

Лекция №2

Основные параметры УЗ поля и области промышленного применения УЗ малой интенсивности

2.1. Восприятие звуков человеком

На рис. изображена "диаграмма слуха", на которой показаны области частот и звуковых давлений, а также уровни интенсивности звуков, воспринимаемых человеческим ухом. Нормальное ухо слышит только те звуки, которые лежат внутри этой области. Нижняя граница области характеризует зависимость порога слышимости от частоты, а верхняя - порог болевого ощущения, когда волна перестает восприниматься как звук, вызывая в ухе ощущение боли и давления. Отметим, что человеческое ухо является уникальным приемником акустических волн, воспринимающим звуки, различающиеся по интенсивности на 12-15 порядков в области частот около 1 кГц, где диаграмма слуха имеет наибольшее вертикальное сечение. Из диаграммы видно, что при одинаковом звуковом давлении и одинаковой интенсивности звуки различной частоты могут восприниматься, как звуки разной громкости. Поэтому в акустике, помимо субъективной величины - громкости звука, оцениваемой на слух, используются и объективные характеристики звука, которые могут быть непосредственно измерены, - уровень звукового давления и равный ему уровень интенсивности (рассмотрим далее).

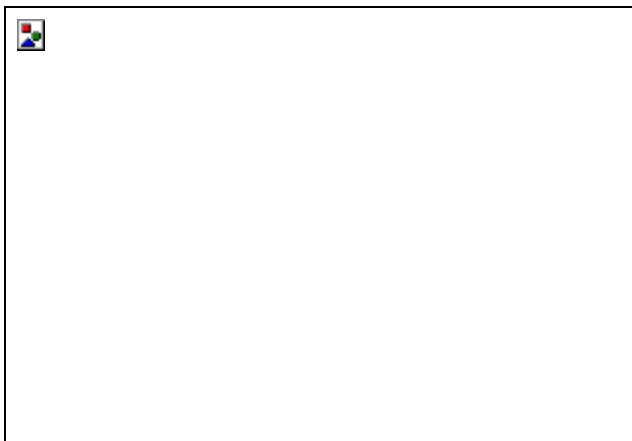


Рис.

В принципе, L_p - величина безразмерная, но для численного значения логарифма используют название "Бел" (в честь изобретателя телефона Г. Белла). На практике обычно используют в 10 раз меньшую единицу – «децибел»

В определении L_p принято использовать стандартный порог слышимости

$L_p = 2 \times 10^{-5}$ а соответствующее ему значение минимальной интенсивности I_0

зависит, согласно от среды, в которой распространяется звук, и для воздуха при нормальных условиях составляет $\frac{1}{340}$

Для громкости звука используют единицу под названием "фон". Громкость тона в фонах для любой частоты равна уровню звукового давления в децибелах для тона с частотой f воспринимаемого как звук той же громкости.

На рис. изображены также кривые для уровней равной громкости при различных уровнях звукового давления и интенсивности, из которых видно, что при f для других слышимых ухом частот f_1 и f_2 могут заметно отличаться.

2.2. Распространение УЗ колебаний

В технике применяют УЗ колебания различных частот. Обычно УЗ начинают считать колебания с 18-22 КГц.

Распространение УЗ связано с изменением состояния среды (возмущением) и переносом энергии. При этом вещество практически не переносится.

Представим вещество как бы изнутри: равномерно распределенные частицы среды находятся в состоянии покоя. И мы начинаем с одного торца создавать возмущение, выводя частицы из положения равновесия.

Как будет распространяться волна? Атомы вещества связаны с другими атомами упругими связями и не движутся.

Вывели атомы из положения равновесия, т.е. в одной области сблизили атомы. Но они связаны между собой, и начинают расширяться. При периодически действующем возмущении атомы начинают периодически приближаться друг к другу и удаляться. Это периодическое возмущение начинает распространяться вдоль образца. Таким образом вдоль образца распространяется ультразвуковая волна.

Любой процесс, вызванный периодическим возмущением характеризуется периодом, частотой колебаний и длиной волны то

$$T_0 = 1/f$$

$$\lambda_0 f = c \quad \text{Скорость распространения.}$$

Возникновение и распространение УЗК (без поглощения в среде) описывается волновым уравнением:

$$c^2 \nabla^2 a = \delta^2 u / \delta t^2$$

где ∇ -оператор Лапласа, a - мгновенное смещение частиц, t -время

Аналогичные уравнения записываются для мгновенных значений плотности, колебаний скорости частиц, избыточного давления.

