

Техническое Описание Ультразвуковых Датчиков

Раздел “Техническое Описание” содержит краткий обзор принципов ультразвуковых исследований, учитываемых при разработке и использовании датчиков. В данном разделе рассмотрены следующие тематики:

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ
3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ
4. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ
5. АКТИВИЗАЦИЯ ДАТЧИКА
6. КАБЕЛИ

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

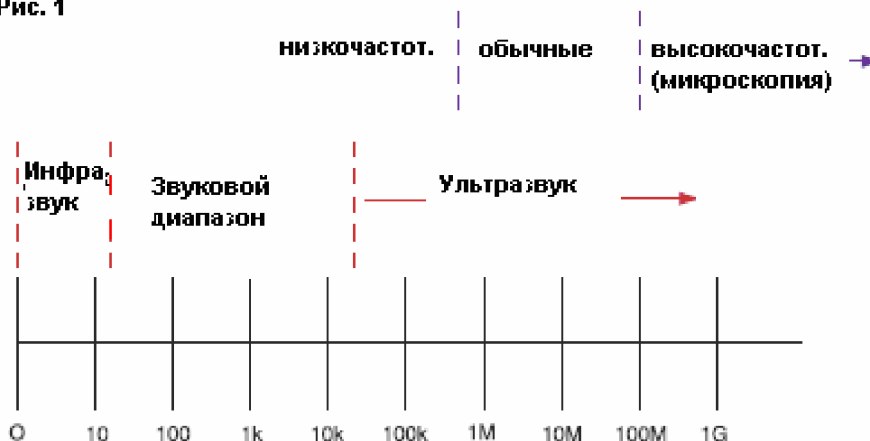
а. Что такое Ультразвук?

Звук с частотой, превышающей диапазон восприятия человеком (обычно 20КГц), называется ультразвуком. Тем не менее, в ультразвуковом неразрушающем контроле и толщинометрии используются звуковые волны в диапазоне от 100КГц до 50МГц. Принцип работы ультразвуковой и аудио волны одинаков, но ультразвуковая волна значительно короче. Это означает, что она может быть отражена от таких малых поверхностей, как дефекты внутри материала. Как раз это качество ультразвука позволяет использовать ультразвук для неразрушающего контроля.

На Рисунке 1 Акустический Спектр разбивается на три диапазона частот.

Ультразвуковой Диапазон далее разбивается на 3 участка.

Рис. 1

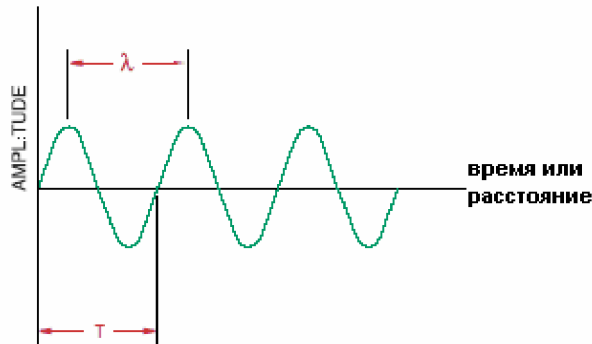


б. Частота, Период и Длина Волны

Ультразвуковые колебания по форме схожи с распространением световых волн. Тем не менее, в отличие от световой волны, которая может распространяться в вакууме, для распространения ультразвуковых волн требуется упругая среда подобная жидкости или

твердым телам. На Рисунке 2 отражены основные параметры незатухающей волны (нв): длина (λ) и полный цикл распространения волны (T).

Рис. 2



Число циклов, завершающихся за одну секунду, характеризуется частотой (f) и измеряется в Герцах (Гц);

- 1 цикл/секунду= 1 Гц
- 1000 циклов/секунду= 1 КГц
- 1,000,000 циклов/секунду= 1 МГц

Время, требующееся для завершения полного цикла – период (T) - измеряется в секундах. Отношение частоты и периода незатухающей волны приведено в Уравнении 1.

Eqn. 1 $f = 1/T$

с. Скорость и Длина Ультразвуковой Волны

Скорость распространения звука (с) в полностью упругом материале при одной температуре и давлении постоянна. Соотношение с, f, λ и T представлено Уравнение 2 и 3:

Eqn. 2 $\lambda = c/f$

Eqn. 3 $\lambda = cT$

λ = Длина Волны

c = Скорость Звука в Материале

f = Частота

T = Период времени

В Таблице 1, приведенной в конце документа указана скорость распространения продольных и поперечных волн в материалах, обычно подвергающихся ультразвуковому тестированию.

d. Распространение Волн и Движение Частиц

В большинстве методов ультразвуковых исследований применяются продольные и поперечные волны. Существуют так же другие волновые формы, включая поверхностные волны и волны Ламба.

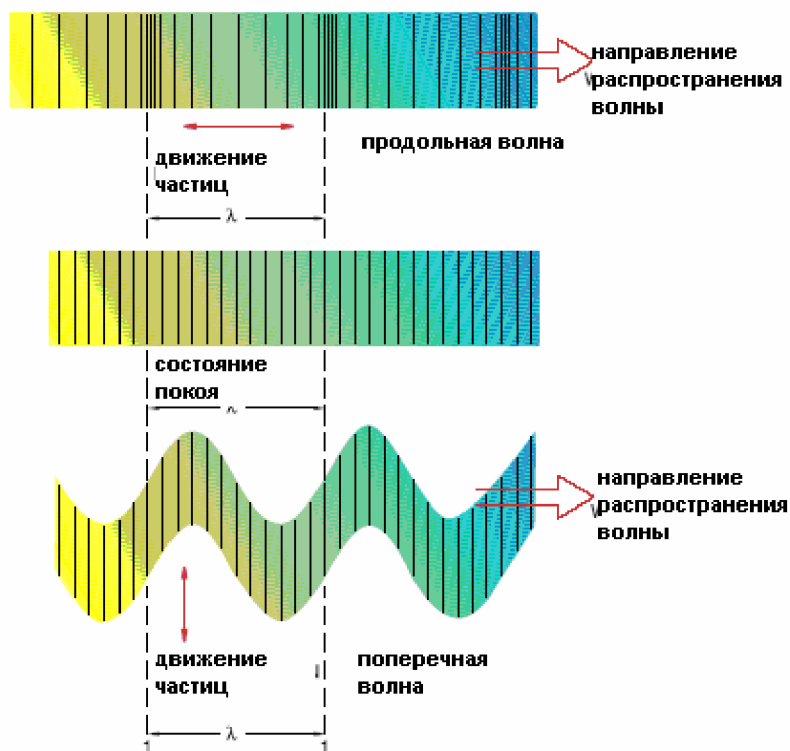
- Продольная волна – это волна сжатия, в которой движение частиц происходит в одном направлении с распространением самой волны.
- Поперечная волна – вид волнового движения, в котором частицы движутся поперечно к направлению распространения волны.

