

Биофизика слуха

Вопросы для подготовки к занятию:

1.	Механические колебания	
	1.1	Колебания, виды колебаний.
	1.2	Гармонические колебания. Основные параметры гармонического колебания.
	1.3	Вибрация. Механотерапия.
2.	Механические волны	
	2.1	Механические волны, частота волны. Продольные и поперечные волны.
	2.2	Волновой фронт. Скорость и длина волны.
	2.3	Уравнение плоской волны.
	2.4	Энергетические характеристики волны. Вектор Умова.
	2.5	Ударные волны.
3.	Акустика. Звук	
	3.1	Звук, виды звука. Физические характеристики звука.
	3.2	Характеристики слухового ощущения. Звуковые измерения.
	3.3	Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука.
	3.4	Прохождение звука через границу раздела сред.
	3.5	Физические основы звуковых методов исследования в клинике (Аускультация, фонокардиография, перкуссия).
	3.6	Шум. Факторы, определяющие профилактику шума. Защита от шума.
4.	Биофизика слуха	
	4.1	Роль наружного уха.
	4.2	Роль среднего уха.
	4.3	Роль внутреннего уха.
5.	Инфразвук и его источники.	
	5.1	Воздействие инфразвука на человека.
	5.2	Использование инфразвука в медицине.
6.	Ультразвук	
	6.1	Свойства ультразвука и его источники.
	6.2	Биологическое и химическое действие ультразвука.
	6.3	Применение ультразвука в медицине.
	1. Вопросы для самоконтроля по теме: Биофизика звука и органа слуха	
	2. Тестовые задания по теме: по теме: «Биофизика звука и органа слуха»	

1. Колебания, виды колебаний

Колебаниями называют процессы, повторяющиеся с течением времени.

Повторяющиеся процессы непрерывно происходят внутри любого живого организма, например: сокращения сердца, работа легких; мы дрожим, когда нам холодно; мы слышим и разговариваем благодаря колебаниям барабанных перепонки и голосовых связок; при ходьбе наши ноги совершают колебательные движения. Колеблются атомы, из которых мы состоим. Мир, в котором мы живем, удивительно склонен к колебаниям.

В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания: механические, электрические, электромагнитные и т.п.

Механическими колебаниями называются изменения физической величины, описывающей механическое движение (скорость, перемещение, кинетическая и потенциальная энергия и т. п.).

Колебания делятся также на периодические и непериодические.

Периодическими называют такие колебания, при которых все характеристики движения повторяются через определенный промежуток времени.

Непериодическими называются колебания, не удовлетворяющие указанному условию. Непериодические колебания гораздо разнообразнее периодических. Такие колебания чаще всего являются затухающими или нарастающими гармоническими колебаниями.

Свободными или **собственными** называются такие колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе, после того как она была выведена из положения равновесия.

Примером могут служить колебания шарика, подвешенного на нити. Для того чтобы вызвать колебания, нужно либо толкнуть шарик, либо, отведя в сторону, отпустить его. При толчке шарика сообщается **кинетическая** энергия, а при отклонении — **потенциальная**.

Свободные колебания совершаются за счет первоначального запаса энергии.

Свободные колебания могут быть **незатухающими** только при отсутствии силы трения. В противном случае первоначальный запас энергии будет расходоваться на ее преодоление, и размах колебаний будет уменьшаться.

Свободные колебания при отсутствии трения являются гармоническими.

При отсутствии трения свободные колебания, близкие к гармоническим, возникают также и в других системах: математический и физический маятники.

2. Гармонические колебания. Основные параметры гармонического колебания

Особое место среди периодических колебаний занимают *гармонические* колебания. Их значимость обусловлена следующими причинами. Во-первых, колебания в природе и в технике часто имеют характер, очень близкий к гармоническому, и, во-вторых, периодические процессы иной формы (с другой зависимостью от времени) могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

Гармонические колебания — это колебания, при которых наблюдаемая величина изменяется во времени по закону синуса или косинуса:

$$x = A \cos(\omega t + \phi_0) \quad \text{или} \quad x = A \sin(\omega t + \phi_0)$$

Величины, входящие в формулу имеют следующий смысл:

x — *смещение* тела от положения равновесия в момент времени t ;

A — *амплитуда* колебаний, равная максимальному смещению от положения равновесия;

ω — *круговая частота* колебаний (число колебаний, совершаемых за 2π секунд), связанная с периодом колебаний соотношением $\omega = 2\pi / T$;

T — *период колебаний* — промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание;

ν - *частота колебаний* - число колебаний, совершаемых за одну секунду ($\nu = 1/T$);

$(\omega t + \phi_0)$ — *фаза* колебаний (в момент времени t);

ϕ_0 — *начальная фаза* колебаний (при $t = 0$).

График зависимости смещения от времени представлен на рис.1

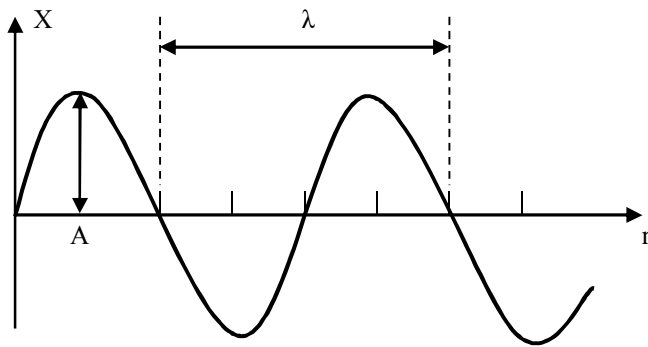


рис.1

Вибрация

Широкое внедрение различных машин и механизмов в жизнь человека повышает производительность труда. Однако работа многих механизмов связана с возникновением вибраций, которые передаются человеку и оказывают на него вредное влияние.

Вибрация — вынужденные колебания тела, при которых либо все тело колеблется как единое целое, либо колеблются его отдельные части с различными амплитудами и частотами.

Человек постоянно испытывает различного рода вибрационные воздействия в транспорте, на производстве, в быту. Колебания, возникшие в каком-либо месте тела (например, руке рабочего, держащего отбойный молоток), распространяются по всему телу в виде упругих волн. Эти волны вызывают в тканях организма

переменные деформации различных видов (сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб). Действие вибраций на человека обусловлено многими физическими факторами: **частотой** (спектр частот, основная частота), **амплитудой**, **скоростью** и **ускорением** колеблющейся точки, **энергией** колебательных процессов.

Продолжительное воздействие вибраций вызывает в организме стойкие нарушения нормальных физиологических функций. Может возникнуть **«вибрационная болезнь»**. Эта болезнь приводит к ряду серьезных нарушений в организме человека.

Влияние, которое вибрации оказывают на организм, зависит от **интенсивности**, **частоты**, **длительности вибраций**, **места их приложения** и **направления** по отношению к телу, позе, а также от **состояния** человека и его индивидуальных особенностей.

Колебания с частотой **3-5 Гц** вызывают реакции вестибулярного аппарата, сосудистые расстройства. При частотах **3-15 Гц** наблюдаются расстройства, связанные с резонансными колебаниями отдельных органов (печень, желудок, голова) и тела в целом. Колебания с частотами **11-45 Гц** вызывают ухудшение зрения, тошноту, рвоту. При частотах, превышающих **45 Гц**, возникают повреждение сосудов головного мозга, нарушение циркуляции крови и т.д.

В то же время в ряде случаев вибрации находят применение в медицине. Например, при помощи специального вибратора стоматолог готовит амальгаму. Использование высокочастотных вибрационных аппаратов позволяет высверлить в зубе отверстие сложной формы.

Вибрация используется и при массаже. При ручном массаже массируемые ткани приводятся в колебательное движение при помощи рук массажиста. При аппаратном массаже используются вибраторы, в которых для передачи телу колебательных движений служат наконечники различной формы. Вибрационные аппараты подразделяются на аппараты для общей вибрации, вызывающие сотрясение всего тела (вибрационные «стул», «кровать», «платформа» и др.), и аппараты местного вибрационного воздействия на отдельные участки тела.

Механотерапия

В лечебной физкультуре (ЛФК) используются тренажеры, на которых осуществляются колебательные движения различных частей тела человека. Они используются в *механотерапии* - форме ЛФК, одной из задач которой является осуществление дозированных, ритмически повторяющихся физических упражнений с целью тренировки или восстановления подвижности в суставах на аппаратах маятникового типа. Основу этих аппаратов составляет балансирующий (от фр. *balancer* — качать, уравнивать) маятник, который представляет собой двухплечный рычаг, совершающий колебательные (качательные) движения около неподвижной оси.

II. Механические волны

Если в каком-либо месте упругой среды (твердой, жидкой или газообразной) возбудить колебания ее частиц, то вследствие взаимодействия между частицами это колебание начнет распространяться в среде от частицы к частице с некоторой скоростью v .

Например, если в жидкую или газообразную среду поместить колеблющееся тело, то колебательное движение тела будет передаваться прилегающим к нему частицам среды. Они, в свою очередь, вовлекают в колебательное движение соседние частицы и так далее. При этом все точки среды совершают колебания с одинаковой частотой, равной частоте колебания тела. Эта частота называется *частотой волны*.

Частотой волны называется частота колебаний точек среды, в которой распространяется волна.

Волной называется процесс распространения механических колебаний в упругой среде.

С волной связан перенос энергии колебаний от источника колебаний к периферийным участкам среды. При этом в среде возникают периодические деформации, которые переносятся волной из одной точки среды в другую. Сами частицы среды не перемещаются вместе с волной, а колеблются около своих

положений равновесия. Поэтому распространение волны не сопровождается переносом вещества.

В соответствии с частотой механические волны делятся на различные диапазоны, которые указаны в табл.1.

Таблица 1. Шкала механических волн

Частота, (Гц)	Наименование диапазона	Примеры
0,001-20	Инфразвуковой	Цунами, тоны сердца
20-2·10⁴	Звуковой	Голос, фонокардиограмма
2·10⁴-10⁵	Низкочастотный ультразвуковой	Звуки, издаваемые дельфинами, летучими мышами
10⁵—10⁷	Среднечастотный ультразвуковой	Колебания магнитострикционных излучателей
10⁷-10⁹	Высокочастотный ультразвуковой	Колебания пьезоэлектрических излучателей
10⁹-10¹³	Гиперзвуковой	Тепловые колебания молекул

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны, различают **продольные и поперечные волны**.

Продольные волны — волны, при распространении которых частицы среды совершают колебания вдоль направления распространения волны.

При этом в среде чередуются области сжатия и разряжения.

Продольные механические волны могут возникать **во всех** средах (твердых, жидких и газообразных).

Поперечные волны — волны, при распространении которых частицы среды совершают колебания перпендикулярно направлению распространения волны.

