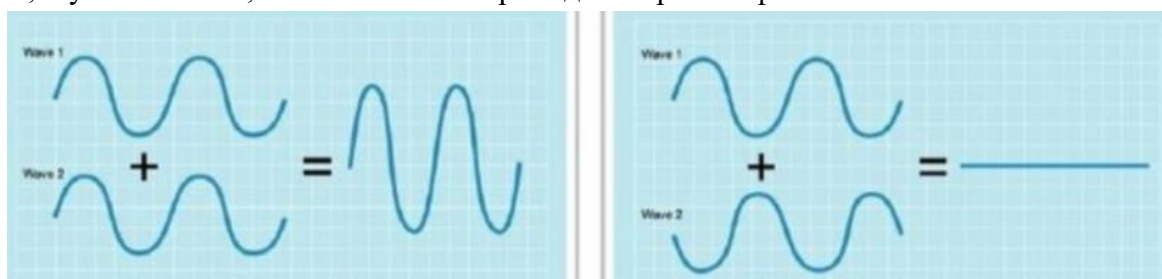


Формирование акустического поля

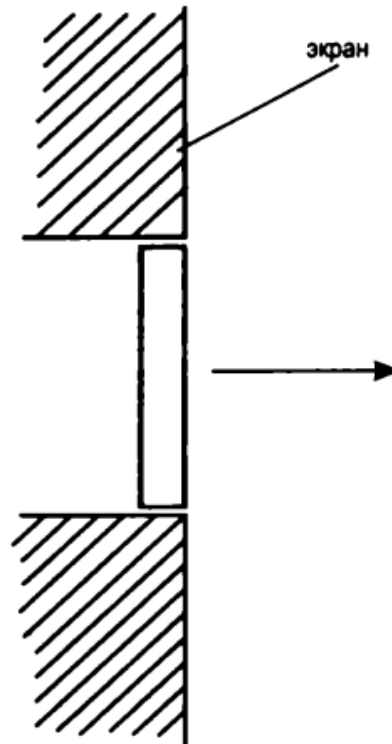
К волнам малой амплитуды может быть применен принцип наложения или принцип Гюйгенса, согласно которому каждое звуковое колебание развивается независимо от других одновременно происходящих акустических явлений. Если в какой-то среде возбуждается несколько колебательных процессов, то результирующее колебание можно найти путём суммирования его отдельных составляющих. При сложении векторных величин (то есть, имеющих направление, например, сил, скоростей) учитываются направления каждой составляющей, при сложении скалярных величин (например, давления) результат зависит только от амплитуды и фазовых соотношений всех составляющих.

Наложение двух или большего числа когерентных (то есть с независящей от времени разностью фаз) колебаний одинаковой частоты называется интерференцией. Результирующие колебания в любой точке среды оказываются равным алгебраической сумме всех колебаний, пришедших в эту точку. Поэтому амплитуда колебаний частиц среды в какой-либо точке возрастает, если отдельные колебания приходят в эту точку в фазе, и уменьшается, если колебания приходят в противофазе.



В результате, в среде возникает акустическое поле – область пространства, в которой существуют акустические колебания.

Стоит рассмотреть акустическое поле, которое создаёт излучатель в виде круглого поршня, окружённого жёстким экраном и работающий в режиме непрерывного монохроматического излучения.



Предположим, что вследствие колебаний такого излучателя прилегающий слой среды возбуждается и начинает колебаться с одинаковой фазой и амплитудой. В соответствии с геометрическими представлениями при этом должна формироваться плоская волна внутри ограниченного цилиндрической поверхности пространства. В действительности из-за интерференции картина поля будет существенно другая. Каждую частицу среды, колеблющуюся вследствие распространения первичной волны, можно рассматривать как точечный источник, излучающий вторичную элементарную сферическую волну. Результирующей бесконечного числа таких элементарных сферических волн, формирующих фактически существующую волну, является огибающая всех вторичных волн.

