

УДК

629.4

Б 869



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ (СГУПС)

Бояркин Е.В., Кочетков А.С., Бехер С.А.

**Физические основы ультразвукового контроля.**

Руководство по подготовке к сертификации

Учебное пособие

(на правах рукописи)

Новосибирск 2018

УДК 629.4 Б 869

Бояркин Е.В., Кочетков А.С., Бехер С.А. Физические основы ультразвукового контроля. Руководство по подготовке к экзамену. Учебное пособие – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. – 38с.

Учебное пособие содержит теоретические сведения по физическим основам ультразвукового контроля деталей подвижного состава и верхнего строения пути и состоит из вопросов по основным темам физических основ ультразвукового контроля и кратких ответов. Учебное пособие разработано совместно с НИЛ «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Учебное пособие предназначено для подготовки к экзамену слушателей ИПТТ и ПК СГУПС, проходящих повышение квалификации или сертификацию на I и II уровни по ультразвуковому методу контроля деталей подвижного состава и верхнего строения пути.

Ответственный редактор:

доктор технических наук *Бехер С.А.*

## Содержание

УДК 629.4.....	1
1 Теория звуковых волн и свойства волн.....	6
1.1 Акустические колебания.....	6
1.2 Акустические волны.....	6
1.3 Диапазон частот, применяемый при контроле объектов железнодорожного транспорта ...	6
1.4 Скорость ультразвуковых волн.....	6
1.5 Частота ультразвуковых волн.....	6
1.6 Деление акустических колебаний в зависимости от частоты.....	6
1.7 Длина волны.....	7
1.8 Период колебания.....	7
1.9 Амплитуда волны.....	8
1.10 Как различаются амплитуды двух сигналов в дБ, если амплитуда первого сигнала больше (меньше) второго в два раза.....	8
1.11 Соотношение между относительными единицами и дБ.....	9
2 Типы ультразвуковых волн.....	9
2.1 Типы ультразвуковых волн.....	9
2.2 Свойства продольной волны.....	9
2.3 Свойства поперечной волны.....	9
2.4 Свойства поверхностной волны Рэлея.....	10
2.5 Свойства поверхностных головных волн.....	10
3 Затухание ультразвуковых волн.....	12
3.1 Затухание ультразвуковых волн.....	12
3.2 Поглощение и рассеивание ультразвуковых волн.....	12
3.3 Влияние диаметра зерна материала на затухание ультразвуковых волн.....	12
3.3 Влияние частоты на затухание ультразвуковых волн.....	12
4 Пьезоэлектрические преобразователи.....	13
4.1 Прямой и обратный пьезоэффект.....	13
4.2 Резонансная частота пьезопластины.....	13
4.3 Зависимость резонансной частоты пьезопластины от толщины.....	13
4.4 Строение прямого преобразователя.....	13
4.5 Строение наклонного ПЭП.....	14
4.6 Строение раздельно-совмещенного ПЭП.....	14
4.7 Подключение раздельно-совмещенного преобразователя к дефектоскопу.....	15
4.8 Подключение совмещенного преобразователя к дефектоскопу.....	15
4.6 Амплитудно-частотная характеристика ПЭП.....	15
4.7 Узко- и широкополосные преобразователи.....	16
4.8 Мертвая зона преобразователя.....	16
4.9 Ширина зондирующего импульса.....	16
4.10 Влияние частоты ультразвуковых волн на мертвую зону преобразователя.....	16
4.11 Влияние угла ввода преобразователя на мертвую зону.....	17
4.12 Проверка мертвой зоны преобразователя.....	17
4.13 Свойства ближней зоны ПЭП.....	17
4.14 Определение расстояния ближней зоны.....	18
4.15 Изменение ближней зона с увеличением радиуса пьезопластины и частоты.....	18
4.16 Изменение ближней зоны с увеличением угла ввода.....	18
4.17 Связь ближней и мертвой зоны.....	18
4.18 Свойства дальней зоны ПЭП.....	18
4.19 Определение угла раскрытия диаграммы направленности.....	19
4.20 Изменение угла раскрытия диаграммы направленности преобразователя с увеличением радиуса пьезопластины и частоты.....	19
4.21 Изменение угла раскрытия диаграммы направленности преобразователя с увеличением угла ввода.....	19
4.22 Акустическая ось преобразователя.....	20
4.23 Угол ввода преобразователя.....	20

4.24	Соотношение между углом ввода и углом акустической оси преобразователя .....	20
4.25	Диаграмма направленности преобразователя.....	20
5	Прохождение и отражение УЗВ на границе раздела сред.....	21
5.1	Процессы, происходящие при прохождении волны через границу раздела двух сред.....	21
5.2	Закон Снеллиуса .....	22
5.3	Изменение угла преломления (ввода) с увеличением угла падения ультразвуковых волн	22
5.4	Изменение угла ввода при увеличении скорости ультразвуковых волн в объекте контроля .....	22
5.5	Первый критический угол.....	23
5.6	Второй критический угол .....	23
5.7	Третий критический угол.....	23
5.8	Диффузное и зеркальное отражения ультразвуковых волн .....	24
6	Методы ультразвукового контроля .....	24
6.1	Зеркально-теневой метод контроля .....	24
6.2	Достоинства зеркально-теневого метода .....	25
6.3	Недостатки зеркально-теневого метода .....	25
6.4	Изменение выявляемость дефектов ЗТМ при увеличении глубины залегания отражателя .....	25
6.5	Применение ЗТМ.....	26
6.6	Схемы теневого и зеркально-теневого методов .....	26
6.7	Эхо-метод .....	26
6.8	Схема установки ПЭП и типичная осциллограмма при контроле эхо-методом прямым ПЭП.....	27
6.9	Схема установки ПЭП и типичная осциллограмма при контроле эхо-методом наклонным ПЭП.....	27
6.10	Факторы, определяющие амплитуду сигнала при контроле эхо-методом .....	28
6.11	Определение координат до отражателя при контроле эхо-методом прямым ПЭП от времени пройденного волной в ОК .....	28
6.12	Параметры дефектоскопа, настраиваемые при контроле эхо-методом прямым ПЭП .....	29
6.13	Определение координат до отражателя при контроле эхо-методом наклонным ПЭП от времени пройденного волной в ОК .....	29
6.14	Параметры дефектоскопа, настраиваемые при контроле эхо-методом наклонным ПЭП	30
6.15	Определение коэффициента выявляемости (дефектности) при контроле эхо-методом ..	30
7	Условные размеры дефекта.....	30
7.1	Линейные условные размеры дефектов .....	30
7.2	Абсолютный способ измерения условных размеров дефекта.....	31
7.3	Относительный способ измерения условных размеров дефекта .....	31
7.4	Определение условной протяженности дефекта .....	31
7.5	Определение условной ширины дефекта .....	31
7.6	Определение условной высоты дефекта .....	31
7.7	Изменение условных размеров дефектов одинакового размера, залегающие на различной глубине.....	32
7.8	Изменение условных размеров ненаправленных (округлых) дефектов разного размера, залегающих на одной глубине, измеренных относительным и абсолютным способами .....	32
7.9	Изменение условных размеров плоских отражателей разного размера, залегающих на одной глубине, измеренных относительным и абсолютным способами .....	32
7.10	Изменение условных размеров дефекта при увеличении ширины диаграммы направленности.....	33
7.11	Изменение условных размеров дефекта при увеличении угла ввода ПЭП .....	33
7.12	Соотношение между условными и реальными размерами дефекта.....	33
7.13	Условное расстояние между дефектами .....	33
8	Чувствительности дефектоскопа и контроля .....	33
8.1	Браковочная чувствительность .....	33
8.2	Чувствительность фиксации.....	33
8.3	Чувствительность оценки .....	33

8.4 Соотношение между браковочной чувствительностью и чувствительностями фиксации и оценки .....	34
8.5 Предельная чувствительность .....	34
8.6 Образцы, применяемые для настройки на предельную чувствительность .....	34
8.7 Диаграмма, применяемая для настройки дефектоскопа на предельную чувствительность .....	34
8.8 Условная чувствительность.....	35
8.9 Образцы, применяемые для настройки на условную чувствительность .....	35
8.10 Диаграмма, применяемая для настройки на условную чувствительность .....	36
8.11 Эквивалентная чувствительность .....	36
8.12 Образцы, применяемые для настройки на эквивалентную чувствительность .....	36
8.13 Систематическая ошибка при определении координат дефекта .....	37
8.14 Случайная ошибка при определении координат дефекта .....	37
9 Разрешающая способность.....	37
9.1 Разрешающая способность аппаратуры .....	37
9.2 Разрешающая способность по дальности.....	37
9.3 Разрешающая способность по фронту.....	37

## **1 Теория звуковых волн и свойства волн**

### **1.1 Акустические колебания**

Акустические колебания – это механические колебания частиц упругой среды возле положения равновесия.

### **1.2 Акустические волны**

Акустические волны – это процесс распространения в упругой среде механического возмущения.

### **1.3 Диапазон частот, применяемый при контроле объектов железнодорожного транспорта**

При проведении контроля применяют в основном ультразвуковой диапазон частот от 0,4 МГц (0,1 МГц) до 10 МГц. Для контроля объектов железнодорожного транспорта наиболее распространенной является частота 2,5 МГц.

### **1.4 Скорость ультразвуковых волн**

Скорость ультразвуковых волн (обозначается «С») – это время, пройденное волной за единицу времени, единица измерения скорости звука м/с, для проведения расчетов принято использовать единицу измерения мм/мкс, при этом  $1000 \text{ м/с} = 1 \text{ мм/мкс}$ .

Скорость распространения поперечной волны приблизительно в два раза (в 0,55) меньше, чем продольной. Например, в стали скорость продольной волны - 5,90 мм/мкс, а поперечной - 3,25 мм/мкс. Скорость волны определяется свойствами материала, в частности плотностью материала и модулями упругости, так например скорость волны в жидкости составляет 1,49 мм/мкс, в воздухе – 0,33 мм/мкс, в орг-стекле – 2,67 мм/мкс.

### **1.5 Частота ультразвуковых волн**

Частота – это число колебаний частицы в единицу времени, измеряется в [Гц] или [1/с].

### **1.6 Деление акустических колебаний в зависимости от частоты**

В зависимости от частоты акустические колебания делятся на:

1) инфразвуковые – диапазон частот ниже границы слышимости человека, < 16...25 Гц;

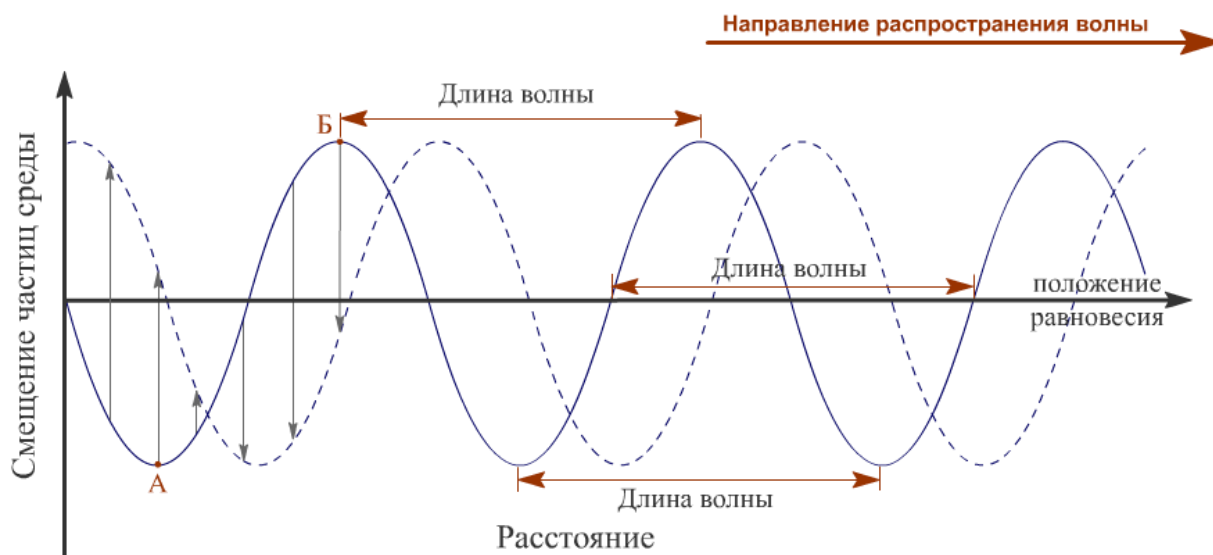
2) звуковые – соответствуют диапазону слышимости человека, от 16...25 до  $(15...20) \cdot 10^3$  Гц;

3) ультразвуковые – диапазон частот выше границы слышимости человека от  $(15...20) \cdot 10^3$  до  $10^9$  Гц;

4) гиперзвуковые – длина волны меньше длины свободного пробега молекул воздуха  $> 10^9$  Гц.