При этом в среде возникают периодические деформации сдвига.

В жидкостях и газах упругие силы возникают только при сжатии и не возникают при сдвиге, поэтому поперечные волны в этих средах не образуются. Исключение составляют волны на поверхности жидкости.

Волновой фронт. Скорость и длина волны

В природе не существует процессов, распространяющихся с бесконечно большой скоростью, поэтому возмущение, созданное внешним воздействием в одной точке среды, достигнет другой точки не мгновенно, а спустя некоторое время. При этом среда делится на две области: область, точки которой уже вовлечены в колебательное движение, и область, точки которой еще находятся в равновесии. Поверхность, разделяющая эти области, называется **фронтом волны**.

Фронт волны - геометрическое место точек, до которых к данному моменту дошло колебание (возмущение среды).

При распространении волны ее фронт перемещается, двигаясь с некоторой скоростью, которую называют **скоростью волны**.

Скоростью волны называется скорость перемещения ее фронта.

Скорость волны зависит от свойств среды и типа волны: поперечные и продольные волны в твердом теле распространяются с различными скоростями.

Скорость волны в среде не следует путать со скоростью движения частиц среды, вовлеченных в волновой процесс. Например, при распространении звуковой волны в воздухе средняя скорость колебаний его молекул порядка 10 см/с, а скорость звуковой волны при нормальных условиях около 330 м/с.

Форма волнового фронта определяет геометрический тип волны. Простейшие типы волн по этому признаку - **плоские** и **сферические**.

Плоской называется волна, у которой фронтом является плоскость, перпендикулярная направлению распространения.

Плоские волны возникают, например, в закрытом поршнем цилиндре с газом, когда поршень совершает колебания.

Амплитуда плоской волны остается практически неизменной. Ее слабое уменьшение по мере удаления от источника волны связано с вязкостью жидкой или газообразной среды.

Сферической называется волна, у которой фронт имеет форму сферы.

Такой, например, является волна, вызываемая в жидкой или газообразной среде пульсирующим сферическим источником.

Амплитуда сферической волны при удалении от источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Для описания ряда волновых явлений, например интерференции и дифракции, используют специальную характеристику, называемую длиной волны.

Длиной волны называется расстояние, на которое перемещается ее фронт за время, равное периоду колебаний частиц среды: $\lambda = V \cdot T = \frac{V}{\nu} = \frac{2\pi \cdot V}{\omega}$

Здесь V — скорость волны, T — период колебаний, ν — частота колебаний точек среды, ω — циклическая частота.

Длина волны λ равна расстоянию между соседними точками, колеблющимися в одинаковой фазе, например расстоянию между двумя соседними максимумами или минимумами возмущения.

Так как скорость распространения волны зависит от свойств среды, то длина волны при переходе из одной среды в другую изменяется, в то время как частота остается прежней.

Уравнение плоской волны

Волна возникает в результате периодических внешних воздействий на среду. Рассмотрим распространение **плоской** волны, созданной гармоническими колебаниями источника:

$$X_{II} = A \cdot \cos(\omega t)$$

где x_n - смещение источника, A — амплитуда колебаний, ω — круговая частота колебаний.

Если некоторая точка среды удалена от источника на расстояние s , а скорость волны равна v , то возмущение, созданное источником, достигнет этой точки через время $t = s/v$. Поэтому фаза колебаний в рассматриваемой точке в момент времени t будет такой же, как фаза колебаний источника в момент времени $(t - s/v)$, а амплитуда колебаний останется практически неизменной. В результате колебания данной точки будут определяться уравнением: $x = A \cos[\omega(t - s/v)]$

Уравнение, определяющее смещение любой точки среды в любой момент времени, называется *уравнением плоской волны*

Энергетические характеристики волны. Вектор Умова

Механические волны переносят энергию. Для количественного описания переноса энергии вводят понятие интенсивности волны.

Интенсивность волны- это энергия, переносимая волной через единицу площади за единицу времени: $I = \frac{E}{t \cdot S} \text{ [Вт/м}^2\text{]}$

I - интенсивность, S - площадь, t - время

Мысленно выделим в ткани организма элементарный объём в виде цилиндра и предположим, что через него переносится энергия (рис 2):

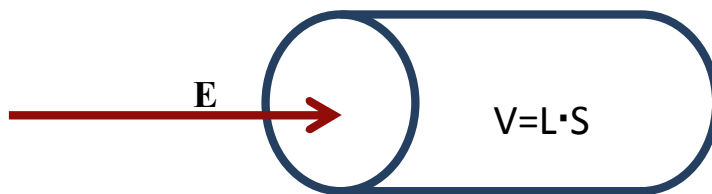


рис 2

$$I = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{\omega \cdot V}{S \cdot t} = \frac{\omega \cdot S \cdot L}{S \cdot t} = \frac{\omega \cdot L}{t} = \omega \cdot v \quad \text{или} \quad \vec{I} = \omega \cdot \vec{v}$$

$\omega = \frac{E}{V}$ - **Объемная плотность энергии**—энергия колебательного движения частиц среды, содержащихся в единице ее объема, измеряется в [Дж/м³].

Вектор Умова: **Интенсивность волны равна произведению скорости (v) её распространения на объемную плотность энергии (ω).**

Среда, в которой распространяется волна, обладает механической энергией, складывающейся из энергий колебательного движения всех ее частиц:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot A^2 \cdot \omega_0^2, \quad \omega_0 \text{ — круговая частота колебаний.}$$

Объемная плотность энергии равна:

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \omega_0^2$$

Тогда вектор Умова имеет вид:

$$\vec{I} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{V}$$

где ρ — плотность среды, A - амплитуда колебаний частиц.

Ударные волны

Ударные волны. При распространении звуковых волн скорость колебания частиц не превышает нескольких см/с, т.е. она в сотни раз меньше скорости волны. При сильных возмущениях (взрыв, движение тел со сверхзвуковой скоростью, мощный электрических разряд) скорость колеблющихся частиц среды может стать сравнимой со скоростью звука. При этом возникает эффект, называемый ударной волной.

При взрыве нагретые до высоких температур продукты, обладающие большой плотностью, расширяются и сжимают тонкий слой окружающего воздуха.

Ударная волна— распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью тонкая переходная область, в которой происходит скачкообразное возрастание давления, плотности и скорости движения вещества.

Ударная волна может обладать значительной энергией. Так, при ядерном взрыве на образование ударной волны в окружающей среде затрачивается около 50 % всей энергии взрыва. Ударная волна, достигая объектов, способна вызвать разрушения.

III. Акустика. Звук

1. Звук, виды звука.
 2. Физические характеристики звука.
 3. Характеристики слухового ощущения. Звуковые измерения.
 4. Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука.
 5. Прохождение звука через границу раздела сред.
 6. Звуковые методы исследования.
1. Факторы, определяющие профилактику шума. Защита от шума.

Звук, виды звука

Акустика- учение о звуке.

Звук - упругие колебания частиц среды, распространяющиеся в виде продольной волны и воспринимаемые ухом человека 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
--------	-----------------

Звук с частотой ниже 16—20 Гц называется **инфразвуком**, выше 20 кГц — **ультразвуком**, а самые высокочастотные упругие волны в диапазоне от 10^9 до 10^{12} Гц- **гиперзвуком**.

Звуки, встречающиеся в природе, разделяют на несколько видов.

Тон— это звук, представляющий собой периодический процесс. Тон может быть простым и сложным. Основной характеристикой тона является **частота**.

Простой тон создается телом, колеблющимся по гармоническому закону (например, камертоном или звуковым генератором).

Простой или чистый тон – это колебание, совершающееся с постоянной частотой.

Сложный тон создается периодическими колебаниями, которые не являются гармоническими (например, звук музыкального инструмента, звук, создаваемый речевым аппаратом человека).

Шум- это звук, имеющий сложную неповторяющуюся временную зависимость и представляющий собой сочетание беспорядочно изменяющихся сложных тонов (шелест листьев).

Звуковой удар- это кратковременное звуковое воздействие (хлопок, взрыв, удар, гром).

Сложный тон, как периодический процесс, можно представить в виде суммы простых тонов (разложить на составляющие тоны). Такое разложение называется **спектром**.

Акустический спектр сложного тона (рис 3) - это совокупность всех его частот с указанием их относительных интенсивностей или амплитуд.

Наименьшая частота в спектре (ω) соответствует основному тону, а остальные частоты называют **обертонами** или **гармониками**. Обертон имеет частоты, кратные основной частоте: 2ω , 3ω , 4ω , ...

Обычно наибольшая амплитуда спектра соответствует основному тону. Именно он воспринимается ухом как **высота** звука. Обертоны создают «окраску» звука-тембр.

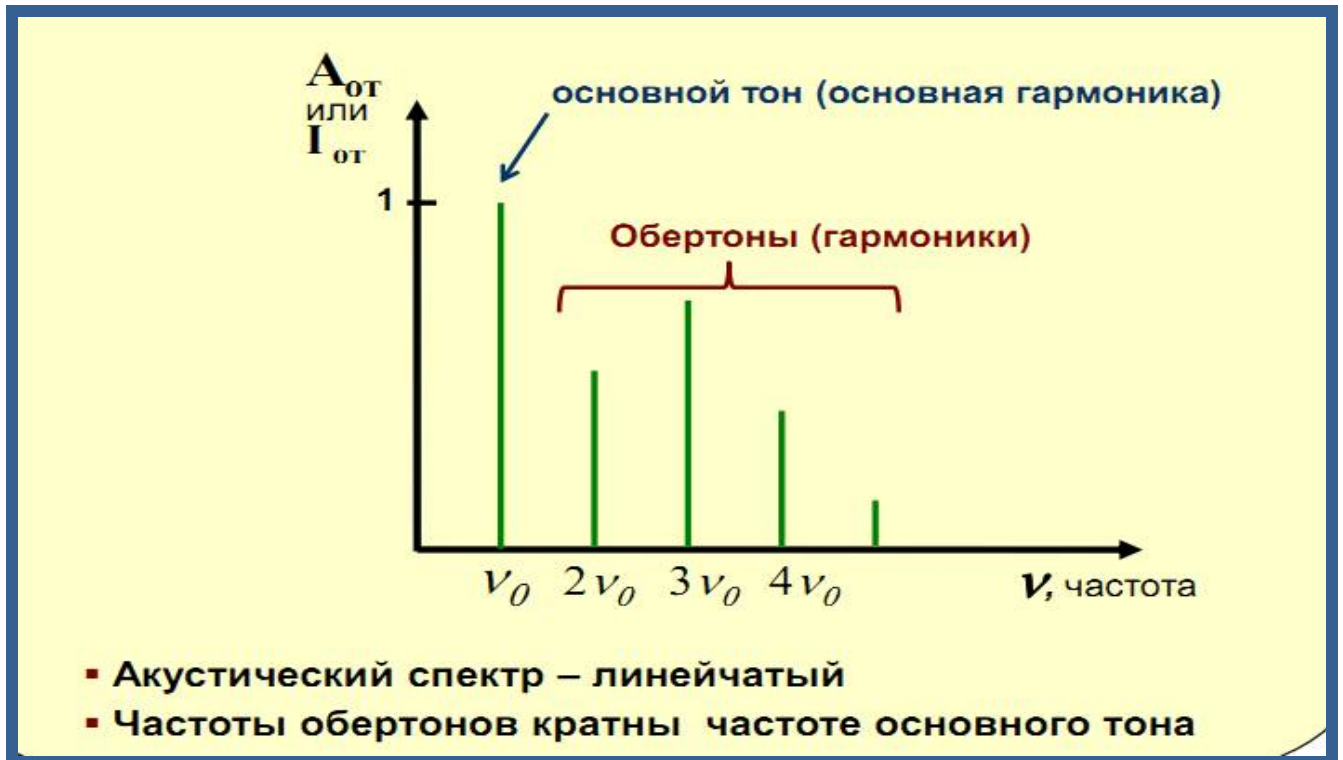


рис 3

Акустический спектр шума является **сплошным**.

