

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

Оглавление

- Термины и определения
- История
- Физические основы
 - Колебания и волны, ультразвуковые волны, акустические свойства сред, явления на границе раздела двух сред, нормальное падение, коэффициенты отражения и прозрачности, падение под углом, закон Снеллиуса, первый критический угол, второй критический угол, третий критический угол, дифракция, ультразвуковое поле, ближняя зона, дальняя зона, акустический тракт, АРД-диаграмма, возбуждение и прием ультразвуковых волн
- Средства ультразвукового контроля
 - Дефектоскоп аналогового типа, дефектоскоп цифрового типа, типы разверток, толщиномер, преобразователи, стандартные образцы, фазированные антенные решетки
- Основные параметры
- Методы ультразвукового контроля
- Проведение ультразвукового контроля
- Технология ультразвукового контроля
- Техника безопасности
- Используемые сокращения

- **Входной контроль**
Контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику, и предназначенный для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции
- **Операционный контроль**
Контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции
- **Приемочный контроль**
Контроль продукции, по результатам которого принимается решение о ее пригодности к поставкам и (или) использованию

- **Эксплуатационный контроль**

Контроль, осуществляемый на стадии эксплуатации

Входной

Профилактический (необязательный)

Текущий (обязательный)

По характеру воздействия на технологический процесс:

Активный (корректировка изготовления продукции)

Пассивный

По полноте охвата продукции:

Сплошной (для продукции ответственного назначения)

Выборочный (могут применяться разрушающие виды испытаний)

- **Дефект**
каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям (ГОСТ 15467-79)
- **Несплошность**
нарушение однородности материала, вызывающее скачкообразное изменение одной или нескольких его физических характеристик (плотности, магнитной проницаемости, скорости звука, волнового сопротивления и проч.)

**В ультразвуковом контроле дефектом является
несплошность, не удовлетворяющая
требованиям ТУ**

- **Достоверность контроля**
характеристика (качественная или количественная) контроля, показывающая на основе предварительно установленных критериев близость к ситуации, исключающей как перебраковку, так и недобраковку
- **Перебраковка**
отсутствие дефектов хотя бы в одном из забракованных по результатам контроля объектов
- **Недобраковка**
наличие дефекта хотя бы в одном из объектов, признанных годными по результатам контроля

- **Дефектное изделие**
Изделие, имеющее хотя бы один дефект
- **Критический дефект**
дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недопустимо
- **Значительный дефект**
дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим
- **Малозначительный дефект**
дефект, который существенно не влияет на использование продукции по назначению и ее долговечность

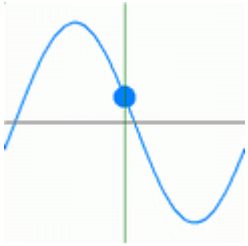
История развития

1943 г. -
выпущены
первые эхо-
импульсные
дефектоскопы
фирмами
«Сперри
продактс инк.»
(Денбери, США)
и «Кельвин энд
Хьюз лтд.»
(Лондон)



1949 г. - В Германии
Josef и Herbert
Krautkramer
выпустили эхо-
импульсный
дефектоскоп





Колебания и волны

Колебания

движения вокруг некоторого среднего положения, обладающее повторяемостью во времени

Волны

колебательные движения, распространяющиеся в пространстве: колебания одной точки среды передаются соседней и так далее

Упругость

свойство точек среды возвращаться к первоначальному состоянию после прекращения воздействия силы

Колебания

Частота

количество периодов (циклов) колебаний в единицу времени (обычно секунду)

Длина волны

минимальное расстояние между двумя точками, колеблющимися в одной фазе

$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f} = \frac{6000 \text{ м/с}}{6 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1 \text{ мм}$$

Амплитуда

наибольшее отклонение от положения равновесия

$$\left\langle \frac{A'}{A_0} \right\rangle = 20 \cdot \lg \left(\frac{A'}{A_0} \right)$$

в N раз	2	3,3	10	20	100
дБ	6	10	20	26	40

Колебательный процесс характеризуется двумя основными величинами - частотой колебаний и амплитудой колебаний.

Частота - количество периодов (циклов) колебаний в единицу времени (обычно секунду). Одно колебание в секунду – 1 Гц. При УЗК обычно частоту измеряют в МГц. Время одного колебания называют **периодом**. Его измеряют в секундах или микросекундах. Колебания от точки к точке среды передаются с определенной скоростью – **скоростью** распространения звука.

Длина волны - минимальное расстояние между двумя точками, колеблющимися в одной фазе. Скорость звука во многих металлах около 6000 м/с. При частоте 6 МГц длина волны равна 1 мм. При ультразвуковом контроле металлов обычно используют волны длиной от 0,06 до 12 мм.

Амплитуда - наибольшее отклонение от положения равновесия. В ультразвуковом контроле обычно измеряют ослабление амплитуды A' относительно возбужденных в объекте контроля колебаний A_0 . Для этого применяют логарифмические единицы – децибелы (дБ). Т.к. $A' < A_0$, то децибелы будут отрицательными, однако в ультразвуковой дефектоскопии знак «-» принято опускать. В акустике рассматриваются изотропные среды.

Изотропия - независимость физических свойств среды от направления в ней. Среда, в которых свойства зависят от направления, называют **анизотропными**.

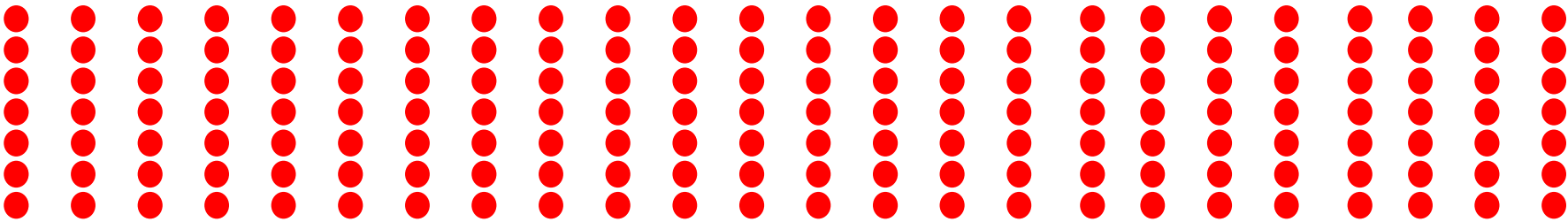
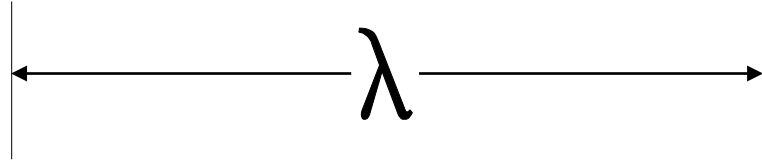
Ультразвуковые волны

- Ультразвуковая волна** процесс распространения упругих колебаний ультразвуковой частоты в материальной среде
- Луч** направление, в котором распространяется максимум энергии волнового процесса
- Фронт** совокупность точек, колеблющихся в одной фазе, до которых в заданный момент дошел волновой процесс

Диапазон частот упругих колебаний

Инфразвук	< 16 Гц
Звук	16 Гц ...20 кГц
Ультразвук	20 кГц ... 100 МГц
Гиперзвук	> 100 МГц

Продольная волна

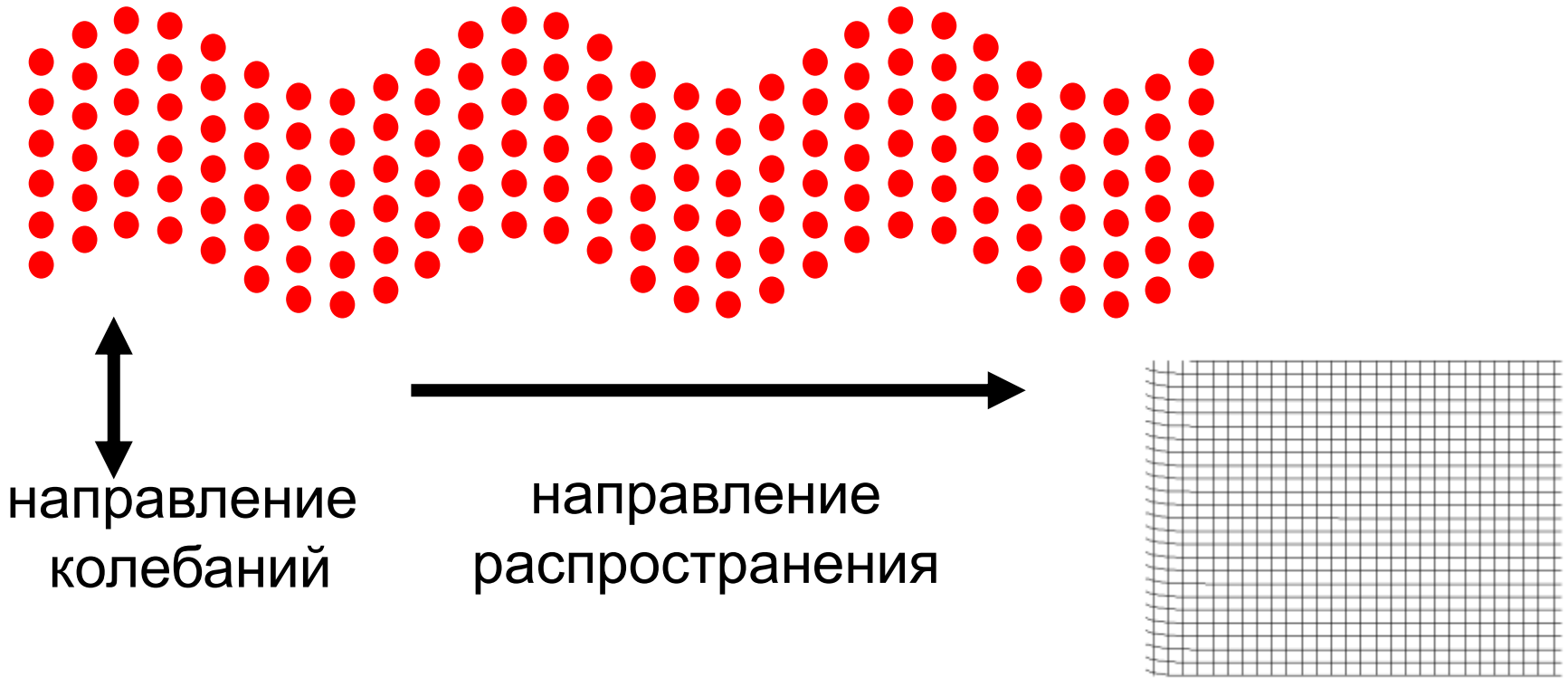


Колебательное движение отдельных частиц происходит в том же направлении, в котором распространяется волна

- Твердые тела
- Жидкости
- Газы

Поперечная волна

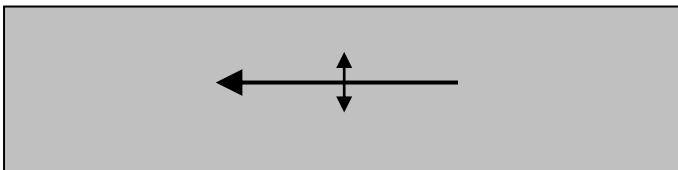
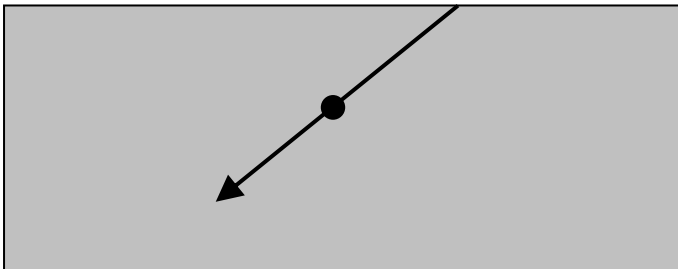
длина волны
 λ



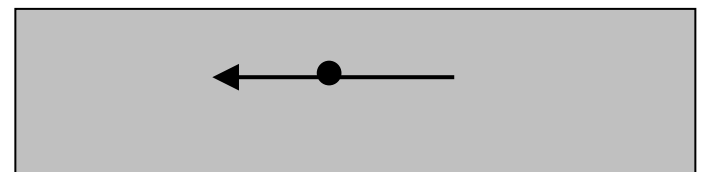
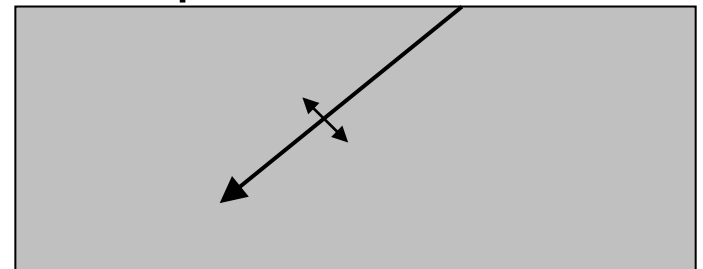
Объемные волны

- Продольные
- Поперечные

Поперечные
горизонтально
поляризованные SH



Поперечные
вертикально
поляризованные SV



Волны вдоль поверхности

Поверхностная волна (Рэлея)

- комбинация продольных и поперечных волн
- распространяется вдоль свободной границы твердого тела
- частицы совершают колебания по эллипсам
- волна распространяется на большие расстояния
- быстро затухает с глубиной

Головная волна

- скорость практически равна скорости продольной волны
- при распространении вдоль поверхности в каждой точке порождает поперечную волну под углом к нормали
- волна быстро ослабляется

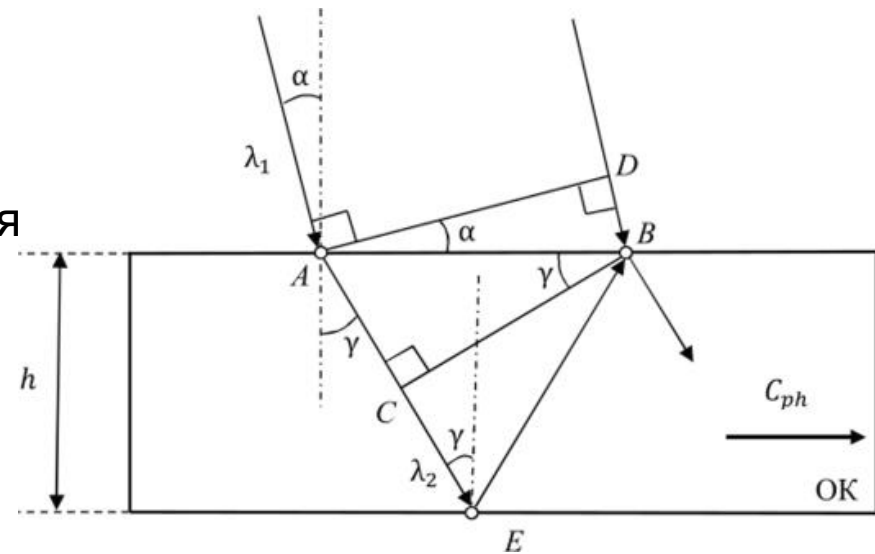
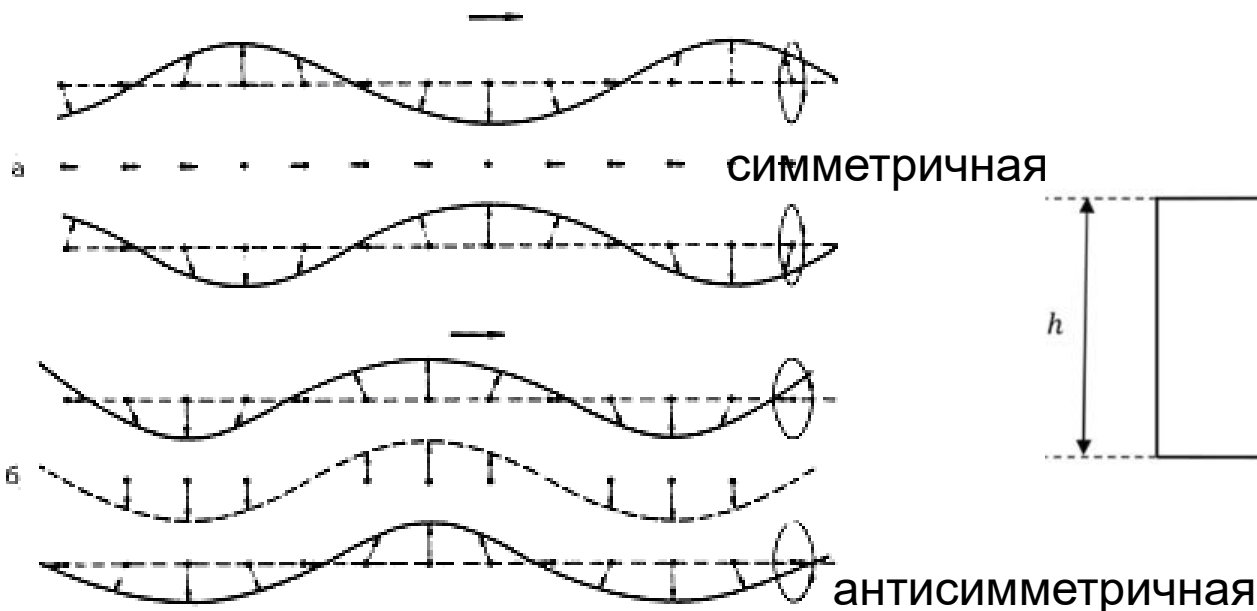
Поверхностная волна (Рэлея)

Локализована в тонком поверхностном слое толщиной в одну – полторы длины волны и следует изгибам поверхности.



Волны в ограниченных твердых телах

При распространении волны в плоских телах с постоянной толщиной (листах, тонких пластинках, проволоке) могут возникать нормальные волны или волны Лэмба. Частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листа, пластины оболочки. Обычно возникают и распространяются независимо две нормальные волны симметричная (волна сжатия или растяжения) и антисимметричная (волна изгиба).



Волны в ограниченных твердых телах

- Волны в пластине (волны Лэмба)
- Волны в стержнях (волны Похгаммера)

Скорость распространения зависит от:

- частоты (явление дисперсии скорости)
- упругих свойств материала
- поперечных размеров пластины или стержня

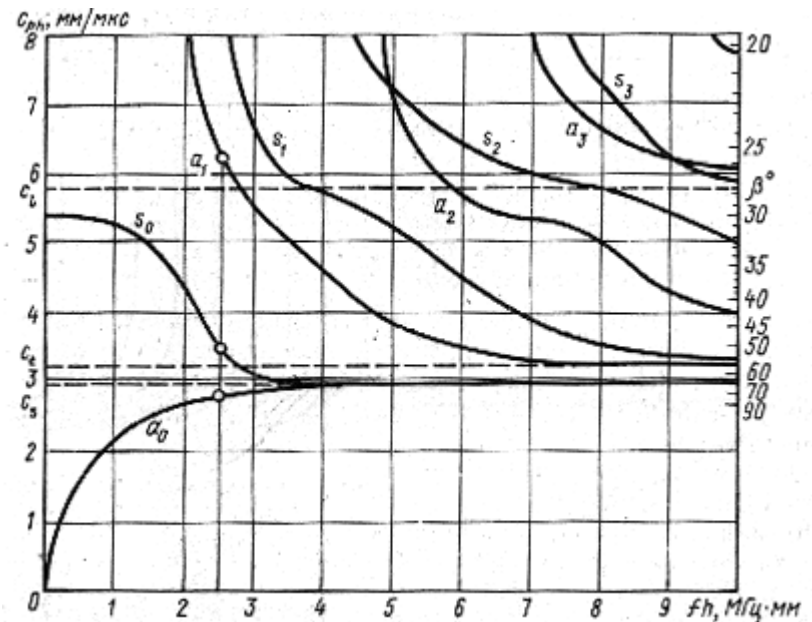
Характерны две скорости распространения:

- фазовая
- групповая

Волны в ограниченных твердых телах

- **Фазовая скорость** скорость изменения фазы в направлении распространения
- **Групповая скорость** скорость распространения энергии при передаче импульса

Фазовую и групповую скорости определяют по дисперсионным кривым:



Типы волн (моды)

- **Бегущая волна**

Фронт перемещается с постоянной скоростью в однородной среде (переносит энергию)

- **Стоячая волна**

Две одинаковые бегущие волны, распространяющиеся в противоположных направлениях

- **Объемные волны**

Продольные и поперечные в безграничном твердом теле

- **Поверхностные (Рэлея, головная)**

- **Нормальные волны (Лэмба, Похгаммера)**

Упругие постоянные

- **Модуль нормальной упругости (модуль Юнга) E**

Отношение механического напряжения при растяжении-сжатии σ к вызываемой деформации ε

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- **Модуль сдвига G**

Отношение механического напряжения сдвига τ к вызываемой им деформации γ

$$\tau = G \cdot \gamma$$

- **Коэффициент Пуассона ν**

Отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной (в металлах коэффициент Пуассона 0,3)

$$\nu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1$$

Скорости ультразвуковых волн

Среда	Тип волны	Скорость	Применение
Безграничное твердое тело	продольная c_l	$c_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}}$	Все виды контроля
	поперечная $c_t \approx 0,55 \cdot c_l$	$c_t = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}}$	Дефектоскопия сварных соединений
Поверх- ность тела	Рэлея $c_s \approx 0,93 \cdot c_t \approx 0,51 \cdot c_l$	$c_s = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot c_t$	Контроль на поверхности
	Головная c_l		Контроль под поверхностью

Акустические свойства сред

- Скорость распространения волны
- Волновое сопротивление (импеданс)
- Коэффициент затухания

- Скорость распространения волны**

Скорости определяются физическими свойствами среды. Т.к. величины многих упругих параметров могут изменяться с изменением температуры, то и скорость звука в некоторой степени зависит от температуры среды, в которой он распространяется. Следовательно, скорость распространения акустических волн зависит от температуры. С повышением температуры: в твердых телах и жидкостях кроме воды скорость уменьшается, в газах и воде увеличивается.

•Волновое сопротивление (импеданс)

Распространение продольной волны вызывает образование областей повышенного и пониженного давления. Речь идет об избыточном давлении, т.е. о таком, которое возникает дополнительно к существующему в невозмущенной среде. Давление определяется по формуле:

$$p = \rho \cdot c \cdot v \quad z = \rho \cdot c \quad p = z \cdot v$$

где:

p – давление;

ρ – плотность;

c – скорость распространения волны;

v – колебательная скорость частиц;

z - акустическое сопротивление среды (акустический импеданс).

Если акустическое сопротивление имеет большую величину, то среда называется «жесткой»: скорости и смещения малы даже при высоких давлениях, если импеданс невелик, то среда называется «мягкой»: даже при малых давлениях достигаются значительные колебательные скорости и давления. Давление в звуковой волне прямо пропорционально акустическому сопротивлению среды и колебательной скорости движения частиц в волне.

•Затухание

Явление уменьшения амплитуды колебаний частиц в звуковой волне, вызванное процессами:

- рассеяния
- поглощения

Коэффициент затухания δ

показывает, на сколько уменьшается амплитуда УЗ колебаний под влиянием затухания при прохождении единицы длины пути

Распространяющуюся в пространстве волну можно записать:

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot R}$$

где:

A – амплитуда сигнала, прошедшего расстояние R ;

A_0 – амплитуда излученного сигнала;

R – расстояние, пройденное волной;

δ – коэффициент затухания среды

Рассеяние

•**Рассеяние** связано с тем, что среда не является строго гомогенной. Она содержит кристаллы, на границах которых акустическое сопротивление меняется, т.к. кристаллы или отдельные составляющие имеют различную плотность или скорость. Для одних материалов это связано с тем, что он представляет сплав зерен различных компонентов, для других – с наличием пор или инородных включений, для третьих – с различной ориентацией анизотропных кристаллов. Влияние на величину коэффициента рассеяний δ в металлах оказывает соотношение средней величины зерна D и длины волны λ . Для дефектоскопии применяются частоты (0,5-10 МГц), чтобы $\lambda = (10-15) D$. Ультразвук слабо рассеивается и, как правило, не возникает помех, связанных с рассеянием на кристаллах.

•Вторая часть затухания – **поглощение**, прямое преобразование звуковой энергии в тепловую. Понятно, что поглощение будет тем больше, чем быстрее будут совершаться колебания, т.е. чем выше частота. Поглощение возрастает примерно пропорционально увеличению частоты.