- Поверхностные волны (Релеевские волны) содержат эллиптически перемещаемые частицы и передается вдоль поверхности материала. Скорость распространения данных волн – около 90% скорости распространения поперечной волны, а глубина проникновения – около одной длины волны.

- Плоские волны (волна Лэмба) – комплексные вибрации, возникающие в материале толщиной менее одной длины ультразвуковой волны, проходящей сквозь него.

Рисунок 3 иллюстрирует движение частиц по отношению к распространению продольных и поперечных волн.

Рис. 3



е. Применение Ультразвука

При проведении неразрушающего ультразвукового контроля используются высокочастотные звуковые волны, пропускаемые в тестовый образец для получения информации об объекте без изменения или нанесения какого-либо повреждения. При проведении тестирования измеряются две величины – время пролета или время прохождения звуковой волны через материал и амплитуда принятого сигнала. Толщина материала может быть рассчитана исходя из значений времени пролета и амплитуды в соответствии со следующим отношением:

Eqn. 4 $T = ct_s/2$

T = Толщина Материала

c = Скорость звука в материале

t_s = Время Пролета

Величина относительного изменения амплитуды сигнала может быть использована в выявлении дефектов или измерении затухания звука в материале. Относительное изменение амплитуды сигнала обычно выражается в децибелах. Децибел -

логарифмическая величина отношения амплитуд двух сигналов, которая может быть получена исходя из следующего уравнения. Ниже приведен ряд необходимых формул;

Eqn. 5 $\text{dB} = 20\log_{10}(A_1/A_2)$

dB = Децибелы

A1 = Амплитуда 1 сигнала

A2 = Амплитуда 2 сигнала

$\frac{A_1}{A_2}$	Ratio	dB
$\frac{100\%}{70.71\%}$	1.4142	3
$\frac{100\%}{50\%}$	2	6
$\frac{100\%}{25\%}$	4	12
$\frac{100\%}{10\%}$	10	20
$\frac{100\%}{1\%}$	100	40

f. Чувствительность и Разрешение

- Чувствительность – это способность ультразвуковой системы определять отражатели (или дефекты) на определенной глубине в тестовом материале. Чем больше сигнал, отраженный от данных дефектов, тем более чувствительна система.
- Осевое разрешение – способность ультразвуковой системы производить одновременные и различные индикации от отражателей, расположенных примерно на одной позиции по отношению к звуковому пучку.
- Околоповерхностное разрешение – возможность ультразвуковой системы определять дефекты, расположенные близко к поверхности тестового образца.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ

a. Форма волны и спектр датчика

Форма волны датчика и спектральный анализ выполняются в соответствии с определениями и условиями проведения теста ASTM E1065. Обычно для частотного анализа в качестве единиц измерения используются МГц, микросекунды – для анализа формы волны и dB – для определения пика амплитуды. Рисунок 4 демонстрирует волну на уровне 14dB или 20% пика амплитуды. Форма волны в -40dB соотносится с 1% амплитудой пика. На Рисунке 5 представлен пик частоты, верхний и нижний предел - 6dB частот и МГц измерения частоты пропускания. Отношение между МГц полосой пропускания и длительностью прохождения волны представлено на Рисунке 6. Разброс на -40dB больше, так как 1% задний конец формы волны содержит очень небольшое

количество звуковой энергии и поэтому оказывает очень небольшое значение на анализ полосы пропускания. Из-за рассеивания, это наиболее подходящий вариант для точного определения формы волны за промежуток времени (микросекунды) и спектров в частотной области.

Рис. 4

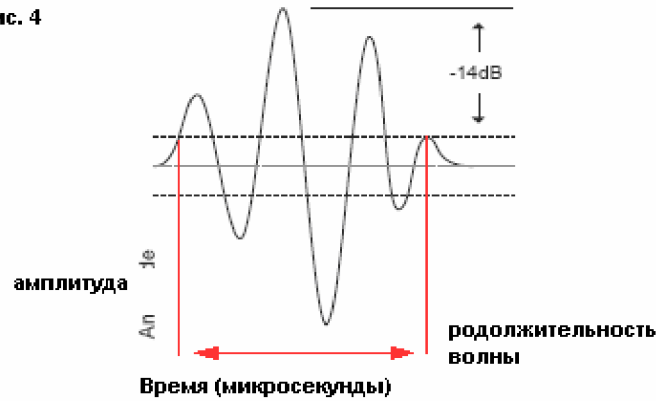


Рис.5

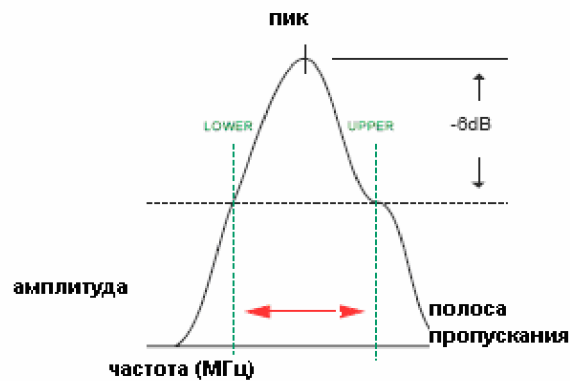
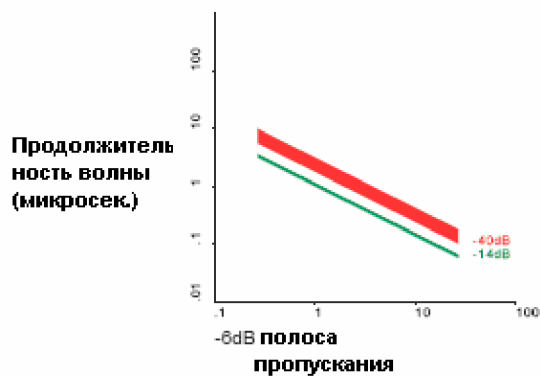


Рис. 6



Приблизительные соотношения, указанные на Рисунке 6 могут быть использованы при выборе датчика. На пример, если требуется $-14dB$ волна за одну микросекунду, какой следует выбрать датчик? На графике видно, что полоса пропускания от 1 до 1.2 МГц соотносится с примерно 1 микросекундой $-14dB$ протяженности длины волны. Принимая номинальный 50% фракционный широкополосный датчик, из уравнения получаем среднюю номинальную частоту от 2 до 2.4МГц. Поэтому, может быть использован датчик частотой 2.25МГц или 3.5МГц.

