta_s = \arcsin(c_l/c_s').$$

Углы  $\beta'$ ,  $\beta''$ ,  $\beta_s$  (в градусах), максимальные значения коэффициентов прозрачности (по энергии) при образовании продольных и поперечных волн, угол  $\beta'_{it}$  (в градусах), при котором достигается максимальная величина коэффициента прозрачности для поперечных волн, применительно к некоторым парам сред, приведены в табл. 3.1

Таблица 3.1.

Параметры преломления

Пары сред	$\beta'$	$\beta''$	$\beta_s$	$D_{it}$ max	$D_{it}$ max	$\beta'_{it}$ max
Оргстекло – сталь	27,4	57,4	64,9	0,25	0,31	31
Полистирол – сталь	23,4	46,7	51,5	0,2	0,22	27
Вода – сталь	14,6	27,5	29,7	0,12	0,18	16,5
Оргстекло – дюраль	25,6	61,3	70,6	0,54	0,70	32
Вода – дюраль	13,7	28,7	31,1	0,29	0,47	16,5

### 3.2. Свободная поверхность твердого тела

Отражение волны, распространяющейся в твердом теле, от его границ – частный случай задачи, рассмотренной выше, с  $\rho' = 0$ . Для падающей поперечной волны имеется третий критический угол

$$\beta''' = \arcsin(c_t/c_l).$$

В стали это  $33^\circ$ , для дюралюмина –  $29,5^\circ$ . Угол, соответствующий наибольшей трансформации (точнее минимальному коэффициенту отражения без трансформации), называется квазиобменным. При нем большая часть энергии волны трансформируется в волну другого типа. Для стали это  $\beta_t = 70^\circ$  и  $\beta_t = 31^\circ$ , для дюралюмина –  $\beta_t = 63,5^\circ$  и  $\beta_t = 26^\circ$ . Термин "обменный угол" (без "квази") используется, если трансформация мод происходит полностью.

На рис. 3.3 показано двойное отражение от прямого двугранного угла (а) и коэффициент такого отражения (в):

$$R_2 = R(\beta)R(90^\circ - \beta).$$

В результате двойного отражения нетрансформированный эхосигнал возвращается к излучающему преобразователю (угловой эффект). На практике двойное отражение часто встречается для поперечных волн (см., например, рис. 2.5, в). При углах  $\beta_t$  в интервале между  $\beta'''$  и  $(90^\circ - \beta''')$  (для стали  $33...57^\circ$ , для дюралюмина  $29,5...60,5^\circ$ ) такая волна отражается без трансформации, так как для обеих граней двугранного угла углы падения больше третьего критического.

Для продольных волн такое отражение используют редко. Если продольная волна распространяется вдоль свободной поверхности, она является головной, порождает поперечную волну и быстро ослабляется. Поэтому



$R=1$  при  $\beta = 0^\circ$  и  $90^\circ$ , как показано на рис. 3.3, в, только когда грань угла, вблизи которой распространяется продольная волна, имеет криволинейную форму (рис. 3.3, б). Такая ситуация бывает при контроле объектов с цилиндрической внутренней поверхностью, например, толстостенной трубы или вала с центральным каналом.

### 3.3. Граница сред, разделенных слоем

Рассмотрен только случай нормального падения. Коэффициенты  $R$  и  $D$  становятся комплексными. Их модули и значения по энергии имеют максимумы и минимумы при определенных волновых толщинах слоя  $k_c h_c = 2\pi h_c / \lambda_c$ . Различают симметричный случай, когда  $z_c$  больше или меньше одновременно  $z$  и  $z'$ , и несимметричный, когда  $z_c$  лежит между  $z$  и  $z'$ . В первом случае максимумы  $\tilde{D}_c$  (равные ему же в отсутствие слоя) достигаются при полуволновом слое (т.е. его толщина равна целому числу полуволн), а минимумы – если слой четвертьволновой (его толщина равна нечетному числу четвертей волн). В несимметричном случае для четвертьволнового слоя достигаются максимумы, при которых  $\tilde{D}_c$  больше, чем  $\tilde{D}$  в отсутствие слоя. Это – явление просветления границы. Коэффициент прозрачности равен 1 (полное просветление), когда

$$z_c = \sqrt{zz'}; \quad h_c = \lambda_c / 4 \quad (3.6)$$

#### Пример 3.1.

Расчитать условия полного просветления границы ЦТС (см. 4.1) – органическое стекло на частоте 2,5 МГц. Из таблиц 4.1 и 2.1 следует:  $z = 24,5$ , а  $z' = 3,15$ . Найдим из (3.6):

$$z_c = \sqrt{24,5 \cdot 3,15} = 8,76 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}$$

Из материалов, имеющихся в табл. 2.1, наиболее близкое волновое сопротивление имеет магний, для которого  $z = 9,98$ , а скорость  $c_l = 5,74$ . Толщина слоя должна равняться

$$h_c = c_l / 4f = 5,74 / 4 \cdot 2,5 = 0,574 \text{ мм}$$

Необходима очень хорошая обработка соединяемых поверхностей и пластины магния. В противном случае промежуточные клеевые или жидкие слои изменят условия согласования.

Если обе среды одинаковы, а слой тонкий ( $h_c \ll \lambda_c$ ), то коэффициент отражения равен

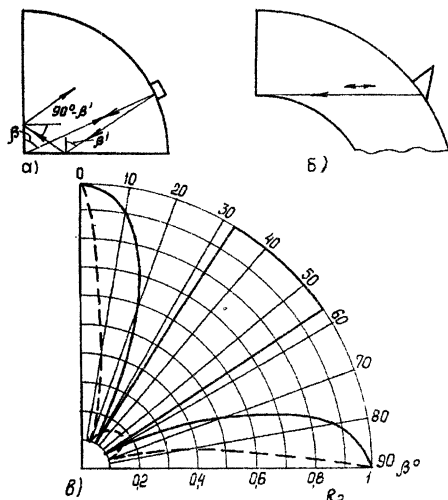


Рис. 3.3. Отражение от двугранного угла: а – схема для угла с плоскими гранями, б – с одной плоской и одной цилиндрической гранью, в – коэффициент двойного отражения в стали для продольных (---) и поперечных (—) волн.

$$\tilde{R}_c = \left[ 1 + \left( \frac{z_c \lambda_c}{zh_c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.7)$$

В табл. 3.2 сведены рассчитанные по формулам (3.5) и (3.7) значения  $\tilde{R}_c$  для слоев в стали, частота 2,5 МГц. Таблица показывает практически полное отражение от тончайшего воздушного зазора (0,00001 мм), имитирующего дефект. Заполнение зазора жидкостью резко улучшает прохождение.

Таблица 3.2.

Отражение от слоев в стали

Толщина слоя $h_c$ , мм	Коэффициенты отражения по энергии, %	
	для слоя воздуха	для слоя воды
$1 \cdot 10^{-6}$	86,67	$2,67 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-5}$	99,85	$2,67 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-4}$	99,998	$2,67 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-3}$	99,998	2,60
$\infty$	99,998	87,84

### 3.4. Отражение и преломление импульсов и пучков лучей

Рассматриваются варианты пучка параллельных лучей (плоская ограниченная волна) и веерообразно расходящегося от излучателя пучка лучей (квазисферическая волна). Амплитуда лучей в пределах пучка может изменяться. Первый вариант приблизительно реализуется в непосредственной близости от плоского излучателя, а второй – в его дальней зоне (см. п. 5.1).

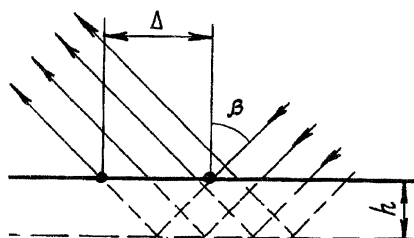


Рис. 3.4. Незеркальное отражение пучка лучей.

Пучок параллельных лучей, падающих под углом несколько большим первого критического, отражается незеркально: он смещается вдоль границы (рис. 3.4). Отражение как бы происходит от мнимой границы (показана пунктиром) на расстоянии  $h$  от действительной. Набег фазы на пути  $2kh/\cos\beta$  равен изменению фазы при отражении. Смещение  $\Delta$  тем больше, чем угол  $\beta$  ближе к критическому. Например, для преобразователя на частоту 2 МГц с углом преломления  $35^\circ$  смещение составляет приблизительно 5 мм, а для угла преломления  $45^\circ$   $\Delta = 0$ . При  $\beta \rightarrow \beta'''$  смещение  $\Delta \rightarrow \infty$ , что соответствует возникновению неоднородной волны.

Отражение и преломление расходящегося пучка для каждого луча происходит, как для ограниченной плоской волны. В результате некоторые лучи отражаются незеркально, а изменение амплитуд лучей пропорцио-

нально значениям  $R$  и  $D$  для данного угла падения. На рис. 3.5 показано связанное с этим изменение угла отражения  $\gamma_l$  продольных волн для границы сталь – воздух и углов преломления  $\alpha_l$  и  $\alpha_t$  для границы оргстекло (призма преобразователя) – сталь. Пьезопластина имела произведение диаметра на частоту 30 мм·МГц.

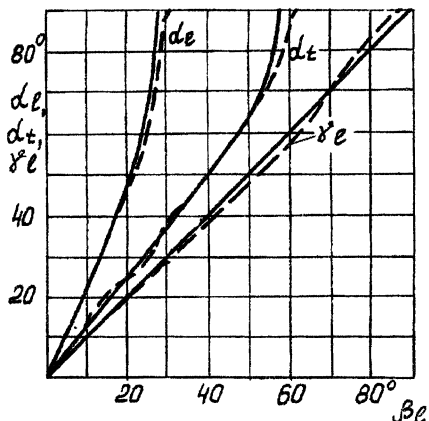


Рис. 3.5. Изменение направления лучей с максимальными амплитудами преломленной и отраженной волн при падении продольной волны:  $\gamma_l$  – угол отражения продольной волны;  $\alpha_l$ ,  $\alpha_t$  – углы преломления продольной и поперечной волн; расчет по закону синусов (—) и эксперимент (---).

Сглаживанию осцилляций способствует также загущение ультразвука в слое и уход волн из зоны соприкосновения сред при наклонном падении. По всем этим причинам для просветления оптимален слой толщиной в одну четверть длины волны, а, например, не три четверти длины волны.

### Пример 3.2.

Оценить направление луча с максимумом амплитудой для поперечных волн в стали. Ультразвук излучается через призму из оргстекла с углом  $\beta = 55^\circ$ . Пьезопластина  $2a = 12$  мм,  $f = 4$  МГц. Сравнить с углом, рассчитанным по закону синусов.

По закону синусов (3.1) угол преломления равен

$$\alpha_l = \arcsin[c_s \sin \beta / c_s] = \arcsin[3,23 \cdot \sin 55^\circ / 2,72] = 77^\circ,$$

что соответствует сплошной кривой  $\alpha_l$  на рис. 3.5. Однако, согласно штриховой кривой угол, соответствующий максимуму излучения, меньше. Определяющее расхождение лучей произведение  $2af = 15 \cdot 4 = 60$  мм·МГц в два раза больше, чем на рис. 3.9, поэтому направленность излучения выше. Интерполируя интервал между двумя кривыми, находим, что  $\beta_l = 75^\circ$ , отклонение угла от теоретического значения составит приблизительно  $2^\circ$ .

Значения углов отражения и преломления отклоняются от найденных по формуле (3.1) в сторону максимумов  $R$  и  $D$ . Явление тем сильнее, чем шире диаграмма направленности преобразователя (см. п. 5.1).

Экспериментально полученная кривая зависимости коэффициента прозрачности от угла падения волны (рис. 3.2) удовлетворительно совпадает с теоретической. Исключение составляет область вблизи угла  $\beta'$ , где согласно экспериментальным измерениям сглаживается вытекающий из теории минимум коэффициента прозрачности  $\tilde{D}_{ll'}$  (штрихпунктирная линия на рис. 3.2). Это явление также объясняется отличием падающей волны от плоской.

Конечная длительность импульса уменьшает осцилляции коэффициентов  $R$  и  $D$  для границ, разделенных слоем.

Сглаживанию осцилляций способствует также загущение ультразвука в слое и уход волн из зоны соприкосновения сред при наклонном падении. По всем этим причинам для просветления оптимален слой толщиной в одну четверть длины волны, а, например, не три четверти длины волны.

## 4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 4.1. Пьезоматериалы

В качестве электроакустических преобразователей (ЭАП) чаще всего используют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Они излучают благодаря обратному, а принимают благодаря прямому пьезоэффекту. Здесь рассматривается пластина из пьезоматериала (пьезопластина или пьезоэлемент) с электродами на больших поверхностях, т. е. направление электрического поля совпадает с толщиной пластины. Для возбуждения продольных волн применяют пластину, колеблющуюся по толщине, а поперечных – пластины со сдвиговыми или радиальными колебаниями (реально такие преобразователи используют очень редко).

В табл. 4.1 приведены важнейшие свойства наиболее распространенных или перспективных пьезоматериалов. Скорость звука  $c_1$  требуется для расчета толщины  $h_1$  пьезопластины, обладающей резонансными свойствами:

$$h_1 = \lambda_1/2 = c_1/2f \quad (4.1)$$

Для свободной (акустически ненагруженной) пластины в формулу входит скорость при постоянной электрической индукции, а в таблице указаны значения скоростей при постоянной напряженности электрического поля – они меньше в  $\sqrt{1 + \beta^2}$  раз и соответствуют сильно нагруженной пластине (коэффициент электромеханической связи  $\beta$  определен ниже).

Плотность  $\rho_1$  и вычисляемое через нее волновое сопротивление  $z_1 = \rho_1 c_1$  используют в расчетах по согласованию пьезопластины со средой, куда излучается ультразвук. Например, акустическую добротность (она определяет длительность колебаний после возбуждения) пластины вычисляют по приближенной формуле:

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{z_1}{z_0 + z_2}, \quad (4.2)$$

где  $z_0$  и  $z_2$  – волновые сопротивления сред, контактирующих с пластиной без промежуточных слоев.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  нужна для расчета емкости пьезопластины как плоского конденсатора (в системе единиц СИ)

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / h_1, \quad (4.3)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м диэлектрическая проницаемость вакуума,  $S$  – площадь пьезопластины. Здесь нужно использовать значение  $\epsilon$  для пластины с закрепленными гранями (деформация постоянна).

Пьезоэлектрическая постоянная  $e$  связывает электрическое напряжение генератора с механическим напряжением в пьезоматериале, а коэффициент электромеханической связи  $\beta$  определяет взаимную упругую и электрическую энергию при преобразовании. Он рассчитывается по формуле:

$$\beta = e / \sqrt{z_1 c_1 \epsilon_0 \epsilon} \quad (4.4)$$

Величина  $\beta^2$  характеризует роль пьезоматериала при определении чувствительности совмещенного преобразователя, т. е. работающего как излучатель и как приемник. Если излучение и прием выполняют пьезопластины из разных материалов, вместо  $\beta^2$  войдет величина

$$\frac{ee'}{c_1 z_1 \varepsilon' \varepsilon_0} \approx dh', \quad (4.5)$$

где штрихом ' отмечены значения, относящиеся к приемнику,  $d$  и  $h'$  — пьезо-константы, часто используемые вместо  $e$  при расчетах излучателя и приемника.

Таблица 4.1.

Свойства ↓	Свойства пьезоматериалов				
	Пьезоматериал → Кварц, Х-срез	ЦТС-19	Метаниобат свинца	ПВДФ	Ниобат лития
Скорость звука $c$ , $10^3 \text{ м/с}$	5,76	3...3,6	3,3	1,5...2,5	7,32
Плотность $\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$	2,65	7,4	6,2	1,3...1,8	4,64
Волновое сопротивление $z$ , $10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$	15,3	22...27	20,5	2...4,5	34
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$	4,5	1400... 2050	300	11...13	30
Пьезоэлектрическая постоянная $e$ , $\text{Кл/м}^2$	0,175	13...19	5,1	0,1...0,13 7	1,9
Коэффициент электромеханической связи $\beta$	0,095	0,4...0,5	0,38	0,1...0,14	0,22
Допустимая температура $t$ , °С	550	200	300	150	1160
Механическая добротность $Q_M$	50000	50	15	<15	>1000

Допустимая температура, при которой может надежно работать преобразователь, на  $20...50^\circ$  ниже температуры аллотропического превращения для кварца, точек Кюри для пьезокерамик, температуры размягчения для ПВДФ. Механическая добротность  $Q_M$  и тангенс угла потерь (не указан) характеризуют потери энергии в свободно колеблющейся пластине.

Максимальное электрическое напряжение  $U_m$ , которое может быть

подано на пластину от генератора, зависит от электрической прочности пьезоматериала, которая определяется напряженностью максимально допустимого электрического поля  $E_m$  ( в таблице не указано)

$$E_m = U_m / h_1 .$$

Для ЦТС-19  $E_m$  равно  $3 \cdot 10^6$  В·м, однако уже при  $0,3E_m$  наблюдается непропорциональный, замедленный рост амплитуды акустического сигнала с ростом напряжения генератора.

Из пьезоматериалов наибольшее применение получил цирконат-титанат свинца (ЦТС). Его свойства даны по ГОСТу, а остальных материалов – по литературным источникам.

Кварц применяют, если необходимо обеспечить высокостабильные измерения с постоянными свойствами по всей поверхности пластины и при изменении температуры.

Метаниобат свинца имеет низкую механическую добротность и его можно применять без демпфера. Кроме того, у него очень малы радиальные колебания, являющиеся в других пьезоматериалах источниками помех. Ниобат лития имеет высокую температуру точки Кюри ( $1210^\circ\text{C}$ ).

Поливинилденфторид (ПВДФ) – эластичная полимерная пленка. Ей можно придать практически любую форму. Ее небольшое волновое сопротивление облегчает акустическое согласование с иммерсионной жидкостью. Радиальные колебания близки к нулю, механическая добротность очень низкая. Есть пленки на очень высокие частоты (до 100 МГц), так как их эластичность предохраняет от разрушения, свойственного тонким пластинам из других (хрупких) материалов.

#### Пример 4.1.

Рассчитать полуволновую толщину, электрическую емкость и акустическую добротность пьезопластины из ЦТС-19 на частоту  $f = 2,5$  МГц, диаметром  $2a = 12$  мм, излучающую в воду и в сталь. Демпфер с волновым сопротивлением  $z_0 = 6 \cdot 10^6$  Па·с/м. Какое максимальное напряжение от генератора можно подавать на такую пластину?

Толщина пластины согласно (4.1)

$$h_1 = 3,3 / (2 \cdot 2,5) = 0,66 \text{ мм} = 0,00066 \text{ м}.$$

Электрическая емкость согласно (4.3)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{\text{ст}} a^2 / h_1 = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,725\pi \cdot 0,006^2 / 0,00066 = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Акустическая добротность для воды согласно (4.2)

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{24 \cdot 10^6}{1,49 \cdot 10^6 + 6 \cdot 10^6} = 5.$$

Для стали расчет дает  $Q_a = 0,8$ . Пластина нагружена сильнее, что привело к уменьшению добротности. Максимальное напряжение генератора определяем по формуле:

$$U_m = 0,3E_m h_1 = 0,3 \cdot 3000 \cdot 0,66 = 594 \text{ В}.$$

## **4.2. Согласование ПЭП с дефектоскопом**

Ниже приведены формулы для ПЭП, состоящего из пьезопластины, нагруженной на протяженные среды (см. п. 1.1) без переходных слоев (рис. 4.1). Одна из сред – демпфер, другая – изделие, иммерсионная жидкость или

призма преобразователя. Обычно между ПЭП и протяженной средой имеются промежуточные тонкие слои: протектор, клей, контактная жидкость. Их параметры также входят в расчетные формулы для ПЭП, но здесь они не рассматриваются. Комплексное электрическое сопротивление ПЭП нужно знать для оптимального его согласования с генератором и усилителем дефектоскопа. На рис. 4.1,а показана довольно часто встречающаяся схема включения ПЭП. Сигнал генератора считаем синусоидальным. На рис. 4.1,б ПЭП представлен в виде эквивалентного комплексного электрического сопротивления:

$$Z_{\Pi} = Z_{AB} = Z_C + Z_p.$$

Оно состоит из последовательно включенных емкостного сопротивления пьезопластины  $Z_C$  и пьезосопротивления  $Z_p$ , обусловленного пьезосвойствами. Возможна также параллельная схема включения этих двух сопротивлений (рис. 4.1,в), но тогда  $Z_p$  будет иным. Емкостное сопротивление равно:

$$Z_C = 1/j\omega C, \quad (4.7)$$

где  $C$  определяется по формуле (4.3). Комплексное пьезосопротивление можно разбить на две составляющих: активную и реактивную, как показано на рис. 4.1,г:

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{X_p}. \quad (4.8)$$

При нагрузке на протяженные среды приближенные значения этих составляющих

$$R_p = \frac{\beta^2}{\omega C k_1 h_1} \cdot \frac{4z_1}{z_0 + z_2}; \quad (4.9)$$

$$X_p = 4 \frac{\beta^2}{j\omega C} \cdot \frac{\operatorname{tg}(0,5k_1 h_1)}{0,5k_1 h_1} \cdot \left[ \frac{z_0 + z_2}{z_1} - 4 \right]^{-1} \quad (4.10)$$

Здесь  $k_1 = 2\pi/\lambda_1 = \omega_1/c_1$  — волновое число в материале пластины. Формулы (4.9) и (4.10) справедливы вблизи  $\omega = \omega_a = \pi c_1/h_1$ . Для ненагруженной пластины  $z_2 = z_0 = 0$  справедливы точные формулы:

$$R_p = 0; \quad X_p = \frac{\beta^2}{j\omega C} \cdot \frac{\operatorname{tg}(0,5k_1 h_1)}{0,5k_1 h_1}. \quad (4.11)$$

Эквивалентное сопротивление становится чисто реактивным:

$$Z_{\Pi} = Z_C + X_p.$$

На антирезонансной частоте  $\omega = \omega_a$  (соответствует полутолщине пластины) оно обращается в бесконечное индуктивное сопротивление, а на резонансной —

$$\omega_p \approx \omega_a \left[ 1 - (2\beta/\pi)^2 \right],$$

$Z_{II} = 0$ . Например, для кварца  $f_p = 0,996 f_a$ , а для ЦТС-19  $f_p = 0,935 f_a$ .

Пример 4.2.

Для условий, указанных в примере 4.1, рассчитать активное электрическое сопротивление.

Согласно (4.9) для излучения в воду

$$R_p = \frac{\beta^2}{\pi^2 \rho c} \frac{2z_1}{z_2 + z_0} = \frac{0,45^2}{\pi^2 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 2,6 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{2 \cdot 24 \cdot 10^6}{6 \cdot 10^6 + 1,49 \cdot 10^6} = 20,2 \text{ Ом.}$$

Для стали найдем  $R_p = 3,6 \text{ Ом}$ ; сопротивление уменьшилось и при том же напряжении генератора отдаваемая им мощность возросла.

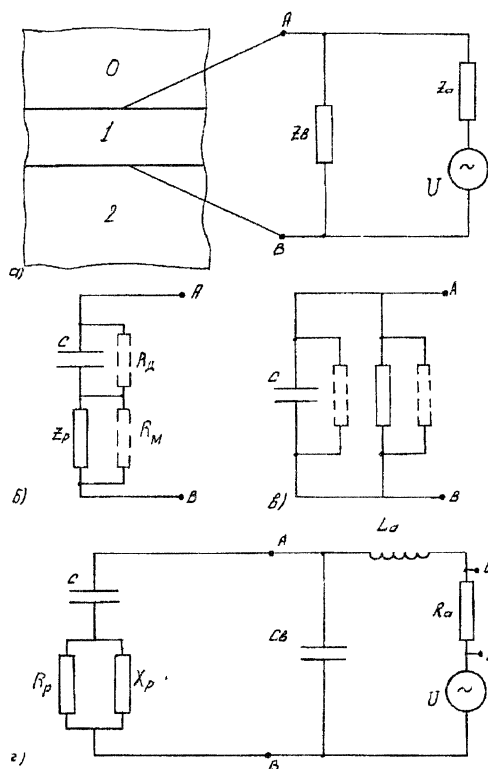


Рис. 4.1. Схемы расчета пьезоэлектрического преобразователя.

На рис. 4.1,з показана схема последовательного включения пьезопластины с электрическим контуром генератора. Комплексное сопротивление  $Z_b$  представлено емкостью  $C_b$ , включающей емкость кабеля, соединяющего ПЭП с дефектоскопом. Комплексное сопротивление  $Z_b$  представлено в виде индуктивности  $L_a$  и активного сопротивления  $R_a$ . При совмещенной схеме включения с  $R_a$  снимают сигнал на усилитель дефектоскопа (клеммы  $EF$ ).

Индуктивность  $L_a$  обычно подбирают так, чтобы скомпенсировать все реактивные сопротивления на некоторой частоте  $\omega_0 = \omega_a$ . При этом достигается наибольшее электрическое напряжение на эквивалентном сопротивлении  $R_p$ . Если  $L_a$  подобрана неверно или если компенсация нарушилась из-за изменения пьезосопротивления  $Z_p$  под влиянием изменившейся акустической нагрузки (например, за счет качества акустического контакта), то условия оптимальности достигаются автоматиче-

тоте  $\omega_0 = \omega_a$ . При этом достигается наибольшее электрическое напряжение на эквивалентном сопротивлении  $R_p$ . Если  $L_a$  подобрана неверно или если компенсация нарушилась из-за изменения пьезосопротивления  $Z_p$  под влиянием изменившейся акустической нагрузки (например, за счет качества акустического контакта), то условия оптимальности достигаются автоматиче-



ски: смещается рабочая частота генератора от  $f_a$  к  $f_p$  (уменьшается на несколько процентов). Это вызывает изменение  $X_p$  и автокомпенсацию реактивных сопротивлений. Амплитуда излучаемого сигнала при этом несколько уменьшается.

Сопротивления потерь, показанные на рис. 4.1, б штриховыми линиями определяют внутреннее активное сопротивление пластины, из-за которого  $Z_p$  не может стать чисто реактивным. Различают диэлектрические  $R_d$  и механические  $R_M$  потери

$$R_d = 1/(\omega C t g \delta); \quad R_M = 4\beta^2 Q_M / (\pi^3 f C). \quad (4.12)$$

Здесь  $t g \delta$  — тангенс угла потерь,  $Q_M$  — механическая добротность, указанная в табл. 4.1.

#### Пример 4.3.

Для условий, сформулированных в примерах 4.1 и 4.2, рассчитать сопротивления потерь. Для ЦТС-19  $t g \delta = 0,035$ .

Согласно (4.12)

$$R_d = 1/(2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 2,6 \cdot 10^{-9} \cdot 0,035) = 700 \text{ Ом};$$

$$R_M = 4 \cdot 0,45^2 \cdot 50 / (\pi^3 2,6 \cdot 10^{-9}) = 190 \text{ Ом}.$$

Механические потери сильнее шунтируют пьезосопротивление, чем диэлектрические емкостные.

### 4.3. Достижение максимальной чувствительности и широкополосности ПЭП

Повышение чувствительности требуется для получения сигналов большой амплитуды, а расширение полосы частот — для формирования коротких импульсов. Чувствительность преобразователя описывает передаточная функция. При излучении она позволяет найти акустический сигнал по известному электрическому, а при приеме — наоборот. Далее здесь используется функция двойного преобразования, описывающая отношение принятого и посланного электрических сигналов и равная произведению передаточных функций при излучении и приеме.

Передаточная функция зависит от частоты. Ее максимум достигается на рабочей частоте и называется коэффициентом преобразования. На антирезонансной частоте пьезопластины, совпадающей с  $\omega_0$  — резонансной частотой электрического контура, передаточная функция двойного преобразования определяется формулой

$$|K| = \frac{32}{\pi^3} \beta^2 \frac{z}{z_1} \cdot \frac{Q_3 Q_a^2}{\left(1 + \frac{8}{\pi^2} \beta^2 Q_3 Q_a\right)^2}. \quad (4.13)$$

Здесь  $Q_a$  и  $Q_3$  — акустическая (4.2) и электрическая добротности:

$$Q_3 = \frac{1}{\omega_0 R_a C}.$$

В режиме приема считают, что генератор отсутствует (запунтирован).