Физические характеристики звука

1. **Звуковое давление** Распространение звука сопровождается изменением давления в среде (рис.4).

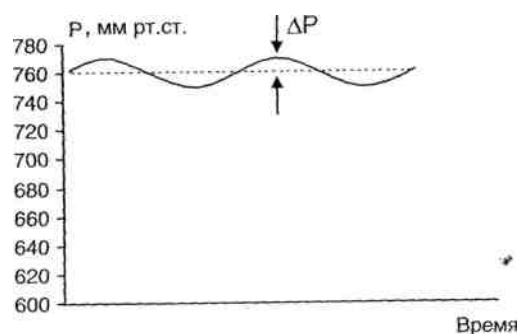


Рис. 4

Именно изменения давления вызывают колебания барабанной перепонки, которые и определяют начало такого сложного процесса, как возникновение слуховых ощущений.

2. Интенсивность звука(I). Распространение звуковой волны сопровождается переносом энергии.

Интенсивность звука — это энергия, переносимая волной через единицу площади за единицу времени.

В однородной среде интенсивность звука, испущенного в данном направлении, убывает по мере удаления от источника звука. При использовании волноводов можно добиться и увеличения интенсивности. Типичным примером такого волновода в живой природе является ушная раковина.

Минимальные значения звукового давления и интенсивности звука, при которых у человека возникают слуховые ощущения, называются *порогом слышимости*.

Для уха среднего человека на частоте 1 кГц порогу слышимости соответствуют значение интенсивности звука: $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м².

Значения звукового давления и интенсивности звука, при которых у человека возникают выраженные болевые ощущения, называются *порогом болевого ощущения*.

Для уха среднего человека на частоте 1 кГц порогу болевого ощущения соответствуют значение интенсивности звука: $I_m = 10$ Вт/м².

3. Уровень интенсивности(L).

Отношение интенсивностей, соответствующих порогам слышимости и болевого ощущения, столь велико ($I_m / I_0 = 10^{13}$), что на практике используют логарифмическую шкалу, вводя специальную безразмерную характеристику — **уровень интенсивности**.

Уровнем интенсивности называют десятичный логарифм отношения интенсивности звука к порогу слышимости:

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

Если человек слышит звуки, приходящие с *одного направления* от нескольких *некогерентных* источников, то их интенсивности складываются:

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

Характеристики слухового ощущения (физиологические характеристики).

Звук является объектом слухового ощущения. Он оценивается человеком субъективно. Все субъективные характеристики слухового ощущения связаны с объективными характеристиками звуковой волны.

Высота, тембр

Воспринимая звуки, человек различает их по высоте и тембру.

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.

Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука

Физические можно измерить	Физиологические можно услышать
1.интенсивность	1.громкость

2. частота	2. высота
3. акустический спектр	3. тембр

Закон Вебера-Фехнера. Громкость звука

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

Смысл закона Вебера-Фехнера:

1. устанавливает связь между физическими и физиологическими характеристиками звука.
2. если увеличивать раздражение в геометрической прогрессии (в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (на одинаковую величину).

На частоте 1000Гц $k=1$, тогда: $L = \lg \frac{I}{I_0}$

Если: $\frac{I}{I_0} = 10$, тогда $L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg 10 = 1\text{бел}$

$\frac{I}{I_0} = 100$, тогда $L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg 100 = 2\text{бел}$

$\frac{I}{I_0} = 1000$, тогда $L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg 1000 = 3\text{бел}$

.....

$\frac{I}{I_0} = \frac{10}{10^{-12}} = 10^{13}$, тогда $L = \lg \frac{I}{I_0} = \lg 10^{13} = 13\text{бел}$

1 Бел- уровень громкости, создаваемый чистым тоном частотой 1000 Гц при изменении интенсивности в 10 раз.

1 Бел=10 дБел

13 Бел=130 дБел

Громкостью звука называют интенсивность (**силу**) слуховых **ощущений**.

Ухо человека имеет различную чувствительность к звукам различных частот. Для учета этого обстоятельства можно выбрать некоторую **опорную частоту**, а восприятие остальных частот сравнивать с нею. По договоренности **опорную частоту** приняли равной **1 кГц** (по этой причине и порог слышимости I_0 установлен для этой частоты).

Для **чистого тона** с частотой **1 кГц** громкость (**E**) принимают равной уровню интенсивности в **децибелах**:

$$E = 10 \lg(I/I_0).$$

Для остальных частот громкость определяют путем сравнения интенсивности слуховых ощущений с громкостью звука на **опорной частоте**.

Громкость звука равна уровню интенсивности звука (**дБ**) на частоте **1 кГц**, вызывающего у «среднего» человека такое же ощущение громкости, что и **данный звук**.

Единицу громкости звука называют **фоном**.

1 Фон=1 дБел на частоте 1000 Гц.

Высокий уровень интенсивности звука приводит к необратимым изменениям в слуховом аппарате. Так, звук в 160 дБ может вызвать разрыв барабанной перепонки и смещение слуховых косточек в среднем ухе, что приводит к необратимой глухоте. При 140 дБ человек ощущает сильную боль, а продолжительное действие шума в 90-120 дБ приводит к поражению слухового нерва.

Звуковые измерения

Кривые равной громкости отражают восприятие звука *средним человеком*. Для оценки слуха *конкретного* человека применяется метод тональной пороговой аудиометрии.

Аудиометрия - метод измерения остроты слуха. На специальном приборе (аудиометре) определяется порог слухового ощущения, или **порог восприятия**, L_n на разных частотах. Для этого с помощью звукового генератора создают звук заданной частоты и, увеличивая уровень интенсивности L , фиксируют пороговый уровень интенсивности L_n , при котором у испытуемого появляются слуховые ощущения. Меняя частоту звука, получают экспериментальную зависимость $L_n(\nu)$, которую называют аудиограммой (рис. 5).

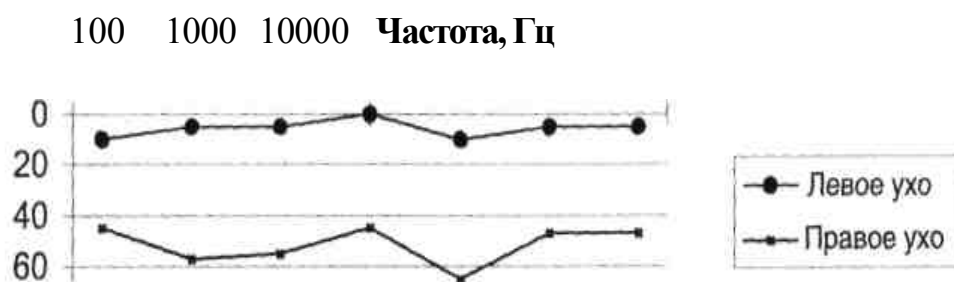


Рис. 5. Аудиограммы

Нарушение функции звуковоспринимающего аппарата может привести к **тугоухости**- стойкому снижению чувствительности к различным тонам и шепотной речи.

Для измерения громкости **сложного тона** или **шума** используют специальные приборы - **шумомеры**. Звук, принимаемый микрофоном, преобразуется в электрический сигнал, который пропускается через систему фильтров. Параметры фильтров подобраны так, что чувствительность шумомера на различных частотах близка к чувствительности человеческого уха.

Волновое сопротивление. Отражение звуковых волн. Реверберация

Звук распространяется в любой среде, кроме вакуума.

Скорость его распространения зависит от упругости, плотности и температуры среды, но не зависит от частоты колебаний.

1. Скорость звука в воздухе-340м/с.
2. Скорость звука в воде (мягких тканях организма) - 1500 м/с;.
3. Скорость звука в твёрдых телах-5700м/с.

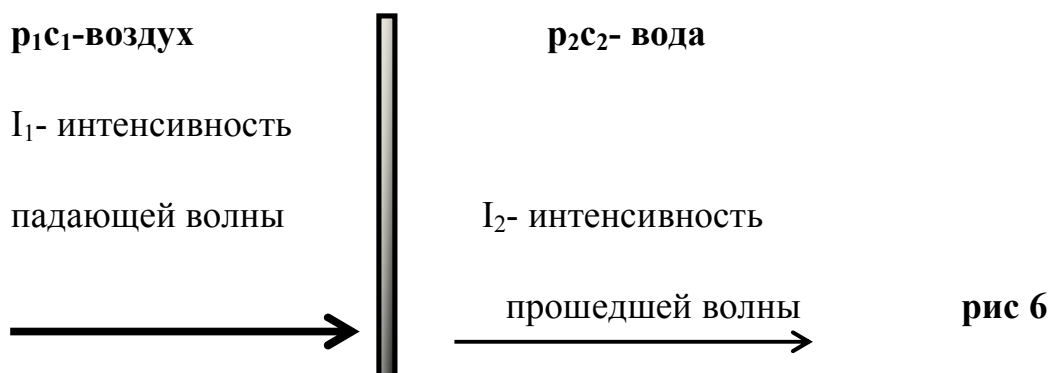
Произведение $\rho \cdot c$ называют **удельным акустическим импедансом**, для плоской волны его называют также **волновым сопротивлением**,

где ρ — плотность среды; c — скорость волны в среде.

Волновое сопротивление — важнейшая характеристика среды, определяющая условие отражения и преломления волн на ее границе.

