

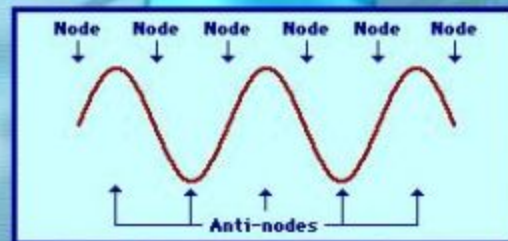
## Лекция 2

# МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Содержание:

- 1) Механические волны. Виды волн. Характеристики.
- 2) Уравнение волны.
- 3) Эффект Доплера
- 4) Звук. Характеристики звука и связь между ними.
- 5) Кривые равной громкости.
- 6) Метод аудиометрии

# Волны



Волна представляет собой колебания, которые при своем распространении не переносят с собой вещество. Волны переносят энергию из одной точки пространства в другую.

Распространение колебаний от точки к точке, от частицы к частице в упругой среде называется *механической волной*.

# Виды волн

поперечные

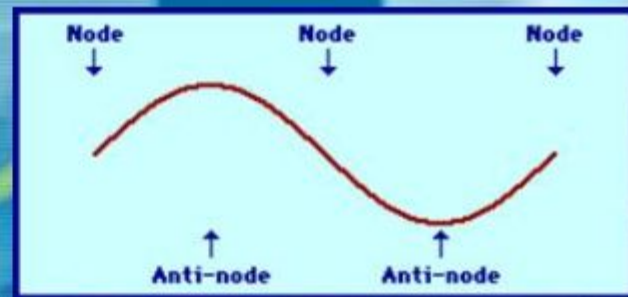
Если смещение частиц происходит перпендикулярно направлению распространения волны, то волна называется *поперечной*

Поперечная волна может распространяться только в твёрдой среде, потому что для её распространения нужна деформация сдвига.



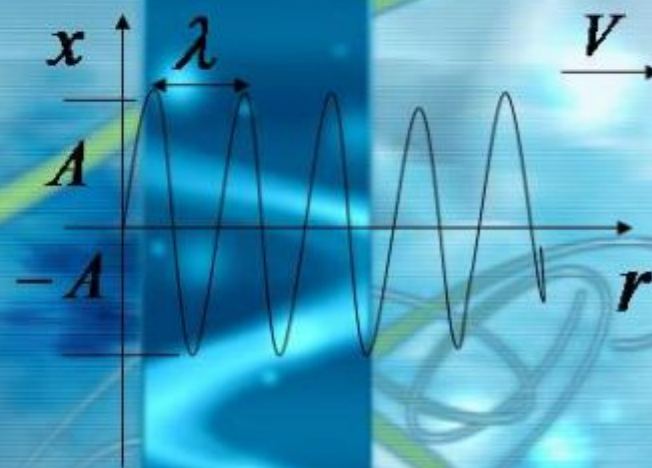
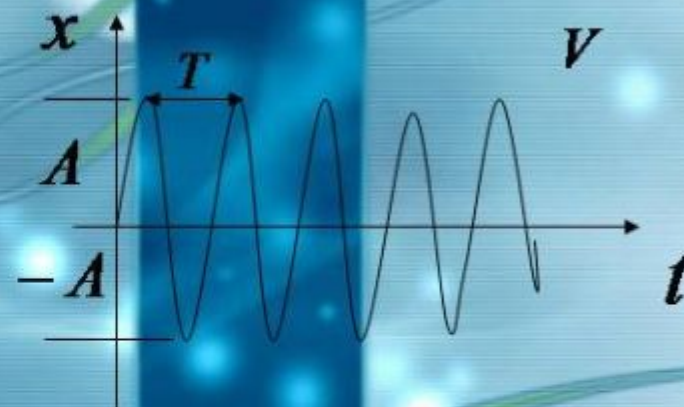
продольные

Если смещение частиц совершается вдоль направления распространения волны, то такие волны называются *продольными*