Ослабление волн

- Расхождение лучей (дифракционное расхождение)
- Затухание волн в среде

Распространяющуюся в пространстве волну можно записать:

где:

R – расстояние, пройденное волной;

δ – коэффициент затухания среды;

w – круговая частота;

k – волновое число;

b – показатель, зависящий от формы фронта волны

Уменьшение амплитуды волны под действием затухания пропорционально:

где:

$e=2,7183\dots$ – число Непера

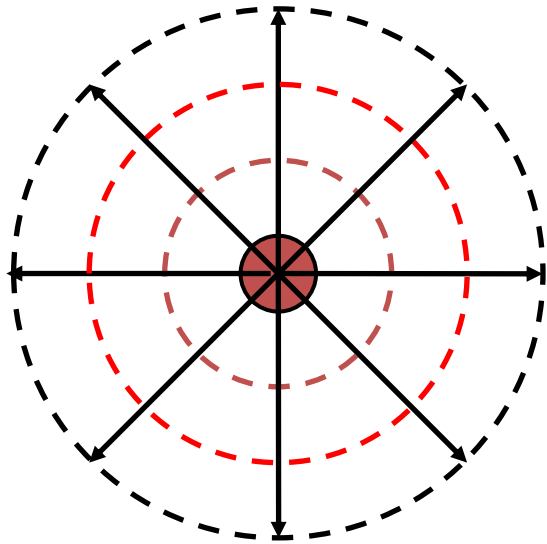
$$a = \frac{A}{R^b} \cdot e^{-\delta \cdot R} \cdot e^{j(w \cdot t - k \cdot R)}$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$k = \frac{w}{C} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$e^{-\delta \cdot R}$$

Дифракционное расхождение

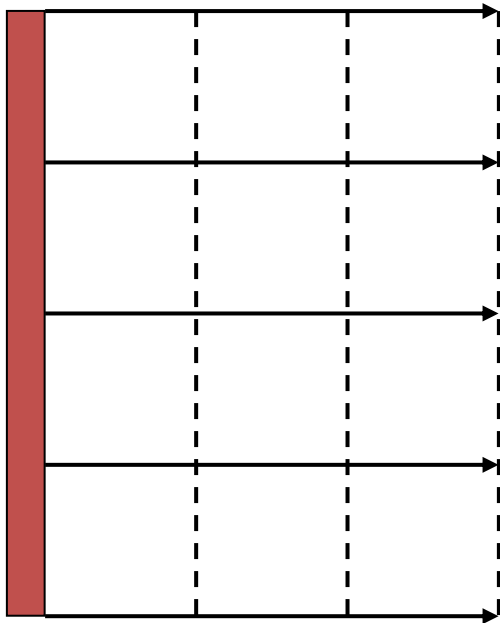


В **сферической** волне, излучаемой во все стороны сферическим источником, расхождение лучей происходит в двух плоскостях, поэтому ослабление с увеличением расстояния идет наиболее быстро. Для сферической волны фронты – сферы.

С увеличением расстояния R амплитуда уменьшается пропорционально

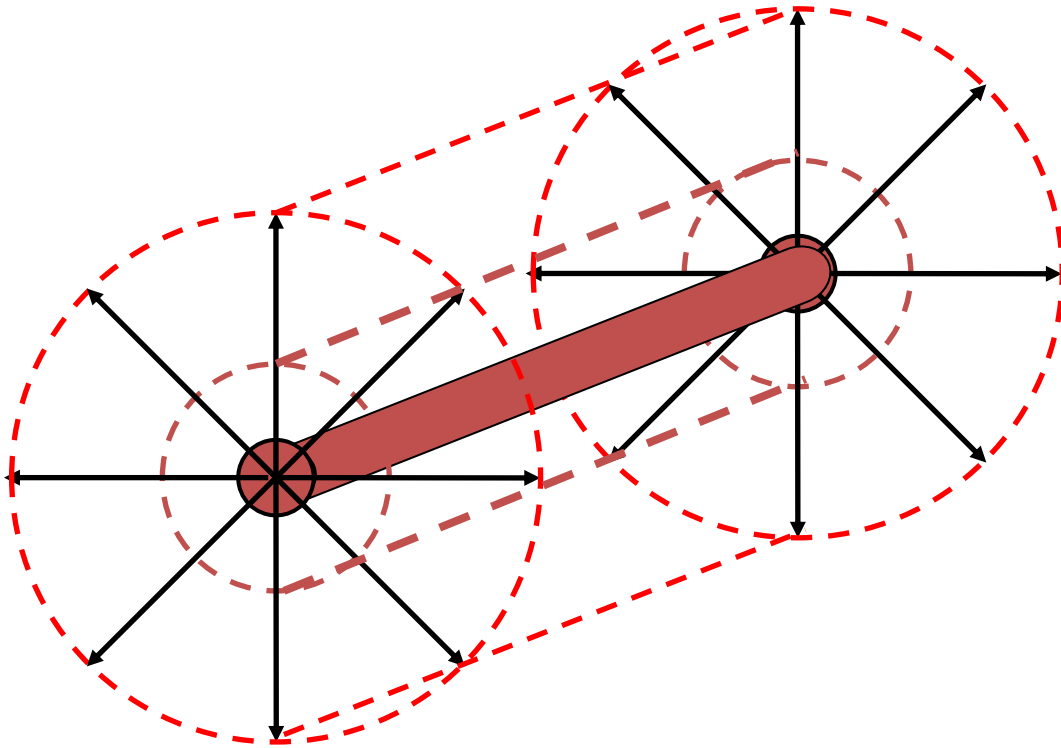
$$\frac{1}{R}$$

Дифракционное расхождение



В **плоской** волне фронты – плоскости, лучи не расходятся. Волна ослабевает только под действием затухания.

Дифракционное расхождение



В цилиндрической волне расхождение происходит в одной плоскости (перпендикулярной к оси стержня), амплитуда ослабевает медленней с расстоянием, чем амплитуда сферической. Пропорционально $\frac{1}{\sqrt{R}}$

Явления на границе раздела двух сред

Условия:

- падающая УЗ волна плоская;
- среды обе полубесконечные;
- граница раздела гладкая (т.е. нет рассеяния, связанного с шероховатостью поверхности)

•Отражение

изменение направления УЗ волны на границе раздела, при котором волна не переходит в другую среду

•Преломление

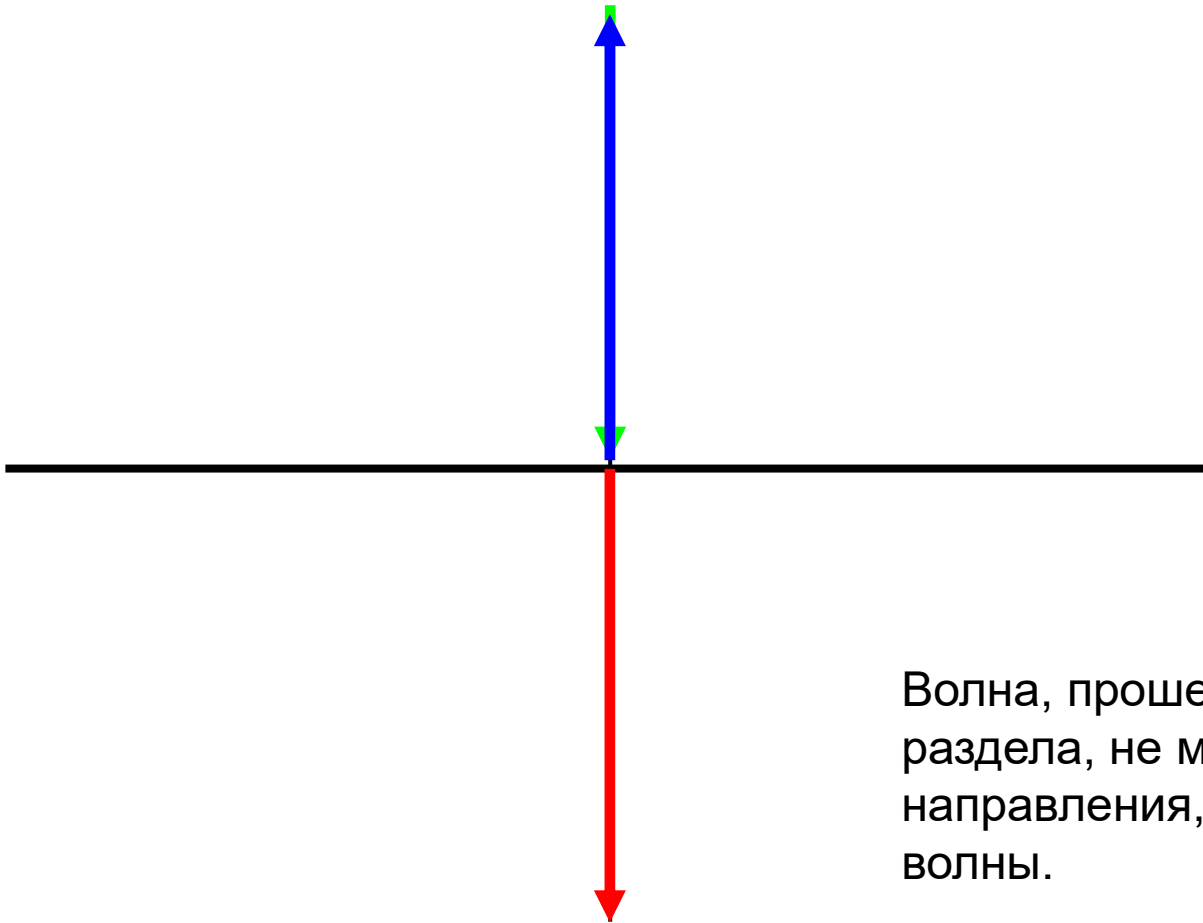
изменение направления УЗ волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду

•Трансформация

преобразование волн одного типа в волны другого типа, происходящее на границе раздела двух сред

Нормальное падение

Волны в акустике отсчитываются от нормали (перпендикуляра) к поверхности раздела двух сред, проходящей через точку падения.



Волна, прошедшая через границу раздела, не меняет своего направления, не меняется также тип волны.

Энергетические соотношения при нормальном падении (коэффициенты отражения и прозрачности)

При падении упругих волн на границу раздела двух сред с разными акустическими свойствами волны частично проходят во вторую среду, а частично отражаются.

Коэффициент отражения

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

Коэффициент прозрачности

$$D = \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{пад}}} = \frac{2 \cdot z_2}{z_2 + z_1}$$

Коэффициент отражения по интенсивности

$$R = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$$

Коэффициент прозрачности по интенсивности

$$D = \frac{4 \cdot z_1 \cdot z_2}{(z_2 + z_1)^2}$$

Акустическим (волновым) сопротивлением (АС) газообразной, жидкой или твердой среды называют отношение звукового давления p в бегущей плоской волне к колебательной скорости частиц среды v . При отсутствии дисперсии скорости звука АС не зависит от формы волны и выражается формулой:

$$R_{\text{ac}} = p/v = \rho c$$

Чем больше отличаются акустические сопротивления сред, тем большая часть энергии УЗ волны отразится от границы раздела двух сред. Этим условием определяется как возможность, так и эффективность выявления нарушений сплошности материалов. Для получения заметного отражения достаточно, чтобы размеры несплошности были соразмеримы с длиной волны.

При малом раскрытии несплошности доля отраженной от нее энергии определяется также величиной раскрытия в направлении распространения волны.

Если волны проходят из одной протяженной твердой среды в другую через зазор, заполненный воздухом, то прохождение очень плохое, т.к. волновое сопротивление газа в тысячи раз меньше, чем твердых тел.

С одной стороны это затрудняет передачу ультразвуковой волны от преобразователя в объект контроля. Для передачи ультразвуковых колебаний от преобразователя в объект контроля зазор между ними заполняют жидкостью – контактной средой. Если контактная жидкость полностью заполняет зазор и слой ее тонкий (тоньше четверти длины волны), то прохождение вполне удовлетворительное.

Граница сред, разделенных тонким слоем

Если волновое сопротивление слоя z меньше (или больше), чем обеих сред z_1 и z_2 , то коэффициент отражения R больше или равен R в отсутствии слоя.

Однако прохождение улучшается, если z лежит в интервале между z_1 и z_2 . Это явление называется **просветлением границы**.

Максимальная прозрачность достигается при условиях:

$$h = \frac{\lambda}{4} \quad z = \sqrt{z_1 \cdot z_2}$$

z_1, z_2 - волновое сопротивление 1-ой и 2-ой среды;

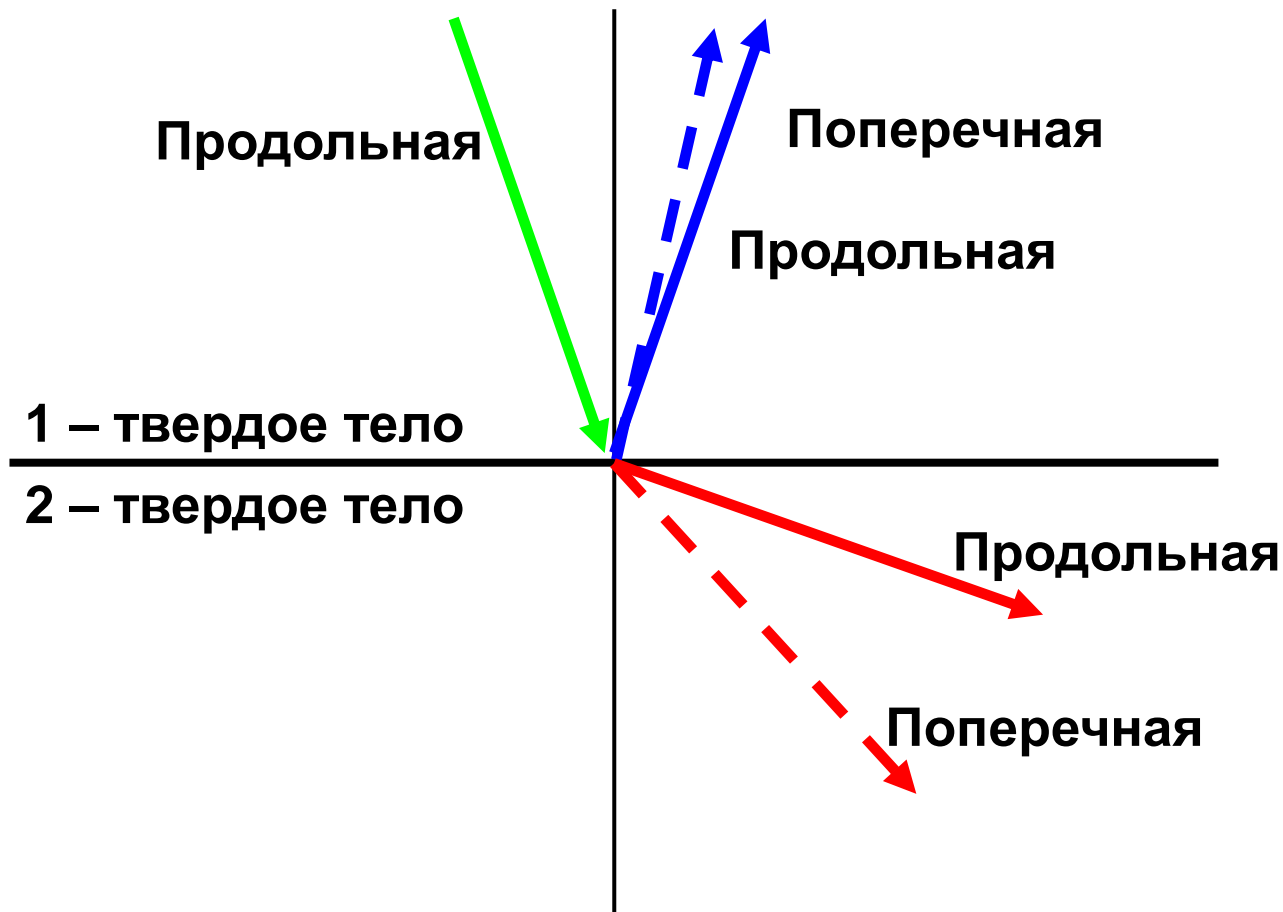
z - волновое сопротивление слоя;

λ - длина волны в слое

С увеличением толщины слоя h амплитуда прошедших и отраженных волн имеет максимумы и минимумы.

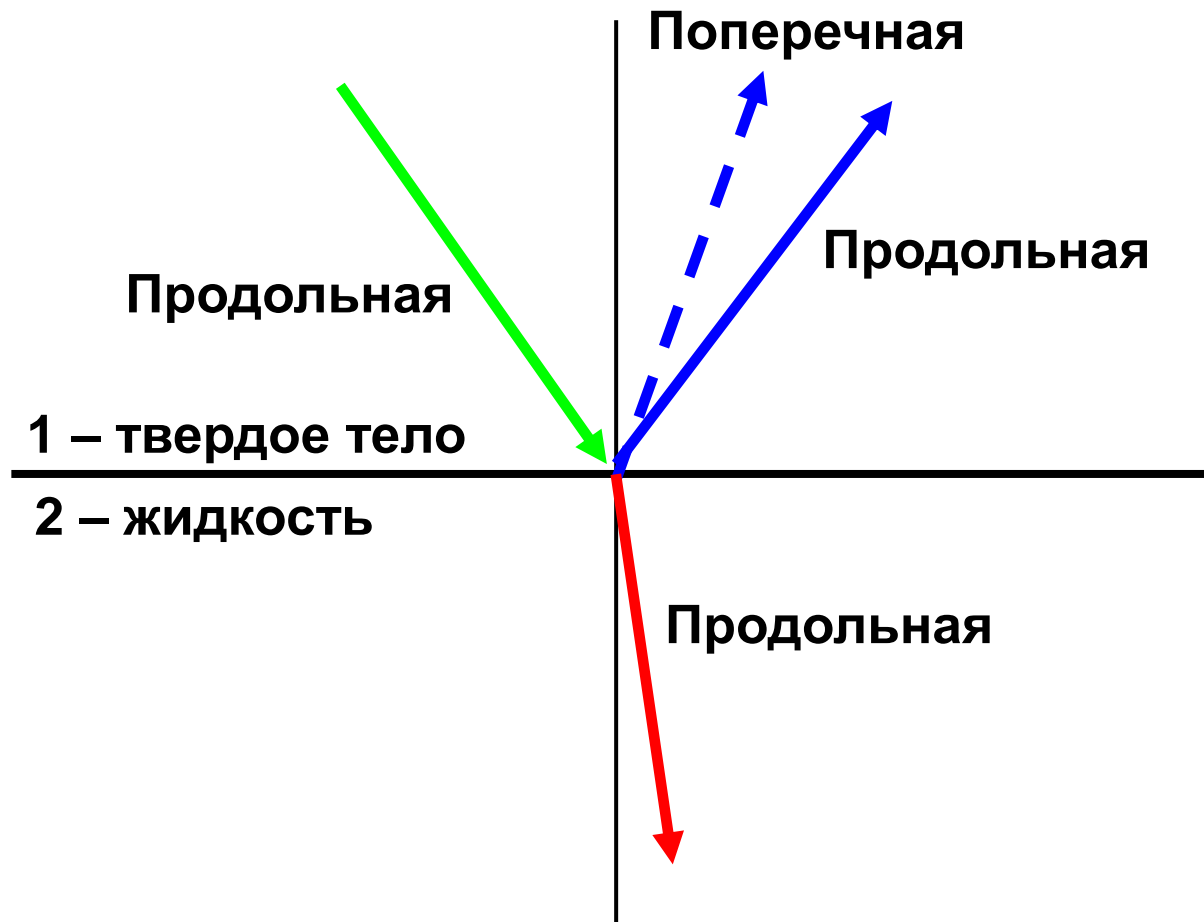
Падение под углом

Если нижняя или верхняя среды твердое тело, то в них при падении упругой волны возникает сразу две волны – продольная и поперечная.



Падение под углом

Если какая-либо среда жидкость или газ, то поперечные волны в ней отсутствуют.



Закон Снеллиуса (синусов)

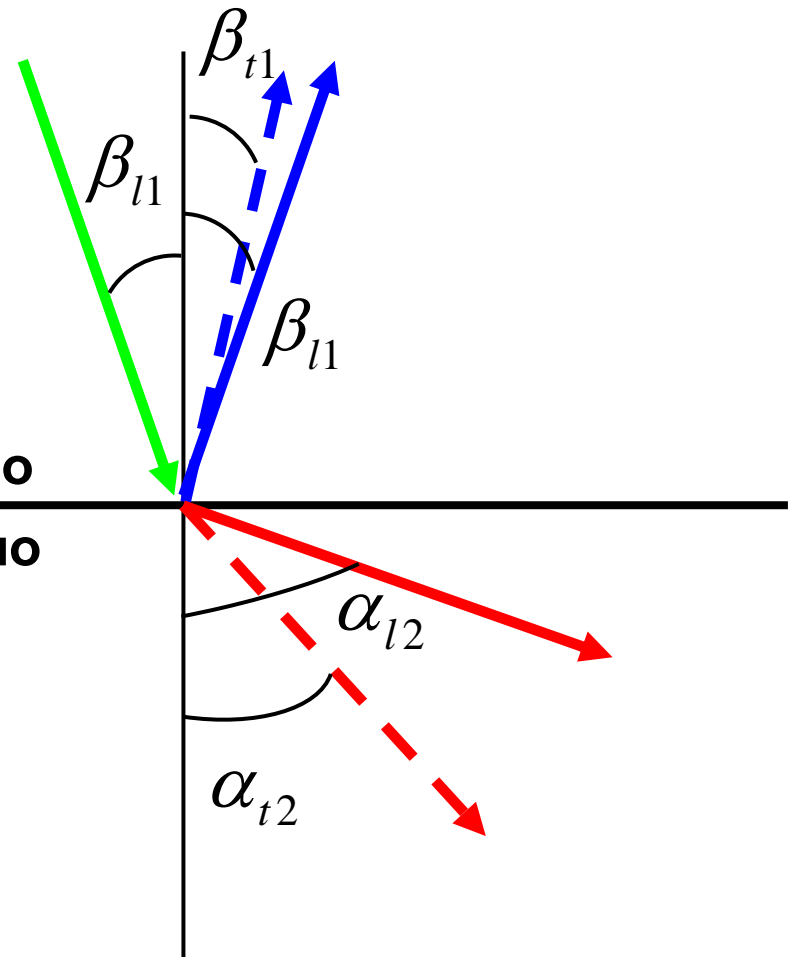
Направление отраженных и преломленных, продольных и поперечных волн определяется законом синусов (законом Снеллиуса).

Для всех волн отношение синуса угла (между направлением волны и нормалью к поверхности раздела) к скорости волны будет постоянной величиной.