Представим себе, что звуковая волна попадает на границу раздела двух сред. Часть волны отражается, а часть — преломляется. Законы отражения и преломления звуковой волны аналогичны законам отражения и преломления света. Преломленная волна может поглотиться во второй среде, а может выйти из нее.

Допустим, что плоская волна падает нормально к границе раздела сред (рис 6), интенсивность ее в первой среде- I_1 , интенсивность преломленной (прошедшей) волны во второй среде- I_2 .



Назовем $\beta = \frac{I_2}{I_1}$ коэффициентом проникновения звуковой волны.

Рэлей показал, что коэффициент проникновения звука определяется формулой:

$$\beta = 4 \frac{\frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}}{\left(\frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} + 1\right)^2}$$

Если $c_1 \rho_1 = c_2 \rho_2$, то получаем, что $\beta = 1$. При равенстве волновых сопротивлений двух сред звуковая волна (при нормальном падении) пройдет границу раздела без отражения.

Если волновое сопротивление второй среды весьма велико по сравнению с волновым сопротивлением первой среды ($c_2 \rho_2 \gg c_1 \rho_1$), то

имеем: $\beta = 4 \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}$.

Оценим коэффициент пропускания на границе «воздух-вода»

1. для воздуха $\rho_1 \cdot c_1 = 440 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.
2. для среды внутреннего уха (вода) $\rho_2 \cdot c_2 = 1\,440\,000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.
3. Получим для перехода из воздуха в воду $\beta = 0,00122$. Это означает, что только тысячная доля интенсивности звуковой волны попадает в воду.
4. По этой причине существует специальный передаточный механизм — система слуховых косточек, которые выполняют функцию согласования волновых сопротивлений воздушной и жидкой сред для уменьшения энергетических потерь.

Во всяком закрытом помещении отраженный от стен, потолков, мебели звук падает на другие стены, полы и пр., вновь отражается и поглощается и постепенно угасает. Поэтому, даже после того, как источник звука прекратит действие, в помещении все еще имеются звуковые волны, которые создают гул. Особенно это

заметно в больших просторных залах. Процесс постепенного затухания звука в закрытых помещениях после выключения источника называют **реверберацией**.

Реверберация, с одной стороны, полезна, так как восприятие звука усиливается за счет энергии отраженной волны, но, с другой стороны, чрезмерно длительная реверберация может существенно ухудшить восприятие речи, музыки, так как каждая новая часть текста перекрывается предыдущими. В связи с этим обычно указывают некоторое оптимальное время реверберации, которое учитывается при постройке аудиторий, театральных и концертных залов и т. п. Например, время реверберации заполненного Колонного зала Дома Союзов в Москве равно 1,70 с, заполненного Большого театра — 1,55 с. Для этих помещений пустых время реверберации соответственно 4,55 и 2,05 с.

Физические основы звуковых методов исследования в клинике

1. Аускультация
2. Фонокардиография (ФКГ)
3. Перкуссия

Звук может быть источником информации о состоянии органов человека.

1. **Аускультация**- непосредственное выслушивание звуков, возникающих внутри организма. По характеру таких звуков можно определить, какие именно процессы протекают в данной области тела, и в некоторых случаях установить диагноз.



Приборы, применяемые для выслушивания: стетоскоп, фонендоскоп.

Стетоскоп- прибор для выслушивания шумов внутренних органов: лёгких, бронхов, сердца, сосудов, кишечника и др. Представляет собой трубку в виде тонкого полого цилиндра с вогнутой раковиной для уха.



Фонендоскоп состоит из полой капсулы с передающей мембраной, которая прикладывается к телу, от нее идут резиновые трубки к уху врача. В полой капсуле возникает резонанс столба воздуха, вызывающий усиление звучания и,

следовательно, улучшение выслушивания. Выслушиваются дыхательные шумы, хрипы, тоны сердца, шумы в сердце.



В клинике используются установки, в которых выслушивание осуществляется при помощи микрофона и динамика. Широко применяется запись звуков с помощью магнитофона на магнитную ленту, что дает возможность их воспроизведения.

2. Фонокардиография — графическая регистрация тонов и шумов сердца и их диагностическая интерпретация. Запись осуществляется с помощью фонокардиографа, который состоит из микрофона, усилителя, частотных фильтров, регистрирующего устройства.



3. **Перкуссия**— исследование внутренних органов посредством постукивания по поверхности тела и анализа возникающих при этом звуков. Постукивание осуществляется либо с помощью специальных молоточков, либо при помощи пальцев.



Если в замкнутой полости вызвать звуковые колебания, то при определенной частоте звука воздух в полости начнет резонировать, усиливая тот тон, который соответствует размеру полости и ее положению. Схематично тело человека можно представить суммой разных объемов: газонаполненных (легкие), жидких (внутренние органы), твердых (кости). При ударе по поверхности тела возникают колебания с разными частотами. Часть из них погаснет. Другие совпадут с собственными частотами пустот, следовательно, усилятся и из-за резонанса будут слышны. По тону перкуторных звуков определяют состояние и топографию органа.

Факторы, определяющие профилактику шума. Защита от шума

Для профилактики шума необходимо знать основные факторы, определяющие его воздействие на организм человека: близость источника шума, интенсивность шума, длительность воздействия, ограниченность пространства, в котором действует шум.

Длительное воздействие шума вызывает сложный симптоматический комплекс функциональных и органических изменений в организме.

Воздействие длительного шума на ЦНС проявляется в замедлении всех нервных реакций, сокращении времени активного внимания, снижении работоспособности.

После длительного действия шума изменяется ритм дыхания, ритм сердечных сокращений, возникает усиление тонуса сосудистой системы, что приводит к повышению систолического и диастолического уровня кровяного давления. Изменяется двигательная и секреторная деятельность желудочно-кишечного тракта, наблюдается гиперсекреция отдельных желез внутренней секреции. Имеет место повышение потливости. Отмечается подавление психических функций, особенно памяти.

Специфическое действие оказывает шум на функции органа слуха. Ухо, как и все органы чувств, способно адаптироваться к шуму. При этом под действием шума порог слышимости повышается на 10—15 дБ. После прекращения шумового воздействия нормальное значение порога слышимости восстанавливается только через 3—5 минут. При высоком уровне интенсивности шума (80—90 дБ) его утомляющее действие резко усиливается. Одной из форм расстройства функции органа слуха, связанной с длительным воздействием шума, является тугоухость.

Сильное воздействие как на физическое, так и на психологическое состояние человека оказывает рок-музыка. Современная рок-музыка создает шум в диапазонах от 10 Гц до 80 кГц. Экспериментально установлено, что если основной ритм, задаваемый ударными инструментами, имеет частоту 1,5 Гц и имеет мощное музыкальное сопровождение на частотах 15—30 Гц, то у человека наступает сильное возбуждение. При ритме с частотой 2 Гц при таком же сопровождении человек впадает в состояние, близкое наркотическому опьянению. На рок-концертах интенсивность звука может превышать 120 дБ, хотя человеческое ухо настроено наиболее благоприятно на среднюю интенсивность

55 дБ. При этом могут возникать контузии звуком, звуковые «ожоги», потеря слуха и памяти.

Защита от шума достаточно сложна. Это связано с тем, что вследствие сравнительно большой длины волны звук огибает препятствия (дифракция) и звуковая тень не образуется.

Кроме того, многие материалы, применяемые в строительстве и технике, имеют недостаточно высокий коэффициент поглощения звука.

Эти особенности требуют специальных средств борьбы с шумами, к которым относятся подавление шумов, возникающих в самом источнике, использование глушителей, применение упругих подвесов, звукоизолирующих материалов, устранение щелей и т.п.

Для борьбы с шумами, проникающими в жилые помещения, большое значение имеют правильное планирование расположения зданий, создание защитных зон, в том числе и растительных. Растения — хороший гаситель шума. Деревья и кустарники могут снижать уровень интенсивности на 5-20 дБ. Эффективны зеленые полосы между тротуаром и мостовой. Лучше всего шум гасят липы и ели. Дома, находящиеся позади высокого хвойного заслона, могут быть избавлены от шумов улицы почти полностью.

Борьба с шумом не предполагает создания абсолютной тишины, так как при длительном отсутствии слуховых ощущений у человека могут возникнуть расстройства психики. Абсолютная тишина и длительный повышенный шум одинаково противоестественны для человека.

Биофизика слуха

3. Звукопроводящая и звуковоспринимающая части слухового аппарата.
4. Роль наружного уха.
5. Роль среднего уха.
6. Роль внутреннего уха.

Слух — восприятие звуковых колебаний, которое осуществляется органами слуха.

По выполняемым функциям в слуховом аппарате человека выделяют **звукпроводящую** и **звуквоспринимающую** части.

По анатомическому признаку в слуховом аппарате человека выделяют **наружное ухо**, **среднее ухо** и **внутреннее ухо**. Строение слухового аппарата показано на рис.