### 1.7 Длина волны

Длина волны – это минимальное расстояние в пространстве между двумя одинаково колеблющимися точками, находящимися в одной фазе (амплитуда колебания и направление движения совпадают).



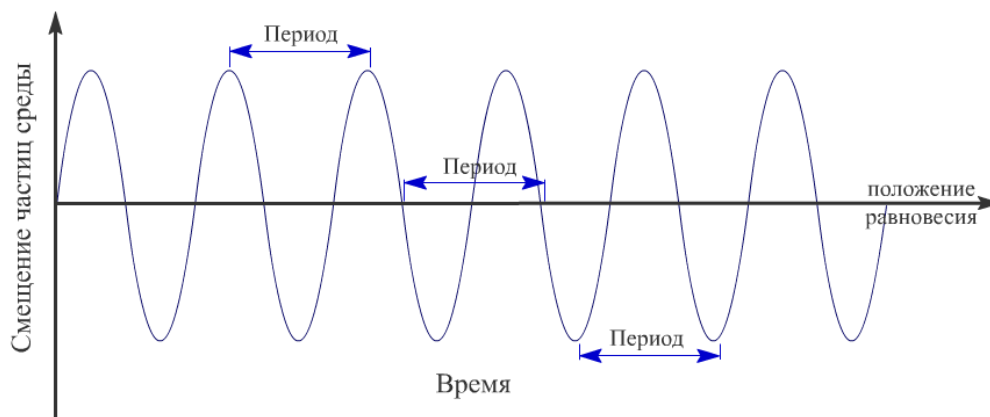
Обозначается символом  $\lambda$  (лямбда) и определяется скоростью ультразвуковых волн и частотой, измеряется в мм.

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

При этом  $c \neq f \cdot \lambda$ , так как скорость ультразвуковых волн определяется только свойствами среды, в которой распространяется волна и не зависит от частоты и длины волны. Аналогично  $f \neq \frac{c}{\lambda}$ , так как частота задается генератором дефектоскопа и не зависит от скорости ультразвуковых волн и длины волны.

### 1.8 Период колебания

Периодом  $T$  называют минимальный интервал времени между одинаковыми положениями частицы. Период – это время одного полного колебания, измеряется в секундах (с), миллисекундах (мс), микросекундах (мкс).



При ультразвуковом контроле период колебания принято измерять в мкс.

### 1.9 Амплитуда волны

Амплитуда волны – это максимальное смещение частиц среды от положения равновесия. При ультразвуковом контроле амплитуду волны принято измерять в относительных логарифмических единицах – дБ (деци Белла).

$$N = 20 \cdot Lg \left( \frac{A}{A_0} \right),$$

где  $A$  – амплитуда измеряемого сигнала,  $A_0$  – амплитуда зондирующего импульса импульса,  $Lg$  – десятичный логарифм.

Поскольку амплитуда зондирующего импульса всегда больше амплитуды любого сигнала, то отношение  $\frac{A}{A_0}$  всегда будет меньше единицы, а значение дБ  $N$  всегда будет отрицательным и при определении амплитуды сигнала в процессе проведения контроля знак «–» принято не записывать. Однако, если выполняется сравнение двух сигналов, знак «+» или «–» учитывают.

### 1.10 Как различаются амплитуды двух сигналов в дБ, если амплитуда первого сигнала больше (меньше) второго в два раза

Если выполняется сравнение двух сигналов, например, отраженных от двух различных дефектов или отраженных от дефекта и от эталонного отражателя, то полученный знак при расчете относительной амплитуды сигнала необходимо учитывать.

Если первый сигнал больше второго в два раза, то  $\left( \frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{2}{1} > 1$ , то  $N = 20 \cdot Lg \left( \frac{2}{1} \right) = 6$  дБ. Если первый сигнал меньше второго в два раза, то  $\left( \frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{1}{2} < 1$ , то  $N = 20 \cdot Lg \left( \frac{1}{2} \right) = -6$  дБ.



## 1.11 Соотношение между относительными единицами и дБ

Значения амплитуд импульсов  $N$  в дБ и соответствующие значения относительной амплитуды  $A/A_0$  соотносятся:

$A/A_0$	2	4	10	20	100	1/100	1/20	1/10	1/4	1/2
$N$ , дБ	6	12	20	26	40	-40	-26	-20	-12	-6

## 2 Типы ультразвуковых волн

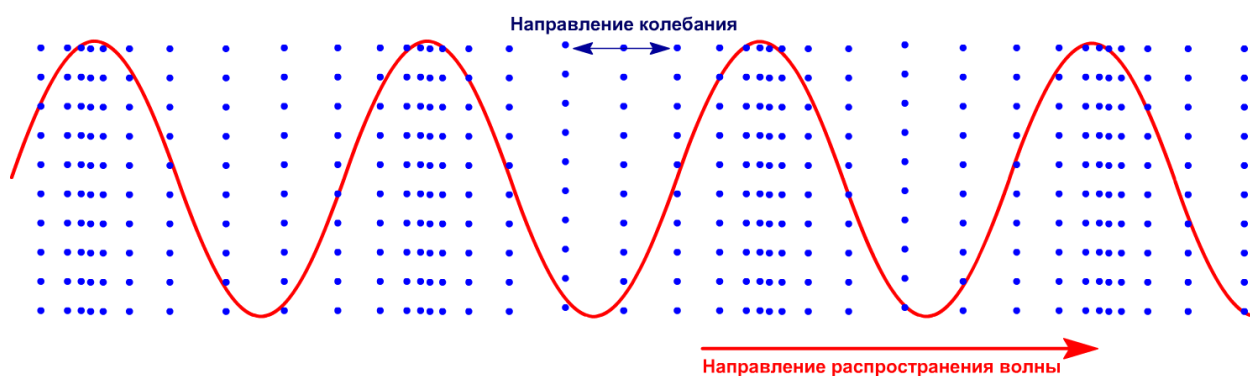
### 2.1 Типы ультразвуковых волн

Ультразвуковые волны делят на объемные: продольные и поперечные; поверхностные: поверхностная Релеевская волна, головная продольная и головная поперечная; волны в пластинах и стержнях.

### 2.2 Свойства продольной волны

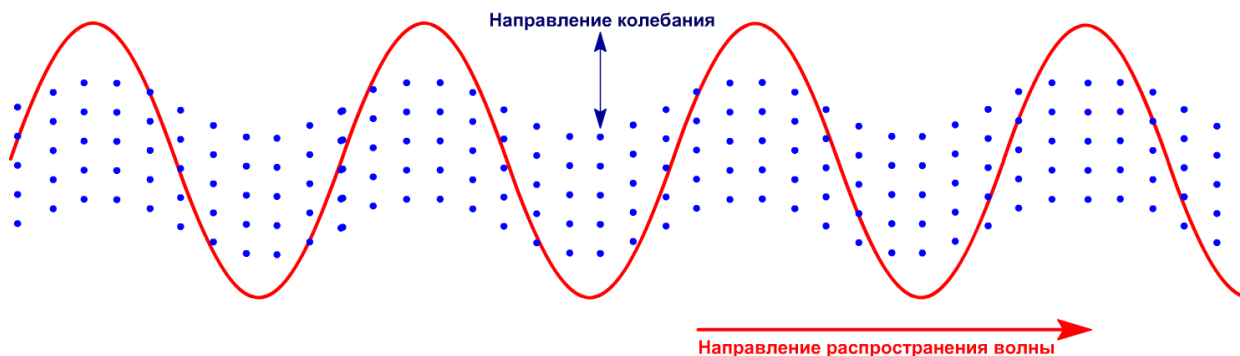
**Продольные волны  $L$**  – это акустические волны, в которых частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны. Под действием волны материал испытывает деформацию сжатия и растяжения. Волны способны распространяться во всех средах (твердые, жидкие, газообразные) кроме вакуума.

Скорость продольной волны в стали  $C_l^{\text{сталь}} = 5900$  м/с, в оргстекле  $C_l^{\text{оргст.}} = 2670$  м/с, в воде  $C_l^{\text{вода}} = 1400$  м/с; в воздухе  $C_l^{\text{воздух}} = 330$  м/с.



### 2.3 Свойства поперечной волны

**Поперечные волны** – это акустические волны, в которых частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Под действием волны материал испытывает деформацию сдвига. Данный тип волн может распространяться только в твердых телах, в телах обладающих деформацией объема и формы. В жидкостях и газах поперечные волны не распространяются.

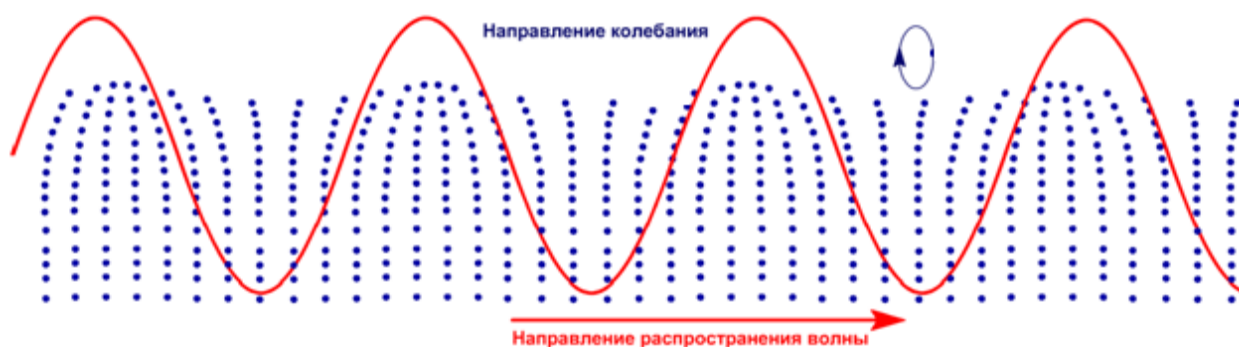


Скорость поперечных волн ( $C_t$ ) в одном материале всегда меньше скорости продольных волн ( $C_l$ ), для большинства материалов выполняется следующее соотношение:  $C_t \approx 0,55 \cdot C_l$ . Скорость ультразвуковых волн в стали составляет 3260 м/с.

## 2.4 Свойства поверхностной волны Рэлея

**Поверхностная Рэлеевская волна** – это акустическая волна, в которой частицы колеблются эллипсу с большой осью, перпендикулярной к поверхности. Вытянутость эллипсов увеличивается с увеличением глубины от поверхности.

Поверхностная волна Рэлея представляет линейную комбинацию продольной и поперечной волн и существует только в твердых телах и имеет малое затухание.



Скорость Рэлеевской волны  $C_s$  приблизительно равна 0,93 скорости поперечных волн (для стали - 3,01 мм/мкс). Глубина проникновения Рэлеевских волн составляет примерно  $1,5\lambda_s$ .