Максимального значения  $|K| = K_m$  достигает при  $Q_3 \text{opt} = \frac{\pi^2}{8\beta^2 Q_a}$ , тогда

$$K_m = \frac{0,5z_2}{z_2 + z_0}. \quad (4.14)$$

Оно не зависит от пьезоэлектрических констант пьезопластины. При отсутствии демпфера ( $z_0 = 0$ )  $K_m = 0,5$  и уменьшается с ростом  $z_0$ . Значение  $K_m$  можно увеличить введением между пьезопластиной и протяженной средой четвертьволнового протектора, у которого волновое сопротивление  $z_{np} = \sqrt{z_1 z_2}$ . Тогда

$$K_m = \frac{0,5z_1}{z_1 + z_0}.$$

При  $z_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$  и излучении в воду  $K_m$  преобразователя из ЦТС от введения просветляющего протектора увеличивается приблизительно в 4 раза.

Максимальная полоса пропускания  $\Delta f/f_0$  (где  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  на уровне 6 дБ от максимума) достигается при  $Q_3 = Q_3 \text{opt}$ . Подбор электрической добротности путем изменения  $R_a$  позволяет расширить полосу пропускания (широкополосность) до 0,5 (рис. 4.2). При еще больших значениях  $Q_3$  расчет  $|K|$  по формуле (4.13) дает минимум, а максимумы достигаются на частотах вблизи 0,8 и 1,2  $\omega_0$ . Теоретическое значение  $|K|$  при максимальной широкополосности близко к  $K_m$ , рассчитанному по формуле (4.14), однако реальные значения в 2 – 3 раза меньше.

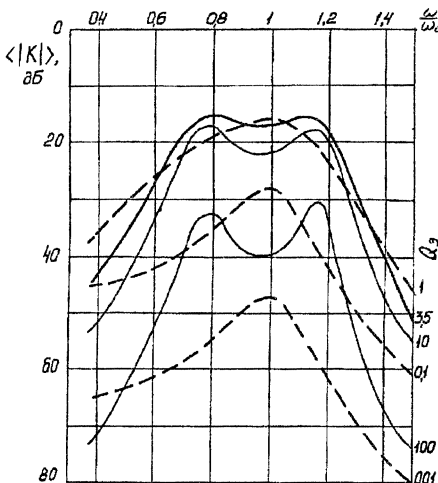


Рис. 4.2. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя; расчет по передаточной функции двойного преобразования. Материал пьезоэлемента ЦТС-19, демпфер с  $z_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ , излучение в оргстекло. Параметр кривых — электрическая добротность  $Q_3$ .

Для формирования очень коротких импульсов (длительностью в 0,5 – 1 периода) или для вариации

частоты колебаний в широком диапазоне применяют особоширокополосные ПЭП с отношением частот  $f_{\max}/f_{\min} \geq 2$ . Такую большую широкополосность получают, применяя ПЭП с пьезопластиной переменной толщины или очень сильно демпфированный (апериодический) ПЭП.

#### 4.4. Бесконтактные преобразователи

В табл. 4.2 перечислены применяемые в производственных или лабораторных условиях способы бесконтактного возбуждения акустических колебаний в объекте контроля и указаны их ориентировочные чувствительности по сравнению с возбуждением, приемом и возбуждением-приемом (двойное преобразование) колебаний контактным способом для стали. В иммерсионном способе относительная чувствительность двойного преобразования фактически не превышает 0,1 в связи с необходимостью повышенного демпфирования ПЭП.

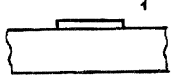
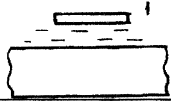


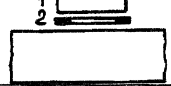
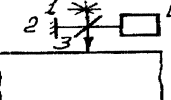
В воздушно-акустическом способе связи контактной средой между ПЭП 1 и изделием является воздух. Основные причины низкой чувствительности – плохое согласование ПЭП с газом и большой коэффициент отражения от границы воздух-сталь (см. табл. 3.1). Способ применяют для контроля материалов с малым волновым сопротивлением типа пластмасс, резины.

Электростатический способ использует пондеромоторное взаимодействие пластины конденсатора 1 с поверхностью изделия, как со вторым электродом. Для повышения чувствительности и линеаризации преобразования служит электрет 2. Способ применяют для исследования колебаний поверхности объекта контроля.

Электромагнитно-акустический (ЭМА) способ использует эффекты магнитострикции, лоренцевского и магнитного взаимодействий катушки с переменным током 2 и токопроводящего изделия в поле электромагнита 1. Различные конструкции ЭМА-преобразователей позволяют возбуждать все возможные типы волн, в частности, конструкция, показанная на схеме, возбуждает поперечную волну нормальную к поверхности. Способ применяют на практике в случаях, когда не нужна высокая чувствительность: слежение за донным сигналом, толщинометрия.

Оптический (лазерный) способ при излучении использует эффекты импульсного расширения объема вблизи поверхности изделия под действием нагрева и испарения вещества с поверхности (на ОК при испарении действует реактивная сила). Для приема применяют интерферометр, показанный на схеме. Излучение лазера 1 расщепляется полупрозрачным зеркалом 3, отражается от зеркала 2 и поверхности изделия, колеблющейся под действием приходящей ультразвуковой волны. Оба интерферирующих луча принимаются фотоумножителем 4. Способ используют для очень точного измерения скорости. Лазерное возбуждение применяют для дефектоскопии при высоких температурах ОК. Возможно сочетание лазерного возбуждения с неоптическими способами приема.

Таблица 4.2.

Чувствительность способов возбуждения и приема		Чувствительность преобразования		
Способ		излучения	приема	двойного
Название	Схема			
Контактный пьезоэлектрический		1	1	1
Иммерсионный пьезоэлектрический		0,3	0,3	0,1
Воздушно-акустический		$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Электростатический		$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Электромагнитно-акустический (ЭМА)		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Оптический (лазерный)		1	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

## 5. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Поле излучения определяет акустический сигнал в произвольной точке  $B$  пространства, а поле излучения-приема – эхосигнал от ненаправленного отражателя в этой точке. Оно обычно пропорционально квадрату поля излучения.

### 5.1. Прямой преобразователь

В поле круглого, квадратного и других ПЭП с отношением размеров в плоскости, перпендикулярной акустической оси, не более 2/1 существуют две различные зоны: ближняя, где амплитуда с расстоянием изменяется немонотонно, и дальняя, в которой она монотонно убывает. Граница между ними приближенно определяется формулой:

$$N = S/(\pi\lambda), \quad (5.1)$$

где  $N$  – расстояние вдоль оси  $x$ , совпадающей с акустической осью преобразователя,  $S$  – его площадь,  $\lambda$  – длина волны.

На рис. 5.1 показан общий вид поля излучения-приема круглого (дискообразного) преобразователя в безразмерных координатах  $x/N$  и  $\rho/a$  ( $\rho$  – расстояние точки  $B$  от оси,  $a$  – радиус преобразователя). Кривые справа со-

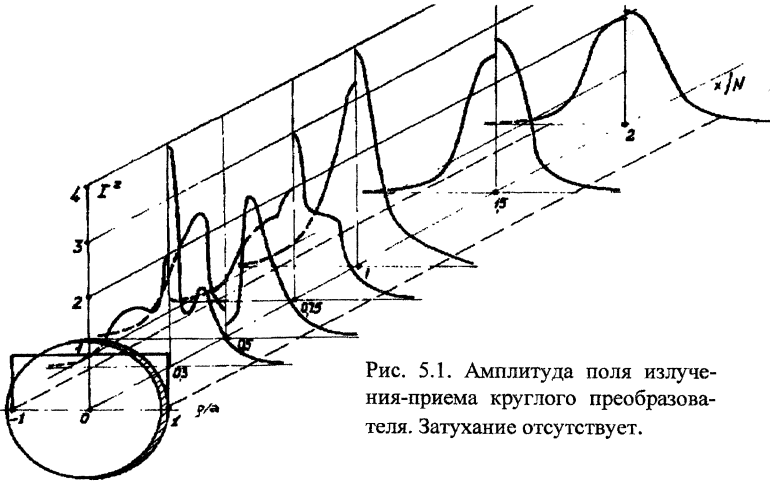


Рис. 5.1. Амплитуда поля излучения-приема круглого преобразователя. Затухание отсутствует.

ответствуют импульсу с показателем длительности  $\gamma = 0,05$ , а слева – с  $\gamma = 0,17$ . При коротких импульсах экстремумы сглаживаются. На рис. 5.2 представлено поле излучения такого же преобразователя в виде линий равного ослабления.

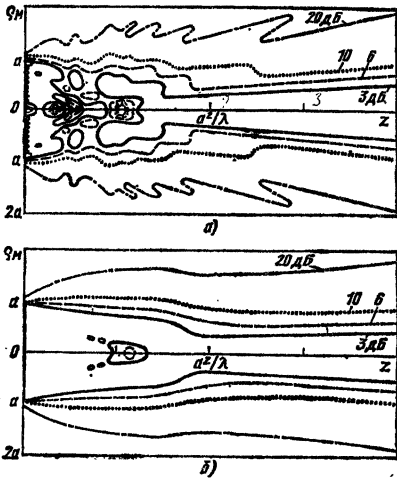


Рис. 5.2 Поле излучения круглого преобразователя в виде линий равного ослабления показателя длительности  $\gamma = 0,014$  (а) и  $0,17$  (б).

Для импульсов большой длительности поле излучения вдоль оси  $x$  круглого преобразователя (рис. 5.3,а) описывает формула:

$$P = P_0 I; \quad |I| = 2e^{-\delta x} \left| \sin \left[ 0,5k \left( \sqrt{x^2 + a^2} - x \right) \right] \right| \approx 2e^{-2\delta x} \left| \sin \left( ka^2 / 4x \right) \right|, \quad (5.2)$$

где  $P$  – акустическое давление в точке  $B$  поля,  $P_0$  – давление на поверхности излучателя,  $\delta$  – коэффициент затухания,  $k$  – волновое число. Наиболее удаленный от излучателя максимум определяет границу ближней зоны:

$$N = \frac{4a^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{a^2}{\lambda}. \quad (5.3)$$

Приближенная часть соответствует  $a \gg \lambda$  и совпадает с (5.1).

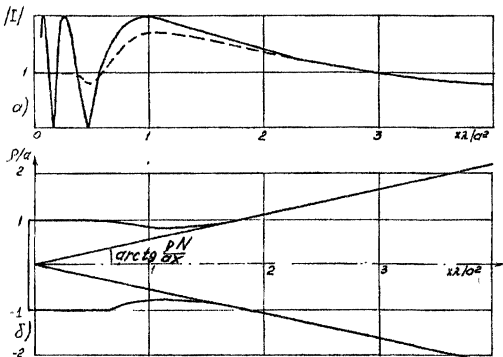


Рис.5.3. Амплитуда поля излучения круглого преобразователя: а – поле на оси (— - непрерывное излучение, --- импульс с показателем длительности  $\gamma = 0,15$ ), б – схематическое изображение поля. Затухание отсутствует, коэффициент в (5.5)  $n = 0,55$ .

В дальней зоне на оси преобразователя амплитуда поля излучения  $P_m$  монотонно ослабляется, а в стороне от оси поле имеет вид пучка лучей, расходящегося из центра излучателя, и описывается диаграммой направленности  $\Phi$  в функ-

ции от углов  $\theta$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через оси  $Y$  и  $Z$ :

$$P_m = P_0 S / (\lambda r); \quad P = P_m \Phi(\theta_y, \theta_z). \quad (5.4)$$

В табл. 5.1 приведены параметры диаграмм направленности излучателей с различной формой пьезопластин. Угол раскрытия основного лепестка (рис. 5.3, б), где сосредоточено около 80% энергии, определяется формулой:

$$\theta' = \arcsin(n\lambda/a). \quad (5.5)$$

Коэффициент  $n$  зависит от формы преобразователя и того, на каком уровне от максимума рассматривается раскрытие диаграммы:  $\Phi = 0; 0,1; \sqrt{0,1}; 0,5; \sqrt{0,5}$ . Значения  $\sqrt{0,1}$  и  $\sqrt{0,5}$  используют, когда рассматривают на уровнях 0,1 и 0,5 раскрытие диаграммы направленности излучения-приема, которая пропорциональна  $\Phi^2$ . Боковые лепестки диаграммы направленности являются источниками помех. Наибольший их уровень соответствует первому боковому лепестку, амплитуда которого также указана в таблице.

Таблица 5.1.

Параметры диаграмм направленности для пьезопластин различной формы.

Форма пьезопластины	Диаграмма направленности $\Phi(X)$	Аргумент $X$	Коэффициент $n$ для раскрытия основного лепестка на уровне $ \Phi  =$					Максимум бокового лепестка
			0	0,1	$\sqrt{0,1}$	0,5	$\sqrt{0,5}$	
Диск, диаметр $2a$	$ 2J_1(X)/X $	$ak \sin \theta$	0,61	0,55	0,45	0,35	0,26	0,14
Эллипс, полуоси $a_y$ и $a_z$	$ 2J_1(X)/X $	$(a_y^2 \cos^2 \varphi + a_z^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} \times k \sin \theta$	0,61	0,55	0,45	0,35	0,26	0,14
Тонкое кольцо, диаметр $2a$	$ J_0(X) $	$ak \sin \theta$	0,39	0,35	0,28	0,24	0,18	0,40
Прямоугольник, стороны	$\left  \frac{\sin X_y}{X_y} \frac{\sin X_z}{X_z} \right $	$a_y k \sin \theta_y; a k \sin \theta$	0,50	0,45	0,38	0,30	0,22	0,21

Угол  $\varphi$  в формуле таблицы для эллиптического преобразователя определяет плоскость, в которой требуется рассчитать диаграмму направленности. Для плоскостей, проходящих через оси эллипса  $\varphi = 0^\circ$  и  $90^\circ$ , поэтому

$$X = a_y k \sin \theta_y, \text{ и } X = a_z k \sin \theta_z.$$

Ввиду того, что диаграммы направленности при излучении и излучении-приеме для круглого и прямоугольного преобразователей часто используют в расчетах, они приведены на рис. 5.4 и 5.5 в относительных единицах и децибелах. Штриховой линией на рис. 5.4 показана диаграмма направленности при излучении круглым преобразователем импульсов, для которых показатель длительности равен 0,13 (верхняя) и 0,19 (нижняя). При этом минимумы сглаживаются, форма кривых в нижней части меняется, поэтому ширину диаграммы направленности  $\Phi$  обычно оценивают на уровне не ниже 0,3 ( $\Phi^2 = 0,1$ ), где этих изменений нет.

Поле излучения круглого преобразователя в пределах основного лепестка можно описать аналитически приближенными формулами:

$$\Phi = e^{-0,142X^2}; \quad \Phi = 1,32^{-X^2}, \quad (5.6)$$

где  $X = ak \sin \theta$ . Они особенно хорошо совпадают с кривыми для излучения коротких импульсов.

При больших значениях углов  $\theta$  вводят множитель, учитывающий направленность элементарного источника излучения продольных волн. В результате вместо (5.4) записывают:

$$P = P_m \Phi(\theta) \cos \theta, \quad (5.7)$$

где  $\Phi$  – ранее определенная диаграмма направленности.

Пример 5.1.

Сравнить преобразователи с пластинами разной формы с точки зрения наилучшей направленности полей излучения-приема в стали. Частота  $f = 2,5$  МГц, максимальный размер пластины  $2a = 20$  мм.

Направленность поля излучения-приема определяет функция  $\Phi^2$ . Найдем углы раскрытия основного лепестка на уровне  $\Phi^2 = 0,1$  или  $|\Phi| = \sqrt{0,1}$  по формуле (5.5) и данным табл. 5.1 для круглой, кольцеобразной и прямоугольной пластин:

$$\theta' = \arcsin[0,45c/(fa)] = \arcsin[0,45 \cdot 5,92/(2,5 \cdot 10)] = 6,1^\circ;$$

$$\theta' = \arcsin[0,28 \cdot 5,92/(2,5 \cdot 10)] = 3,8^\circ;$$

$$\theta' = \arcsin[0,37 \cdot 5,92/(2,5 \cdot 10)] = 5,0^\circ.$$

Строго говоря, максимальным размером прямоугольной пластины является не сторона, а диагональ. Для квадратной пластины с диагональю 20 мм (полусторона  $a = 20/\sqrt{2} = 7,07$  мм) получим:

$$\theta' = \arcsin[0,28 \cdot 5,92/(2,5 \cdot 7,07)] = 7,1^\circ;$$

Таким образом, квадратная пластина обеспечивает наилучшую, а кольцеобразная – наилучшую направленность. Но кольцеобразная пластина обладает меньшей полезной площадью ( $a$ , следовательно, и меньшей чувствительностью), чем круглая такого же диаметра; для нее уровень боковых лепестков в 0,4/0,14=2,9 раз выше, поэтому обычно применяют круглые пластины.

## 5.2. Поле преобразователя с акустической задержкой

Акустическая задержка – среда, помещаемая между пьезоэлементом и объектом контроля, которая задерживает фронт волны на одинаковые (плоскопараллельная задержка) или разные (призма) промежутки времени.



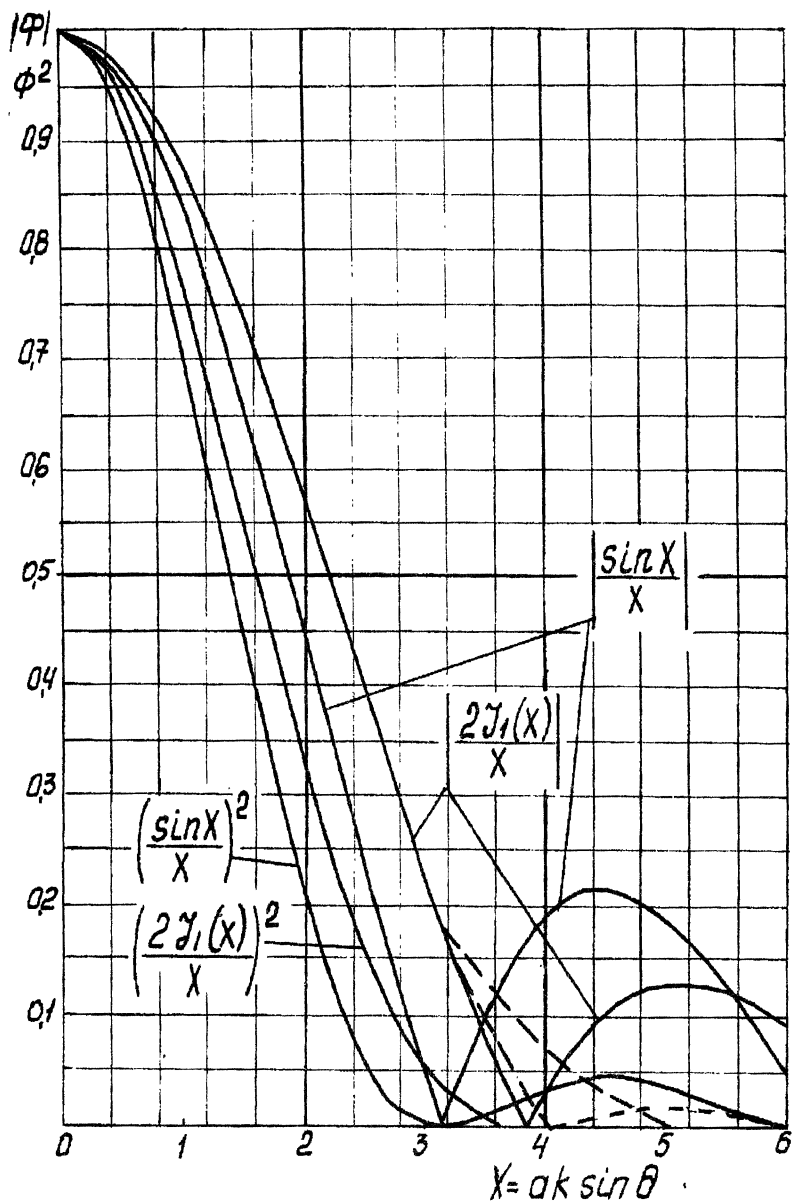


Рис. 5.4. Диаграммы направленности круглого и прямоугольного преобразователей в относительных единицах.

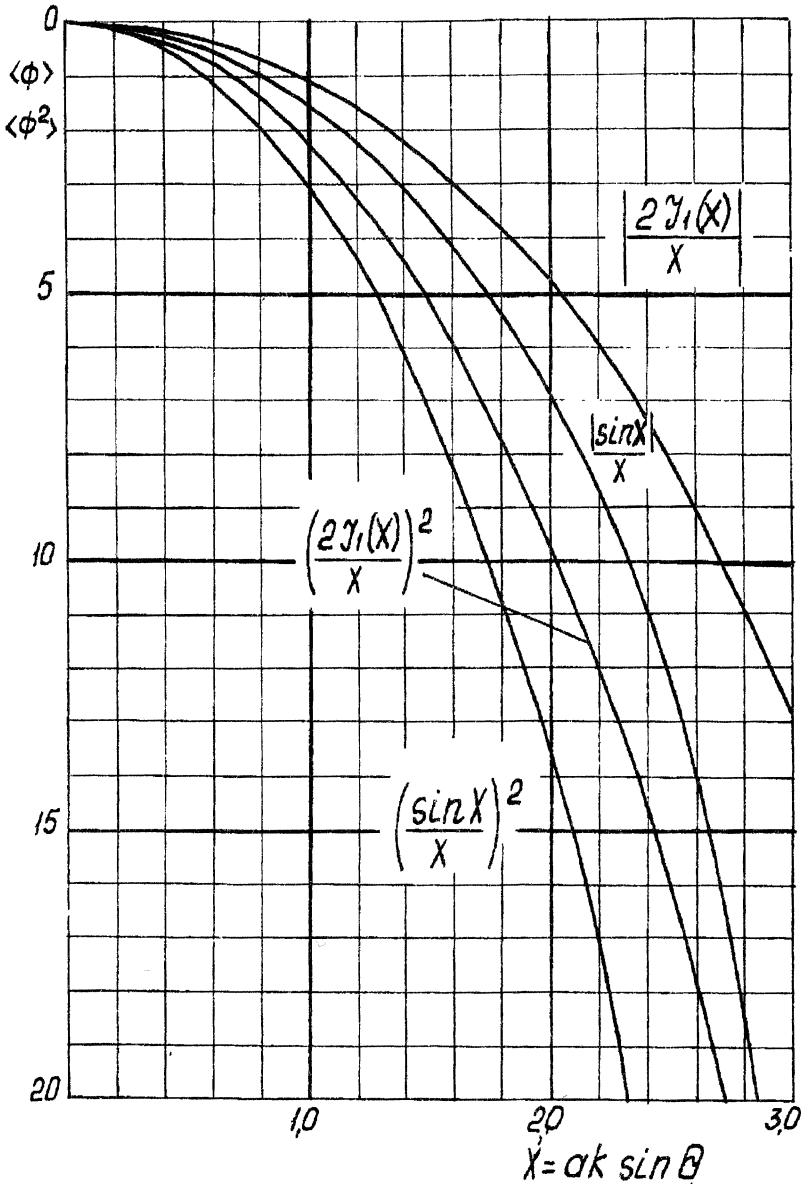


Рис. 5.5. Диаграммы направленности круглого и прямоугольного преобразователей в децибелах.

В последнем случае призма обеспечивает наклонный ввод различных типов волн. Обычно скорость звука в задержке меньше, чем в изделии. Акустической осью  $ON$  такого ПЭП в изделии (рис. 5.5,б) называют преломленную

акустическую ось пьезопластины  $O_A O$ ; точка ее преломления в задержке  $O$  – точкой выхода; эту же точку в ОК – точкой ввода (при бесконечно тонком контактном слое точки совпадают); центральный луч – направление максимума излучения (он может не совпадать с акустической осью, как будет видно на рис. 3.9); угол ввода приблизительно соответствует преломлению этого

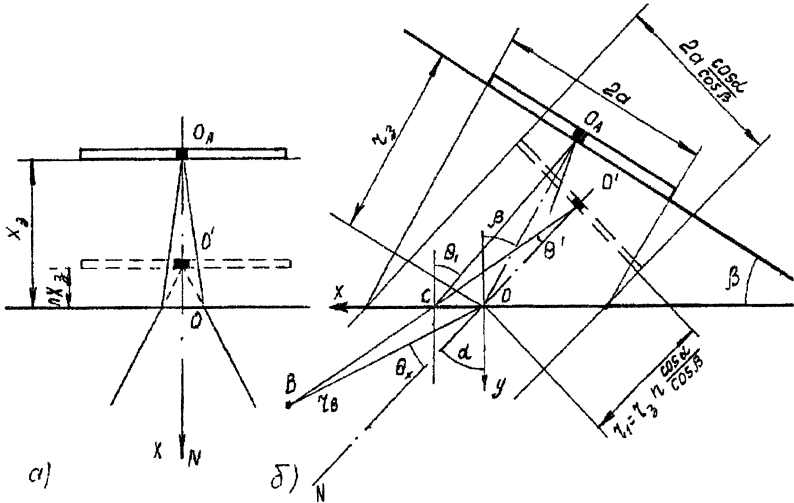


Рис. 5.6. Мнимые пьезоэлементы для преобразователей с плоской (а) и наклонной (б) задержками.

луча; основная плоскость – плоскость преломления акустической оси; дополнительная плоскость перпендикулярна основной и также проходит через акустическую ось. Приведенное определение понятия акустической оси отличается от ГОСТ 23829-85, однако оно точнее соответствует физике явления.

Акустическое поле рассчитывают как для мнимой пьезопластины, показанной на рис. 5.6 штриховыми линиями. Для дискообразного ПЭП с плоскопараллельной задержкой (рис. 5.6,а) поле излучения вдоль оси:

$$P = 2P_0 D \left| \sin \left[ 0,25ka^2 / (x' + nx_3) \right] \exp \left[ -(\delta x' + \delta_3 x_3) \right] \right| \quad (5.8)$$

Границу ближней зоны определяют из условия:

$$x' + nx_3 = a^2 / \lambda.$$

Здесь  $x_3$  – толщина акустической задержки,  $x'$  – расстояние вдоль оси в излучателе,  $n = c_3 / c$  – отношение скоростей звука в задержке и излучателе,  $D \approx \sqrt{\bar{D}}$  – коэффициент прозрачности,  $k$ ,  $\lambda$  – волновое число и длина волны в излучателе,  $\delta$  и  $\delta_3$  – коэффициенты затухания в излучателе и задержке.

Для наклонного ПЭП (рис. 5.6,б) в дальней зоне поле излучения в основной плоскости описывается формулой

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \frac{S \cos \alpha}{\lambda r_{O'A} \cos \beta} D(\theta_1) \Phi \left( a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} k \sin \theta_x \right) \exp[-(\delta r' + \delta_3 r_3)] \approx \\
 &\approx P_m \frac{S \cos \alpha}{\lambda r \cos \beta} \Phi \left( a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} k \sin \theta_x \right) \exp(-\delta r'). \quad (5.9)
 \end{aligned}$$

В дополнительной плоскости мнимая пластина имеет диаметр  $2a$ :

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \frac{S \cos \alpha}{\lambda r_{O'B} \cos \beta} D(\beta) \Phi(ak \sin \theta_z) \exp[-(\delta r' + \delta_3 r_3)] \approx \\
 &\approx P_m \frac{S \cos \alpha}{\lambda r \cos \beta} \Phi(ak \sin \theta_z) \exp(-\delta r'). \quad (5.10)
 \end{aligned}$$

Здесь  $r_{O'B} \approx \eta_1 + r' = r$  — расстояние между центром мнимого излучателя  $O'$  и точкой  $B$ ;  $\eta_1 = r_3 n \cos \alpha / \cos \beta$  — расстояние от  $O'$  до точки выхода  $O$ ;  $r'$  — путь  $OB$  в изделии;  $\beta$  и  $\alpha$  — углы падения и преломления для акустической оси;  $\theta_1$  — угол падения луча  $O_A C$ , соответствующего лучу  $O'B$ ;  $\theta_x \approx \theta'$  и  $\theta_z$  — углы между лучом  $O'B$  и акустической осью в основной и дополнительной плоскостях;  $P_m = P_0 D(\beta) \exp(-\delta_3 r_3)$  — постоянный множитель, приблизительно равный амплитуде поля на границе призма-изделие. Приближенные части формул (5.9) и (5.10) верны при  $r' \gg \eta_1$  и  $D(\theta_1) \approx D(\beta)$ .