Акустическое поле вблизи излучателя вследствие интерференции имеет сложную структуру с чередующимися минимумами и максимумами звукового давления как вдоль, так и поперек акустической оси излучателя.

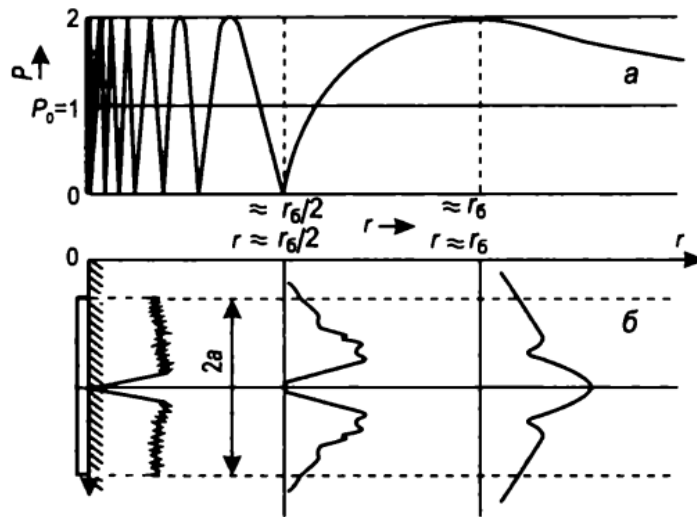


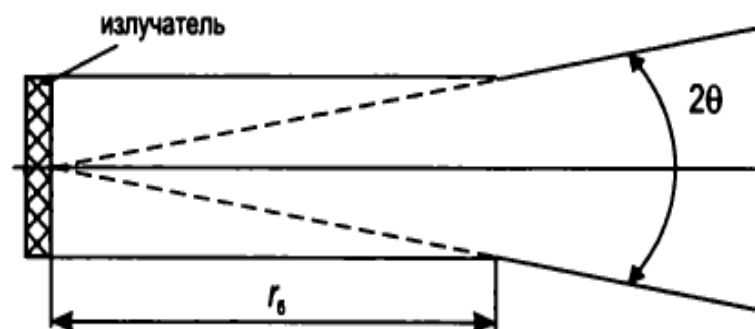
РИС. 4.31. Акустическое поле в ближней зоне излучателя вдоль (а) и поперек (б) оси

Эта зона немонотонного изменения акустического поля называется ближней зоной или зоной дифракции Френеля.

В ближней зоне более 80% излучённой энергии находится в пределах цилиндра, ограниченного краями излучателя, однако, по сечению цилиндра энергия распределена неравномерно. Граница ближней зоны при непрерывном излучении ультразвука определяется формулой:

$$r_0 = \left(\frac{4a^2 - \lambda^2}{4\lambda} \right), \text{ а при } \lambda \ll a \text{ } r_0 = \frac{a^2}{\lambda}$$

За пределами ближней зоны начинается дальняя зона излучателя или зона дифракции Фраунгофера. В этой зоне звуковое давление монотонно убывает с увеличением расстояния от излучателя. В дальней зоне поле имеет вид лучей, выходящий из центра излучателя.



Линия, соединяющая точки максимальной амплитуды волны в дальней зоне и ее продолжение в ближней зоне, называется акустической осью. В однородной среде луч, направленный вдоль акустической оси, называется центральным лучом.

На расстоянии ($r > 3r_0$) функция, описывающая изменение давления и звуковой волне с расстоянием, приближённо следует закону

$$p = |P_0 2 \sin(\pi a^2 / 2\lambda r)| \approx P_0 \pi a^2 / \lambda r.$$

Последнюю формулу можно переписать в виде:

$$p = P_0 \pi r_0^2 / r = P_0 S_a / \lambda r.$$

где S_a – площадь излучателя.

Как видно, на большом расстоянии давление монотонно убывает обратно пропорционально расстоянию.