в. Акустический Импеданс, Коэффициент Отражения и Затухания

Акустический импеданс материала – это противодействие смещению его частиц звуком, рассчитываемое по формуле:

$$\text{Eqn. 6} \quad Z = \rho c$$

Z = Акустический Импеданс

c = Скорость Звука в Материале

ρ = Плотность Материала

Граница между двумя материалами с разным акустическим импедансом называется акустической границей. При нормальном падении звука в акустическую границу, часть звуковой энергии отражается, а часть продолжает свое перемещение в материале. Потеря энергии в dB при прохождении сигнала из среды 1 в среду 2 рассчитывается следующим образом:

$$\text{Eqn. 7a} \quad \text{dB loss} = 10 \log_{10} [4Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2]$$

Z_1 = Акустический импеданс Первого Материала

Z_2 = Акустический Импеданс Второго Материала

Потеря энергии dB эхосигнала в среде 1 при отражении от акустической границы со средой 2:

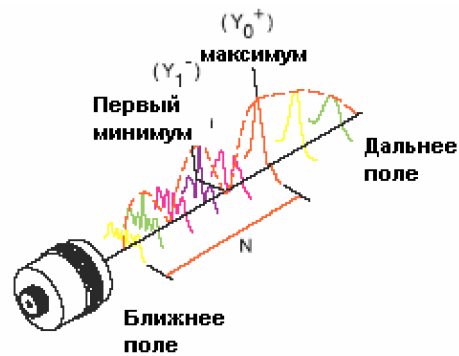
$$\text{Eqn. 7b} \quad \text{dB loss} = 10 \log_{10} [(Z_2 - Z_1)^2 / (Z_1 + Z_2)^2]$$

Пример: Потеря dB при распространении сигнала из воды ($Z = 1.48$) в 1020 сталь ($Z = 45.41$) составляет -9.13dB; Этот так же справедливо при прохождении сигнала из 1020 стали в воду. Потеря в dB отраженного эхосигнала в 1020 стали составляет -0.57dB; что так же соответствует потере энергии эхосигнала при распространении в обратном направлении. При $Z_2 < Z_1$ происходит переверт формы волны. В материале происходит увеличение затухания ультразвука. При отсутствии значительных отражателей, выделяются три варианта затухания: преломление, рассеивание или поглощение. Характеристики затухания ультразвука в материале имеют большое значение при выборе датчика для проведения исследования.

с. Звуковое Поле

Звуковое поле датчика разделяется на две зоны: поля в дальней и ближней зоне. Поле в ближней зоне – это участок, расположенный непосредственно перед датчиком, где амплитуда эхосигнала проходит несколько серий максимумов и минимумов и заканчивается в последнем минимуме на расстоянии N от датчика.

Рис. 7



Положение последнего минимума определяет протяженность ближнего поля (N или Y_0) и является естественным фокусом датчика. Дальнее поле – площадь за N, где давление звукового поля ослабевает и стремится к нулю. Из-за существующих в ближнем поле различий, достаточно трудно точно оценить размер дефекта с помощью метода, основанного на измерении амплитуды. Протяженность ближнего поля напрямую зависит от частоты датчика, диаметра элемента и скорости звука в тестовом материале, как это видно из Уравнения 8:

Eqn. 8 $N = D^2 f / 4c$

Eqn. 8a $N = D^2 / 4\lambda$

N = протяженность Ближнего Поля

D = Диаметр Элемента

f = Частота

c = Скорость Звука в Материале

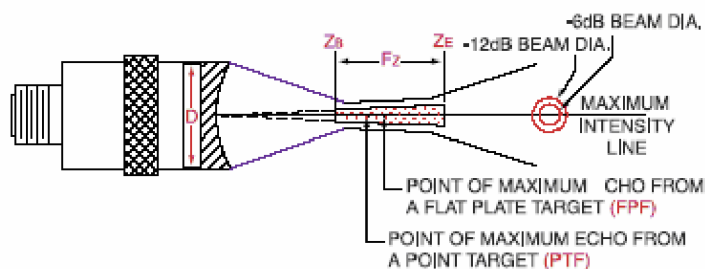
λ = Длина Волны

(В Таблице 2, приведенной в конце документа, Вы найдете численные значения протяженности ближнего поля в воде для различных комбинаций частот датчиков и диаметра элемента.)

d. Другие Параметры Звуковой Волны

Существуют различные параметры звукового поля, использующиеся при описании характеристик датчика. При выборе датчика, подходящего для проведения определенного исследования, помимо ближнего поля необходимо так же знать длину волны и фокусную зону. На Рисунке 8 дано графическое представление данных параметров:

Рис. 8



ZB = Начало Фокусной Зоны

Fz = Фокусная Зона

ZE = Конец Фокусной Зоны

D = Диаметр Элемента

Диаметр Звукового Луча

Чувствительность датчика определяется диаметром луча в интересующей точке. Чем меньше диаметр луча, тем больше количество энергии, отраженной от дефекта. Диаметр -6dB сигнала импульс - эхо в фокусе может быть рассчитано в соответствии с уравнением 9 или 9а. Для плоских датчиков используется Уравнение 9а с SF = 1

Eqn. 9 $BD(-6dB) = 1.02Fc/fD$

Eqn. 9a $BD(-6dB) = .2568DS_F$

BD = Диаметр Луча

F = Фокусное Расстояние

c = Скорость Звука в Материале

f = Частота

D = Диаметр Элемента

SF = Нормированное Фокусное Расстояние (Eqn. 14)

Фокусная Зона

Начальная и конечная точка фокусной зоны расположены в точке падения амплитуды сигнала импульс- эхо до - 6dB амплитуды в точке фокуса. Длина фокусной зоны вычисляется в Уравнении 10:

Eqn. 10 $F_Z = N * S_F^2 [2 / (1 + .5 S_F)]$

FZ = Фокусная Зона

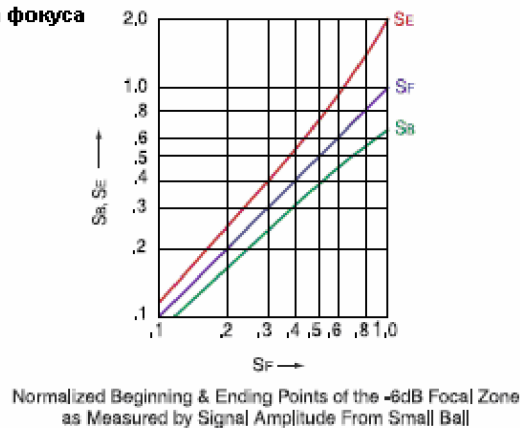
N = Ближнее Поле

SF = Нормированное Фокусное Расстояние (Уравнение. 14)

На рисунке 9 изображены нормализованная начальная (SB) и конечная (SE) точка фокусной зоны в -6dB исходя из фокусирующего фактора.

Рис. 9

-6dB зона фокуса

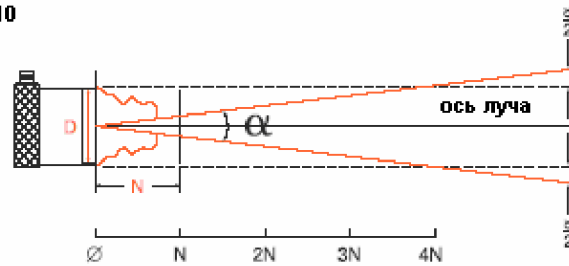


Рассеивание Луча и Половинный Угол

Все ультразвуковые волны дивергируют. Другими словами, для всех датчиков характерно рассеивание луча. На Рисунке 10 приведено упрощенное представление

звукового луча плоского датчика. В ближнем поле он имеет сужающуюся сложную форму. В дальнем поле волна дивергируется.