Длина ближней зоны наклонного преобразователя, отсчитываемая от центра мнимой пьезопластины, как области, за пределами которой формируется диаграмма направленности, в основной и дополнительной плоскостях, определяется формулами:

$$N_O = r'_N + \eta_1 = S \cos \alpha / \cos \beta \pi \lambda; \quad N_D = r''_N + \eta_1 = S / \pi \lambda, \quad (5.11)$$

где  $r'_N$  и  $r''_N$  — длина ближней зоны в основной и дополнительной плоскостях, отсчитываемая от точки ввода в ОК. Для оценок рекомендуется вторая из этих формул, ею также определяется положение последнего (считая от пьезопластины) максимума эхосигнала на оси преобразователя.

Пример 5.2.

Построить диаграмму направленности в плоскости падения в стали для наклонного излучателя с призмой  $\beta = 40^\circ$ , диаметр пьезопластины  $2a = 17,4$  мм, частота  $f = 1,8$  МГц, скорости волн: продольной в оргстекле  $c_3 = 2,72$  мм/мкс, поперечной в стали  $c = 3,25$  мм/мкс (взяты фактические данные из экспериментальных исследований, выполненных Х. Вюстенбергом, за которые авторы приносят ему искреннюю благодарность).

Находим угол преломления по формуле (3.1):

$$\alpha = \arcsin(c \sin \beta / c_3) = \arcsin(3,25 \sin 40^\circ / 2,72) = 50,2^\circ.$$

С учетом уменьшения размеров мнимой пьезопластины множитель в аргументе функции  $\Phi$  в формуле (5.9) будет равен:

$$ka' = 2\pi f a \cos \alpha / (c \cos \beta) = 2\pi 1,8 \cdot 8,7 \cos 50,2^\circ / (3,25 \cos 40^\circ) = 23,3.$$

По кривой  $2J_1(x)/x$  (рис. 5.3) строим диаграмму направленности излучателя (рис. 5.6, а, штриховая линия). Поскольку множитель  $D(\theta_1)$  в формуле (5.9) в данном случае практически не меняется, воспользуемся приближенной частью этой формулы. Результат удовлетворительно совпал с экспериментальной сплошной кривой.

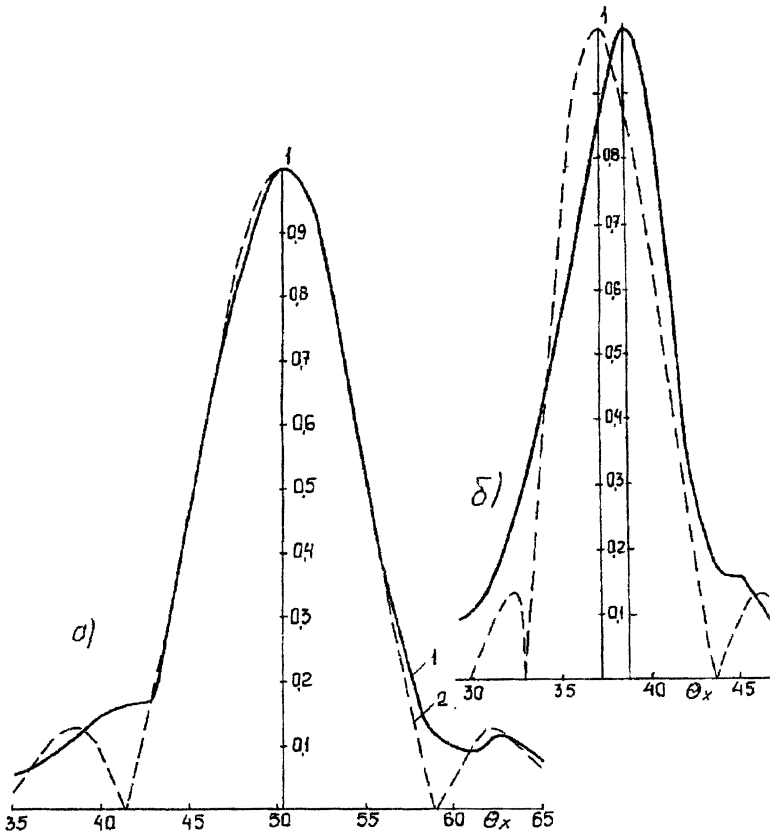


Рис. 5.7. Диаграммы направленности излучателей с призмами  $\beta = 40^\circ$  (а) и  $30^\circ$  (б).

Формула (5.9) верна для углов  $\beta$ , отличающихся от критических значений на 5 и более градусов. На рис. 5.6,б показан результат построения с ее помощью диаграммы направленности для ПЭП с призмой  $30^\circ$  и остальными параметрами, близкими к примеру 5.2. Расчетная штриховая кривая отличается от сплошной экспериментальной, несмотря на учет изменения коэффициента прозрачности с углом  $\theta$ . Хорошо видно отличие угла преломления, вычисленного по (3.1), от экспериментального угла ввода, как отмечалось в п. 3.4.

Акустическое поле раздельно-совмещенного преобразователя рассчитывают, построив мнимые пьезопластины для излучателя и приемника с центрами  $O'$  и  $O''$  (рис. 5.8). Поле в точке  $B$  находят, вычислив расстояния  $r'$ ,  $r''$  вдоль лучей  $O'B$ ,  $O''B$  и углы  $\theta'$ ,  $\theta''$  между этими лучами и акустическими осями мнимых пластин:

$$P_B \sim \Phi(a'k \sin \theta') \cdot \Phi(a''k \sin \theta') / r' r'' \quad (5.12)$$

Здесь  $a'$ ,  $a''$  – размеры мнимых пьезопластин в основной плоскости, постоянные множители и коэффициенты прозрачности опущены.

Пример 5.3.

Построить поле излучения-приема в стали на оси РС преобразователя на частоту 2,5 МГц с призмами из оргстекла, размеры которого показаны на рис. 5.8.

Угол преломления акустических осей для продольных волн  $\theta' = \arcsin(5,92 \cos 4^\circ / 2,72) = 8,7^\circ$ . Волновой размер пластин равен:

$$a'k = \frac{3 \cdot 2\pi \cdot 2,5 \cos 8,7^\circ}{5,92 \cos 4^\circ} = 7,99.$$

Поскольку задача симметрична, формула (5.12) приобретет вид:

$$P_B \sim \Phi^2(7,99 \sin \theta) / r^2.$$

На рисунке построены центры мнимых пьезопластин. Углы и расстояния измерены по чертежу. Функцию  $\Phi$  находим по рис. 5.4. Результаты построения показаны в виде кривой в сопоставлении с экспериментальными точками.

### 5.3. Фокусирующий преобразователь

Фокусирующий преобразователь концентрирует энергию поля в определенной области – фокальной зоне, которая при сферической фокусировке имеет вид круга, а при цилиндрической – полосы. Здесь рассмотрена сферическая фокусировка, однако полученные закономерности справедливы также для цилиндрической.

Применение получили два способа фокусировки: криволинейной пьезопластиной (активным концентратором) и линзой (рис. 5.9). Между искривленной поверхностью и плоской поверхностью изделия вводят акустическую задержку, которая также играет роль линзы. Для обеспечения эффективной фокусировки задержка и линза должны иметь толщины значительно меньше длины ближней зоны, поэтому считают, что в этой области акустическое поле – пучок лучей, перпендикулярных поверхности излучателя.

Деформацию пучка линзой и задержкой рассчитывают по законам геометрической акустики (аналогичным законам геометрической оптики). Фокальные расстояния для рис. 5.9,  $a$  и  $b$  равны:

$$F_a = (R_a - r_3) \frac{c_3}{c_o}; \quad F_b = \left( \frac{R_l}{1 - c_3/c_l} - r_3 \right) \frac{c_3}{c_o},$$

где  $R_a$  и  $R_l$  – радиусы кривизны поверхностей активного концентратора и линзы,  $c$  – скорости звука, индексы  $l$ ,  $3$ ,  $o$  относятся к материалам линзы, задержки и объекта контроля соответственно.

В результате фокусирующей системой формируется сходящийся волновой фронт с радиусом кривизны, равным фокальному расстоянию  $F$ . Все дальнейшее относится к активному концентратору, радиус кривизны которого равен фокальному расстоянию:  $R = F$  (рис. 5.9, в). Будем считать апертурный угол (угловую апертуру)  $\theta_M = \arcsin(a/F) < 30^\circ$ . Тогда выражение для поля излучения вдоль оси  $x$ :

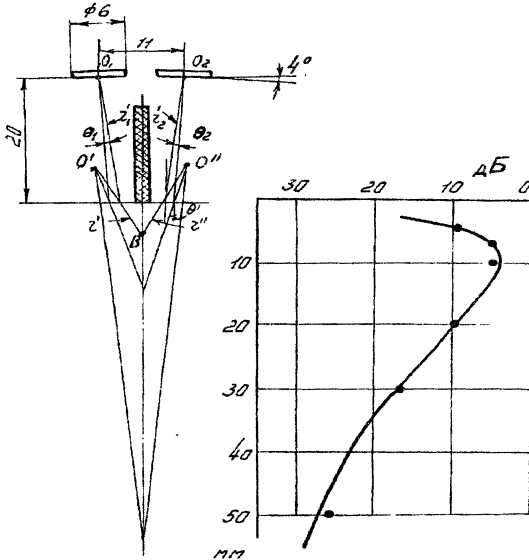


Рис. 5.8. Акустическое поле на оси РС преобразователя.

$$|I_{\phi}| = \left| \frac{2}{1-x/F} \sin \left[ \frac{\pi N}{2x} \left( 1 - \frac{x}{F} \right) \right] \right|, \quad (5.13)$$

При  $x = F$  (геометрический фокус) раскрытие неопределенности в (5.13) дает:

$$|I_{\phi}| = N/F, \quad N = S/\pi\lambda. \quad (5.14)$$

Поле излучения-приема равно квадрату поля излучения. Отличие акустических фокусирующих систем от оптических состоит в заметном смещении максимума максимума  $|I_{\phi}|$  (акустического фокуса  $F_a$ ) от геометрического фокуса в сторону преобразователя.

Поле в плоскости геометрического фокуса:

$$|I_{\phi}| = \frac{S}{\lambda F} \left| \frac{2J_1(k\rho \sin\theta_m)}{k\rho \sin\theta_m} \right|.$$

Радиус фокального пятна  $\rho_0$  из условия  $J_1 = 0$ :

$$\rho_0 = 0,61F\lambda/a. \quad (5.15)$$

При  $\theta_m = 30^\circ$  достигается минимальный радиус фокального пятна:

$$\rho_{0\min} = 1,22\lambda. \quad (5.16)$$

Максимальное значение  $|I_\phi|$  именуется коэффициентом усиления  $K$ . Протяженность фокальной области  $f$  определяют как расстояние вдоль оси,

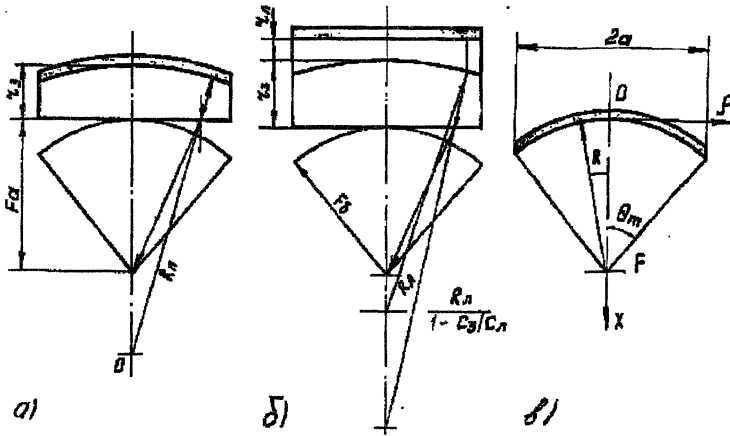


Рис. 5.9. Системы фокусировки ультразвука.

где  $|I_\phi|$  превышает 0,7 от максимального значения. Графики на рис. 5.10 позволяют рассчитать основные параметры фокусирующей системы.

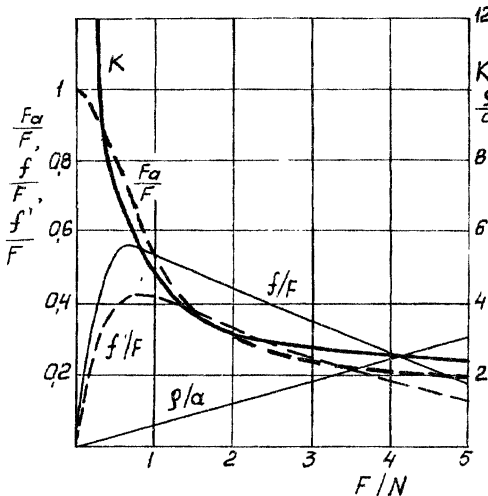


Рис. 5.10. Графики для расчета параметров фокального поля: коэффициента усиления  $K$ , смещения акустического фокуса  $F_a$ , радиуса фокального пятна  $\rho_0$ , протяженности фокальной области  $f$  и ее части  $f'$  в направлении  $x > F$ .

Пример 5.4.

Рассчитать поле вдоль оси фокусирующего преобразователя для отношения  $F/N = 0,5$ . Определить параметры поля и сопоставить с параметрами, найденными с помощью рис. 5.10.

Формула (5.13) при условиях задачи приобретает вид:



$$|I_{\phi}| = \left| \frac{2}{1-x/F} \sin \left[ \frac{\pi F}{x} \left( 1 - \frac{x}{F} \right) \right] \right|.$$

Результат расчета по ней показан на рис. 5.11. Максимальное значение  $|I_{\phi}| = K = 7,2$ ; смещение акустического фокуса  $F_a/F = 0,8$ ; протяженность фокальной области  $f = 0,59F$ , а ее части от максимума в сторону увеличения  $x$   $f' = 0,4F$ . На рис. 5.11 проводим вертикальную линию через точку  $F/N = 0,5$  и находим те же значения параметров.

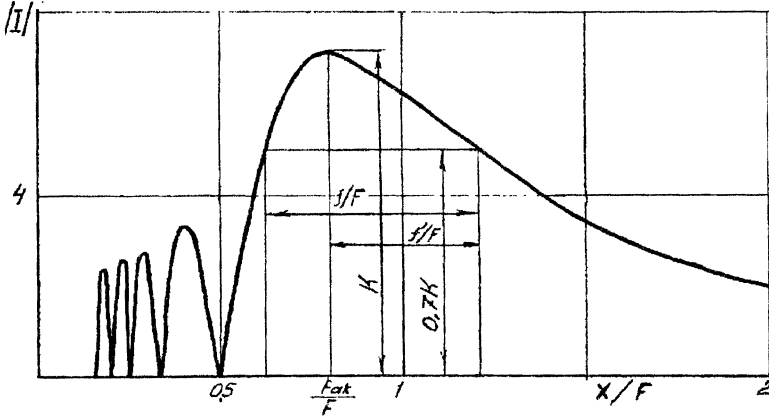


Рис. 5.11. Поле вдоль оси фокусирующего излучателя,  $F = N/2$ .

При проектировании фокусирующих преобразователей часто ставится задача создания акустического поля, в котором концентрация энергии вблизи оси происходит в возможно более широком диапазоне расстояний. Лучших результатов в достижении этой цели удастся добиться с помощью аксиконового РС преобразователя. В нем два пьезоэлемента: в центре – круглая плоская пластина, а вокруг нее – фокусирующее кольцо (активный концентратор). Один из элементов служит излучателем, а другой – приемником УЗ.

Поле излучения-приема аксиконового преобразователя приближенно определяют как произведение полей, рассчитанных по формулам (5.13) и (5.4). При этом пренебрегают отсутствием центральной части активного концентратора. Если диаметр центральной плоской пластины значительно меньше, чем активного концентратора, то поле излучения-приема приближенно рассчитывают по формуле (5.13) без возведения ее в квадрат.

## 6. РАСЧЕТ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

### 6.1. Формулы для эхосигналов от поверхностей объекта контроля и от отражателей, удаленных от границ.

При расчетах реальные дефекты представляют отражателями правильной формы. Различают теоретические модели дефектов (лучше имитирующие реальные дефекты) и искусственные дефекты, иначе – искусственные отражатели, которые изготавливают на практике. Модели и искусственные отражатели совпадают для длинного цилиндра, называемого боковым отверстием, плоской и вогнутых поверхностей

Сводка формул для расчета эхосигналов, называемых формулами акустического тракта, при контроле прямым преобразователем дана в табл. 6.1.  $P_0$  и  $P'$  – амплитуды излученного и принятого сигналов,  $S$  – площадь пьезопластины,  $r$  – расстояние преобразователь-отражатель. Для учета затухания формулы граф 3, 4 и 5 следует умножить на  $e^{-2\delta r}$ .

Отражатели разделены на три группы: компактные, все размеры которых меньше неоднородностей поля излучения преобразователя; протяженные в одном направлении (паз, длинный цилиндр); протяженные в двух направлениях (плоскость, вогнутые поверхности). Отражатель считают протяженным, если его размер больше ширины обрасти эффективно взаимодействующего с ним поля преобразователя.

Каждой группе отражателей соответствует своя зависимость амплитуды эхосигнала от приведенного расстояния  $r/N$ ,  $N$  – длина ближней зоны преобразователя (графа 8). Заштрихованные области на кривых определяют вариацию амплитуды под влиянием формы и длительности импульса. Кривая  $I_3$  относится к донному сигналу, уточненное ее значение приведено на рис. 2.6. Формул для расчета эхосигналов от вогнутых цилиндрических отражателей в ближней зоне нет. По формулам таблицы нельзя точно рассчитать эхосигнал от вогнутых цилиндрических поверхностей стандартных образцов СО-3, V-1 и V-2, так как из-за их небольшой ширины возникают отражения от боковых поверхностей, увеличивающие эхосигнал на 1...2 дБ от расчетного значения.

В формулах для ближней зоны (графы 3, 4) интервалы численных коэффициентов определяют диапазон разброса амплитуд эхосигналов в зависимости от расстояния отражатель – преобразователь, формы и длительности импульсов. Они также зависят от формы пьезопластины. Расчет в переходной и более точный расчет в ближней зоне круглого преобразователя следует вести по общей формуле (графа 8), используя коэффициент вида дефекта  $A$  из граф 6 и 7.

## Формулы для расчета амплитуд экосигналов от

Модель дефекта	Искусственный отражатель	Формулы для ослабления $P'/P_0$	
		Ближняя зона $r < S/\pi\lambda$	
		Круглый ПЭП, диаметр D	Прямоугольный ПЭП, длина L
1	2	3	4
Тонкий диск, площадь s, диаметр d Сфера, диаметр d	Плоскостное отверстие Отверстие со сферическим дном	$(1..4) \frac{s}{S}$ $(1..4) \frac{d\lambda}{4S}$	
Цилиндр, длина l, диаметр d Конус, угол $\varphi > 45^\circ$ , диаметр d	Отверстие с цилиндрическим дном Отверстие с коническим дном	$(1..4) \frac{l\sqrt{d\lambda}}{2S}$ $(1..4) \frac{1}{6S \sin \varphi} \sqrt{\frac{d^3\lambda}{2 \cos^3 \varphi}}$	
Бесконечный цилиндр, диаметр d Бесконечная полоса, ширина l	Цилиндрическое отверстие Плоскостной паз	$(0,8..1,2) \frac{\sqrt{d\lambda}}{D}$ $(1,6..2,4) \frac{l}{D}$	$(0,5..0,7) \frac{\sqrt{d\lambda}}{L}$ $(1..1,5) \frac{l}{L}$
Бесконечная плоскость Вогнутые поверхности: цилиндр сфера	Донная поверхность Полуцилиндр Полусфера	$(1..0,8)$	

отражателей при контроле прямым преобразователем

Дальняя зона $r > 3S/\pi\lambda$	Коэффициент вида дефекта А		Общая формула
	Модель с $d, d > \lambda$ или от- ражатель	Модель с $d, d \ll \lambda$	
5	6	7	8
$\frac{Ss}{r^2\lambda^2}$	$\frac{s}{\lambda^2}$	$0,6\left(\frac{d}{\lambda}\right)^3$	$\frac{P'}{P_0} = AI_1 \frac{\lambda^2}{S} e^{-2\delta r}$
$\frac{Sd}{4r^2\lambda}$	$\frac{d}{4\lambda}$	$4,3\left(\frac{d}{\lambda}\right)^3$	
$\frac{Sl}{2r^2\lambda} \sqrt{\frac{d}{\lambda}}$	$\frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{d}{\lambda}}$	-	
$\frac{0,12S}{r^2\lambda} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}}$	$\frac{0,12}{\sin\varphi} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}}$	-	
$\frac{S}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3}}$	$0,5\sqrt{\frac{d}{\lambda}}$	$7,4\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2$	$\frac{P'}{P_0} = AI_2 \frac{2\lambda}{D} e^{-2\delta r}$
$\frac{Sl}{\sqrt{2}(r\lambda)^3}$	$\frac{1}{\lambda}$	$4,9\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2$	
$\frac{S}{2r\lambda}$	-	-	$\frac{P'}{P_0} = I_3 e^{-2\delta r}$
$\sqrt{\frac{S}{2r\lambda}}$	-	-	
1	-	-	

Коэффициент  $A$  определяется отношением характеристических размеров отражателя  $b$  (диаметра  $d$ , ширины или длины  $l$ ) к длине волны. Если  $b > \lambda$ , то модели дают такие же эхосигналы, как имитирующие их искусственные дефекты (отверстия с плоским, сферическим или цилиндрическим дном, паз). При  $b < \lambda$  для искусственных дефектов коэффициенты, показанные в графе 6, сохраняются, а для моделей — изменяются. В графе 7 они приведены для случая  $b \ll \lambda$  для продольных волн в материалах с коэффициентом Пуассона 0,3. Формулы граф 3, 4, 5 соответствуют случаю  $b > \lambda$ .

Отметим, что применение формул имеет ряд ограничений. Ниже рассмотрены эти ограничения и способы их устранения.

Формулы приведены для прямого совмещенного преобразователя. Для преобразователей с акустическими задержками вводят мнимые излучатель и приемник, как показано в п. 6.2.

Предполагается, что диаметры сферы и цилиндра  $d$  значительно меньше расстояния преобразователь-отражатель. Для расчета отражения от цилиндра с диаметром  $d$ , соизмеримым с расстоянием до него (например, от канала ротора), нужно использовать формулу:

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3(1+d/2r)}}, \quad (6.1)$$

где  $r$  — расстояние до ближайшего к преобразователю края отражателя. Она переходит в формулу табл. 6.1 при  $d \ll r$ . Подобным образом трансформируется формула таблицы для сферического отражателя

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{Sd}{4\lambda r^2(1+d/2r)^2}.$$

Диаметр диска, длина или ширина короткого цилиндра, конуса, паза не должны превосходить 0,2 от размеров  $D$  и  $L$  преобразователя. Ограничение для диска снимают, применяя АРД диаграммы (см. п. 6.2).

При отражении поперечных волн диаметр цилиндра в графах 5 и 6 должен быть больше  $2\lambda$  (для продольных волн — больше  $0,4\lambda$ ). Для сферы подобные ограничения существуют, но количественно не исследованы. Для устранения этого ограничения расчет выполняют по графикам, как рассмотрено в п. 6.2.

Формулы таблицы позволяют рассчитать максимальное значение эхосигнала от дефекта, расположенного на определенном расстоянии от преобразователя. В дальней зоне это соответствует положению отражателя на оси преобразователя. В ближней зоне максимальный эхосигнал может давать отражатель, лежащий в стороне от оси. Приведем формулы для расчета значений эхосигналов от моделей дефектов, расположенных не на оси в дальней зоне преобразователя, в том числе дефектов, наклонных к оси (затухание не учтено).

Боковое цилиндрическое отверстие диаметром  $d$  (рис. 6.1,а):

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S}{\lambda} \cos \theta \sqrt{\frac{d(\cos \theta)^3}{8h}} \Phi^2(\theta). \quad (6.2)$$

Здесь  $\Phi(\theta)$  – диаграмма направленности преобразователя,  $\theta$  – угол между его осью и направлением на цилиндр.

Диск диаметром  $2b$  и площадью  $s$  (рис 6.1,б), наклоненный под углом  $\varphi$  к поверхности ввода:

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{sS}{r^2 \lambda^2} \cos \theta \cos \varepsilon \Phi^2(\theta) \frac{2J_1(2kb \sin \varepsilon)}{2kb \sin \varepsilon}, \quad (6.3)$$

где  $\varepsilon = \varphi - \theta$  – угол падения на дефект.

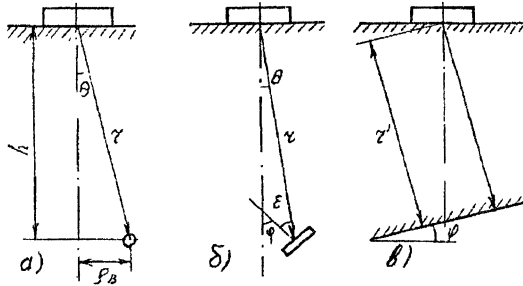


Рис. 6.1. Отражатели, смещенные от оси преобразователя, и наклонные отражатели

Полоса шириной  $2b$ , наклоненная под углом  $\varphi$ :

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{bS}{(r\lambda)^{3/2}} \cos \theta \cos \varepsilon \Phi^2(\theta) \frac{\sin(2kb \sin \varepsilon)}{2kb \sin \varepsilon}. \quad (6.4)$$

Плоскость под углом  $\varphi$  к поверхности ввода (рис. 6.1.в):

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S}{2r'\lambda} \cos \theta \Phi^2(\varphi), \quad (6.5)$$

где  $r'$  – кратчайшее расстояние от преобразователя до плоскости.

Формулы (6.3) – (6.5) записаны для скалярного случая и экспериментально не проверялись.

Пример 6.1. Сфера какого диаметра  $d$  даст такую же амплитуду сигнала, как плоскостное отверстие диаметром  $d' = 3$  мм, если  $\lambda = 1,5$  мм?

Одинаковые амплитуды эхосигналов два компактных отражателя дадут, когда их значения  $A$  одинаковы, причем  $d' > \lambda$ ; отсюда:

$$d/(4\lambda) = \pi d'^2 / (4\lambda^2); \quad d = \pi d'^2 / \lambda = \pi 3^2 / 1,5 = 19 \text{ мм.}$$

Пример демонстрирует плохую выявляемость округлых дефектов по сравнению с плоскими, перпендикулярными оси преобразователя.

Пример 6.2.

На сколько нужно поднять чувствительность дефектоскопа при настройке по полуцилиндру радиусом  $r = 70$  мм, чтобы обеспечить обнаружение в стали на глубине  $r' = 40$  мм конического отверстия диаметром  $d' = 3$  мм с углом при вершине  $2\varphi = 120^\circ$ ? Диаметр ПЭП  $2a = 12$  мм, частота  $f = 4$  МГц, затуханием пренебречь.

Длина волны и длина ближней зоны равны:

$$\lambda = 5,92/4 = 1,48 \text{ мм}; \quad N = a^2 / \lambda = 6^2 / 1,48 = 24,3 \text{ мм}.$$

Приведенные (отнесенные к длине ближней зоны) расстояния равны:

$$r/N = 70/24,3 = 2,9; \quad r'/N = 40/24,3 = 1,6.$$

Отражение от полуцилиндра нужно рассчитывать по формулам графы 4, а от конуса – графы 8. Ослабление в первом случае составит:

$$P'/P_0 = \sqrt{\pi a^2 / (2\lambda r)} = \sqrt{\pi 6^2 / (2 \cdot 1,48 \cdot 70)} = 0,74 = 2,6 \text{ дБ}.$$

Во втором случае рассчитываем значения  $A$  и  $I_1$ , а затем  $P'/P_0$ :

$$A = \frac{0,12}{\sin \varphi} \left( \frac{d}{\lambda \cos \varphi} \right)^{3/2} = \frac{0,12}{\sin 60^\circ} \left( \frac{3}{1,48 \cos 60^\circ} \right)^{3/2} = 1,13;$$

$$I_1(r/N) = I_1(1,6) = 2,7.$$

Взято среднее значение  $I_1$  из заштрихованного интервала.

$$P'/P_0 = A^2 I_1 / (\pi a^2) = 1,13 \cdot 1,48^2 \cdot 2,7 / \pi 6^2 = 0,059 = 24,7 \text{ дБ}.$$

Чувствительность следует увеличить на 25 дБ, а для облегчения поиска дефекта – на 31 дБ.

