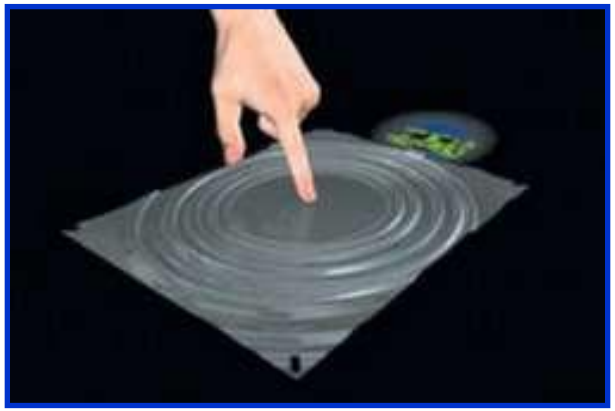
Кафедра физики БГТУ
доцент Крылов Андрей Борисович

Лекция 8 (2 сем).

Звук и ультразвук



Поперечная механическая волна на поверхности воды

1. Звук, инфра- и ультразвук. Классификация звуков.
2. Скорость распространения звука в твердых телах, жидкостях и газах.
3. Физические и физиологические характеристики звука. Уровень интенсивности звука.
4. Отражение и поглощение звука и ультразвука. Волновое сопротивление.
5. Достоинства и недостатки УЗ по сравнению со звуком.

Часть 2. Акустика

Природа звука

- *Акустика – это раздел физики, в котором изучают **звук** и связанные с ним явления.*

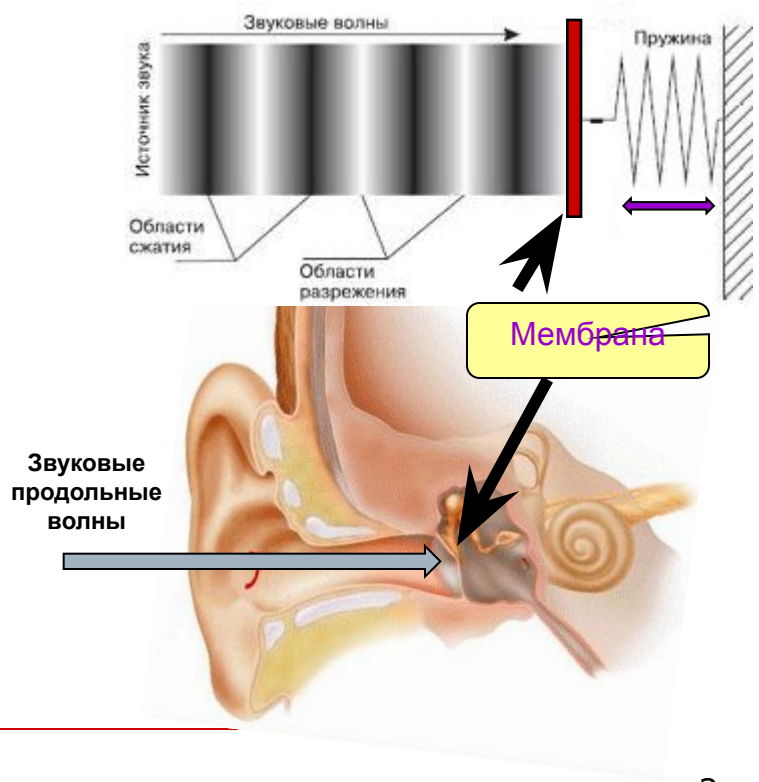
- *Звук или звуковая волна – это продольная механическая волна, которая распространяется в упругих средах (твёрдых телах, жидкостях и газах) и воспринимается человеческим ухом.*

Звуку соответствует диапазон частот ν от 16 Гц до 20000 Гц.

- *Колебания с частотой больше 20000 Гц называются ультразвуком*
- *Колебания с частотой меньше 16 Гц называются инфразвуком.*

  - *В газовой среде звуковая волна является только продольной,*
  - *в жидкостях и газах – и продольная, и поперечная.*

Но (!) человеческое ухо слышит только продольную механическую волну.