## 2.5 Свойства поверхностных головных волн

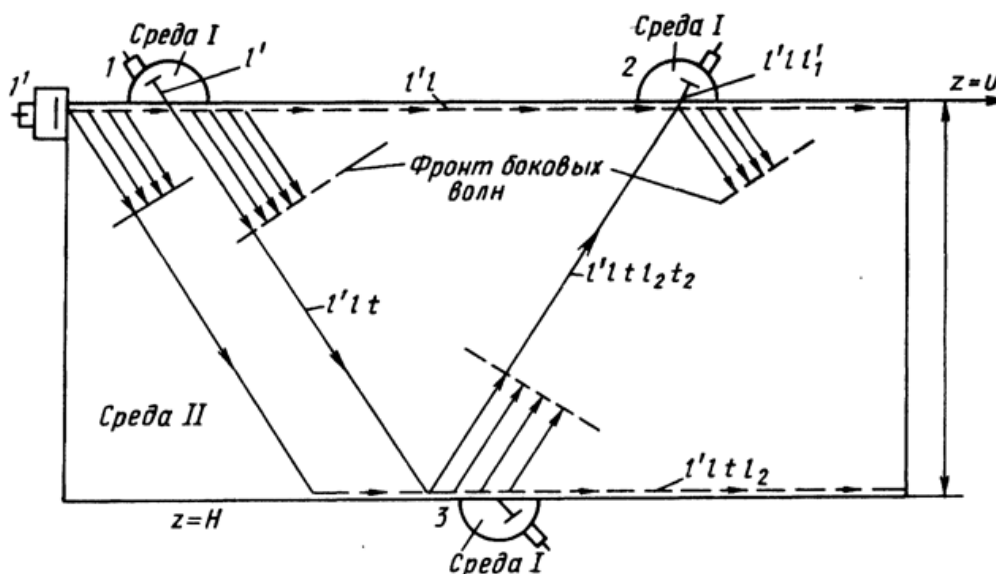
**Поверхностные головные волны** – это акустические волны, в которых частицы колеблются по эллипсу. Волна распространяется под поверхностью, не выходя на нее, и непрерывно излучает трансформированные волны. Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться продольные головные, излучающие поперечные трансформированные волны, и поперечные головные волны, излу-

чающие продольные трансформированные. Скорости распространения головных волн равны скоростям соответствующих объемных волн.

На практике головные волны возбуждают с помощью наклонно падающей продольной волны из внешней среды (призмы) на границу с контролируемым изделием под первым, вторым и третьим критическими углами.

Свойства головных волн:

- 1) волны существуют только в твердых средах;
- 2) непрерывно излучают боковые трансформированные волны, из-за чего очень быстро затухают. Боковая поперечная волна, дойдя до нижней поверхности, трансформируется в головную волну (третий критический угол), и процесс повторяется вновь на противоположной поверхности;



- 4) волна легко возбуждается прямым преобразователем, сдвинутым с торцевой поверхности к краю образца;

5) волна «не реагирует» на поверхностные дефекты и неровности поверхности глубиной меньше длины волны, вследствие её отсутствия на поверхности. В тоже время с помощью данной волны можно обнаружить подповерхностные дефекты в слое, начиная от глубины  $\lambda$  до  $(3 \dots 4) \lambda$ . Трансформированные волны мешают проведению контроля, отражаясь от противоположной поверхности изделия и давая ложные сигналы, поэтому минимальная толщина контролируемых изделий должна быть более 10 ... 20 мм.

### 3 Затухание ультразвуковых волн

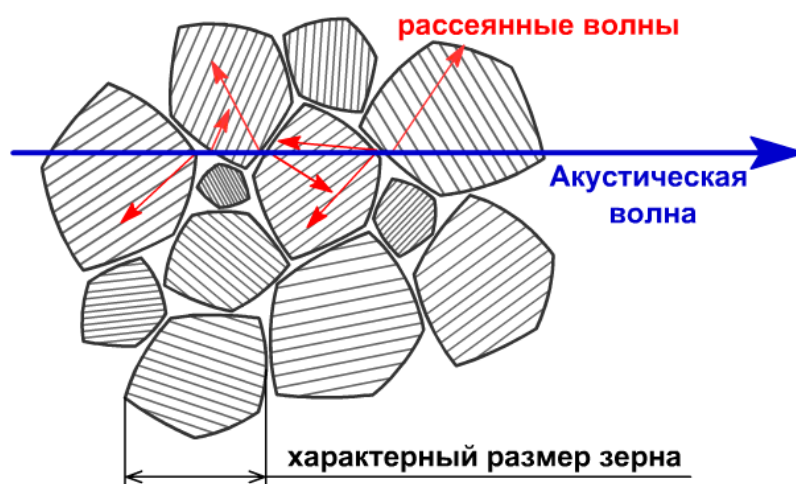
#### 3.1 Затухание ультразвуковых волн

Затуханием называют процесс уменьшения амплитуды волны, связанный с поглощением и рассеянием акустических волн в материале объекта контроля.

#### 3.2 Поглощение и рассеивание ультразвуковых волн

Поглощение ультразвуковых волн связано с совершением работы на колебаний частиц и переходом энергии колебания в тепловую энергию (разогрев материала). Поглощение наиболее ярко проявляется у бесструктурных материалов, например, оргстекло, резина, вода, газы и т.д.

Рассеивание ультразвуковых волн характерно для материалов, имеющих структуру, таких как металлы, обладающие зеренной структурой. Волна, падающая на границу раздела зерен частично отражается, частично преломляется, что приводит к рассеиванию волны.



#### 3.3 Влияние диаметра зерна материала на затухание ультразвуковых волн

Чем больше диаметр зерна (больше соотношение диаметра зерна к длине волны), тем больше происходит рассеивание волн на границах зерен и тем больше затухание УЗВ.

#### 3.3 Влияние частоты на затухание ультразвуковых волн

Чем больше частота, тем больше затухание ультразвуковых волн, при этом наиболее сильно затухает поперечная волна по сравнению с продольной (примерно в семь раз затухание поперечной волны больше чем продольной).

## 4 Пьезоэлектрические преобразователи

### 4.1 Прямой и обратный пьезоэффект

Прямой пьезоэлектрический эффект – это преобразование акустических колебаний в электрический сигнал, используется для регистрации акустических волн.

Обратный пьезоэлектрический эффект – это преобразование электрического сигнала в акустические колебания, используется для излучения акустических волн.

### 4.2 Резонансная частота пьезопластины

Резонансная частота пьезопластины определяется её толщиной и скоростью ультразвуковых волн в материале пьезопластины.

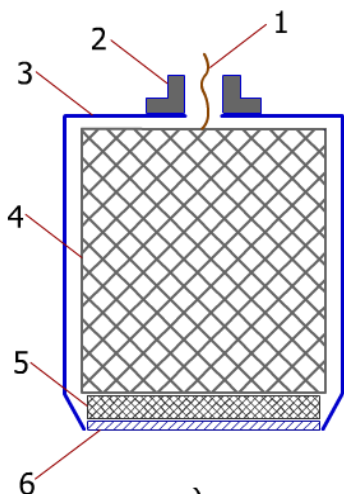
$$f_p = \frac{c_p}{2h}$$

### 4.3 Зависимость резонансной частоты пьезопластины от толщины

Чем больше толщина пьезопластины, тем резонансная частота меньше и определяется по формуле:

$$f_p = \frac{c_p}{2h}$$

### 4.4 Строение прямого преобразователя



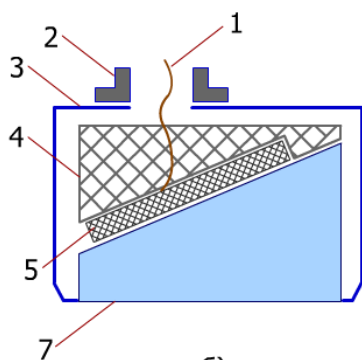
- 1 – электрические выводы соединяет преобразователь с дефектоскопом через коаксиальный провод;
- 2 – разъем для подключения коаксиального провода;
- 3 – корпус преобразователя;
- 4 – демпфер, изготовленный из материала поглощающего ультразвуковые колебания, приклеивается к пьезопластине и гасит ее свободные колебания;

5 – пьезопластина преобразует акустические колебания в электрический сигнал и обратно;

6 – протектор прямого ПЭП расположен между объектом контроля и пьезопластинкой и предназначен для ее защиты.

Преобразователь излучает продольные ультразвуковые волны, угол ввода 0 градусов.

#### 4.5 Структура наклонного ПЭП



1 – электрические выводы соединяет преобразователь с дефектоскопом через коаксиальный провод;

2 – разъем для подключения коаксиального провода;

3 – корпус преобразователя;

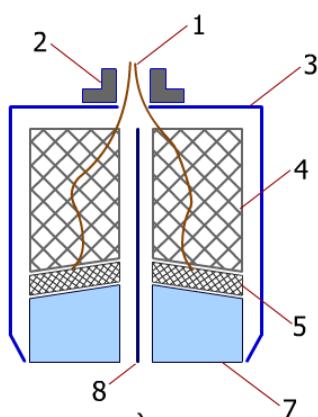
4 – демпфер, изготовленный из материала поглощающего ультразвуковые колебания, приклеивается к пьезопластине и гасит ее свободные колебания;

5 – пьезопластина преобразует акустические колебания в электрический сигнал и обратно;

7 – призма наклонного преобразователя обеспечивает угол падения продольной ультразвуковой волны на границу раздела сред (угол призмы) и соответствующий угол акустической оси (угол ввода) в объекте контроля.

Преобразователи преимущественно излучают поперечные волны (угол ввода от 40 до 70 градусов), либо поверхностные Рэлеевские волны (угол ввода 90 градусов). Также существуют преобразователи, излучающие продольные волны (угол ввода 18...24 градуса).

#### 4.6 Структура раздельно-совмещенного ПЭП



1 – электрические выводы соединяет преобразователь с дефектоскопом через коаксиальный провод;

2 – разъем для подключения коаксиального провода;

3 – корпус преобразователя;

4 – демпфер, изготовленный из материала поглощающего ультразвуковые колебания, приклеивается к пьезопластине и гасит ее свободные колебания;

5 – пьезопластина преобразует акустические колебания в электрический сигнал и обратно;

7 – призма наклонного преобразователя обеспечивает угол падения продольной ультразвуковой волны на границу раздела сред (угол призмы) и соответствующий угол акустической оси (угол ввода) в объекте контроля.

8 – акустический экран в раздельно-совмещенном преобразователе предотвращает прохождение ультразвука напрямую от источника к приемнику.

Преобразователь излучает продольные волны, имеет две пьезопластины (излучающую и приемную) и небольшой угол призмы, обеспечивающий фокусировку волн на определенной глубине контролируемого объекта. В отличие от совмещенной схемы подключения имеет маленькую мертвую зону.

#### **4.7 Подключение раздельно-совмещенного преобразователя к дефектоскопу**

Раздельно-совмещенные преобразователи имеют две пьезопластины, излучающая пьезопластина подключается к выходу дефектоскопа, приемная – ко входу дефектоскопа.

#### **4.8 Подключение совмещенного преобразователя к дефектоскопу**

Совмещенный преобразователь подключается к входу и выходу дефектоскопа одновременно.

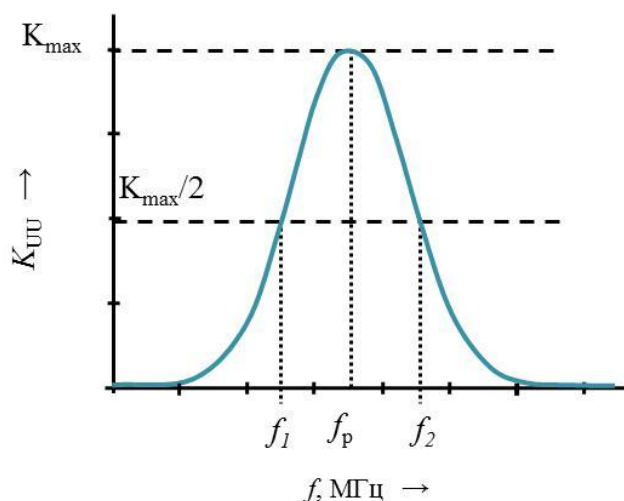
#### **4.6 Амплитудно-частотная характеристика ПЭП**

Амплитудно-частотная характеристика ПЭП характеризует изменение амплитуды колебания пьезопластины при изменении частоты ультразвуковых волн.

И характеризуется двумя основными характеристиками:

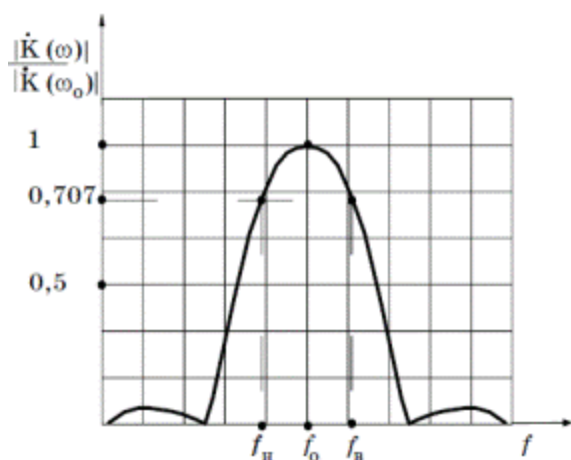
1) резонансная частота – частота, при которой амплитуда колебания пьезопластины максимальна;

2) полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого амплитуда колебания пьезопластины изменяется не более чем в два раза (на 6 дБ).