Акустическое поле в дальней зоне графически описывается диаграммой направленности, показывающей изменение звукового давления в зависимости от угла между направлением луча и акустической осью на постоянном расстоянии от излучателя.

Диаграмма направленности не зависит от расстояния до излучателя.

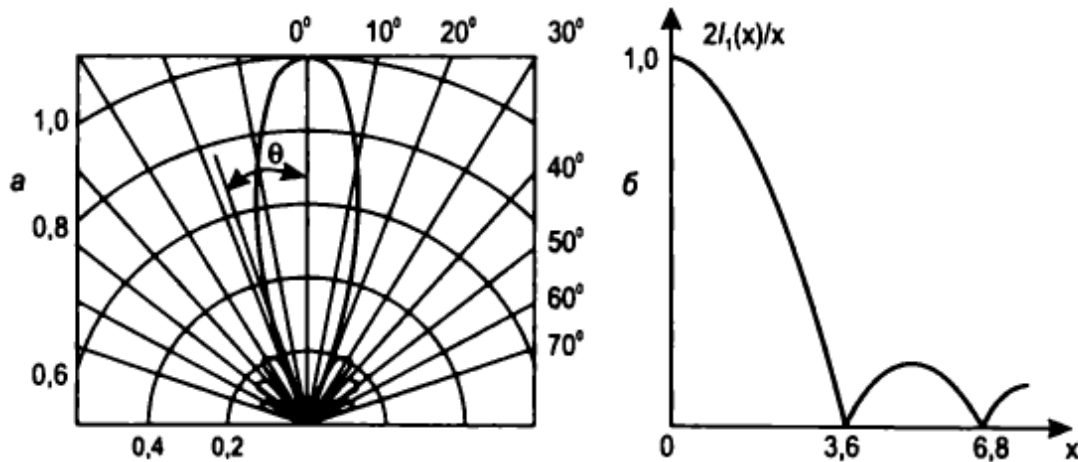


РИС. 4.32. Диаграмма направленности поля излучения круглого излучателя в полярных (а) и в декартовых (б) координатах

Центральная часть диаграммы направленности, в пределах которой амплитуда поля уменьшается от единицы до нуля, называется основным лепестком. В пределах основного лепестка сосредоточенно около 85% энергии поля излучения. Вне основного лепестка диаграмма направленности имеет вид боковых лепестков. Уровень боковых лепестков определяется отношением поля на акустической оси к максимальной величине поля вне основного лепестка.

В практике контроля иногда определяют угол раскрытия основного лепестка на уровень, отличающийся от нулевого. На уровне 20дБ (или уровень 0,1 от максимума)

$$\theta_{0,1} = \arcsin 0,54\lambda/a.$$

На уровне 12дБ (или уровень 0,25 от максимума)

$$\theta_{0,25} = \arcsin 0,46\lambda/a.$$

На уровне 6дБ (или уровень 0,5 от максимума)

$$\theta_{0,5} = \arcsin 0,35\lambda/a.$$

На уровне 3дБ (или уровень 0,7 от максимума)

$$\theta_{0,7} = \arcsin 0,25\lambda/a.$$

Для преобразователей, имеющих симметричную диаграмму направленности, удвоенный угол раскрытия основного лепестка (2θ) называется шириной основного лепестка диаграммы направленности. Для преобразователей с несимметричной диаграммой, направленности (например, для наклонного ПЭП – плоскости падения)

ширина основного лепестка диаграммы направленности определяется путём сложения углов раскрытия по разные стороны от акустической оси.

Следует иметь в виду, что приведённые формулы определяют параметры основного лепестка поля излучения.

Из приведённых выражений видно, что основной лепесток диаграммы направленности излучателя сужается с увеличением произведения частоты f и размера преобразователя a .

