

Лекция №4

Механические колебания. Волны. Акустика

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
2. **Свободные гармонические колебания**
3. Характеристики колебаний
4. **Кинетическая и потенциальная энергия колебаний**
5. **Вынужденные колебания**
6. **Волны в упругой среде. Уравнение волны. Характеристики.**
7. **Физические основы биологической акустики**
8. **Звуковые методы исследования в клинике**
9. **Ультразвуковые колебания. Воздействия ультразвука на биологические ткани**
10. **Эффект Доплера и его применение в медицине.**

Механические колебательные процессы и живой организм (Биомеханика)

Этот вопрос нас интересует в двух аспектах:

1. Организм как колебательная система:
 - а) сердце;
 - б) биоритмы;
 - в) пульсирующий ток крови;
 - г) синтез звуковых колебаний (гортань);
 - д) дыхательный процесс.

2. Воздействие колебаний (волн) на организм:
 - а) особенности слухового восприятия;
 - б) вибрации;
 - в) ультразвуковые колебания;
 - г) инфразвуковые колебания.

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебания - это движения, которые повторяются с течением времени.

Колебательная система - тело или несколько тел, которые совершают колебания.

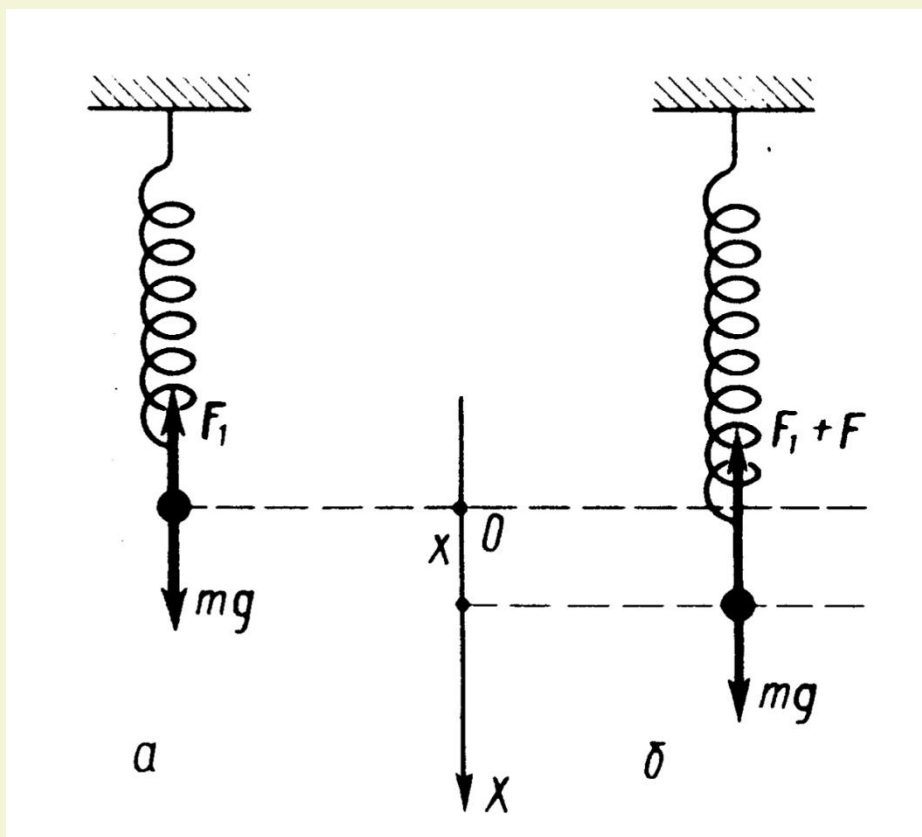
Условия возникновения колебаний:

1. На систему должна действовать внешняя сила, которая изменяет ее координату относительно положения равновесия. В результате система получает запас потенциальной или кинетической энергии.
2. В системе должна возникать упругая или квазиупругая сила, которая всегда направлена к положению равновесия и прямо пропорциональна смещению тела от положения равновесия.
- 3 Сила трения в системе должна быть малой по величине

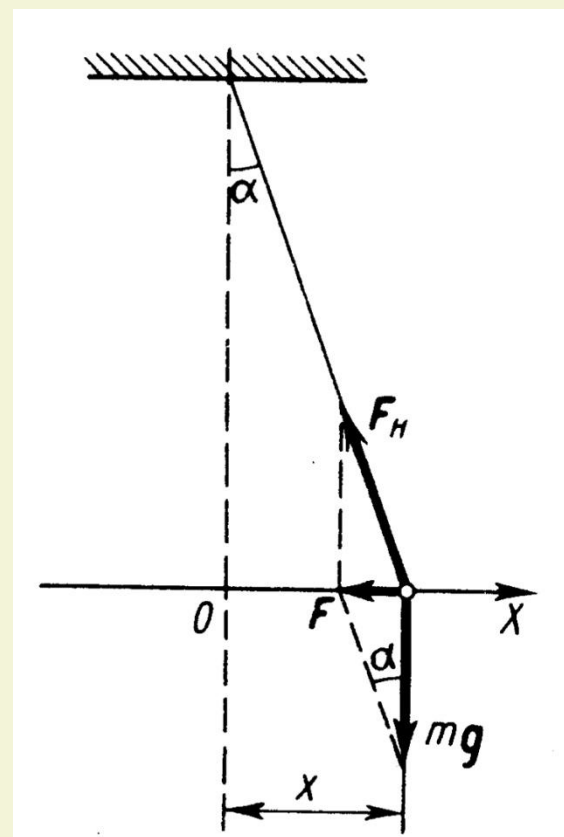
Квазиупругая сила - неупругая по природе, но имеет такие же свойства, как и упругая сила.

Примеры колебательных систем

Пружинный маятник



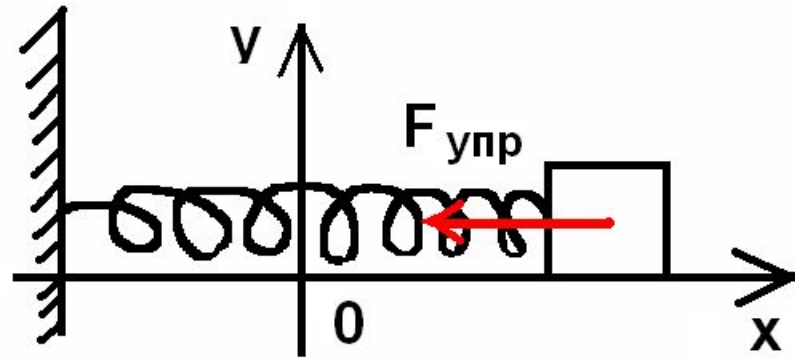
Математический маятник



Свободные гармонические колебания

Рассмотрим горизонтальный пружинный маятник. Силу трения

не учитываем. Согласно второму закону Ньютона $\overset{\boxtimes}{m}\overset{\boxtimes}{a} = \overset{\boxtimes}{F}_{\text{упр}}$



$$ma = -kx$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

Обозначим $\frac{k}{m} = \omega_0^2$, где ω_0 - собственная частота колебаний

Тогда дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний имеет вид:

Решения этого уравнения: $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ

Период (T) – время одного полного колебания.

Единица измерения [T] – с (секунда)

Частота (ν) – число колебаний за единицу времени.

Единица измерения [ν] – Гц (герц).

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad \nu = \frac{1}{T}$$

Циклическая частота (ω) – число колебаний за 2π секунд.

Единица измерения [ω] – рад/с

$$\omega = 2\pi\nu; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Амплитуда колебания (А) – максимальное значение изменяющейся величины.

В уравнении $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$

x – смещение тела от положения равновесия в любой момент времени,

$A = x_{\text{макс}}$ – амплитуда смещения

Фаза колебаний (ϕ) определяет состояние колебательной системы в произвольный момент времени. Единица измерения $[\phi]$ – рад (радиан).

$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, где φ_0 - начальная фаза колебаний (при $t=0$)

ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР

- Тело массы m , колеблющееся горизонтально под действием силы упругости пружины $F = -kx$ (k — коэффициент упругости, x — смещение тела относительно положения равновесия, знак “минус” означает, что упругая сила направлена противоположно направлению смещения x) согласно 2-му закону Ньютона запишем:

$$ma = -kx \quad \text{или} \quad m\ddot{x} = -kx$$

Обозначим:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{уравнение гармонического осциллятора}$$

Решением является:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или}$$

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

- Частота ω_0 называется **собственной частотой** данного гармонического осциллятора.