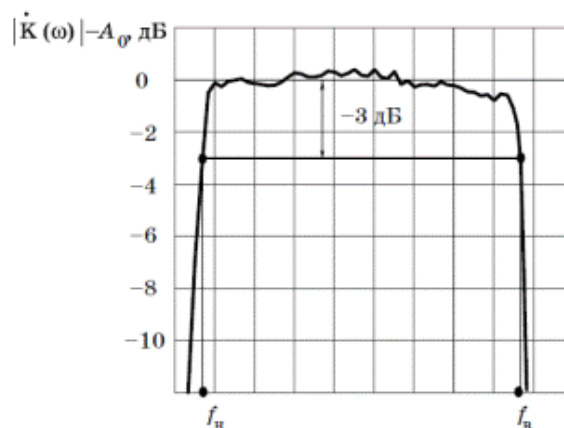


## 4.7 Узко- и широкополосные преобразователи

Узкополосные ПЭП имеют явно выраженную резонансную частоту и узкую полосу пропускания. Широкополосные ПЭП не имеют явно выраженной резонансной частоты и имеют широкую полосу пропускания.



Узкополосный ПЭП



Широкополосный ПЭП

## 4.8 Мертвая зона преобразователя

Мертвая зона преобразователя – это участок объекта контроля под преобразователем, где выявление дефектов не возможно из-за сливания эхо-сигнала от дефекта с зондирующим импульсом. Расстояние мертвой зоны определяется шириной зондирующего импульса.

## 4.9 Ширина зондирующего импульса

Зондирующий импульс – это излучение ультразвуковых волн в объект контроля, складывается из времени возбуждения пьезопластины  $t_b$  и времени собственных колебаний пьезопластины после возбуждения – реверберации пьезопластины  $t_r$ . Время возбуждения определяется числом периодов в зондирующем импульсе  $n$ , периодом колебания  $T$  или частотой  $f$ ,  $t_b = n \cdot T = \frac{n}{f}$ . Время реверберации определяется свойствами самой пьезопластины и качеством демпфера, наклеенного на него.

## 4.10 Влияние частоты ультразвуковых волн на мертвую зону преобразователя

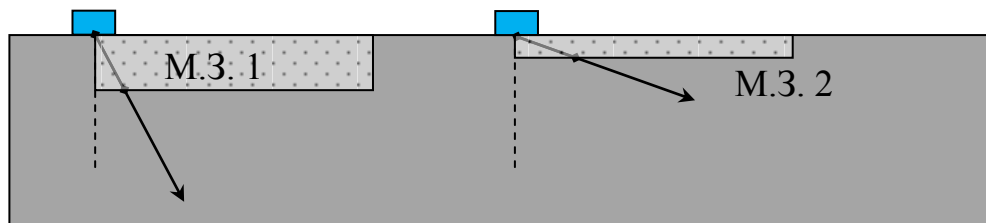
Чем больше частота ультразвуковых волн, тем меньше мертвая зона, т.к. мертвая зона определяется шириной зондирующего импульса, которая зависит от времени возбуждения пьезопластины, это время тем меньше чем больше частота  $t_b = \frac{n}{f}$  ( $n$  – число периодов в зондирующем импульсе).



#### 4.11 Влияние угла ввода преобразователя на мертвую зону

Чем больше угол ввода, тем меньше мертвая зона, т.к. мертвая зона в ОК определяется по глубине  $H$ , а при одинаковом расстоянии по лучу (одинаковая ширина зондирующего импульса) глубина будет тем меньше, чем больше будет угол ввода.

$H = R \cdot \cos(\alpha)$ , чем больше  $\alpha$ , тем меньше  $\cos(\alpha)$  и меньше  $H$  и мертвая зона.

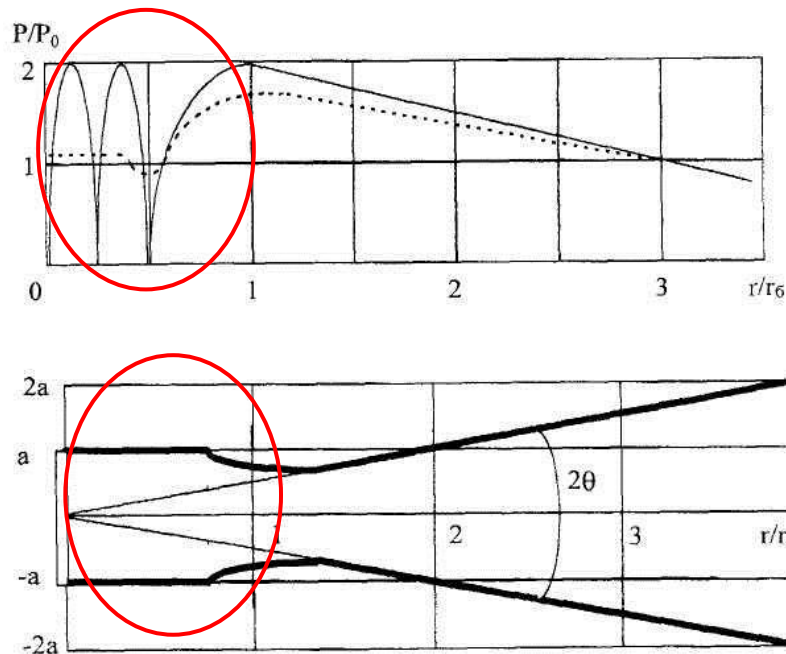


#### 4.12 Проверка мертвой зоны преобразователя

Мертвая зона преобразователя проверяется по боковой поверхности цилиндрических отражателей диаметром 2 мм. Данные отражатели имеют стандартные образцы СО-3Р (глубина залегания отражателей 3, 6, 8 и 12 мм) и СО-2 (глубина залегания отражателей 3 и 8 мм).

#### 4.13 Свойства ближней зоны ПЭП

Ближняя зона – это область объекта контроля под преобразователем, в которой наблюдается немонотонное изменение амплитуды колебаний (имеются зоны максимума и минимума). Наличие зон минимума и максимума связано с интерференцией волн, излучаемых различными участками пьезопластины. В результате, при попадании дефекта в зону минимума, он может быть пропущен. Фронт волны в ближней зоне близок к плоскому и не расходится.



#### 4.14 Определение расстояния ближней зоны

Расстояние ближней зоны ПЭП определяется по формуле:

$$R_{б.з.} = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 \cdot f}{c_l}, \text{ для прямого ПЭП и } R_{б.з.} = \frac{a_*^2}{\lambda} = \frac{a_*^2 \cdot f}{c_l}, \text{ для наклонного ПЭП,}$$

где  $a_*$  – мнимый радиус пьезопластины.

$$a_* = a \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)}, \quad a_* \leq a \text{ и чем больше угол ввода, тем меньше мнимый радиус ПЭП.}$$

#### 4.15 Изменение ближней зона с увеличением радиуса пьезопластины и частоты

Чем больше радиус пьезопластины и больше частота, тем расстояние ближней зоны больше, т.к.  $R_{б.з.} = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 \cdot f}{c_l}$ .

#### 4.16 Изменение ближней зоны с увеличением угла ввода

С увеличением угла ввода мнимый радиус пьезопластины наклонного ПЭП уменьшается, соответственно уменьшается и ближняя зона.

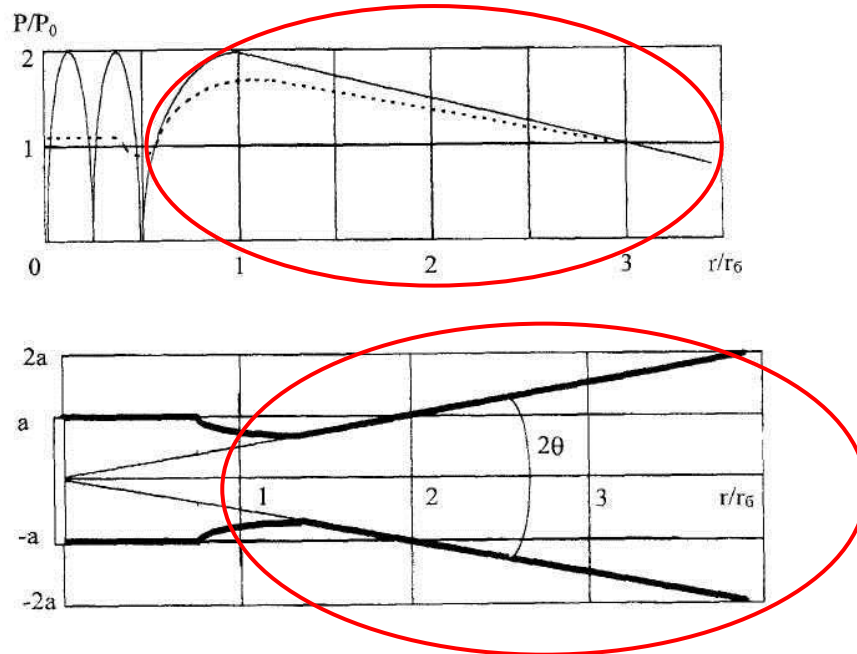
$$R_{б.з.} = \frac{a_*^2}{\lambda} = \frac{a_*^2 \cdot f}{c_l}, \quad a_* = a \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)}, \quad a_* \leq a \text{ и чем больше угол ввода, тем меньше мнимый радиус ПЭП.}$$

#### 4.17 Связь ближней и мертвой зоны

Мертвая и ближняя зоны не связаны между собой, ближняя зона не зависит от величины мертвой зоны.

#### 4.18 Свойства дальней зоны ПЭП

Дальняя зона – это область ОК вдали от преобразователя, в которой волна имеет расхождение ультразвуковых волн (угол раскрытия диаграммы направленности), фронт волны близок к сферическому. Амплитуда волны монотонно убывает по экспоненциальному закону из-за расхождения лучей от источника.



#### 4.19 Определение угла раскрытия диаграммы направленности

Угол раскрытия диаграммы направленности определяется по формуле:

$$\varphi = \arcsin\left(n \frac{\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(n \frac{c}{a \cdot f}\right) \text{ для прямого ПЭП,}$$

$$\varphi = \arcsin\left(n \frac{c}{a_* \cdot f}\right), \text{ для наклонного ПЭП,}$$

где  $n$  – коэффициент формы пьезопластины, для круглой пластины равен 0,61, для квадратной – 0,5;  $a_*$  – мнимый радиус пьезопластины.

$$a_* = a \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)},$$

при этом  $a_* \leq a$  и чем больше угол ввода, тем меньше мнимый радиус ПЭП.

#### 4.20 Изменение угла раскрытия диаграммы направленности преобразователя с увеличением радиуса пьезопластины и частоты

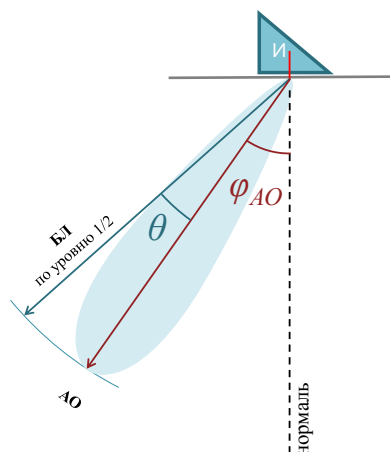
Чем больше радиус пьезопластины и больше частота, тем расстояние диаграммы меньше, т.к.  $\varphi = \arcsin\left(0,61 \frac{c}{a_* \cdot f}\right)$ .

#### 4.21 Изменение угла раскрытия диаграммы направленности преобразователя с увеличением угла ввода

С увеличением угла ввода мнимый радиус пьезопластины наклонного ПЭП уменьшается, а угол раскрытия диаграммы направленности увеличивается.