Рис. 10



Для плоских датчиков, как это указано на Рисунке 10, угол распространения луча - 6dB импульс – эхо рассчитывается в соответствии с Уравнением 11:

Eqn. 11 $\sin(\alpha/2) = .514c/fD$

$\alpha/2$ = Половина угла рассеивания луча между точками -6dB

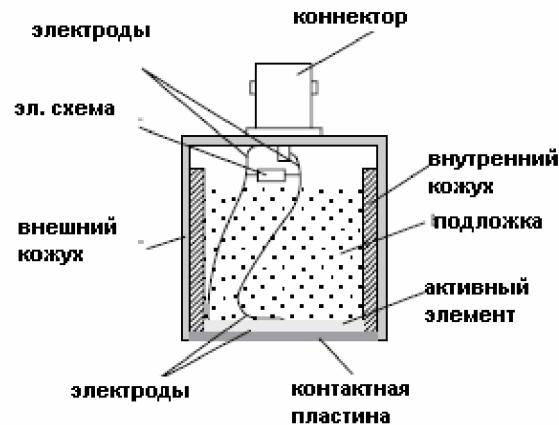
Как видно из этого уравнения, рассеивание луча может быть уменьшено при выборе датчика большей частоты или диаметра или того и другого.

3.КОНСТРУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

а.Что такое Ультразвуковой датчик?

Датчик – устройство, преобразующее один вид энергии в другой. Ультразвуковой датчик преобразует электрическую энергию в механическую (звуковая волна) и наоборот. Основными компонентами является активный элемент, гасящая подложка и контактная поверхность.

Рис. 11



в. Активный Элемент

Активный элемент, выполненный из пьезо- или сегнетоэлектрического материала, преобразует электрическую энергию (импульс возбуждения) в ультразвуковую. Обычно используют поляризованные керамические материалы, которые могут быть рассеяны различным образом для генерации различных волновых режимов. Такие новые материалы как пьезополимеры и композиты задействуются в измерениях для улучшения разрешающей способности датчика и системы.

с.Подложка

Подложка – обычно плотный материал с высоким коэффициентом затухания, контролирующей вибрацию датчика путем поглощения энергии, излучаемой внутренней поверхностью активного элемента. При совпадении акустического импеданса подложки и активного элемента датчик обладает высоким затуханием, хорошим диапазоном разрешений, но небольшой амплитудой сигналов. В случае несоответствия акустического импеданса элемента и подложки, обратно в тестовый материал будет отражаться больше звуковой энергии. При этом из-за большей продолжительности волны снижается разрешающая способность датчика, но достигается большая чувствительность и амплитуда сигналов.

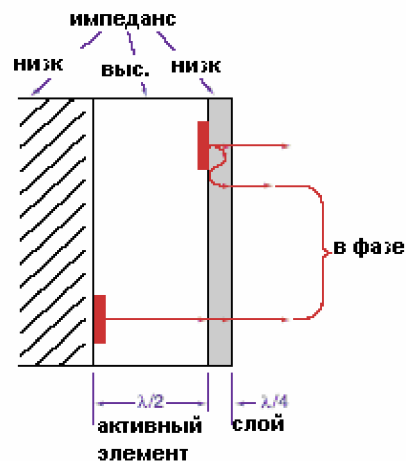
d. Контактная Поверхность

Основным назначением контактной поверхности является защита элемента датчика в процессе тестирования. В контактных датчиках, она выполняется из прочных, неподверженных коррозии материалов для предупреждения износа на таких поверхностях как, к примеру, сталь.

В иммерсионных наклонных датчиках, а так же датчиках с линией задержки контактная поверхность так же выполняет функцию акустического преобразователя между акустическим импедансом активного элемента и воды, призмы или линии задержки, которые обладают низким акустическим импедансом. Для этого используется слой толщиной в $1/4$ длины волны ($\lambda/4$) с соответствующим акустическим импедансом (размер активного элемента обычно около $1/2$ длины волны). Выбор толщины контактной пластины основывается на идее наложения, обосновывающей возможность фазового совпадения волн, генерируемых активным элементом и отражаемых в соответствующем слое, как это указано на Рисунке 4.

При фазовом совпадении сигналов, происходит сложение амплитуд сигналов и, как следствие, в тестовый материал попадает волна большей амплитуды. На Рисунке 12 изображено фазовое совпадение активного элемента и контактной пластины. При неудачном подборе материалов и отсутствии совпадения сигналов по фазе происходит разрыв в волновом фронте.

Рис 12



4. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ

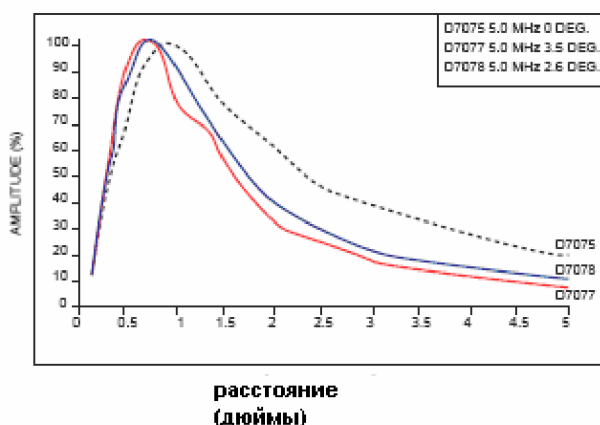
а. Раздельно–Совмещенные Датчики

В раздельно-совмещенных датчиках используются вмонтированные в усеченные линии задержки отдельные передающий и принимающий элементы. Такая конфигурация позволяет решить проблему выделения главного импульса и соответственно улучшить околоповерхностное разрешение. Более того, усечение линий задержки под углом обеспечивает псевдо фокус, который делает раздельно-совмещенные датчики более чувствительными к эхосигналам от таких неоднородных дефектов как обыкновенная и точечная коррозия.

Конструктивное решение раздельно-совмещенных датчиков позволяет получить четко определенную кривую зависимости амплитуды от расстояния. По большому счету, уменьшение угла падения или увеличение размера элемента датчика приведет к увеличению псевдо-фокусного расстояния и используемого диапазона, что видно из Рисунка 13.