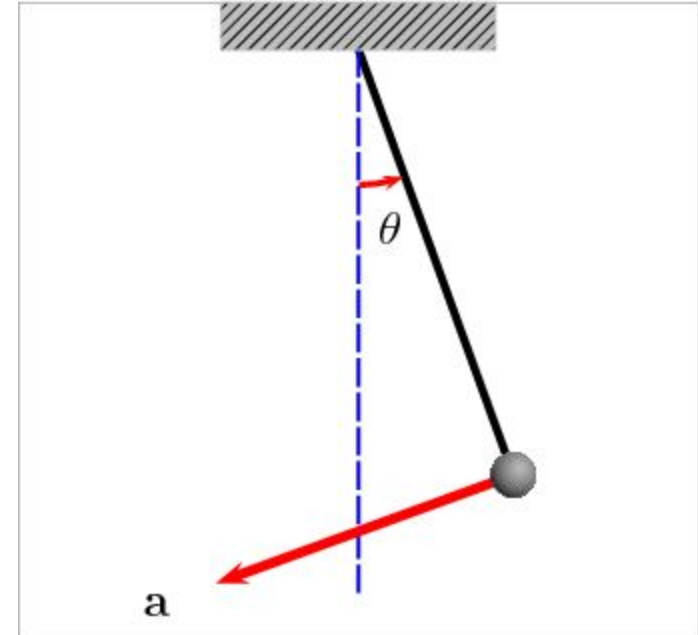
Скорость и ускорение в гармоническом колебательном движении точки определяются соответствующими производными по времени:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$v_x = \dot{x} = -\omega A \cos(\omega t + \varphi_0) = \omega A \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a_x = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x = \omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

- **Скорость** изменяется по гармоническому закону, но **ее амплитуда больше амплитуды x в ω раз и опережает x на $\pi/2$**
- Ускорение изменяется по гармоническому закону, но **его амплитуда больше в ω^2 раз и опережает x на π**
- (т.е. в противофазе с x)

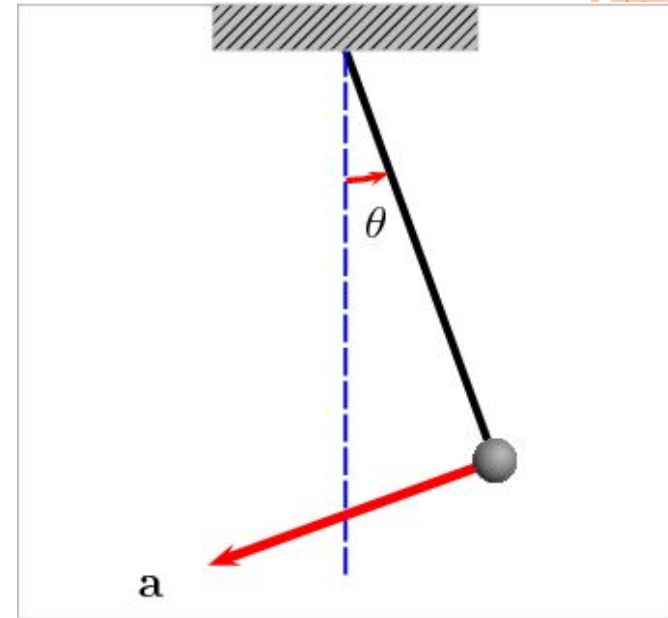


Способы представления гармонических колебаний

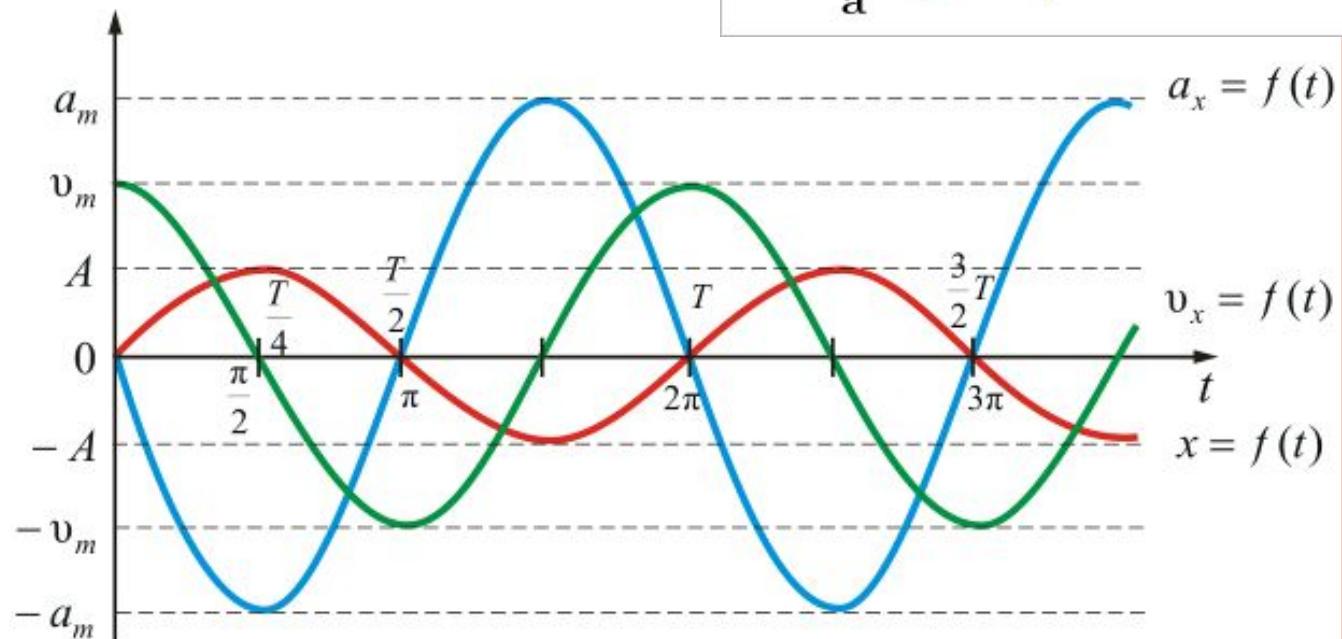
а) аналитический: $x = a \sin(\omega t + \alpha)$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi) = v_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 a \sin(\omega t + \varphi) = -a_m \sin(\omega t + \varphi)$$



б) графический:



КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ

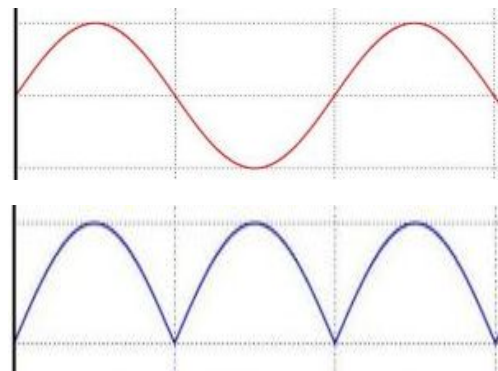
- Если проходим через положение равновесия, то вся энергия переходит в кинетическую (потенциальная = 0) и, наоборот, в крайнем положении вся энергия переходит в потенциальную.

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2} = \frac{kA^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}, T_{\text{макс}} = \frac{kA^2}{2}$$

$$U = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}, U_{\text{макс}} = \frac{kA^2}{2} = T_{\text{макс}}$$

$$E = T + U = \frac{kA^2}{2} (\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)) = \frac{kA^2}{2} = \text{const}$$

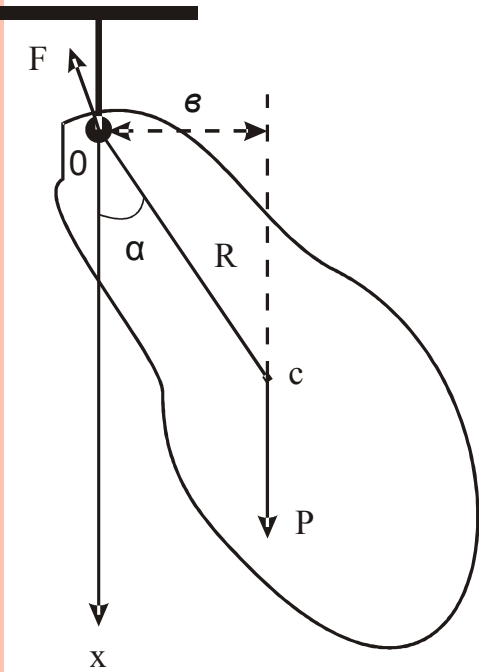
Сравнивая графики $\sin^2$ и $\sin$ можно видеть, что **T и U изменяются с частотой $2\omega_0$** . Т.е. энергия от T к U и наоборот в процессе колебаний перекачивается в два раза быстрее.



$\sin x$

$\sin^2 x$

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК



Физическим маятником называется твердое тело, которое может колебаться вокруг горизонтальной оси (возможно только при условии, что центр масс тела не лежит на этой оси). Т.е. нужен ненулевой момент сил. Движение такого маятника можно описать основным уравнением динамики для вращательного движения тела:

$$I\beta = \sum N_{\text{внеш}}$$

где I — момент инерции маятника относительно горизонтальной оси вращения через точку O . Внешних сил здесь две: сила F упругого происхождения (изгибает ось), действующая на маятник со стороны оси в точке O и сила тяжести P , приложенная в центре масс. Величина и направление силы F нам неизвестны, но это неважно, так как она проходит через ось вращения и поэтому ее момент равен нулю (плечо равно нулю).