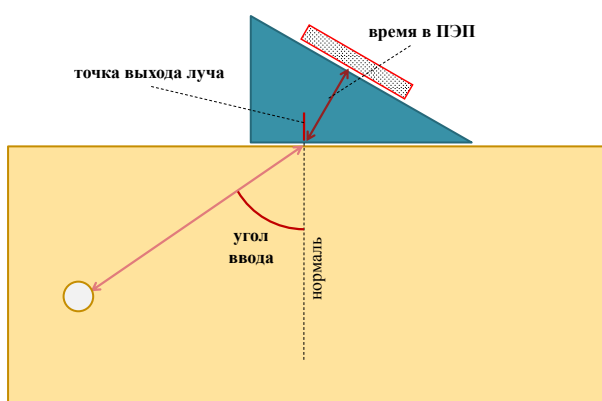
$\varphi = \arcsin\left(0,61 \frac{c}{a_* \cdot f}\right)$ ,  $a_* = a \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)}$ ,  $a_* \leq a$  и чем больше угол ввода, тем меньше мнимый радиус ПЭП.

## 4.22 Акустическая ось преобразователя



Угол акустической оси – это угол между нормалью к поверхности и акустической осью преобразователя.

## 4.23 Угол ввода преобразователя



Угол ввода – это угол между нормалью к поверхности и линией соединяющей точку выхода ультразвуковых волн и точку на ненаправленном отражателе, дающая максимальную амплитуду эхо-сигнала.

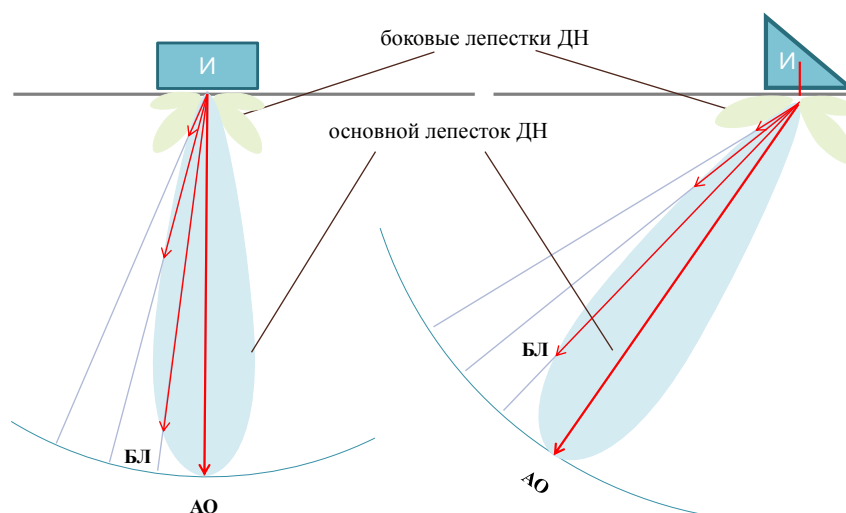
## 4.24 Соотношение между углом ввода и углом акустической оси преобразователя

Угол ввода обычно равен или меньше, чем угол акустической оси. Отклонения угла ввода от акустической оси тем больше, чем больше глубина залегания отражателя, шире диаграмма направленности и больше численное значение угла ввода. При глубине залегания отражателя более 150 мм принято определять угол ввода на специальных образцах с цилиндрическими отражателями на контролируемой глубине.

## 4.25 Диаграмма направленности преобразователя

Угловое распределение амплитуды волны в объекте контроля описывается диаграммой направленности. На диаграмме направленности выделяют основной ле-

песток (85% всей энергии излучения) и боковые лепестки (15% всей энергии излучения).



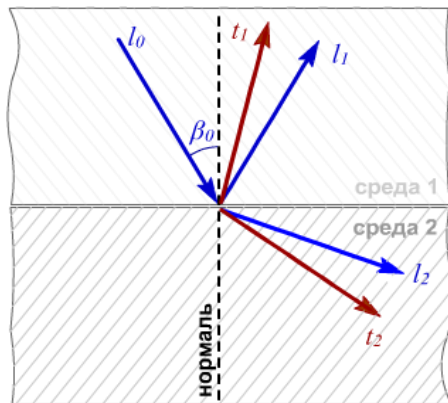
Угловое распределение амплитуд имеет максимум в направлении акустической оси, амплитуда боковых лучей убывает при удалении от нее. Диаграмму направленности принято характеризовать двумя параметрами: углом наклона акустической оси и углом раскрытия диаграммы направленности.

Широкая диаграмма направленности с большим углом раскрытия имеет преимущества на этапе поиска дефектов, так как позволяет озвучивать значительные объемы материала. Узкая диаграмма направленности позволяет проводить измерения координат дефектов, оценивать их форму и размеры с меньшей погрешностью.

## **5 Прохождение и отражение УЗВ на границе раздела сред**

### **5.1 Процессы, происходящие при прохождении волны через границу раздела двух сред**

Падение волны на границу раздела сред сопровождается тремя основными процессами: отражением, преломлением и трансформацией. При отражении от границы возникает волна того же типа, распространяющаяся обратно в первую среду. Преломление приводит к изменению направления распространения волны во второй среде. Трансформация вызывает появления в первой и второй средах волн другого типа, отличного от типа падающей волны.



$l_0$  – падающая продольная волна;  
 $l_1$  – отраженная продольная волна;  
 $l_2$  – преломленная продольная волна;  
 $t_1$  – трансформированная отраженная поперечная волна;  
 $t_2$  – трансформированная прошедшая поперечная волна.

## 5.2 Закон Снеллиуса

Отношение синуса угла (относительно нормали к поверхности) распространения ультразвуковой волны к скорости данной волны величина постоянная.

$$\frac{\sin(\beta_l)}{c_{l1}} = \frac{\sin(\beta_t)}{c_{t1}} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_{l2}} = \frac{\sin(\alpha_t)}{c_{t2}}.$$

Из закона синусов следует:

- 1) угол падения равен углу отражения;
- 2) чем больше угол падения волны, тем больше угол отражения, преломления и трансформации;
- 3) чем больше скорость ультразвуковых волн, тем больше угол преломления и трансформации;
- 4) угол преломления продольной волны всегда больше угла преломления поперечной волны.

## 5.3 Изменение угла преломления (ввода) с увеличением угла падения ультразвуковых волн

С увеличением угла падения угол преломления увеличивается прямо пропорционально:

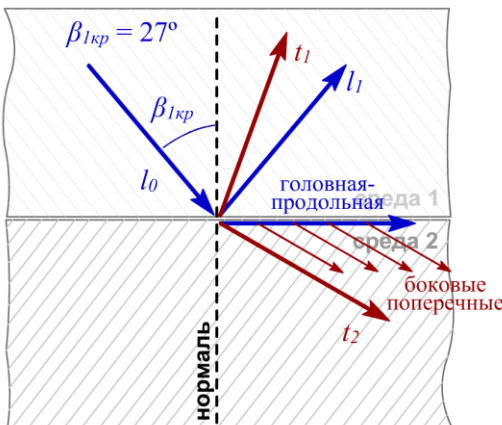
$$\frac{\sin(\beta_l)}{c_{l1}} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_{l2}}.$$

## 5.4 Изменение угла ввода при увеличении скорости ультразвуковых волн в объекте контроля

Угол ввода увеличится, так как отношение синуса угла к скорости величина постоянная, поэтому увеличение скорости ультразвуковых волн в объекте контроля должно пропорционально увеличить и угол ввода.

$$\frac{\sin(\beta_l)}{c_{l1}} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_{l2}} = \text{const.}$$

### 5.5 Первый критический угол



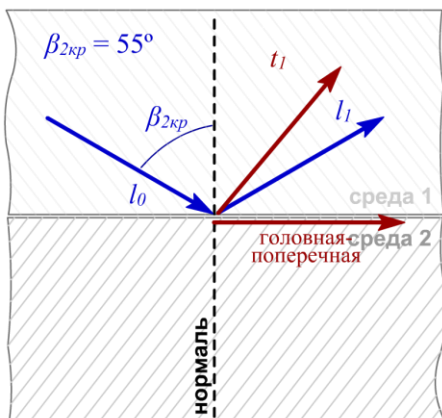
Первый критический угол – это минимальный угол падения **продольной** ультразвуковой волны на границу раздела **оргстекло-сталь**, при котором во второй среде образуется объемная поперечная волна, а вдоль поверхности раздела идет поперечная продольная головная волна, непрерывно излучающая поперечные трансформированные волны.

Первый критический угол определяется из закона Снеллиуса:

$$\frac{\sin(\beta_{кр1})}{c_{l1}} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_{l2}}, \text{ т.к. } \alpha_l = 90^\circ, \text{ то } \sin(\alpha_l) = \sin(90) = 1, \text{ получаем}$$

$$\sin(\beta_{кр1}) = \frac{c_{l1}}{c_{l2}} = \frac{2,67}{5,9} = 0,453; \beta_{кр1} = 27^\circ$$

### 5.6 Второй критический угол



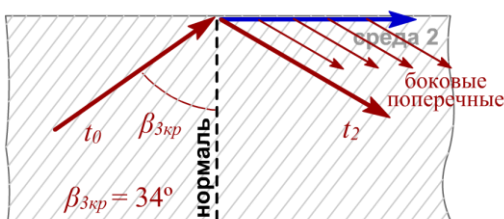
Второй критический угол – это минимальный угол падения **продольной** ультразвуковой волны на границу раздела **оргстекло-сталь**, при котором во второй среде преломленные объемные волны отсутствуют, а вдоль поверхности раздела идет поперечная продольная головная волна, непрерывно излучающая продольные трансформированные волны.

Второй критический угол определяется из закона Снеллиуса:

$$\frac{\sin(\beta_{кр2})}{c_{l1}} = \frac{\sin(\alpha_t)}{c_{t2}}, \text{ т.к. } \alpha_t = 90^\circ, \text{ то } \sin(\alpha_t) = \sin(90) = 1, \text{ получаем}$$

$$\sin(\beta_{кр2}) = \frac{c_{l1}}{c_{t2}} = \frac{2,67}{3,26} = 0,819; \beta_{кр2} = 55^\circ$$

### 5.7 Третий критический угол



Третий критический угол – это минимальный угол падения поперечной ультразвуковой волны на **свободную поверхность сталь-воздух**, при котором в **первой среде (сталь)** отражается объемная поперечная волна, а **вдоль свободной поверхности** идет поперечная продольная головная волна, непрерывно излучающая поперечные трансформированные волны.

Третий критический угол определяется из закона Снеллиуса:

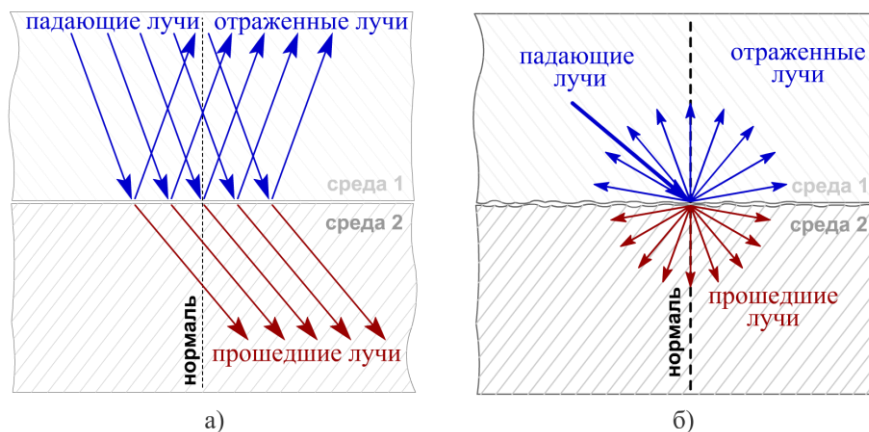
$$\frac{\sin(\beta_{кр3})}{c_{t2}} = \frac{\sin(\alpha_l)}{c_{l2}}, \text{ т.к. } \alpha_l = 90^\circ, \text{ то } \sin(\alpha_l) = \sin(90) = 1, \text{ получаем}$$

$$\sin(\beta_{кр3}) = \frac{c_{t2}}{c_{l2}} = \frac{3,26}{5,9} = 0,55; \beta_{кр3} = 33,5^\circ.$$

## 5.8 Диффузное и зеркальное отражения ультразвуковых волн

Поверхность считается зеркальной, если ее шероховатость существенно меньше длины волны  $\lambda \ll Rz$ . Поверхность является диффузной, если ее шероховатость сравнима или больше длины волны  $\lambda \leq Rz$ .