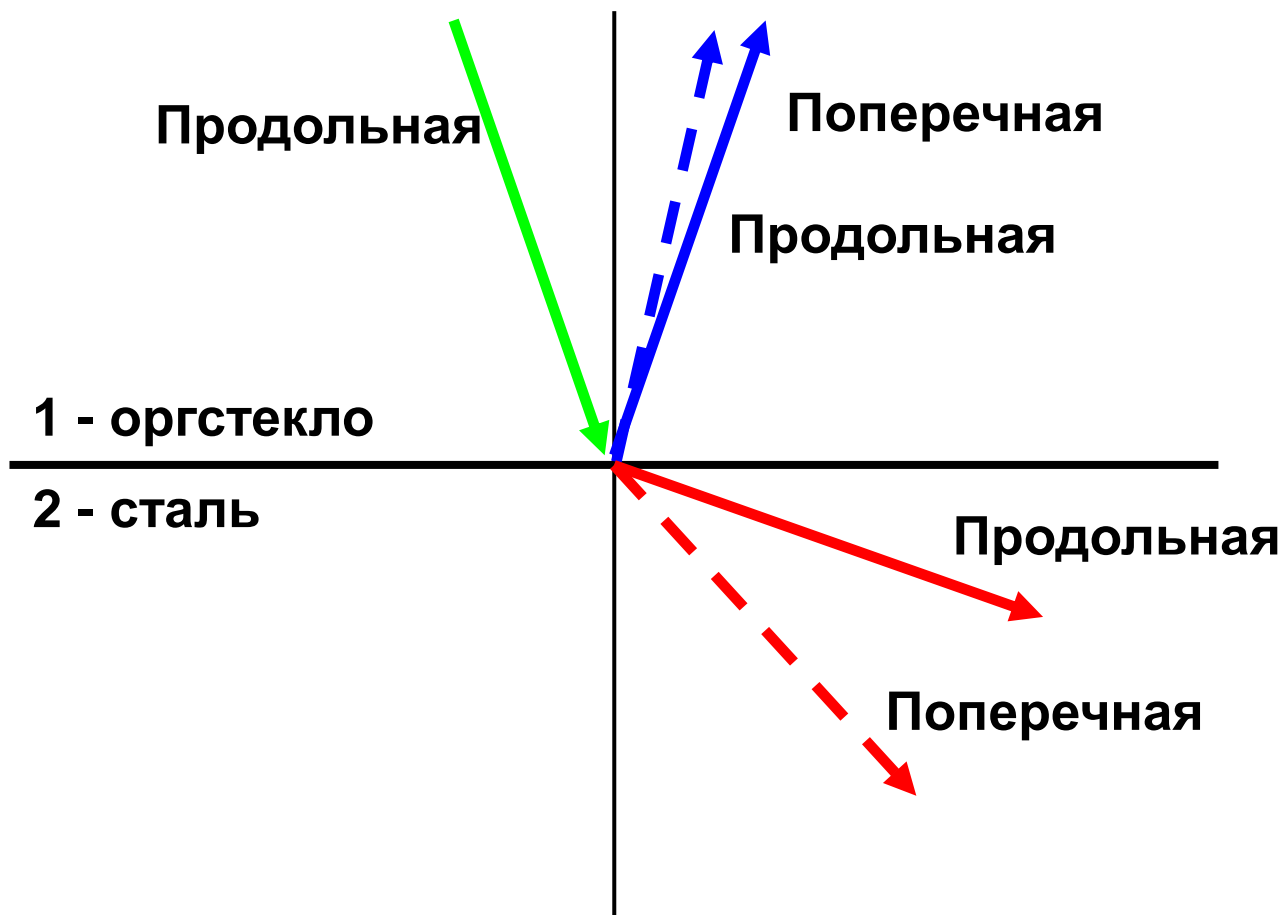
1 – твердое тело

2 – твердое тело

$$\frac{\sin \beta_{l1}}{C_{l1}} = \frac{\sin \beta_{t1}}{C_{t1}} = \frac{\sin \alpha_{l2}}{C_{l2}} = \frac{\sin \alpha_{t2}}{C_{t2}}$$



В ультразвуковом контроле часто встречается случай, когда падает продольная волна (из оргстекла), а в результате преломления и трансформации во второй среде (в стали) возникают продольная и поперечная волны, причем скорости обеих волн больше, чем скорость падающей волны. Возникают также отраженные волны: продольная и поперечная.



Первый критический угол

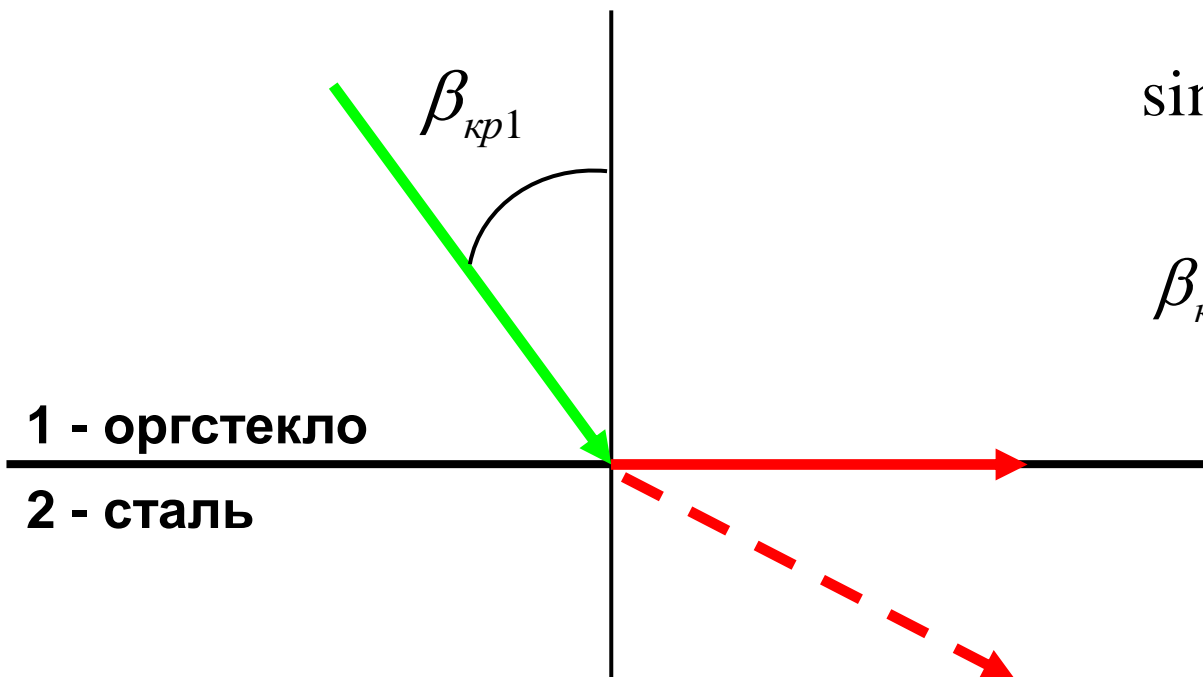
Рассмотрим частные случаи падения волн на границу раздела двух сред. Если увеличивать угол падения продольной волны, то при некотором его значении угол преломления для продольной волны будет равен 90° .

Преломленная продольная волна будет распространяться вдоль поверхности (возникнет головная волна).



$$\sin \beta_{kp1} = \frac{C_{l1}}{C_{l2}}$$

Первый критический угол



$$\sin \beta_{kp1} = \frac{C_{l1}}{C_{l2}}$$

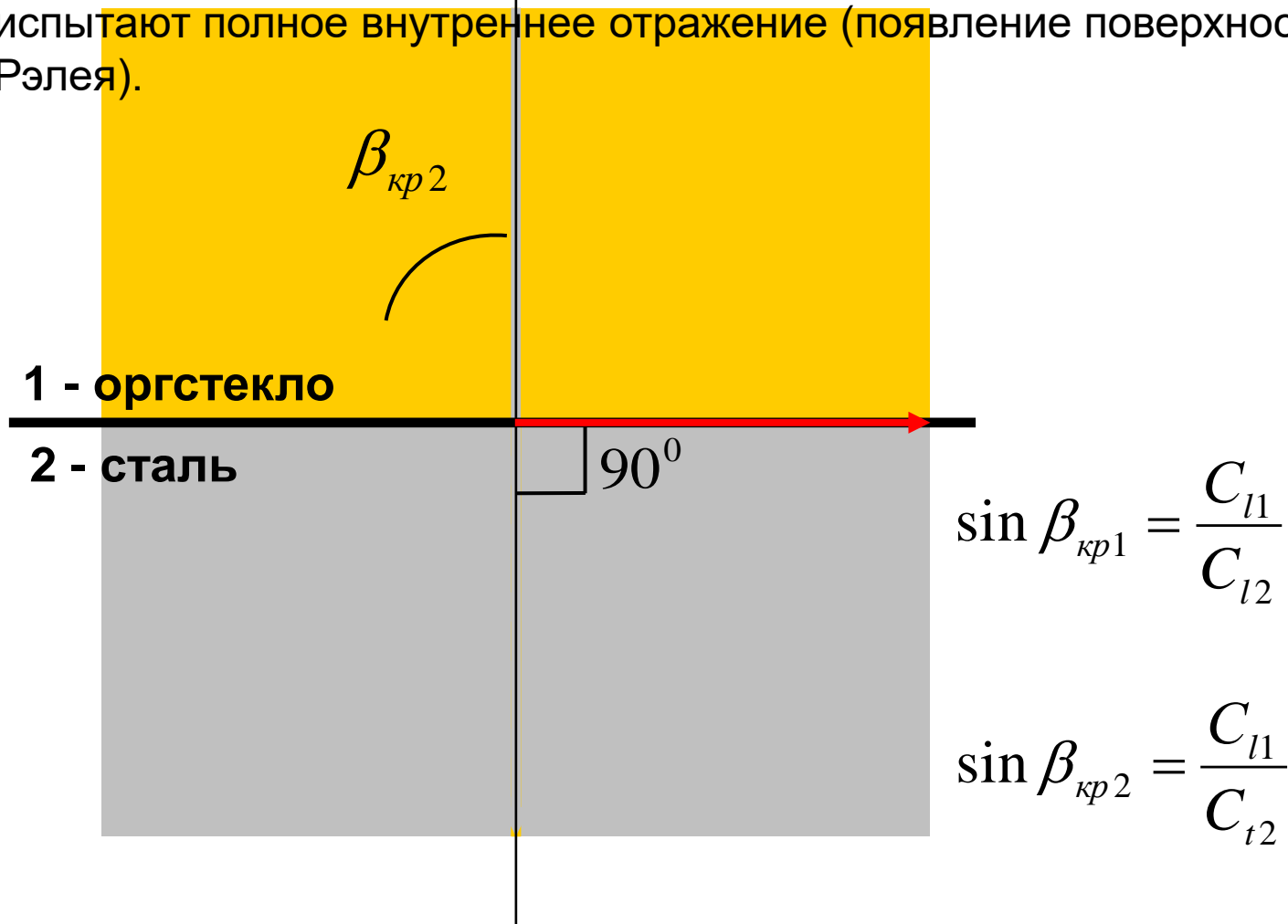
$$\beta_{kp1} = 27,5^{\circ}$$

1-й критический угол

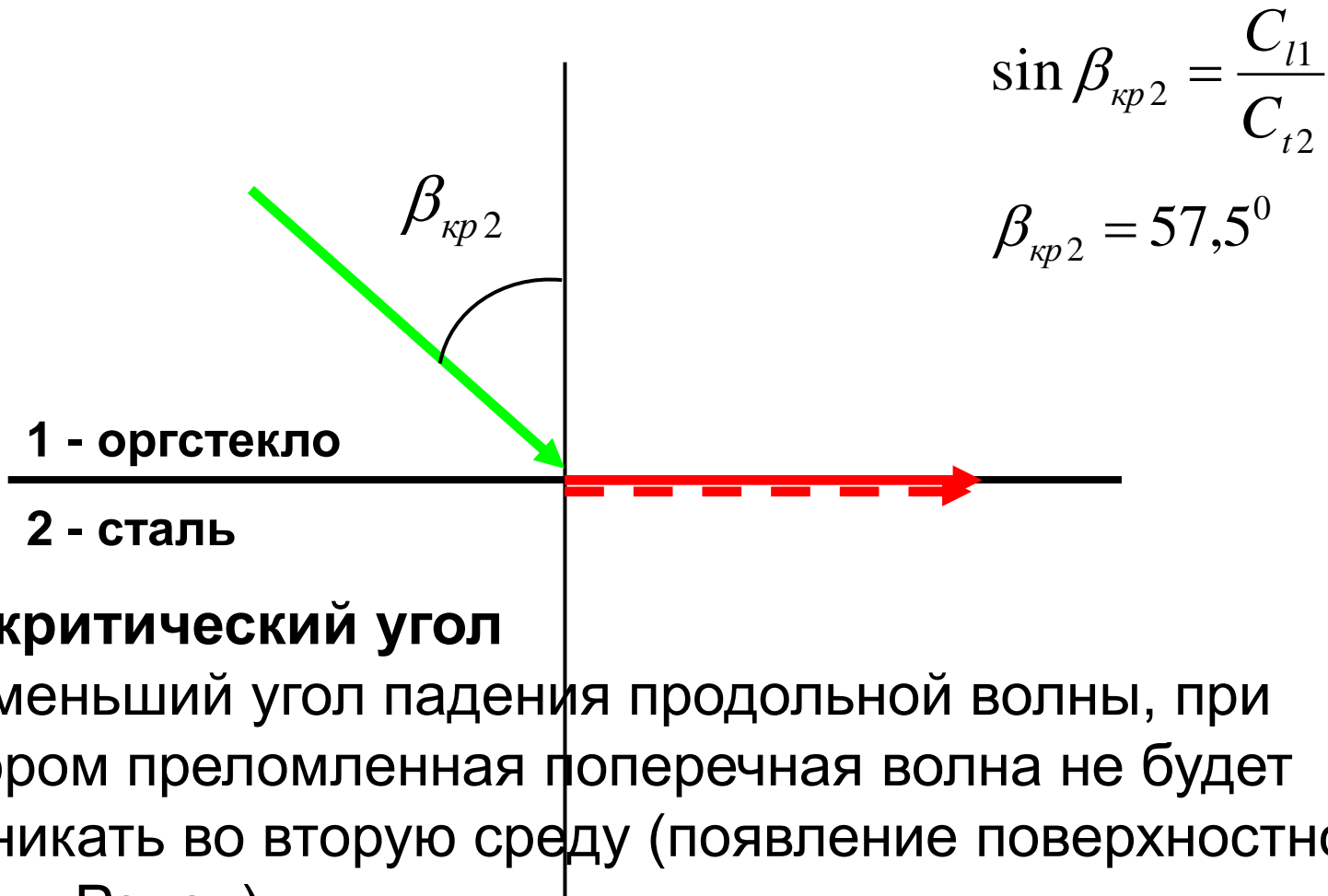
наименьший угол падения продольной волны, при котором преломленная продольная волна не будет проникать во вторую среду (возникновение головной волны)

Второй критический угол

При углах падения, больших первого критического, во второй среде останется только поперечная волна. При 2-ом критическом угле поперечная волна пойдет вдоль поверхности, т.е. обе преломленные волны испытают полное внутреннее отражение (появление поверхностной волны Рэлея).



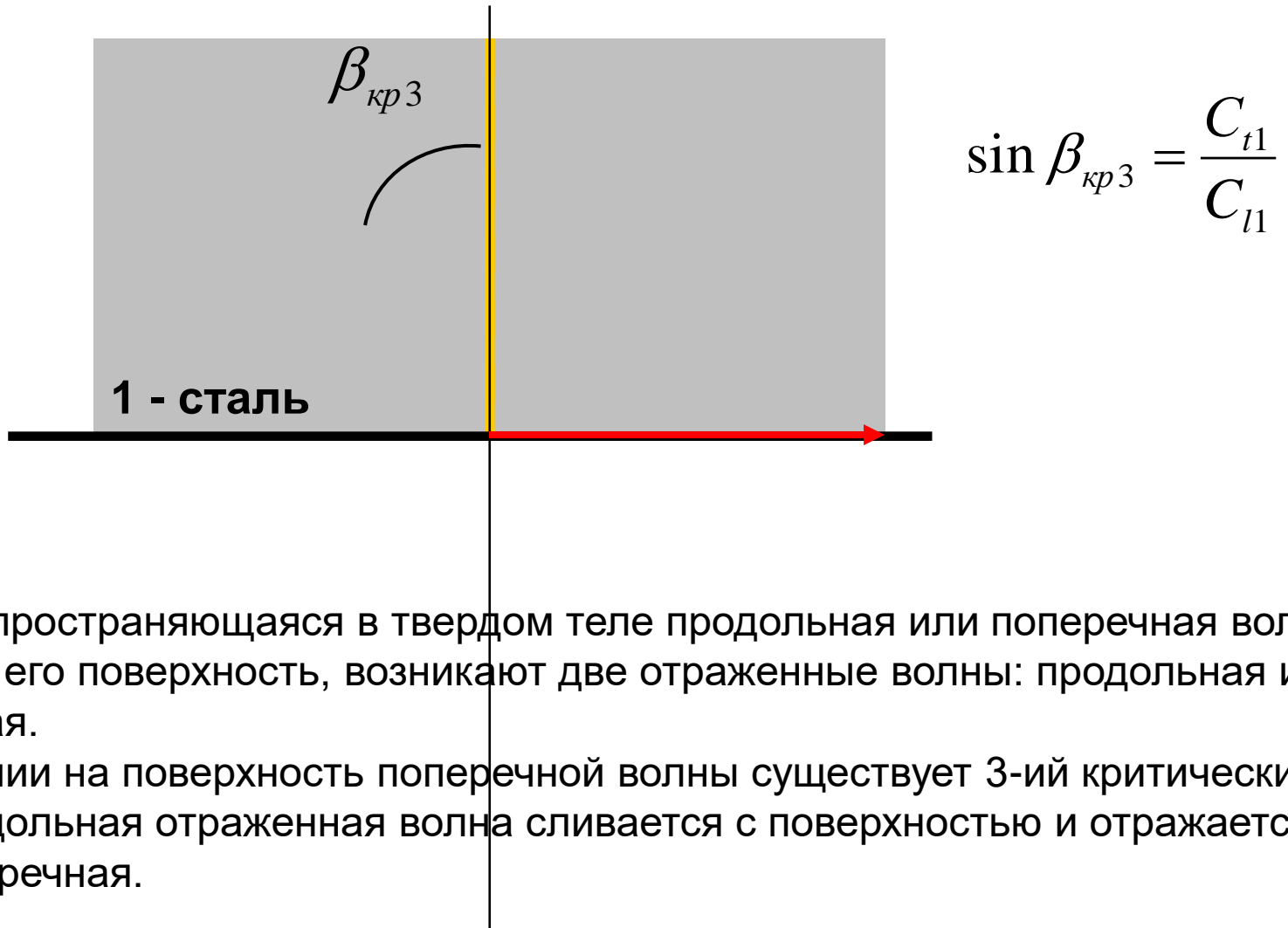
Второй критический угол



2-й критический угол

наименьший угол падения продольной волны, при котором преломленная поперечная волна не будет проникать во вторую среду (появление поверхностной волны Рэлея)

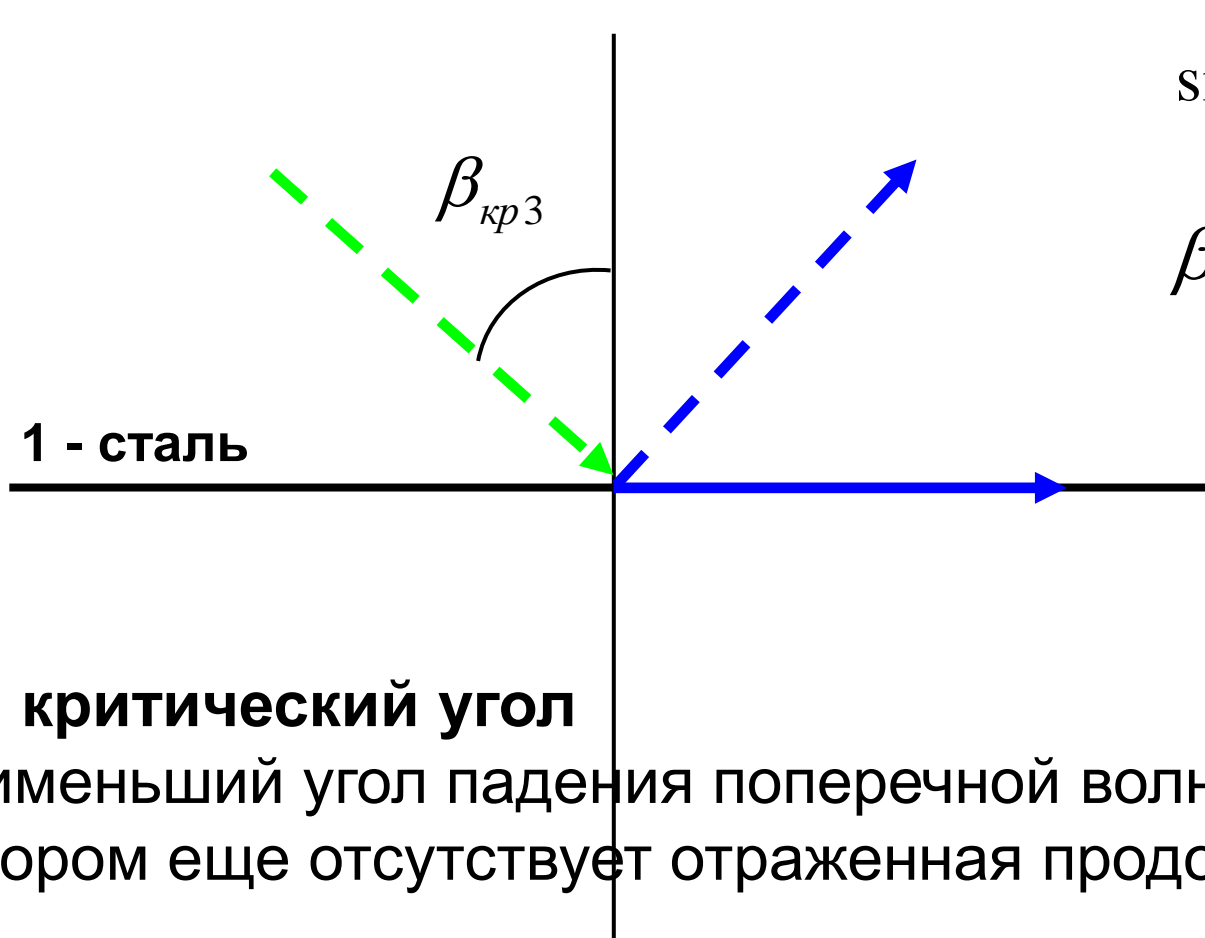
Третий критический угол



Когда распространяющаяся в твердом теле продольная или поперечная волна падает на его поверхность, возникают две отраженные волны: продольная и поперечная.

При падении на поверхность поперечной волны существует 3-ий критический угол. Продольная отраженная волна сливается с поверхностью и отражается одна поперечная.