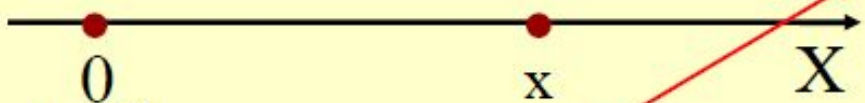
# Параметры волны

1.  $v$  – скорость распространения волны
2.  $\lambda$  – длина волны
3.  $A$  – амплитуда колебаний волны
4.  $L$  – путь волны по прямой
5.  $T$  – период волны (время, за которое волна проходит путь  $\lambda$ )
6.  $\nu$  – частота колебаний волны (число волн, возникающих за 1 секунду)
7.  $t$  – время, в течении которого распространяется волна.
8.  $x$  – отклонение каждой точки от положения равновесия
9.  $r$  – расстояние точки от источника колебаний



# Уравнение плоской механической волны

- Выражает зависимость **смещения ( $S$ )** колеблющейся точки, которая участвует в волновом процессе, от **координаты** ее равновесного **положения во времени**

$$S_0 = A \cos(\omega t) \quad S = A \cos[\omega(t - \tau)]$$


Пусть:

Амплитуда колебаний всех точек равна  $A = const$

$\omega$  – круговая частота колебаний, определяется частотой внешнего воздействия

$\tau$  – время, за которое возмущение дойдет до точки с координатой  $x$

$v$  – скорость распространения волны

$$\varphi = \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

Знаем, что:

$$\tau = \frac{x}{v}$$

$$S = A \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

$\varphi$  – фаза волны

# Энергетическая характеристика волны

1. **Поток энергии волны ( $\Phi$ )** - это величина, равная средней энергии, переносимой волной в единицу времени через некоторую поверхность:

$$\Phi = \frac{dE}{dt} \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right]$$

2. **Интенсивность волны или плотность потока энергии волны ( $I$ )** - это величина, равная потоку энергии, переносимой волной через единичную площадь, перпендикулярную направлению распространения волны:

$$I = \frac{\Phi}{S} \quad (3) \quad \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

# Эффект Доплера

- ➔ **Эффектом Доплера** называют **изменение частоты волны, воспринимаемой наблюдателем (приемником волн), вследствие относительного движения источника волн и/или их приемника**
- ➔ Наблюдается в акустике, оптике

**Эффект Доплера** описывают формулой:

$$\nu' = \frac{v \pm v_{\text{н}}}{v \mp v_{\text{и}}} \nu$$

частота волны,  
воспринимаемая  
приемником

частота волны,  
испускаемой  
источником

$v$  – скорость распространения волны в среде

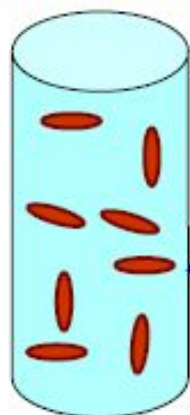
$v_{\text{н}}$  и  $v_{\text{и}}$  - скорости движения приемника и источника волн,  
соответственно

- **Верхние** знаки “+” и “-” используют при взаимном **сближении** источника и приемника волн
- **Нижние** знаки “-” и “+” используют при **удалении** источника и приемника волн друг от друга



**Эффект Доплера** используют в медицине (диагностике) для определения скорости кровотока (скорости движения частиц в среде) при помощи УЗ-волн

**Кровеносный сосуд**



Отраженная  
УЗ-волна

**Техническая система**

- Генератор УЗ-волн с частотой  $\nu_r$
- Приемник УЗ-волн, воспринимает волны частотой  $\nu_{пр}$

Неподвижна

$\nu_0$  - Скорость движения объекта (клеток)

Частота, воспринимаемая объектом:

$$\nu_1 = \frac{v + v_0}{v} \nu_r$$

Частота, воспринимаемая приемником:  $\nu_{пр} = \frac{v}{v - v_0} \nu_1 = \frac{v + v_0}{v - v_0} \nu_r$

Разница частот (**доплеровский сдвиг**):  $\nu_{пр} - \nu_r = \frac{2v_0}{v - v_0} \nu_r = \nu_d$