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Момент силы тяжести:

$$N = [RP] = -Rmg\sin\alpha = -P\vartheta$$

где $\vartheta = R\sin\alpha$ - плечо силы тяжести. Знак «минус» означает, что при $\alpha > 0$, то есть при отклонении против часовой стрелки момент силы вызывает вращение по часовой стрелке (в направлении противоположном первоначальному отклонению). Т.е момент силы тяжести действует аналогично квазиупругой силе $-kx$. Итак, получаем:

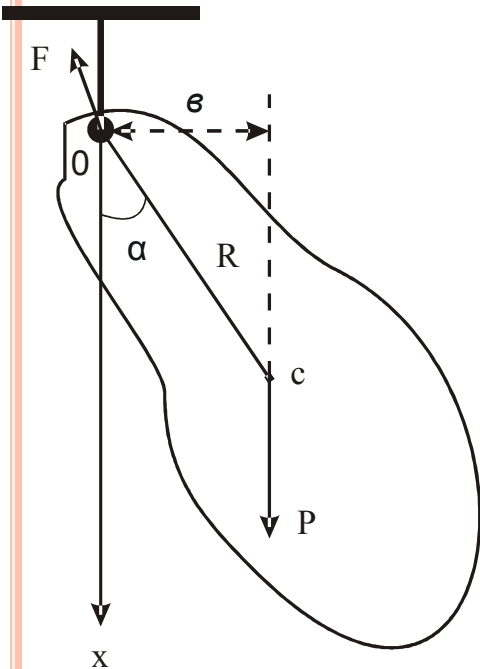
$$I \alpha'' = -mgR\sin\alpha$$

При малых α (при $\alpha \ll 1$ в радианной мере) $\sin\alpha \approx \alpha$ и

$$\alpha'' + \omega^2 \alpha = 0, \quad \text{где}$$

$$\omega^2 = \frac{mgR}{I}$$

R- расстояние от оси вращения до центра масс



ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

В результате имеем дифференциальное уравнение гармонических колебаний, решением которого как нам уже известно является функция:

$$\alpha(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

где циклическая частота

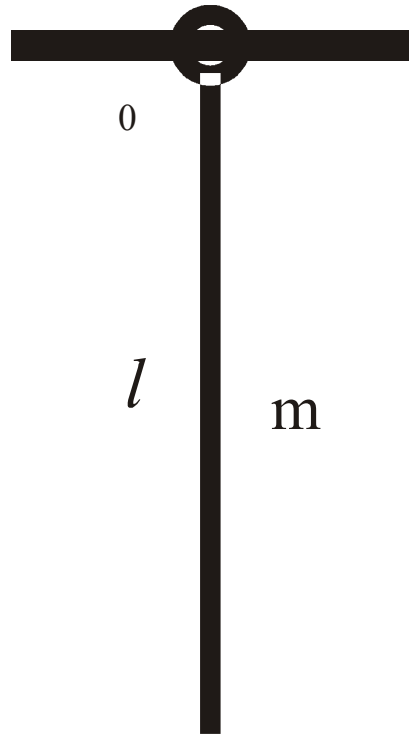
$$\omega = \sqrt{\frac{mgR}{I}}$$

а период колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgR}}$$



КОЛЕБАНИЯ ОДНОРОДНОГО СТЕРЖНЯ



Найдем, для примера, частоту колебаний однородного стержня, качающегося на оси, проходящей через его край.

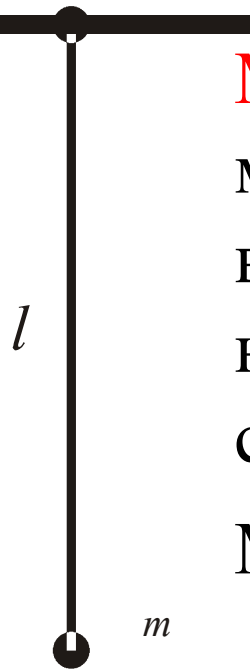
По теореме Штейнера момент инерции стержня относительно оси 0 равен:

$$I = I_0 + md^2 = \frac{1}{12} ml^2 + m(l/2)^2 = \frac{1}{3} ml^2.$$

$$\omega = \sqrt{\frac{mgR}{I}} = \sqrt{\frac{mg \frac{1}{2} l}{\frac{1}{3} ml^2}} = \sqrt{\frac{3g}{2l}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК



Математическим маятником называется тело, массу которого можно считать сосредоточенной в одной точке, подвешенное на невесомой, нерастяжимой нити. Он оказывается частным случаем физического маятника.

Момент инерции материальной точки $I = ml^2$

$$\omega = \sqrt{\frac{mgR}{I}} = \sqrt{\frac{mgl}{ml^2}} = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Т.е. из-за разного характера распределения массы есть отличие в частоте колебаний математического маятника и стержня той же длины и массы.

Математический и физический маятники

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL}}$$

Приведённая длина — это условная характеристика физического маятника — это условная характеристика физического маятника. Она численно равна длине математического маятника, период которого равен $\frac{I}{ma}$ периоду данного физического маятника.

Приведённая длина вычисляется следующим образом:

где I — момент инерции где I — момент инерции относительно точки подвеса, m — масса, а a — ускорение силы тяжести. Период колебаний математического маятника зависит от его длины и ускорения силы тяжести и не зависит от массы груза.

Измерив период колебаний маятника, можно определить ускорение свободного падения g в данном месте.

Частота **собственных** колебаний зависит только от свойств системы ($\omega_0^2 = k/m$ для математического и $\omega_0^2 = mgR/I$ для физического маятников),

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

- Если нельзя пренебрегать сопротивлением среды при записи 2-го закона Ньютона для движения тела под действием упругой силы, то его надо дополнить некоторой функцией, отражающей свойства сил сопротивления (сил трения).
- Например, если тело все время движется в жидкости с малыми скоростями, то сила трения пропорциональна скорости и второй закон Ньютона записывается так:

$$m\ddot{x} = -kx - k_1\dot{x}$$

или в стандартном для дифференциальных уравнений виде :

$$\ddot{x} + \frac{k_1}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$



ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Обозначим: $\frac{k}{m} = \omega_0^2$ (как и ранее) и $\frac{k_1}{2m} = \beta$

дифференциальное уравнение затухающих колебаний:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Решение уравнений такого типа в математике хорошо известно и в нашем случае выглядит так:

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) = A(t) \sin(\omega t + \varphi)$$

Заметим, что здесь фигурирует не собственная частота колебаний ω_0 , а частота ω , которая зависит от **коэффициента затухания β** :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

Частота свободных колебаний зависит как от свойств системы (ω_0), так и от величины потерь энергии (β)

ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ

- Быстроту затухания описывают также с помощью декремента затухания или с помощью логарифмического декремента затухания. Декрементом затухания Δ называют отношение двух последовательных амплитуд:

$$\Delta = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T}$$

- Логарифмическим декрементом затухания δ называют натуральный логарифм обычного декремента затухания:

$$\delta = \ln \Delta = \beta T$$

- если величина β фиксирована, то величина δ прямо пропорциональна периоду колебаний. Например, если $\delta=0.01$ то амплитуда уменьшится в e раз после 100 колебаний. Быстроту затухания колебаний определяется $\beta = \delta/T$.
- Добротность системы Q . При больших добротностях $\delta \approx \pi/Q$

Вынужденные колебания

Согласно II закону Ньютона $\boxed{ma} = \boxed{F_{ynp}} + \boxed{F_{Tp}} + \boxed{F_{вн}}$, где

$F_{вн} = F_0 \sin \omega_{вн} t$ - внешняя (вынуждающая) сила, изменяющаяся по гармоническому закону

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx + r \frac{dx}{dt} = F_0 \sin \omega_{вн} t \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{F_0}{m} \sin \omega_{вн} t$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x + 2\beta \frac{dx}{dt} = f_0 \sin \omega_{вн} t \quad \text{- дифференциальное уравнение вынужденных колебаний}$$

Решения этого уравнения: $x = A \sin(\omega t + \varphi); \quad x = A \cos(\omega t + \varphi)$

где амплитуда колебаний

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{вн}^2)^2 + 4\beta^2 \omega_{вн}^2}} ,$$

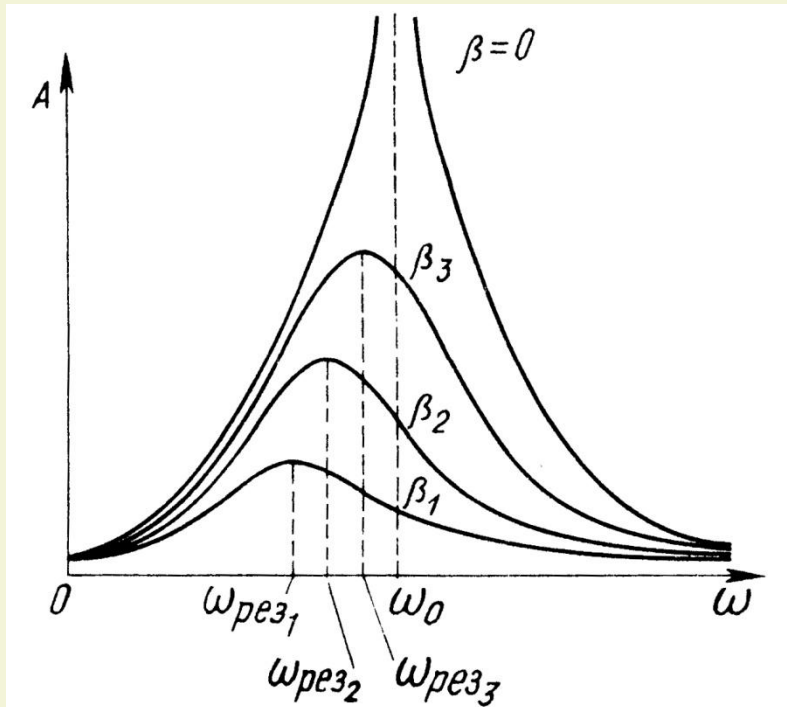
а $\omega = \omega_{вн}$ (частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы)

Резонанс – явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении собственной частоты колебаний системы с частотой вынуждающей силы:

$$\omega_0 = \omega_{вн}$$

Резонансная частота $\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$

Резонансные кривые при разных значениях коэффициента затухания β :



С уменьшением коэффициента затухания ($\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$) увеличивается резонансная частота.