Третий критический угол



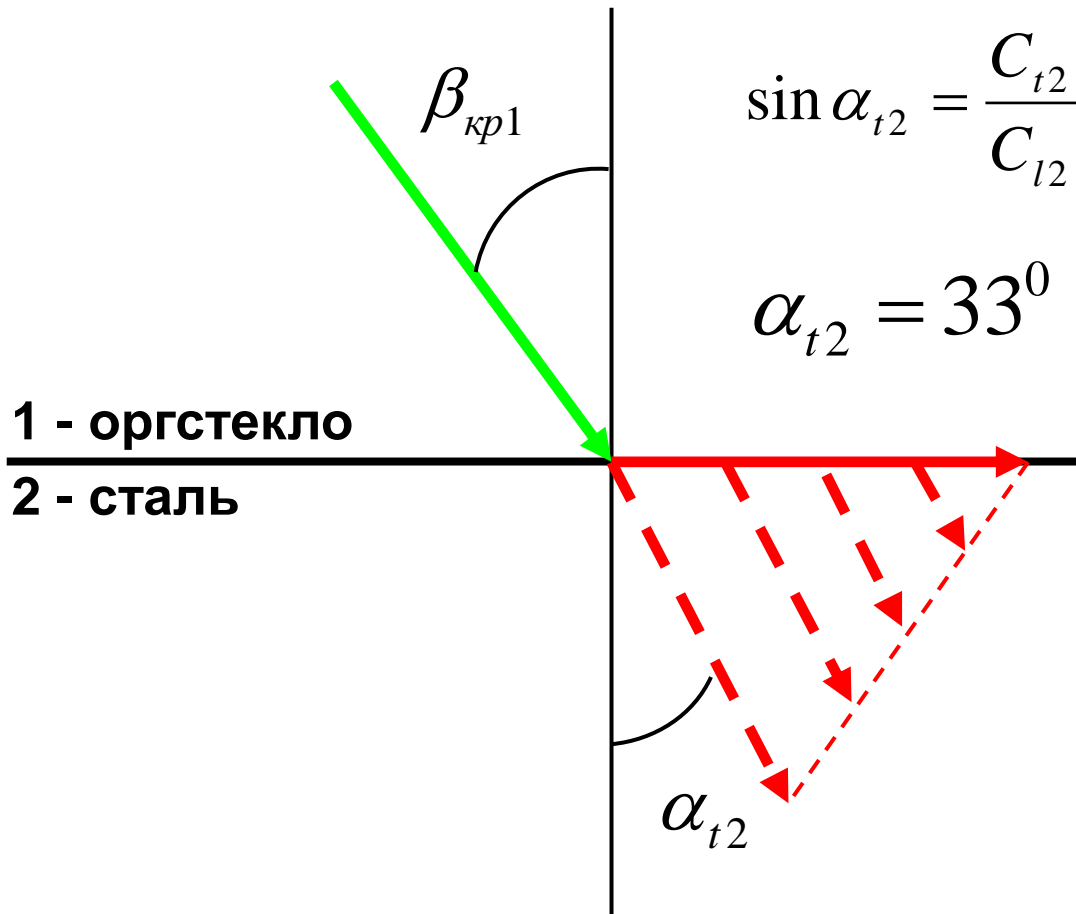
$$\sin \beta_{кр3} = \frac{C_{t1}}{C_{l1}}$$

$$\beta_{кр3} = 33^{\circ}$$

3-й критический угол

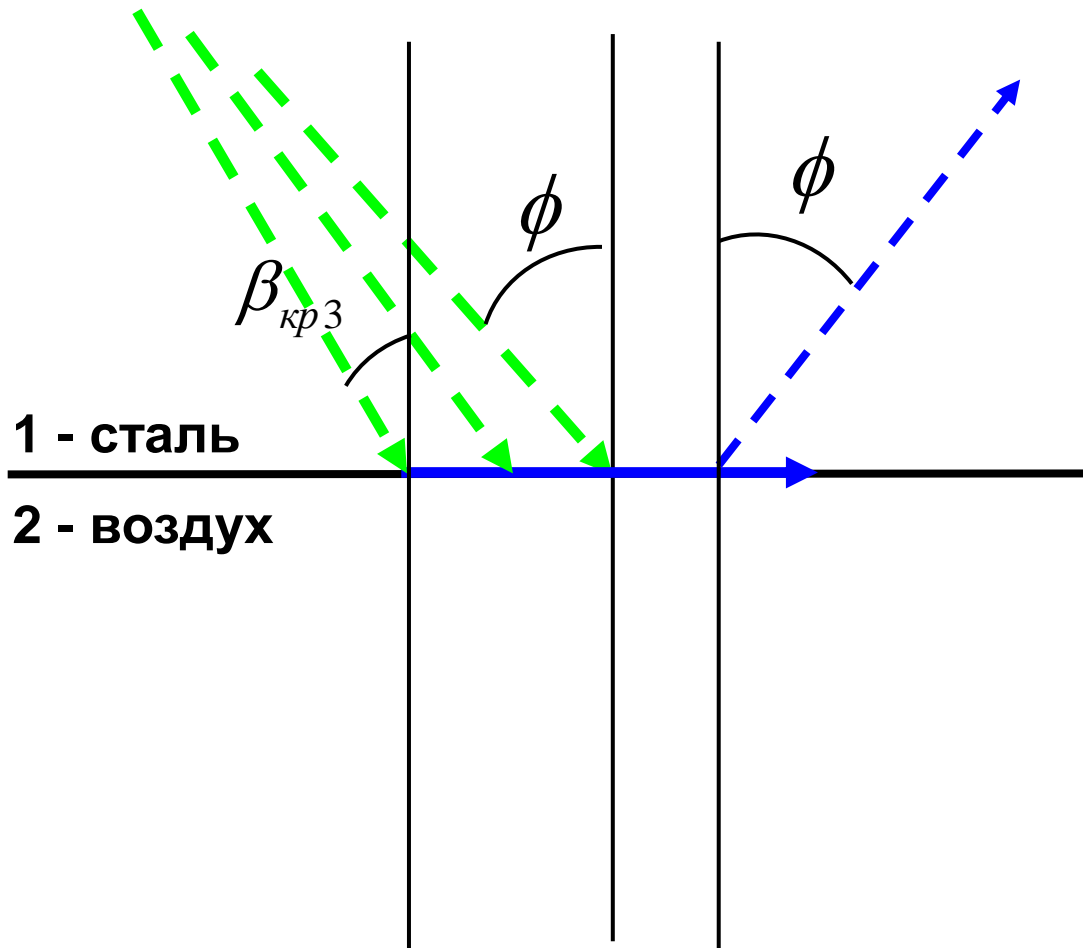
наименьший угол падения поперечной волны, при котором еще отсутствует отраженная продольная волна

Головная волна



При падении на границу раздела продольной волны под углом, близким к первому критическому, вдоль поверхности возбуждается неоднородная продольно-подповерхностная волна, называемая головной. В каждой точке границы раздела генерируются поперечные волны под углом, равным третьему критическому углу.

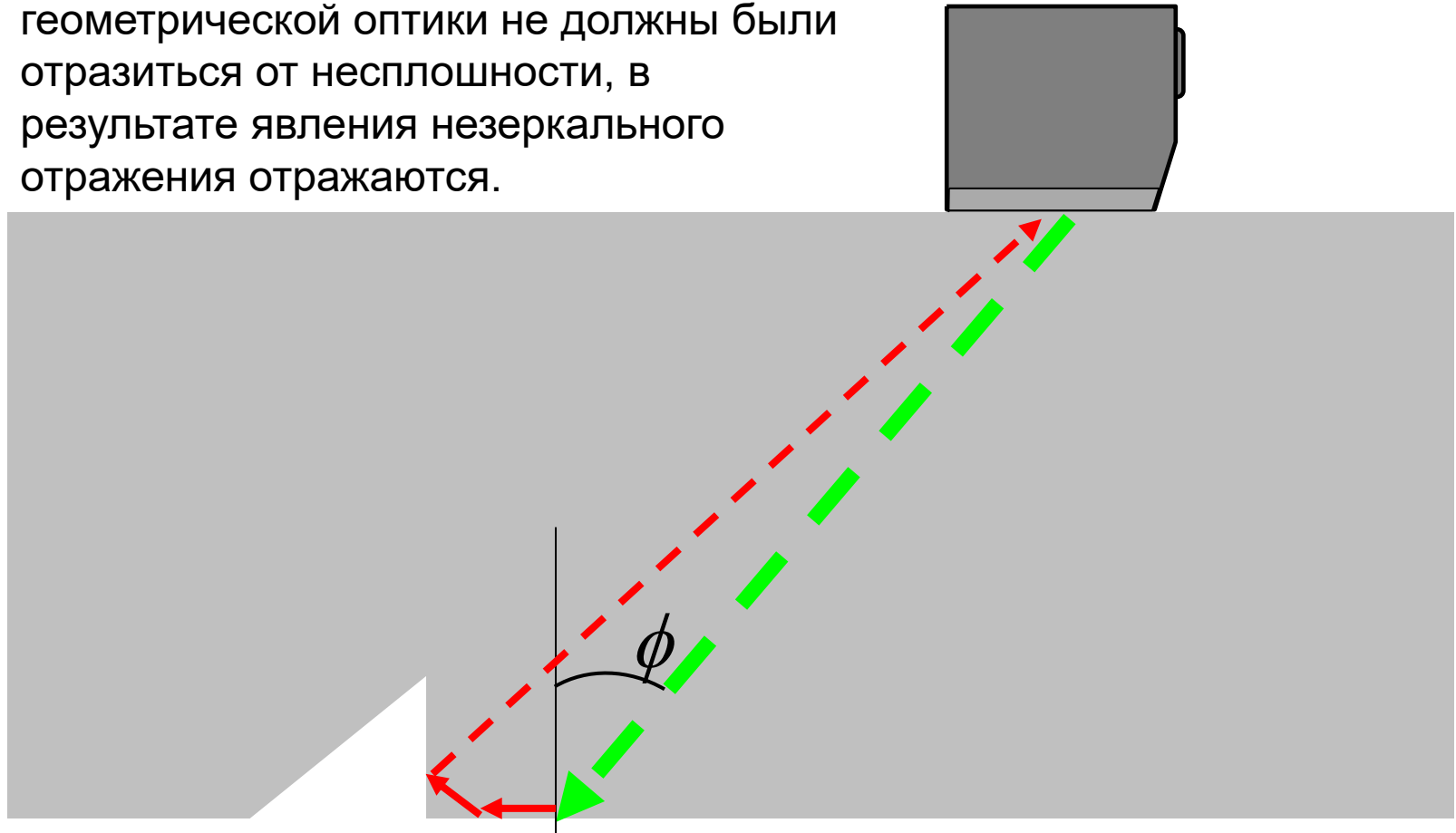
Незеркальное отражение



Вблизи третьего критического угла (несколько больше его) наблюдается явление незеркального отражения – происходит смещение отраженных лучей вдоль поверхности вследствие переноса энергии головной волной. Точка отражения центрального луча не совпадает с точкой падения. Это явление тем заметнее, чем угол падения ближе к третьему критическому и чем ниже частота.

Незеркальное отражение

Лучи, которые по законам геометрической оптики не должны были отразиться от несплошности, в результате явления незеркального отражения отражаются.

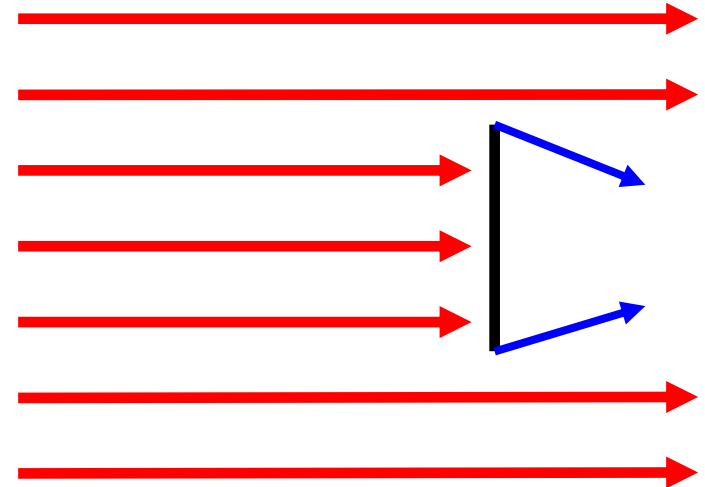
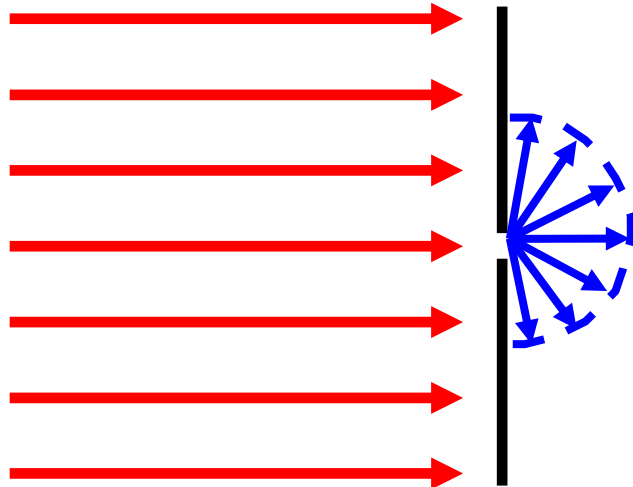


Дифракция

Явление частичного огибания волнами препятствий, находящихся на пути их распространения

Принцип Гюйгенса

каждую точку среды, приходящую в колебание вследствие распространения первичной волны, можно рассматривать как точечный источник, излучающий вторичную элементарную сферическую волну



В основе большинства способов, которые применяет ультразвуковая дефектоскопия, лежит использование законов т.н. геометрической оптики. УЗ лучи распространяются по прямым линиям, а если попадают на границу раздела, то на ней происходят явления, описываемые законом Снеллиуса.

Однако в зависимости от соотношений размеров препятствий и длины волны на некотором расстоянии в геометрической тени обнаруживаются УЗ волны, т.е. ультразвук как бы огибает преграду.

Принцип Гюйгенса объясняет это явление.

Если плоская волна встречает на своем пути звуконепроницаемую преграду с точечным отверстием, то она распространяется по другую сторону преграды в виде сферических волн, расходящихся от отверстия преграды, как от нового точечного источника.

Если на пути распространения УЗ колебаний имеется препятствие, то колеблющиеся частицы среды, расположенные по краям препятствия, создают сферические волны, которые распространяются в зоне геометрической тени препятствия.

Дифракция в УЗД - особенности распространения УЗ волн и их взаимодействия с границами разделов, которые не объясняются законами геометрической оптики

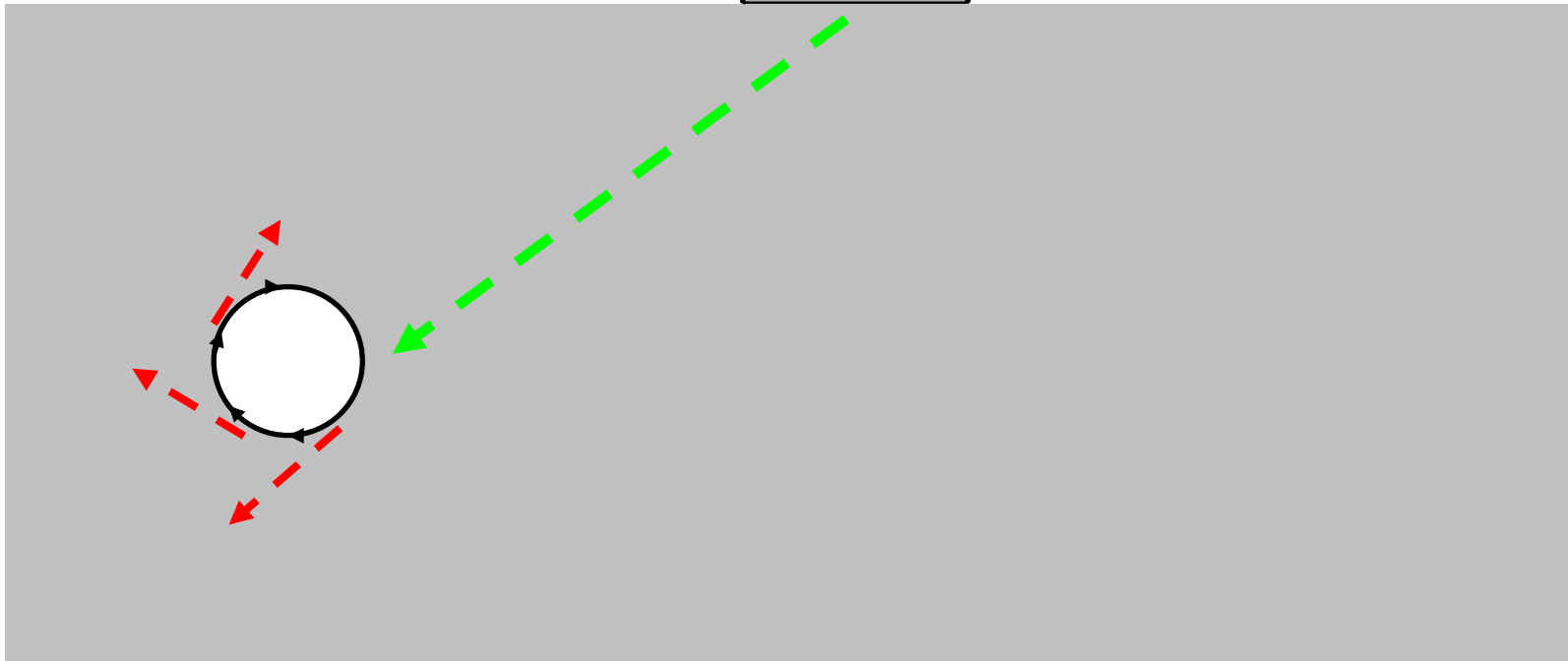
Дифракция I типа

К **дифракции первого типа** относят взаимодействие ультразвуковой волны с острыми краями трещины. Край трещины становится точечным источником и возбуждает сферическую УЗ волну. Применяется для выявления неблагоприятно ориентированной к УЗ лучу трещины, при определении высоты трещины.



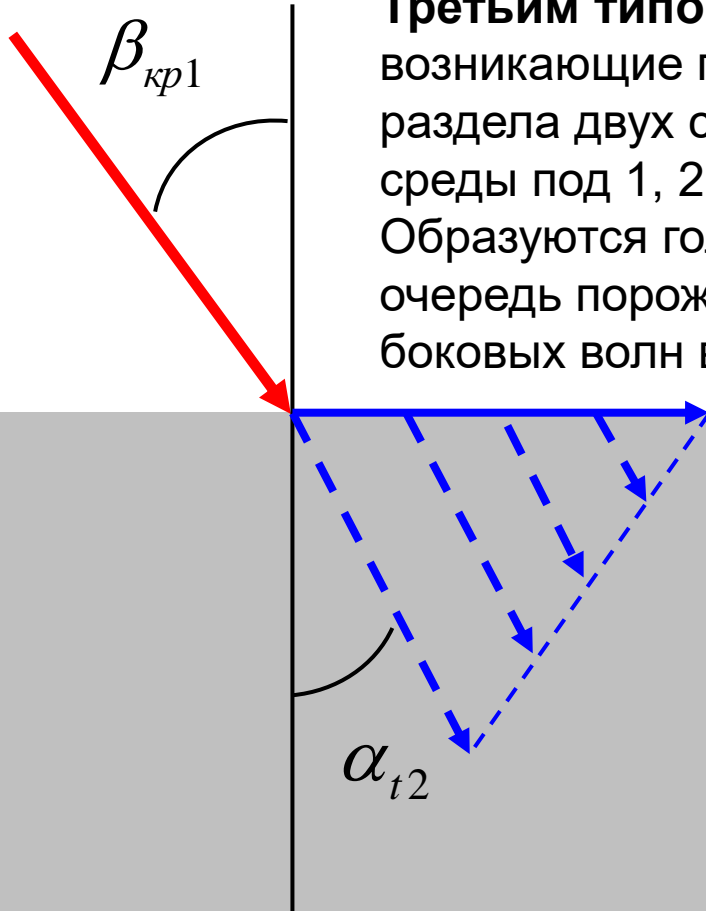
Дифракция II типа

К **дифракции второго типа** можно отнести явления, возникающие при касании УЗ лучами гладких поверхностей. Формируются волны, огибающие поверхности тел, которые порождают дифракционные волны соскальзывания. Применяется для измерения периметра объемных несплошностей.



Дифракция III типа

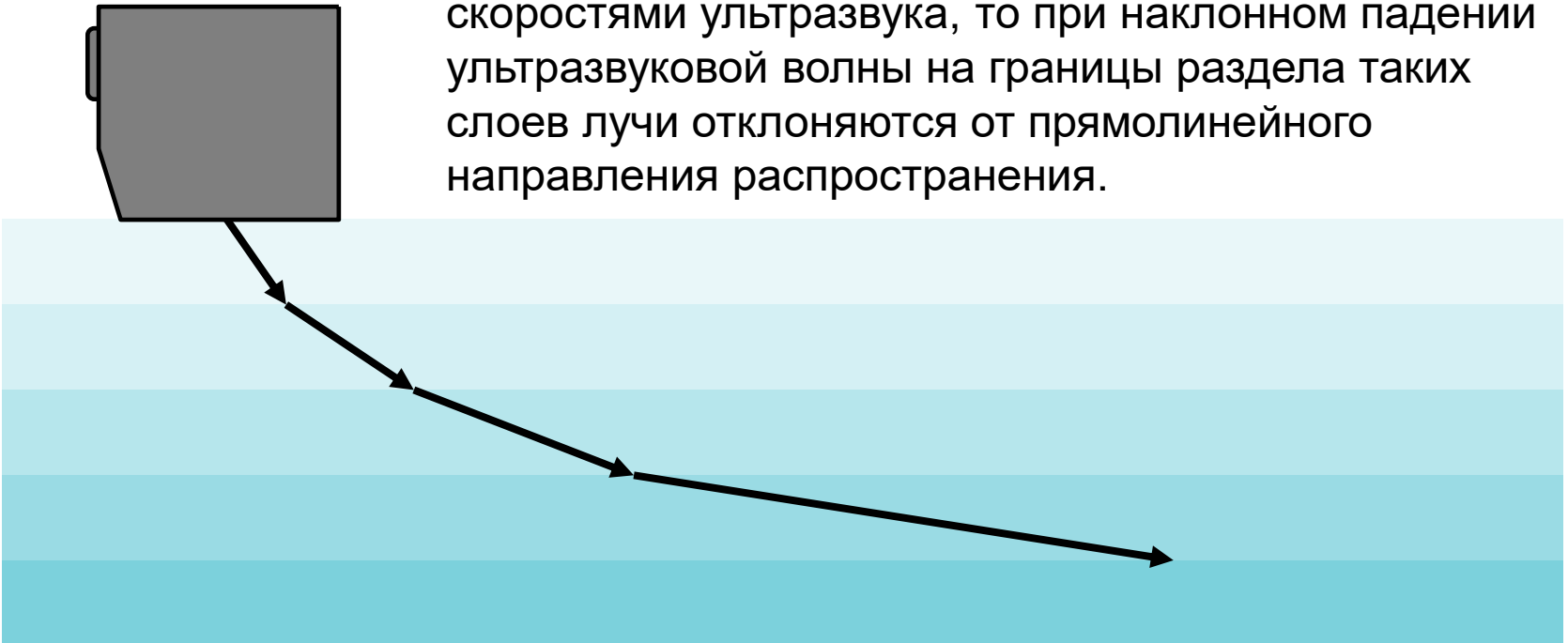
Третьим типом дифракции называют явления, возникающие при падении волн на границу раздела двух сред или на свободную границу среды под 1, 2 или 3 критическими углами. Образуются головные волны, которые в свою очередь порождают семейство дифракционных боковых волн в обеих средах.



Рефракция

***Рефракция - преломление волн
Применительно к УЗ волнам – непрерывное изменение
направления луча в среде, скорость в которой изменяется.***

Когда в среде имеются слои с различными скоростями ультразвука, то при наклонном падении ультразвуковой волны на границы раздела таких слоев лучи отклоняются от прямолинейного направления распространения.



Ультразвуковое поле

К УЗ волнам малой амплитуды может быть применен принцип наложения или принцип Гюйгенса, согласно которому каждое звуковое колебание развивается независимо от других одновременно происходящих акустических явлений.

Интерференция

Наложение двух или большего числа когерентных колебаний (имеющих частоты одинаковые или относящиеся как целые числа, а также неизменную разность фаз).

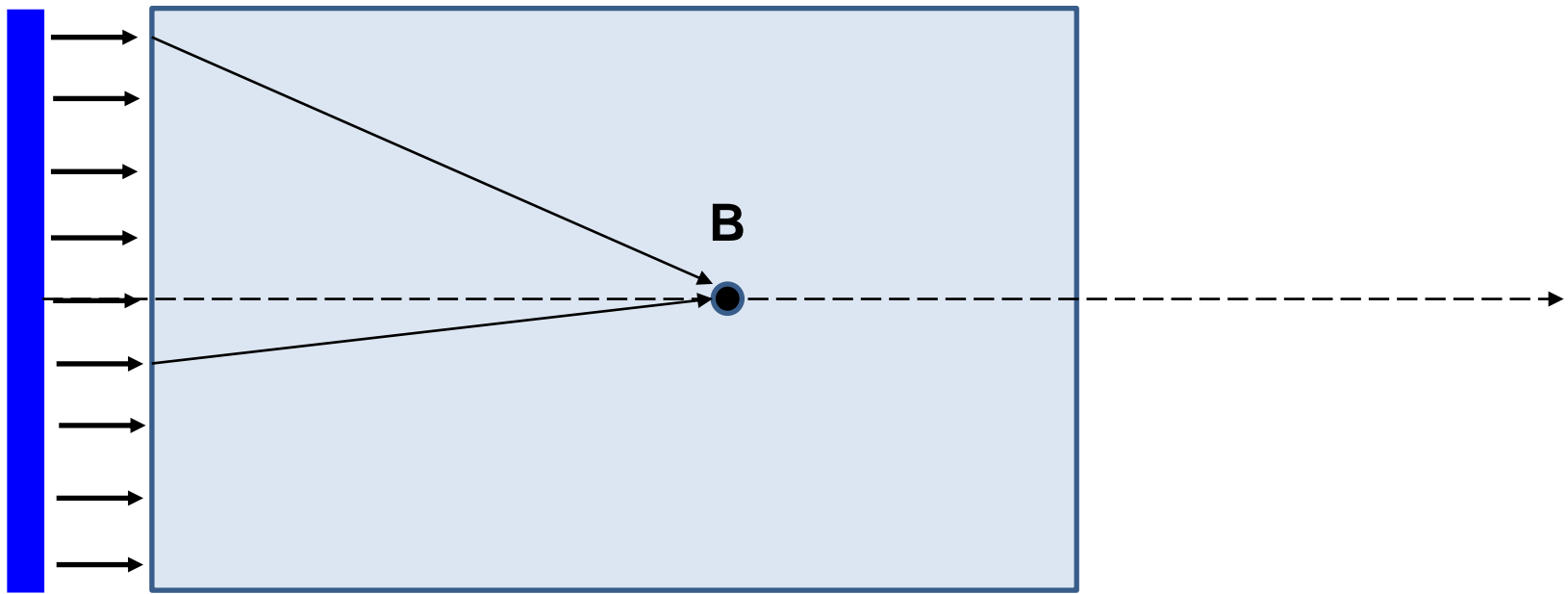
Результирующее колебание в любой точке среды оказывается равным алгебраической сумме всех колебаний, пришедших в эту точку.