Для УЗ-волн  $v \gg v_0$ :

$$\nu_d = \frac{2v_0}{v} \nu_r$$

### 3. Частотные диапазоны волн

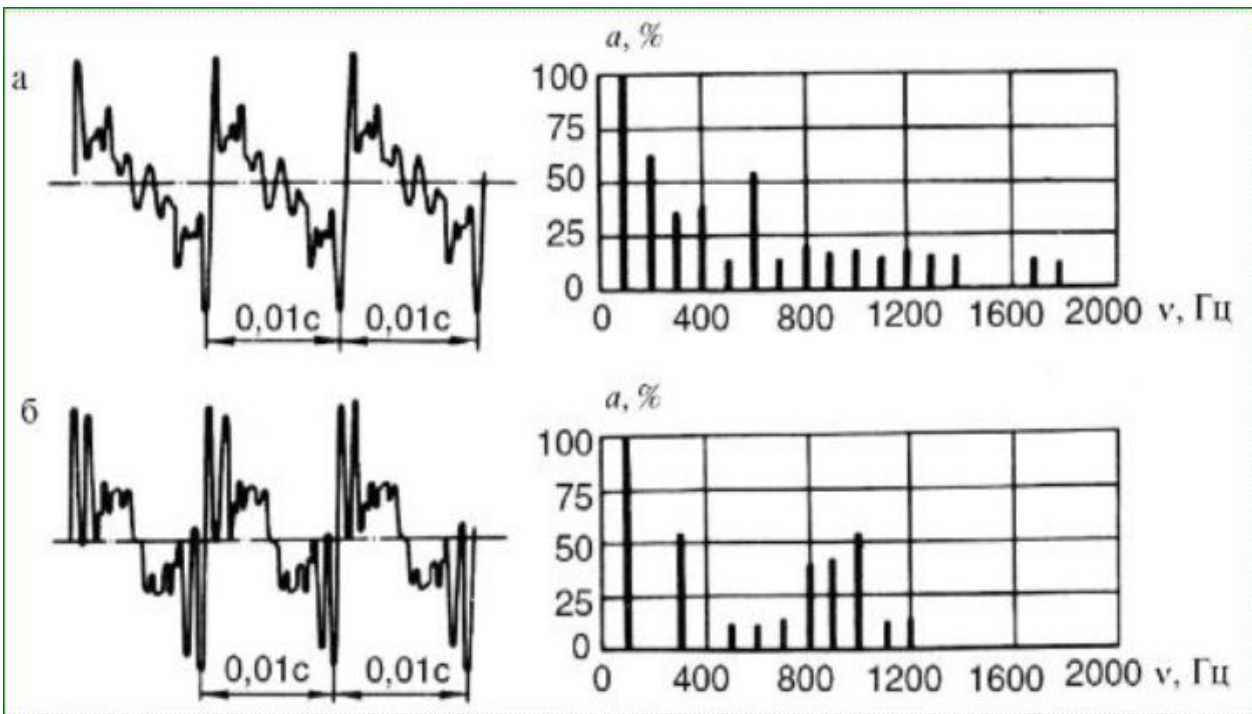
➔ **Частота волны ( $\nu$ )** – это частота колебаний точек среды

Частота, Гц	Диапазон	Пример
0,5 – 20	Инфразвуковой	Цунами, тоны сердца
20 – 20000	Звуковой (слышимый)	Голос
$2 \cdot 10^4 - 10^{8-9}$	Ультразвуковой (УЗ)	Звуки дельфинов, летучих мышей, излучатели УЗ
$10^9 - 10^{13}$	Гиперзвуковой	Тепловые колебания молекул