Если считать, что вдоль одной оси распространяется плоская волна, то волновое уравнение получает вид:

$$c^2 \frac{d^2 a}{dx^2} = \frac{d^2 a}{dt^2}$$

Решение волнового уравнения имеет вид гармонической волны :

$$a = A_m \sin(\omega t - \omega x/c)$$

A_m - амплитуда смещения

$\omega = 2\pi f$ - круговая частота

x/c - фазовая постоянная для гармонического колебания частицы

$$(\omega/c) x = \varphi$$

Дифференцированием по t можно получить выражение для мгновенной скорости частицы среды:

$$v = a_m \omega \cos(\omega t - \varphi)$$

Причем амплитуда (максимальное значение) колебательной скорости равна $v_m = a_m \omega$

Если ещё раз продифференцировать выражение для a , то получим формулу для ускорения частиц среды в УЗ поле:

$$g_a = -a_m \omega^2 \sin(\omega t - \varphi)$$

т.е. амплитуда ускорения

$$g_a = -a_m \omega^2$$

Переменное УЗ давление в волне может превышать атмосферное давление в тысячи раз. Зависимость P от координаты и времени описывается формулой:

$$P = a_m \rho_0 c \omega \cos(\omega t - \varphi)$$

Т.е. амплитуда УЗ давления

$$P = a_m \rho_0 c \omega = v \rho_0 c$$

Из этого следует $P/v = \rho_0 c$

Отношение УЗ давления к колебательной скорости частиц называется волновым сопротивлением среды.

Волновое сопротивление среды является весьма сложной характеристикой среды, которая определяет условия распространения, поглощения, отражения, приложения и т.д.

Амплитуда смещения связана с интенсивностью (энергией через единицу поверхности в единицу времени) соотношением:

$$a_m = 1/2 \pi f (2I/\rho_0 c)^{1/2}$$

Другие величины:

$$v_m = (2I/\rho c)^{1/2}$$

$$p_m = (2I \rho c)^{1/2}$$

$$g_m = 2 \pi f (2I/\rho_0 c)^{1/2}$$

Таким образом, колебательная скорость УЗ не связана с частотой, $a \sim 1/f$, $g \sim f$

Рассчитаем в качестве примера амплитуду звукового давления при распространении в воде УЗ колебаний с амплитудой 10 мкм, $f = 20$ кГц, $\rho = 1$ г/см³, $c = 1,5 \cdot 10^5$ см/с

$$P = \rho c \omega a = 17,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/см}^2 = 18 \text{ атм.}$$

2.3. Энергия звуковой волны.

Распространение волны всегда связано с переносом энергии. Поток энергии УЗ волны определяется суммой кинетической и потенциальной энергии колеблющихся частиц среды, т.е. $E = \rho v^2 / 2 = 1/2 \cdot \omega^2 \rho A^2$

Чаще применяется характеристика называемая интенсивностью.

Интенсивность УЗ колебаний (или силой звука), называют энергию, которая переносится в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Для плоской волны $I = 2\pi^2 \rho c f^2 A^2$

Интенсивность выражается в Дж на м² за секунду (Дж/м²с).

В практике используется чаще Вт/см²=Дж/см²с.

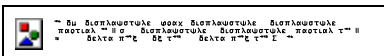
Интенсивность при пушечном выстреле =10⁻³ Вт/см²

Таким образом, акустическая мощность, отдаваемая в среду зависит не только от параметров излучения, но и от акустических свойств среды.

2.4. Скорость распространения УЗ колебаний в различных средах.

Волны в жидкостях и газах.

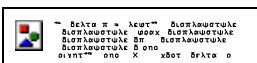
В жидкостях и газах возможны лишь деформации сжатия и растяжения, поэтому в них могут распространяться только продольные волны. Вычислим скорость распространения продольных волн с использованием волнового уравнения. Последнее может быть уравнений механики, описывающих распространение возмущения в среде, в котором деформацию следует заменить величиной Δp где p - давление в волне, p_0 - равновесное давление в среде, Δp - возмущение давления. Тогда мы можем записать



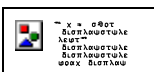
Чтобы из этого уравнения получить волновое уравнение, необходимо знать материальное уравнение среды



Качественно эта зависимость изображена на рис. При очень малых возмущениях плотности $\Delta \rho$ и давления Δp из приведенного уравнения получаем:



где введено обозначение



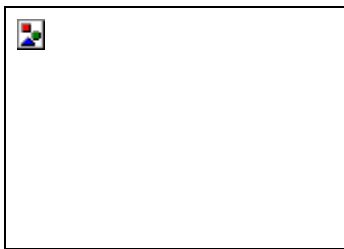


Рис.