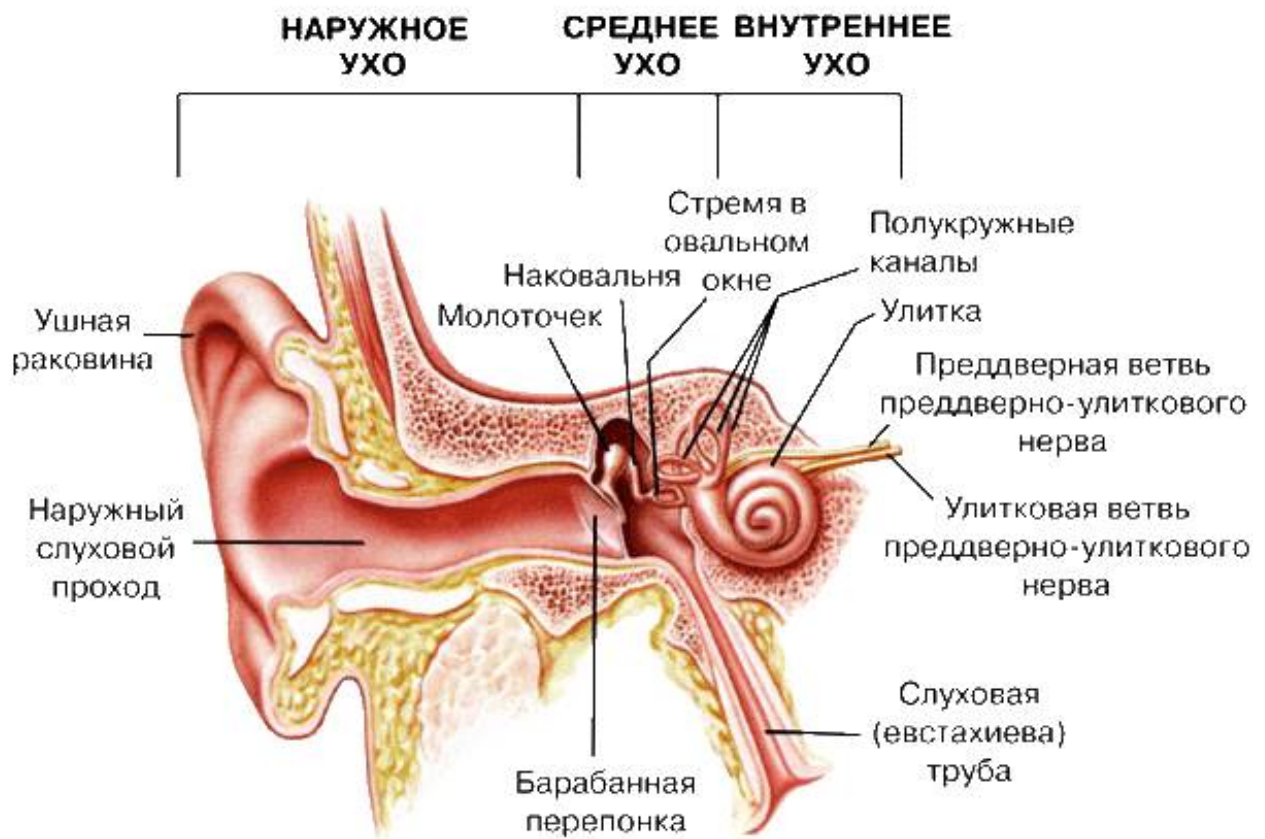


рис. 7

Роль наружного уха

Наружное ухо состоит из ушной раковины, слухового прохода (в виде узкой трубки), барабанной перепонки. Ушная раковина играет роль звукоулавливателя, концентрирующего звуковые волны на слуховом проходе, в результате чего звуковое давление на барабанную перепонку увеличивается по сравнению со звуковым давлением в падающей волне примерно в 3 раза. Наружный слуховой проход вместе с ушной раковиной можно сравнить с резонатором типа трубы. Барабанная перепонка, отделяющая наружное ухо от среднего уха, представляет

собой пластинку, состоящую из двух слоев коллагеновых волокон, ориентированных по-разному. Толщина перепонки около 0,1 мм.

Причина наибольшей чувствительности уха в области 3 кГц

Звук поступает в систему через наружный слуховой канал, который является закрытой с одной стороны акустической трубой длиной $L = 2,5$ см. Звуковая волна проходит через слуховой проход и частично отражается от барабанной перепонки. В результате происходит интерференция падающей и отраженной волн и образуется стоячая волна. Возникает акустический резонанс. Условия его проявления: длина волны должна быть в 4 раза больше длины воздушного столба в слуховом проходе. При этом столб воздуха внутри канала будет резонировать на звук с длиной волны, равной четырем его длинам. В слуховом канале, как в трубе, будет резонировать волна длиной:

$$\lambda = 4L = 4 \cdot 0,025 = 0,1 \text{ м.}$$

Частота, на которой возникает акустический резонанс равна 3,4 кГц. Этот резонансный эффект объясняет тот факт, что человеческое ухо имеет наибольшую чувствительность на частоте около 3 кГц.

Строение среднего уха

Среднее ухо является устройством, предназначенным для передачи звуковых колебаний из воздушной среды наружного уха в жидкую среду внутреннего уха. Среднее ухо (рис. 8) содержит барабанную перепонку, овальное и круглое окна, а также слуховые косточки (молоточек, наковальню, стремечко).

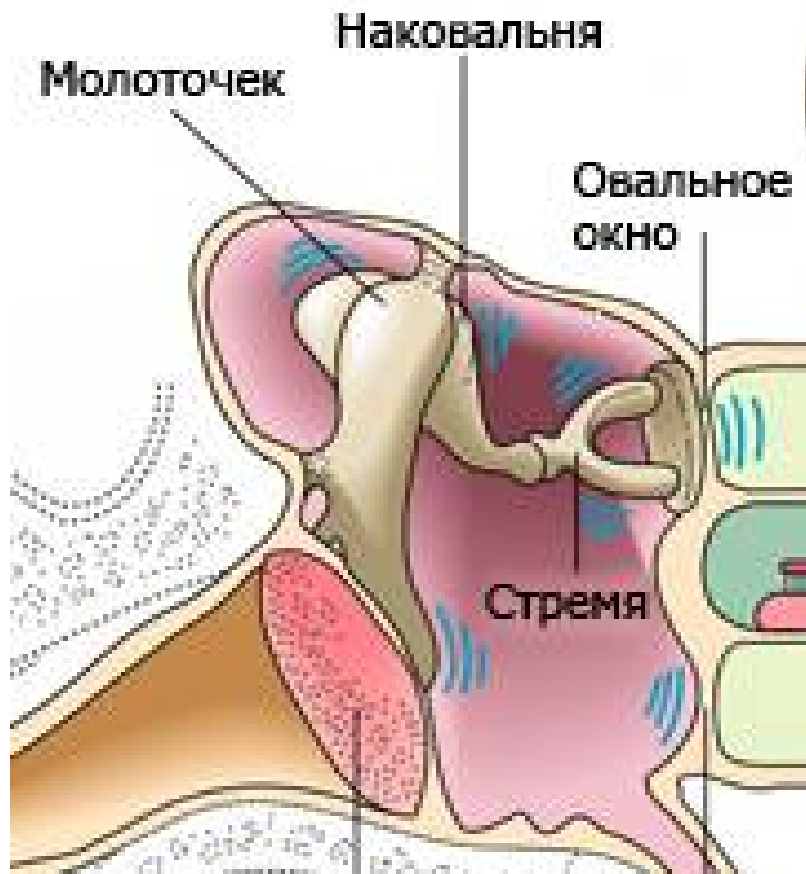


рис 8

Среднее ухо представляет собой полость $V=1\text{см}^3$, расположенную внутри височной кости, которая отделяется от наружного уха барабанной перепонкой, а от внутреннего уха — овальным и круглым окнами. Среднее ухо заполнено воздухом, влажность которого равна 100%. Любая разность давлений между наружным и средним ухом приводит к деформации барабанной перепонки. Барабанная перепонка- это воронкообразная мембрана, вдавленная внутрь среднего уха. От нее звуковая информация передается косточкам среднего уха (форма барабанной перепонки обеспечивает отсутствие собственных колебаний, что весьма существенно, так как собственные колебания перепонки создавали бы шумовой фон).

Сообщается с носоглоткой с помощью **слуховой (евстахиевой) трубы.**

Функции среднего уха:

1. звукопроводение колебаний из воздушной среды наружного уха в жидкую

- среду внутреннего уха;
2. звукоусиление $k=22,5$ раз (в результате происходит усиление звука в наружном и среднем ухе в 50-60 раз);
 3. выравнивание давления воздуха внутри и снаружи от барабанной перепонки с помощью **слуховой (евстахиевой) трубы**.

Проникновение звуковой волны через границу «воздух-жидкость»

Для того чтобы понять назначение среднего уха, рассмотрим *непосредственный* переход звука из воздушной среды в жидкую. На границе раздела двух сред одна часть падающей волны отражается, а другая часть переходит во вторую среду. Доля энергии, перешедшей из одной среды в другую, зависит от величины коэффициента пропускания, который равен $\beta = 0,00122$ или $\beta = 0,122\%$. Это означает, что только тысячная доля интенсивности попадает в воду. В логарифмическом масштабе потери интенсивности составляют:

$$I_{\text{дБ}} = \lg(1_{\text{пад}}/1_{\text{прош}}) = 10 \cdot \lg(1/0,00122) = 29 \text{ дБ.}$$

То есть при переходе из воздуха в воду уровень интенсивности звука уменьшается на 29 дБ. С энергетической точки зрения такой переход абсолютно *неэффективен*. По этой причине существует специальный передаточный механизм — система слуховых косточек, которые выполняют функцию согласования волновых сопротивлений воздушной и жидкой сред для уменьшения энергетических потерь.

Физические основы функционирования системы слуховых косточек

Система косточек представляет собой последовательное звено, начало которого (*молоточек*) связано с барабанной перепонкой внешнего уха, а конец (*стремечко*) - с овальным окном внутреннего уха (рис. 8).

Площадь барабанной перепонки равна $S_{6п} = 64 \text{ мм}^2$, а площадь овального окна $S_{оо} = 3 \text{ мм}^2$.

Система косточек работает как рычаг, который дает выигрыш в силе со стороны внутреннего уха в 1,3 раза.

Различие площадей барабанной перепонки и овального окна совместно с системой косточек обеспечивает усиление звукового давления в 26 раз.

Выполненные расчеты показывают, что при прохождении звука через среднее ухо происходит увеличение уровня его интенсивности на 28 дБ. Потери уровня интенсивности звука при переходе из воздушной среды в жидкую составляют 29 дБ.

Функции среднего уха:

1. звукопроводение колебаний из воздушной среды наружного уха в жидкую среду внутреннего уха;
2. звукоусиление $k=26$ раз, в результате происходит усиление звука в 50-60 раз;
3. выравнивание давления воздуха внутри и снаружи от барабанной перепонки.

Роль внутреннего уха

Звуковоспринимающей системой слухового аппарата являются внутреннее ухо.

Внутреннее ухо представляет собой замкнутую полость. Эта полость, называемая лабиринтом, имеет сложную форму и заполнена жидкостью — перилимфой. Она состоит из двух основных частей: улитки, преобразующей механические колебания в электрический сигнал, и вестибулярного аппарата, обеспечивающего равновесие тела в поле силы тяжести.