Амплитуда колебаний какой-либо точки возрастает, если отдельные колебания приходят в эту точку в фазе и уменьшается, если колебания приходят в противофазе.

Акустическое поле

Область пространства, в котором преобразователь излучает и в котором может принимать волны.

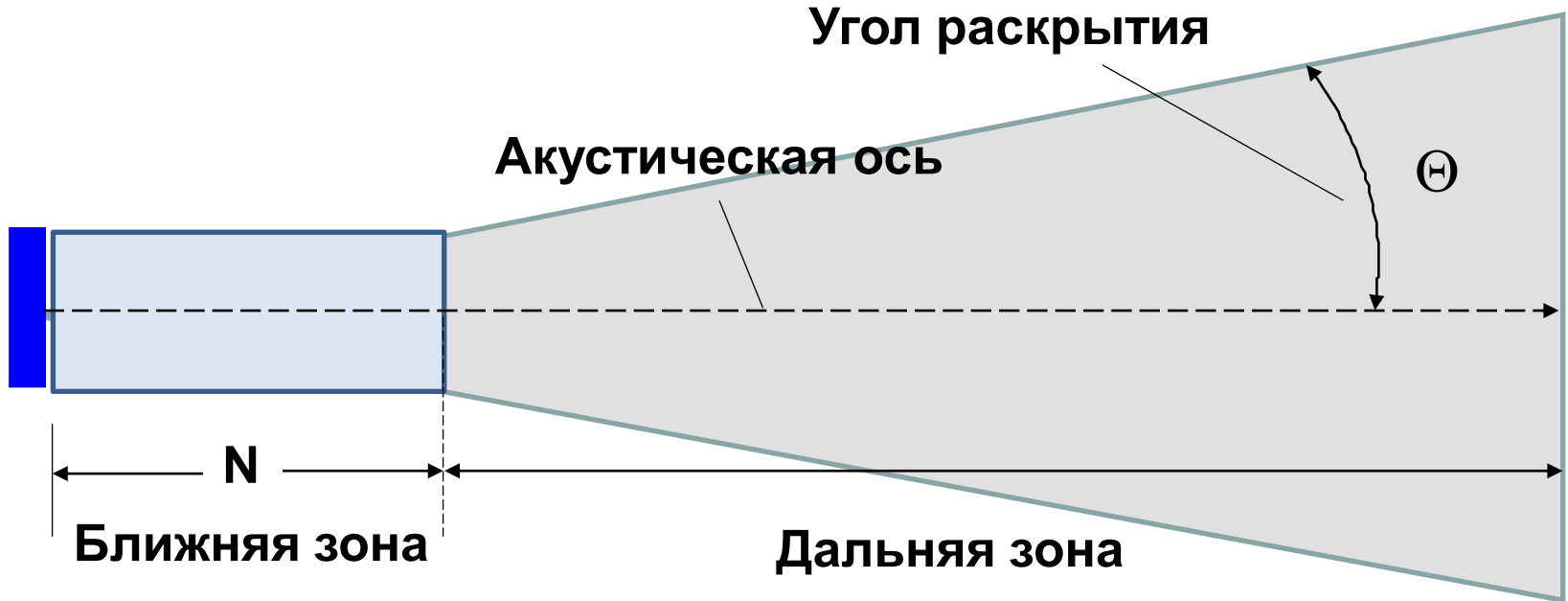
Ближняя зона (Френеля)



Прожекторная
зона

Ближняя
зона (Френеля)

Ультразвуковое поле



$$N \approx \frac{a^2}{\lambda}$$

размер ближней зоны для прямого ПЭП

$$N \approx \frac{a^2 \cdot \cos \alpha}{\lambda \cdot \cos \beta}$$

размер ближней зоны для наклонного ПЭП

$$\Theta_{0,1} = \arcsin\left(n \cdot \frac{\lambda}{a}\right)$$

a – радиус круглого пьезоэлемента;
 α - угол ввода;
 β - угол призмы;
 λ – длина волны;
 $\Theta_{0,1}$ - угол раскрытия по уровню (-20) дБ
 n – коэффициент, равный 0,45 для круглой и 0,38 для прямоугольной пьезопластины

Поле излучения на оси круглой пьезопластины

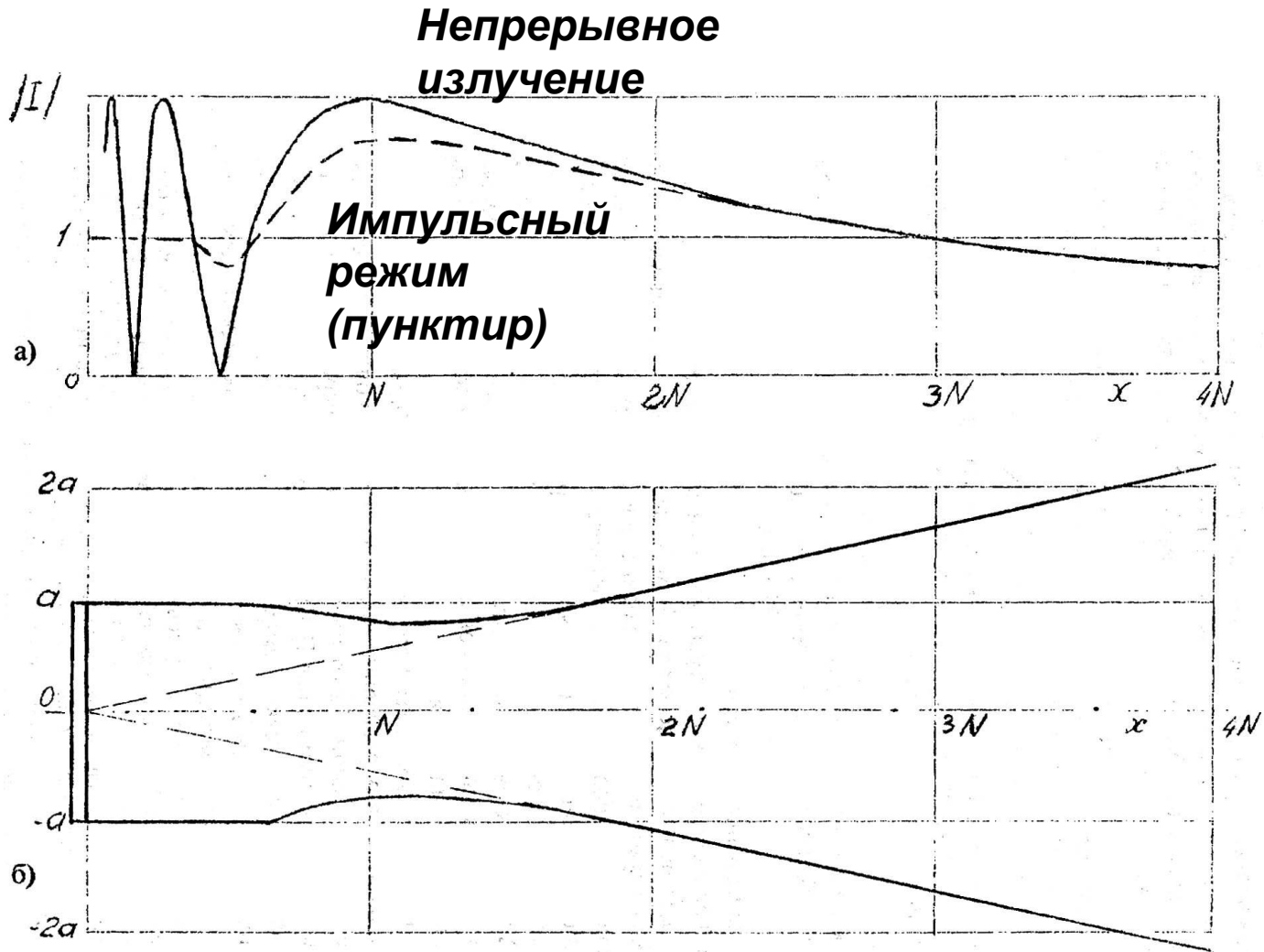


Диаграмма направленности

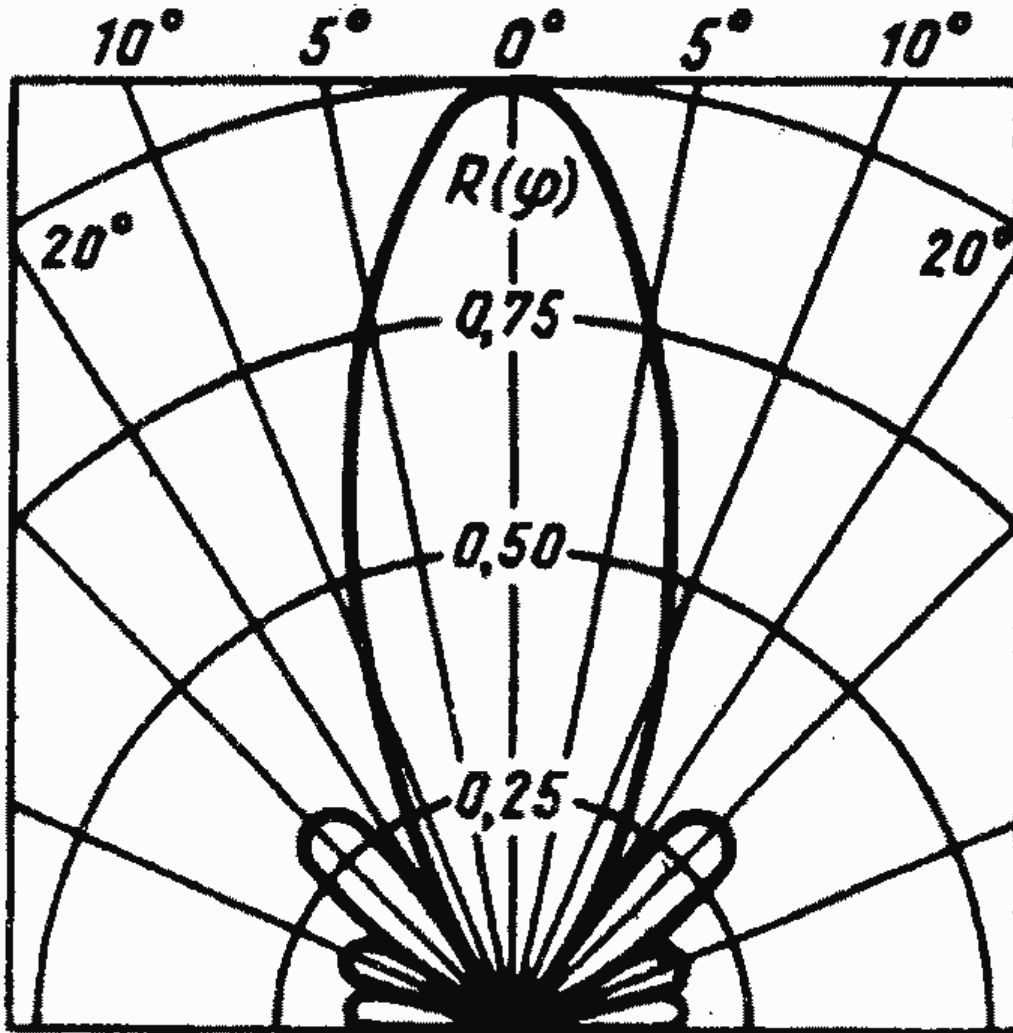


Диаграмма направленности

зависимость амплитуды излучения от угла между лучом (направлением на отражатель) и акустической осью пьезопластины

Ширина диаграммы направленности

удвоенный угол раскрытия основного лепестка

Основной лепесток

центральная часть диаграммы направленности, в пределах которой амплитуда поля уменьшается от 1 до 0

- **Поле излучение преобразователя**

зависимость амплитуды излучения от положения исследуемой точки в пространстве

- **Поле приема**

зависимость амплитуды принятого преобразователем сигнала от положения в пространстве точечного источника

- **Поле излучения-приема**

зависимость амплитуды принятого сигнала от положения в пространстве точечного отражателя, облучаемого тем же преобразователем

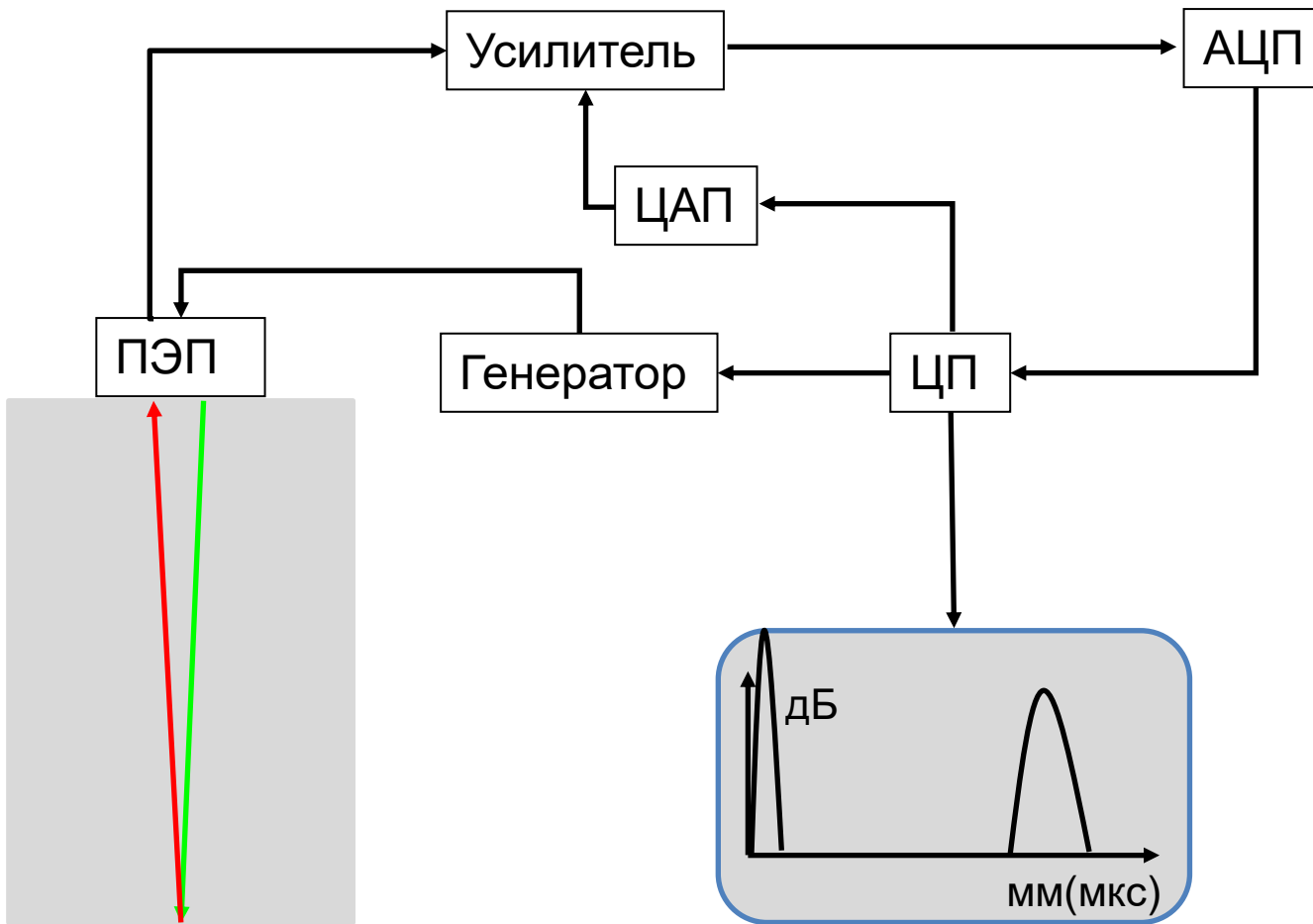
Акустический тракт

Путь ультразвука от излучателя до отражателя и затем к приемнику.

Формулы акустического тракта определяют ослабление ультразвукового сигнала на пути от излучателя до отражателя и обратно к приемнику.

С увеличением расстояния до отражателя и уменьшением его размеров амплитуда эхосигнала от него уменьшается.

Импульсный дефектоскоп цифрового типа



Импульсный дефектоскоп цифрового типа

По сигналу центрального процессора сигналов дефектоскопа генератор зондирующих импульсов вырабатывает возбуждающий электрический импульс, который поступает через разъем генератора на пьезоэлектрический преобразователь и в виде акустического импульса излучается в контролируемое изделие.

Принятый эхосигнал преобразуется пьезоэлектрическим преобразователем в электрический импульс и через разъем приемника поступает на вход приемного тракта дефектоскопа.

Коэффициент усиления приемного тракта дефектоскопа задается центральным процессором через схему ЦАП (цифро-аналогового преобразователя).

Усиленный электрический импульс поступает на вход АЦП - аналого-цифрового преобразователя.

С выхода аналого-цифрового преобразователя сигнал поступает на центральный процессор для дальнейшей обработки и отображения на дисплее.

Типы разверток

- **A – развертка**

Горизонтальная ось – время пробега импульса в ОК или путь импульса

Вертикальная ось – амплитуда эхосигнала

- **B – развертка**

Поперечное сечение изделия поверхностью, определяемое лучом ПЭП при его перемещении

- **C – развертка**

План расположения несплошностей

- **D – развертка**

Продольное сечение изделия поверхностью, определяемое лучом ПЭП при его перемещении

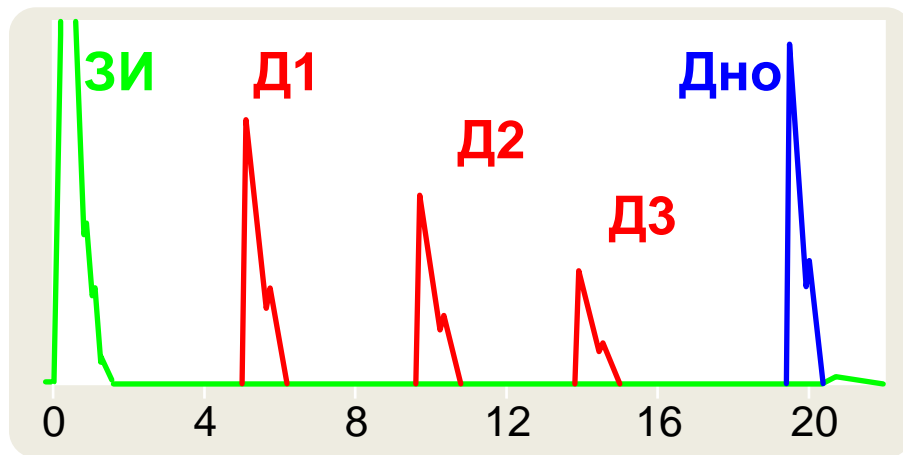
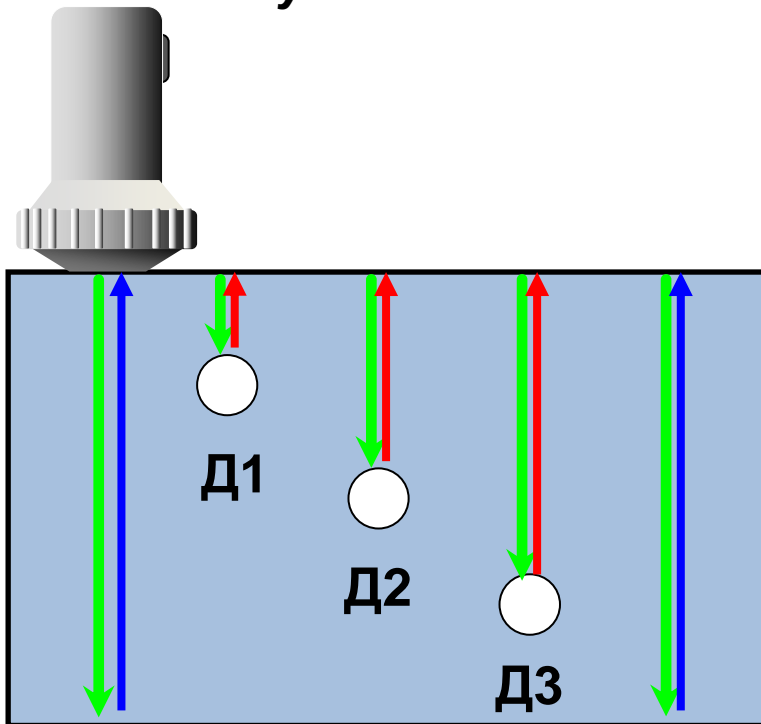
- **M – развертка**

A – развертка с запоминанием изменения амплитуды

Типы разверток. А-развертка

Горизонтальная ось – время пробега импульса в ОК или путь импульса

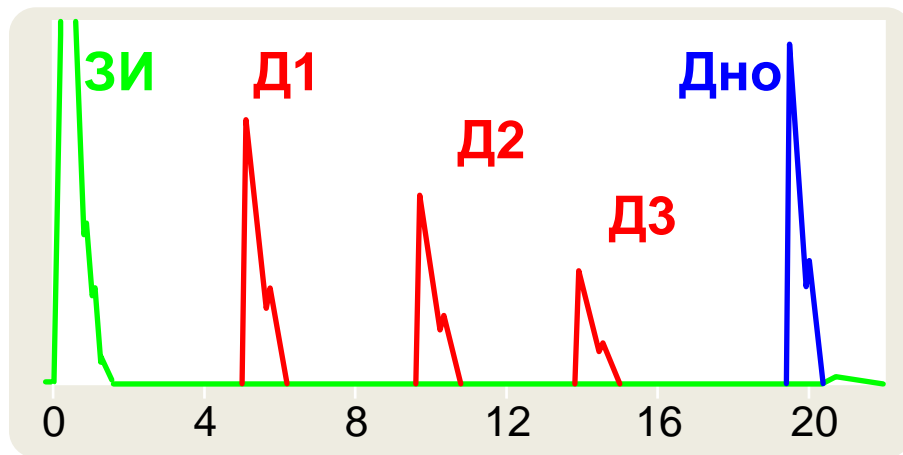
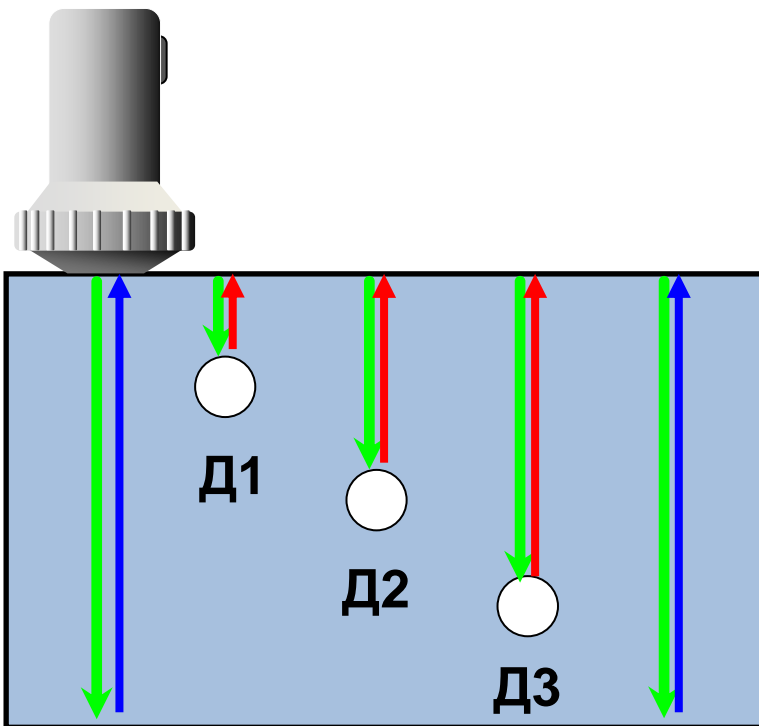
Вертикальная ось – амплитуда эхосигнала