Пример демонстрирует, что отверстие с коническим дном может имитировать довольно слабо отражающие дефекты.

## 6.2. Расчет эхосигналов по диаграммам и графикам.

Для плоскодонного и бокового цилиндрического отверстий, чаще других используемых в качестве искусственных отражателей, даны удобные способы расчета максимальных эхосигналов, применимые для широкого диапазона диаметров. Также рассмотрено изменение амплитуды эхосигнала при смещении преобразователя относительно полуплоскости, имитирующей край протяженного дефекта.

### Плоскодонное отверстие.

Амплитуды максимальных эхосигналов от плоскодонных отверстий определяют с помощью семейства кривых амплитуда—расстояние—диаметр (АРД диаграмм). На рис. 6.2 и 6.3 даны безразмерные АРД диаграммы с логарифмическим и линейным масштабами по оси абсцисс, где отложено приведенное расстояние преобразователь—отражатель (т.е. расстояние, деленное на длину ближней зоны). Параметр — отношение диаметров отражателя и преобразователя.

Рис. 6.2 — скорректированная на основе наших расчетов АРД (по-немецки AVG) диаграмма Крауткремера. Ее достоинство – большой диапазон расстояний. Зато диаграмма на рис. 6.3 позволяет весьма просто учитывать затухание, что будет показано далее. Заштрихованные области соответствуют вариации эхосигналов под влиянием формы и длительности импульсов. Для конкретных типов преобразователей строят размерные АРД диаграммы, в которых на оси абсцисс откладывают расстояние от преобразователя до отражателя, а параметр — диаметр или площадь отражателя. На рис. 6.4 приведена шкала перевода диаметра в площадь плоскодонного отверстия.

Пример 6.3.

Построить размерную АРД диаграмму к прямому преобразователю диаметром

$D = 24$  мм; длина волны  $\lambda = 3$  мм. Подготовить прибор к контролю изделия толщиной 250 мм с уровнем фиксации  $s = 7$  мм<sup>2</sup>.

По шкале рис. 6.4 находим, что площадь  $s = 7$  мм<sup>2</sup> соответствует диаметру плоскодонного отверстия  $d = 3$  мм. Размерную диаграмму строим по безразмерной рис. 6.3. В качестве примера рассчитаем кривые для донного сигнала и для  $d = 3$  мм. Параметры:

$$N = D^2 / (4\lambda) = 24^2 / (4 \cdot 3) = 48 \text{ мм}; \quad d/D = 3/24 = 0,125.$$

Зададимся значениями  $r = 20; 50; 100$  мм и т. д. и определим положение точек кривых. Например  $r = 100$  мм,  $r/N = 100/48 = 2,08$ . На пересечении абсциссы 2,08 с кривыми "Донный сигнал" и  $d/D = 0,125$  (интерполируем между кривыми 0,1 и 0,15) находим значения  $P'/P_0$ , равные 3,5 и 31 дБ. Отмечаем их на абсциссе 100 мм. Построенные таким образом кривые показаны на рис. 6.5.

Определяем нужное повышение усиление по сравнению с донным сигналом. Толщине 250 мм соответствует ослабление этого сигнала на 10,5 дБ, а сигнала от плоскодонного отверстия  $d = 3$  мм — на 45 дБ (все расчеты выполняем с точностью 0,5 дБ). Для настройки чувствительности нужно получить донный сигнал, установить его амплитуду на экране дефектоскопа на стандартный уровень и увеличить чувствительность на  $45 - 10,5 = 34,5$  дБ.

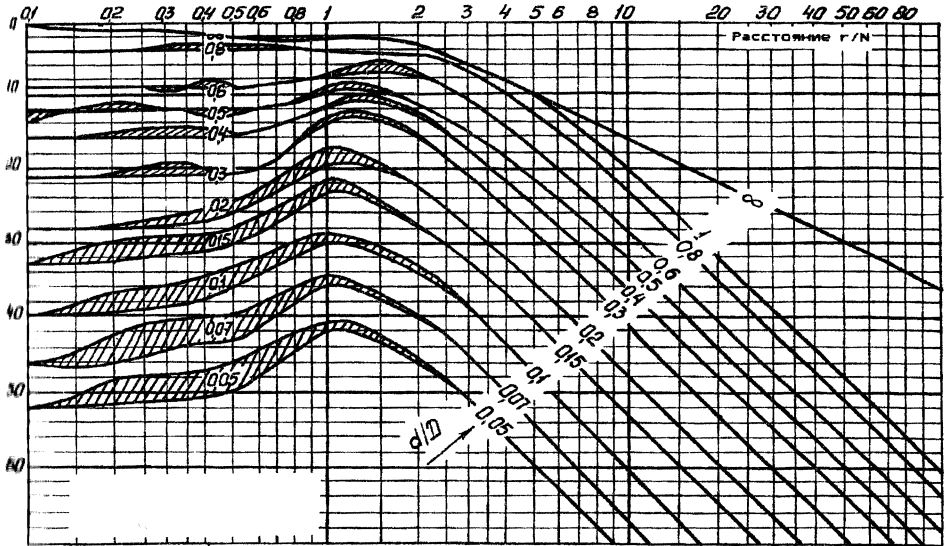


Рис. 6.2. АД диаграмма с логарифмическим масштабом по оси абсцисс



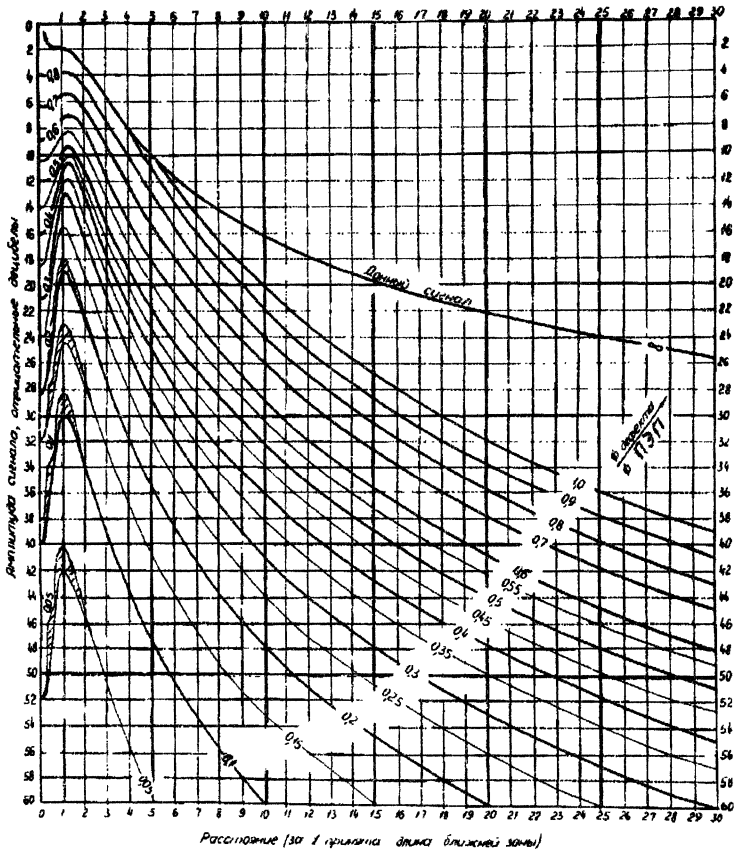


Рис. 6.3. АРД диаграмма с линейным масштабом по оси абсцисс.

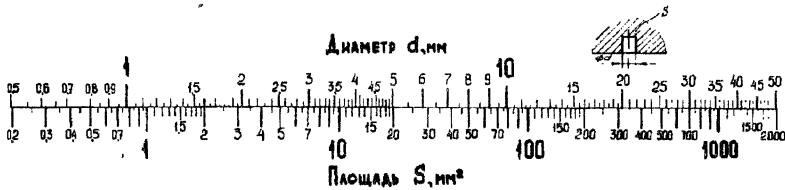


Рис. 6.4. Шкала диаметр - площадь диска.

Предпочтительнее однако другой путь. Отложим на аттенуаторе значение амплитуды донного сигнала 10,5 дБ. Ручкой некалиброванной регулировки чувствительности дефектоскопа установим донный сигнал на стандартный уровень. Теперь шкалы аттенуатора и АРД диаграммы совмещены, а требуемую чувствительность получим при установке аттенуатора в положение 45 дБ. Так как ступени аттенуатора обычно имеют величину 1 или 2 дБ, для повышения точности отсчета используем градуировку экрана, описанную в п. 2.4. В настоящем примере для сигнала 10,5 дБ установим аттенуатор на деление 10 дБ,

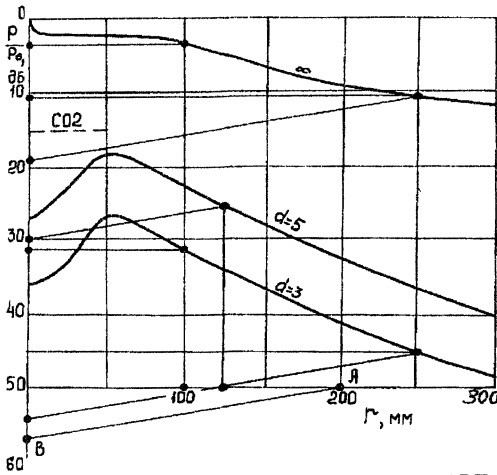


Рис. 6.5. К примеру построения размерной АРД диаграммы.

а амплитуду донного сигнала на экране – на 0,5 дБ ниже стандартного уровня.

Для учета затухания ультразвука в материале изделия следует наложить на размерную АРД диаграмму с линейным масштабом по оси абсцисс прозрачный планшет с горизонтальными линиями, повернуть его на угол  $\varphi$  и использовать его линии вместо горизонтальных линий диаграммы. Для определения угла  $\varphi$  выбирают на любой горизонтальной линии координатной сетки АРД диаграммы точку с большим значением  $r$  (чем больше  $r$ , тем выше точность). Находят произведе-

ние

$$2\langle\delta\rangle r = \langle 17,46\delta r \rangle.$$

Это значение откладывают на оси ординат вниз от пересечения с выбранной горизонталью и отмечают вторую точку. Прямая, проведенная через две найденные точки, имеет искомым угол наклона  $\varphi$ .

Пример 6.4.

Выполнить настройку дефектоскопа, как указано в примере 6.3, с учетом коэффициента затухания  $\delta = 2$  Нп/м.

Отметим на горизонтали  $P'/P_0 = 50$  дБ (рис. 6.5) точку  $A$  с  $r = 200$  мм = 0,2 м. Найдем значение

$$\langle 17,4\delta r \rangle = \langle 17,4 \cdot 2 \cdot 0,2 \rangle = 7 \text{ дБ}.$$

Отметим на оси ординат вторую точку  $B$ , соответствующую делению  $50 + 7 = 57$  дБ.

Соединим обе точки прямой и будем пользоваться параллельными ей линиями вместо горизонтальных. Тогда ослабление донного сигнала на глубине 250 мм будет не 10,5, а 19 дБ. На это деление нужно установить аттенюатор для совмещения его шкалы и АРД диаграммы. Уровень фиксации 7 мм<sup>2</sup> обеспечивается при установке аттенюатора на 53,5 дБ. Увеличение чувствительности по отношению к донному сигналу составит, как и ранее,  $53,5 - 19 = 34,5$  дБ.

НПЦ ЭХО+ прилагает АРД диаграммы к каждому типу выпускаемых преобразователей.

#### Боковое цилиндрическое отверстие.

Расчет выполняют по соответствующей общей формуле табл. 6.1 и графикам рис. 6.6. Формулу удобнее записать в децибелах:

$$\langle P'/P_0 \rangle = \langle \lambda/(2D) \rangle + \langle A(d/\lambda) \rangle + \langle I_2(r/N) \rangle \quad (6.6)$$

Первый член просто вычисляют, второй – получают из рис. 6.6,а. Для продольных волн эта кривая совпадает с формулой графы 6 табл. 6.1. Для поперечных вертикально поляризованных волн кривая и формула совпадают только при  $d/\lambda > 2$ . Для поперечных горизонтально поляризованных волн экспериментальная кривая не снималась, но предполагается, что  $A$  описывается кривой для продольных волн. Третий член берут по рис. 6.6,б, где зависимость амплитуды от расстояния дана в децибелах. Если значения  $r/N$  больше приведенных на рис. 6.1,а, то  $I_2$  рассчитывают по формуле:

$$\langle I_2 \rangle = \langle 2,22(N/r)^{3/2} \rangle. \quad (6.7)$$

Для преобразователей конкретного типа целесообразно с помощью формулы (6.6) строить семейства кривых типа АРД диаграмм для бокового цилиндрического отверстия.

#### Пример 6.5

Построить размерную АРД диаграмму к прямому преобразователю с параметрами, как в примере 6.3, для бокового цилиндрического отверстия.

Построим кривую для диаметра  $d = 3$  мм.

$$\langle 2\lambda/D \rangle = \langle 2 \cdot 3/24 \rangle = 12 \text{ дБ}.$$

Знак минус не пишем, т. к. децибелы отрицательные.

Рассчитываем второй член; его аргумент  $d/\lambda = 3/3 = 1$ . По графику рис. 6.6,а найдем  $\langle A \rangle = 6$  дБ. Задаемся значениями  $r$ , рассчитываем приведенные расстояния ( $N = 48$  мм), по графику рис. 6.6,б и формуле (6.7) находим  $\langle I_2 \rangle$  и затем  $\langle P'/P_0 \rangle$ . Результаты вычислений сведены в таблицу:

$r$ , мм	0	50	100	200	300
$r/N$	0	1,04	2,08	4,16	6,24
$\langle I_2 \rangle$ , дБ	2	0	4,1	11,7	17
$\langle P'/P_0 \rangle$ , дБ	20	18	22,1	29,7	35

Фрагмент построенной АРД диаграммы для бокового цилиндрического отверстия показан на рис 6.7. Кривая “Донный сигнал” идентична приведенной на рис. 6.5.

Для того, чтобы обеспечить возможность настройки по отверстию диаметром 6 мм в СО-2 при работе с АРД диаграммой, достаточно на ее оси ординат отметить уровень экосигнала от этого отверстия (отметка “СО-2” на рис. 6.5). Теперь чтобы совместить шкалы аттенюатора и АРД диаграммы, можно отложить этот уровень на шкале аттенюатора и некалиброванной ручкой установить такую чувствительность, чтобы сигнал от отверстия в СО-2 на экране достигал стандартного уровня. Далее пользоваться АРД диаграммой, как в примерах 6.3 и 6.4.

#### Пример 6.6.

Рассчитать амплитуды экосигналов от отверстия в СО-2 для условий контроля, как в примерах 6.3.

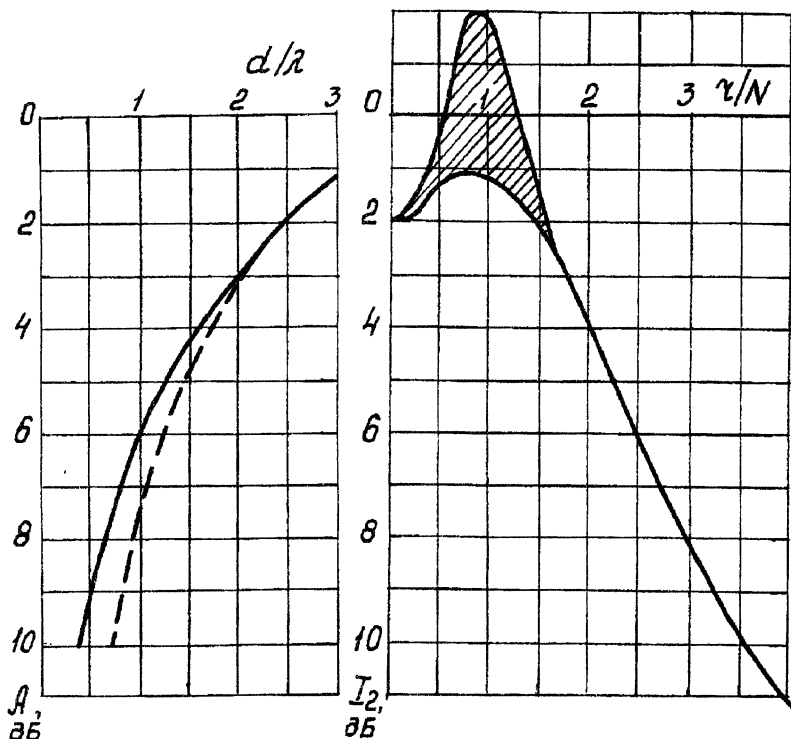


Рис. 6.6. Графики к расчету сигнала от бокового цилиндрического отверстия.

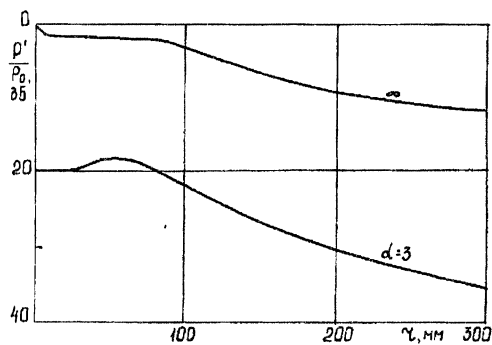


Рис. 6.7. К примеру построения размерной АРД диаграммы для отражателя в форме бокового цилиндрического отверстия.

В примере 6.3 контроль выполняется преобразователем с параметрами:  $D = 2a = 24$  мм,  $\lambda = 3$  мм,  $N = 48$  мм. Приведенное расстояние до дефекта  $r/N = 44/48 = 0,92$ . Отражатель находится в ближней зоне, поэтому расчет выполняем по формуле

(6.6):

$$\left\langle \frac{P'}{P_0} \right\rangle = \left\langle \frac{2 \cdot 3}{24} \right\rangle + \left\langle A \left( \frac{6}{3} \right) \right\rangle + \langle I_2(0,92) \rangle = 12 + 3 + 0 = 15 \text{ дБ}.$$

На рис. 6.5 именно этот уровень отмечен штриховой линией.

### Пример 6.7.

Рассчитать амплитуды эхосигнала от отверстия в СО-2 для наклонного преобразователя с углом ввода  $\alpha = 50^\circ$  диаметром пьезоэлемента  $2a = 12$  мм на частоту 2,5 МГц. Путь в призме 11 мм.

Поскольку контроль выполняют наклонным преобразователем, пользуемся понятием мнимого пьезоэлемента (см. п. 5.2). Угол призмы, рассчитанный по (3.1),  $\beta = 40^\circ$ .

Найдем отношения диаметра отражателя  $d$  к длине волны  $\lambda$  и расстояния от мнимого пьезоэлемента до отражателя  $r$  к длине ближней зоны:

$$\lambda = c_1 / f = 3,23 / 2,5 = 1,3 \text{ мм}; \quad d / \lambda = 6 / 1,3 = 4,6.$$

Длина ближней зоны согласно второй формуле (5.11):

$$N = a^2 / \lambda = 6^2 / 1,3 = 27,7 \text{ мм}.$$

Путь в задержке от центра мнимого пьезоэлемента до точки выхода (по рис. 5.5,б), путь в объекте контроля и суммарный путь равны:

$$r_1 = r_2 c_2 \cos \alpha / (c_1 \cos \beta) = 11 \cdot 2,73 \cdot \cos 50^\circ / (3,23 \cdot \cos 40^\circ) = 7,8 \text{ мм};$$

$$r' = H / \cos \alpha = 44 / \cos 50^\circ = 68,5 \text{ мм}; \quad r = r' + r_1 = 68,5 + 7,8 = 76,3 \text{ мм}.$$

Искомое отношение (приведенное расстояние):

$$r / N = 76,3 / 27,7 = 2,8.$$

Отношение  $d / \lambda > 2$ , и отражатель практически находится в дальней зоне, поэтому расчет выполняем по формуле табл. 6.1:

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{S'}{\omega \lambda \sqrt{8r^3}} = \frac{\pi 6^2 \cdot 2,5 \cdot \cos 50^\circ}{3,23 \cdot \cos 40^\circ} \sqrt{\frac{d}{8 \cdot 76,3^3}} = 20,4 \text{ дБ}.$$

При построении АД диаграммы для этого ПЭП (здесь не показана) нужно отметить уровень 20,4 дБ на оси ординат, чтобы обеспечить возможность настройки чувствительности дефектоскопа по СО-2.

### Полуплоскость (край протяженного дефекта).

На рис. 6.8,б показано изменение амплитуды эхосигнала  $P' / P_\infty$  ( $P_\infty$  — сигнал от плоскости) при взаимном перемещении края полуплоскости и преобразователя (рис. 6.8,а) в функции от двух безразмерных параметров:  $l/a$  и  $r/N$ .

В практике ультразвукового контроля при измерении условной протяженности дефекта положение края определяют по точкам, где амплитуда уменьшается на 6, 10 или 20 дБ от максимума (точнее, от эхосигнала над плоскостью дефекта). При этом преобразователь смещается на некоторое расстояние  $l$  от края дефекта, называемое полураширением условной протяженности дефекта, которое можно найти по кривым рис. 6.8,в. Можно также воспользоваться формулами. При измерении по уровню 6 дБ (способ "6 дБ") расширения не происходит,  $l_6 = 0$ . Для уровня 10 дБ:

$$l_{10} = 0,18a \quad \text{при } r/N \leq 2; \quad (6.7)$$

$$l_{10} = 0,05r\lambda/a + 0,065a \quad \text{при } r/N \geq 2.$$

Для уровня 20 дБ:

$$l_{20} = 0,58a \quad \text{при } r/N \leq 2; \quad (6.8)$$

$$l_{20} = 0,177r\lambda/a + 0,23a \quad \text{при } r/N \geq 2.$$

Есть также способ поиска положения края дефекта по дифракционному максимуму, наблюдаемому на кривых с  $r/N \geq 2,5$ . Для него:

$$l_m = -a \quad \text{при } 4 \geq r/N \geq 2,5; \quad (6.9)$$

$$l_m = -0,154r\lambda/a - 0,44a \quad \text{при } r/N \geq 4.$$

Знак минус показывает, что условный размер меньше истинного. Этим способом можно пользоваться, только когда истинный размер дефекта больше  $2l_m$ . Этот вопрос рассмотрен также в п. 7.3.

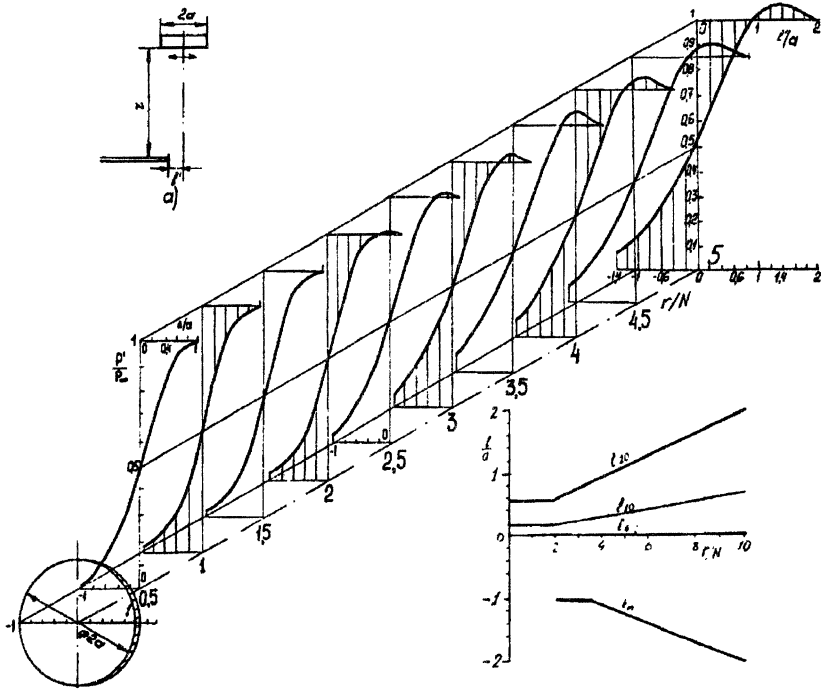


Рис. 6.8. Изменение эхосигнала от края полуплоскости (протяженного дефекта).

Пример 6.8.

Преобразователем (параметры – как в примере 6.3) на глубине  $r = 110$  мм обнаружен дефект. Условная протяженность по способу "20 дБ"  $L = 60$  мм. Какова истинная протяженность дефекта?

Приведенное расстояние  $r/N = 110/48 = 2,3 > 2$ . Рассчитаем полурастворение для этого дефекта:

$$l_{20} = 0,177 \cdot 110 \cdot 3/12 + 0,23 \cdot 12 = 7,6 \text{ мм.}$$

Такое же значение можно получить, пользуясь графиком для  $l_{20}$  на рис. 6.8,в. Для  $r/N = 2,3$  находим

$$l_{20}/a = 0,63; \quad l_{20} = 0,63 \cdot 12 = 7,6 \text{ мм.}$$

Истинная протяженность дефекта равна:

$$L - 2l = 60 - 2 \cdot 7,6 = 44,8 \text{ мм.}$$

### 6.3. Угловые отражатели

При контроле наклонными преобразователями хорошо выявляются

вертикальные дефекты (например трещины), перпендикулярные донной поверхности. Это связано с двойным отражением от поверхностей изделия и дефекта, в результате чего лучи возвращаются к тому же преобразователю, работающему как приемник (угловой эффект). Искусственные дефекты, имитирующие это явление, называют угловыми отражателями. Эти отражатели и формулы для расчета максимальных экосигналов от них приведены в табл. 6.2.

Большинство обозначений в табл. 6.2 – те же, что в табл. 6.1 со следующими изменениями:  $s'$  – площадь отражающей поверхности зарубки,  $\lambda$  – длина поперечной волны. Для возбуждения и приема поперечных волн применяют наклонные преобразователи с призмой (см. п. 5.2), поэтому согласно формуле (5.9) введена мнимая пьезопластина площадью  $S'$  (см. рис. 5.5,б). Для прямоугольной пластины

$$S' = LL'; \quad L' = L_1 \cos \alpha / \cos \beta.$$

Здесь  $L_1$  и  $L$  – размеры пьезопластины в плоскости падения и дополнительной плоскости,  $\beta$  и  $\alpha$  – углы падения и преломления для акустической оси. Для круглой пластины мнимый пьезоэлемент – эллиптический с размерами  $D \cdot \cos \alpha / \cos \beta$  в основной и  $D$  в дополнительной плоскостях. В формулы, отмеченные \*, вместо  $L$  и  $L'$  вводят  $2D/\pi$  и  $2D \cdot \cos \alpha / (\pi \cos \beta)$ .

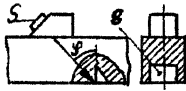
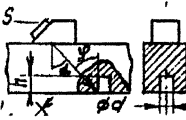
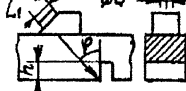
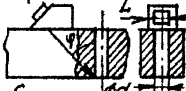


В  $r$  входит путь в изделии  $r'$  и дополнительный путь  $r_1$  от мнимой пластины до точки выхода. Обычно он не превышает 10 мм, и при больших расстояниях  $r'$  им пренебрегают. Во все формулы для экосигналов необходимо ввести множитель  $e^{-2\delta r'}$  для учета затухания в изделии,  $\delta$  – коэффициент затухания поперечных волн. Множитель, учитывающий затухание в призме, и коэффициент прозрачности не введены, поскольку использована приближенная часть формулы (5.9).