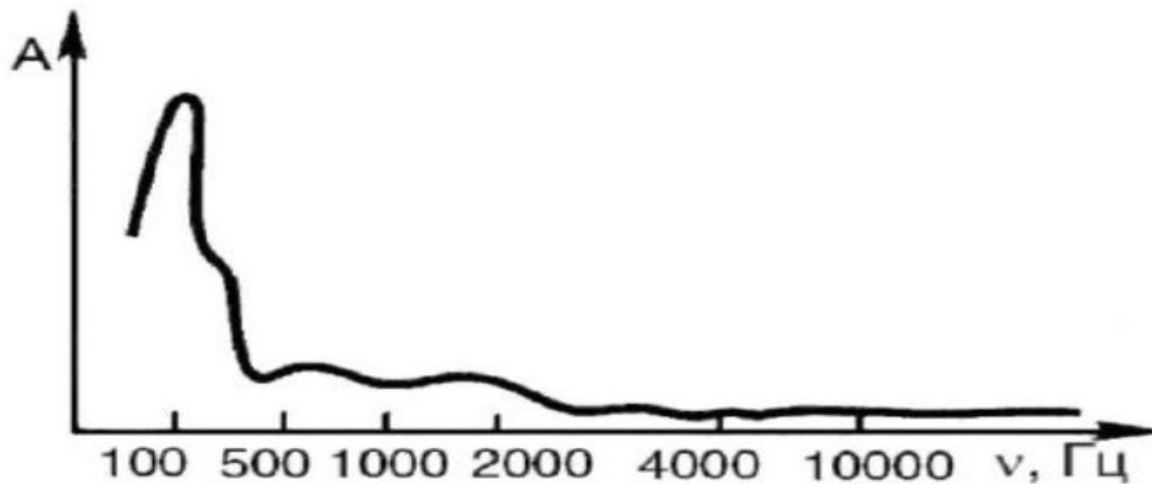
# Звук

- Звук в широком смысле - упругие колебания и волны, распространяющиеся в газообразных, жидких и твердых веществах; в узком смысле - явление, субъективно воспринимаемое органами слуха человека и животных.
- В норме ухо человека слышит звук в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц. Однако с возрастом верхняя граница этого диапазона уменьшается:

Возраст	Верхняя граница частоты, Гц
Маленькие дети	22 000
До 20 лет	20 000
35 лет	примерно 15 000
50 лет	примерно 12 000



Акустические спектры одной и той же ноты ( $\nu_0 = 100$  Гц), взятой на рояле (а) и кларнете (б).



Спектр, полученный от шума горения газовой горелки

# Физические характеристики звука

- **1. Скорость (v).** Звук распространяется в любой среде, кроме вакуума. Скорость его распространения зависит от упругости, плотности и температуры среды, но не зависит от частоты колебаний. Скорость звука в газе зависит от его молярной массы (M) и абсолютной температуры (T):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

- Где  $\gamma$  - отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме
- R – универсальная газовая постоянная
- T – температура газа

Скорость звука в воде равна 1500 м/с; близкое значение имеет скорость звука и в мягких тканях организма.

# Физические характеристики звука

- **2. Звуковое давление.** Распространение звука сопровождается изменением давления в среде. Звуковое давление ( $\Delta P$ ) - это амплитуда тех изменений давления в среде, которые возникают при прохождении звуковой волны.
- **3. Интенсивность звука.** Распространение звуковой волны сопровождается переносом энергии. Интенсивность звука - это плотность потока энергии, переносимой звуковой волной.
- **4. Частота** – количество колебаний в единицу времени.

# Характеристики слухового ощущения

- Звук является объектом слухового ощущения. Он оценивается человеком субъективно. Все субъективные характеристики слухового ощущения связаны с объективными характеристиками звуковой волны.
- **Высота, тембр, громкость**
- Воспринимая звуки, человек различает их по высоте и тембру громкости.
- **Высота** тона обусловлена прежде всего частотой основного тона (чем больше частота, тем более высоким воспринимается звук). В меньшей степени высота зависит от интенсивности звука (звук большей интенсивности воспринимается более низким).
- **Тембр** - это характеристика звукового ощущения, которая определяется его гармоническим спектром. Тембр звука зависит от числа обертонов и от их относительных интенсивностей.
- **Громкостью** звука называют интенсивность (силу) слуховых ощущений. Громкость связана с частотой и интенсивностью звука.

# Закон Вебера-Фехнера

*Закон Вебера-Фехнера: если увеличивать раздражение в геометрической прогрессии (т.е. в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (т.е. на одинаковую величину).*

Применительно к звуку это означает, что если интенсивность звука принимает ряд последовательных значений, например  $aI_0$ ,  $a^2I_0$ ,  $a^3I_0$  ( $a$  - некоторый коэффициент,  $a > 1$ ) и т.д., то соответствующие им ощущения громкости звука  $E_0$ ,  $2E_0$ ,  $3E_0$  и т.д.