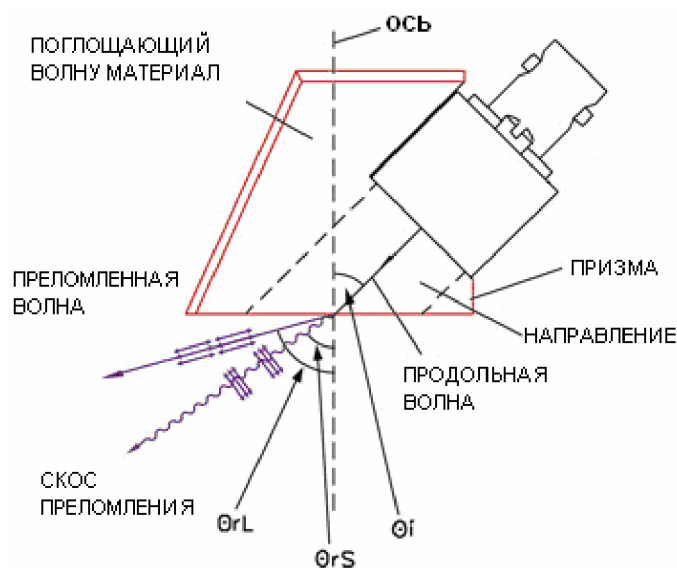
Рис. 13

линейная зависимость амплитуды от расстояния



б. Наклонные Датчики

В наклонных датчиках принципы отражения и волнового преобразования используются для генерации и передачи в тестовый образец преломленной продольной или поперечной волны, как это указано на рисунке 14.



Необходимый для генерации желаемой волны (например, поперечная волна под углом в 45°) угол падения рассчитывается в соответствии с Законом Снеллиуса (См. Уравнение 12). Из-за рассеивания луча, данное уравнение не является справедливым при низких частотах и небольшом размере активного элемента. Для получения более подробной информации о данном явлении обратитесь в фирму Panametrics.

$$\text{Eqn. 12} \quad \sin \theta_i / c_i = \sin \theta_{rl} / c_{rl} = \sin \theta_{rs} / c_{rs}$$

θ_i = Угол Падения в Призме

θ_{rl} = Угол Отраженной продольной Волны

θ_{rs} = Угол Отраженной Поперечной Волны

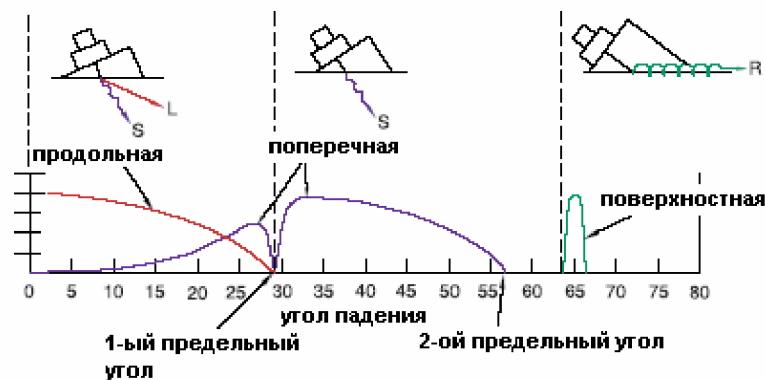
c_i = Скорость Звука в Инцидентном Материале
(Продольная волна)

c_{rl} = Скорость Звука в Материале
(Продольная волна)

c_{rs} = Скорость Звука в тестовом Материале (Поперечная волна)

На Рисунке 15 представлено отношение между углом падения и амплитудой преломленной или преобразованной продольной, поперечной и поверхностной волн, передаваемых из пластиковой призмы в сталь.

Рис. 15



Наклонные датчики обычно используются для выявления и определения размеров дефектов, расположенных не параллельно к тестовой поверхности. Ниже приведены некоторые термины и формулы, используемые для определения положения дефекта.



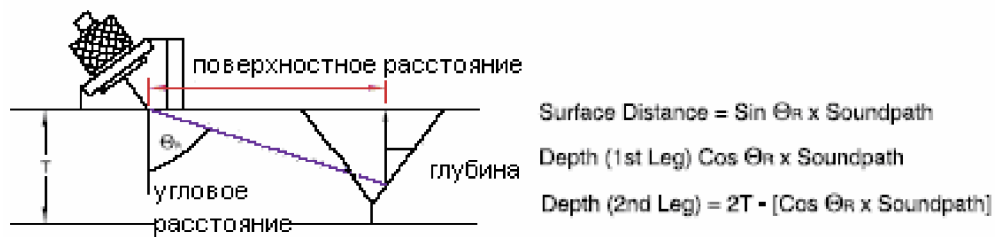
θ_n - угол падения

T - толщина

$$\text{Leg} = \frac{T}{\cos \theta_n}$$

$$\text{V-PATH} = \frac{2T}{\cos \theta_n}$$

$$\text{Skip Distance} = 2T \times \tan \theta_n$$



В исследовании сварных швов часто используются преломленные поперечные волны. Тем не менее, для успешного исследования таких зернистых материалов как аустенитная нержавеющая сталь требуются преломленные продольные волны или другие методики.

с. Датчики с Линией Задержки

Датчики с линией задержки представлены одноэлементными датчиками продольных волн вместе с заменяемыми линиями задержки. Одно из преимуществ подобных датчиков – улучшение околоповерхностного разрешения. Задержка позволяет элементу остановить вибрацию до получения сигнала от отражателя. При использовании датчиков с линией задержки важно учитывать многочисленные эхосигналы от окончания линии задержки.

Датчики с линией задержки так же широко используются в условиях повышенных температур. Приведенные в каталоге высокотемпературные линии задержки, тем не менее, не предназначены для длительного контакта с тестируемой поверхностью.

d. Иммерсионные Датчики

Существует три основных преимущества использования иммерсионных, а не контактных датчиков:

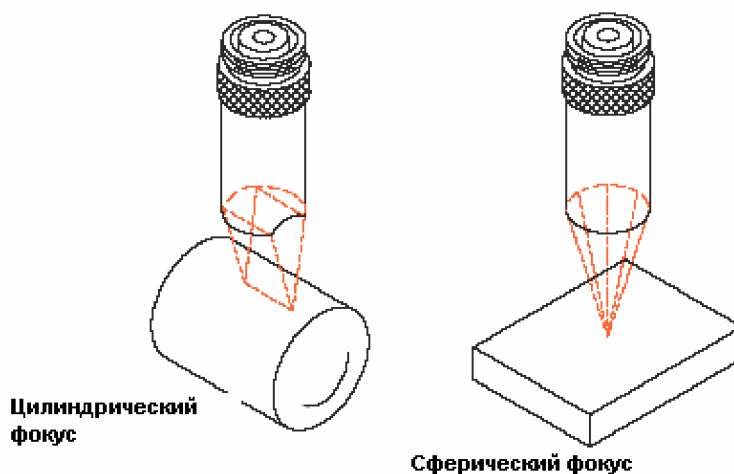
- Равномерность передачи ультразвука в материале приводит к уменьшению колебаний чувствительности.
- Автоматизация сканирования позволяет значительно сократить время исследования.
- Фокусировка иммерсионных датчиков увеличивает чувствительность к дефектам малого размера.