В табл. 6.2, как и в табл. 6.1, отражатели разделены на три группы: компактные (зарубка, засверловка), протяженные в одном направлении (риска, вертикальное цилиндрическое отверстие) и протяженный в двух направлениях (двугранный угол). Формула для полуцилиндрического образца дана для сопоставления. Диапазон вариации численных коэффициентов в формулах для ближней зоны уменьшен, поскольку немонотонности изменения экосигналов здесь сглажены. Для расчетов в переходной зоне используют коэффициент вида дефекта  $A$  и общие формулы и графики из табл. 6.1.

В формулы введен коэффициент  $G$ , который учитывает геометрию отражения, явления незеркального отражения и трансформации волн (см. пп. 3.2, 3.4).  $G$  (рис. 6.9) зависит от угла падения на поверхность  $\varphi$  и от глубины зарубки, засверловки или риски  $h$ , которая должна быть на 20% больше длины поперечной волны ( $h > 1,2\lambda$ ). Для изделий с плоскопараллельными поверхностями  $\varphi = \alpha$  – углу ввода. Для изделий с непараллельными или искривленными поверхностями  $\varphi \neq \alpha$ . Обозначение  $G'$  относится к  $h \rightarrow \infty$ .

Таблица 6.2.

Максимальные эхосигналы от угловых отражателей  $P/P_m$   
для поперечных волн

Искусственный дефект, отражатель	Ближняя зона	Дальняя зона	Коэффициент вида дефекта $A$
Зарубка 	$(1...2,5) \frac{Gs'}{S'}$	$\frac{Gs'S'}{r^2\lambda^2}$	$\frac{Gs'}{\lambda^2}$
Засверловка 	$(0,5...1,2) \times \frac{Gh}{S' \sqrt{\sin \varphi}} \sqrt{\frac{\lambda d}{\sin \varphi}}$	$\frac{GhS'}{2r^2} \sqrt{\frac{d}{\lambda^3 \sin \varphi}}$	$\frac{Gh}{2} \sqrt{\frac{d}{\lambda^3 \sin \varphi}}$
Риска 	$\frac{Gh}{L} *$	$\frac{GhS'}{\sqrt{2(r\lambda)^3}}$	$\frac{Gh}{\lambda}$
Вертикальное отверстие 	$\frac{G'}{2L} \sqrt{\frac{\lambda d}{\sin \varphi}} *$	$G' \frac{S'}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3 \sin}}$	$\frac{G'}{2} \sqrt{\frac{d}{\lambda \sin \varphi}}$
Двугранный угол 	$G'$	$G' \frac{S'}{2r\lambda}$	-
Полуцилиндр 	-	$\frac{L}{\sqrt{2r\lambda}}$	-

В области углов около  $60^\circ$  экспериментально наблюдаемый угол  $\varphi$  меньше расчетного на  $6...8^\circ$ . В формулах для засверловки и вертикального цилиндрического отверстия угол  $\varphi$  должен быть больше  $30^\circ$ . Для поперечных волн это обычно выполняется, поскольку угол призмы преобразователя больше первого критического.

## Пример 6.9

Рассчитать размеры зарубок для настройки чувствительности при контроле сварного соединения толщиной  $H = 50$  мм. Уровень фиксации  $s = 7$  мм<sup>2</sup>, углы ввода преобразователей  $\alpha = 45, 50$  и  $65^\circ$ ; размеры пьезопластины  $L \cdot L_1 = 8 \cdot 8$  мм<sup>2</sup>, частота  $f = 4$  МГц.

Рассчитаем длину волны и оценим длину ближней зоны:

$$\lambda = c_r / f = 3,23 / 4 = 0,8 \text{ мм}; \quad N = L^2 / (\pi \lambda) = 8^2 / (\pi \cdot 0,8) = 25,8 \text{ мм}.$$

Минимальное расстояние преобразователь-отражатель



$$r' = H / \cos \alpha = 50 / \cos 45^\circ = 71 \text{ мм,}$$

таким образом, отражатель в дальней зоне преобразователя.

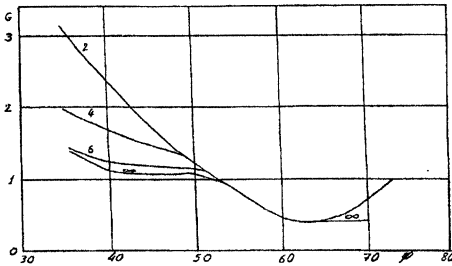


Рис. 6.9. Коэффициент  $G$  для расчета сигналов от угловых отражателей в функции от угла падения  $\varphi$  на донную поверхность объекта контроля и глубины отражателя  $h$  в мм.  $\infty$  соответствует значению  $G = G'$  для двугранного угла и вертикального отверстия.

Эхосигналы  $P$  и  $P'$  от плоскодонного отверстия и зарубки с отражающими площадями  $s$  и  $s'$  опреде-

ляются формулами:

$$\frac{P}{P_m} = \frac{S' s}{r^2 \lambda^2} e^{-2\delta'}; \quad \frac{P'}{P_m} = G \frac{S' s'}{r^2 \lambda^2} e^{-\delta'}$$

Эти сигналы должны быть равны, отсюда:

$$s = G s'$$

По кривой 2, рис. 6.9 для заданных углов найдем:  $G = 1,8; 1,3$  и  $0,5$ ; площади зарубок:  $s' = s/G$  равны  $3,9; 5,4$  и  $14 \text{ мм}^2$  Принимаем  $h = 2 \text{ мм}$ , тогда длины зарубок:  $l$  равны  $2; 2,7$  и  $7 \text{ мм}$ .

Возникает опасение, не будут ли края последней зарубки за пределами пучка лучей основного лепестка диаграммы направленности преобразователя. Рассчитаем по формуле (5.5) угол раствора пучка на уровне  $\sqrt{0,5}$  и раскрытие пучка  $l_{\Pi}$  на расстоянии  $r' = H / \cos \alpha = 50 / \cos 65^\circ = 118 \text{ мм}$ ;

$$\theta = \arcsin(0,22 \cdot 2\lambda / L) = \arcsin(0,22 \cdot 2 \cdot 0,8 / 8) = 2,5^\circ;$$

$$2l = 2r' \operatorname{tg} \theta = 2 \cdot 118 \cdot \operatorname{tg} 2,5^\circ = 10,4 \text{ мм.}$$

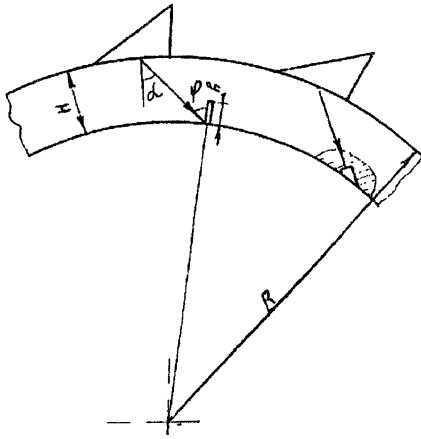
т.е. зарубка находится в пределах эффективной части основного лепестка.

В следующем примере рассмотрен контроль изделий с внутренним каналом большого диаметра (труб или роторов). Наиболее часто встречающиеся в таких изделиях дефекты — продольные трещины и риски на внутренних и наружных поверхностях, поэтому настройку чувствительности выполняют по искусственной риске. Требуется сопоставить этот отражатель с плоскодонным отверстием. Поскольку поверхности непараллельны, угол падения на внутреннюю поверхность будет больше, чем угол ввода.

Пример 6.10

Контроль стальной трубы диаметром  $2R = 400 \text{ мм}$  с толщиной стенки  $H = 20 \text{ мм}$  (рис. 6.10) ведут на частоте  $2 \text{ МГц}$  наклонным преобразователем с пьезопластиной  $L_1 \setminus L = 20 \cdot 22 \text{ мм}^2$ , угол ввода  $\alpha = 45^\circ$  ( $\beta = 35^\circ$ ). Расстояние пластина — точка ввода  $r_3 = 26 \text{ мм}$ , настройка чувствительности выполнена по риске глубиной  $h = 2 \text{ мм}$  и протяженностью  $40 \text{ мм}$ . Найти площадь эквивалентного плоскодонного отражателя.

Рис. 6.10. К расчету эквивалентной площади риски.



Рассчитаем длину волны и оценим длину ближней зоны:

$$\lambda = c_t / f = 3,23/2 \approx 1,6 \text{ мм};$$

$$N = \frac{S}{\pi \lambda_t} = \frac{20 \cdot 22}{\pi \cdot 1,6} = 87 \text{ мм}.$$

Приведенное расстояние (с учетом пути в призме) мнимый преобразователь – отражатель:

$$r = \left( \frac{H}{\cos \alpha} + r_K \frac{c_K}{c_t} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right) / N =$$

$$\left( \frac{20}{\cos 45^\circ} + 26 \frac{2,72}{3,23} \cdot \frac{\cos 45^\circ}{\cos 35^\circ} \right) / 87 = 0,63.$$

Здесь  $c_s$  и  $c_t$  – скорости продольной волны в материале призмы (органическое стекло) и поперечной волны в стали. Поскольку путь ультразвука меньше длины ближней зоны, будем использовать соответствующие формулы таблиц 6.1 и 6.2, принимая средние значения численных коэффициентов. Риска длиной 40 мм – это протяженный дефект, а плоскодонное отверстие – компактный. Приравниваем амплитуды эхосигналов:

$$1,75s / S' = Gh / L'; \quad s = Gh / 1,75.$$

Определим значение коэффициента  $G$ . Угол падения на внутреннюю поверхность :

$$\varphi = \arcsin \frac{\sin \alpha}{1 - H/R} = \arcsin \frac{\sin 45^\circ}{1 - 20/200} = 51,8^\circ;$$

Пользуясь кривой 2 рис. 6.10, находим  $G = 1,1$ . В результате

$$s = 1,1 \cdot 2 \cdot 22 / 1,75 = 27,6 \text{ мм}^2.$$

#### 6.4. Отражение от дефектов при контроле эхосеркальным методом

При контроле этим методом анализируются сигналы, зеркально отраженные от дна изделия и (зеркально или незеркально) от дефекта. Здесь рассмотрен вариант, называемый "тандем", когда одинаковые излучатель и приемник перемещаются в одной плоскости или в двух близкорасположенных плоскостях и сумма расстояний от преобразователей до плоскости, в которой расположен отражатель, поддерживается постоянной.

Формулы для расчета эхосигналов от некоторых искусственных отражателей и моделей дефектов сведены в табл. 6.3. Все формулы – для поперечных волн, углы наклона преобразователей – между первым и вторым критическими. Обозначения – как табл. 6.1 и 6.2, со следующими дополнениями:  $R_2 = R(\alpha)R(90^\circ - \alpha)$  – коэффициент двойного отражения (п. 3.2);  $r_u$  и  $r_n$  – расстояния излучатель-отражатель и отражатель-приемник, одно из них включает путь от дна изделия до преобразователя (на рисунках таблицы 6.3 – до приемника). Формулы таблицы необходимо умножить на  $e^{-\delta(r_u + r_n)}$  для

учета затухания. Коэффициент прозрачности и затухание в призмах, как и в табл. 6.2, опущены.

Пример 6.11

Сравнить изменение амплитуд эхосигналов  $\langle P_T/P_C \rangle$  от бокового цилиндрического и плоскодонного отверстий диаметром  $d = 2b = 3 \text{ мм}$ , лежащих в середине сварного шва толщиной  $H = 200 \text{ мм}$  при контроле способом тандем и совмещенным преобразователем. Угол ввода  $\alpha = 45^\circ$ , частота  $f = 1,8 \text{ МГц}$ , размеры пьезопластины  $L \cdot L = 18 \cdot 18 \text{ мм}^2$ , коэффициент затухания  $\delta = 0,25 \text{ Нп/м}$ . Импульсы короткие.

Рассчитаем длину волны и оценим длину ближней зоны преобразователя

$$\lambda = c_t / f = 3,23 / 1,8 = 1,8 \text{ мм}; \quad N = L^2 / \pi \lambda = 18^2 / \pi \cdot 1,8 = 57 \text{ мм}.$$

Минимальное расстояние преобразователь-отражатель

$$r = H / (2 \cos \alpha) = 200 / (2 \cos 45^\circ) = 141 \text{ мм},$$

таким образом, отражатель лежит в дальней зоне преобразователя. Эхосигналы для бокового цилиндрического отражателя находим из формул таблиц 6.1 и 6.3. Одинаковые множители опускаем;  $r_n = 2r + r$ .

$$\frac{P_T}{P_c} = \frac{1}{r\sqrt{2r+r}} \bigg/ \frac{1}{\sqrt{r^3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 4,8 \text{ дБ}.$$

Отношение множителей, учитывающих потери на затухание, дает:

$$\langle \delta \rangle 2r = 8,68 \delta \cdot 2r = 8,686 \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 0,141 = 0,6 \text{ дБ}.$$

Итого сигнал, полученный способом тандем, на  $4,8 + 0,6 = 5,4 \text{ дБ}$  меньше, чем совмещенным преобразователем.

Сигналы  $P'_c$  и  $P'_r$ , полученные совмещенным преобразователем и способом тандем от плоскодонного отверстия, определяем из (6.3) и третьей формулы табл. 6.3. Угол падения на отражатель считаем равным  $\varepsilon = \alpha = 45^\circ$  в обоих случаях. Отношение эхосигналов:

$$\frac{P'_c}{P'_T} = \frac{\Phi'(kb \cos \varepsilon) \sin 2\varepsilon}{r^2} \bigg/ \frac{1}{r(2r+r)} = 3\Phi' \left[ \frac{2\pi}{1,8} \cdot 1,5 \cdot \cos 45^\circ \sin(2 \cdot 45^\circ) \right] = 0,33 = 9,61 \text{ дБ}.$$

$\Phi'$  - диаграмма направленности отражателя, который выступает в качестве вторичного излучателя. Ее аргумент равен  $X = 3,7$ . Значение  $\Phi'$  для этого аргумента находим из графика  $|2J_1(X)/X|$ , верхняя штриховая кривая на рис 5.3. С учетом затухания сигнал при способе тандем на 9 дБ больше сигнала при использовании совмещенного преобразователя.

Общее изменение отношения амплитуд двух сигналов для разных способов контроля - около 14 дБ. Пример показывает возможность определения характера дефекта способом коэффициента формы (см. п. 7.6).

### 6.5. Особенности отражения от реальных дефектов

Реальные дефекты отличаются от рассмотренных выше моделей неправильностью формы, шероховатостью поверхности, они могут быть заполнены окислами и другими веществами, в результате чего отражение будет неполным. Дефекты разделяют на объемные и плоскостные. Первые (поры, шлаки) дают равновероятное рассеяние падающей волны по всем направлениям. От вторых (расслоения, трещины, непровары в сварных швах) рассеяние имеет определенную направленность. Ориентация плоскости этих дефектов зависит от технологического процесса и условий эксплуатации. Бывают промежуточные типы дефектов, например, паукообразные трещины,

Эхосигналы при контроле методом тандем

Модель дефекта или искусственный отражатель	Формулы для дальней зоны
Сфера диаметром $d$	$\frac{R_2 S' d}{4r_u r_n \lambda}$
Боковое отверстие диаметром $d$	$\frac{R_2 S'}{\lambda r_n} \sqrt{\frac{d}{8r_u}}$
Диск, плоскодонное отверстие площадью $s$	$\frac{R_2 S' s \cos \varphi}{\lambda^2 r_u r_n}$
Полоса, паз шириной $l$	$\frac{R_2 S' l \cos \varphi}{r_u \sqrt{2r_n \lambda^2}}$
Плоскость	$\frac{R_2 S'}{\lambda(r_u + r_n)}$

некоторые виды непроваров.

Объемные дефекты удовлетворительно выявляются совмещенным преобразователем независимо от направления падения волны. От плоскостных дефектов большие эхосигналы наблюдают только при благоприятных (зеркальных) условиях отражения. При незеркальном отражении имеются дифракционные волны от краевых точек дефекта. Их амплитуда значительно меньше амплитуды зеркального отражения и определяется направлениями излучения и приема относительно плоскости дефекта, а также типом излучаемых и принимаемых волн.

При контроле наклонным совмещенным преобразователем амплитуда эхосигнала дифракционной волны от края вертикальной полуплоскости с очень малым раскрытием приблизительно эквивалентна амплитуде отражения от бокового цилиндрического отверстия диаметром

$$d = \lambda / 2\pi^2.$$

Наблюдают также рассеяние на неровной поверхности дефекта. Оно тем больше, чем больше параметр Рэлея

$$R = 2k\sigma \cos \varepsilon,$$

где  $k$  – волновое число,  $\sigma$  – среднеквадратичное значение высоты неровностей,  $\varepsilon$  – угол падения на дефект.

## 7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ

Здесь изложены только способы измерения параметров дефектов (неплошностей) с помощью универсального дефектоскопа. Способы, предполагающие использование специальных приборов (спектральных дефектоскопов, систем Зипскан и т.п.), здесь не рассматриваются. В следующей главе рассмотрено исследование дефектов с помощью акустической голографии. В число измеряемых характеристик дефектов входят: координаты, эквивалентная площадь, условные размеры, отнесение дефекта к компактным или протяженным, количество раздельно фиксируемых дефектов, связанное с разрешающей способностью.

### 7.1. Измерение координат дефекта

#### Принцип измерения.

Измерение состоит в поиске положения преобразователя, на поверхности ввода при котором достигается максимум эхосигнала (точки  $O$ ) и определении координат дефекта относительно найденного положения. Компактные дефекты в дальней зоне преобразователя имеют один максимум эхосигнала. Наличие нескольких максимумов говорит о сложной форме дефекта, его протяженности, групповом характере.

Координаты точки  $O$  на поверхности объекта контроля (рис. 7.1, а) обозначим ( $X_0, Y_0, Z_0$ ). Координата  $Z$  перпендикулярна рисунку. Относительно этой точки координаты дефекта можно выразить формулами:

$$x = r \sin \alpha; \quad y = r \cos \alpha; \quad r = c(t - t_3). \quad (7.1)$$

Здесь  $r$  — расстояние до дефекта, определенное через измерение времени  $t$  глубиномером, настроенным на скорость звука  $c$ ;  $t_3$  — время пробега в акустической задержке (призме преобразователя, жидких контактных слоях и т. д.);  $\alpha$  — угол ввода, он определяется выбором преобразователя. Для прямого преобразователя  $\alpha = 0$ ,

$$y = c(t - t_3). \quad (7.2)$$

При контроле наклонным преобразователем однократно отраженным лучом (рис. 7.2.) глубина дефекта от поверхности ввода вместо (7.1) определяется формулой

$$y = 2H - y_{изм}, \quad (7.3)$$

где  $y_{изм}$  — глубина, измеренная дефектоскопом,  $H$  — толщина ОК. Когда угол ввода преобразователя  $\alpha = 35 - 38^\circ$  (для стали), происходит сдвиг отраженных лучей на 3 - 6 мм (рис. 3.8). Смещение тем больше, чем ниже частота

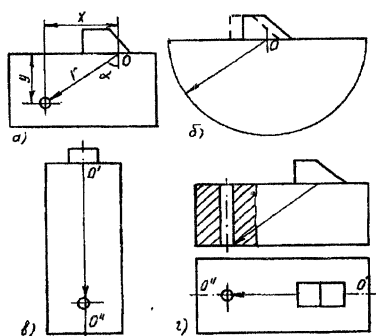


Рис. 7.1. Схема определения и проверки угла ввода и точки выхода для измерения координат дефектов.

и чем угол ввода ближе к третьему критическому углу  $33^\circ$ . Это учитывают при измерении координаты  $x$ .

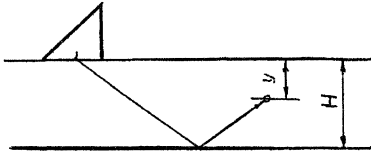


Рис. 7.2. Измерение координат дефекта отраженным лучом

#### Пример 7.1.

Однократно отраженным лучом в объекте толщиной 50 мм измерены координаты дефекта  $y_{изм} = 80$  мм,  $x_{изм} = 59$  мм. Преобразователь с углом ввода  $50^\circ$  на частоту 4 МГц.

Согласно (7.2) рассчитываем  $y$

$$y = 2H - y_{изм} = 2 \cdot 50 - 80 = 20 \text{ мм}$$

Сдвиг при отражении считаем равным нулю. Тогда

$$x = x_{изм} = 59 \text{ мм}$$

При контроле наклонным преобразователем объекта с цилиндрической поверхностью радиусом  $R$  (рис. 7.3) координаты обнаруженного дефекта удобно измерять по окружности (например, гибкой линейкой)  $x' = OD_1$  и по радиусу от поверхности ввода  $y' = D_1D$  вместо измеряемых дефектоскопом  $x$  и  $y$  в прямоугольных координатах. Расчет  $x'$  и  $y'$  выполняют по графиками рис. 7.4, на которых значения  $x'/R$  и  $y'/R$  представлены в виде зависимости  $l/R$ , где  $l$  расстояние от преобразователя до дефекта. Графики построены для значений углов ввода, часто применяемых на практике.

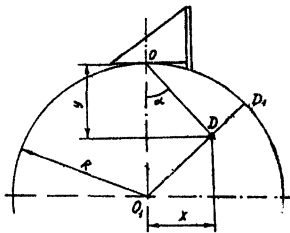


Рис. 7.3. Определение координат при контроле цилиндра

Величина  $l$  связана с координатами дефекта  $x$  и  $y$  формулами

$$l = y / \cos \alpha = x / \sin \alpha ;$$

Удобно настроить дефектоскоп на измерение величины  $l$  по отверстию диаметром 6 мм в СО-2. В табл. 3.1 приведены значения  $l$  в этом образце для преобразователей с различными углами ввода. Для преобразователей с углами ввода  $35 \dots 60^\circ$  настройка ведется, когда отверстие расположено на глубине 44 мм, а для преобразователей с углами ввода  $65$  и  $70^\circ$  —

на глубине 15 мм.

Таблица 3.1

$\alpha$ , град.	35	40	45	50	60	65	70
$l$ , мм	53,7	57,4	62,2	68,5	88	35,5	43,9

#### Пример 7.2.

Контролируется труба диаметром  $2R = 200$  мм с толщиной стенки 20 мм преобразователем с углом ввода  $\alpha = 45^\circ$ , перемещающимся в плоскости поперечного сечения. Измерены координаты дефекта, выявленного прямым лучом:  $y_{изм} = x_{изм} = 18$  мм. Определить координаты дефекта для цилиндрической поверхности.

Вычисляем  $l = 18 / \cos 45^\circ = 25,5$ ; отношение  $l/R = 25,5 / 100 = 0,255$ . По графикам рис. 7.4, используя кривые  $45^\circ$ , находим  $y'/R = 0,165$ ;  $x'/R = 0,21$ . Отсюда следует  $y' = 16,5$  мм;  $x' = 21$  мм.

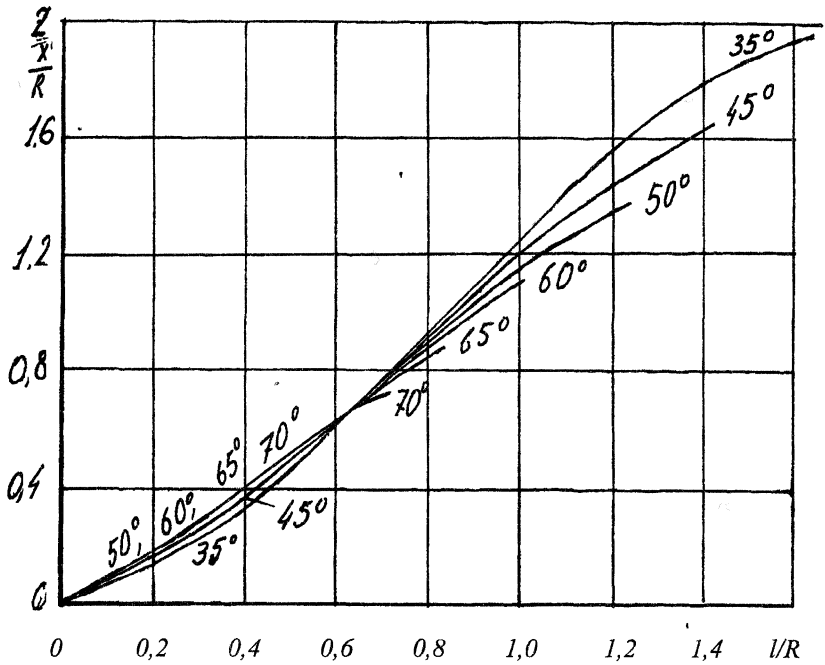
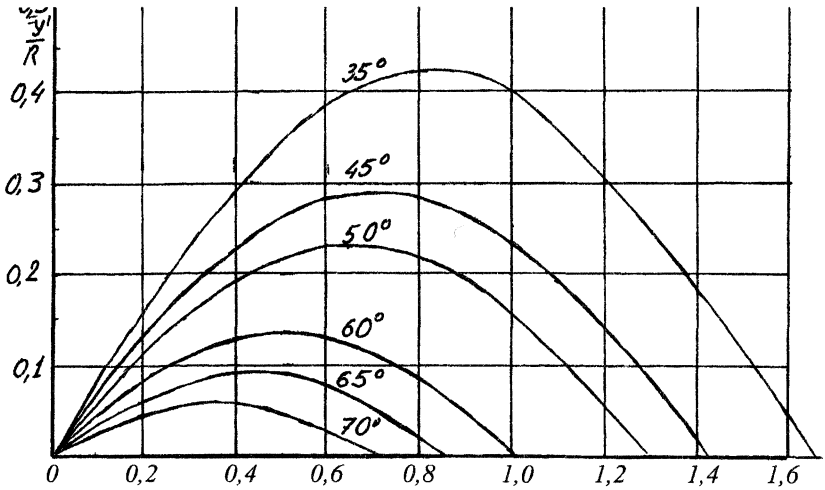


Рис. 7.4. Координаты дефектов при контроле цилиндрических изделий

#### Настройка и проверка аппаратуры

Настройка и проверка выполняются по стандартным образцам (СО)

ГОСТ 14782-86 для этой цели предусматривает СО-2 и СО-3, принцип использования которых показан на рис. 7.1, *а* и *б*. Зарубежными стандартами предусмотрены образцы V-1 и V-2, позволяющие реализовать операции, аналогичные описанным ниже. Методика КУ предусматривает использование дополнительного образца, показанного на рис. 7.1, *в* и *г*. При всех показанных на рис. 7.1 измерениях, при которых предусматривается поиск максимума эхосигнала, путь ультразвука в образце должен как минимум в 2 раза превосходить длину ближней зоны, которую оценивают по формуле (5.11). Ширина образцов должна быть больше ширины преобразователя. Если эти условия для образцов СО-2 и СО-3 не выполняются, необходимо изготавливать подобные им образцы с увеличенными размерами.

Проверку правильности работы глубиномера выполняют по многократным отражениям, например, по многократным донным сигналам в СО-2, положенном на бок (толщина 30 мм), при контроле прямым преобразователем. Преобразователь должен располагаться вблизи центра образца, чтобы не влияли отражения от боковых поверхностей. При правильной работе интервалы времени между первым и вторым, вторым и третьим и т. д. донными сигналами должны быть одинаковыми. Интервал от зондирующего до первого донного сигнала увеличен за счет прохождения импульсом протектора и слоя контактной жидкости (время  $t_3$ ).

Если прибор имеет измеритель времени, настройку на начало отсчета выполняют по образцу, для которого известно время пробега импульса. При контроле прямым преобразователем используют образец СО-2, в котором время пробега продольных волн в прямом и обратном направлениях по высоте равняется 20 мкс. При контроле наклонным преобразователем с углами ввода  $65^\circ$  и менее используют образец СО-3, в котором время пробега поперечных волн от оси цилиндра до полуцилиндрической поверхности в прямом и обратном направлениях 34,1 мкс. Регулируют задержку начала отсчета времени таким образом, чтобы время пробега эхосигнала в образце, по которому ведется настройка, было равно расчетному. При этом задержка отсчета времени получится равной  $t_3$ .

#### Пример 7.3.

Настроить прибор таким образом, чтобы при измерении прямым преобразователем начало отсчета времени и координат совпадало с моментом вхождения импульса в ОК.