Если $\beta=0$ (в системе без трения), амплитуда вынужденных колебаний бесконечно велика ($A \rightarrow \infty$).

Автоколебания

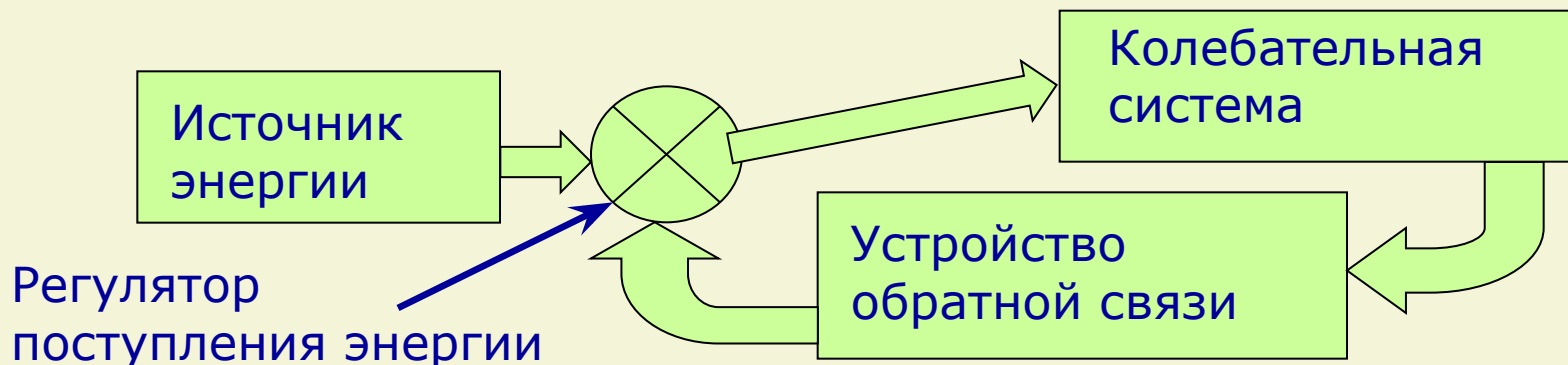
Автоколебания - это вынужденные колебания, происходящие под действием внешней силы, частоту которой задает сама колебательная система.

Так как система обладает собственной частотой ω_0 , то и автоколебания будут происходить с частотой близкой к ней, т. е. автоколебательная система будет находиться в состоянии близком к резонансу.

Такие колебания требуют минимальных затрат энергии.

Автоколебания очень широко применяются в технике, особенно в электронике. В биологических объектах практически все колебания носят автоколебательный характер.

Всем автоколебаниям присуща одна характерная особенность: наличие механизма обратной связи



Механические волны

Механическая волна – процесс распространения колебаний в упругих средах (твёрдых телах, жидкостях, газах).

Источник волны – колебательная система.

Частицы упругой среды совершают вынужденные колебания около положения равновесия.

Волна не переносит вещество, но переносит энергию.

Если уравнение колебаний источника $x = A \sin \omega_0 t$
то уравнение волны имеет вид:

$$S = A \sin \left[\omega \left(t - \frac{l}{v} \right) \right] , \text{ где}$$

S – смещение частицы среды от положения равновесия;

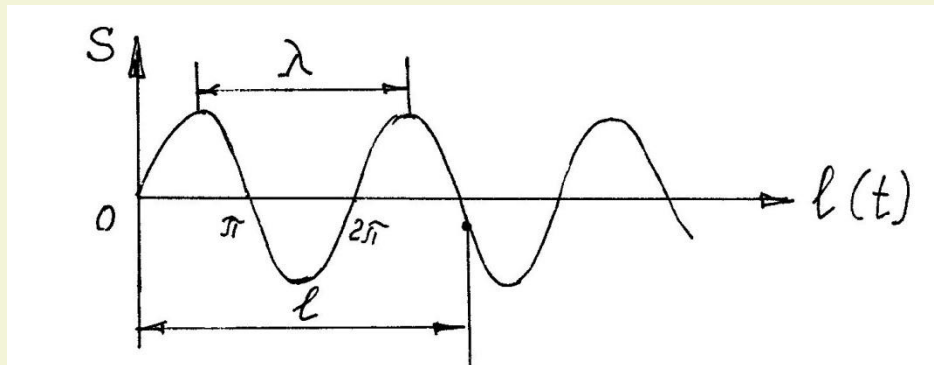
A – амплитуда колебания частиц среды;

ω – частота вынужденных колебаний (равна частоте колебаний источника);

l – расстояние от источника волны до данной точки среды;

v – скорость волны;

$\frac{l}{v} = \tau$ – время, за которое волна дошла до данной точки



Виды механических волн

Различают волны **продольные** и **поперечные**.

В **продольной волне** колебания частиц среды совершаются вдоль направления распространения волны.

Продольные волны распространяются во всех упругих средах.

В **поперечной волне** колебания частиц среды совершаются перпендикулярно направлению распространения волны.

Поперечные волны распространяются в твёрдых телах и на поверхности жидкости.

Характеристики волн

Скорость (v) – расстояние, которое проходит волна за единицу времени.

В однородной среде волны распространяются с постоянной скоростью. Скорость волны зависит от свойств среды – упругости и плотности. Чем больше плотность и упругость среды, тем больше скорость волны. Скорость механических волн в твёрдых средах больше, чем в жидких, а в жидких средах – больше, чем в газах.

Длина волны (λ) – расстояние (вдоль направления распространения волны) между точками, фазы которых одинаковы *или* расстояние, которое прошла волна за время, равное **периоду колебаний (T)**.

$$\lambda = v \cdot T \quad T = \frac{1}{\nu} \quad \lambda = \frac{v}{\nu}$$

При переходе волны из одной среды в другую изменяется скорость волны, так как изменяются свойства среды. Значит изменяется и длина волны. Частота колебаний при этом не изменяется.

Фронт волны – совокупность точек среды, колеблющихся в один и тот же момент времени в одной фазе.

Волна называется **плоской**, если фронтом волны является плоскость, перпендикулярная направлению её распространения.

Энергетические характеристики:

Поток энергии (Φ) – энергия, переносимая волной через любую поверхность за единицу времени.

Единица измерения $[\Phi]$ – Дж/с = Вт

$$\Phi = \frac{E}{t}$$

Интенсивность (I) – поток энергии волны через единицу площади – плотность потока энергии

Единица измерения $[I]$ – Вт/м²

$$I = \frac{\Phi}{S}$$

$I = \frac{E}{t \cdot S}$ энергия, переносимая волной за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны.

$$\varepsilon = \frac{E}{V} \quad (\text{Дж/м}^3) - \text{объёмная плотность энергии}$$

$$\vec{I} = \varepsilon \vec{v} \quad - \text{вектор Умова (вектор, равный по модулю интенсивности волны и совпадающий с направлением вектора скорости)}$$

Интерференция – сложение волн, в результате которого интенсивность результирующей волны в разных точках пространства принимает значение от минимального до максимального.

Дифракция – отклонение волны от прямолинейного распространения на резких неоднородностях среды. Дифракция возникает, если длина волны сравнима с размерами препятствия (меньше его).

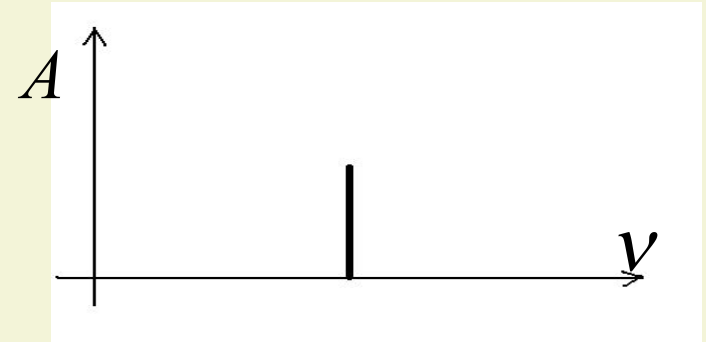
Условия **отражения** и **преломления** волн на границах среды определяются волновым сопротивлением среды (ρv , где ρ – плотность среды, v – скорость волны).

ЗВУК. АКУСТИКА

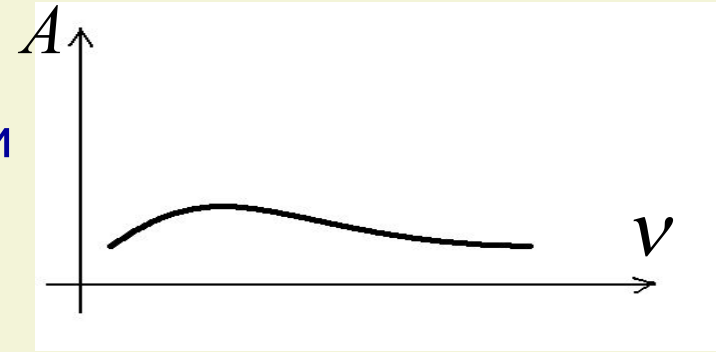
Звук - механические колебания, распространяющиеся в упругой среде в виде продольных волн, воспринимаемые ухом человека, т.е. лежащие в диапазоне частот от 16 Гц до 20000 Гц.