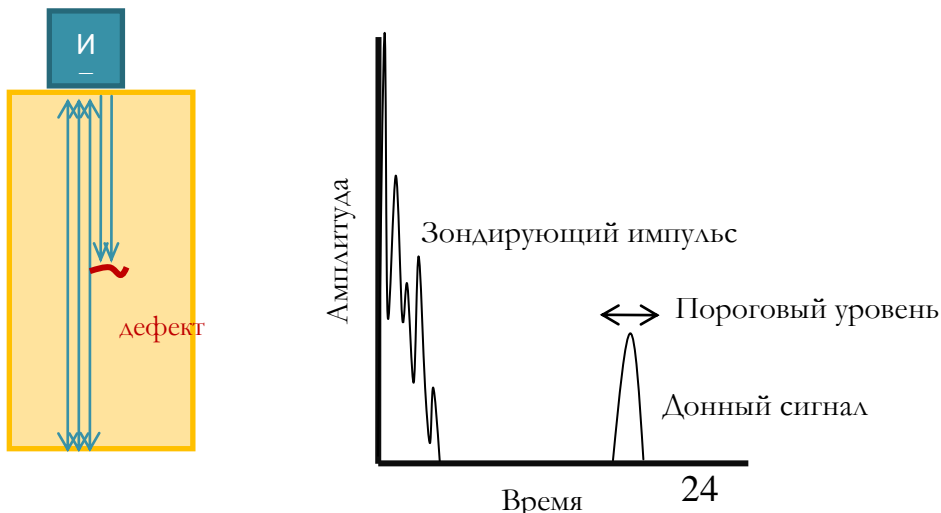
Вследствие диффузного отражения параллельный пучок хаотично рассеивается на неровностях среды во всех направлениях и амплитуда эхо-сигнала отраженного от поверхности или прошедшей через нее значительно уменьшается.



## 6 Методы ультразвукового контроля

### 6.1 Зеркально-теневой метод контроля

ЗТМ основан на анализе изменения амплитуды донного сигнала, признаком дефекта является уменьшение амплитуды донного сигнала ниже порогового уровня.





## 6.2 Достоинства зеркально-теневого метода

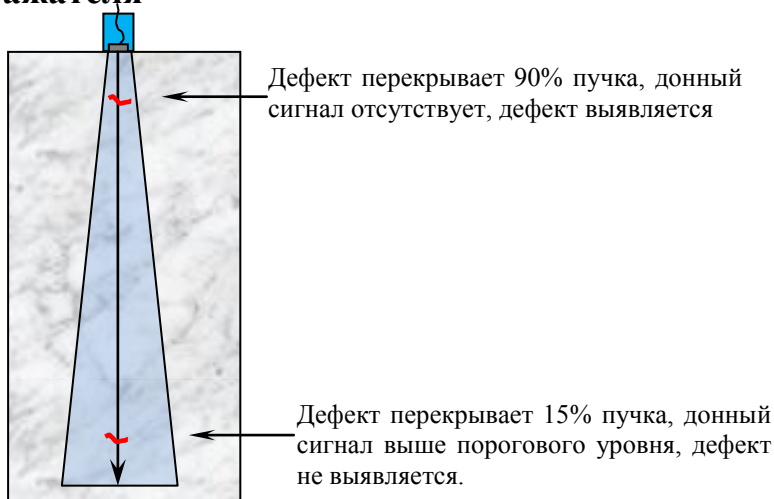
Зеркально-теньевым методом можно выявить дефекты, находящиеся в мертвой зоне ПЭП, любой ориентации и формы частично или полностью перекрывающие ультразвуковой пучок.

## 6.3 Недостатки зеркально-теневого метода

Основными недостатками ЗТМ являются:

- невозможно определить глубину залегания дефектов;
- перебраковка, связанная с потерей акустического контакта из-за загрязнения или повреждения поверхности ввода, недостаточного количества контактирующей жидкости;
- перебраковка из-за коррозии донной поверхности (диффузное рассеивание волн на шероховатой поверхности), не параллельности поверхности ввода и донной поверхности, наличия локальной структурной неоднородности с большим затуханием ультразвуковых волн (например, сварное соединение);
- выявляет преимущественно развитые дефекты перекрывающие ультразвуковой пучок;
- чем больше глубина залегания дефекта, тем больше амплитуда донного сигнала и, соответственно, хуже выявляемость дефекта.

## 6.4 Изменение выявляемость дефектов ЗТМ при увеличении глубины залегания отражателя



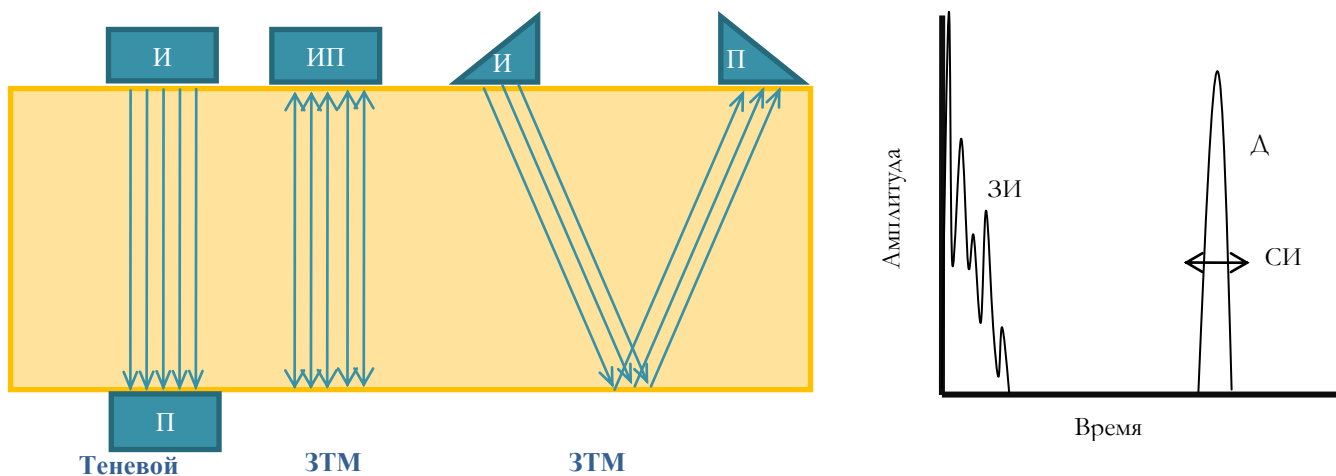
Чем глубже дефект, тем меньше он перекрывает УЗ пучок и амплитуда донного сигнала увеличивается, а выявляемость дефекта уменьшается. В частности коэффициент дефектности в относительных единицах увеличивается (стремится к единице), а в децибелах уменьшается по модулю и стремится к нулю.

### 6.5 Применение ЗТМ

Зеркально-теневой метод применяется для контроля дефектов структуры материалов типа внутренних несплошностей: пористость, раковины, рыхлоты и т.п., позволяет выявлять развитые трещины, перекрывающие ультразвуковой пучок.

### 6.6 Схемы теневого и зеркально-теневого методов

Для контроля теньевым методом применяются два преобразователя, устанавливаемые с разных сторон объекта контроля, один преобразователь является излучателем, второй приемником. ЗТМ может реализоваться одним прямым или РС ПЭП, являющимся излучателем и приемником, либо двумя наклонными ПЭП, находящимися с одной стороны объекта контроля, один ПЭП излучатель (или излучатель + приемник), второй приемник (или также излучатель и приемник).

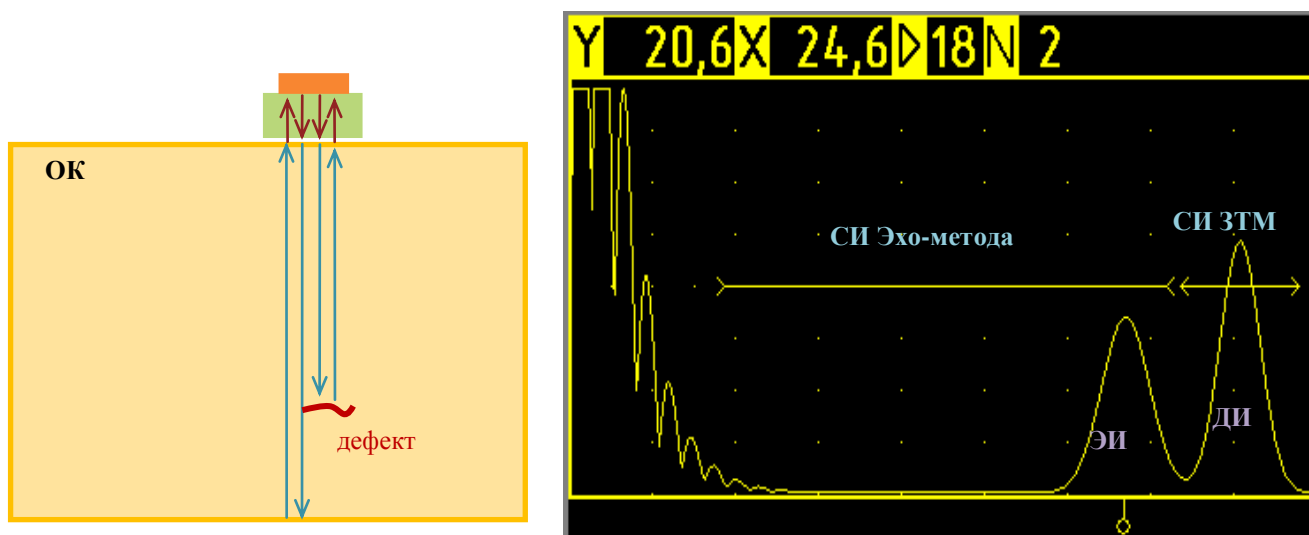


### 6.7 Эхо-метод

Эхо-метод основан на измерение амплитуды сигнала, отраженного от дефекта, и времени, пройденного волной от момента излучения до момента приема отраженной волны от дефекта. По амплитуде сигнала судят о наличии дефекта и его величине, по времени, пройденного волной – о его месте положения в объекте контроля.

## 6.8 Схема установки ПЭП и типичная осциллограмма при контроле эхо-методом прямым ПЭП

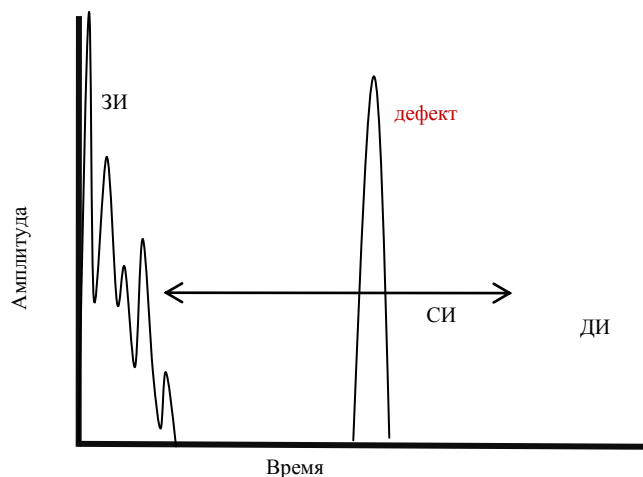
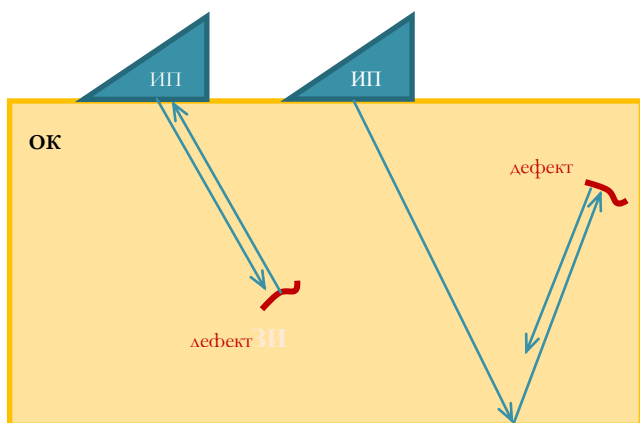
При контроле эхо-методом прямым ПЭП на экране дефектоскопа наблюдается зондирующий импульс, донный сигнал и временная селекция эхо-метода, находящаяся между зондирующим импульсом и донным сигналом. Донный сигнал может иметь отдельный строб ЗТМ при комбинированном контроле эхо-методом и ЗТМ.



ЗИ – зондирующий импульс; ЭИ – эхо-импульс; СИ – строб-импульс; ДИ - донный импульс.