Используем СО-2, высота которого равна  $H = 59$  мм, поэтому время пробега в нем импульса продольных волн в прямом и обратном направлениях равно  $t = 2H/c_l = 2 \cdot 59/5,9 = 20$  мкс. Оперирруя ручкой установки нуля, добиваемся отсчета "20,00" мкс на шкале времени прибора. Настройка закончена

#### Пример 7.4.

Выполнить такую же настройку для наклонного преобразователя.

Используем СО-3, радиус которого равен  $R = 55$  мм. Время пробега в нем импульса поперечных волн в прямом и обратном направлениях равно  $t = 2R/c_t = 2 \cdot 55/3,23 = 34,06$  мкс  $\approx 34,1$  мкс. Получаем максимальный эхосигнал от во-



гнутой цилиндрической поверхности (рис. 7.1,б). Опирая ручкой установки нуля, добиваемся отсчета времени "34,1" мкс на шкале времени. Настройка закончена.

Точку  $O$  на поверхности изделия отмечают под точкой выхода. У прямого преобразователя последняя находится в геометрическом центре. У наклонного преобразователя в дополнительной плоскости она лежит в плоскости симметрии, а в основной – определяется экспериментально. Она расположена над осью полуцилиндрической поверхности образца СО-3, когда эхосигнал от этой поверхности максимален (7.1,б). Для преобразователя с углами ввода  $70^\circ$  и более найденная экспериментально точка выхода на 2...5 мм смещена от места пересечения геометрической оси пьезопластины с рабочей поверхностью преобразователя; такое положение преобразователя на рис. 7.1,б показано штриховыми линиями.

Скорость звука определяют как рекомендовано в 2.3. Угол ввода  $\alpha$  находят с помощью образца с боковым цилиндрическим отверстием (рис. 7.1,а). Измеряют значение  $x$  при максимуме эхосигнала и при известном  $y$  рассчитывают

$$\alpha = \arctg x/y. \quad (7.4)$$

На образце СО-2 непосредственно вблизи поверхности ввода обозначены углы  $\alpha$  для углеродистой стали. Шкала для преобразователей с углами ввода  $60^\circ$  и меньше расположена вблизи поверхности образца на расстоянии 44 мм до бокового цилиндрического отверстия. Шкала для преобразователей с углами ввода больше  $60^\circ$  расположена вблизи поверхности образца на расстоянии 15 мм до бокового цилиндрического отверстия. Если материал ОК не углеродистая сталь, для настройки дефектоскопа изготавливают из этого материала образец СО-2А, подобный СО-2.

Современные дефектоскопы имеют глубиномер с автоматическим отсчетом координаты  $y$  при контроле прямым преобразователем, координат  $x$  и  $y$  при контроле наклонным преобразователем. Настройка глубиномера с прямым преобразователем заключается в получении донного сигнала (например, от СО-2) и регулировки скорости звука до получения отсчета, равного толщине ОК (59 мм). Настройка глубиномера с наклонным преобразователем заключается в получении максимального эхосигнала от бокового цилиндрического отверстия (например, от отверстия диаметром 6 мм в СО-2) и настройке прибора на измерения координат  $x$  и  $y$  от точки ввода до поверхности отверстия (для отверстия в СО-2 на глубине 44 мм, считая до центра отверстия, на значение  $y \approx 42$  мм и  $x$ , равному расстоянию, измеренному масштабной линейкой по поверхности образца). При этом будут учтены величины  $c$ ,  $\sin \alpha$  и  $c$ ,  $\cos \alpha$  из формул (7.1).

При большой глубине залегания отражателя угол ввода уменьшается. Это происходит потому, что луч диаграммы направленности преобразователя, соответствующий меньшему значению  $\alpha$ , проходит более короткий путь и амплитуда эхосигнала от отражателя для него больше, чем для центрально-

го луча с углом  $\alpha$ , измеренным на малой глубине. Этот эффект тем заметнее, чем больше затухание УЗ в материале ОК и чем шире диаграмма направленности. В связи с этим при глубине залегания дефекта более 100 мм настройку дефектоскопа выполняют не по СО-2, а по аналогичному образцу с боковым отражателем на глубине, близкой к измеряемой.

При повышении температуры угол ввода для наклонного преобразователя увеличивается, т. к. скорость звука в призме уменьшается сильнее, чем в металле ОК. В связи с этим проверку угла ввода или настройку дефектоскопа на измерение координат производят при температуре контроля. Для преобразователей с углом ввода  $70^\circ$  и более это требование обязательно.

Перед началом использования каждого прямого преобразователя следует проверить перпендикулярность акустической оси к его рабочей поверхности. Проверку по схеме рис. 7.1,в выполняют дважды с поворотом преобразователя вокруг оси на  $90^\circ$ . Перед началом использования каждого наклонного преобразователя следует проверить равенство нулю угла в дополнительной плоскости по схеме 7.1,г (вид сбоку и сверху). При равенстве этого угла нулю точка выхода преобразователя располагается над осью  $O'O''$ . Если найденные углы отличаются нуля, вводят поправку при измерении координат дефектов.

#### Погрешность измерения.

Согласно формуле (7.1) и принципу измерения, погрешности связаны с неточностями определения времени пробега, скорости, угла ввода и положения точки  $O$  начала отсчета. Формулы для расчета погрешности от каждого из этих факторов приведены в табл. 7.2. Через  $r$  обозначено расстояние от преобразователя до отражателя, а также координаты  $x$  и  $y$ , если формулы расчета погрешностей для них одинаковы.

Погрешность измерения времени одинаково проявляется при контроле прямым и наклонным преобразователями. Ее причины дифференцированы: погрешность глубиномера как измерительного устройства, ошибка учета пути в задержке-призме, включая слой контактной жидкости ( $r_3$  и  $c_3$  – путь и скорость в задержке), длительность импульса. Две последние погрешности отнесены к  $r$ . Влияние длительности импульса на измерение времени учитывается членом  $\kappa T$ , где  $T$  – период колебаний, а  $\kappa = 0,1..1$  в зависимости от изменения положения точки, по которой выполняется измерение, относительно начала импульса. Обычно  $\kappa \approx 0,25$ . Погрешность в определении скорости звука влияет на точность измерения расстояния так же, как погрешность измерения времени. При настройке скорости проявляются те же факторы, что при измерениях, поэтому  $\Delta c/c + \Delta t/t = 2\Delta t/t$ . При контроле наклонным преобразователем скорость влияет также на угол ввода. Ошибка измерения координаты  $X$  на поверхности изделия обозначена через  $\Delta X = X - X_0$ .

Таблица 7.2.

Причина		Тип преобразователя	
N	погрешности	прямой	наклонный
		$\Delta r/r; \Delta X$	$\Delta y/y$ $\Delta x/x$
1	Погрешность измерения времени $\Delta t$	$\Delta r/r = \Delta t/(t - t_3)$	
1.1	Погрешность глубиномера $\Delta t'$	$\Delta t'/(t - t_3)$	
1.2	Неточность учета толщины задержки	$-cr_3/(c_3r)$	
1.3	Длительность импульса	$\kappa\lambda/r$	
2	Изменение скорости в изделии $\Delta c$	$\Delta r/r = \Delta c/c$	$(1 - \text{tg}^2\alpha)\Delta c/c$ $2\Delta c/c$
3	Неточность угла ввода $\Delta\alpha$	$\Delta X/r = \text{tg}(\Delta\alpha)$	$-\Delta\alpha \cdot \text{tg}\alpha$ $\Delta\alpha/\text{tg}\alpha$
4	Неточность определения точки О по максимуму эхосигнала	$\Delta X = D/4$	ближняя зона - дальняя зона $\frac{0,3\lambda}{D} \text{tg}\alpha$ $\frac{0,3\lambda}{D \text{tg}\alpha}$

Оценка погрешности определения точки  $O$  выполнена с помощью приближенной формулы, которая связывает изменение расстояния до дефекта  $\Delta r$  (рис. 7.5) с углом  $\theta \ll \alpha$  между акустической осью и лучом, направленным на отражатель. Такое изменение происходит вследствие нестабильности акустического контакта при перемещении наклонного преобразователя по поверхности объекта контроля:

$$\Delta r = r - r_0 = c\Delta t \approx \theta y \text{tg}\alpha / \cos\alpha; \quad r_0 = y / \cos\alpha.$$

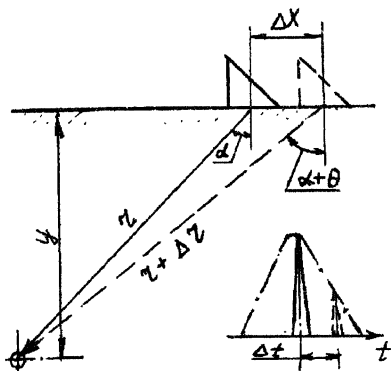


Рис. 7.5. Изменение расстояния до отражателя (а) и перемещение импульса по линии развертки (б) при движении наклонного преобразователя по поверхности ОК. Штриховые линии – положение преобразователя и импульс на экране при смещении в сторону от максимального эхосигнала. Штрихпунктирная линия – геометрическое место перемещения вершины импульса на экране.

#### Пример 7.5.

Оценить максимальную погрешность измерения координат дефекта на глубинах 10, 100 и 1000 мм в стали прямым преобразователем диаметром  $D = 24$  мм, частота  $f = 2$  МГц. Наклон акустической оси преобразователя в плоскости  $xu$   $\Delta\alpha = 1^\circ$ , погрешность глубиномера  $\Delta t/t = 1\%$ , изменение толщины слоя контактной жидкости  $r_3 = 0,1$  мм;  $c_3 = 1,48$  мм/мкс.

Вычислим длину волны и длину ближней зоны преобразователя:

$$\lambda = c/f = 5,92/2 \approx 3 \text{ мм}; \quad N = D^2/(4\lambda) = 24^2/(4 \cdot 3) = 48 \text{ мм}.$$

Общая погрешность измерения глубины для  $r = 10$  мм ( $\kappa = 0,25$ ):

$$\begin{aligned} \Delta r/r &= 2(\Delta t/t + \kappa\lambda/r + cr_3/c_3r) = \\ &= 2(0,01 + 0,25 \cdot 3/10 + 5,92 \cdot 0,1/1,48 \cdot 10) = 0,25 = 25\% \end{aligned}$$

Множитель 2 учитывает, что погрешность возникает дважды: при настройке скорости звука и при измерении глубины. Для глубины  $r = 100$  мм –  $\Delta r/r = 4,3\%$ ; для  $r = 1000$  мм –  $2,2\%$ .

Погрешность определения положения точки  $O$  с координатами  $(X_0, Z_0)$ , соответствующей максимуму эхосигнала, в плоскости  $yz$  на глубине 10 мм (в ближней зоне) равна:

$$\Delta Z = Z - Z_0 = D/4 = 24/4 = 6 \text{ мм}.$$

На глубине  $r = 100$  мм (в дальней зоне):

$$\Delta Z = 0,3\lambda r/D = 0,3 \cdot 3 \cdot 100/2424 = 3,75 \text{ мм},$$

а для  $r = 1000$  мм –  $\Delta Z = 37,5$  мм.

В плоскости  $xu$  необходимо учитывать неперпендикулярность оси преобразователя. Для глубины 100 мм связанное с этим смещение дефекта

$$\Delta X = \Delta Z + r \cdot \text{tg}\Delta\alpha = 3,75 + 100\text{tg}1^\circ = 5,5 \text{ мм}.$$

Для глубины 1000 мм –  $\Delta X = 55$  мм.

Пример демонстрирует, что с увеличением глубины уменьшается составляющая погрешности измерения времени пробега, связанная с длительностью импульса и изменением толщины слоя контактной жидкости. Смещение дефекта относительно положения точки  $O$  при неперпендикулярности оси возрастает пропорционально глубине залегания дефекта.

#### Пример 7.6.

Дефектоскоп с углом ввода преобразователя  $\alpha = 50^\circ$  настроен по образцу из углеродистой стали. Ведется контроль изделия из аустенитной стали со скоростью поперечных волн  $c = 3,18$  мм/мкс. Оценить погрешность измерения координат.

Используя формулы строки 2 табл. 7.2, находим

$$\Delta y/y = (1 - \operatorname{tg} 50^\circ)(3,23 - 3,18)/3,23 = -0,0065 = -0,65\% ;$$

$$\Delta x/x = 2(3,23 - 3,18)/3,23 = 0,031 = 3,1\% .$$

Координата вдоль поверхности изделия будет заметно завывшаться, а по глубине – немного занижаться.

## 7.2. Измерение эквивалентной площади дефекта

Эквивалентной площадью (эквивалентным диаметром) дефекта называют площадь (диаметр) плоскодонного отражателя, дающего эхосигнал той же амплитуды и расположенного на такой же глубине в таком же материале, что и естественный дефект. Для ее определения используют стандартные образцы предприятия (СОП) с искусственными дефектами или АРД диаграммы.

### Пример 7.7.

При условиях, как в примерах 6.3 и 6.4 обнаружен дефект на глубине 125 мм, дающий амплитуду 30 дБ. Шкалы амплитуд АРД диаграммы и аттенюатора совмещены. Какова эквивалентная площадь этого дефекта?

На АРД диаграмме, показанной на рис. 6.5, от ординаты 30 дБ проводим наклонную линию до пересечения с абсциссой 125 мм. Находим эквивалентный диаметр 5 мм, что по шкале рис. 6.4 дает эквивалентную площадь  $s = 19,5 \text{ мм}^2$ .

Применение АРД диаграмм ограничивается кривизной поверхности изделия. При контроле прямым преобразователем диаметром  $D$  (в мм) диаграмму для плоской поверхности можно применять для стального изделия с выпуклой цилиндрической поверхностью радиусом  $R$  (в мм), когда выполняются одновременно два условия

$$R \geq D^2/(4 \dots 8); \quad R \geq 0,16D^2 f, \quad (7.5)$$

где  $f$  – частота в МГц. Цифра 4 в первом условии соответствует обычным условиям контроля, а цифра 8 – обильному применению густой контактной смазки. Совмещение шкал амплитуд АРД диаграммы и аттенюатора необходимо выполнять по СОП с кривизной поверхности близкой к кривизне ОК.

При контроле преобразователем с задержкой (наклонным, РС) в последнем условии цифровой множитель во втором условии 0,1 и даже меньше. Для вогнутых поверхностей условия более жестки. Когда это ограничение нарушается или используются специальные преобразователи (например, раздельно-совмещенные, фокусирующие), применяют СОП или соответствующие АРД диаграммы.

### Пример 7.8.

Контроль вала какого диаметра  $2R$  можно выполнять прямым преобразователем диаметром 12 мм на частоте 2,5 МГц, пользуясь АРД диаграммой для плоской поверхности ОК?

Из условий (7.5) находим

$$2R \geq 2 \cdot 12^2/4 = 72 \text{ мм}; \quad 2R \geq 2 \cdot 0,16 \cdot 12^2 \cdot 2,5 = 115,2 \text{ мм}.$$

Более жестким является второе условие, согласно которому диаметр вала должен быть больше 115 мм, но совмещение шкал амплитуд АРД диаграммы и аттенюатора необходимо выполнять по донному сигналу СОП из того же вала, на участке, где дефекты отсутствуют. Поскольку диаметр вала значительно больше длины ближней зоны преобразовате-

ля, донные сигналы от вогнутой поверхности цилиндра и плоской поверхности одинаковы.

СОП и изделие должны иметь одинаковое качество поверхности ввода. Это проверяют тем же дефектоскопом с датчиками ДШВП и в случае несоответствия вводят поправки (изготовитель датчиков – НПО ЦНИИТМАШ).

Реальную площадь компактных дефектов определяют, деля эквивалентную площадь на коэффициент выявляемости. Для поковок и проката он равен 0,15 ... 0,4, а для сварных швов – 0,01 ... 0,1. Более точно коэффициент может быть определен для конкретных изделий, технологий и материалов путем набора статистических данных по вскрытию реальных дефектов.

Для протяженных плоских дефектов типа расслоений в листах и плитах эквивалентную площадь  $s$  используют как меру отражательной способности дефекта, характеризующую степень его раскрытия, заполненность инородными веществами. Коэффициент отражения от протяженного дефекта, рассчитанный по  $s$ , равен

$$|R| = (1..4)s/S \quad \text{– для ближней зоны;}$$

$$|R| = 2s/\lambda r \quad \text{– для дальней зоны.}$$

Пример 7.9.

При контроле плиты на частоте 3 МГц (длина волны  $\lambda = 2$  мм) преобразователем диаметром  $D = 2a = 12$  мм обнаружен протяженный дефект эквивалентной площадью  $s = 30$  мм<sup>2</sup> на глубине 50 мм. Каков коэффициент отражения от дефекта?

Длина ближней зоны

$$N = a^2/\lambda = 6^2/2 = 18 \text{ мм.}$$

Дефект находится в дальней зоне; для нее:

$$|R| = 2 \cdot 30/2 \cdot 50 = 0,6.$$

От дефекта отражается около половины УЗ энергии

### 7.3. Измерение условных размеров

Условный размер протяженных дефектов, когда они параллельны поверхности ввода (условную протяженность дефекта), измеряют по расстоянию между положениями преобразователя над крайевыми точками дефекта. Этот вопрос в общем виде рассмотрен в 6.2, здесь он уточняется. Положение краевой точки дефекта определяют по одному из следующих признаков:

1. Ослабление эхосигнала до уровня фиксации.
2. Ослабление эхосигнала на 6, 10 или 20 дБ от максимального значения (способы "6", "10" и "20 дБ").

В примере 6.9 было показано, как оценить истинную протяженность дефекта по условной, измеренной способом "20 дБ". Для этого следует рассчитать полурасширение дефекта по рекомендациям 6.2 и вычесть удвоенное значения полурасширения из измеренной условной протяженности дефекта. Система кривых рис. 6.8 позволяет сопоставить условные протяженности, измеренные различными способами.

## Пример 7.10.

В плите при контроле, как в примере 7.9, с уровнем фиксации по плоскодонному отверстию диаметром  $d = 2,2$  мм, на глубине  $r = 50$  мм обнаружен протяженный дефект эквивалентным диаметром 6,2 мм. Рассчитать полурастворение при различных способах измерения.

Полурастворение по признаку 2 рассчитаем по формулам (6.8) и (6.9) :

$$l_6 = 0.$$

Поскольку  $r = 2,8N > 2N$

$$l_{10} = 0,0575 \cdot 50 \cdot 2/6 + 0,065 \cdot 6 = 1,3 \text{ мм};$$

$$l_{20} = 0,177 \cdot 50 \cdot 2/6 + 0,23 \cdot 6 = 6,3 \text{ мм}.$$

Для определения полурастворения  $l_\phi$  по уровню фиксации найдем ослабление эхосигнала, соответствующего плоскодонке диаметром  $d' = 6,2$  мм, до уровня фиксации. Приведенные расстояние и диаметры:

$$r/N = 50/18 = 2,8; \quad d/D = 2,2/12 = 0,18; \quad d'/D = 6,2/12 = 5,2$$

С помощью АРД диаграммы рис. 6.2 находим, что разница (в дБ) амплитуд эхосигналов, соответствующих этим плоскодонкам:

$$29 - 14 = 15 \text{ дБ} = 0,18.$$

По кривой  $r/N = 3$  рис. 6.8 (ближайшее к 2,8 значение) находим, что на уровне 0,18 величина  $l'/a = 0,5$ . Тогда полурастворение  $l_\phi = 0,5a = 3$  мм.

Из примера видно, что полурастворение везде положительно, т. е. условная протяженность больше реальной. Исключение составляет способ "6 дБ". Измеренная по нему условная протяженность может быть равна, больше или меньше реальной.

При контроле наклонным преобразователем кроме условной протяженности (при контроле сварных швов – вдоль шва) используют понятия условной высоты (развитие дефекта в плоскости перпендикулярной поверхности ввода, то есть по высоте шва), и условной ширины (по ширине шва). Последнее измерение выполняют редко. Условную высоту чаще всего измеряют способом 6 дБ по перемещению эхосигнала на экране дефектоскопа. По крайним положениям эхосигнала определяют верхнюю и нижнюю точки дефекта, но иногда этого пересчета не делают и указывают пробег импульса по экрану в мкс. Измерение условной высоты дает результаты слабо коррелированные с истинной высотой для всех способов, кроме дифракционно-временного. При контроле обычным эхометодом целесообразно ограничиться определением развит или нет дефект по высоте по методике, изложенной в следующем пункте.

При наклонном расположении плоскостного дефекта к акустической оси преобразователя дифракционные максимумы эхосигналов от его краевых точек обычно превосходят сигнал от остальной части дефекта при небольшой его шероховатости. По координатам точек, соответствующих этим максимумам, определяют размеры и ориентацию дефекта. Это дифракционно-временной способ определения размеров дефекта. Эксперименты показали, что при контроле совмещенным преобразователем поперечных волн для получения эхосигналов от краевых точек наклонного к акустической оси дефекта необходимо вести контроль на уровне фиксации, соответствующем плоскодонному отверстию диаметром 0,5 мм, т. е. при чувствительности на

порядок больше обычно применяемой.

При раздельной схеме контроля и размещении преобразователей по разные стороны от дефекта амплитуда эхосигнала от краевых точек значительно больше. Для получения наибольшей амплитуды оптимальные углы ввода раздельных преобразователей поперечных волн должны быть 37 ... 47 градусов, а продольных волн – 60 ... 70 градусов.

#### 7.4. Распознавание компактных и протяженных дефектов

Дефект считают компактным, если его условные размеры (протяженность, ширина и высота) не превосходят условных размеров эквивалентного дефекту плоскодонного отверстия при измерении размеров любыми, но одинаковыми способами. Иногда для упрощения контроля сравнивают условные размеры всех обнаруженных дефектов с условным размером плоскодонного отверстия максимально допустимого диаметра для контролируемого изделия. Как правило, ограничиваются сравнением по условной протяженности или условной высоте.

Обычно плоскодонное отверстие имеет диаметр значительно меньше диаметра преобразователя, тогда условную протяженность его определяет диаграмма направленности преобразователя как излучателя-приемника. Если диаметры отражателя и преобразователя соизмеримы, то их общая диаграмма направленности сужается. Только когда размер отражателя больше, чем преобразователя, условные протяженности, измеренные способами 6, 10 или 20 дБ возрастают и характеризуют истинный размер дефекта. Условная протяженность, измеренная по уровню фиксации, постоянно растет с увеличением размера отражателя, но размер дефекта она также характеризует только в том случае, когда этот размер больше размера преобразователя.

Из изложенного следует, что при измерении условной протяженности разными способами, превышение ею условной протяженности эквивалентного дефекту плоскодонного отверстия свидетельствует об обнаружении протяженного дефекта, который (возможно) лишь частично отражает ультразвук.

Когда дефект расположен в дальней зоне прямого преобразователя, для отличия компактного и протяженного дефектов пользуются графиками рис. 7.6. Они построены в безразмерных координатах. Прямые на рис. 7.6,а соответствуют условной протяженности  $\Delta x$ , измеренной относительными способами на уровнях 6 и 20 дБ. Кривые на рис. 7.6,б соответствуют условной протяженности  $\Delta x'$ , измеренной по уровню фиксации, Кружок или квадрат у графиков соответствуют круглому или прямоугольному пьезоэлементу размером  $D$  в направлении перемещения преобразователя,  $\langle A_d/A_\Phi \rangle$  — превышение амплитуды эхосигнала от дефекта над уровнем фиксации в положительных дБ. Если точка, соответствующая измеренной условной протяженности дефекта, лежит на соответствующей кривой или ниже ее —



дефект компактный; если выше – протяженный.

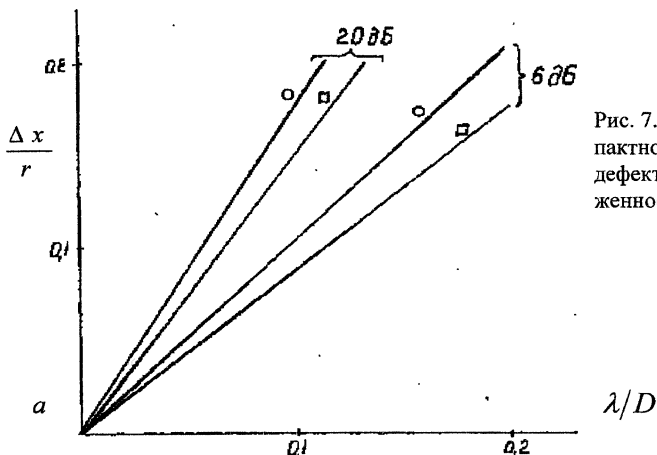
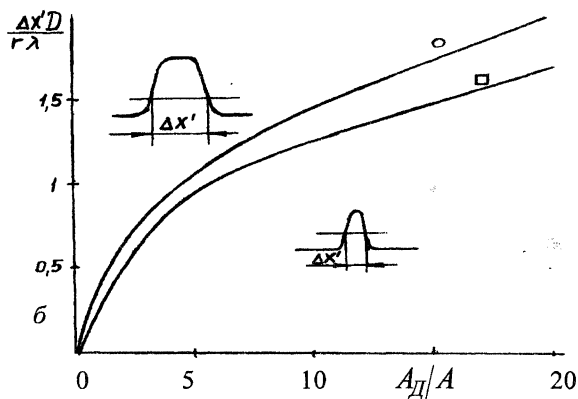


Рис. 7.6. Распознавание компактного и протяженного дефекта по условной протяженности



Пример 7. 11.

При тех же условиях контроля, как в примере 7.10, обнаружен дефект эквивалентным диаметром  $d'=4$  мм на глубине  $r=70$  мм. Условная протяженность его на уровне фиксации (по плоскостному отверстию диаметром  $d=2,2$  мм) равна  $\Delta x'=25$  мм. Является или нет дефект протяженным?

Определим, на каком уровне от максимума измеряется условная протяженность дефекта. Приведенное расстояние

$$r/N = 70/18 = 3,9.$$

Дефект находится в дальней зоне преобразователя, следовательно можно пользоваться графиками рис. 7.6 и амплитуда эхосигнала от него пропорциональна площади эквивалентного отражателя

$$\langle A_D/A_\Phi \rangle = 20 \lg(4/2,2)^2 = 10,4 \text{ дБ}.$$

Определяем параметр на оси ординат рис. 7.6,б

$$\Delta x' D/(r\lambda) = 25 \cdot 12/(70 \cdot 2) = 2,14$$

На рис. 7.6,б находим точку с координатами (10,4; 2,14). Она лежит выше кривой с кружочком. Квалифицируем дефект как протяженный.

При контроле наклонным преобразователем компактные и протяженные дефекты при перемещении преобразователя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (при контроле сварных соединений – вдоль свар-

ного шва), различают, пользуясь теми же графиками рис. 7.6. Развитые по высоте дефекты при перемещении преобразователя в плоскости падения (перпендикулярно сварному шву) отличаются от компактных большим временным интервалом перемещения эхосигнала по линии развертки экрана дефектоскопа при уменьшении амплитуды эхосигнала на 6 дБ от максимального значения. Компактному дефекту соответствует временной интервал равный или меньший интервала от бокового цилиндрического отверстия произвольного диаметра, центр которого расположен на той же глубине, что и дефект.

На рис. 7.7 показаны временные интервалы  $\Delta t$  (мкс) пробега эхосигнала по линии развертки на уровне 6 дБ в зависимости от глубины залегания цилиндрического отражателя  $y$  (мм). Теоретически зависимость должна быть пропорциональной (если не учитывать затухание). Однако для некоторых наклонных преобразователей экспериментальные кривые этому не соответствуют даже для углеродистой мелкозернистой стали. Кривые сняты для преобразователей из комплекта ПРИЗ-ДС.