Скорость звука

- *Скорость звука в среде зависит от свойств среды (температуры, плотности среды и т.д.).*

Таблица 1. Скорость звука в разных средах

Вещество	Скорость звука, м/с	Вещество	Скорость звука, м/с
воздух при 0 ^0C	331	гладкие мышцы	1550
воздух при 20 ^0C	340	мозг	1520
вода	1437	жировая ткань	1460
хрусталик	1650	кости черепа	3660

- *Вывод из таблицы:* ***скорость звука***
  - *в воздухе* ***340 м/с,***
  - *в жидкостях и кровенаполненных тканях – около* ***1500 м/с,***
  - *твёрдых телах –* ***3000-5000*** *м/с.*

- *Для твёрдых тел скорость равна:* $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$,

где ***E*** *–* ***модуль упругости*** *(константа,* ***характеризующая упругость*** *твердого тела),*

ρ *– плотность тела.*

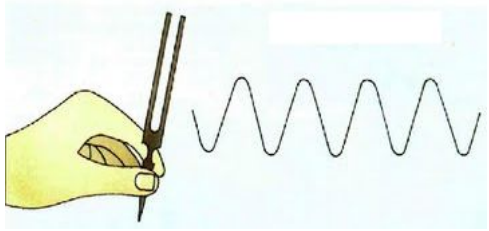
- Для воздуха скорость (в м/с) возрастает с увеличением температуры ***t*** (в градусах Цельсия):

$$v = (331{,}6 + 0{,}6t)$$

+4

Классификация звуков

Звуки делятся на тоны (простые и сложные), шумы и звуковые удары.



- ***Простой или чистый тон*** *– звук, источник которого совершает гармонические колебания (например, камертонили генратор звуковой частоты). Простой тон имеет только одну частоту* ν**.**
- ***Сложный тон*** *– звук, источник которого совершает периодические негармонические колебания (например, музыкальные звуки, гласные звуки аппарата речи).*
  - ***Любой сложный тон*** *может быть разложен на простые тона по теореме Фурье, поэтому сложный тон имеет набор кратных частот* ν_i**. *Спектр сложного тона линейчатый* (*Рис. 1а*).**

- ***Шум*** *– сочетание беспорядочно меняющихся сложных тонов (например, вибрации машин, скрип, шорох, согласные звуки речи) любых частот.* ***Спектр шума сплошной*** (*Рис. 1б*)**.**
- ***Звуковой удар*** *– это кратковременное звуковое воздействие (взрыв, хлопок).*

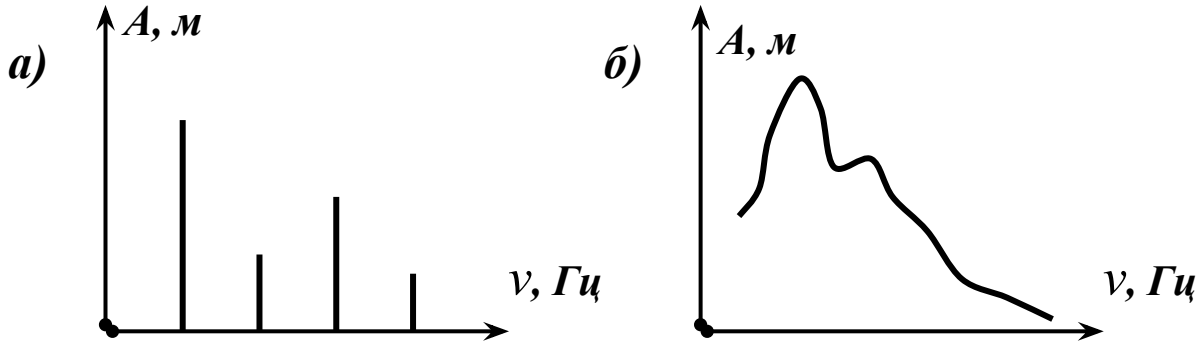


Рис. 1. Гармонические спектры **сложного тона** (***а***) и **шума** (***б***)

Физические и физиологические характеристики и связь между ними

- *Звук представляет собой:*
  - *с одной стороны частный случай **распространения** колебаний (с точки зрения физики),*
  - ***с другой стороны** субъективное ощущение (с точки зрения психофизиологии).*
- *Поэтому различают: объективные (**физические**), характеризующие **источник звука**, и субъективные (**физиологические**), характеризующие **приёмник** (ухо).*
- *Физиологические характеристики звука зависят от физических характеристик **(Табл.2).***