Фокусная Конфигурация

В иммерсионных датчиках могут быть реализованы три различные конфигурации: не сфокусированные (“плоские”), сферически сфокусированные (“точка”) и цилиндрически сфокусированные (“линия”) датчики. Фокусировка достигается либо при помощи линз, либо за счет искривления самого элемента. Первый путь является наиболее распространенным.

Не сфокусированные датчики могут использоваться в обычных измерениях, а так же при исследовании толстых материалов. Сферически сфокусированные датчики позволяют увеличить чувствительность к небольшим дефектам, а цилиндрически сфокусированные датчики используются для инспекции труб и прутковых заготовок. Ниже, на Рисунке 17, приведены примеры сферической и цилиндрической фокусировки.

Рис. 17



По определению, фокусное расстояние датчика – это расстояние от наружной поверхности датчика до точки звукового поля, в которой локализован сигнал с максимальной амплитудой. В не сфокусированных датчиках это расстояние соответствует длине ближнего поля датчика. Так как последний максимум сигнала возникает на расстоянии равноценном ближнему полю, датчик не может быть акустически сфокусирован на расстоянии, превышающем данное ближнее поле.

При фокусировке датчика необходимо определять тип фокусировки (сферический или цилиндрический), фокусное расстояние и цель (точка или ровная поверхность). На основании данной информации может быть вычислен радиус кривизны линзы. При проведении тестирования, измеренное фокусное расстояние будет сбиваться.

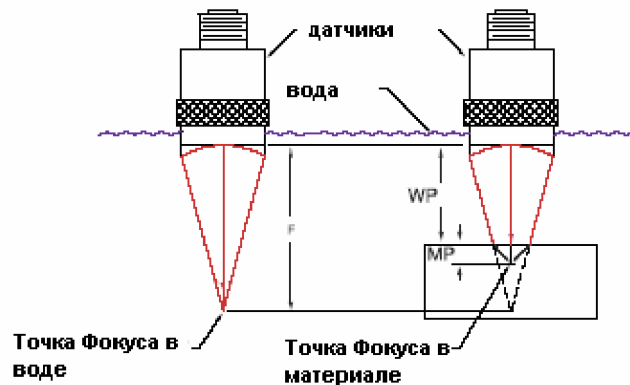
Существуют ограничения на фокусное расстояние датчиков определенной комбинации частоты и диаметра элемента, а так же целеуказания. Максимальное практическое фокальное расстояние для точечной цели составляет $0.8 \cdot \text{длины Ближнего Поля}$. Датчики с фокусным расстоянием, превышающим данные максимумы, но меньшим чем ближнее поле, называются слабо сфокусированными. Другими словами, у них может не быть преимуществ по сравнению с плоскими датчиками.

Помимо ограничения на максимальную фокусную длину, существует так же механическое ограничение на минимальное фокусное расстояние датчика. В Таблице 2 приведена протяженность ближнего поля, а так же минимальное и максимальное фокусное расстояние обычных комбинаций частоты датчика и диаметра элемента. Для получения более подробной информации обратитесь в фирму Panametrics.

Зависимость Фокусного Расстояния от Акустической скорости звука и геометрии Тестового Образца

Измеряемое фокусное расстояние датчика зависит от материала исследования. Эта зависимость является следствием различия скорости звука в материалах. Изначальное определение фокусного расстояния производится исходя из параметров воды. Так как большинство материалов обладают большей скоростью звука, фокусное расстояние значительно уменьшается. Этот эффект вызван преломлением (в соответствии с законом Снеллиуса) и продемонстрирован на Рисунке 18.

Рис. 18



Изменение фокусного расстояния представлено в Уравнении 13. На пример, при заданном фокусном расстоянии и глубине материала уравнение может быть использовано для определения соответствующего столба жидкости для компенсации эффекта фокусировки в тестовом материале.

Eqn. 13 $WP = F - MP(c_{tm}/c_w)$

WP = Столб Жидкости

MP = Глубина Материала

F = Фокусное Расстояние в Воде

ctm = Скорость Звука в тестовом Материале

cw = Скорость Звука в Воде

На фокусировку может так же повлиять искривленность поверхности тестового образца. В зависимости от того, выгнут материал или вогнут, звуковой пучок может сужаться быстрее, чем в плоском образце или же рассеиваться и расфокусироваться.

Коэффициент Усиления Фокусировки

Сфокусированные иммерсионные датчики используют акустические линзы для сдвига положения Y+0 к наружной поверхности датчика. В результате их чувствительность может быть значительно увеличена. На Рисунке 19 приводится пример увеличения амплитуды сигнала, отраженного от небольшого дефекта, возникающего в результате фокусировки, где SF – нормированное фокусное расстояние, рассчитываемое по формуле 14. Амплитуда сигнала, отраженного от небольшого дефекта, не может превышать амплитуду эхосигнала от плоской плиты.

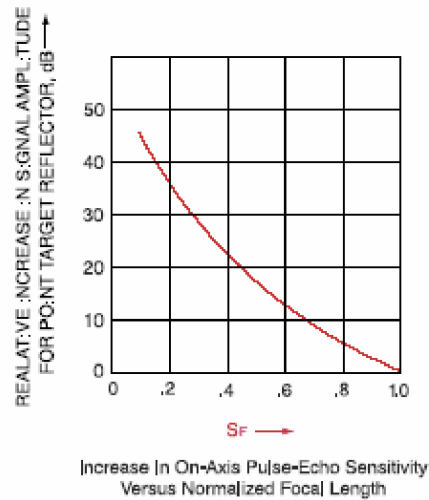
Eqn. 14 $S_F = F/N$

SF = Нормированное Фокусное Расстояние

F = Фокусное Расстояние

N = Ближнее Поле

Рис. 19



На пример, данная схема может быть использована для определения увеличения импульс-эхо чувствительности 2.25 МГц датчика с диаметром элемента в 1.0", сфокусированного на расстоянии в 4 дюйма. Длина ближнего поля данного датчика составляет 9.55", а нормированное фокусное расстояние - 0.42 (4.0"/9.55"). График указывает на увеличение чувствительности примерно на 21dB. Коэффициент усиления фокусировки (dB) для цилиндрических фокусов находится как $\frac{3}{4}$ коэффициента усиления сферического фокуса.

е. Датчики Поперечных Волн с Нормальным Падением

Датчики поперечных волн содержат пьезокристалл поперечных волн. Вместо использования принципов преломления для генерации поперечных волн в материале, как в случае наклонных датчиков, кристалл сам их генерирует. Обычно подобные датчики используются для измерения скорости поперечной волны в материале. Результаты измерений, вместе с данными скорости распространения продольных волн, позволяют рассчитать коэффициент Пуассона, Модуль Юнга и модуль сдвига.

$$\text{Eqn. 15} \quad \sigma = \frac{1-2(V_T/V_L)^2}{2-2(V_T/V_L)^2}$$

$$\text{Eqn. 16} \quad E = \frac{V_L^2 \rho (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)}$$

$$\text{Eqn. 17} \quad G = V_T^2 \rho$$

σ = Коэффициент Пуассона
 V_L = Скорость Распространения Продольной Волны
 V_T = Скорость Распространения Поперечной Волны
 ρ = Плотность Материала
 E = Модуль Юнга
 G = Модуль Сдвига

При проведении измерений следует использовать только очень вязкие контактные жидкости, так как поперечные волны в жидкости не распространяются. При использовании данного типа датчиков в режиме передачи, важно выстраивать датчики в соответствии с полярностью. При 90° отклонении, приемник может не получить сигнал от датчика.