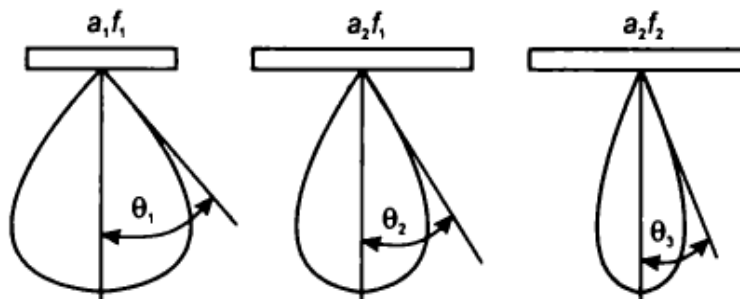
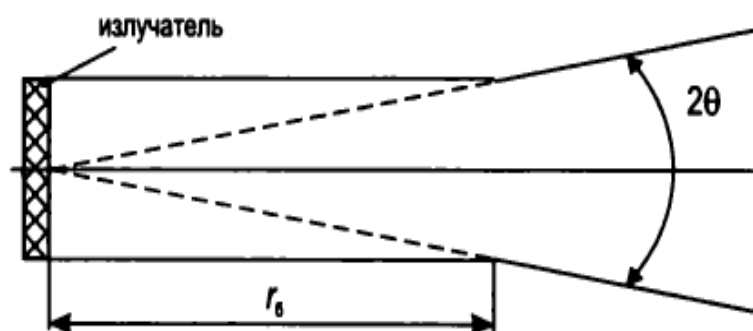


РИС. 4.33. Влияние параметра af на угол раскрытия θ основного лепестка диаграммы направленности круглого излучателя: $a_2 > a_1; f_2 > f_1$

Пример:

$f=2,0$ МГц	$2a=24$ мм	$\theta=8^\circ 40'$
$f=4,0$ МГц	$2a=24$ мм	$\theta=4^\circ 20'$
$f=2,0$ МГц	$2a=12$ мм	$\theta=17^\circ 30'$
$f=4,0$ МГц	$2a=12$ мм	$\theta=8^\circ 40'$

При схематическом изображении акустическое поле излучателя обычно представляют в виде цилиндра или усечённого конуса в ближней зоне и в виде конуса с вершиной в центре излучателя в дальней зоне.



Вершина конуса имеет угол 2θ , равный ширине основного лепестка диаграммы направленности. В конце ближней зоны имеется фокус звукового пучка. Звуковой пучок так существенно уже, чем диаметр излучателя, амплитуда звукового давления здесь в два раза превышает среднее звуковое давление непосредственно у излучателя.

Действительное поле, создаваемое пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) ультразвукового дефектоскопа, отличается от рассмотренного расчётного поля. При рассмотрении простейших волн мы пренебрегли связью, существующей между различными типами волн. Так, в поле продольной волны имеются так же составляющие

сдвиговой и поверхностной волн. Помимо этого, до сих пор мы рассматривали поле идеального круглого излучателя, работающего в режиме непрерывных колебаний, однако, основной режим работы в дефектоскопии – импульсный.

Сложная структура поля, особенно для ПЭП с большим $\frac{\alpha}{\lambda}$, обусловлена наличием элементарных волн с большой разницей фаз, приходящих с краевой области излучателя. Если бы возбуждение ПЭП к краю удалось уменьшить, то поле было бы равномернее.

В отличие от теоретического поршневого излучателя, у обычного ПЭП пьезопластина возбуждается неравномерно – по краям амплитуда ее колебаний меньше, чем в середине. Если создать ПЭП с колоколообразным возбуждением, то неравномерности поля почти исчезают.

Большое влияние на звуковое давление оказывает импульсное возбуждение излучателя. На рисунке видно, что импульсы от различных частей излучателя приходят в точку наблюдения в разное время, следовательно, интерференции не возникает.