Таблица 2. Характеристики звука

Физические (объективные)	***Физиологические (субъективные)***
Интенсивность I (Вт/м^2) или уровень интенсивности L (дБ)	***Громкость (уровень громкости) E (фон)***
Гармонический спектр	***Тембр звука***
Частота звука ν (Гц)	***Высота звука***

Порог слышимости и порог болевого ощущения

- *Порог слышимости – это минимальная интенсивность I_0, которую человек ещё слышит, но ниже которой звук ухом не воспринимается.*
  - *Человек лучше всего слышит на частоте 1000 Гц, значит, порог слышимости на этой частоте минимален ($I_0=I_{min}$) и интенсивность на пороге слышимости на этой частоте равна $I_0=10^{-12}$ Вт/м^2.*
  - *На других частотах интенсивность на пороге слышимости выше.*

- *Порог болевого ощущения или болевой порог – это максимальная интенсивность I_{max}, воспринимаемая без болевых ощущений.*
  - *При интенсивности звука больше порога болевых ощущений происходит повреждение органов слуха.*
  - *Порог болевых ощущений на частоте 1000 Гц самый низкий : $I_{max}=10^1$ Вт/м^2.*
  - *На остальных частотах **болевой порог выше**.*

- *Таким образом, человек слышит звуки в диапазоне интенсивностей звука:*
  $I = 10^{-12} – 10^1$ Вт/м^2.
  - *Как видно, **различия в интенсивностях**, соответствующих болевому порогу и порогу слышимости **очень велики**:*

$$\frac{I_{max}}{I_0}=\frac{10^1}{10^{-12}}=10^{13}$$

(13 порядков).

Уровни интенсивности в Беллах и децибеллах

- Поэтому вводят понятие уровня интенсивности звука L: $L = \lg \frac{I}{I_0}$,
  - где L – уровень интенсивности звука любой частоты,
  - I - интенсивность данного звука,
  - I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости для частоты 1000 Гц (минимально возможная интенсивность).
- Уровень интенсивности в СИ измеряется в Белах (Б).
- Один Бел – это уровень интенсивности L такого звука, интенсивность I которого в 10 раз больше пороговой интенсивности.
- На практике пользуются единицей измерения уровня интенсивности в 1 децибел (дБ), так как это наименьшее изменение уровня интенсивности, которое может различить человеческое ухо, причём 10 дБ = 1 Б.
- Тогда связь уровня интенсивности L с интенсивностью I в децибелах:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ (дБ)}$$

А связь **уровня интенсивности L** с **уровнем громкости E** (**громкостью в фонах**)

$$E = kL \text{ (фон)}$$

k- коэффициент селективности $0 < k \leq 1$

Примеры уровней интенсивности

Таблица 3. Примеры уровней интенсивности ***L*** (в децибелах) и интенсивности ***I*** различных звуков

Источник звука	L (дБ)	I ($Вт/м^2$)
Шелест листьев	10	10^{-11}
Тиканье часов	20	10^{-10}
Мирная беседа	40	10^{-8}
Громкий разговор	70	10^{-5}
Шумная улица	90	10^{-3}
Самолет на старте	100	10^{-2}

- *Человек слышит звуки в диапазоне уровней интенсивности L звука от **0** до **130 дБ**.*
- *Порог слышимости (ПС) и болевой порог (БП) **разные по величине на разных частотах**.*