Виды звуков:

1. **Простой тон** – гармонические колебания определенной частоты
2. **Сложный тон** – колебание, являющееся суммой нескольких гармонических колебаний



3. **Шум** – сложный звук, являющийся суммой не повторяющихся во времени колебаний, среди которых невозможно выделить определенные частоты



4. **Удар** – не повторяющееся во времени колебание, которое происходит за очень малое время. Например, хлопок, взрыв и т.п.

Физические характеристики звука

Частота звука (ν) находится в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Интенсивность звука (I) изменяется в широком диапазоне.

Минимальная интенсивность, которая вызывает слуховое ощущение, называется **порогом слышимости (I_0)**.

Интенсивность звука, который вызывает чувство боли, называется **порогом болевого ощущения ($I_{\text{макс}}$)**.

Для частоты в 1000 Гц:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

$$I_{\text{макс}} = 10^2 \text{ Вт/м}^2$$

Скорость звука (v) различна в разных средах. Например, в воздухе $v \approx 330$ м/с, в воде $v \approx 1457$ м/с, в железе $v \approx 5000$ м/с.

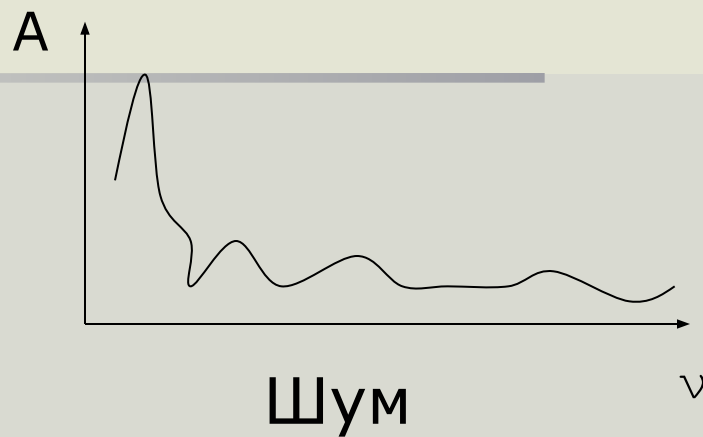
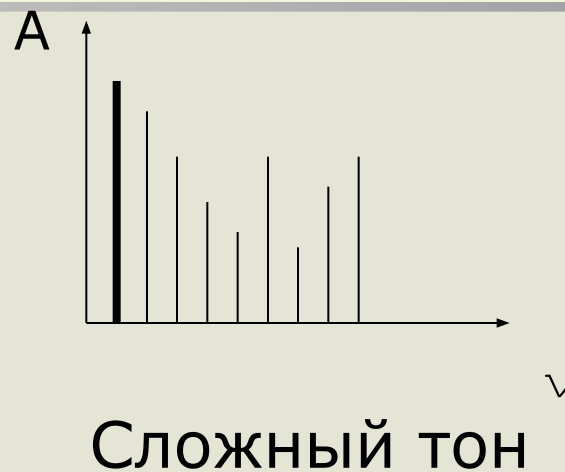
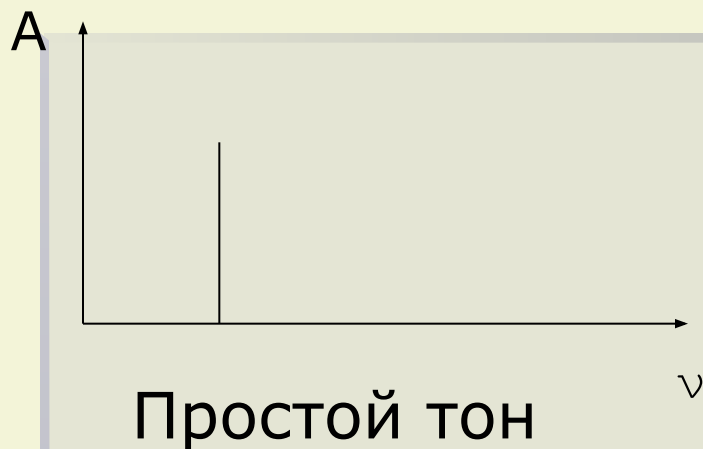
Звуковое (акустическое) давление – давление, возникающее в среде при прохождении звуковых волн

$$p = \sqrt{2\rho v I}$$

ρ – плотность среды, v – скорость звука,
 I – интенсивность звука.

Акустический спектр – набор частот, которые входят в сложный тон, с указанием их амплитуд.

Акустические спектры



Объективные характеристики звука

Частота – количество колебаний в
единицу времени

Интенсивность

Звуковое давление

**Акустический или гармонический
спектр**

Характеристики слухового ощущения

Характеристики слухового ощущения являются **субъективными**. Они связаны с объективными (физическими) характеристиками.

Субъективные характеристики звука:

Высота тона определяется частотой звуковой волны. Чем больше частота, тем выше тон.

Тембр – звуковая окраска основного тона. Определяется акустическим спектром. Основной тон – звук минимальной частоты в акустическом спектре. Остальные тоны называют обертонами. Чем больше тонов в акустическом спектре, тем богаче тембр звука.

Громкость звука характеризует уровень слухового ощущения, зависит от интенсивности звука и частоты.

Связь интенсивности и громкости, **психофизический закон Вебера – Фехнера**:

При одинаковой частоте возрастание интенсивности звука в геометрической прогрессии ($I, I^2, I^3 \dots$), воспринимается ухом в арифметической прогрессии ($E, 2E, 3E \dots$)

$$E = k \lg \frac{I}{I_0}$$

где E – уровень громкости (измеряется в фонах),
 k – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности,
 I_0 – порог слышимости,
 I – интенсивность звука.

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

– уровень интенсивности звука. Единица измерения – бел. 1 децибел = 0,1 бел.

$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ интенсивность на пороге слышимости на частоте 1 кГц

Громкость звука E

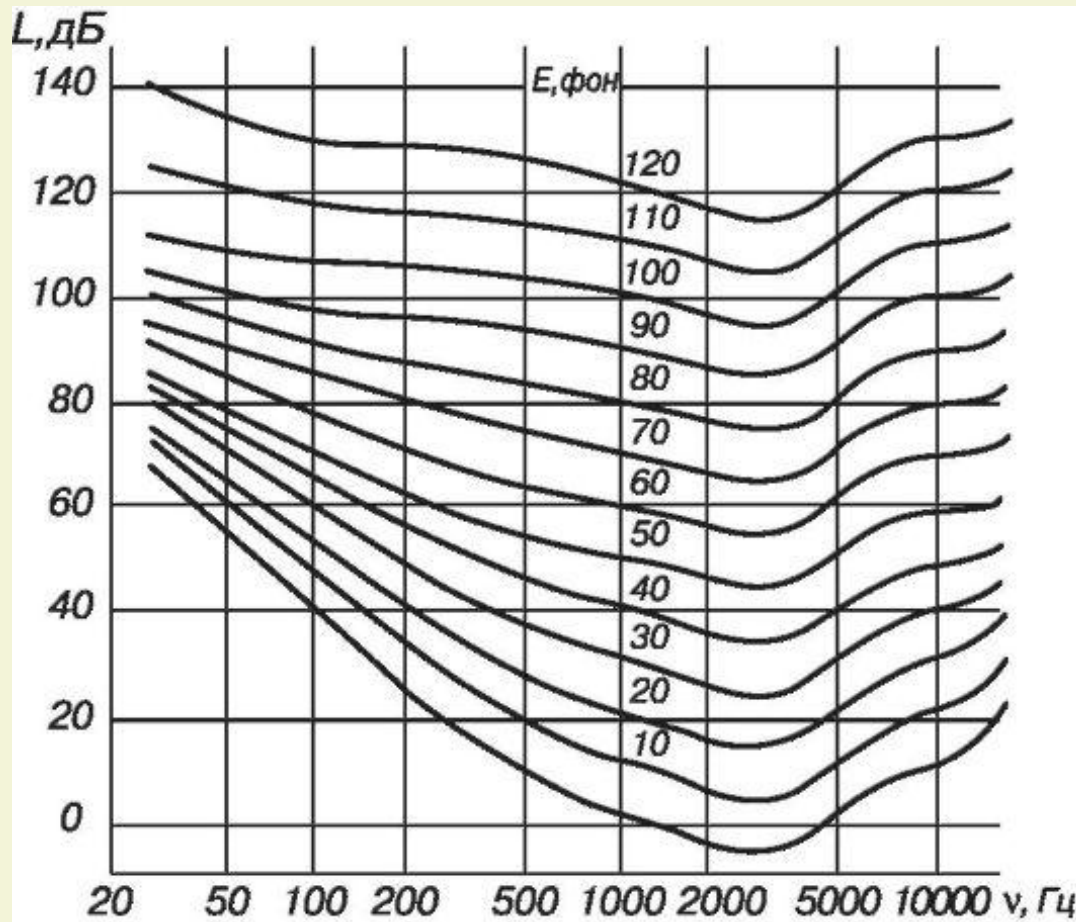
Громкость звука измеряется в фонах

На частоте 1кГц $K=1$

$$E = 10 * \lg \frac{I}{I_0} \quad \Phi(\text{фон})$$

Для отличия от шкалы интенсивности звука в шкале громкости децибелы называют фонами.
При частоте звука в 1000 Гц шкалы интенсивности и громкости совпадают.