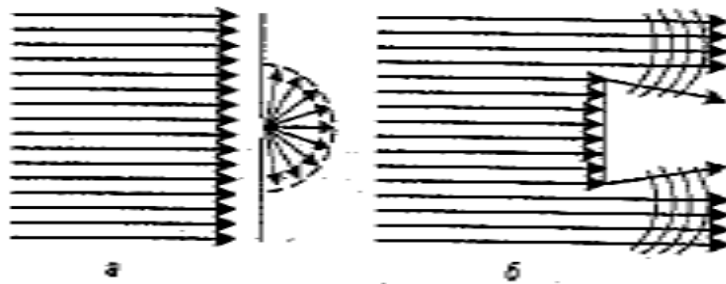
После того, как был рассмотрен физический принцип работы ультразвукового контроля следует рассмотреть способы его применения, то есть, какие методы акустического контроля существуют.

Дифракция ультразвуковых волн

В основе большинства способов контроля, которые применяются в практической ультразвуковой дефектоскопии, лежит использование законов так называемое геометрической оптики. Это означает, что звуковые лучи распространяются по прямым линиям, а если попадают на границу раздела, то на ней происходят явления, описываемые законом Снеллиуса. Однако существуют такие области на границах раздела двух сред (в частности, области на несплошностях в объекте контроля), а также такие условия взаимодействия волны с объектом, когда возникающие явления невозможно объяснить только законами геометрической оптики. Так, если при распространении колебаний на их пути встречается звуконепроницаемое препятствие, то по законам геометрической оптики за препятствием должна возникнуть область, куда не проникает звуковое поле, то есть область звуковой тени. Однако на самом деле, в зависимости от соотношения размеров этого препятствия и длины волны на некотором расстоянии за препятствием в области геометрической тени обнаруживаются звуковые волны, то есть звук как бы огибает преграду. Это свойство звуковых волн представляет собой одно из проявлений особенности волновых процессов, получившее название «дифракция».

Для объяснения этого явления воспользуемся принципом Гюйгенса, в соответствии с которым каждую частицу среды, колеблющуюся в первичной волне можно рассматривать как точечный источник, излучающий вторичную элементарную сферическую волну. Результирующей бесконечного числа таких элементарных сферических волн, дающей фактически существующую волну, является огибающая всех вторичных волн.

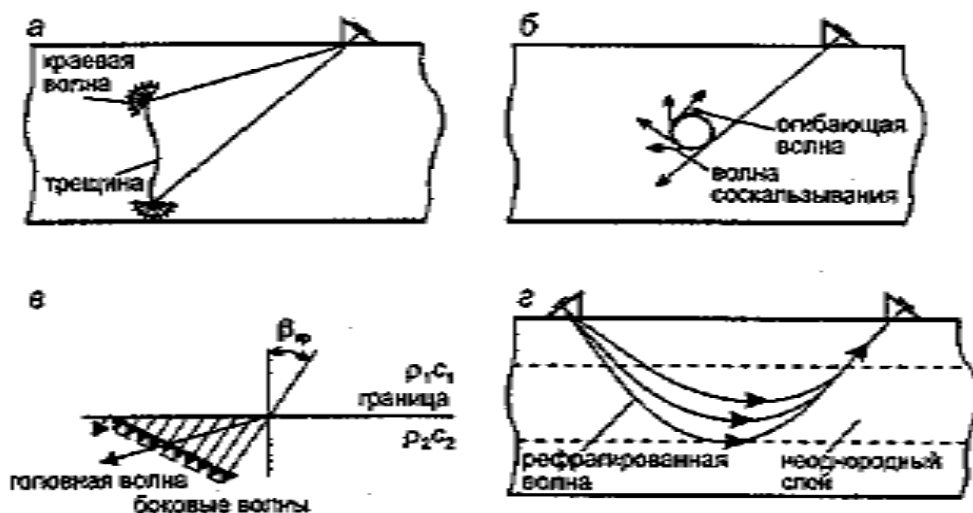
Так, если плоская волна встречает на своём пути звуконепроницаемую преграду с точечным отверстием, то она распространяется по другую сторону преграды в виде сферических волн, расходящихся от этого отверстия, как от нового точечного источника. Если на пути распространения колебаний имеется препятствие, то колеблющиеся частицы сред, расположенные по краям препятствия создают сферические волны, которые формируются в зоне геометрической тени препятствия.