Возмущения плотности ρ связаны со смещением s (или амплитудой A) соотношением:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos(kx - \omega t)$$

Следовательно, уравнение примет вид:

$$\Delta\rho = \rho_0 k A \cos(kx - \omega t)$$

Подставляя полученное в уравнение, описывающее распространение возмущения, записывая ρ и переходя к пределу при $\lambda \rightarrow \infty$ получим волновое уравнение

$$\Delta\rho = \rho_0 k A \cos(kx - \omega t)$$

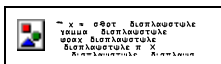
из которого сразу видно, что скорость волны задается приведенным выражением и не зависит от частоты (дисперсия отсутствует). Естественно, что с такой скоростью распространяются волны с длиной волны λ превосходящей длину свободного пробега молекул в газе или межатомные расстояния в жидкостях. В этом случае жидкость и газ могут рассматриваться как сплошные среды. Для волн высоких частот, когда $\lambda \rightarrow 0$ возникает дисперсия, а волны с длиной $\lambda \rightarrow \infty$ распространяться вообще не могут.

Для воздуха материальное уравнение является уравнением адиабаты и в акустике обычно записывается в следующем виде:

$$p = p_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

где γ - показатель адиабаты.

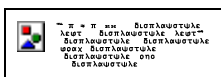
Тогда, подставляя приведенное выражение в формулу для скорости - скорость волны (в акустике и УЗ технике употребляют термин "скорость звука") в газе получается равной



где μ - молярная масса газа.

Скорость звука зависит, таким образом, от рода газа и по порядку величины совпадает со средней скоростью теплового движения молекул.

Для жидкости материальным уравнением является полуэмпирическое уравнение Тета:



где \square - характерное внутреннее давление, обусловленное межмолекулярным взаимодействием (оно составляет для большинства жидкостей без пузырьков и различных включений несколько тысяч атмосфер). Параметр \square имеет порядок нескольких единиц (например, для воды \square).

В таблице приведены значения скорости звука, измеренные в некоторых газах (при температуре \square) и жидкостях.

Газы	Скорость звука, м/с	Жидкости	Скорость звука, м/с
Водород	1265	Вода \square	1490
Гелий	965	Этил. спирт \square	1180
Азот	334	Водород \square	1127
Воздух	331	Кислород \square	911
Кислород	316	Азот \square	867
Углекислота	216	Гелий \square	180

Скорость распространения УЗ колебаний в твердых телах

$$C = \sqrt{B/\rho} \quad B - \text{модуль упругости (модуль Юнга)}$$

2.5. Поглощение и отражение УЗ колебаний

При распространении УЗ волны в жидкостях, газах и твердых материалах происходят необратимые потери энергии.

В жидкостях наибольшие потери связаны с внутренним трением (плотностью жидкости). Большую роль играет также и теплопроводность жидкости. Очевидно, что температура на участках сжатия выше, чем на участках разре-

жения. Совершается работа переноса энергии за счет поглощения энергии волны.

В твердых телах наряду с внутренним трением и теплопроводностью появляются потери на упругую и пластическую деформации.

Изменение интенсивности УЗ колебаний за счет поглощения определяются формулой:

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad \text{где } I_0 - \text{интенсивность при } x=0, \quad I - \text{интенсивность на расстоянии } x$$

Коэффициент поглощения, обусловленный вязкостью определяется выражением.

$$\alpha_1 = 2\eta \rho \omega^2 / 3\rho c^2 \quad \eta - \text{коэффициент вязкости}$$

Коэффициент поглощения, обусловленный теплопроводностью

$$\alpha_2 = 2\pi^2 c K T q^2 / \lambda^2 \rho V C_p^2$$

q - коэффициент теплового расширения, V - механический эквивалент тепла

Рассмотрим далее переход ультразвуковой волны из одной среды в другую. Допустим, УЗ волна распространяется в среде с $C_1 \rho_1$ и попадает на границу раздела со средой $C_2 \rho_2$.