А - развертка

Типы разверток. М-развертка

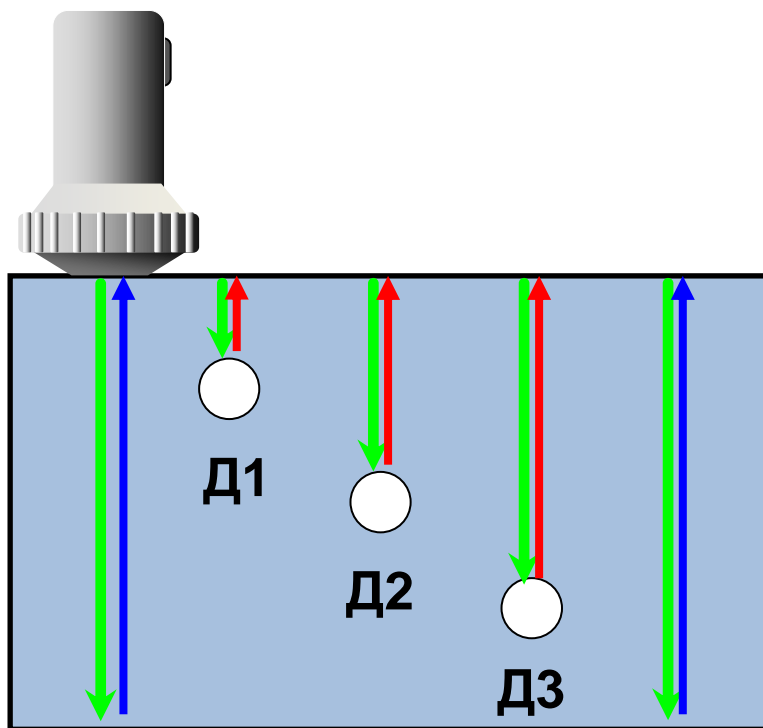
*А – развертка с
запоминанием изменения
амплитуды*



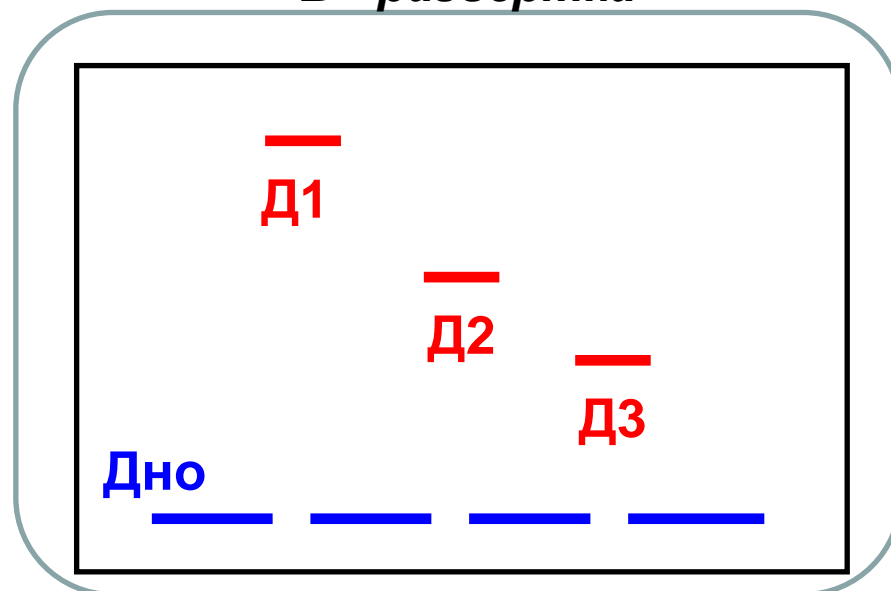
М - развертка

Типы разверток. В-развертка

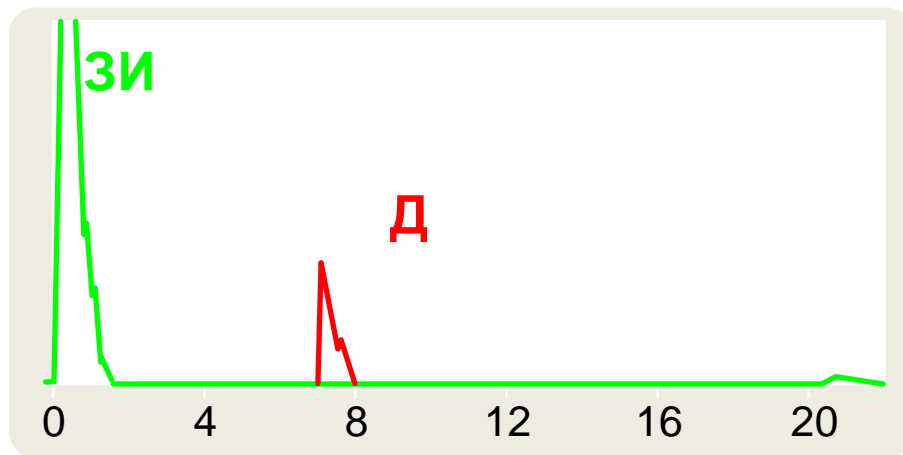
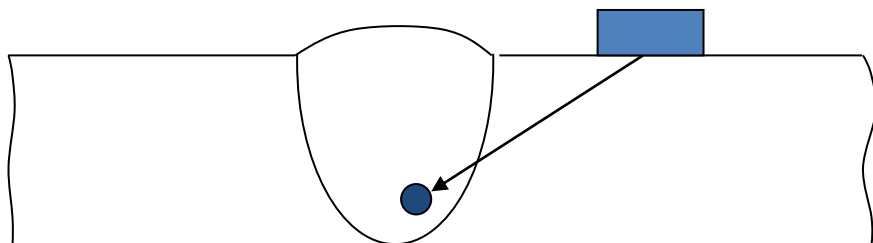
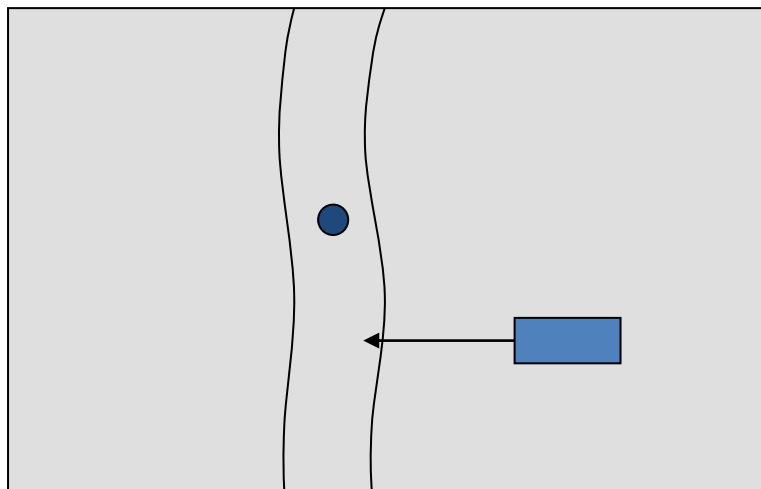
Поперечное сечение изделия поверхностью, определяемое лучом ПЭП при его перемещении



В - развертка

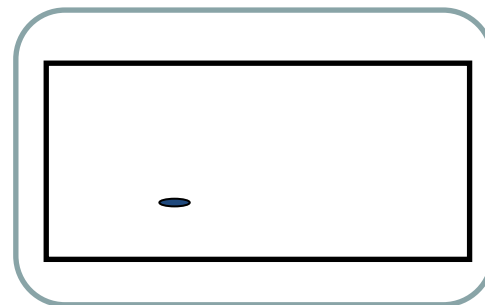


Типы разверток. В-развертка

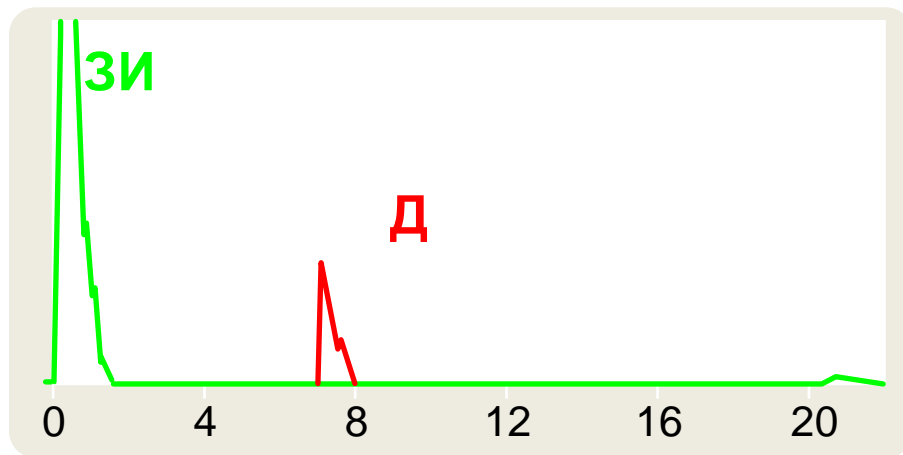
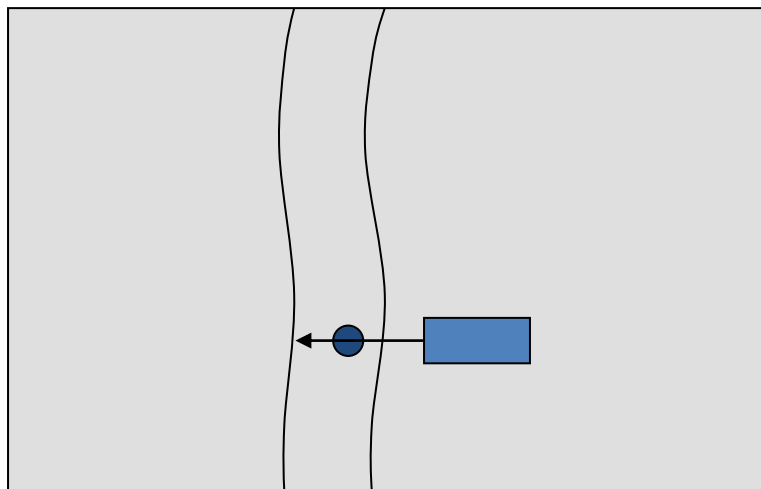


А - развертка

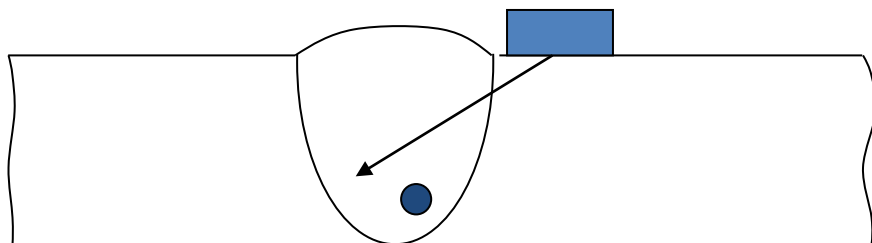
В - развертка



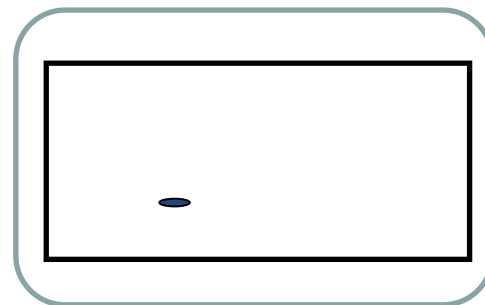
Типы разверток. D-развертка



A - развертка



D - развертка



Ультразвуковой толщиномер

Толщиномер должен обеспечить более точное измерение времени прихода донного сигнала t , вычесть из него время t' , соответствующее пробегу УЗ импульса в призмах или протекторе ПЭП, а также в слое контактной жидкости, и пересчитать время в толщину измеряемого изделия h с учетом скорости ультразвука в изделии C :

$$h = \frac{C \cdot (t - t')}{2}$$

Настройка толщиномера:

- введение значения скорости в материале изделия C по образцу или по участку изделия, толщина которого известна;
- настройка начала отсчета (определение времени пробега УЗ импульса в призмах или протекторе ПЭП, а также в слое контактной жидкости t')

Измерения малых толщин выполняют, используя многократные отражения импульса в изделии.

УЗ преобразователи

- **По способу акустического контакта**

- контактные П1__
- иммерсионные П2__

- **По углу ввода УЗ в ОК**

- прямые П_1_
- наклонные П_2_

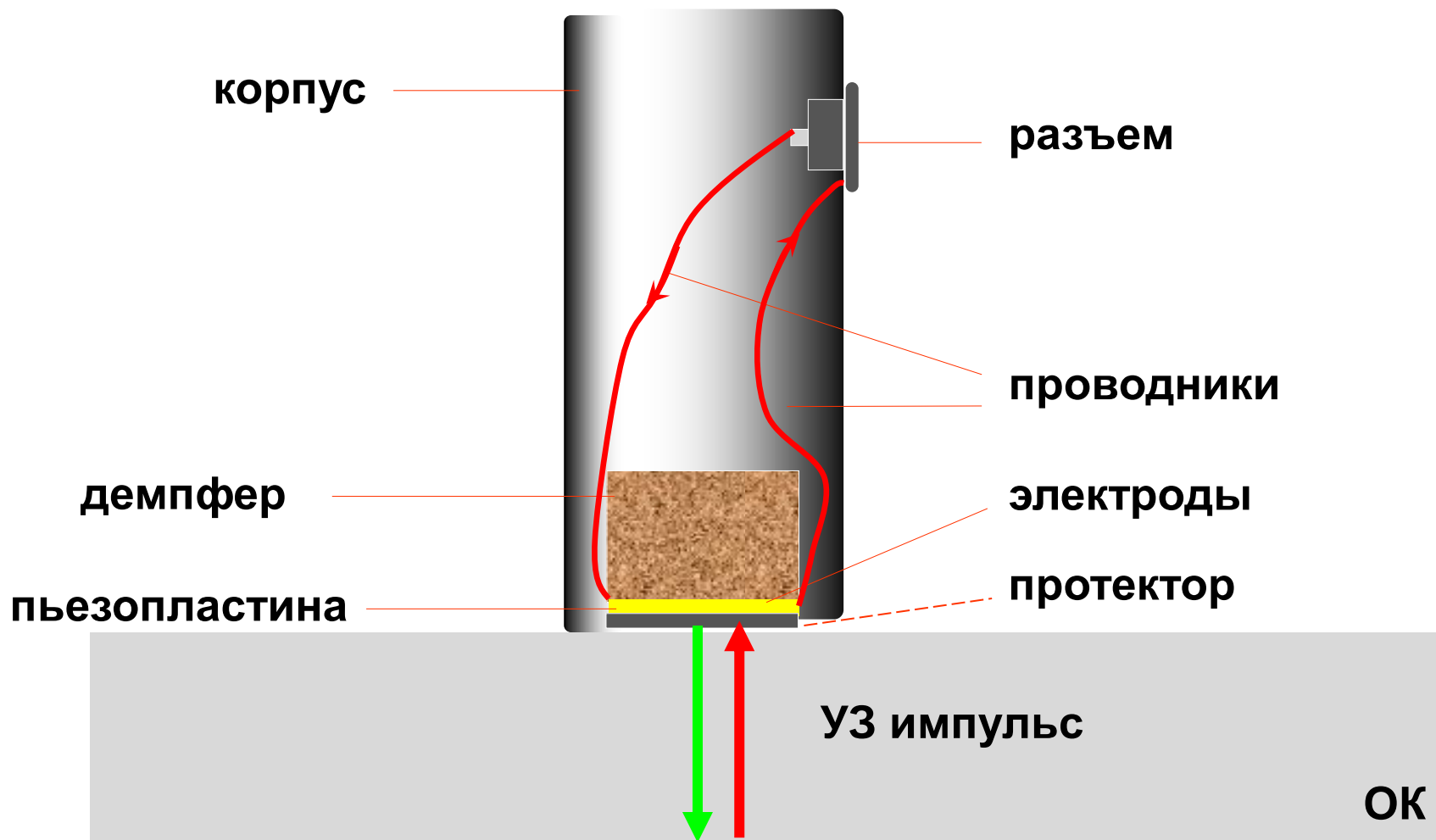
- **По способу излучения-приема**

- совмещенные П__1
- раздельно-совмещенные (РС) П__2

- **По типу волн в ОК**

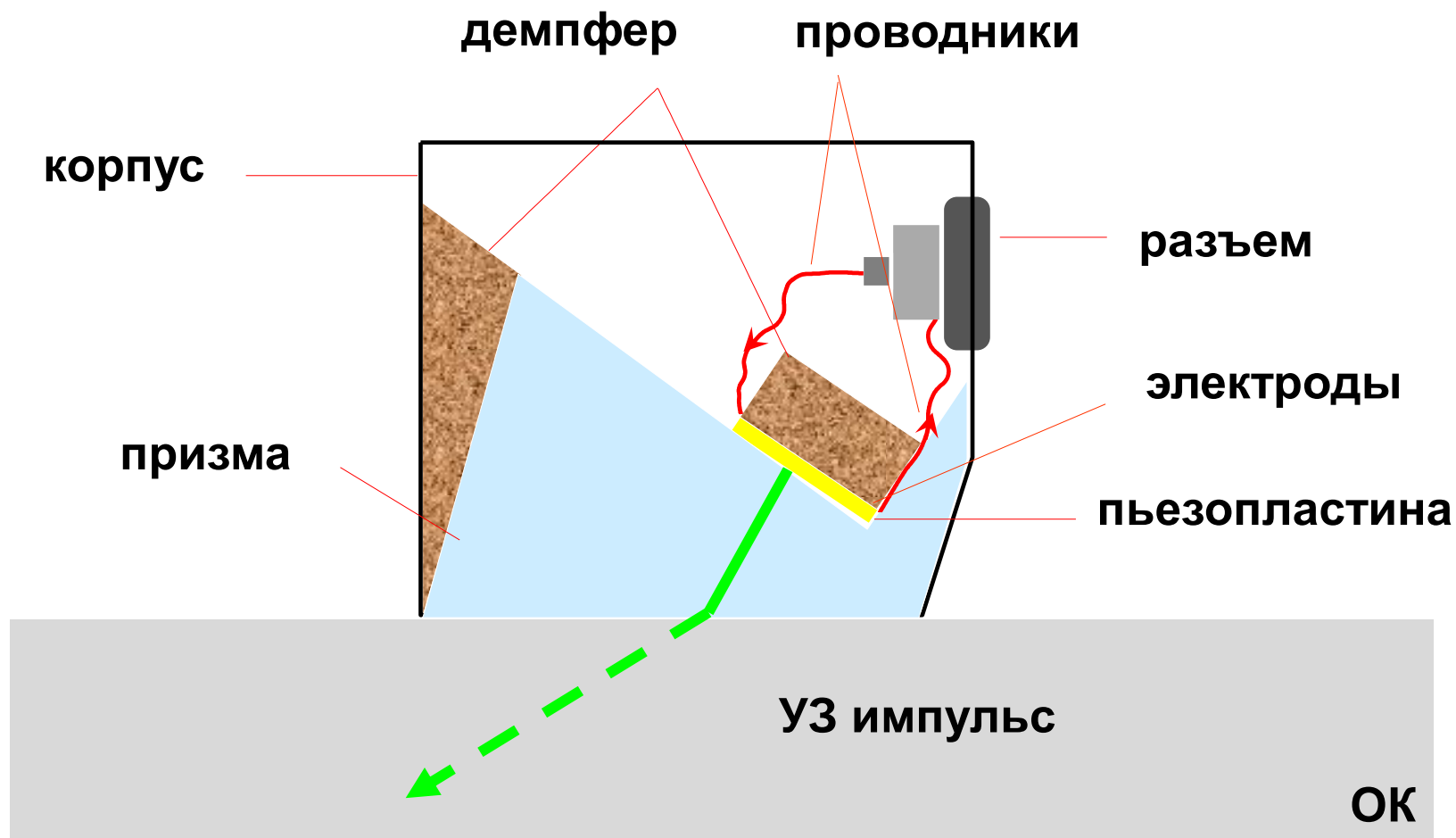
- продольные
- поперечные
- поверхностные

Прямой преобразователь

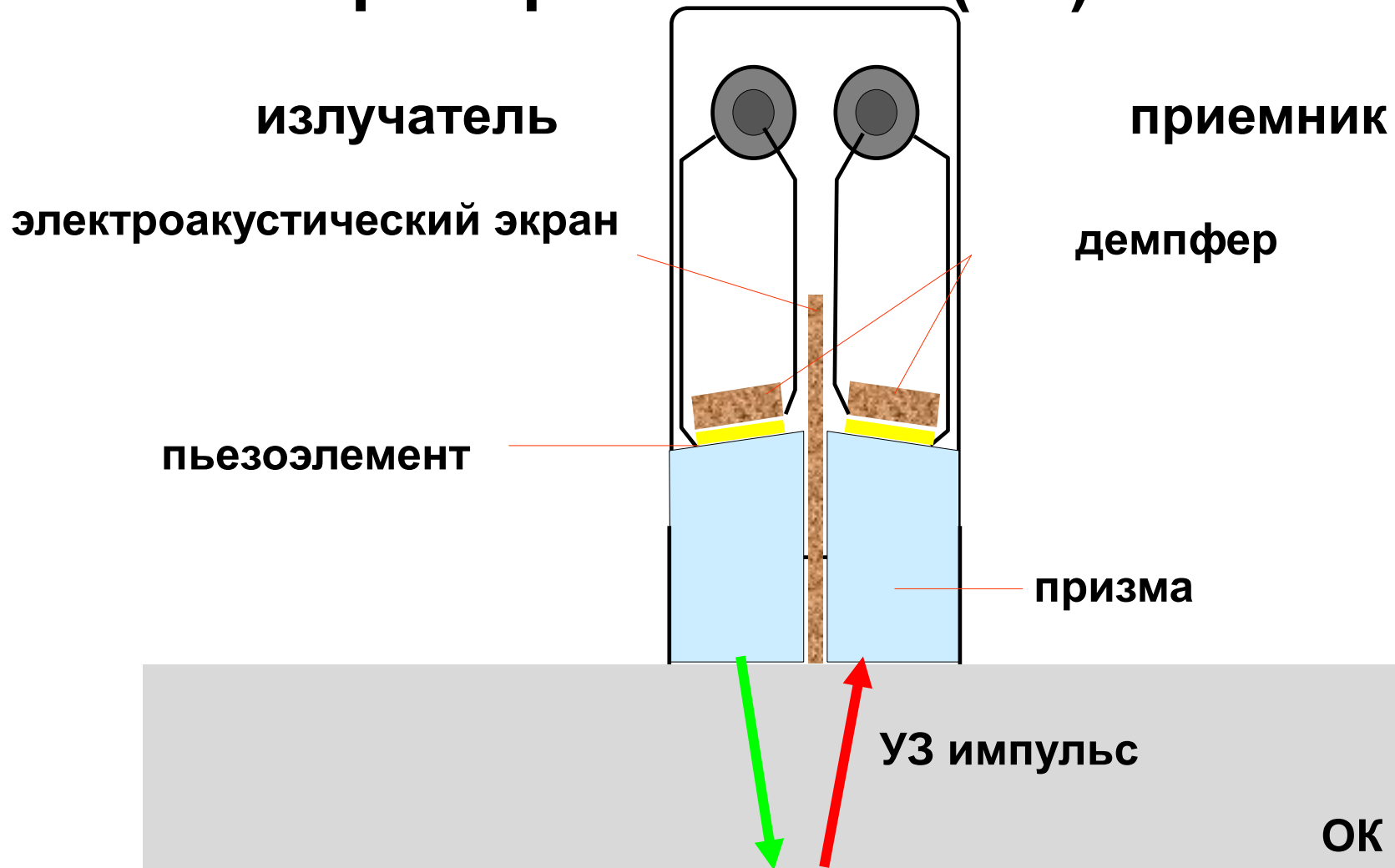


Наклонный преобразователь

Пьезоэлемент излучает в призму продольные волны, которые на границе призмы с изделием преломляются и трансформируются в поперечные.