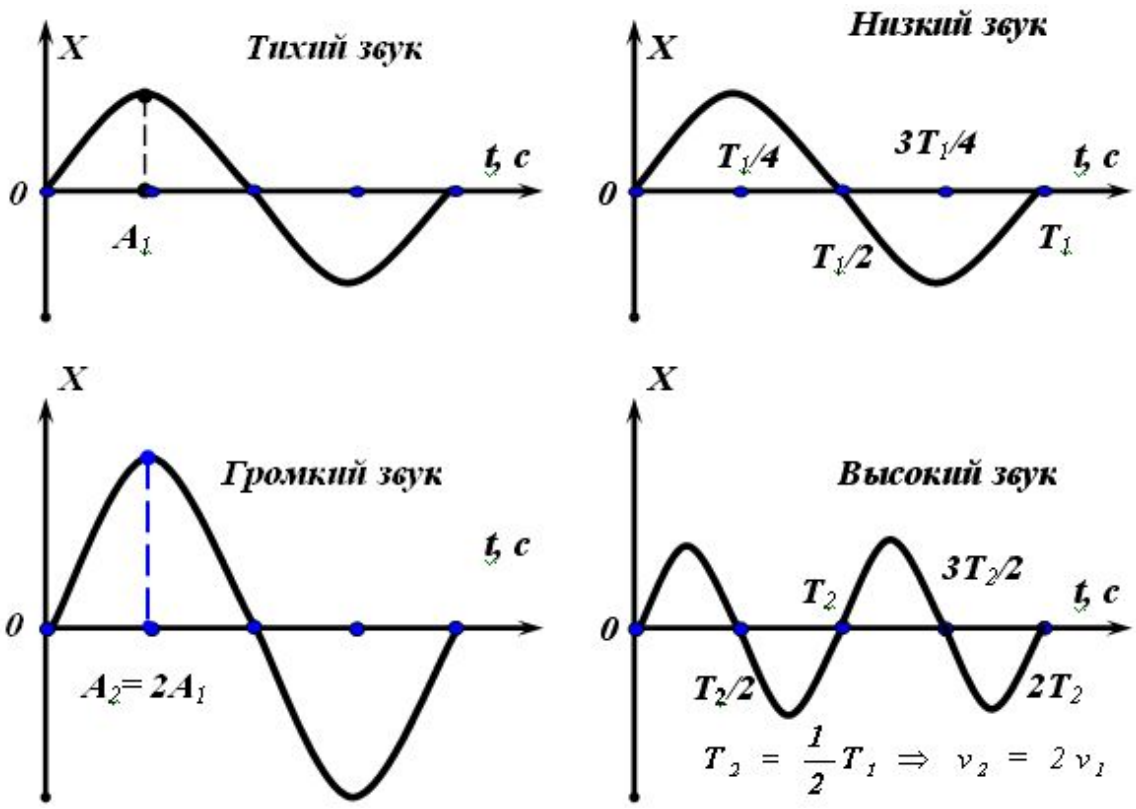
От чего зависит громкость звука

Громкость E зависит от амплитуды колебаний:

маленькая амплитуда – тихий звук, большая амплитуда – громкий звук (рис.4)

Запомните

- *Громкость (уровень громкости) в СИ измеряется в фонах (фон).*
- *На частоте 1000 Гц громкость, выраженная в фонах, равна уровню интенсивности, выраженному в децибелах: E=L*
- *Для других частот коэффициент селективности k является функцией частоты и интенсивности k=f(ν,I), а его значение находят по специальным графикам, которые называются кривыми равной громкости.*
- *Человек слышит звуки в диапазоне громкости (уровней громкости) **E** звука от 0 до 130 фон.*



Громкость Высота звука

Высоты человеческого голоса

Высота и тембр звука. Громкость звука

Звуки человеческого голоса по высоте делят на несколько диапазонов. Они могут быть как низкие (басы), так и высокие (колоратурное сопрано).