Обозначим $C_1 \rho_1 = R_1$ и $C_2 \rho_2 = R_2$

Коэффициент пропускания определяется отношением прошедшей волны, и падающей волны.

$$\tau_{\text{проп}} = 4R_1 R_2 / (R_1 + R_2)^2$$

Если $R_1 = R_2$ то вся энергия пройдет, а если наоборот то нет.

При переходе из воды в воздух и наоборот $\tau_{\text{проп}} = 0.0011$ т. е. 0.0999 всей падающей энергии отражается от границы.

Для воды и стали $\tau_{\text{проп}} = 0.013$

Для воды и дерева $\tau_{\text{проп}} = 1$

Понятно, что если на пути УЗ волны будет препятствие, то большая доля отразится.

Достаточно иметь воздушную полость шириной 1 мкм, что бы вся энергия отразилась.

2.6. Области применения УЗ в промышленности.

В зависимости от энергии УЗК (т. е. от энергии вводимых колебаний) применение УЗ подразделяют две большие области.

1. Область применения УЗ низкой интенсивности.
2. Область применения УЗ высокой интенсивности.

О применении УЗ колебаний низкой интенсивности мы говорим кратко на сегодняшней лекции, а последующие что последующее посвятим изучению областей применения высоко интенсивного УЗ.

Итак - применение УЗ колебаний низкой (или малой) интенсивности. Эта область очень обширна и мы поэтапно рассмотрим несколько применений УЗ колебаний малой интенсивности.

1. УЗ приборы для контроля химических характеристик различных материалов и сред.

Все они основаны на изменении скорости УЗ колебаний в среде и позволяют:

- определить концентрацию бинарных смесей
- плотности растворов
- степени поляризации высокополимеров
- наличие в растворах примесей, газовых пузырьков
- определить скорости протекания химических реакций
- жирность молока, сметаны
- дисперсность в гетерогенных системах и др.

Разрешающая способность современных УЗ приборов 0.05% , точность измерений на образцах длиной 1м составляет 0.5 -1 м/с (скорость в металле более 5000 м/с)

Практически все измерения проводятся методом сравнения с эталоном.

2. Приборы для контроля физико - химических характеристик основанные на измерении затухания ультразвука

- Измерение вязкости
- Измерение плотности
- Состав, содержание примесей, газов и т.п.

Используемые методики также основаны на методах сравнения с эталоном.

3. УЗ расходомеры

Их действие также основано на измерении скорости распространения УЗ колебаний вдоль потока жидкости и против. Сравнение даёт V скорость потока. При известном сечении это объём, т.е. расход. Сравнение осуществляется обработкой полученных сигналов. Расходомеров используется в практике большое количество.

Пример одного из расходомеров

**С т а ц и о н а р н ы й у л ь т р а з в у к о в о й р а с х о д о -
м е р "А К Р О Н"**



(№15183 в Г о с р е е с т р е С р е д с т в И з м е р е н и й)

На з н а ч е н и е :

Измерение объемного расхода и суммарного объема (количества) жидкостей, протекающих в напорных трубопроводах систем водоснабжения, канализации и нефтепродуктоснабжения без врезки в действующий трубопровод. Принцип действия расходомера заключается в измерении разности времени прохождения ультразвуковой волны по потоку и против потока контролируемой жидкости, пересчете ее в мгновенное значение расхода с последующим интегрированием.

Погрешность прибора составляет 2 % от верхнего предела измерения. Верхний и нижний пределы измерения устанавливает оператор.

Расходомер включает в себя блок датчиков (состоит из двух ультразвуковых датчиков и устройства для их крепления на трубе) и электронный блок, соединенные радиочастотным кабелем длиной до 50 м (стандартно - 10м.). Датчики устанавливаются на прямолинейном участке трубопровода на наружной поверхности, очищенной от грязи, краски и ржавчины. Условие правильной установки датчиков - наличие прямого участка трубы не менее 10 Ду - перед и 5 Ду - после датчиков.

После включения прибора оператор производит настройку прибора путем ввода технологических параметров, таких, как:

- дата и время;
- длина выборки для усреднения;
- макс. значение расхода;
- длина внешней окружности трубы, толщина стенки трубопровода;
- тип жидкости (холодная, горячая вода, мазут, сточные воды);
- материал трубопровода;
- срок эксплуатации трубопровода;
- диапазон выходного тока (0-5, 0-20, 4-20 мА).