Математически это означает, что громкость звука пропорциональна логарифму интенсивности звука.

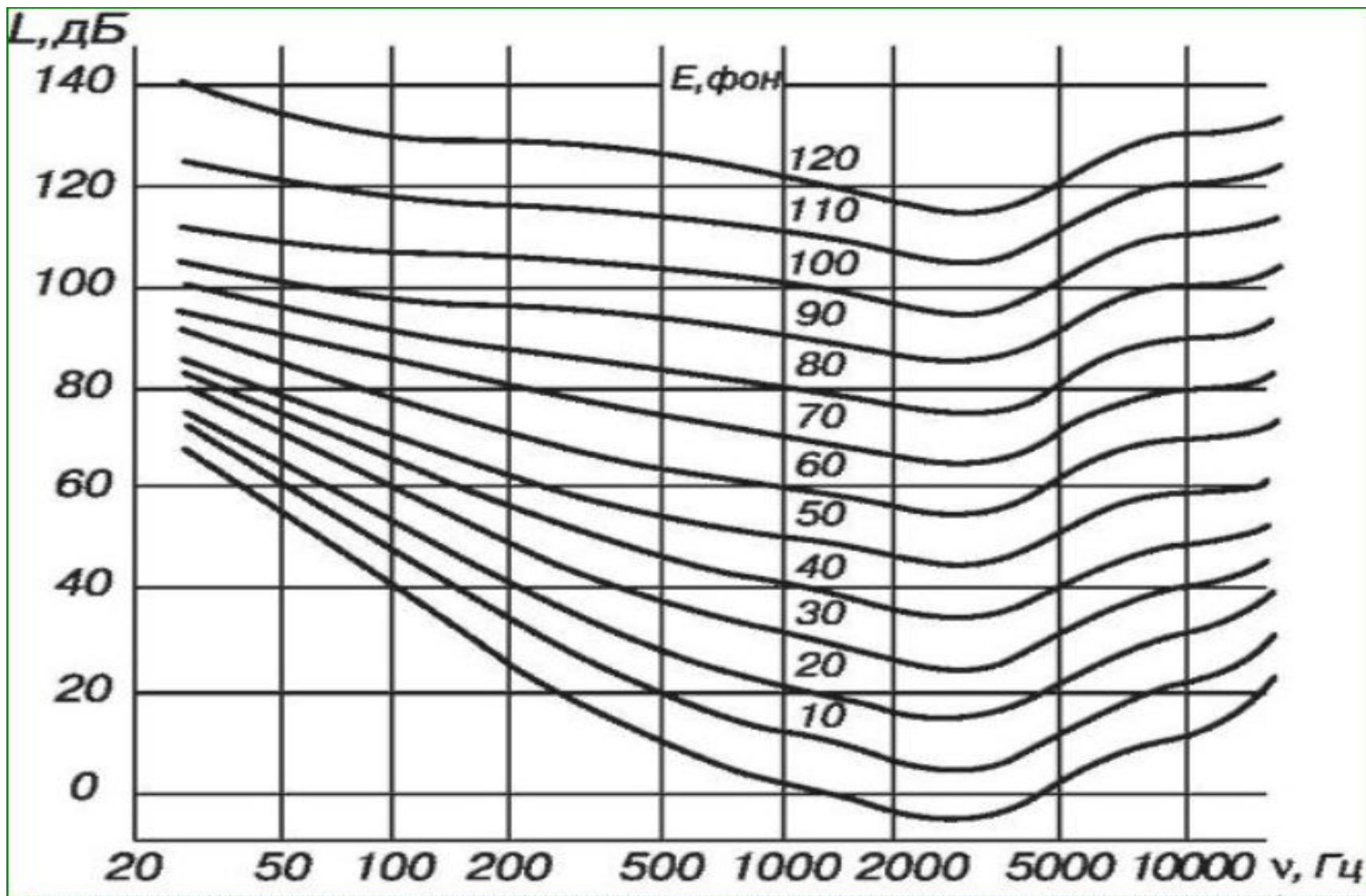
Если действуют звуковое раздражение с интенсивностью  $I$ ,  $I_0$  - порог слышимости, то на основании закона Вебера-Фехнера громкость связана с интенсивностями следующим образом:

$$E = 10k \lg(I / I_0),$$

где  $k$  - некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности. Условно считают, что на частоте 1 кГц  $k = 1$