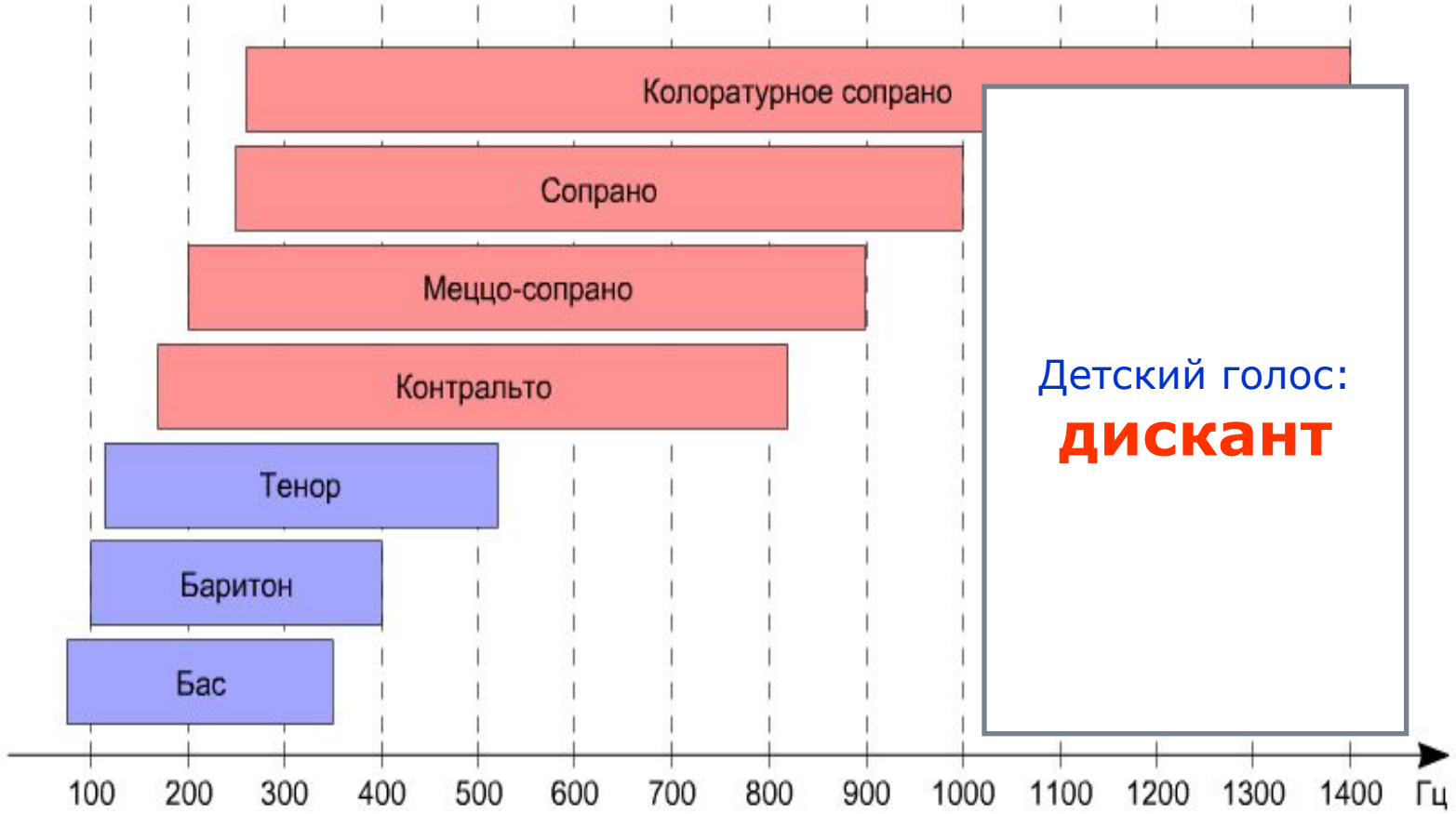
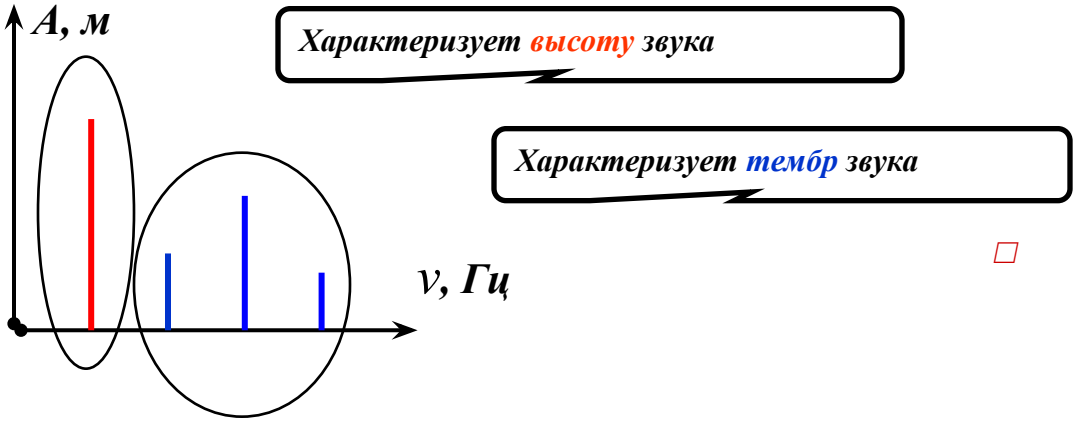


Рисунок . Диапазоны частот женских и мужских голосов

Баритонального дисканта (фраза из «Служебного романа») не бывает

Как связаны с физическими характеристиками звука его высота и тембр?