5. АКТИВИЗАЦИЯ ДАТЧИКА

Общим принципом разработки ультразвуковых датчиков фирмы Panametrics является использование для возбуждения негативного пика. Максимальное напряжение импульса ограничено величиной в 50 вольт на каждый миллиметр толщины пьезоэлектрического датчика. Соответственно, низкочастотные датчики значительно превышают по толщине высокочастотные датчики. На выходе датчиков с частотой в 5.0МГц и ниже может использоваться отрицательный быстро нарастающий, непродолжительный импульс возбуждения на 600 вольт. Для 10МГц датчиков, напряжение на выходе должно быть снижено до 300 вольт.

Несмотря на то, что к использованию рекомендован отрицательный импульс возбуждения, так же может быть использована незатухающая волна или тональная посылка. Но, тем не менее, в использовании данных типов возбуждения существуют свои ограничения. Во-первых, средняя мощность рассеяния не должна превышать 125мВт во избежание перегрева датчика и кристалла. Так как значение данного параметра зависит от ряда факторов – напряжение, рабочий цикл и электрическое сопротивление датчика – для расчета максимальной длительности возбуждения и числа циклов в рамках общего ограничения по мощности могут быть использованы следующие уравнения:

Eqn. 18	$V_{rms} = 1/2(0.707)V_{p-p}$
Eqn. 19	$P_{tot} = \frac{(Duty\ Cycle)(V_{rms})^2 \cos(\text{phase angle})}{Z}$
Eqn. 20	$No. \text{ of Cycles in a Burst} = \frac{(Freq.)(Duty\ Cycle)}{Rep\ Rate}$

Далее приведен пример использования данных уравнений для расчета рабочего цикла и числа циклов датчика V310-SU.

V310-SU 5.0МГц, диаметр элемента 0.25", не сфокусированный

Допуск: 100 Вт Пик-Пик, 50 Ом - номинальный импеданс датчика. (Примечание: Это значение может варьироваться от датчика к датчику и должно быть измерено. В случае необходимости, полное сопротивление может быть указано при покупке датчика.)

-45° фазовый угол

5КГц (Rep Rate) Частота повторения импульсов

Шаг 1: Расчет V_{rms}

$$V_{rms} = 1/2(0.707)V_{p-p}$$

$$V_{rms} = 1/2(0.707)(100) = 35.35 \text{ Вт}$$

Шаг 2: Для нахождения рабочего цикла перегруппируем Уравнение 19.

За P_{tot} принимается величина в 0.125мВт, так как это рекомендованный для датчика максимум.

$$\text{Рабочий Цикл} = Z * P_{tot} (V_{rms})^2 * \cos(\text{фазовый угол}) = (50)(0.125)/(35.35)^2 * (\cos -45^\circ) = 0.007 \text{ s/s}$$

Что означает 7 миллисекунд активности на каждые 1000 миллисекунды.

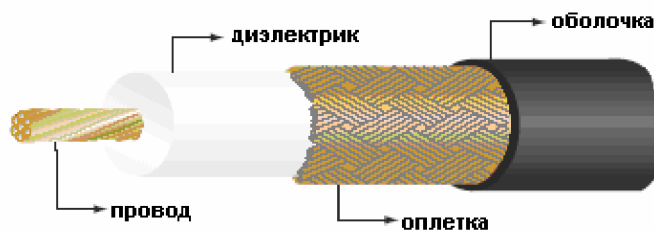
Шаг 3: Число циклов может быть рассчитано из Уравнения 20.

$$\begin{aligned} \text{No. циклов} &= (\text{Частота})(\text{Рабочий Цикл}) / \text{Частота повторения импульсов} \\ &= (5 * 10^6) * (0.007) / (5 * 10^3) \\ &= 7 \end{aligned}$$

6. Кабели

Внутренняя часть кабеля состоит из трех основных компонентов: жилы провода, диэлектрика и оплетки. Эти компоненты защищены оболочкой. На Рисунке 20 представлен поперечный разрез кабеля. Провод является плюсом, тогда как оплетка - заземлением. Диэлектрик изолирует жилу провода от оплетки.

Рис. 20



В большинстве кабелей используется один слой оплетки. Тем не менее, для лучшей защиты от электрических помех в некоторых кабелях предусмотрен дополнительный слой оплетки, находящийся в соприкосновении с первым.

Ниже приведен список стандартных кабелей, предоставляемых фирмой Panametrics:

Тип	Разряд	Импеданс	Диаметр
15	Низкий Импеданс	15 ohms	0.11"
25	Низкий Импеданс	25 ohms	0.10"
58	RG58/U	50 ohms	0.20"
62	RG62/U	93 ohms	0.24"
74	RG174/U	50 ohms	0.11"
188	RG188/U	50 ohms	0.11"
316	RG316/U	50 ohms	N/A

RG/U – принятая в армии аббревиатура "радио управляемый, универсальный"

"RG" – обозначение коаксиального кабеля

"U" - "general utility/общее использование".

Большинству кабелей в ультразвуковом НК присвоены военные RG номера, которые обозначают материалы, размеры и электрические характеристики кабелей. Характеристический импеданс коаксиального кабеля определяется отношением внутреннего диаметра внешнего проводника кабеля (D) к внешнему диаметру внутреннего проводника (d) и диэлектрической константе (E) изоляционного материала между проводами.

$$\text{Eqn. 21 } \text{Impedance } (Z_0) = \frac{138}{\sqrt{E}} \log (D/d) \, \Omega$$

Характеристический импеданс может так же быть рассчитан из емкостного сопротивления (C) и индуктивности (L) на каждую единицу длины кабеля

$$\text{Eqn. 22 } \text{Impedance } (Z_0) = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Для коаксиальных кабелей характерны значения в 50 Ом, 75 Ом и 95 Ом. Обратите внимание, что текущее входное полное сопротивление при определенной частоте может значительно отличаться от характеристического импеданса кабеля из-за импеданса источника и приемника. В ультразвуковых исследованиях при передаче генератор является источником, а датчик – приемником; при приеме сигнала наоборот. Общее сопротивление генератора и приемника приведет к отражению части электрической энергии на каждом конце кабеля. Данное отражение определяется длиной кабеля, частотой RF сигнала и электрическим импедансом кабеля и его выходов. В ультразвуковом НК степень влияния кабеля определяется путем экспериментов с короткими и длинными кабелями, кабелями с различным импедансом, а так же с помощью установки на гнездо генератора/приемника переходного аттенюатора на 50 Ом.