Раздельно-совмещенный преобразователь (РС)



Основные стандартные образцы

Назначение СО-1:

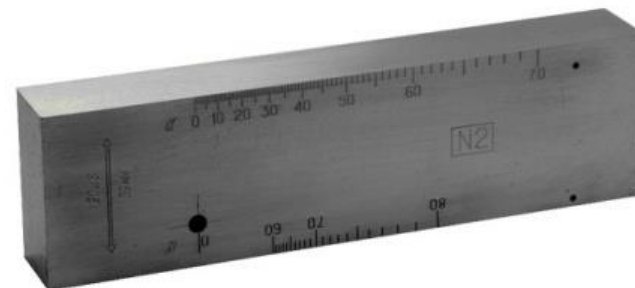
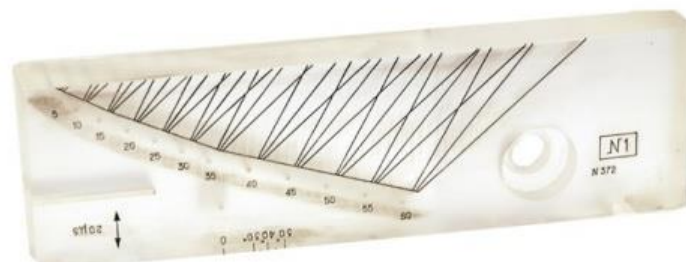
- условная чувствительность (в мм)
- проверка лучевой разрешающей способности
- проверка погрешности глубиномера
- определение угла призмы

Назначение СО-2:

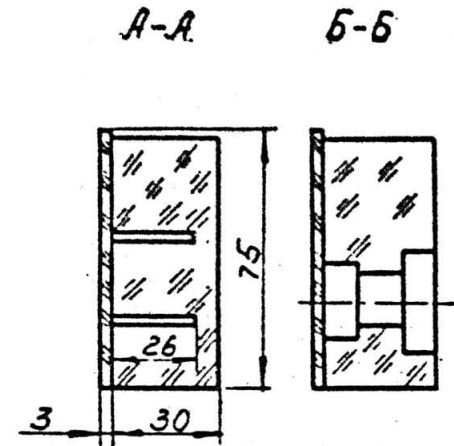
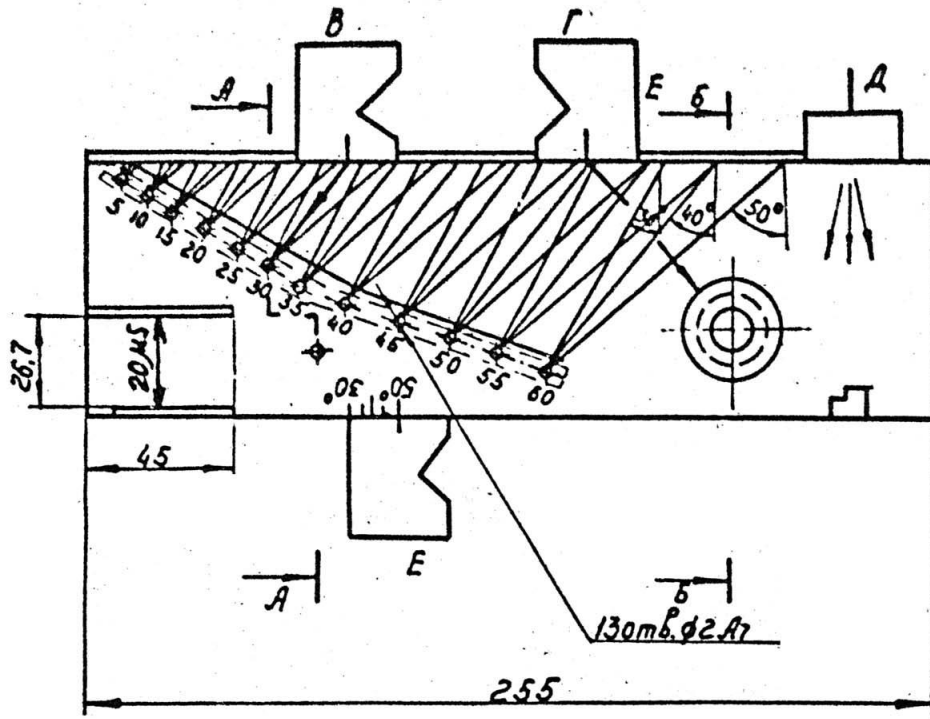
- условная чувствительность (в дБ)
- проверка мертвой зоны, угла ввода, ширины диаграммы направленности
- проверка погрешности глубиномера

Назначение СО-3

- определение точки выхода, стрелы ПЭП
- отстройка от времени пробега УЗ в призме ПЭП

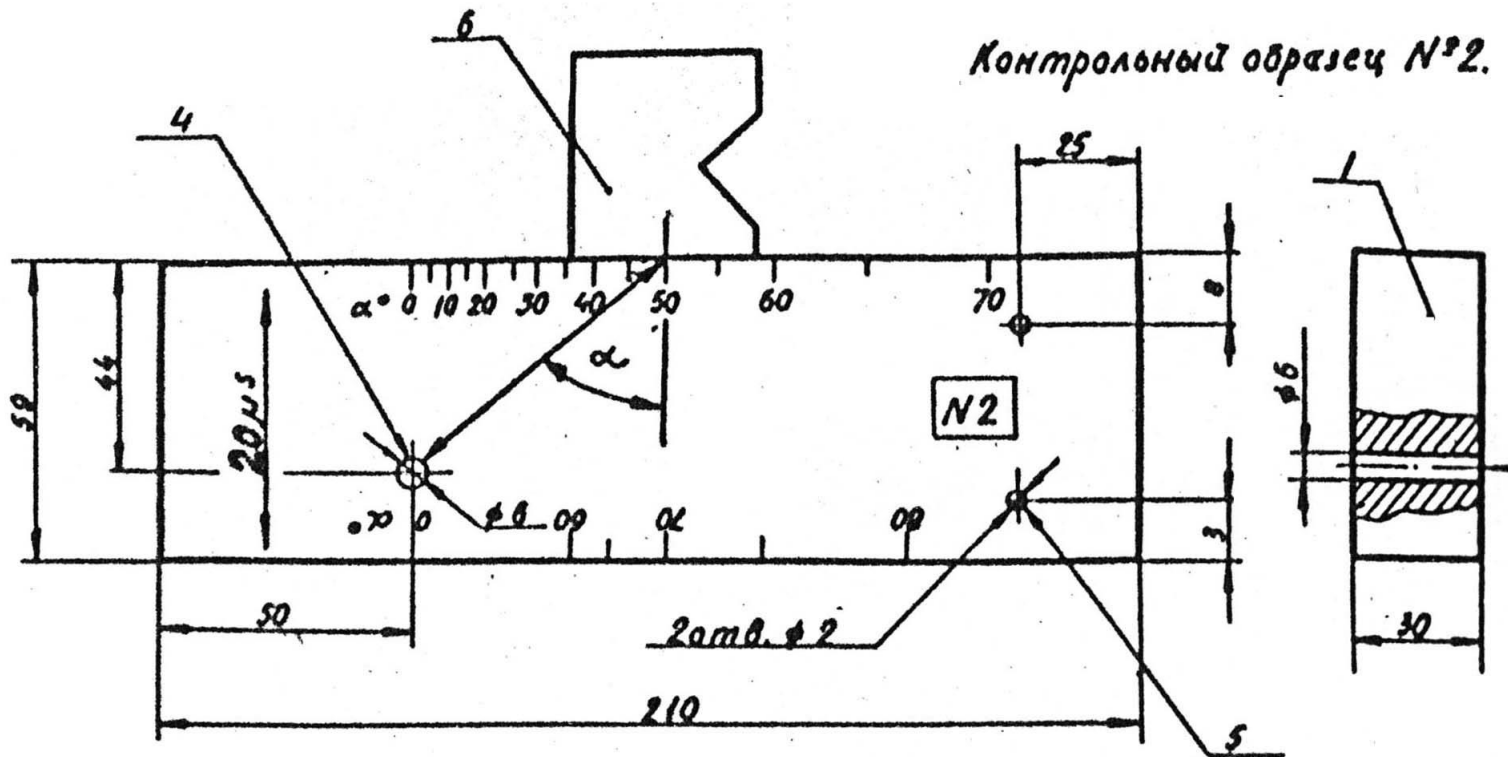


СО-1

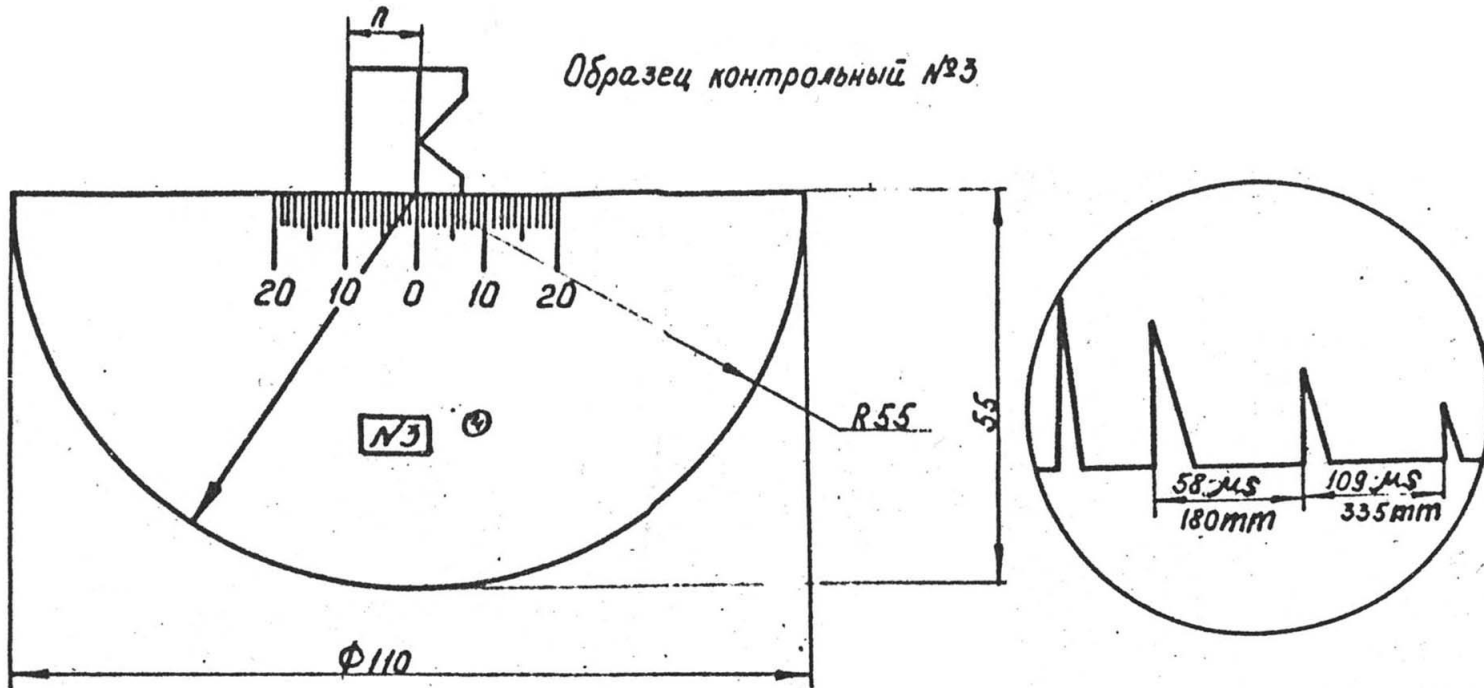


Контрольный образец №1

СО-2

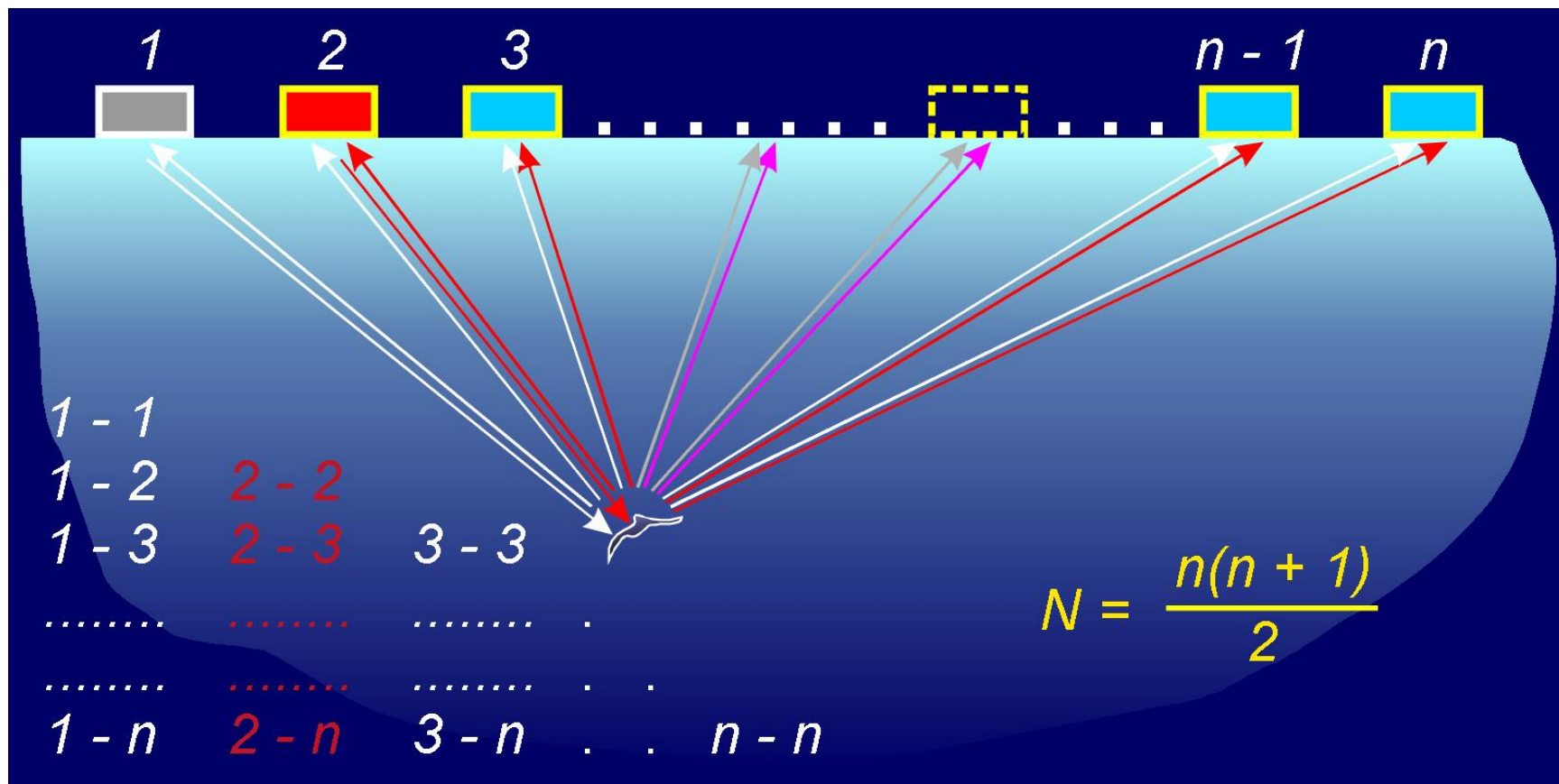


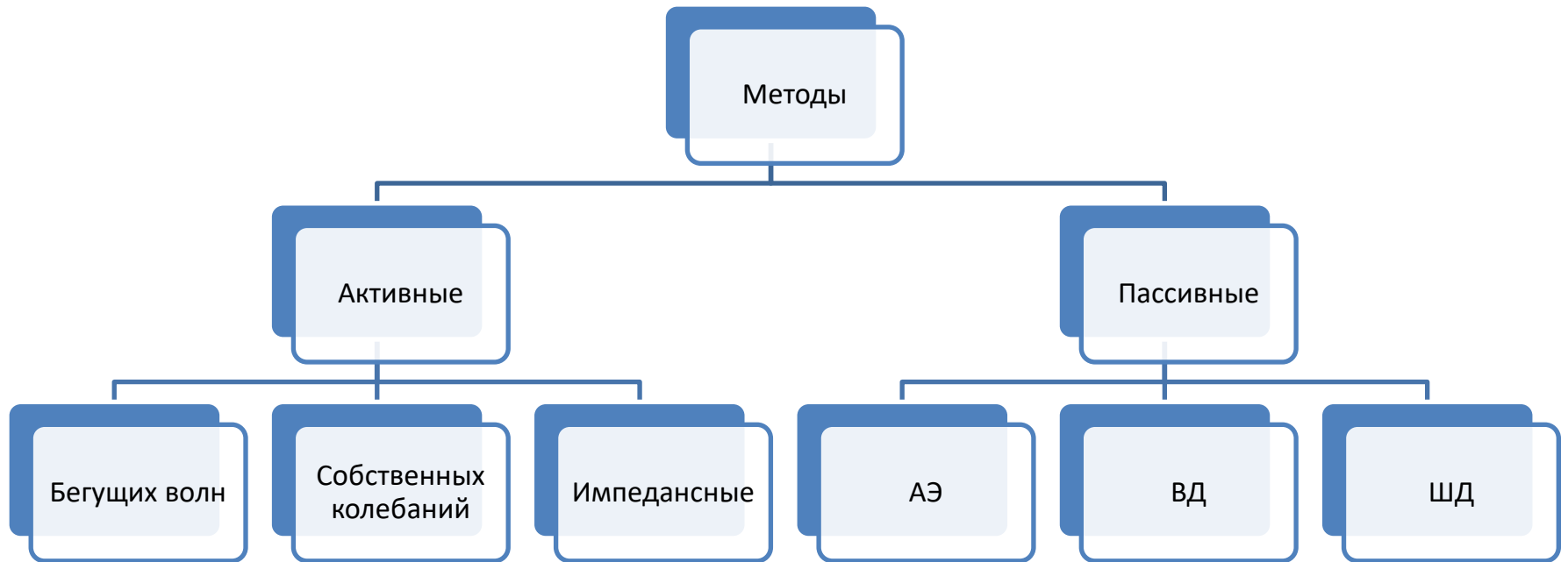
СО-3



Комбинационно синтезированная апертура (SAFT-C)

Каждая точка томограммы – сумма N эхосигналов от точки сечения





Пассивные методы

- **Акустико-эмиссионный (АЭ)**

регистрация упругих волн, возникающих в результате акустической эмиссии (излучение упругих волн в результате внутренней динамической локальной перестройки структуры материала ОК)

- **Вибрационно-диагностический (ВД)**

измерение вибрации какого-либо узла или детали

- **Шумодиагностический (ШД)**

анализ спектра шумов работающего механизма

АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ

- **Методы бегущих волн (отражения, прохождения, комбинированные)**

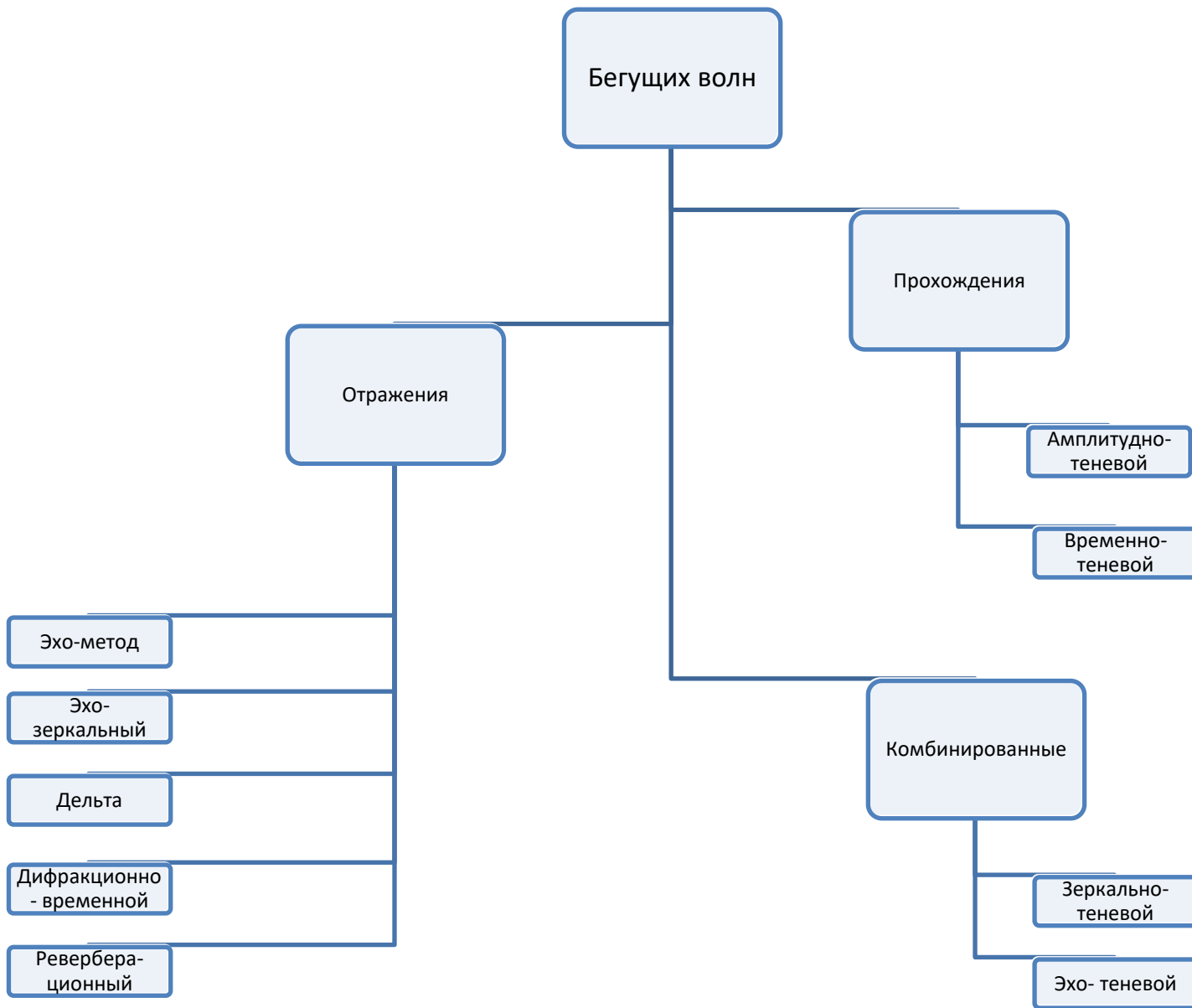
основаны на свойствах бегущих волн направленно распространяться в средах в виде лучей и отражаться от границ сред или несплошностей, обладающих другими акустическими свойствами

- **Методы собственных колебаний (свободных и вынужденных)**

основаны на возбуждении в ОК вынужденных или свободных колебаний и измерении их параметров: собственных частот и величины потерь

- **Импедансные**

информативный параметр – механический импеданс ОК в зоне его контакта с преобразователем



Методы бегущих волн

- **Отражения**

анализ отражения импульсов упругих волн от неоднородностей или границ ОК

- **Прохождения**

анализ влияние параметров ОК на характеристики прошедших через него волн

- **Комбинированные**

оценка влияния параметров ОК как на отражение, так и на прохождение упругих волн

Методы отражения

- **Эхо – метод**

прозвучивание ОК короткими импульсами и прием отраженных от несплошности эхосигналов

- **Эхо – зеркальный метод**

прозвучивание шва двумя идентичными наклонными ПЭП, расположенными с одной стороны шва и синхронно перемещающимися

- **Дельта – метод**

регистрация дифрагированных волн, переизлученных краями несплошности

- **Дифракционно - временной метод**

прием волн, возникающих в результате рассеяния на верхнем и нижнем кончиках несплошности

- **Реверберационный метод**

оценка времени объемной реверберации в ОК

Методы прохождения

- **Теневой метод (амплитудно-теневой)**

регистрация уменьшения амплитуды прошедшей волны (сквозного сигнала) под влиянием несплошности

- **Временной теневой метод**

измерение запаздывания импульса, вызванного огибанием несплошности

Комбинированные методы

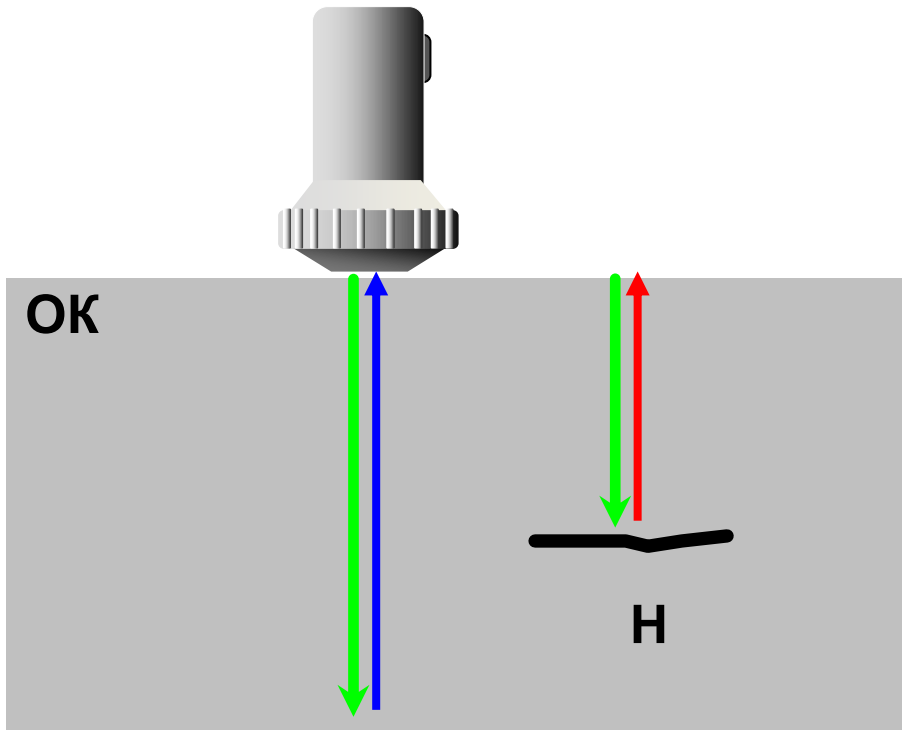
- **Зеркально – теневой**

признак обнаружения несплошности – ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности

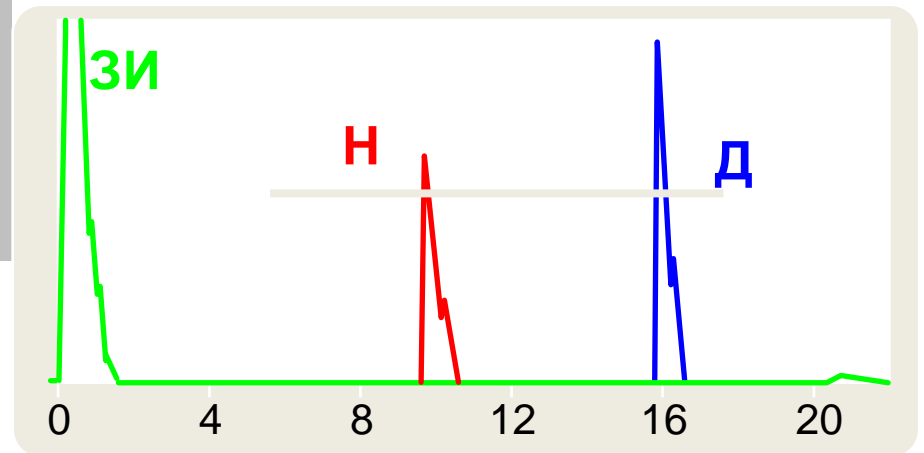
- **Эхо – теневой**

анализ как прошедших, так и отраженных волн

Эхо - метод



ЗИ - Зондирующий импульс
Н - Сигнал от несплошности
Д - Донный сигнал



Эхо - метод

Излучаемые в изделие импульсы УЗ волн называют зондирующими. Дефектоскоп посылает их через определенные промежутки времени. Зондирующий импульс ультразвуковых колебаний отражается от противоположной (донной) поверхности изделия и, возвращаясь, частично попадает на приемный пьезоэлемент преобразователя. На экране дефектоскопа возникает донный сигнал. При наличии несплошности импульс ультразвуковых колебаний отразится от него раньше, чем от донной поверхности. Между зондирующим и донным сигналами возникает промежуточный – импульс от несплошности, который и является признаком наличия несплошности.