Строение улитки

Рис. 9 Поперечный разрез улитки

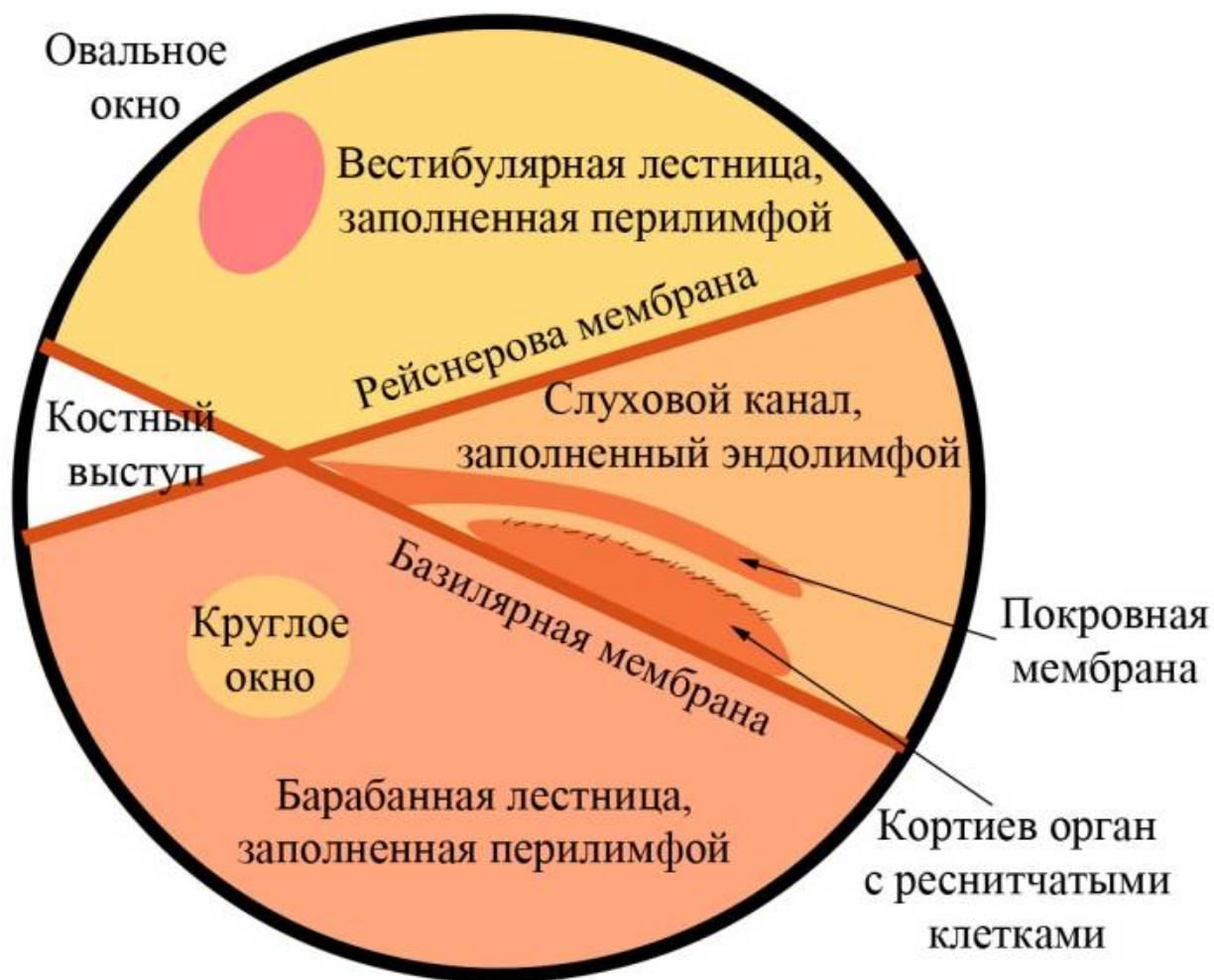
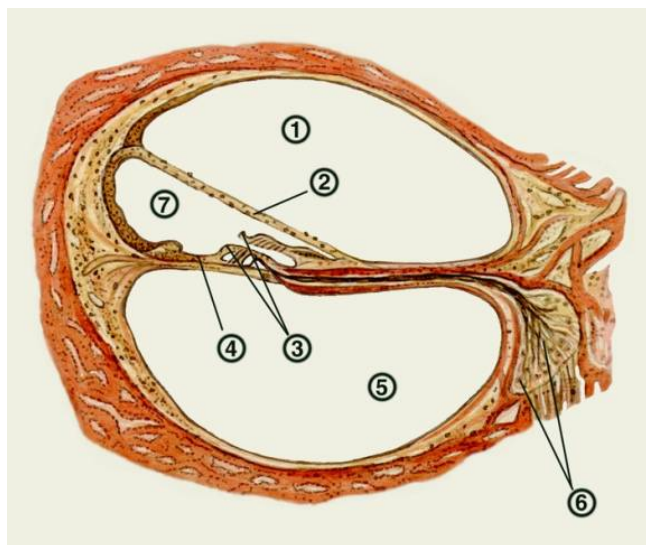


Рис.9



Улитка является полым костным образованием длиной 35 мм и имеет форму конусообразной спирали, содержащей 2,5 завитка.

По всей длине улитки вдоль нее проходят две перепончатые перегородки, одна из которых называется *рейснеровой мембраной*, а другая — *основной(базиллярной) мембраной*. Длина основной мембраны приблизительно равна 32 мм. Она очень неоднородна по своей форме: расширяется и утончается в направлении от овального окна к верхушке улитки. Вследствие этого модуль упругости основной мембраны вблизи основания улитки примерно в 100 раз больше, чем у вершины.

Пространство между мембранами - **улитковый ход(слуховой канал)** - заполнено жидкостью, называемой *эндолимфой*.

Вестибулярный и барабанный каналы заполнены особой жидкостью — перилимфой. В верхней части улитки они соединяются между собой. Колебания стремечка передаются мембране овального окна, от нее перилимфе вестибулярного хода, а затем через тонкую вестибулярную мембрану - эндолимфе улиточного хода. Колебания эндолимфы передаются основной мембране, на которой находится **кортиев орган**, содержащий чувствительные волосковые клетки (около 24 000), в которых возникают электрические потенциалы, передаваемые по слуховому нерву в мозг.

Барабанный ход заканчивается мембраной круглого окна, которая компенсирует перемещения *перелимфы*.

Функция кортиева органа — преобразование (трансформация) энергии звуковых колебаний в процесс нервного возбуждения. Звуковые колебания воспринимаются барабанной перепонкой и через систему косточек среднего уха передаются жидким средам внутреннего уха — перилимфе и эндолимфе. Колебания последних приводят к изменению взаиморасположения волосковых клеток кортиева органа и покровной мембраны, что вызывает сгибание волосков и возникновение биоэлектрических потенциалов, улавливаемых и передаваемых в центральную нервную систему отростками нейронов спирального ганглия, подходящими к основанию каждой волосковой клетки.

Частотно-избирательные свойства основной мембраны улитки

Теория Бекеша – это теория слуха, объясняющая первичный анализ звуков в улитке.

Основная мембрана является неоднородной линией передачи механического возбуждения. При действии акустического раздражителя по основной мембране распространяется волна, степень затухания которой зависит от частоты: чем меньше частота раздражения, тем дальше от овального окна распространится волна по основной мембране. Так, например, волна с частотой 300 Гц до затухания распространится приблизительно на 25 мм от овального окна, а волна с частотой 100 Гц — приблизительно на 30 мм.

Различающиеся по высоте звуковые колебания воспринимаются различными отделами кортиева органа: высокие частоты вызывают колебания в нижних отделах улитки, низкие — в верхних, что связано с особенностями гидродинамических явлений в ходе улитки.

1. Звуки разной частоты распространяются на разную длину.
2. Высокие частоты затухают быстро (основание улитки).
3. Средние частоты доходят до середины улитки.
4. Низкие частоты доходят до вершины улитки.
5. Улитка разделяет сложные колебания на частоты.

В настоящее время считается, что восприятие высоты тона определяется положением максимума колебаний основной мембраны.

Инфразвук и его источники

Инфразвук — упругие колебания и волны с частотами от 0,001 Гц до 16-20 Гц, лежащими ниже области слышимых человеком частот.

Инфразвуковые волны распространяются в воздушной и водной средах, а также в земной коре (сейсмические волны). Основная особенность инфразвука, обусловленная его низкой частотой, малое поглощение. При распространении в глубоком море и в атмосфере на уровне земли инфразвуковые волны частоты 10—20 Гц затухают на расстоянии 1000 км не более чем на несколько децибел.

Известно, что звуки извержений вулканов и атомных взрывов могут многократно обходить вокруг земного шара. Из-за большой длины волны мало и рассеяние инфразвука. В естественных средах заметное рассеяние создают лишь очень крупные объекты — холмы, горы, высокие здания.

Естественными источниками инфразвука являются метеорологические, сейсмические и вулканические явления. Инфразвук генерируется атмосферными и океаническими турбулентными флуктуациями давления, ветром, морскими волнами (в том числе и приливными), водопадами, землетрясениями, обвалами.

Источниками инфразвука, связанными с человеческой деятельностью, являются взрывы, орудийные выстрелы, ударные волны от сверхзвуковых самолетов, удары копров, работа реактивных двигателей и др. Инфразвук содержится в шуме двигателей и технологического оборудования. Вибрации зданий, создаваемые производственными и бытовыми возбудителями, как правило, содержат инфразвуковые компоненты. Существенный вклад в инфразвуковое загрязнение среды дают транспортные шумы. Например, легковые автомобили на скорости 100 км/ч создают инфразвук с уровнем интенсивности до 100 дБ. В моторном отделении крупных судов зарегистрированы инфразвуковые колебания, создаваемые работающими двигателями, с частотой 7—13 Гц и уровнем интенсивности 115 дБ. На верхних этажах высотных зданий, особенно при сильном ветре, уровень интенсивности инфразвука достигает 100 дБ.

Инфразвук почти невозможно изолировать — на низких частотах все звукопоглощающие материалы практически полностью теряют свою эффективность.

Воздействие инфразвука на человека. Использование инфразвука в медицине

На человека инфразвук оказывает, как правило, отрицательное действие: вызывает угнетенное настроение, усталость, головную боль, раздражение. У человека, подвергнутого воздействию инфразвука низкой интенсивности,

появляются симптомы «морской болезни», тошнота, головокружение. Появляется головная боль, повышается утомляемость, слабеет слух. При частоте 2-5 Гц и уровне интенсивности 100—125 дБ субъективная реакция сводится к ощущению давления в ухе, затруднению при глотании, вынужденной модуляции голоса и затруднению речи. Воздействие инфразвука негативно сказывается на зрении: ухудшаются зрительные функции, снижается острота зрения, сужается поле зрения, ослабляется аккомодационная способность, нарушается устойчивость фиксации глазом наблюдаемого объекта.

Шум на частоте 2-15 Гц при уровне интенсивности 100 дБ приводит к возрастанию ошибки слежения за стрелочными индикаторами. Проявляется судорожное подергивание глазного яблока, нарушение функции органов равновесия.

Летчики и космонавты, подвергнутые на тренировках воздействию инфразвука, медленнее решали даже простые арифметические задачи.

Существует предположение, что различные аномалии в состоянии людей при плохой погоде, объясняемые климатическими условиями, являются на самом деле следствием воздействия инфразвуковых волн.

При средней интенсивности (140-155 дБ) могут наступать обмороки, временная потеря зрения. При больших интенсивностях (порядка 180 дБ) может наступить паралич со смертельным исходом.

Предполагают, что негативное влияние инфразвука связано с тем, что в инфразвуковой области лежат частоты собственных колебаний некоторых органов и частей тела человека. Это вызывает нежелательные резонансные явления. Некоторые частоты собственных колебаний для человека:

- тело человека в положении лежа - (3—4) Гц;
- грудная клетка - (5-8) Гц;
- брюшная полость — (3—4) Гц;
- глаза - (12—27) Гц.