## 6.9 Схема установки ПЭП и типичная осциллограмма при контроле эхо-методом наклонным ПЭП

При контроле эхо-методом наклонным ПЭП на экране дефектоскопа наблюдается зондирующий импульс и временная селекция эхо-метода которая ограничивает контролируемый участок объекта контроля. Контроль может выполняться прямым лучом (контролируется зона от поверхности ввода до противоположной поверхности) однократно или многократно отраженным лучом (все сечение образца контролируется два или более раза).



### 6.10 Факторы, определяющие амплитуду сигнала при контроле эхо-методом

- 1) Величина дефекта (чем больше дефект, тем больше амплитуда сигнала);
- 2) ориентация дефекта (выявляется дефект, расположенный перпендикулярно относительно акустической оси, при отклонении более 10 градусов, амплитуда резко уменьшается);
- 3) форма дефекта (наибольшая амплитуда у плоских отражателей, наименьшая – у сферических, средняя – у цилиндрических);
- 4) глубина залегания дефектов (чем больше глубина, тем меньше амплитуда сигнала);
- 5) затухание ультразвуковых волн (чем больше затухание УЗВ в материале, тем меньше амплитуда);
- 6) заполненность несплошности другой средой типа вода, масло, шлаковые или неметаллические включения (чем плотнее среда заполнения несплошности, тем меньше коэффициент отражения от дефекта и меньше амплитуда сигнала).

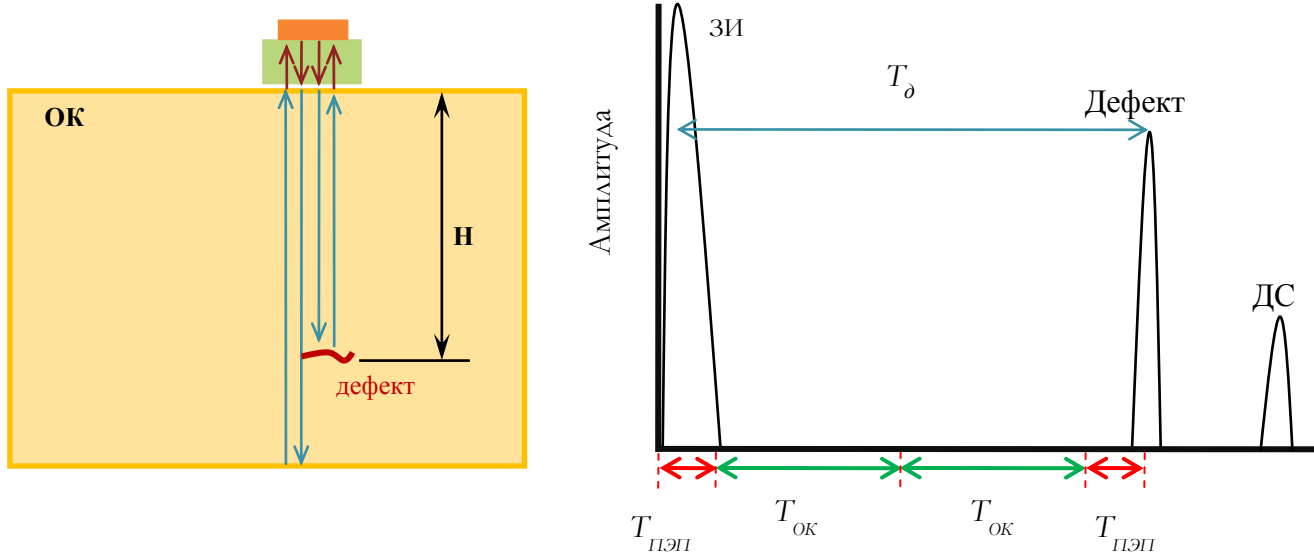
### 6.11 Определение координат до отражателя при контроле эхо-методом прямым ПЭП от времени пройденного волной в ОК

Прямым ПЭП определяется только глубина залегания отражателя.

Глубина залегания определяется по формуле:

$$H = \frac{1}{2}(t_d - 2t_n) \cdot C_l,$$

где  $t_d$  – время, пройденное волной от излучения до приема;  $2t_{\pi}$  – задержка в призме преобразователя;  $C_l$  – скорость продольной ультразвуковой волны (для стали равна 5900 м/с).



### 6.12 Параметры дефектоскопа, настраиваемые при контроле эхо-методом прямым ПЭП

В дефектоскопе должны быть установлены угол ввода, скорость ультразвуковых волн и задержка в призме преобразователя (время, пройденное волной в преобразователе при излучении и приеме, настраивается на стандартном образце).

### 6.13 Определение координат до отражателя при контроле эхо-методом наклонным ПЭП от времени пройденного волной в ОК

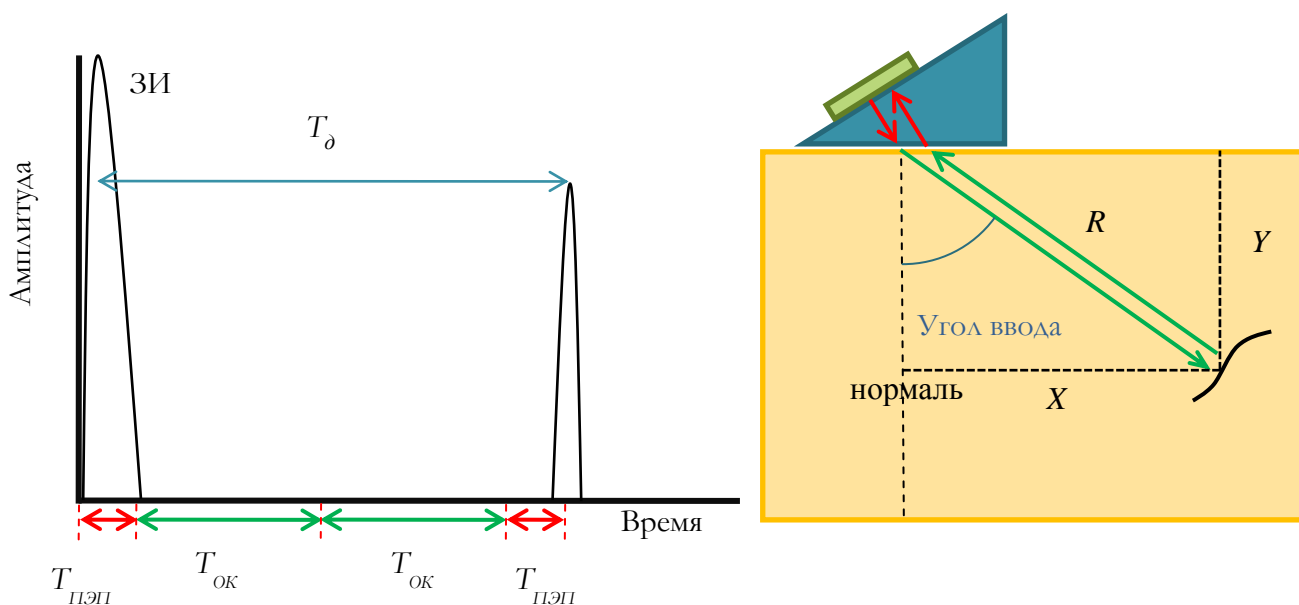
Наклонным ПЭП определяется глубина, дальность и расстояние по лучу.

Глубина залегания определяется по формуле:  $Y = \frac{1}{2}(t_d - 2t_{\pi}) \cdot C_l \cdot \cos \alpha$ .

Дальность от точки выхода до сечения, в котором находится дефект, определяется:  $X = \frac{1}{2}(t_d - 2t_{\pi}) \cdot C_l \cdot \sin \alpha$ .

Расстояние, пройденное лучом от преобразователя до дефекта (расстояние по лучу):  $R = \frac{1}{2}(t_d - 2t_{\pi}) \cdot C_l$ ,

где  $t_d$  – время, пройденное волной от излучения до приема;  $2t_{\pi}$  – задержка в призме преобразователя;  $C_l$  – скорость поперечной ультразвуковой волны (для стали равна 3250 м/с);  $\alpha$  – угол ввода ультразвуковых волн.



## 6.14 Параметры дефектоскопа, настраиваемые при контроле эхо-методом наклонным ПЭП

В дефектоскопе должны быть установлены: скорость ультразвуковых волн, угол ввода и задержка в призме преобразователя (угол ввода и задержка в призме ПЭП определяются на стандартном образце).

## 6.15 Определение коэффициента выявляемости (дефектности) при контроле эхо-методом

Коэффициент выявляемости (дефектности  $K_d$ ) – это отношение амплитуд эхо-импульсов дефекта и эталонного отражателя. Коэффициент выявляемости может выражаться как в безразмерных относительных единицах  $K_d = \frac{A_d}{A_{co}}$ , так и в децибелах  $K_d = N_d - N_{co}$ . В качестве эталонного часто используется ненаправленный отражатель – засверловка диаметром 6 мм в стандартном образце СО-2 или СО-3Р.

## 7 Условные размеры дефекта

### 7.1 Линейные условные размеры дефектов

Условная протяженность измеряется на объекте контроля при перемещении ПЭП параллельно дефекту; условная ширина измеряется на объекте контроля при перемещении ПЭП перпендикулярно дефекту; условная высота равна разности показания глубин залегания дефекта на дефектоскопе при перемещении ПЭП перпендикулярно дефекту.

## 7.2 Абсолютный способ измерения условных размеров дефекта

Условные размеры определяются при неизменной абсолютной чувствительности (чувствительности оценки) не зависимо от амплитуды сигнала от дефекта, пороговое значение чувствительности оценки указывается в НТД.

## 7.3 Относительный способ измерения условных размеров дефекта

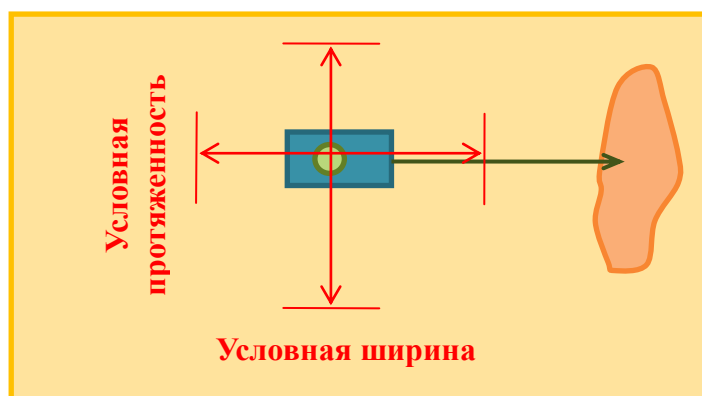
Условные размеры определяются при чувствительности дефектоскопа, которая на 6 (8, 10, 12...) дБ выше относительно максимальной амплитуды от дефекта. Максимум сигнала от дефекта доводят до середины экрана, затем увеличивают чувствительность дефектоскопа на 6 дБ и измеряют условные размеры дефекта.

## 7.4 Определение условной протяженности дефекта

Условная протяженность измеряется на объекте контроля при перемещении ПЭП параллельно дефекту и равна расстоянию между точками на объекте контроля, в которых амплитуда сигнала от дефекта уменьшилась до порогового уровня (обычно середина экрана).

## 7.5 Определение условной ширины дефекта

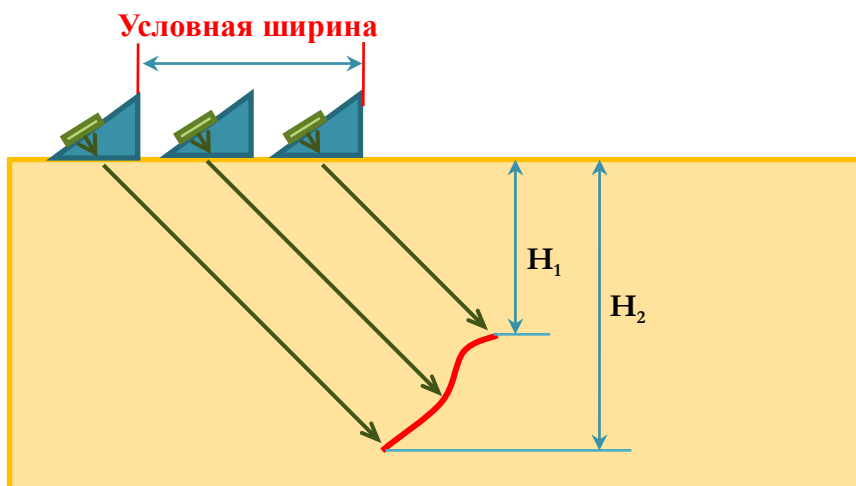
Условная ширина измеряется на объекте контроля при перемещении ПЭП перпендикулярно дефекту и равна расстоянию между точками на объекте контроля, в которых амплитуда сигнала от дефекта уменьшилась до порогового уровня (обычно середина экрана).