Таблица 1: Акустические Свойства Материалов

	Скорость Продольной Волны		Скорость Поперечной Волны		Акустич. Импеданс (Кг/м ² с x 10 ⁶)
	(дюйм/мс)*	(м/с)	(дюйм/мс)*	(м/с)	
Смола Акриловая (Perspex®)	0.107	2,730	0.056	1,430	3.22
Алюминий	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
Бериллий	0.508	12,900	0.350	8,880	23.5
Латунь корабел.	0.174	4,430	0.083	2,120	37.30
Кадмий	0.109	2,780	0.059	1,500	24.02
Ниобий	0.194	4,920	0.083	2,100	42.16
Медь	0.183	4,660	0.089	2,260	41.61
Глицерин	0.076	1,920	—	—	2.42
Золото	0.128	3,240	0.047	1,200	62.60
Инконель®	0.229	5,820	0.119	3,020	49.47
Железо	0.232	5,900	0.127	3,230	45.43
Чугун (крупнозернистый)	0.138	3,500	0.087	2,200	25.00
Чугун (мелкозернистый)	0.220	5,600	0.126	3,220	40.00
Свинец	0.085	2,160	0.028	700	24.49
Марганец	0.183	4,660	0.093	2,350	34.44
Ртуть	0.057	1,450	—	—	19.66
Молибден	0.246	6,250	0.132	3,350	63.75
Моторное масло (SAE 20 или 30)	0.069	1,740	—	—	1.51
Никель, без примесей	0.222	5,630	0.117	2,960	49.99
Платина	0.156	3,960	0.066	1,670	84.74
Полиамид (нейлон, Perlon®)(крупнозернистый)	0.087	2,200	0.043	1,100	2.40
(мелкозернистый)	0.102	2,600	0.047	1,200	3.10
Полистирол	0.092	2,340	—	—	2.47
Поливинилхлорид, PVC, твердый	0.094	2,395	0.042	1,060	3.35
Серебро	0.142	3,600	0.063	1,590	37.76
Сталь, 1020	0.232	5,890	0.128	3,240	45.63
Сталь, 4340	0.230	5,850	0.128	3,240	45.63
Сталь, 302 Аустенитная нержавеейка	0.223	5,660	0.123	3,120	45.45
Сталь, 347 Аустенитная нержавеейка	0.226	5,740	0.122	3,090	45.40
Олово	0.131	3,320	0.066	1,670	24.20
Титан, Ti 150A	0.240	6,100	0.123	3,120	27.69
Вольфрам	0.204	5,180	0.113	2,870	99.72
Уран	0.133	3,370	0.078	1,980	63.02
Вода (20oC)	0.058	1,480	—	—	1.48
Цинк	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61
Цирконий	0.183	4,650	0.089	2,250	30.13

* Переводной Коэффициент: 1 м/с = 3.937 x 10⁻⁵ дюйм/мс

Источник: Руководство по Неразрушающему Контролю, Глава 7, Ультразвуковые Исследования ASNT 1991 ed Paul McIntire

Протяженность Ближнего Поля Плоских Датчиков в Воде

Значения ближнего поля в данной таблице были получены в соответствии со следующей формулой:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{D} \right)^2 \right]$$

Обратите внимание, что уравнения 8 и 8А были выведены из данного выражения. Эти расчеты были получены на основании значения скорости звука в воде (0.586 x 10⁵ дюйм/сек) при 220С, а так же текущего диаметра датчика. Текущий диаметр элемента датчика незначительно меньше, чем номинальное значение, приведенное в каталоге. Минимальное и максимальное фокусное расстояние рассчитано с учетом акустических и механических ограничений каждой конфигурации. Эти ограничения относятся к частоте работы датчика, диаметру элемента и размеру. Для данной таблицы могут существовать исключения.

Протяженность Ближнего Поля Плоских Датчиков в Воде				
Элемент			Фокусное расстояние (PTF)**	
Частота (МГц)	Диаметр (Дюймы)	N (Дюймы)	Min (Дюймы)	Max (Дюймы)
0.5	1.50	4.757	2.15	3.80
	1.125	2.661	1.50	2.10
	1.00	2.095	1.25	1.65
	0.75	1.164	0.78	0.93
1.0	1.50	9.559	2.50	7.65
	1.125	5.366	1.90	4.30
	1.00	4.235	1.625	3.38
	0.75	2.372	1.00	1.90
2.25	0.50	1.043	0.60	0.80
	1.50	21.534	2.70	14.50
	1.125	12.099	2.15	9.50
	1.00	9.554	1.875	7.60
	0.75	5.364	1.00	4.30
	0.50	2.374	0.80	1.90
3.5	0.375	1.329	0.50	1.06
	0.25	0.584	0.35	0.45
	1.00	14.868	1.95	11.25
	0.75	8.350	1.00	6.65
	0.50	3.699	0.83	2.95
5.0	0.375	2.073	0.60	1.65
	0.25	0.914	0.385	0.70
	1.00	21.243	1.95	14.401
	0.75	11.932	1.00	9.50
	0.50	5.287	0.75	4.20
7.5	0.375	2.965	0.60	2.35
	0.25	1.309	0.43	1.00
	0.75	17.900	1.00	12.75}
	0.50	7.933	0.75	6.30}
10	1.00	42.490	2.00	20.00}
	0.75	23.868	1.00	15.375}
	0.50	10.579	0.75	8.40}
	0.375	5.934	0.60	4.75}
	0.25	2.622	0.46	2.10

15	0.50	15.870	0.75	11.75}
	0.375	8.902	0.60	7.10}
	0.25	3.935	0.50	3.15}
20	0.25	5.247	0.50	4.20}
	0.125	1.290	0.25	1.00}
25	0.25	6.559	0.50	5.25}

**** Стандартные, Линейные иммерсионные датчики, а так же датчики большого диаметра фирмы Rapametrics с прямым разъемом могут быть сфокусированы на расстояние между максимальным и минимальным точечным фокусом в соответствии с ограничениями, приведенными в таблице 2. Перед приобретением датчиков, сфокусированных на расстоянии, выходящим за данные ограничители, обратитесь за консультацией в фирму Rapametrics.**

‡ Необходимо учитывать эффект затухания, который увеличивается линейно при квадрате частоты и ширины пропускания. В исследованиях, которые используют длинные столб жидкости, эффект зависимости затухания от частоты необходимо проверить с помощью ASTM E 1065 Annex A7. Данный эффект должен быть рассмотрен, если фокусное расстояние превышает следующие значения:

Частота	Фокусное Расстояние
5.0МГц	13 дюймов
7.5 МГц	6 дюймов
10 МГц	3.5 дюйма
15 МГц	1.5 дюйма
20 МГц	0.8 дюйма
25 МГц	0.5 дюйма
30 МГц	0.4 дюйма