Кривые равной громкости



Кривые равной громкости позволяют найти соответствие между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах

Аудиометрия – метод измерения остроты слуха

Примеры

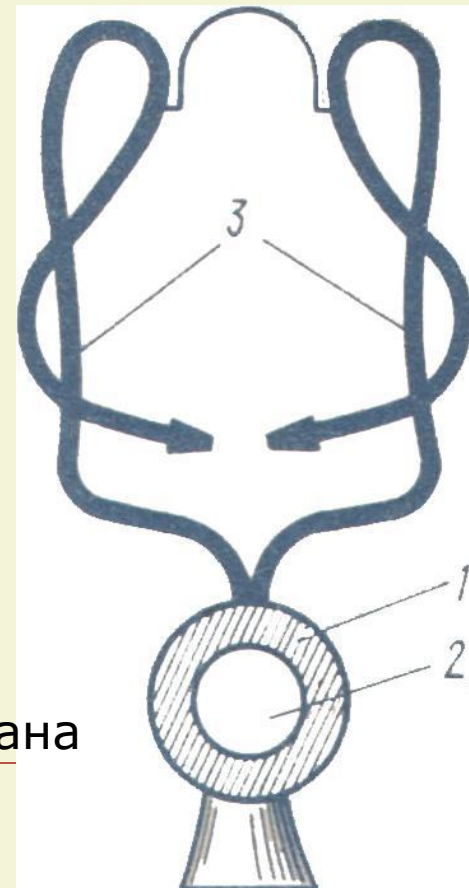
Примерный характер звука	Интенсивность звука (Вт/м ²)	Звуковое давление (Па)	Уровень интенсивности звука (Дб)
Порог слышимости	10^{-12}	0,00002	0
Шепот	10^{-10}	0,0002	20
Разговор нормальным голосом	10^{-7}	0,0064	50
Разговор громким голосом	10^{-6}	0,02	60
Шум на оживленной улице	10^{-5}	0,64	80
Крик	10^{-4}	0,2	80
Порог болевого ощущения	10	64	130

Звуковые методы в медицине

Аускультация (выслушивание) – с
помощью стетоскопа или



- 1 – полая капсула
- 2 – передающая звук мембрана
- 3 – резиновые трубки



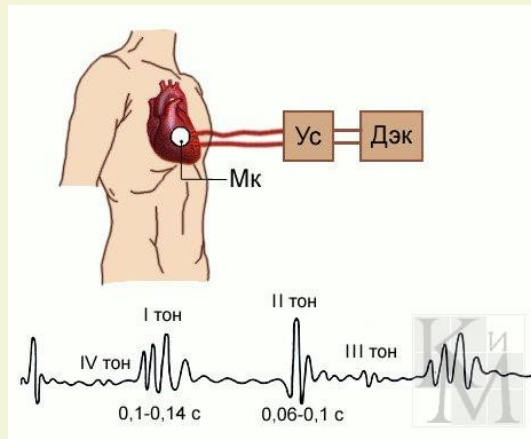
Аускультация



Звуковые методы в медицине

Перкуссия – выслушивание звучания отдельных частей тела при их простукивании

Фонокардиография (ФКГ) – графическая регистрация тонов и шумов сердца



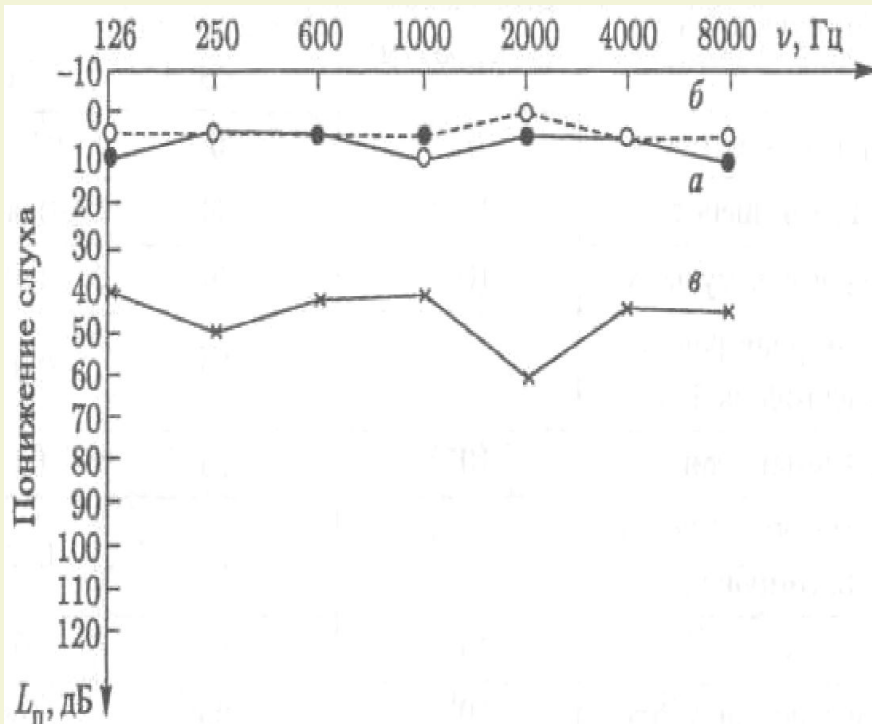
Диагностика органов слуха

Метод измерения остроты слуха называется **аудиометрией**.

На специальном приборе (**аудиометре**) определяют порог слухового ощущения на разных частотах.



Аудиограммы



кривые, которые отражают зависимость порога восприятия от частоты тона, то есть это спектральная характеристика уха на пороге слышимости.

Биофизика ультразвука

Ультразвук (УЗ) – упругие механические колебания, частота которых превышает 20 кГц.

Скорость УЗ и звука определяется плотностью среды. Зависимость прямая.

Верхний предел частоты УЗ ограничен свойствами среды, в которой распространяется волна, т.к. длина волны УЗ не может быть менее межатомного расстояния в структуре. В кристаллах получены колебания с частотой 20 МГц.

В медицине обычно используются УЗ волны с частотой порядка 800 кГц.

Ультразвук. Особенности распространения.

Все основные свойства УЗ волны и её взаимодействие с веществами определяются длиной УЗ волны, которая меньше, чем у звуковой волны.

Основные свойства УЗ волн:

1. Распространяются узким пучком.
 2. Легко фокусируются.
 3. Несут высокую энергию (до 10^4 Вт/м²).
 4. Хорошо отражаются от твёрдых тел, жидкостей.
 5. Сильно поглощаются газами.
-

Ультразвук. Взаимодействие с веществом

Ультразвук малой интенсивности:

- Диспергаторы (эмульгаторы)
- Ускорение реакций окисления
- Гибель вирусов, бактерий, грибов
- Стимулирование обменных процессов, микромассаж

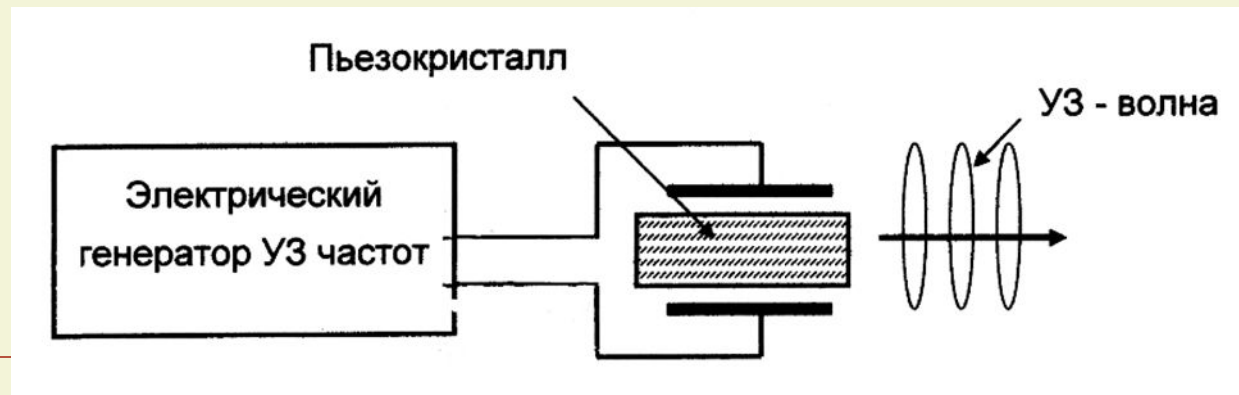
Ультразвук большой интенсивности:

- Разрыв тканей за счет кавитации
 - Разрушение злокачественных образований
 - Дробление камней в мочевом пузыре
 - Распиливание костей
-