Преимущества и недостатки эхо-метода:

Преимущества:

- Односторонний доступ
- Наибольшая чувствительность к выявлению внутренних несплошностей
- Высокая точность определения координат несплошностей

Недостатки:

- Низкая помехоустойчивость к наружным отражателям
- Сильная зависимость амплитуды сигнала от ориентации плоскостной несплошности
- Наличие мертвой зоны

Преимущества и недостатки эхо-зеркального метода:

Преимущества:

- Выявление вертикально ориентированных несплошностей
- Неплохая помехоустойчивость

Недостатки:

- Наличие механической связи между ПЭП
- Требуется большая зона поверхности сканирования
- Наличие зоны непроиззвучивания, примыкающей к донной поверхности, из-за невозможности сближения ПЭП друг с другом

Преимущества и недостатки дельта метода:

Преимущества:

- Пониженный уровень шумов
- Высокая чувствительность к вертикальным трещинам и непроварам в швах
- Определяет степень остроты кончика несплошности (отличие трещины от несплошностей другого типа)

Недостатки:

- Необходимость зачистки шва
- Сложность расшифровки принятых сигналов при контроле соединений толщиной 15 мм и менее
- Трудности в оценке величины несплошностей
- Ограничение по глубине

Преимущества и недостатки теневого метода:

Преимущества:

- Слабая зависимость амплитуды сигнала от ориентации несплошности (уверенное обнаружение наклонных несплошностей, не дающих прямого отражения при эхо-методе)
- Высокая помехоустойчивость
- Отсутствие мертвой зоны

Недостатки:

- Необходим двусторонний доступ к изделию
- Сложность ориентации ПЭП относительно центральных лучей диаграммы направленности
- Более низкая чувствительность (в 10..20 раз) по сравнению с эхо-методом

Преимущества и недостатки зеркально-теневого метода:

Преимущества:

- Односторонний доступ
- Более уверенное по сравнению с теневым методом обнаружение несплошностей, расположенных в корне шва
- Эффективен при поиске грубых несплошностей в материалах с высоким затуханием ультразвука и уровнем шумов

Недостатки:

- Более низкая чувствительность (в 10..20 раз) по сравнению с эхо-методом

Способы акустического контакта

- Контактный способ
- Иммерсионный способ
- Щелевой способ
- Сухой контакт
- Сухой точечный контакт
- Бесконтактный способ

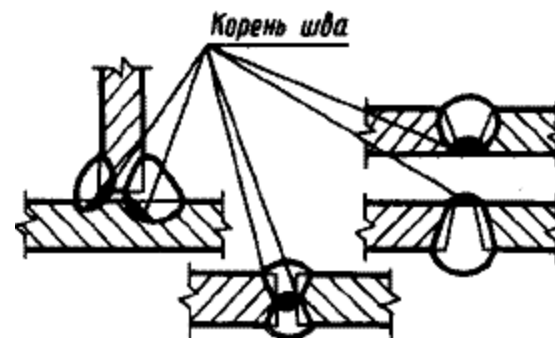
Контроль соединений

- ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»;
- РД 34.17.302-97 «Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Основные положения (ОП 501-ЦД-97)»;
- ВСН 012-88 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов»;
- РД РОСЭК 001-96 «Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения»;
- РД РОСЭК-02-008-96 «Лифты пассажирские, больничные, грузовые, неразрушающий контроль. Основные положения»;
- РД-08.00-60.30.00-КТН-046-1-05 «Руководящий документ. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов»;
- СТО Газпром 2-2.4-083-2006 «Инструкция по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов»;
- СТО 0022—0256-00-5-2005 «Швы стыковых и угловых сварных соединений сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика ультразвукового контроля»;
- РДИ 38.18.016-94 «Инструкция по ультразвуковому контролю сварных соединений технологического оборудования»

Контроль соединений

Существует три основных вида сварки металлов:

- плавлением;
- давлением
- трением



Дуговая сварка стыковых соединений – наиболее распространенный способ сварки плавлением. Свариваемые кромки располагаются на некотором расстоянии друг от друга и промежуток заполняют металлом электрода, плавящимся под действием электрической дуги. Участок, свариваемый первым, называют **корнем**. Здесь кромки соединений располагают возможно близко друг к другу.

Корень шва (ГОСТ 17659-2009) - часть сварного шва, наиболее удаленная от его лицевой поверхности.

При **односторонней сварке** (шов с V-образной разделкой) корень располагается в нижней части шва. **Корневой** частью шва считают слой толщиной в 1/3 его толщины, но не более 5 мм.

При **двусторонней сварке** (швы с X-образной или K-образной разделкой) корень располагается в средней части шва.

Типы соединений по ГОСТ 17659-2009

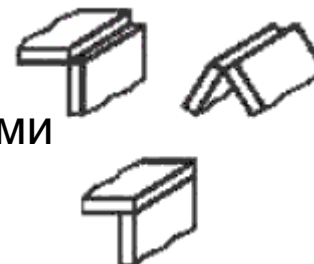
•Стыковое соединение

тип соединения, при котором детали лежат в одной плоскости и примыкают друг к другу торцевыми поверхностями



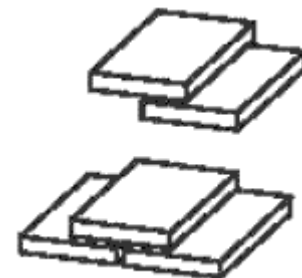
•Угловое соединение

тип соединения, при котором угол между поверхностями двух деталей в месте примыкания кромок свыше 30°



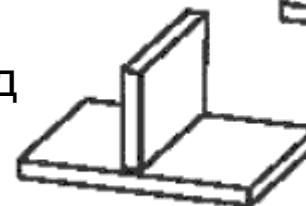
•Нахлесточное соединение

тип соединения, при котором детали параллельны друг другу и частично перекрывают друг друга



•Тавровое соединение под прямым углом

тип соединения, при котором детали сопрягаются под прямым углом (образуя Т-образную форму)



•Тавровое соединение под острым углом

тип соединения, при котором деталь примыкает к другой под острым углом



Типы соединений по ГОСТ 17659-2009

•Торцовое соединение

тип соединения, при котором угол между поверхностями двух деталей в месте примыкания кромок составляет от 0° до 30°

•Параллельно соединенные

тип соединения, при котором детали параллельны друг другу, например при плакировании взрывом

•Крестообразное соединение

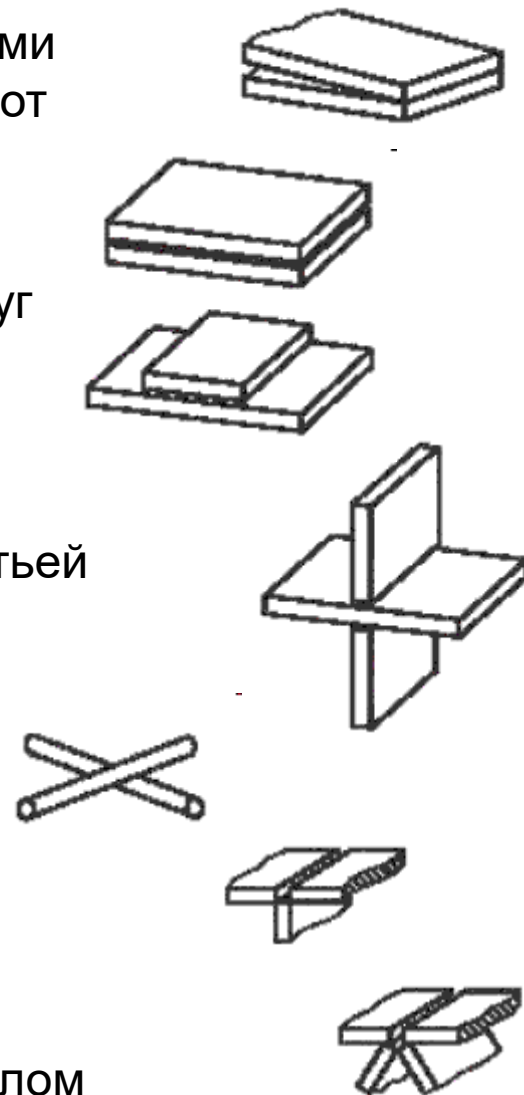
тип соединения, при котором две детали, лежащие в одной плоскости, примыкают под прямым углом к третьей детали, лежащей между ними (образуя двойную Т-образную форму)

•Перекрестное соединение

тип соединения, при котором две детали (например проволоки) лежат друг на друге пересекаясь

•Соединение нескольких деталей

тип соединения, при котором не менее трех деталей примыкают друг к другу под любым установленным углом



Практически все дефекты сварки удовлетворительно выявляются при УЗК:

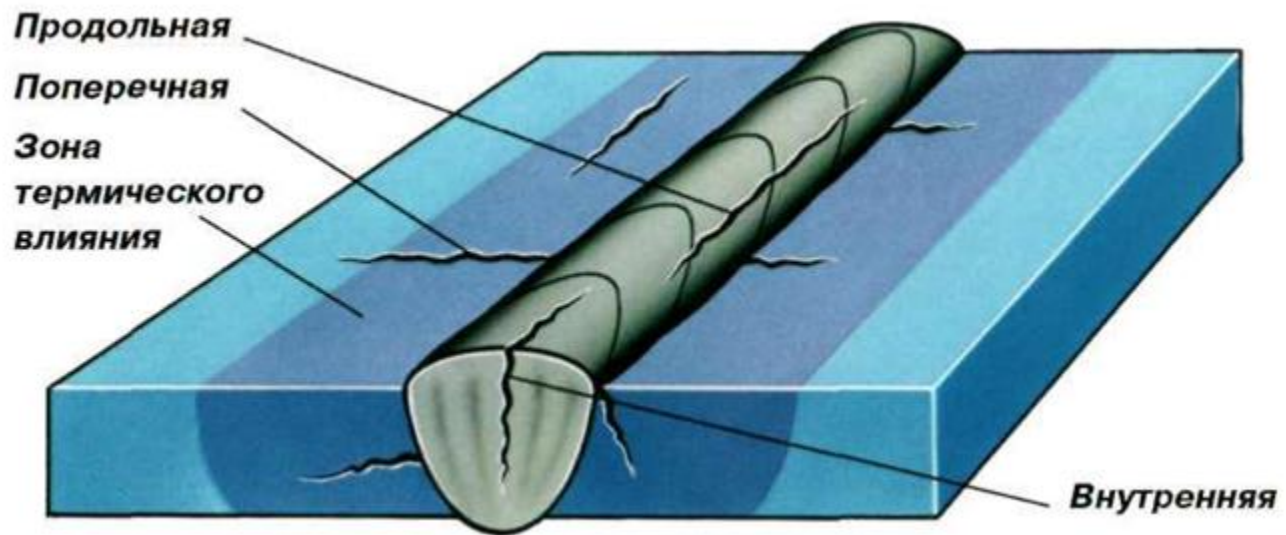
- **трещины** (несплошность, вызванная местным разрушением шва и его охлаждением);
- **газовая пора** (несплошность, образованная газами, задержанными в расплавленном металле. Имеет, как правило, сферическую форму);
- **твердое включение** (твердые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва);
- **несплавление** (отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва);
- **непровар** (несплошность по всей длине шва или на его отдельном участке, возникающая из-за неспособности расплавленного металла проникнуть внутрь соединения)

Плохо выявляются:

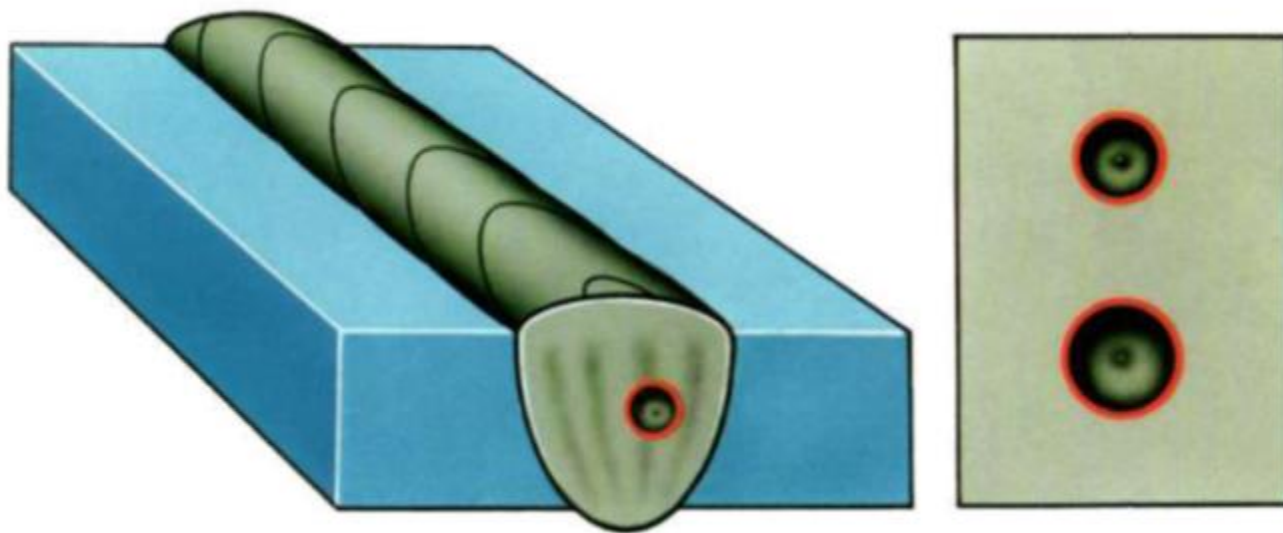
- **сильно сжатый непровар** в корне шва с хорошо подогнанными кромками;
- **слипания** (неокисленные непровары), возникающие при сварки давлением

Основной способ контроля стыковых сварных соединений – поперечной волной наклонным преобразователем. Преобразователь перемещается по ровной поверхности основного металла. Валик шва ограничивает приближение преобразователя к сварному шву.

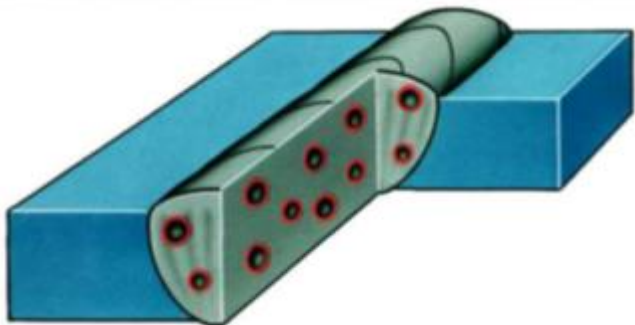
Трещины



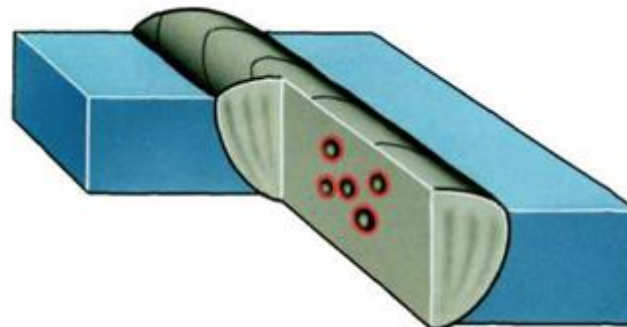
Газовая пора



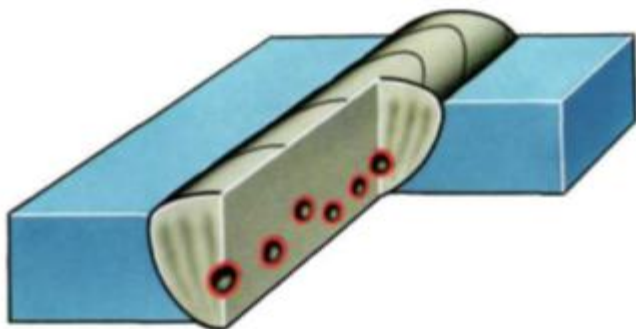
Равномерно распределенная пористость



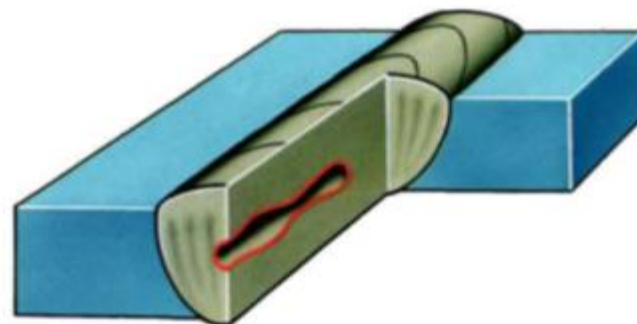
Скопление пор



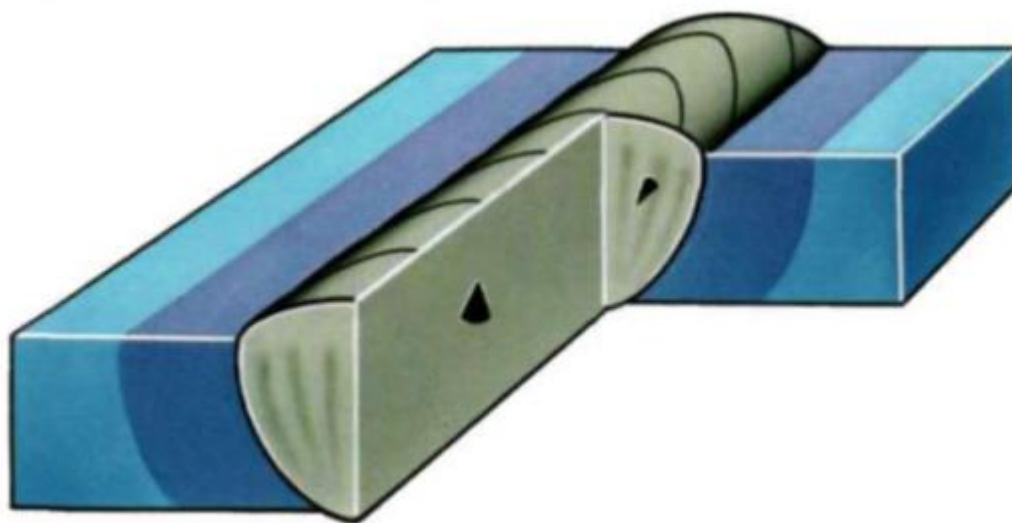
Цепочка пор



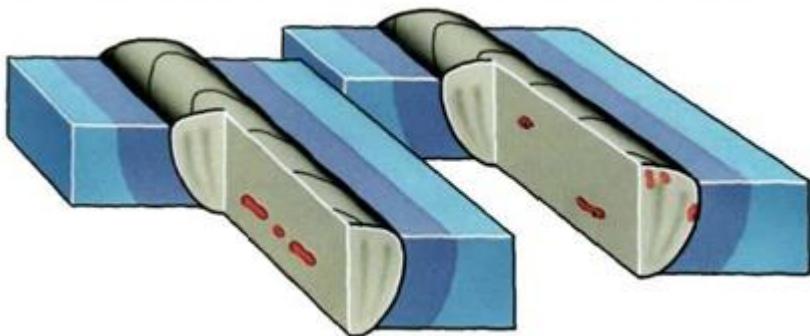
Продолговатая газовая полость



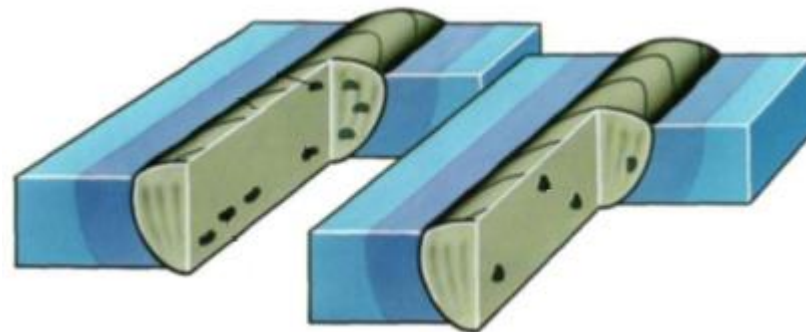
Твердое включение



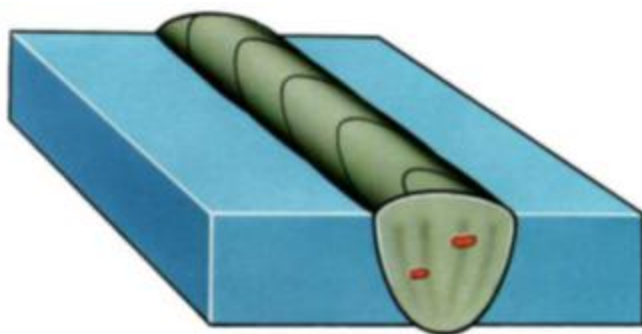
Шлаковое включение



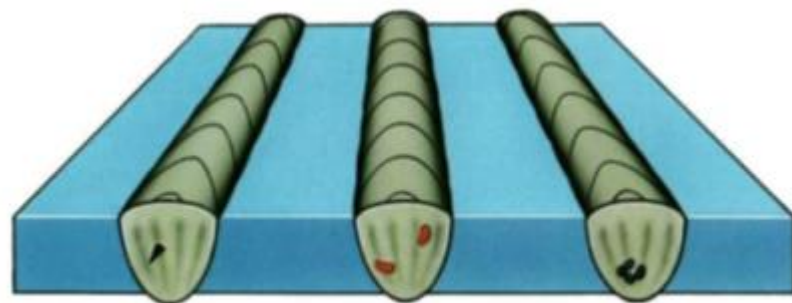
Флюсовое включение



Оксидное включение



Металлические включения – вольфрам, медь, др.



Несплавление