# Кривые равной громкости



# Аудиометрия

В медицинской практике используется ряд методов диагностики, способных помочь в оценке степени и характера глухоты, а также в определении причин её спровоцировавших. Одним из них является аудиометрия. Уникальность данного метода в том, что он лишён противопоказаний и не имеет осложнений, поэтому аудиометрия практикуется как способ проверки слуха даже у самых маленьких детей.

## Преимущества аудиометрии

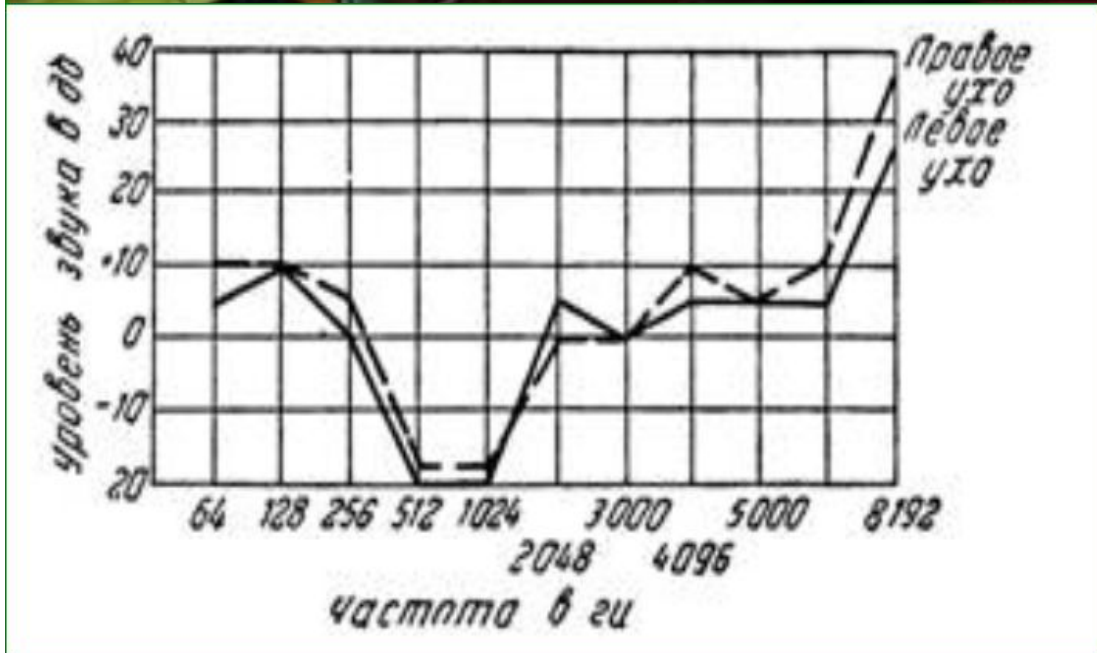
Аудиометрия - это метод диагностики слуховых нарушений, при котором исследуется чувствительность к звуковым волнам, отличающимся по частоте. В результате аудиометрии определяется не только степень нарушения слуха, но и собирается вся информация, необходимая для точного подбора слухового аппарата.

Аудиометрия проводится врачом-сурдологом при помощи прибора, который называется аудиометр. Современная аудиометрия проводится при помощи электронного аудиометра, который определяет порог слышимости на разных частотах.

Итогом аудиометрии становится аудиограмма - специальный график, в котором отражена острота слуха человека. Это наиболее важный показатель, который иллюстрирует минимальную интенсивность слуха, способную восприниматься ухом. Её принято называть понятием «порог чувствительности».



Аудиометр – прибор для измерения зависимости порога слышимости от частоты звука



При построении аудиограммы на оси абсцисс откладывается интенсивность звука в децибелах, на оси ординат — частоты. При определении порога слышимости для данной частоты на аудиограмме отмечается соответствующая точка