Получение ультразвуковых колебаний

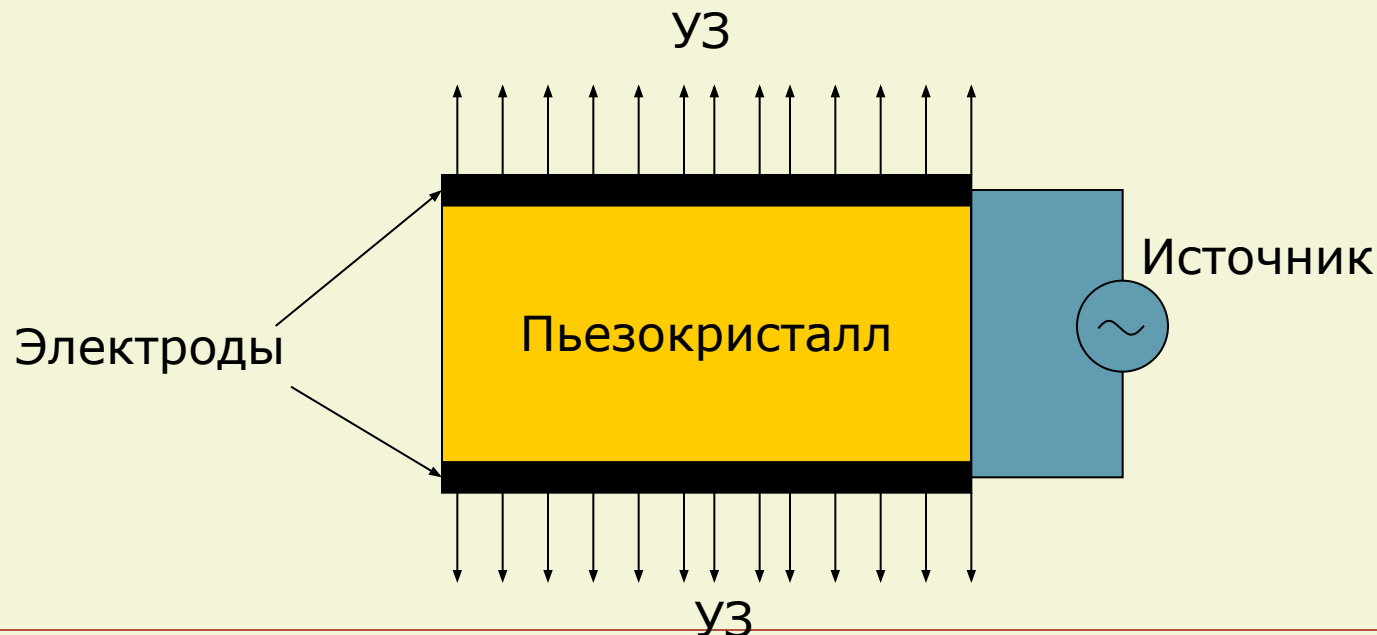
Электромеханические излучатели:

1. Основанные на явлении обратного пьезоэлектрического эффекта (высокочастотный УЗ)
2. Основанные на явлении магнитострикции (низкочастотный УЗ)



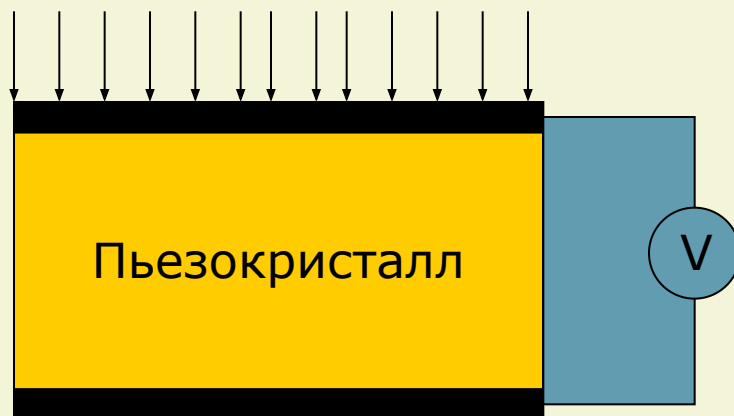
Обратный пьезоэффект

Под действием электрического поля
происходит механическая
деформация пьезокристалла



Прямой пьезоэффект

Под действием механических деформаций пьезокристалла возникает электрическое напряжение на гранях



Особенности распространения УЗ

- Малая длина волны.
Направленность. (Применимы законы геометрической оптики)
- Поглощение (ослабление интенсивности при прохождении через вещество)

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

-
- **Глубина полупоглощения** – глубина, на которой интенсивность УЗ уменьшается вдвое.

Ткань	Глубина полупоглощения, см
Мышечная	2,1
Жировая	3,3
Костная	0,23
Кровь	35

Особенности распространения УЗ

- Преломление и отражение

Так как волновое сопротивление биологических сред в 3000 раз больше волнового сопротивления воздуха, то отражение УЗ на границе воздух-кожа составляет 99,99%.

- Деформация, кавитация (возникает при интенсивностях, больших $0,8 \cdot 10^4$ Вт/м²)
 - Выделение тепла
 - Химические реакции
-

Физические процессы, обусловленные воздействием УЗ

- микровибрация на клеточном и субклеточном уровне,
 - разрушение биомакромолекул,
 - перестройка и повреждение биологических мембран, изменение проницаемости мембран,
 - тепловое действие,
 - разрушение клеток и микроорганизмов
-

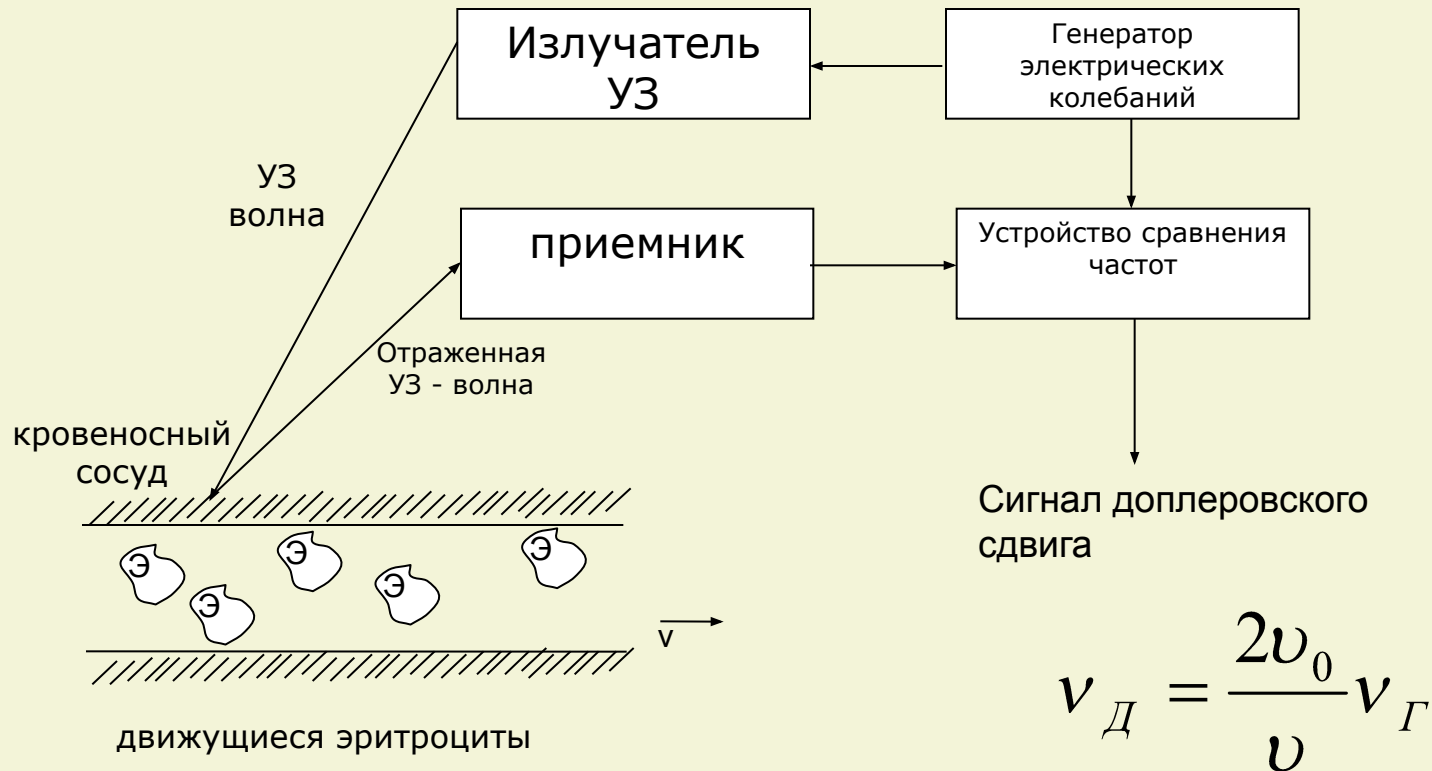
Эффект Доплера

Эффектом Доплера называют изменение частоты волн, воспринимаемых наблюдателем (приемником волн), вследствие относительного движения источника волн и наблюдателя.

$$\nu''' = \frac{v + v_n}{v - v_u} \nu$$

$$\nu''' = \frac{v - v_n}{v + v_u} \nu$$

Диагностика на основе эффекта Доплера



v_0 – скорость движения эритроцитов

v – скорость УЗ

v_G – частота генератора

v_D – доплеровский сдвиг частот

Ультразвуковая диагностика – локационные методы

Эхоэнцефалография – определение
опухолей и отека головного мозга

Ультразвуковая кардиография –
измерение размеров сердца в
динамике

Ультразвуковая локация для
определения размеров глазных сред

Ультразвуковая диагностика

Ультразвуковой Доплер эффект –
изучают характер движения
сердечных клапанов; определяют
скорость кровотока

По скорости ультразвука
определяют место повреждения
кости

Ультразвуковая голография

Ультразвуковая физиотерапия

Терапевтическое	действие
ультразвука	обусловлено
механическим, тепловым и физико-химическим факторами	

Фонофорез - введение с помощью ультразвука в ткани через поры кожи некоторых лекарственных веществ (гидрокортизона, тетрациклина и др.).