## 7.6 Определение условной высоты дефекта

Условная высота дефекта определяется одновременно при определении условной ширины при перемещении ПЭП перпендикулярно дефекту и равна разности показания глубины залегания дефекта при положениях ПЭП, в которых амплитуда сигнала от дефекта уменьшилась до порогового уровня (обычно середина экрана).

$$\Delta H = H_2 - H_1$$



### **7.7 Изменение условных размеров дефектов одинакового размера, залегающие на различной глубине**

При увеличении глубины залегания дефекта условные размеры, определенные относительным способом, всегда увеличиваются (из-за увеличения ширины диаграммы направленности), а абсолютным способом сначала увеличиваются (из-за увеличения ширины диаграммы направленности), затем уменьшаются (из-за уменьшения амплитуды сигнала от дефекта).

### **7.8 Изменение условных размеров ненаправленных (округлых) дефектов разного размера, залегающих на одной глубине, измеренных относительным и абсолютным способами**

При увеличении размеров ненаправленных отражателей залегающих на одной глубине условные размеры, определенные абсолютным способом, увеличиваются (из-за увеличения амплитуды сигнала от дефекта), а условные размеры, определенные относительным способом, не изменяются (т.к. амплитуда сигнала всегда устанавливается на 6 дБ выше относительно порога и у ненаправленных отражателей форма огибающей не зависит от размера отражателя).

### **7.9 Изменение условных размеров плоских отражателей разного размера, залегающих на одной глубине, измеренных относительным и абсолютным способами**

При увеличении размеров плоских отражателей, залегающих на одной глубине, условные размеры, определенные абсолютным и относительным способами, увеличиваются.



### **7.10 Изменение условных размеров дефекта при увеличении ширины диаграммы направленности**

Чем больше ширина диаграммы направленности ПЭП, тем больше условные размеры отражателя, т.к. луч дольше озвучивает дефект при перемещении ПЭП.

### **7.11 Изменение условных размеров дефекта при увеличении угла ввода ПЭП**

Чем больше угол ввода, тем шире диаграмма направленности (при условии, что прочие параметры не изменяются) и тем больше условные размеры дефекта.

### **7.12 Соотношение между условными и реальными размерами дефекта**

Условные размеры обычно больше реальных.

### **7.13 Условное расстояние между дефектами**

Это расстояние между центрами или ближайшими границами дефектов, определяется после измерения условных размеров дефекта.

## **8 Чувствительности дефектоскопа и контроля**

### **8.1 Браковочная чувствительность**

Браковочная чувствительность – это чувствительность дефектоскопа, при которой выполняют оценку пригодности изделия к эксплуатации по амплитудному критерию. Если амплитуда сигнала выше порогового уровня (обычно середины экрана) при установке браковочной чувствительности, то объект контроля бракуется.

### **8.2 Чувствительность фиксации**

Чувствительность фиксации – это чувствительность дефектоскопа, при которой выполняется поиск дефектов обычно на 6 и более дБ выше, чем браковочная чувствительность.

### **8.3 Чувствительность оценки**

Чувствительность оценки – это чувствительность дефектоскопа, при которой выполняются измерение условных размеров дефекта и оценка допустимости дефекта по условным размерам.

#### **8.4 Соотношение между браковочной чувствительностью и чувствительностями фиксации и оценки**

Чувствительность фиксации обычно больше на 6 и более дБ, чем браковочная чувствительность, чувствительность фиксации для определения условных размеров абсолютным способом обычно равна или больше чувствительности фиксации, чувствительность фиксации для определения условных размеров относительным способом не зависит от браковочной чувствительности или фиксации, а определяется только амплитудой сигнала от дефекта.

#### **8.5 Предельная чувствительность**

Предельная чувствительность – это чувствительность дефектоскопа (при данной настройке) еще обеспечивающая выявление идеального отражателя (диск) минимального размера на максимальной глубине с вероятностью 99 %, в материале с определенными акустическими свойствами при данной настройке дефектоскопа.

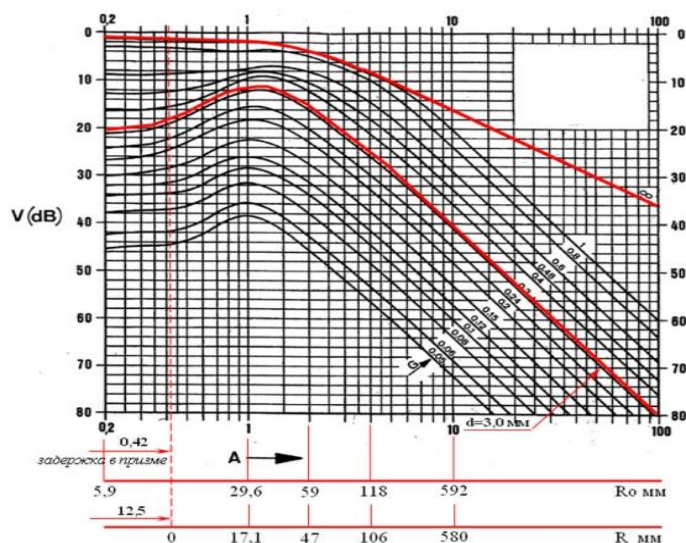
#### **8.6 Образцы, применяемые для настройки на предельную чувствительность**

Для настройки предельной чувствительности используются стандартные или настроечные образцы с плоскодонными засверловками, перпендикулярные акустической оси преобразователя. Обычно образцы имеют три плоскодонных засверловки (на минимальной, средней и максимальной глубине), либо две засверловки (на минимальной и максимальной глубине), при настройке на предельную чувствительность настраивается временная регулировка чувствительность (ВРЧ). При контроле сварных соединений вместо плоскодонных засверловок применяют зарубки определенного размера на глубинах, соответствующих толщине сварного соединения и двойной толщине.

#### **8.7 Диаграмма, применяемая для настройки дефектоскопа на предельную чувствительность**

Для настройки на предельную чувствительность может применяться АД диаграмма (А – амплитуда, Р – расстояние, Д – диаметр плоскодонной засверловки). АД диаграмма строится для преобразователя с определенными параметрами и углом ввода, а также плоскодонными засверловками данного диаметра и может учитывать изменение затухания ультразвуковых волн в материале. При наличии АД диаграм-

мы чувствительность дефектоскопа можно настроить по одной плоскодонной засверловке и значениям амплитуды, и формы ВРЧ, полученным по АРД диаграмме.



## 8.8 Условная чувствительность

Условная чувствительность – это чувствительность, настраиваемая на государственном стандартном образце СО-2 или СО-3Р по засверловке диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Условная чувствительность равна разности чувствительности дефектоскопа при выявлении дефекта и чувствительности на стандартном образце полученной от данной засверловки.

Для настройки браковочной чувствительности определяют амплитуду сигнала от засверловки диаметром 6 мм на глубине 44 мм на СО-2 или СО-3Р и добавляют условную чувствительность  $N_{\text{усл}}$  и коэффициент, учитывающий потерю ультразвуковых волн на шероховатой поверхности объекта контроля  $\Delta N$  (если шероховатость стандартного образца и объекта контроля различаются).

$$N_{\text{бр}} = N_{\text{СО-3Р}} + N_{\text{усл}} + \Delta N.$$

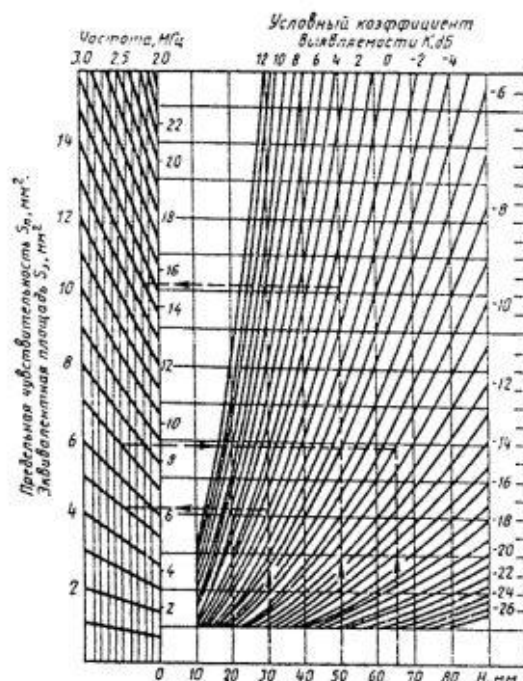
## 8.9 Образцы, применяемые для настройки на условную чувствительность

Для настройки на условную чувствительность могут применяться стандартные образцы СО-2 или СО-3Р, чувствительность настраивается по засверловке диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Настройка по засверловке диаметром 6 мм на глубине 15 мм или по амплитуде донного сигнала не будет считаться настройкой на условную чувствительность, а соответствует настройке на эквивалентную чувствительность.

## 8.10 Диаграмма, применяемая для настройки на условную чувствительность

Для настройки на условную чувствительность может применяться SKH диаграмма ( $S$  – эквивалентная или предельная площадь отражателя;  $K$  – условная чувствительность;  $H$  – глубина залегания дефекта). SKH диаграмма строится для преобразователя с определенной частотой, углом ввода, для материала с определенными акустическими свойствами. SKH диаграмма не может учитывать изменения затухания ультразвуковых волн в материале.

Пример построения SKH-диаграммы и определения предельной чувствительности  $S_p$  и эквивалентной площади  $S_e$



## 8.11 Эквивалентная чувствительность

Эквивалентная чувствительность – это чувствительность, настраиваемая по образцу с определенными акустическими свойствами, имеющий эквивалентный отражатель заданных размеров на заданной глубине.

## 8.12 Образцы, применяемые для настройки на эквивалентную чувствительность

Для настройки на эквивалентную чувствительность могут использоваться настроечные образцы с засверловками или пропилами, обычно выполненные из контролируемого объекта контроля; стандартные образцы, например СО-2 или СО-3Р при настройке по засверловке диаметром 6 мм на глубине 15 мм или по амплиту-

де донного сигнала; опорные сигналы от конструктивных отражателей на контролируемом объекте контроля.

Для настройки браковочной чувствительности определяют амплитуду сигнала от эквивалентного отражателя и добавляют эквивалентную чувствительность  $N_{\text{эк}}$ .

$$N_{\text{бр}} = N_{\text{НО}} + N_{\text{эк}}$$

### **8.13 Систематическая ошибка при определении координат дефекта**

Систематическая ошибка – это постоянная или изменяющаяся по определенному закону ошибка определения координат дефекта.

Систематическая ошибка связана с неправильно настроенными в дефектоскопе параметрами контроля: задержкой УЗВ в призме преобразователя, скорости ультразвуковых волн или углом ввода ПЭП. Систематическую ошибку можно измерить и устранить путем повторной настройкой дефектоскопа на стандартных образцах.

### **8.14 Случайная ошибка при определении координат дефекта**

Случайная ошибка определения координат дефекта – это случайным образом проявляющаяся ошибка, которая связана с погрешностью дефектоскопа, оператора, выполняющего контроль (неправильно определен максимум амплитуды сигнала), влиянием внешних факторов (например, температуры), шероховатостью объекта контроля, затуханием УЗВ, ориентацией дефекта и т.п.

## **9 Разрешающая способность**

### **9.1 Разрешающая способность аппаратуры**

Разрешающая способность аппаратуры – это минимальное расстояние между двумя сигналами в мкс на экране дефектоскопа еще различимых между собой на уровне 6 дБ.

### **9.2 Разрешающая способность по дальности**

Разрешающая способность по дальности – это минимальное расстояние между двумя дефектами, расположенных вдоль акустической оси, сигналы от которых на экране дефектоскопа еще различимы между собой на уровне 6 дБ.

### **9.3 Разрешающая способность по фронту**

Разрешающая способность по фронту – это минимальное расстояние между двумя дефектами, расположенных параллельно фронту ультразвуковой волны, сигналы от которых на экране дефектоскопа еще различимы между собой на уровне 6 дБ.