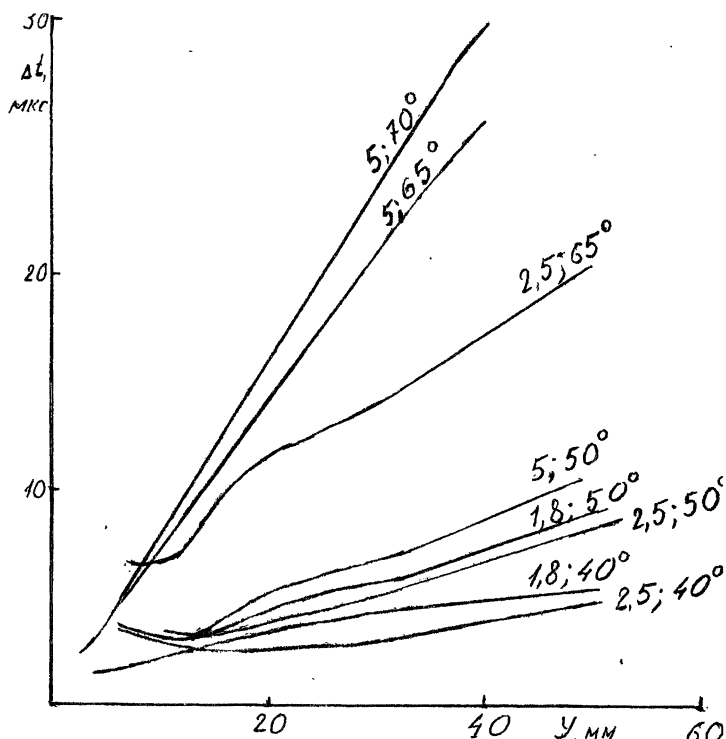


Рис. 7.7. Интервал времени, соответствующий пробегу эхосигнала от боковых отверстий на разной глубине  $y$  по линии развертки  
Пример 7.12.

Преобразователем из комплекта ПРИЗ-Д5 с углом ввода  $50^\circ$  на частоту 2,5 МГц в сварном шве обнаружен дефект на глубине 60 мм. Временной интервал пробега эхосигнала по линии развертки до уменьшения его амплитуды на 6 дБ от максимума  $\Delta t$  равен 9,5 мкс. Является ли дефект компактным или он развит по высоте?

По графику  $50^\circ$ , 2,5 МГц для абсциссы  $y = 60$  мм находим  $\Delta t = 10$  мкс, т. е. не меньше измеренного для дефекта значения  $\Delta t$ . Квалифицируем дефект как компактный.

### 7.5. Количество дефектов; разрешающая способность

Допустимое количество дефектов указывают либо для всего изделия, либо для его части, например, для определенной длины сварного шва, и обычно увеличивают с ростом толщины изделия  $H$ . В ГОСТ 24507-80 на контроль поковок указано допустимое количество  $n_0$  дефектов для толщины 100 мм, а для других толщин  $H$  рассчитывают  $n$  по формуле

$$n = n_0 H / 100,$$

округляя число в сторону уменьшения. Указывают также допустимое расстояние между дефектами.

При определении количества дефектов необходимо учитывать ограниченную способность УЗ метода контроля раздельно фиксировать близкорасположенные дефекты – разрешающую способность. При дальнейших оценках предполагается, что дефекты компактны и эхосигналы от них одинаковой амплитуды; при разных амплитудах эхосигналов разрешение хуже.

Считают, что дефекты разрешаются, если амплитуда эхосигнала между ними уменьшается не менее чем в 2 раза (на 6 дБ) относительно меньшей из амплитуд от этих дефектов.

Общее правило таково: разрешение достигается, если существует такое пространственное положение зоны озвучивания, при котором в нее не попадают сразу оба дефекта. Зона озвучивания – область пространства, ограниченная половиной пространственной длительности импульса и шириной поля излучения-приема преобразователя. На границе зоны озвучивания амплитуда эхосигнала от каждого из одинаковых дефектов должна быть в 4 раза меньше, чем максимальная амплитуда в ее пределах, тогда амплитуда сигнала сразу от двух дефектов будет в два раза меньше максимальной амплитуды от одного дефекта.

Различают разрешающие способности вдоль акустической оси преобразователя (лучевую)  $\Delta r$  и в перпендикулярном направлении (фронтальную)  $\Delta l$ . Первая определяется длительностью импульса  $\tau \approx 3T$ :

$$\Delta r = c\tau / 2 \approx 1,5\lambda. \quad (7.6)$$

Фронтальная разрешающая способность  $\Delta l = \Delta X$  для прямого преобразователя она определяется шириной его акустического поля:

$$\Delta l \geq D/2 \quad - \text{в ближней зоне}; \quad (7.7)$$

$$\Delta l \geq 1,4r\lambda/D. \quad - \text{в дальней зоне}, \quad (7.8)$$

где  $D$  – диаметр преобразователя,  $r$  – расстояние от него до дефектов.

Для наклонного преобразователя справедливы те же формулы со сле-

дующими замечаниями.  $\lambda$  – длина поперечной волны; пьезопластина обычно имеет прямоугольную форму, поэтому в дополнительной плоскости фронтальная разрешающая способность вместо (7.8) определяется формулой

$$\Delta l \geq 1,2r\lambda/L, \quad (7.9)$$

где  $L$  – размер пьезопластины в дополнительной плоскости,  $r = y/\cos \alpha$ . В основной плоскости фронтальная разрешающая способность в направлении перпендикулярном акустической оси определяется формулой

$$\Delta l \geq \frac{1,2r\lambda}{L'} = \frac{1,2r\lambda}{L_1 \cos \alpha / \cos \beta}, \quad (7.10)$$

где  $L_1$  и  $L'$  – размеры реальной и мнимой пьезопластины в плоскости падения.

Два дефекта, расположенные на одной глубине, чаще всего разрешаются благодаря разному времени пробега до них, т. е. благодаря лучевой разрешающей способности, когда расстояние между ними.

$$\Delta X = \Delta r / \sin \alpha > 1,5\lambda / \sin \alpha \quad (7.11)$$

На рис. 7.8 показаны импульсы от двух боковых отверстий в стали на глубине  $y = 44$  мм, отстоящих на  $\Delta X = 3,4$  мм друг от друга. Штрихпунктирная линия – огибающая вершин эхосигналов, как на рис. 7.2,б. Огибающие для обоих отверстий одинаковы и находятся на одном и том же участке развертки. Данные получены для  $\alpha = 50^\circ$ ,  $D = 12$  мм,  $f = 2,5$  МГц. По формуле (7.11)  $\Delta X = 2,5$  мм, то есть меньше 3,4. Действительно, дефекты хорошо разрешаются.

Максимальная фронтальная разрешающая способность достигается в фокальной плоскости ( $r = F$ ) фокусирующего преобразователя; согласно (5.15), она приближенно равна

$$\Delta l = 2F\lambda/D \quad (7.12)$$

Из (5.16) следует, что предельное разрешение равно  $2\lambda$ , то есть близко к лучевой разрешающей способности.

Пример 7.13.

Какой диаметр прямого преобразователя обеспечит наиболее высокое фронтальное разрешение на всей толщине  $H = 300$  мм изделия при контроле на частоте 2 МГц (длина волны 3 мм)?

Приравняем разрешающие способности в ближней и дальней зонах, рассчитанные согласно (7.7) и (7.8):

$$D/2 = r\lambda/D; \quad D = \sqrt{2r\lambda} = \sqrt{2 \cdot 300 \cdot 3} = 42,5 \text{ мм.}$$

Преобразователь с диаметром пьезоэлемента 42 мм обеспечит наиболее высокую общую фронтальную разрешающую способность при условиях задачи.

Пример 7.14.

Будут ли разрешаться два дефекта, расстояние между которыми  $\Delta X = 10$  мм, расположенных на одинаковой глубине  $r = 70$  мм при контроле прямым и наклонным (угол ввода  $\alpha = 50^\circ$ ) преобразователями с диаметрами пьезоэлемента  $D = 12$  мм и длинами

волн 3 мм?

Длина ближней зоны  $N = D^2 / (4\lambda) = 12^2 / (4 \cdot 3) = 12 \text{ мм} < 70 \text{ мм}$  так что дефекты расположены в дальней зоне. Выполняем расчет по формулам (7.8) и (7.11). Для прямого преобразователя условие разрешения

$$\Delta X \geq 1,4 \cdot 70 \cdot 3 / 12 = 24,5 \text{ мм.}$$

т. е. не выполняется. Для наклонного преобразователя:

$$\Delta X \geq 1,5 \cdot 3 / \sin 50^\circ = 5,8 \text{ мм.}$$

Наклонным преобразователем дефекты разрешаются, а прямым – нет, несмотря на идентичные диаметры преобразователей и длины волн. Это объясняется тем, что в случае наклонного преобразователя действует лучевая разрешающая способность.

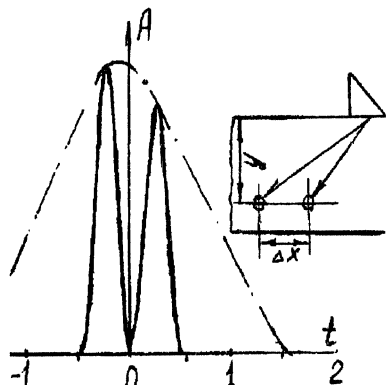


Рис. 7.8. Разрешение двух дефектов, расположенных на одной глубине, при контроле наклонным преобразователем.

## 7.6. Определение формы дефекта

Основная задача - различить плоскостные и объемные дефекты (см. 6.5). Дефекты промежуточного типа, как правило, не удастся идентифицировать. В табл. 7.2 приведены способы определения формы, эффективность которых доказана проверкой на реальных дефектах.

Все существующие способы применимы только к дефектам, размеры которых превосходят длину волны. Способы разработаны применительно к контролю сварных швов, однако они применимы и к другим объектам. Для плоскостных дефектов предполагается, что они ориентированы вертикально, т. е. перпендикулярно или почти перпендикулярно (в пределах  $15^\circ$ ) поверхности ввода.

Изменения амплитуд в таблице даны в положительных децибелах.

Изменение угла озвучивания на поверхности ввода (способ 1) осуществляют одним преобразователем. Находят его положение, соответствующее максимуму эхосигнала от дефекта. Затем перемещают преобразователь по окружности, центром которой является эпицентр дефекта на поверхности ввода, сохраняя направление на дефект. Если при развороте на  $45^\circ$  амплитуда уменьшилась на 8 дБ или более, то с большой степенью вероятности можно утверждать, что в плоскости, перпендикулярной поверхности ввода, дефект плоскостной. В случае объемного в плане дефекта (справа) амплитуда эхосигнала мало изменяется

Изменение угла озвучивания в плоскости падения (способ 2) осуществляется двумя преобразователями с разными углами ввода. Это требует использования бокового цилиндрического отверстия для получения опорного сигнала. Более информативный вариант этого способа предусматривает использование системы “ПАРУС”, разработанной и поставляемой ЦНИИТ-

МАШ. В ней используется один преобразователь, угол ввода которого изменяется и одновременно преобразователь перемещается по поверхности таким образом, что дефект, расположенный на определенной глубине, озвучивается под разными непрерывно изменяющимися углами. За опорный уровень амплитуды принимают ее изменение при озвучивании при тех же условиях бокового отверстия на той же глубине. Дефект считается плоскостным, если в каком-либо диапазоне углов эхосигнал от него возрастает на 6 дБ по сравнению с эхосигналом от отверстия при одинаковом опорном уровне.

Признак  $K_{II}$  (способ 3) основан на озвучивании дефекта поперечной волной, а приеме двух волн: поперечной с амплитудой  $A_1$  и трансформированной на дефекте продольной волны с амплитудой  $A_1$ . Для приема продольной волны наклонный преобразователь снабжают дополнительным пьезоэлементом. В качестве опорного используют эхосигнал от угла. При переходе от объемного к плоскостному дефекту  $\langle A_1 \rangle - \langle A_1 \rangle$  возрастает на 10...13 дБ. Достоверность распознавания реальных дефектов этим способом около 0,8. Способ можно также реализовать, принимая трансформированную продольную волну другим преобразователем.

Высокую достоверность при оценке формы реальных дефектов показал способ 4, то есть дельта-метод, когда приемник получаемых в результате дифракции на дефекте продольных волн располагается над дефектом (при контроле сварных соединений – над выпуклостью сварного шва, которую обычно зачищают). В случае объемного дефекта (справа) сигнал  $A_1$  больше, чем сигнал  $A_2$  так как он возникает из-за отражения, а не дифракции, а сигнал 2 меньше, так как он возникает в результате соскальзывания обтекающей дефект волны. В случае плоскостного дефекта (слева) оба сигнала возникают в результате дифракции волн на краях дефекта и их амплитуды приблизительно равны. Правда амплитуда эхосигналов продольной волны, принятой непосредственно после дифракции на дефекте, больше, чем волны, отраженной после дифракции от дна изделия, поскольку последняя проходит больший путь.

Способ 5 – дифракционно-временной метод. Он предусматривает измерение координат крайних точек дефекта и одновременное сравнение амплитуд сигналов от его верхней и нижней точек. В случае объемного дефекта (справа) сигнал  $A_1$  от верхней точки дефекта больше, чем  $A_2$ , так как он возникает в результате отражения, а не дифракции. Второй сигнал возникает в результате образования волн обегания и соскальзывания, которые имеют небольшую амплитуду. Для плоскостного дефекта (слева) оба сигнала – сигналы от блестящих точек, они близки по амплитуде. Измерение координат этих точек позволяет оценить размер дефекта.

При контроле сварных соединений часто нужно обнаруживать и идентифицировать трещины различной ориентации. Это позволяет сделать спо-

Признаки формы дефекта

N	Схема измерения	Признак	Плоскостной	Объемный
1		$\langle A_0 \rangle - \langle A_{45} \rangle$	$\geq 8$	$\leq 8$
2		$\langle K_\alpha \rangle = [\langle A_{40} \rangle - \langle A_{60} \rangle] - [\langle A'_{40} \rangle - \langle A'_{60} \rangle]$	$\geq 6$	$0 \pm 0,5$
3		$\langle K_{II} \rangle = [\langle A_I \rangle - \langle A_I' \rangle] - [\langle A_I' \rangle - \langle A_I \rangle]$	$> 10$	$< 6$
4		$\langle A_1 \rangle - \langle A_2 \rangle$	$> 0$	$< 0$
5		$\langle A_1 \rangle - \langle A_2 \rangle$	$\approx 0$	$> 0$
6		$\langle A_{1,3} \rangle - \langle A_{1,2} \rangle \approx \langle A_{2,4} \rangle - \langle A_{3,4} \rangle$	продольная трещина $< 0$ поперечная трещина $> 0$	$\approx 0$
7		$\langle K_\Phi \rangle = \langle A_1 \rangle - \langle A_3 \rangle$	$\leq 0$	$> 0$

соб 6. Сравнивают амплитуды эхосигналов, излученных преобразователями 1 и 3, и принятые преобразователями 2 и 4:  $A_{12}$ ,  $A_{14}$ ,  $A_{32}$  и  $A_{34}$ . В табл. 3.3 приведены соотношения между ними характерные для дефектов различной формы и ориентации.

$A_3$

Коэффициент формы (способ 7) определяют по соотношению амплитуд эхосигналов, полученных совмещенным преобразователем  $A_1$  и экозеркальным методом (обычно вариантом тандем)  $A_3$ . В случае плоскостного дефекта  $A_3 > A_1$  так как отражение от дефекта происходит преимущественно зеркально, в результате  $K_\phi \leq 1$ , то есть  $\langle K_\phi \rangle < 0$ . В случае объемного дефекта  $A_3 < A_1$ , так как путь совмещенный преобразователь – дефект и обратно короче пути излучатель – дефект – донная поверхность — приемник, а УЗ волны рассеиваются дефектом почти равномерно по всем направлениям, в результате  $K_\phi > 1$ . Эффективность этого способа была показана в примере 2.14. Достоверность распознавания формы дефектов этим методом – более 0,9.

Отметим также спектральный метод определения формы дефекта. Он требует применения специального дефектоскопа-спектроскопа, в котором можно варьировать частоту ультразвука в 2 - 3 раза и наблюдать происходящие при этом изменения амплитуды эхосигнала. Для объемного дефекта характерно плавное изменение амплитуды в зависимости от частоты. Для плоскостного дефекта, наклоненного к оси преобразователя, характерно быстрое изменение амплитуды с частотой, возникновение максимумов и минимумов. Это объясняется интерференцией дифракционных волн, возникающих на краевых (блестящих) точках дефекта.

Оптимальным методом распознавания формы и размеров дефектов средствами УЗ контроля следует считать применение когерентных методов контроля, в особенности компьютерную акустическую голографию. Возможности этого метода рассмотрены в 8.

Пример 7.15.

Обнаружен дефект преобразователями с углами ввода  $40^\circ$  и  $60^\circ$ , амплитуды эхосигналов 28 и 26 дБ. От бокового цилиндрического отверстия, расположенного на той же глубине, получены теми же преобразователями эхосигналы с амплитудами 25 и 38 дБ. Объемный или плоскостным является дефект?

Для определения характера дефекта используем способ 2, т.е. вычислим величину  $K_\alpha$  в децибелах:

$$\langle K_\phi \rangle = \langle A_{40} \rangle - \langle A'_{40} \rangle - \langle A_{60} \rangle + \langle A'_{60} \rangle = 28 - 25 - 26 + 38 = 15 \text{ дБ}$$

Поскольку децибелы отрицательные, —  $15 < 6$ . Дефект нужно квалифицировать как плоскостной.



## 8. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

### 8.1. Когерентные и некогерентные методы представления данных УЗ контроля

Все методы получения акустических изображений основаны на измерении физических параметров акустических полей после их взаимодействия с дефектами. Методы можно разделить на когерентные, в которых используется фазовая, амплитудная и временная характеристики зарегистрированного поля, и некогерентные, в которых фазовая информация не используется. В некогерентных методах получают изображение в области регистрации модуля амплитуды поля, рассеянного дефектами. В когерентных методах за счет дополнительной обработки фазовых данных (аналоговой или цифровой) получают более полное изображение поля, рассеянного дефектами. Использование фазовой информации дает возможность получать изображения неоднородностей с высоким разрешением и, соответственно, определять реальные параметры выявленного дефекта.

В гл. 7 рассмотрены возможности исследования дефектов некогерентными методами, а именно наиболее широко распространенным эхометодом. С его помощью, осуществляя одно и двумерное сканирование нефокусирующим преобразователем, получают пространственное и временное отображением амплитуд эхосигналов. Результаты представляют в виде разверток типа *B*, *C* и других, дающих изображения дефектов в изделии в поперечном сечении или в плане. Точность представления дефектов была оценена в 7.3, 7.5 и 7.6. Их размеры в лучшем случае оцениваются с погрешностью порядка 10 мм. Подобные результаты получаются также с применением других некогерентных способов визуализации (например, ячейка Польмана, трубка Соколова).

К когерентным методам обработки данных относятся методы, использующие аналоговые средства: дифракция Брэгга, "прямая визуализация", акустическая голография с помощью поверхностного рельефа, голографическая интерферометрия. В настоящее время в связи с развитием компьютерной техники наибольшее распространение получили цифровые когерентные методы: компьютерная акустическая голография, метод синтезированной фокусирующей апертуры (SAFT), *tz*-метод, вычислительная томография. Ниже будут рассмотрены два наиболее активно развивающихся в дефектоскопии когерентных цифровых метода формирования изображения: компьютерная акустическая голография и SAFT.

В основе рассматриваемых когерентных методов лежит следующее: с помощью небольшого акустического преобразователя измеряют значения акустического поля в ряде точек в заданной области на поверхности ввода, осуществляют их совместную обработку и получают акустическое изображение внутреннего объема (или сечения) контролируемого изделия. При этом, по существу, с помощью цифровых методов выполняется синтезирова-

ние фокусирующего преобразователя с очень большими размерами, равными области сканирования, а следовательно с очень узкой фокальной областью. Рассматриваемые методы позволяют получить образ дефекта, когда он имеет резкие границы, шероховатые поверхности и облучается во многих направлениях.

Сравним акустические и оптические методы получения изображения дефекта. В оптике длина волны измеряется тысячными долями микрометров, поэтому выявляются дефекты обычно значительно меньше, чем несплошности, влияющие на прочностные свойства объекта контроля. Шероховатости поверхности дефекта обычно больше длины оптической волны, поэтому преобладает диффузное рассеяние. В результате получается четкое изображение дефекта с сохранением фактуры его поверхности.

В УЗ дефектоскопии длина акустических волн в десятки тысяч раз больше. Размеры выявляемых дефектов обычно не меньше 1 мм – то есть приблизительно равны или больше длины ультразвуковой волны. Рассеяние волн на таких дефектах происходит преимущественно зеркально. Дифракционные эффекты возникают лишь на участках дефекта, в которых резко изменяется его профиль – «блестящих точках». В связи с этим акустическое изображение дефекта, превосходящего длину УЗ волны, не соответствует его оптическому изображению, разбиваясь на ряд «блестящих точек».

## 8.2. Акустическая голография

Акустическая голография – типичный когерентный метод, который активно развивается в применении к дефектоскопии. Это связано с тем, что системы, реализующие метод акустической голографии, позволяют формировать изображения дефектов с высоким разрешением, производить дополнительную обработку первичных данных и полученного изображения для улучшения его качества, осуществлять документирование, хранение результатов контроля и их отображение в любом удобном для оператора виде.

Важное отличие акустической голографии от оптической на стадии регистрации состоит в том, что измерение акустического поля осуществляется с помощью приемников, обеспечивающих его линейную регистрацию, то есть регистрируется амплитуда, а не интенсивность сигнала, как в оптике. Это дает возможность построить изображение, используя различные методы цифровой обработки данных. Ниже рассмотрены два метода численного восстановления изображений: метод обращенной волны и метод проекций в спектральном пространстве.

**Метод обращенной волны** основан на том, что в изотропной среде выполняется Фурье-анализ комплексных значений поля в любой плоскости. Пространственные Фурье-компоненты можно рассматривать как плоские волны, которые распространяются в различных направлениях. Тогда амплитуда поля – это сумма амплитуд плоских волн с учетом фазовых сдвигов, которые они приобретают, приходя в точку регистрации.

Например, для двумерного случая (рис. 8.1,а) в плоскости  $xz$  акустическое поле  $U(x, z)$ , рассеянное дефектом, расположенным на глубине  $z$ , реги-

стрируется в виде поля  $U(x,0)$  приемно-излучающим преобразователем, перемещающимся вдоль оси  $x$  по поверхности ввода. Его Фурье-образ, записанный в виде

$$F[U(x,0)] = \int U(x,0) \exp(jkf_x x) dx,$$

можно рассматривать как спектр плоских волн вида

$$B(x,y) = \exp[jk(ax + \gamma z)].$$

Здесь  $F$  – прямое одномерное преобразование Фурье,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $f_x = 1/\lambda \sin \theta_x$ , величины  $\alpha = \lambda f_x$  и  $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2}$  – направляющие косинусы,  $\theta_x$  — максимальный угол, под которым видна с поверхности дефекта область перемещения преобразователя. Она определяется шириной диаграммы направленности преобразователя и доступной для сканирования зоной на поверхности ввода объекта контроля (ОК). Используя уравнение Гельмгольца для спектра на другой линии, получим:

$$F[U(x,z)] = F[U(x,0)] \exp(jkz\sqrt{1 - \alpha^2}), \quad (8.1)$$

то есть распространение волны в направлении  $z$  проявляется в относительных фазовых различиях составляющих (8.1). Из (8.1) модуль амплитуды рассеянного поля на линии дефекта  $z_d$  будет равен

$$|U(x, z_d)| = \left| F^{-1} \left\{ F[U(x,0)] \exp(jkz_d \sqrt{1 - \alpha^2}) \right\} \right|. \quad (8.2)$$

Это выражение определяет изображение дефекта. Здесь  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье.

Если желательно получить распределение поля по всему сечению  $(x,z)$ , необходимо многократно выполнять алгоритм (8.2) для различных значений координаты  $z$ . Изложенный алгоритм очень широко используется в голографических системах.

В приведенных выше выражениях считалось, что поле  $U(x,y,0)$  измерялось непрерывно, тогда как на практике измерения проводятся в ряде дискретных точек. В этом случае необходимо пользоваться дискретным преобразованием Фурье, в котором операция интегрирования заменена на суммирование по совокупности точек приема. Для уменьшения времени обработки данных пользуются быстрым преобразованием Фурье (БПФ), что однако, требует дополнительных ограничений на расстояние между точками излучения-приема – оно должно быть постоянным.

Метод проекции в спектральном пространстве (ПСП) основан на том, что пространственный спектр функций  $h(x,z)$ , описывающий падающее и рассеянное дефектами поле, отличен от нуля на окружности радиусом  $2k = 4\pi/\lambda$  плоскости волновых векторов  $k_x, k_z$  с центром  $(0,0)$  для совмещенного преобразователя. Здесь также рассмотрим двумерный случай – плоскость  $x,z$ . Измерение поля вдоль некоторой линии  $z_\Gamma$  дает возможность определить значения двумерного спектра  $H(k_x, k_z)$ , например, на нижней

полуокружности (все дефекты расположены под линией измерений)

$$H(k_x, k_z) = T \left\{ \exp(jz_\Gamma \sqrt{k^2 - k_x^2}) F[h(x, z_\Gamma)] \right\},$$

где  $T(\varphi)$  – оператор проекции, который переносит значения функции  $\varphi$  из точки  $(k_x, 0)$  в точку  $(k_x, -\sqrt{k^2 - k_x^2})$ . Тогда алгоритм получения изображений можно записать как:

$$|h(x, z)| = \left| F_2^{-1} [H(k_x, k_z)] \right|. \quad (8.3)$$

Таким образом, измеряя поле на линии  $z_\Gamma$ , можно путем проецирования ее спектра и выполнения обратного двумерного преобразования Фурье  $F_2^{-1}$  определить поле в сечении  $x, z$ . Оба алгоритма (8.2) и (8.3) справедливы для однородного пространства.

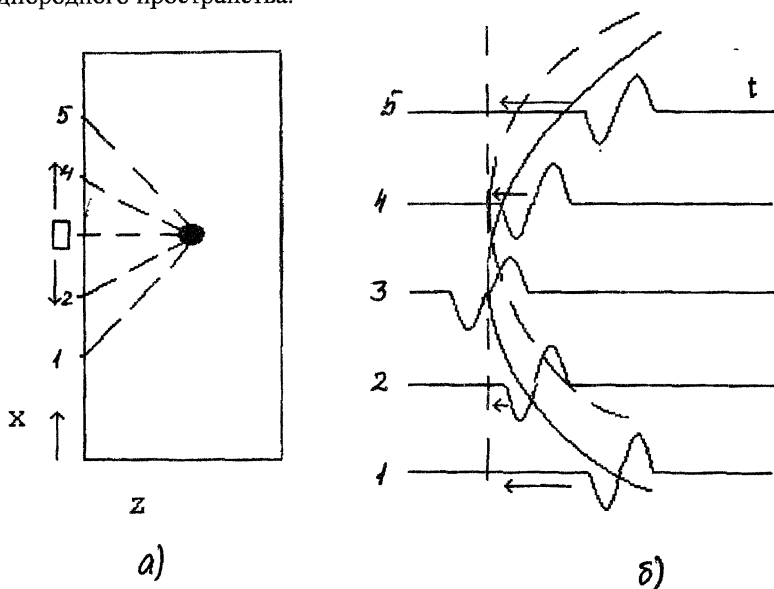


Рис. 8.1. Принцип когерентной обработки информации

**Многочастотная голография.** Акустическая голография, как и большинство других когерентных методов имеет высокую фронтальную разрешающую способность  $\Delta l$ , которая согласно дифракционной теории определяется длиной волны  $\lambda$  и числовой апертурой  $A = \sin \theta_x \approx L/2r$  ( $L$  – область перемещения преобразователя,  $r$  – расстояние от преобразователя до отражателя)

$$\Delta l = \lambda/A. \quad (8.4)$$

Таким образом, поперечное разрешение определяется длиной волны и размерами апертуры, на которой регистрируется поле, рассеянное дефектом. Фор-

мула (8.4) совпадает с (7.12), если считать, что диаметр фокусирующего преобразователя равен размеру области регистрации  $D = L$ .