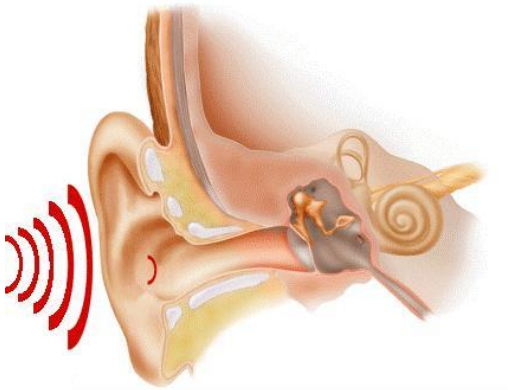
- *Высота звука определяется амплитудой A его основной частоты ν_1 в гармоническом спектре, причём чем больше частота колебаний, тем* ***выше звук****.*
- *Например, у рояля самый низкий звук 27 Гц, а самый высокий – 4185 Гц.*

- *Музыкальные звуки с одним и тем же основным тоном различаются тембром, который определяется наличием обертонов (**гармоник**): их частотами ν_i и амплитудами A_i, характером нарастания амплитуд в начале и их спадом в конце звучания.*

- *Таким образом, тембр звука определяется его гармоническим спектром:*
  - *чем больше обертонов, тем тембр считается более богатым,*
  - *чем больше амплитуды обертонов, тем тембр считается более насыщенным.*

Человек слышит в диапазонах

(запомните!)



Вспомним ещё раз, в каком диапазоне слышит человек:

- диапазон *частот*: ν= 16–20000 Гц;
- диапазон *интенсивностей*: $I=10^{-12} - 10^{1}$ Вт/м^2;
- диапазон *уровней интенсивности*: L= 0 – 130 дБ;
- диапазон *уровней громкости*: E = 0 – 130 фон.

Инфразвук

Инфразвук – это механические волны с частотами менее 16 Гц.

- *Инфразвук обладает большой проникающей способностью и распространяется на большие расстояния.*
- *Воздействие инфразвуком на организм вызывает комплекс нежелательных ощущений:*
  - *головокружение,*
  - *затруднение дыхания,*
  - *боли в животе,*
  - *чувство страха и др.*
- *В основе такого воздействия предполагаются резонансные эффекты: частоты собственных колебаний тела человека (его отдельных частей и органов) совпадают с частотным диапазоном инфразвука.*
- *Первичные механизмы воздействия инфразвука на биологические объекты изучены недостаточно!*

Ультразвук

*Ультразвук – это **продольные механические волны**, частоты которых лежат в интервале $2 \cdot 10^4 - 10^{10\text{-}12}$ Гц.*

- *Один из способов генерирования и регистрации УЗ основан на использовании **пьезоэлектрического эффекта, прямого и обратного**.*

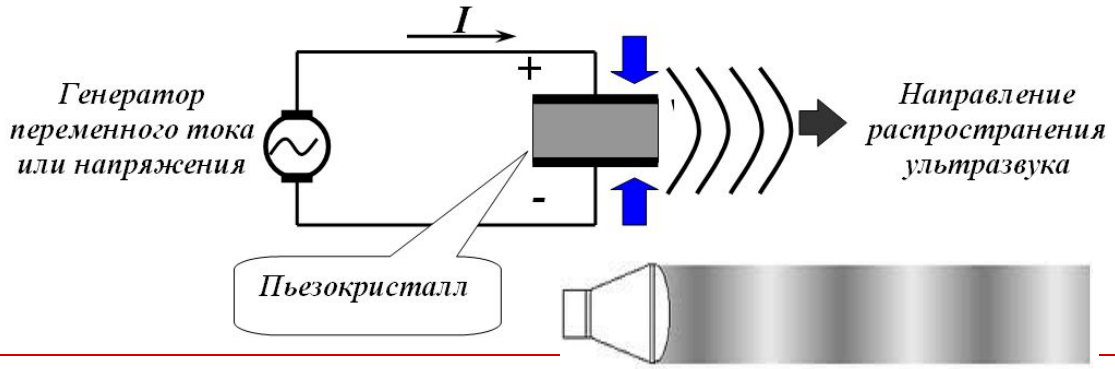
- *УЗ-приёмник работает на принципе прямого пьезоэлектрического эффекта:*

  под действием механической УЗ-волны возникает деформация пластинки пьезокристалла, которая приводит к генерации в нём переменного электрического тока, который может быть измерен.