Особенно вредно воздействие инфразвука на сердце. При достаточной мощности возникают вынужденные колебания сердечной мышцы. При резонансе (6-7 Гц) их амплитуда возрастает, что может привести к кровоизлиянию.

Использование инфразвука в медицине

В последние годы инфразвук стали широко применять в медицинской практике. Так, в офтальмологии инфразвуковые волны с частотами до 12 Гц используются при лечении близорукости. При лечении заболеваний век используется инфразвук для фонофореза, а также для очищения раневых поверхностей, для улучшения гемодинамики и регенерации в веках, массажа и т.д.

Ультразвук

**Ультразвук- упругие колебания частиц среды с частотой $\nu > 10-15\text{кГц}$.
Верхняя частота 10^{13}Гц .**

Свойства ультразвука

1. Малая длина волны ультразвука является основанием для того, чтобы рассматривать их распространение методами геометрической акустики.

Физически это приводит к лучевой картине распространения.

Отсюда свойства: геометрическое отражение и преломление, фокусировка.

2. Возможность сосредоточения большой плотности потока энергии в ультразвуковых пучках ($\omega \sim \nu^2$).

В результате это приводит к разрушению живых клеток, омертвлению мелких животных.

Глубина полупоглощения для различных тканей.

Вид ткани	Частота в МГц.	Глубина (см)
1. Мышца	0,8	2,1
2. Жир. Ткань	0,8	3,3
3. Костная ткань	0,8	0,23
4. Кровь	1,0	35,0

Глубина полупоглощения показывает, на какой глубине интенсивность колебаний уменьшается наполовину.

Источники ультразвука:

1. **Естественные**- летучие мыши (79-80тыс. Гц), кошки, собаки, дельфины, кузнечики.
2. **Искусственные**- обратный пьезоэффект, магнитострикция.

Пьезоэффект-явление, наблюдаемое в образцах анизотропных материалов.

Кристаллы целого ряда веществ (кварц, турмалин, титанат бария и т. д.) обладают замечательным свойством.

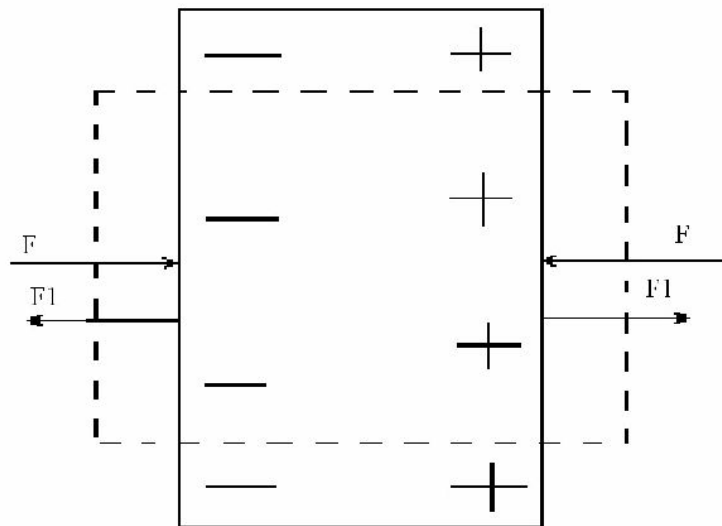
Если из них определенным образом вырезать пластинку, то при сжатии или растяжении такой пластинки на ее поверхности появятся электрические заряды — с одной стороны положительные, с другой — отрицательные. В этом и состоит пьезоэлектрический эффект. Этот эффект обратим.

Обратный пьезоэффект-состоит в механической деформации среды под действием внешнего электрического поля.

Пластинку покрывают с двух сторон металлическими электродами (например, алюминиевой фольгой), присоединяют к ним источник переменного напряжения, пластинка попеременно то сжимается, то растягивается.

Эти колебания поверхности пластинки и возбуждают в среде ультразвуковые

волны, удастся получать ультразвуки сравнительно небольшой интенсивности.



Пьезоэффектом обладают кости человека, кварц и ниобат лития.

Если на пластинку из кварца подаётся напряжение $U=10^3$ В, то величина возникающей деформации приблизительно равна $\Delta X=2 \cdot 10^{-7}$ см (10-15 атомов приходится на ΔX).

Если смену зарядов производить с резонансной частотой, при том же напряжении, то размах колебаний возрастает и мощность ультразвука увеличится. Чем тоньше пластинка, тем выше резонансная частота

Если $d=1$ мм, то $\nu=2,88$ млн. колебаний в сек.

$d=0,5$ мм, то $\nu=5,76$ млн. колебаний в сек.

Обычный песок состоит из крупинок кварца. Если расплавить песок, получится кварцевое стекло.

Пьезоэффектом обладают кристаллы кварца, которые встречаются редко, поэтому их выращивают искусственно.

3. **Магнитострикция**-стержень (никель, кобальт, железо, ряд сплавов) в переменном магнитном поле меняет длину и приводит в колебательное движение прилегающие слои воздуха или жидкости, создавая ультразвук.

Состав (2%-ванадия, 49%-железа, 49%-кобальта) имеет большой

магнитострикционный эффект.

Это явление, называемое магнитострикцией, используется для получения ультразвуков большой интенсивности.

Простейший **магнитострикционный излучатель** — это никелевый стержень, вставленный внутрь катушки, по обмотке которой пропускается переменный ток.

В катушке возникает при этом переменное магнитное поле и стержень в такт с его колебаниями периодически то сжимается, то расширяется, т. е. совершает механические колебания.

Эти колебания стержня и возбуждают в среде ультразвуковые волны.



магнитострикционный излучатель

Биологическое действие ультразвука

1. Кавитация- сжатия и разряжения в жидкости, создаваемых ультразвуком полостей. При захлопывании выделяется значительная энергия, происходит разогревание вещества, ионизация и диссоциация молекул, возникают огромные давления (тыс. атмосфер).

Давление вызывающее кавитацию –2атм.или 135 Вт/см^2 .

2. В биологических объектах происходят следующие процессы:

- Микровибрации на клеточном уровне
- разрушение биомолекул

- повреждение мембран, изменение проницаемости
- тепловое действие
- разрушение клеток и микроорганизмов, вирусов.

Химическое действие

Кавитация- под воздействием ультразвука в жидкостях образуются пустоты в виде мельчайших пузырьков, куда происходит испарение жидкости с кратковременным возрастанием давления внутри них.

При кавитации внутри пузырьков находятся мельчайшие капельки воды, которые имеют заряд противоположный стенкам. При сжатии их размеры уменьшаются и заряды оказываются расположенными на пузырьках очень малых размеров. В результате электрическое напряжение сильно возрастает. Между стенками и капельками происходят электрические разряды, напоминающие микроскопические молнии. Эти разряды являются одной из причин химического действия ультразвука.

В кавитационной полости возникают большие электрические напряжения и высокая температура.

Далее полость захлопывается, что приводит к появлению ударных волн.

Происходят процессы ионизации и диссоциации газов полости (расщеплении молекулы воды на радикалы H^+ и OH^- с последующим образованием перекиси водорода $H_2 O_2$).

Повышение температуры и большие перепады давления, которыми сопровождается прохождение ультразвука, могут приводить к образованию ионов и радикалов, способных вступать во взаимодействие с молекулами. При этом могут протекать такие химические реакции, которые в обычных условиях неосуществимы.

В воде:

$H_2O \rightarrow H^+ OH^-$ -получаются химически активные вещества.

Высокие давления и высокие температуры способны вызвать химические превращения.

Расщепление молекул под действием ультразвука происходит под действием больших давлений в кавитационном пузырьке.

На этом эффекте основано изготовление эмульсий (сера, камфара).

Применение ультразвука

1. Бактериология, иммунология

Ультразвук производит разрыв бактериальных клеток и клеточных структур. (при захлопывании кавитационных полостей появляются ударные волны). Из клеток при разрыве извлекаются токсины, ферменты, гормоны.

Из коклюшной палочки извлекался эндотоксин, который терял токсические свойства и сохранял иммуногенные свойства по отношению к токсину (вакцина против коклюша).

2. Просмотр внутренних органов

Ультразвук отражается от тканей различной плотности ($\Delta\rho=10\%$), $v=(1-15)\cdot 10^6$ Гц, $\tau=10^{-6}$ с).

Ткани организма дают серию отражённых сигналов различной амплитуды, в результате образуется теневое изображение органов.

УЗИ плода (30



недель)

В канцерогенной ткани больше структур, отражающих ультразвук. И это послужило основой для диагностики опухолевых процессов (рак груди, щитовидки, мозга, глаз и т.д.).

3. **Ультразвуковая кардиология**- диагностируется наличие сужения митрального клапана.

4. **Ультразвуковая терапия**- ($v=500-2500$ Гц)

Факторы лечебного действия:

- Механический (волнообразное распространение участков сжатия и разряжения)
- Химический-способствует интенсивному протеканию физико-химических и биохимических реакций в тканях.
- Тепловой эффект- поглощение энергии ультразвуковой волны.

В результате терапевтический эффект-болеутоляющий, рассасывающий инфильтрат.

5. **Ультразвуковой фонофорез лекарственных веществ**-введение лекарственного вещества с помощью ультразвука.

Действие: механическое, лекарственное, спазмолитическое, рассасывающее.

6 **Ультразвуковое сканирование**-двухмерное изображение. Датчик движется, отражённые импульсы дают светящиеся точки, при слиянии которых формируется изображение исследуемого органа.

7. **Прибор для слепых**-ориентир.

8. Хирургия

- Рассечение костей
- Резка тканей
- Сварка костей
- Сварка мягких тканей

Вопросы для самоконтроля по теме: Биофизика звука

1. Дать определение колебания (примеры).
2. Дать определение периодического колебания (примеры).
3. Дать определение гармонического колебания(примеры).
4. Дать определение свободного колебания(примеры).
5. Дать определение незатухающего колебания(примеры).
6. Дать определение затухающего колебания(примеры).
7. Дать определение вынужденного колебания(примеры).
8. Дать определение периода колебаний.
9. Дать определение частоты колебаний.
10. Дать определение амплитуды колебаний.
11. Дать определение волны.
12. Дать определение фронта волны.
13. Дать определение продольной волны.
14. Дать определение поперечной волны.
15. Написать математическое выражение уравнения волны, объяснить смысл.
16. Дать определение интенсивности волны.
17. Написать математическое выражение вектора Умова-Пойтинга, объяснить смысл.
18. Дать определение звука.
19. Дать определение чистого тона, его источники.
20. Дать определение сложного тона, его источники.
21. Дать определение акустического спектра. Изобразить графически акустический спектр.
22. Дать понятие обертона.
23. Дать определение шума, примеры.
24. Дать определение амплитуды звуковой волны.
25. Дать понятие характеристики слухового ощущения -высота звука.
26. Дать понятие характеристики слухового ощущения -громкости звука.