Ультразвуковая хирургия

Ультразвуковой скальпель –
рассечение тканей

Ультразвуковой остеосинтез –
«сваривания» тканей

Удаление опухолей в мозговой
ткани без вскрытия черепной
коробки

Дробление почечных камней

Практическое применение УЗ

В фармацевтической промышленности – создание эмульсий, лекарств, аэрозолей

В хирургии - стерилизация медицинских инструментов

Для ориентировки слепых в пространстве

Аппарат Sono-Ace-PICO



Позволяет проводить диагностику при:

- ☐ повреждении мышц
- ☐ повреждении мышц ротаторных манжет плечевых суставов
- ☐ повреждении мениско-связочного комплекса коленных суставов
- ☐ повреждении сухожильно-связочного аппарата всех суставов
- ☐ наличии дисковых патологий (грыжи, протрузии, стеноз позвоночного канала)
- ☐ наличии остеофитов, хондромных тел в суставах
- ☐ заболеваниях сосудов верхних и нижних конечностей, сосудов шейного отдела
- ☐ заболеваниях внутренних органов

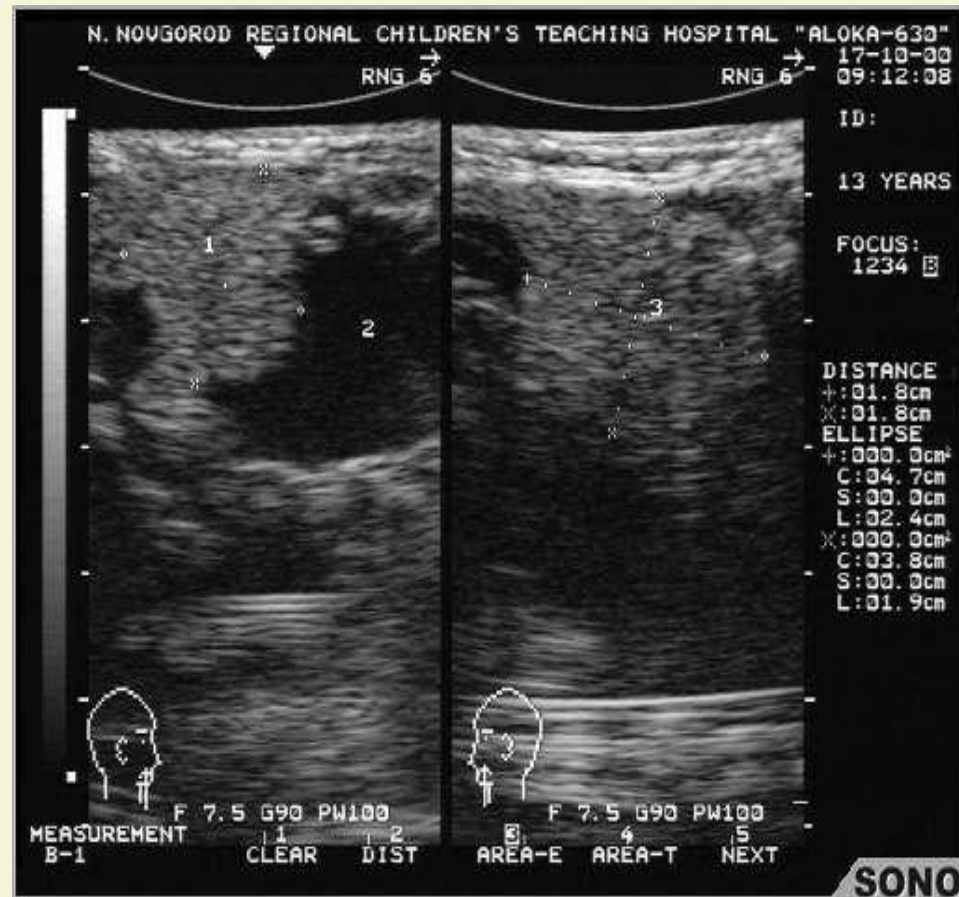
Эхографическая картина абсцесса левой миндалины у пациента 14 лет.



На снимке представлены взаимоперпендикулярные сечения образования левой миндалины, которое характеризуется нечеткими контурами и гипоэхогенным внутренним содержимым с "плавающими" эхогенными включениями. За образованием слабое акустическое усиление.

Эхографическая картина кисты правой подчелюстной слюнной железы у пациента 13 лет

На левой половине снимка представлен участок неизменной ткани правой подчелюстной железы (1), анэхогенное образование (2) с четкими контурами и эффектом дистального псевдоусиления. На правой половине снимка - неизменная левая подчелюстная слюнная железа (3).



Инфразвук и его воздействие на человека

Инфразвук – механическая волна с частотой менее 16 Гц

Действие на человека: раздражение, угнетающее настроение, головная боль, усталость.

Положение тела	Частоты собственных колебаний для человека (Гц)
Лежа	3 – 4
Грудная клетка	5 – 8
Брюшная полость	3 – 4

Заключение:

В лекции рассмотрены:

- **понятие механической волны и звука как примера такой волны;**
 - **Звук как физическая реальность и психофизическое явление**
 - **Звуковые методы исследования в клинике**
 - **Ультразвуковые колебания. Воздействия ультразвука на биологические ткани и применение УЗ методов в медицине.**
-

Тест-контроль

Человек может слышать
механические волны с частотой:

1. 0,5 Гц
 2. 5000 Гц
 3. 25000 Гц
 4. 30000 Гц.
-

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Обязательная:

- Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник. -М.: Дрофа, 2007.-

Дополнительная:

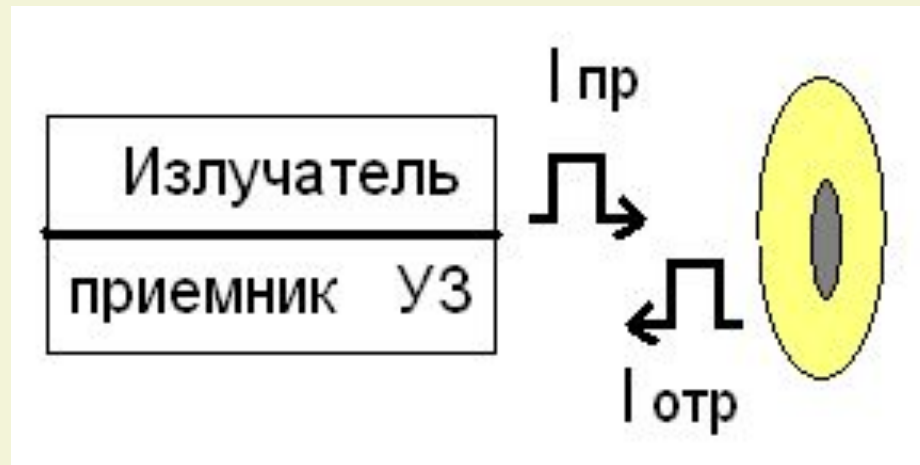
- Федорова В.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии: учебное пособие. -М.: Физматлит, 2005.-
- Антонов В.Ф. Физика и биофизика. Курс лекций: учебное пособие.-М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006.-
- Богомолов В.М. Общая физиотерапия: учебник. -М.: Медицина, 2003.-
- Самойлов В.О. Медицинская биофизика: учебник. -СПб.: Спецлит, 2004.-
- Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике для самост. работы студентов /сост. О.Д. Барцева и др. -Красноярск: Литера-принт, 2009.-
- Сборник задач по медицинской и биологической физике: учебное пособие для самост. работы студентов / сост. О.П.Квашнина и др. -Красноярск: тип.КрасГМА, 2007.-
- Физика. Физические методы исследования в биологии и медицине: метод. указания к внеаудит. работе студентов по спец. – педиатрия / сост. О.П.Квашнина и др. - Красноярск: тип.КрасГМУ, 2009.-

Электронные ресурсы:

- ЭБС КрасГМУ
- Ресурсы интернет
- Электронная медицинская библиотека. Т.4. Физика и биофизика.- М.: Русский врач, 2004.

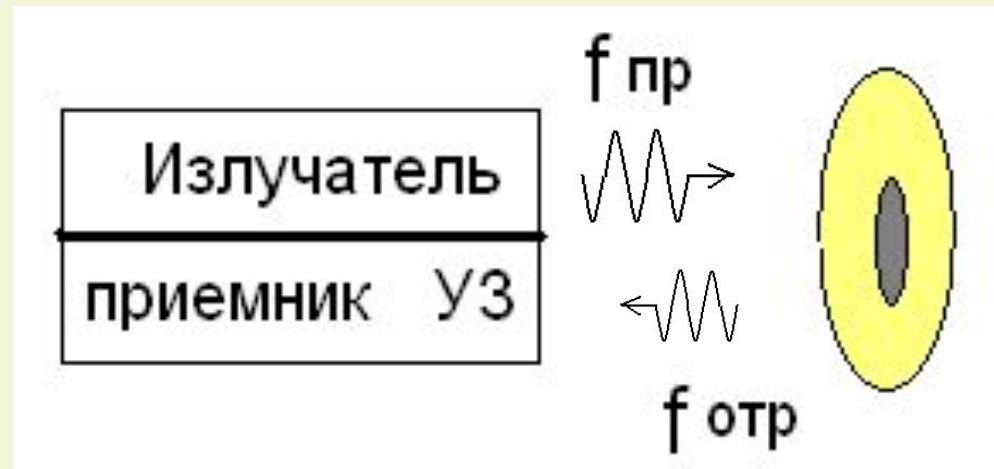
Ультразвук. Применение в диагностике

Эхоскопия



Интенсивность

Доплеровское сканирование



Частота