- *УЗ-излучатель работает на принципе обратного пьезоэлектрического эффекта:*

  под действием электрического тока, идущего в цепи, в которую встроена пластинка пьезокристалла, в этом кристалле возникает механическая деформация.

  *Пластинка начнет вибрировать, излучая механическую волну с частотой текущего в цепи электрического тока **I**.*

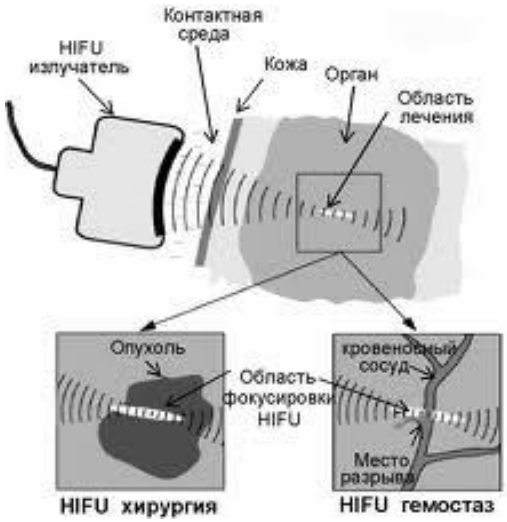


Преимущества ультразвука (УЗ) по сравнению со звуком

- По физической природе УЗ не отличается от звука:
  - Ультразвук - это тоже продольная механическая волна.
  - При её распространении образуются чередующиеся участки сгущения и разряжения частиц среды.
  - Скорость распространения УЗ и звука в средах одинаковы.

- Однако у ультразвука существуют особенности:
  - Бóльшее разрешение у УЗ.
  - Бóльшая интенсивность для УЗ-волны достигается легче, чем для звука.

Бóльшее разрешение у УЗ



- Существует закон: волну можно сфокусировать на площадке размером не меньше длины волны λ.
- Длина волны λ ультразвука существенно **меньше** длины звуковой волны.
- Докажем это:
  - По определению $\lambda = v/\nu$, тогда длина волны для звука с частотой 1 кГц (10^3 Гц) и ультразвука с частотой 1 МГц (10^6 Гц) равны:

для звука: $\lambda_{зв} = 1500/1000 = 1{,}5 \cdot 10^3/10^3 = 1{,}5$ м,

для ультразвука: $\lambda_{уз} = 1500/1000000 = 1{,}5 \cdot 10^3/10^6 = 1{,}5$ мм.

- **Вывод:** при облучении УЗ можно различить **детали гораздо мéньших размеров**, чем при облучении слышимым звуком, т.е. разрешение УЗ выше, чем у звука.

Особенности отражения и поглощения ультразвука и звука

Главная характеристика акустических свойств среды - *звуковый импеданс* Z (*акустическое* или *волновое сопротивление*):

$$Z = \rho \mathbf{v}$$

где ρ – плотность вещества среды,

$\mathbf{v}$ – скорость звука (ультразвука) в данной среде.

- Вспомним, что для твёрдых тел скорость равна:

$$\mathbf{v} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

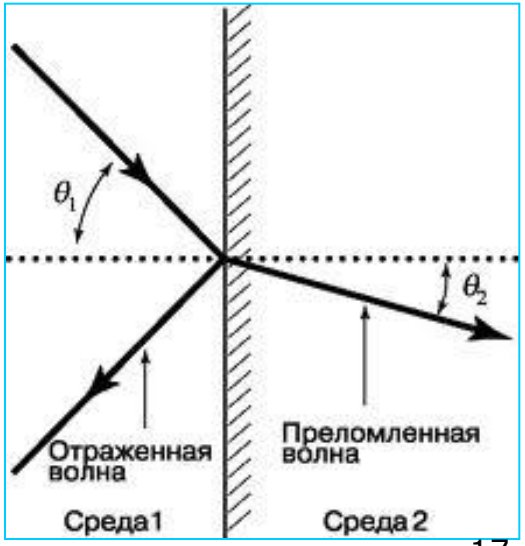
где E – модуль упругости (константа, характеризующая упругость твердого тела),

ρ – плотность тела.

Тогда:

$$Z = \rho \mathbf{v} = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\rho^2 \frac{E}{\rho}} = \sqrt{E\rho}$$

- При падении звука или ультразвука с интенсивностью $I_{пад}$ на границу раздела двух сред возникают:
  - отраженные волны с интенсивностью $I_{отр} = RI_{пад}$, где R – коэффициент отражения, и
  - волны, проходящие во вторую среду, с интенсивностью $I_{вх} = \beta I_{пад}$, где β – коэффициент пропускания.