27. Дать определение интенсивности звука. Единицы измерения интенсивности звука.
28. Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука.
29. Дать понятие характеристики слухового ощущения- тембра звука.
30. Закон Вебера-Фехнера, его смысл и математическая формулировка.
31. Дать определение порога слышимости. Численное значение порога слышимости.
32. Дать определение порога боли. Численное значение порога боли.
33. Дать определение единицы громкости- бел.
34. Какой диапазон громкостей звука в беллах воспринимает ухо человека?
35. Дать определение единицы громкости- фон.
36. Какой диапазон громкостей звука в децибелах воспринимает ухо человека?
37. Дать определение звуковому методу исследования- перкуссии.
38. Дать определение звуковому методу исследования- аускультации.
39. Дать определение инфразвука.
40. Источники инфразвука.
41. Воздействие инфразвука на человека.
42. Использование инфразвука в медицине.
43. Дать определение ультразвука.
44. Перечислить источники ультразвука.
45. Объяснить смысл обратного пьезоэлектрического эффекта.
46. Объяснить смысл явления магнитострикции.
47. Объяснить смысл явления кавитации.
48. Биологическое и химическое действие ультразвука.
49. Дать определение звуковому методу исследования -фонокардиографии.

Тестовые задания по теме: по теме:«Биофизика слуха»

1. Выявлена аудиометрией тугоухость на частоте 125-500 Гц, возможно поражение:

- 1.всей улитки
- 2.слуховой косточки
- 3.верхушки улитки
- 4.барабанной перепонки
- 5.средней части улитки
- 6.основание улитки

2. Выявлена аудиометрией тугоухость на частоте 1000-2000 Гц, которая вызвана поражением:

- 1.всей улитки
- 2.слуховой косточки
- 3.верхушки улитки
- 4.барабанной перепонки
- 5.средней части улитки
- 6.основание улитки

3.Выявлена аудиометрией тугоухость на частоте 15000-20000 Гц, которая вызвана поражением:

- 1.всей улитки
- 2.слуховой косточки
- 3.верхушки улитки
- 4.барабанной перепонки
- 5.средней части улитки
- 6.полукружных каналов
- 7.основание улитки

4. Улитка внутреннего уха как амплитудно-частотный анализатор сложные звуки разлагает на отдельные тоны, которые пространственно воздействуют на кортиева орган. Установите соответствие между областью улитки и частотой принимаемого тона:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. высокочастотные тоны | а) верхушка улитки |
| 2. среднечастотные тоны | б) средняя часть улитки |
| 3. низкочастотные тоны | в) основание улитки |

5. Звуковая волна первично возникает и распространяется в улитке внутреннего уха по:

1. перилимфе барабанной лестницы
2. эндолимфе слухового канала
3. перилимфе вестибулярной лестницы

6. Звуковая волна возбуждает рецепторные клетки кортиева органа, действуя:

1. на весь кортиев орган
2. на несколько участков кортиева органа
3. на участки кортиева органа, где возникают "режущие" волны

7. Установите соответствие:

- | | |
|---------------|-------------------------|
| 1. звук | а) 0 - 20 Гц |
| 2. ультразвук | б) 20 - 20000 Гц |
| 3. инфразвук | в) 20000 – 10^{10} Гц |

8. Установите соответствие между физическими и физиологическими параметрами звука:

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| 1. частота | а) тембр |
| 2. амплитуда, интенсивность | б) громкость |
| 3. акустический спектр | в) высота |

9. Основной физической характеристикой чистого тона является:

1. амплитуда

- 2.интенсивность
- 3 частота
- 4.акустический спектр

10. Источником чистого тона является:

- 1.музыкальный инструмент
- 2.аппарат речи
- 3.камертон
- 4.шум

11. Акустический спектр-это набор с указанием их относительной интенсивности:

- 1.частот
- 2.амплитуд
- 3.звуков

12. Акустический спектр-это важная характеристика:

- 1.чистого тона
- 2.сложного тона
- 3.шума

13. Закон Вебера-Фехнера устанавливает соответствие между:

1. физическими и физиологическими параметрами звука
2. громкостью и амплитудой звука
3. интенсивностью звука и порогом слышимости
4. интенсивностью звука и порогом болевого ощущения

14.Установите соответствие между характером и интенсивностью звука (дбел):

- | | |
|-----------------------------------|--------|
| 1. порог слышимости | а) 0 |
| 2. порог болевого ощущения | б) 130 |
| 3. сердечные тоны через стетоскоп | в) 10 |
| 4. шум двигателя самолёта | г) 110 |

15. Основой аппарата для аудиометрии является:

1. шумомер
2. звуковой генератор
3. камертон

16. В основе получения ультразвука лежит:

1. прямой пьезоэлектрический эффект
2. обратный пьезоэлектрический эффект и явление магнитострикции
3. прямой пьезоэлектрический эффект и явление магнитострикции

17. Уровень громкости тона частотой 1000 Гц при изменении интенсивности звука в 10 раз называется:

1. фоном
2. белом
3. децибелом

18. Закон Вебера-Фехнера описывается уравнением:

1. $L = k \cdot Lg \frac{I}{I_0}$

2. $\Delta E = 20 \cdot Lg \frac{I}{I_0}$

3. $\Delta E = 10 \cdot Lg \frac{I}{I_0}$

19. Аудиометрия-метод определения:

1. остроты слуха
2. порога слышимости
3. уровня громкости

20. Аудиограмма - это кривая представляющая собой совокупность точек:

1. интенсивностей звука при различных частотах
2. громкости звука при различных частотах
3. порогов слышимости при различных частотах

21. Бел-это изменение уровня громкости тона частотой 1000Гц при изменении интенсивности звука в:

1. 2 раза
2. 10 раз
3. 100 раз

22. Децибел равен:

1. 100 бел
2. 0.1 бел
3. 1 бел
4. 10

23. Звуки представляющие сочетание множества тонов: частота, форма, интенсивность и продолжительность которых беспорядочно меняются называется:

1. инфразвуком
2. шумом
3. акустическим спектром

24. Нормально допустимым уровнем шума считается:

1. 50-90 дБ
2. 30-100 дБ
3. 40-50 дБ
4. 130 дБ

25. Для объективного измерения громкости шума применяют прибор, называемый:

1. фонендоскоп
2. аудиометр
3. шумомер

26. Явление продолжения звучания звука после выключения источника звука вследствие многократного отражения и рассеяния волн в закрытых помещениях называется:

1. аускультацией
2. реверберацией
3. перкуссией

27. Время реверберации-это время, в течение которого интенсивность звука в помещении (после выключения источника) ослабляется в:

1. 6 раз
2. 10^6 раз
3. 600 раз
4. 6000 раз

28. Упругие колебания, распространяющиеся в среде в виде продольных волн, при частоте ниже 16 Гц называют:

1. звуком
2. ультразвуком
3. инфразвуком

29. Обратный пьезоэлектрический эффект-это изменение размеров пластинки пьезоэлектрика под действием:

1. переменного магнитного поля
2. электрического поля
3. магнитного поля
4. переменного электрического поля

30. Магнитострикция-это изменение длины (удлинение и укорочение) ферромагнитного сердечника под действием:

1. электрического поля
2. переменного магнитного поля
3. переменного электрического поля
4. магнитного поля

31. Шум имеет:

1. сплошной спектр
2. линейчатый спектр
3. постоянную частоту

32. Выслушивание звуков, возникающих внутри организма называется:

1. перкуссией
2. аускультацией
3. фонокардиографией

33. Метод анализа звуков, возникающих при постукивании по поверхности тела называется:

1. аускультацией
2. перкуссией
3. фонокардиографией

34. Установите соответствие между характером звука, возникающим при перкуссии и видом ткани организма:

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1. мягкие ткани (мышцы) | а) тихий, быстро затухает |
| 2. полость, наполненная воздухом | б) громкий, менее затухающий |

35. Тембр звука характеризуется:

1. частотой
2. гармоническим спектром
3. обертонами

36 Уравнение плоской гармонической волны имеет вид:

1. $X=A \cdot \cos(\omega t)$
2. $X=A \cdot \cos\omega(t-s/v)$
3. $X=A \cdot \sin(\omega t)$

37. Вектор Умова имеет вид:

1. $I = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 A^2 v$
2. $I = \frac{E}{St}$
3. $\omega = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 A^2$
4. $E = \frac{1}{2} m \omega_0^2 A^2$

38. Найти соответствие между видом колебаний и процессом затухания:

- | | |
|------------------|-----------------|
| 1. свободные | а) затухающие |
| 2. вынужденные | б) незатухающие |
| 3. гармонические | |

39. Колебания, совершающиеся под действием внутренних сил называются:

1. вынужденными
2. свободными
3. гармоническими

40. В процессе лечения ухо стало слышать лучше, следовательно, порог слышимости...

1. увеличился
2. уменьшился
3. не изменился
4. стал стабильным

41. В каких средах распространяется звук?

1. в твердых и жидких средах, в газах и вакууме
2. в твердых, жидких, газообразных
3. в воздухе и вакууме
4. только в твердых телах и газах
5. только в газах

42. Ультразвук - это...

1. электрические колебания с частотой, выше звуковой
2. механические колебания и волны с частотой менее 16 Гц
3. механические колебания и волны с частотой более 20 КГц
4. электромагнитные волны с частотой более 20 КГц

43. Какая величина является характеристикой слуха?

1. громкость
2. интенсивность
3. частота
4. порог слышимости

44. Звук стал выше, следовательно, его частота...

1. не изменилась
2. уменьшилась
3. стабилизировалась
4. увеличилась

45. Какими факторами определяется громкость звука?

1. интенсивностью, частотой
2. порогом слышимости
3. порогом болевых ощущений
4. спектром звука

46. Как движутся частицы воздуха при распространении в нём звуковой волны?

1. совершают колебания вдоль направления распространения волны
2. колеблются перпендикулярно направлению распространения
3. движутся прямолинейно и равноускоренно по направлению распространения волны
4. движутся по синусоидальной траектории

47. В каких средах распространяется звук?

1. в твердых и жидких средах, в газах и вакууме
2. в твердых, жидких, газообразных
3. в воздухе и вакууме
4. только в твердых телах и газах
5. только в газах

48. Ультразвук - это...

1. электрические колебания с частотой, выше звуковой
2. механические колебания и волны с частотой менее 16 Гц
3. механические колебания и волны с частотой более 20 КГц
4. электромагнитные волны с частотой более 20 КГц