Вместе с тем лучевое разрешение  $\Delta z$  в направлении оси  $z$  для одночастотных голографических систем низкое. Оно будет равно

$$\Delta z = \lambda / 2A^2. \quad (8.5)$$

В реальных системах, лучевое разрешение будет определяться длительностью импульса (которая в действительности всегда конечна), диаграммой направленности акустического преобразователя, углом ввода акустического пучка в контролируемое изделие. С целью повышения лучевого разрешения, что необходимо для дефектоскопии, применяется многочастотная голография. В многочастотной голографии регистрируется совокупность  $i$  голограмм на частотах  $f_i$  в определенном диапазоне частот  $\Delta f_i$  с заданной дискретностью  $\delta f = f_i - f_{i-1}$ . Полученные по алгоритмам (8.2) или (8.3) восстановленные поля  $U_i(x, y)$  для каждой частоты затем когерентно суммируются, формируя изображение:

$$|U(x, y)| = \left| \sum_i U_i(x, y) \right| \quad (8.6)$$

В результате фронтальная разрешающая способность будет определяться соотношением (8.5), в котором  $\lambda = \lambda_0$  — длина звуковой волны в изделии, соответствующая среднему значению частоты  $f_i = f_0$ , а лучевое разрешение зависит от полосы используемых частот  $\Delta f_i$

$$\Delta z = (\lambda_0 / 2) (f_0 / \Delta f_i)$$

Недостаток такого алгоритма состоит в том, что измерение полей выполнено на дискретном наборе частот. Это приводит к появлению "паразитных" изображений на расстояниях  $\delta z_l$ , равных

$$\delta z_l = \pm (\lambda / 2) (f_0 / \Delta f_i)^l,$$

где  $l = 1, 2, 3, \dots$

### 8.3. Метод фокусированной синтезированной апертуры (SAFT).

Многочастотную голографию можно рассматривать как своеобразное синтезирование короткого импульса с использованием информации о его амплитуде и времени распространения, которое определяет фазу сигнала. В связи с развитием вычислительной техники появилась возможность перейти непосредственно к регистрации и обработке данных об особенностях распространения коротких импульсов в контролируемом изделии. Этот метод — метод SAFT — позволяет достаточно просто учесть сложную форму контролируемого изделия. На рис. 8.1, а, б дана схема этого метода.

Совмещенный преобразователь с широкой диаграммой направленности сканирует ОК в пределах заданной апертуры. Для каждого положения преобразователя регистрируются эхо-сигналы, соответствующие  $A$ -разверткам. Затем вся совокупность эхосигналов обрабатывается когерентно с помощью ЭВМ. В результате этого получают изображения внутреннего объема кон-

тролируемого изделия (если осуществляется двумерное сканирование), либо его сечения, соответствующего  $B$ -развертке (при одномерном сканировании).

Обработка данных может осуществляться несколькими способами. Один из них приведен на рис. 8.1,б. Здесь представлены несколько сигналов, соответствующих  $A$ -разверткам для нескольких положений преобразователя. Временное положение эхоимпульсов, рассеянных точечным дефектом, в зависимости от координаты преобразователя изменяется по гиперболе. Для любой выбранной области в визуализируемом сечении можно вычислить относящуюся к ней гиперболу (в двумерном SAFT), в соответствии с которой значение сигналов, изображенных на  $A$ -развертке, "сдвигается", а затем суммируется. Полученная таким образом совокупность значений амплитуд сигналов позволяет построить сечение объекта, с высоким разрешением по осям  $x$  и  $z$ .

Описанный алгоритм обработки данных, несмотря на свою простоту и наглядность, весьма трудоемок и предъявляет достаточно высокие требования к ЭВМ, обрабатывающей данные. Сам алгоритм предполагает выполнение очень большого числа одинаковых операций (таких, как возведение в квадрат, извлечения квадратного корня) достаточно медленных для вычисления с помощью универсальных ЭВМ.

Другой способ обработки данных (FT SAFT) основан на использовании аппарата БПФ, что приводит к значительному сокращению времени получения изображений. Здесь используется идеология обработки данных многочастотной акустической голографии. Для каждого пространственного положения преобразователя данные, соответствующие  $A$ -развертке, подвергаются временному преобразованию Фурье. В результате для каждого пространственного отсчета на заданной совокупности частот получают комплексные значения рассеянного дефектом акустического поля, что позволяет образовывать совокупность акустических голограмм на заданных частотах. Осуществляя для каждой частоты восстановление по алгоритмам (8.2) или (8.3), получим, после когерентного сложения, изображения сечения  $xz$ .

Таким образом метод многочастотной акустической голографии и метод SAFT оказываются близкими с точки зрения применяемого математического аппарата.

#### **8.4. Компьютерные системы визуализации дефектов с когерентной обработкой данных серии Авгур**

##### **8.4.1. Принципы построения системы**

Ультразвуковые компьютерные системы визуализации дефектов с когерентной обработкой данных серии Авгур разработаны НПП "ЭХО+". Принципиальное отличие этих систем от обычного дефектоскопа состоит в когерентной обработке данных, которая позволяет получать изображения дефектов с высоким разрешением. При этом появляется возможность определять размеры и ориентацию дефекта не по максимальной амплитуде эхосигнала или условным размерам, как в обычных эхodefектоскопах, а по его высококачественному изображению.

Фронтальная разрешающая способность таких систем равна длине УЗ волны и для продольной волны в стали на частоте 2,5 МГц составляет величину около 2,5 мм. Точность измерения размеров дефектов не хуже половины длины УЗ волны.

Системы серии Авгур предусматривают прозвучивание ОК прямыми или наклонными УЗ преобразователями с шагом 0,1 – 0,2 мм. Для каждого шага запоминаются результаты в виде разверток типа  $A$  ( $A$ -скана) с учетом временных задержек и истинной формы экосигналов. Голографическое изображение дефектов получают, совместно обрабатывая массив  $A$ -сканов в области сканирования  $L = 50 \dots 200$  мм. Предполагается, что регистрация проводится вдоль линии (линейная голография) и изображение восстанавливается в одной плоскости (слое). При двумерном сканировании данные обрабатываются когерентно только послойно.

В системах Авгур предусмотрена возможность использования нескольких вариантов восстановления изображения из числа рассмотренных выше. Можно получать изображения дефектов многочастотным вариантом метода обращенной волны. Изображения, полученные таким способом, обладают высоким качеством, но для этого требуется значительное время.

Другой вариант – метод ПСП – позволяет получить изображение значительно быстрее, особенно, при использовании многих частот и многих ракурсов озвучивания, но из-за ошибок интерполяции уровень шумов в восстановленном изображении несколько выше, чем в методе обращенной волны. В системах Авгур метод ПСП реализован для двух схем сбора данных: совмещенной (раздельно-совмещенной) и раздельной, что существенно расширяет функциональные возможности прибора.

Многослойные изображения при двумерном сканировании так же можно восстанавливать методом ПСП. Для исключения искажающего влияния реальных пространственно-частотных характеристик используемого акустического преобразователя применяется метод эталонной голограммы, которую снимают для данного преобразователя по отражению от бокового цилиндрического отверстия. В результате разрешающую способность изображений можно повысить от полутора до трех раз в зависимости от качества используемого преобразователя.

Важное достоинство когерентных методов визуализации заключается также в том, что существенно снижаются требования к акустическому контакту. Его ухудшение приводит к большей зашумленности изображения, но не к смещениям и искажениям изображения дефекта. Системы визуализации позволяют следить за развитием дефектов с предельной объективностью и достоверностью.

#### 8.4.2. Аппаратная часть систем серии Авгур

Системы состоят из трех частей: автоматизированного сканера (или набора сканеров различного типа); акустических и электронных выносных блоков; базового электронного блока с компьютером типа Notebook.

Сканер обеспечивает пошаговое двухкоординатное перемещение акустического блока преобразователей в прямом и обратном направлениях. По-

ложение преобразователя при движении фиксируется с точностью 0,1 мм. Размеры в области сканирования устанавливаются программно, в пределах, достаточных для получения качественного изображения. Конструкция сканеров позволяет проводить контроль изделий с плоской и неплоской поверхностями, например, труб с минимальным диаметром 200 мм.

Сканер с акустическим блоком (преобразователями) и базовый электронный блок соединены линией связи длиной до 90 м. Такая схема построения системы ориентирована на широкий класс решаемых задач и, в частности, на проведения контроля объектов, достаточно удаленных от дефектоскописта.

С помощью акустического и электронного базового блока осуществляется излучение и прием акустических импульсов, передача зарегистрированных данных в ПЭВМ, управление механическим сканером. Все режимы работы системы Авгур (сбор данных, их обработка, отображение, документирование) задаются с Notebook.

#### 8.4.3. Программное обеспечение системы

Функциональные возможности когерентной систем серии Авгур, эффективность и удобство их использования в значительной степени определяются качеством программного обеспечения, поэтому при создании систем особое внимание было уделено разработке пакета прикладных программ, которые дают следующие возможности:

- регистрацию эхоимпульсов, рассеянных дефектами;
- представление этих данных и результатов их обработки (графическое, растровое в виде разверток типа *B*, *C* и трехмерное изображения);
- обработку зарегистрированных эхоимпульсов для получения голографического изображения дефектов;
- повышение качества получаемых изображений за счет применения различных способов фильтрации;
- выполнение различных сервисных операций.

Данные программы выполнены в виде самостоятельных модулей, вызов которых происходит с помощью программы-монитора. Рассмотрим более подробно их функциональные возможности.

Программа сбора данных обеспечивает проведение дистанционного (ограниченного длиной соединительного кабеля) контроля изделия и работает в режиме обычного дефектоскопа, позволяющего наблюдать сигнал в виде *A*-развертки (*A*-скана). С ее помощью можно исследовать в реальном масштабе времени частотный спектр всего *A*-скана, либо любой выделенной его части, устанавливать режимы контроля и управления аппаратной частью системы, включающие в себя выбор:

- частоты заполнения и длительности зондирующего радиоимпульса;
- амплитуды излучаемого радиоимпульса и коэффициента усиления основного усилителя;
- размеров области сканирования;



- времени задержки начала и длительности временной выборки, в пределах которой регистрируются экосигналы;
- состояния коммутатора, выбирающего нужный преобразователь из имеющихся в блоке.

Программа обеспечивает также обмен данными между компьютером и аппаратной частью системы.

Когерентная обработка сигнала обеспечивает существенное повышение чувствительности аппаратуры. Как отмечалось выше, по существу, с помощью цифровых методов выполняется синтезирование фокусирующего преобразователя с очень большими размерами, равными области сканирования, а следовательно с очень узкой фокальной областью. Это обеспечивает существенное повышение отношения сигнал – помеха при контроле материалов с крупнозернистой структурой, в частности аустенитных сварных швов.

Дополнительные возможности повышения чувствительности достигаются путем использования фазоманипулированных сигналов с соответствующей корреляционной обработкой. Например, система Авгур 4.2 позволяет генерировать сложный зондирующий импульс, фазоманипулированный по коду Баркера максимальной длины, либо по непериодической M-последовательности различной длины: 32, 64 или 128 периодов.

Исследования показали, что чувствительность системы Авгур 4.2 на 32 ... 36 дБ выше по сравнению с традиционным дефектоскопическим контролем. В результате абсолютная чувствительность системы (отношение амплитуды зондирующего импульса к амплитуде минимального регистрируемого сигнала) составляет 146 дБ. Это важно для регистрации слабых экосигналов от «блестящих» точек.

Программы отображения позволяют проанализировать измеренные экосигналы и восстановленные изображения. С помощью программы представления *A*-сканов можно отобразить в растровом виде массив экосигналов, измеренных на заданной пространственно-временной апертуре (изображение *B*-типа) для любого измеренного слоя, анализировать любой *A*-скан в виде радио- или видеоимпульсов в выбранном временном интервале и измерять их параметры, наблюдать спектры выбранных экосигналов. Анализ набора *A*-сканов в виде изображения *B*-типа представляет самостоятельный интерес особенно при контроле расходящимися акустическими пучками.

Программа просмотра трехмерных изображений предназначена для анализа изображений, восстановленных при двумерном растровом сканировании. С ее помощью можно наблюдать изображения *B*-, *C*- и *D*-типа (виды сбоку поперек, сверху и сбоку вдоль сварного шва), трехмерное аксонометрическое изображение дефекта, в котором можно поворачивать ОК для рассмотрения дефектного участка со всех сторон. Предусмотрена возможность проекционного *B+C+D* изображения. В рамках этого представления можно помечать фрагменты изображения, причем плоскость анализа появляется одновременно на всех проекциях. Для детального анализа предусмотрен режим

изменения масштаба изображения и измерения с помощью маркеров координат дефектов.

На рис. 8.4,*а* показан образец, позволяющий демонстрировать технические возможности системы Авгур 4.2. На рис. 8.4,*б* представлены результаты контроля в виде развертки типа *B* образца традиционным эхо-методом преобразователем диаметром 12 мм на частоту 2,5 МГц. Искусственные дефекты (плоскодонные отверстия диаметрами 6 мм, расположенные на глубине 70 мм) не разрешаются и представляются в виде сплошной линии. Плоскодонные отверстия, расположенные на разной глубине, разрешаются: хорошо видно изменение глубины на 2 мм.

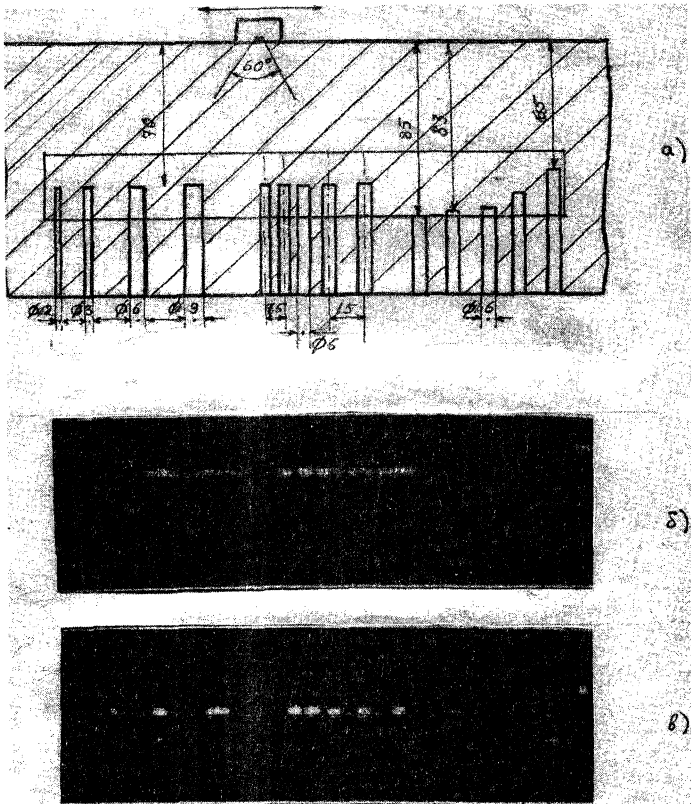


Рис. 8.2. Испытания на образце (*а*) дефектоскопа с *B*-разверткой (*б*) и голографической системы (*в*)

На рис. 8.4,*в* представлены результаты контроля образца системой Авгур 4.2. Все плоскодонные отверстия на глубине 70 мм фиксируются раздельно, то есть разрешаются. Сохраняется высокая лучевая разрешающая способность и высокая чувствительность. Плоскодонное отверстие диамет-

ром 2 мм фиксировалось с резервом чувствительности 70 дБ. Подобные испытания позволили установить технические характеристики системы.

#### 8.4.4. Основные технические характеристики системы Авгур 4.2.

Диапазон рабочих частот, МГц .....	1-8
Частота квантования аналого-цифрового преобразования (АЦП), МГц .....	20 или 40
Емкость буферной памяти АЦП, байт .....	2048
Количество двоичных разрядов преобразования АЦП .....	8
Входное сопротивление приемного усилителя, Ом .....	500
Регулируемый коэффициент усиления, дБ .....	0 ... 52
Шаг регулировки усиления, дБ .....	1
Погрешность установки усиления, дБ .....	0,25
Регулируемая амплитуда выходных импульсов, В .....	60
Диапазон контролируемых толщин (продольная волны в стали, прямой преобразователь), мм .....	до 600
Разрешающая способность (продольная волна в стали, прямой преобразователь, частота 2.5 МГц):	
фронтальная (не зависит от глубины), мм .....	2,5
лучевая, мм .....	2,5
Типы используемых преобразователей .....	прямые, наклонные совмещенные, РС
Количество преобразователей, шт. ....	1÷8
Длина кабеля связи сканер – базовый блок, м .....	до 90
Тип используемого компьютера .....	NoteBook
Напряжение питания, В .....	220

#### 8.4.5. Опыт применения систем Авгур

В настоящее время системы серии Авгур широко применяются при контроле оборудования атомных электростанций. Акустическая голография позволяет применить новый подход к анализу качества сварных швов через анализ влияния дефектов на прочность шва. На рис. 8.5 показан алгоритм этой концепции. Суть ее состоит в следующем. На первом этапе производится традиционный ультразвуковой контроль по методикам и нормам, действующим в атомной энергетике. Это может быть более тщательный ручной контроль, но предпочтительнее использование той же системы Авгур в обзорном (поисковом) режиме. При этом устраняются такие недостатки ручного УЗ контроля, как действие больших доз радиационного облучения на дефектоскописта и отсутствие объективного документа по результатам контроля.

Далее в зонах, где обнаружены дефекты с амплитудой эхосигнала выше заданного уровня, проводится экспертный контроль системой Авгур. В этом режиме детально регистрируется поле дефекта с очень малым (порядка 0,12

мм) шагом. Затем уже в лабораторных условиях в спокойной обстановке эти данные обрабатываются и анализируются экспертом. Информация о параметрах дефектов передается специалистом по прочности.

Следует отметить, что в теории прочностных расчетов и определения ресурса накоплен значительный опыт применения. Созданы и утверждены методики расчетов влияния дефектов на прочность конструкции. Для их широкого применения нехватало лишь значений конкретных размеров дефектов, которые предоставила акустическая голография. По результатам прочностных расчетов принимается решение о целесообразности ремонта шва.

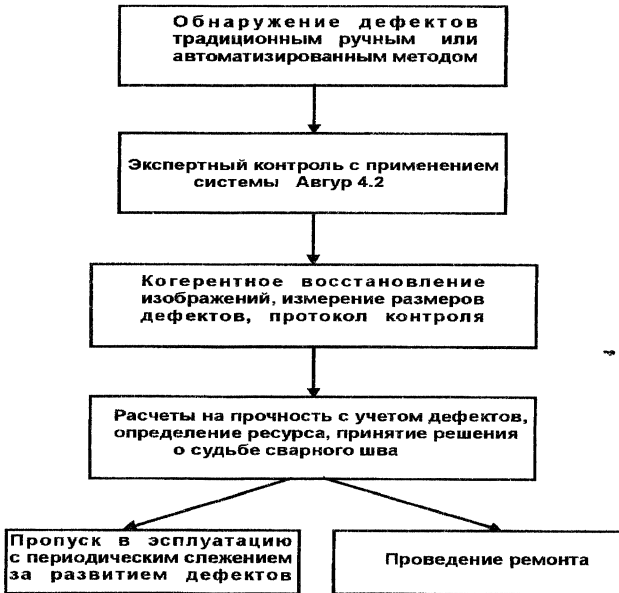


Рис. 8.3. Алгоритм комплексного анализа прочности сварного шва

На основании опыта производственного контроля установлены следующие фактические технические данные систем серии Авгур 4.2:

Диапазон контролируемых диаметров труб, мм .....	100 ÷ 1220
Диапазон контролируемых толщин сварных соединений, мм ....	5 ÷ 100
Среднее время установки и съема системы на соединении, мин.....	3
Среднее время обзорного контроля 1 м шва, мин. ....	7
Среднее время экспертного контроля дефектного места, мин.....	10
Среднее время анализа одного дефектного места, мин. ....	10
Минимально выявляемый дефект, (эквивалентный диаметр), мм ..	1
Точность измерения размеров дефектов, мм .....	±1
Фронтальная разрешающая способность, мм.....	1,5
Лучевая разрешающая способность, мм .....	2,0

Измеряемые характеристики дефекта: ..... длина, высота,  
 форма (плоскостной или объемный)  
 Величина отношения сигнал – помеха при контроле  
 аустенитных сварных швов в зависимости от структуры и  
 применяемой методики, дБ .....  $6 \div 15$

В период с 1996 по 1999 гг. был проведен массовый экспертный и обзорный контроль наиболее ответственных сварных швов первых контуров на пяти атомных электростанциях. Контролю подвергались швы, забракованные по результатам штатного ручного контроля. Всего проверено 774 сварных швов (в том числе 476 как в экспертном так и в обзорном режимах) диаметрами от 300 до 1344 мм. По результатам контроля пропущено в дальнейшую эксплуатацию 691 шов, 83 шва были подвергнуты ремонту. В 105 швах были обнаружены дефекты, не найденные при штатном контроле.

На рис. 8.4 показано изображение экрана компьютера после завершения обзорного режима контроля аустенитного сварного шва трубы диаметром 325 мм толщиной стенки 16 мм. Четыре горизонтальные развертки соответствуют четырем преобразователям поперечных волн слева («негатив») и

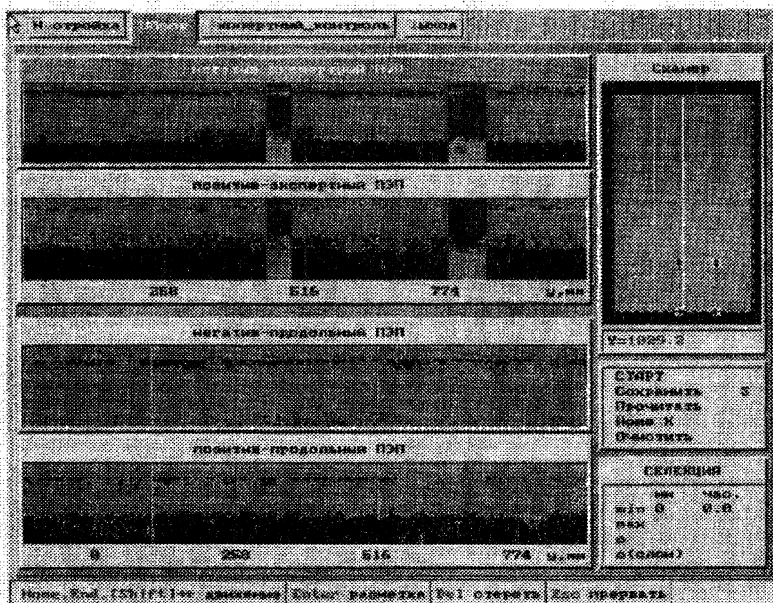


Рис. 8.4. Изображение экрана компьютера в момент завершения обзорного режима контроля сварного шва Ду-300.

справа («позитив») от контролируемого шва с углами ввода  $75^\circ$  и  $45^\circ$ . Фон означает наличие качественного акустического контакта.

Отмеченные области для первого и второго преобразователей соответствуют зонам, выделенным под экспертный контроль. В правой части экрана показано поле сканирования шва и местоположение акустического блока.

На рис. 8.5 показано изображение одного из дефектов. По развертке типа *B* (сечение поперек шва) определяются высота дефекта, его местоположение относительно разделки шва, а также тип дефекта. На экране имеется маска, показывающая разделку шва в соответствии с конструкторской документацией. Корень шва имеет сложную конфигурацию поэтому контроль выполнялся только прямым лучом. Судя по этому изображению, дефект плоскостной с шероховатой поверхностью, тянется по высоте от 8 до 13 мм. Несколько ниже расположен еще один небольшой дефект.

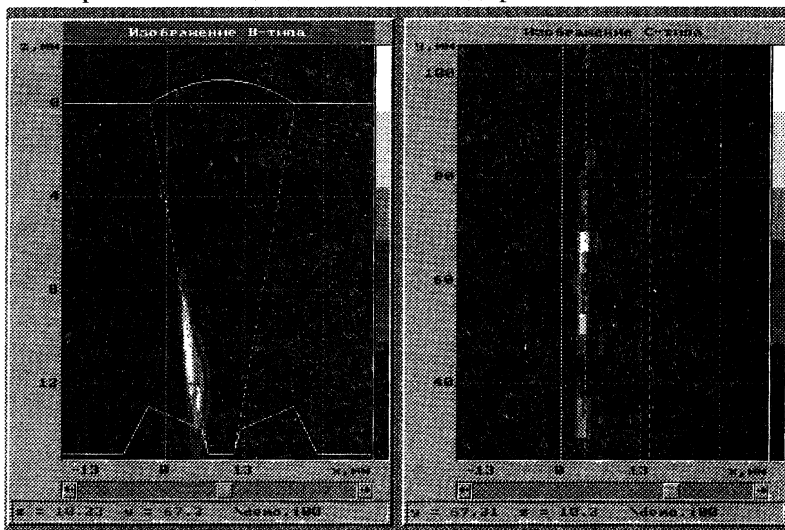


Рис. 8.5. Изображение дефекта в аустенитном сварном шве диаметром 325 x 16 мм.

По развертке типа *C* (изображение шва в плане) определяем длину дефекта: от 50 до 75 мм (25 мм). Дефект расположен правее оси шва на 2 мм. Максимальная амплитуда достигается на расстоянии 70 мм вдоль шва. Этому месту соответствует изображение на развертке типа *B* (слева).

Достоверность экспертного контроля сопоставлялась с результатами вскрытия дефектного места. Оказалось, что это трещина в корне шва с максимальным размером по высоте 5 мм и длиной 24 мм.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия. Справочное пособие. Минск: Вышайшая школа. 1987, 272 с.
2. Ермолов И. Н. Контроль ультразвуком (краткий справочник). М: НПО ЦНИИТМАШ, 1992, 85 с.
3. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Акустический метод контроля. М: Высшая школа, 1991, 288 с.
4. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. М: Metallurgiya. 1989, 752 с.
5. Методы акустического контроля металлов / Под ред. Н. П. Алешина. М. Машиностроение, 1989, 454 с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. / Под ред. В. В. Клюева. М: Машиностроение. 1995, 288 с.
7. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 228 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Обозначения.....	4
1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН.....	6
1.1. Волны и импульсы.....	6
1.2. Типы волн.....	7
2. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕД.....	12
2.1. Скорость звука.....	12
2.2. Затухание.....	12
2.3. Измерение скорости.....	13
2.4. Измерение коэффициента затухания.....	19
3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН.....	25
3.1. Граница двух протяженных сред.....	25
3.2. Свободная поверхность твердого тела.....	27
3.3. Граница сред, разделенных слоем.....	28
3.4. Отражение и преломление импульсов и пучков лучей.....	29
4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	31
4.1. Пьезоматериалы.....	31
4.2. Согласование ПЭП с дефектоскопом.....	33
4.3. Достижение максимальной чувстви- тельности и широкополосности ПЭП.....	36
4.4. Бесконтактные преобразователи.....	38
5. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	40
5.1. Прямой преобразователь.....	40
5.2. Поле преобразователя с акустической задержкой.....	43
5.3. Фокусирующий преобразователь.....	49
6. РАСЧЕТ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ.....	53
6.1. Формулы для эхосигналов от поверхно- стей объекта контроля и от отражателей, удаленных от границ.....	53
6.2. Расчет эхосигналов по диаграммам и графикам.....	58
6.3. Угловые отражатели.....	65
6.4. Отражение от дефектов при контроле эхозеркальным методом.....	69
6.5. Особенности отражения от реальных дефектов.....	70
7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ.....	72
7.1. Измерение координат дефектов.....	72
7.2. Измерение эквивалентной площади дефектов.....	80
7.3. Измерение условных размеров.....	81
7.4. Распознавание компактных и протяженных дефектов.....	83
7.5. Количество дефектов; разрешающая способность.....	86
7.6. Определение формы дефекта.....	88



<b>8. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАНЫХ</b> .....	92
8.1 Когерентные и некогерентные методы представления данных УЗ контроля.....	92
8.2. Акустическая голография.....	93
8.3. Метод фокусированной синтезированной апертуры (SAFT).....	96
8.4. Компьютерные системы визуализации дефектов с когерентной обработкой данных серии Авгур.....	97
Список литературы.....	106

**И.Н. ЕРМОЛОВ, А.Х. ВОПИЛКИН,  
В.Г. БАДАЛЯН**

## **РАСЧЕТЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

**(КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК)**

Корректурa авторская

---

Подписано в печать: 09.02.2004 г.

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Печать офсетная. Формат бумаги 60/84 <sup>1/16</sup>. Усл. п.л. 6,75.

Тираж 150 экз. Заказ № 350

---

Изготовлено с готового оригинал-макета в Издательстве МГОУ  
105005. г. Москва, ул. Радио, д. 10-а, тел.: 265-41-63, факс:265-41-62.