Особенности отражения ультразвука и звука

- *Доля энергии волны, перешедшей из одной среды в другую, зависит от соотношения между величинами звуковых импедансов **Z** обеих сред.*

- *Для ультразвука, как и для звука, при нормальном (**перпендикулярном**) падении УЗ волны на границу раздела двух сред коэффициент отражения **R** равен:*

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right]^2 = \left[\frac{v_2\rho_2 - v_1\rho_1}{v_2\rho_2 + v_1\rho_1}\right]^2$$

- *Видно, что чем больше различаются волновые сопротивления сред, тем меньшая доля энергии переходит через границу раздела двух сред.*

- *Так, на границе **«воздух-живая ткань (вода)» коэффициент отражения R порядка 96-99%***

- ***Оценим его при 20^0С:***

$$Z_1 = Z_{воздух} = v_1\rho_1 = 340 \cdot 29 = 3{,}4 \cdot 2{,}9 \cdot 10^3 = 9{,}86 \cdot 10^3 \ кг/(с \cdot м^2)$$

$$Z_2 = Z_{вода} = v_2\rho_2 = 1500 \cdot 1000 = 1{,}5 \cdot 10^6 \ кг/(с \cdot м^2)$$

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right]^2 = \left[\frac{1{,}5 \cdot 10^6 - 9{,}86 \cdot 10^3}{1{,}5 \cdot 10^6 + 9{,}86 \cdot 10^3}\right]^2 = \left[\frac{1500 - 9{,}86}{1500 + 9{,}86}\right]^2 \approx \left[\frac{1490{,}14}{1509{,}86}\right]^2 \approx 0{,}97$$

Вывод: между источником ультразвука и поверхностью тела не должно быть воздушной прослойки, а нужна прослойка со свойствами воды: для этого и предназначены **гели для УЗИ** исследований.

Особенности поглощения ультразвука и звука

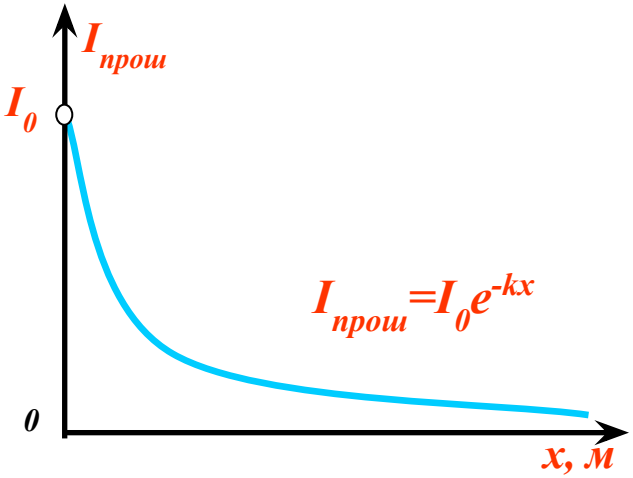
- *При прохождении звука или ультразвука через среду происходит их поглощение по закону:*

$$I_{прош} = I_0 e^{-kx}$$

*где k – **показатель ослабления**, зависящий от свойств среды и частоты волны (константа).*

- *Закон читается так:*

  *Интенсивность волны $I_{прош}$ после прохождения в среде расстояния **x** (интенсивность прошедшей волны) прямо пропорциональна интенсивности I_0 волны, падающей на среду, и уменьшается по экспоненте с увеличением толщины среды x (смотри график).*



- *Поглощение акустических волн в среде сильно зависит от их частоты V: с увеличением частоты показатель ослабления k увеличивается.*

*Поэтому высокочастотные акустические волны (ультразвук) **поглощаются сильнее**, чем низкочастотные (звук).*

Достоинства и недостатки УЗИ

Достоинства
Фокусируется на ме́ньшем по размеру объекте, чем при звуковых методах (бо́льшее разрешение), т.к. частота больше
Передаёт больше энергии, чем звук (бо́льшой интенсивности достичь легче), поэтому лучше дробит конкременты
Неинвазивный метод
Доступный метод

Спасибо за внимание!

УЗИ-аппарат