Дифракция проявляется в очень сильной степени, если размеры преграды невелики, по сравнению с длиной звуковой волны. Если размеры препятствия равны длине волны или меньше ее, то лучи огибают препятствие, несколько рассеиваются и значительного отражения в этом случае не наблюдается.

Ранее дифракцию определяли, как явление частичного огибания волнами препятствий, находящихся на пути их распространения. Однако в настоящее время этот случай рассматривают лишь как одно из проявлений дифракции. В общем случае в современной ультразвуковой дефектоскопии под дифракцией понимают такие особенности распространения волн и их взаимодействия с границами разделов, которые могут быть объяснены с законами геометрической оптики.

Для практической дефектоскопии наибольшее значение имеют 4 случая или 4 типа дифракции.



а. Дифракция первого типа возникает при взаимодействии волны с острыми краями несплошностей, в частности, с краями трещин. В этом случае край трещины становится вторичным излучателем, каждый элемент которого является точечным источником, возбуждающим сферическую волну. Вследствие этого трещина, даже неблагоприятно ориентированная по отношению к ультразвуковому лучу, при достаточной чувствительности может быть выявлена при контроле.

б. Второй тип дифракции имеет место в тех зонах объектов, в которых лучи касаются гладких поверхностей. В этом случае формируются волны, огибающие поверхности тел, которые в свою очередь порождают дифракционные волны соскальзывания. Существуют методики, использующие этот тип дифракции для измерения периметра объемных дефектов. При этом сравнивается время прохождения сигнала, отраженного от несплошности, и дифрагированного сигнала, оббежавшего часть несплошности и соскользнувшего с нее.

в. Третьим типом дифракции называют явление, возникающее при падении волн на границу раздела двух сред или на свободную границу среды под первым, вторым или третьим критическим углами. При этом образуются головные волны, которые в свою очередь порождают семейство дифракционных боковых волн в обеих средах

г. Четвёртый типа дифракции возникает в тех случаях, когда в среде имеются слои с различными скоростями распространения волны. При наклонном падении волны на границе раздела таких слоёв лучи отклоняются от прямолинейного направления распространения. Это явление известно под названием рефракция. Этот тип дифракции нашёл практическое применение для изменения толщины поверхностно – закалённых слоёв металла, например, в валках холодной прокатки, в поверхностном слое которых скорость звука изменяется в зависимости от глубины.

Волны, обусловленные дифракцией, всегда присутствуют в контролируемом объекте. При отражении от плоскодонных либо объёмных дефектов возникают краевые волны, или волны обегания-соскальзывания, или головные и боковые волны. Чаще всего возникает совокупность дифрагированных волн нескольких типов. Вблизи свободной поверхности головные и боковые волны также присутствуют всегда, поскольку, под каким бы углом волны не излучались в твёрдое тело, вследствие конечных размеров преобразователей всегда найдутся, которые направлены вдоль и вблизи свободной поверхности. Однако при реализации обычных методов контроля, когда принимаемый сигнал соответствует геометрическому отражению от дефектов, импульсы дифрагированных волн вследствие неоптимального их излучения и приёма пренебрежимо малы и не принимаются во внимание.

Между тем, знание законов возбуждения и распространения дифрагированных волн позволяет решить ряд задач ультразвукового контроля, которые традиционными методами ультразвуковой дефектоскопии решить крайне сложно либо вообще нельзя. К ним можно отнести определение тип дефекта и измерение его размеров, выявление сигналов на фоне шума в некоторых сварных швах, измерение глубины закалённых слоёв и др.