Введенные параметры, как и измеренные значения, сохраняются в памяти прибора не менее одного года даже при отсутствии питания!

Расходомер имеет жидкокристаллический дисплей, на который выводится следующая информация:

- текущие значения измеряемых величин:
 - объема протекающей жидкости;

- мгновенного значения расхода;
- скорости потока;
- времени работы;
- содержимое архивов (за 30 сут., за 24 ч; перерывы учета);
- индикация настройки акустического канала при монтаже;
- диагностические сообщения о возможных неисправностях.

Время монтажа на объекте не превышает 20 минут! (что позволяет использовать стационарный расходомер "АКРОН" в качестве портативного прибора для энергоаудита Недостаток способа - необходимость питания от сети 220 В).

Межповерочный интервал - 1 год. Поверка прибора производится на расходомерной установке или расчетно-имитационным способом по методике, изложенной в инструкции.

Технические характеристики :

Ду измеряемого трубопровода, мм	30 ...2000
Диапазон измеряемых расходов, мЗ/ч	0 ...40 000
Основная погрешность, % - при измерении объема - при измерении количества	1,5 % показаний 2 % верхнего предела
Температура окружающей среды, °С	0 ...50
Температура жидкости, °С	-10 ... +150
Напряжение питания, В	220

4. Сигнализаторы уровней

Принцип действия основан на локации уровня звуковыми импульсами, проходящими через газовую среду, и на явлении отражения этих импульсов от границы раздела "газ - контролируемая среда". Мерой уровня при этом является время распространения звуковых колебаний от излучателя до контролируемой границы раздела сред и обратно до приемника.

Результат измерения выводится на персональный компьютер IBM PC/AT, где все измерения запоминаются, с последующей возможностью их просмотра и анализа, а также подключения к системе автоматизированного сбора и обработки данных. Уровнемер в составе системы может включать конечные автоматы, насосы и др. устройства при уровне выше максимального и ниже минимального значения, что позволяет автоматизировать технологический процесс. Дополнительно формируется токовый выход (0,5 мА, 0-20 мА) для самопишущих приборов. Позволяет также контролировать температуру

среды в резервуарах. Основным форматом выводимых данных является расстояние от вершины резервуара до поверхности содержащейся в ней вещества. По желанию заказчика, при предоставлении необходимой информации возможна доработка устройства для вывода высоты, массы либо объема вещества в резервуаре.

5. УЗ анализаторы.

Скорость УЗ смеси газа лежит между значениями скоростей в одном из газов.

$$C^2 = (RT/xM + (1-x)M') * (xC_p + (1-x)c'_p / xC_v + (1-x)c'_v)$$

M, M' - молекулярная масса обоих газов

6. Охранные УЗ устройства. Основаны на измерении различных параметров УЗ полей:

- а) изменение A
- б) изменение F

7. Измерители температуры газов и пожарные сигнализаторы.

$$c = \sqrt{\gamma RT/M}$$

8. Неразрушающий контроль

Одним из основных технологических приёмов является НК качества. Не одно изделие не должно быть использовано, принято и эксплуатироваться без проверки. Можно проверку осуществить путем испытаний, но так можно испытать 1- 10 изделий, но нельзя проверить 100% всех изделий, т.к. проверить - это значит испортить всё изделия.

Поэтому проверять необходимо не разрушая.

Одни из наиболее дешевых, простых и чувствительных является УЗ метод НК.

В чем преимущество этого метода перед остальными

- 1- в отличии от радиационного - безопасен
- 2- позволяет выявлять дефекты с раскрытием до 1 мкм.
- 3- очень дешев по сравнению с гамма - радиационным методом, требующем применения специальных ускорителей заряженных частиц
- 4- разнообразие методов и расширенные возможности в отличии от радиационного- работающего на просвет

Итак - методы УЗ контроля (основные)

1. Теневой метод - или метод сквозного прозвучивания. Излучения и приемник разделены. Дефект на пути УЗ колебаний. Ослабляет сигнал, и чем больше дефект, тем больше ослабление

2. Эхо метод

Во всех УЗ методах ИК для ввода и вывода используются различные варианты:

- а) непосредственный контакт УЗ пр-ля с контр. Изделием
- б) через толстый слой воды
- в) без контактный способ