

ГБОУ ВПО ОрГМУ МЗ РФ

КАФЕДРА БИОФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

Колосова Н.И.

Денисов Е.Н.

Учебно-методическое пособие по биофизике

Биофизика сенсорных систем

Оренбург, 2015

Оренбург, 2015

Учебное пособие предназначено для студентов лечебного, (очная и заочная формы обучения) для подготовки к занятиям по биофизике по темам: Биофизика глаза и биофизика звука и органа слуха.

Целью учебного пособия является формирование у студентов-медиков системных знаний о:

- строении органа слуха;
- использовании звуковых и ультразвуковых методах, для диагностики и терапии.
- оптической системе глаза, первичных механизмах свето- и цветовосприятия;
- недостатках оптической системы глаза и физических основах их исправления.

В пособие включены:

- теоретические данные по биофизике глаза и слуха
- вопросы для подготовки к занятию
- тесты
- вопросы для самоконтроля знаний

Представленный материал соответствует требованиям Государственного (2000г) образовательного стандарта, официальной учебной программе для студентов 1 курса медицинских вузов по биофизике.

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к печати РИС ОрГМУ.

Содержание

Глава 1 Биоп физика глаза

Вопросы для подготовки к занятию:

1. **Элементы геометрической оптики**
 - 1.1 Линзы, виды линз.
 - 1.2 Главная оптическая ось, фокус линзы.
 - 1.3 Построение изображения в линзе, формула линзы.
 - 1.4 Оптическая сила линзы. Связь оптической силы линзы с радиусами кривизны поверхностей линзы.
2. **Формирование изображения оптической системой глаза**
 - 2.1 Строение глаза.
 - 2.2 Оптическая система глаза, виды и характеристики биолинз.
 - 2.3 Редуцированный глаз. Построение изображения в глазу.
 - 2.4 Угол зрения. Разрешающая способность. Острота зрения.
 - 2.5 Аккомодация.
 - 2.6 Бинокулярное зрение.
 - 2.7 Недостатки оптической системы глаза и физические основы их исправления.
3. **Биофизические основы зрительной рецепции**
 - 3.1 Морфо-функциональные слои сетчатки глаза.
 - 3.2 Строение палочки.
 - 3.3 Первичные механизмы свето- и цветовосприятия.
 - 3.4 Цветное зрение.

Глава № 2 Биоп физика слуха

1. Элементы геометрической оптики

Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом.

Видимый свет – это электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от 400 до 760 нм. Этот диапазон является главным источником информации для человека.

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представлений о световых лучах, называется геометрической оптикой. Под *световым лучом* понимается направленная линия, вдоль которой распространяется световая энергия. Геометрическая оптика является приближенным методом построения изображений в оптических системах, но позволяет разобрать основные явления, связанные с прохождением через них света.

1.1 Линзы, виды линз. Главная оптическая ось, фокус линзы

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями и по показателю преломления отличающееся от окружающей среды. Линза называется *тонкой*, если ее толщина мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей.

Прямая O_1O_2 , проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется **главной оптической осью** (рис.1). Для всякой линзы существует точка **O**, называемая оптическим центром линзы. Любая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью линзы.

Лучи света, идущие вдоль оптических осей линзы, т.е. проходящие через ее центр, не преломляются. Если луч света идет не вдоль оптической оси, то после прохождения он изменяет свое направление, т.е. преломляется линзой.

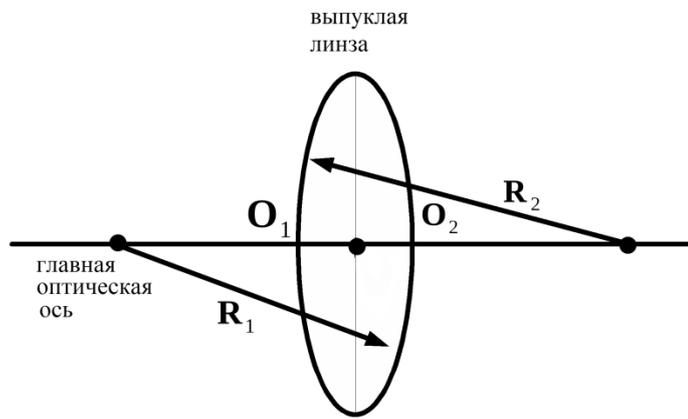


Рис. 1.1 Схематическое изображение линзы

Если на линзу падает параллельный пучок света и после прохождения он сходится в одной точке F , то линзу называют *собирающей* (рис. 1.2, а), а точку F - *действительным фокусом* линзы. Если же параллельный пучок света после прохождения линзы расходится так, что кажется исходящим из одной точки, то линза называется *рассеивающей*, а точка F - *мнимым фокусом* линзы (рис. 1.2, б).

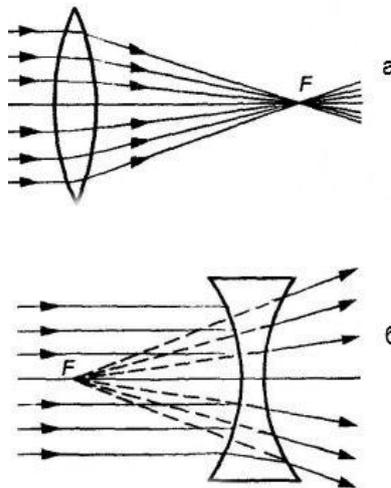


Рис.1.2 Линза: а- собирающая; б - рассеивающая

Если в фокус собирающей линзы поместить точечный источник света, то после прохождения линзы все лучи пойдут параллельно оптической оси линзы.

Фокус линзы, лежащий на главной оптической оси, называется *главным фокусом* линзы. Расстояние F от центра линзы до ее *главного фокуса* называется ее *фокусным расстоянием*.

Каждая линза имеет передний и задний (по ходу луча) фокусы. Если по обе стороны линзы одинаковая среда, то переднее и заднее фокусные расстояния линзы равны. Если же по обе стороны линзы разные среды (например, по разные стороны роговицы глаза находится воздух и водянистая влага) с показателями преломления n_1 и n_2 , то переднее F_1 и заднее F_2 фокусные расстояния будут отличаться примерно в (n_1/n_2) раз.

1.2 Оптическая сила линзы

Основной характеристикой и мерой преломляющего действия линзы служит ее **оптическая сила (D)** – величина, обратная фокусному расстоянию линзы. $D = \frac{1}{F}$

В СИ оптическая сила линзы измеряется в *диоптриях* (дптр), при этом фокусное расстояние должно измеряться в метрах:

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

1 диоптрия – это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м. У собирающих линз оптическая сила положительна, у рассеивающих – отрицательна. Оптическая сила зависит от показателей преломления вещества линзы и среды, окружающих линзу, а также радиусов кривизны ее поверхностей.

Связь оптической силы линзы с радиусами кривизны поверхностей линзы

Связь оптической силы линзы с радиусами кривизны поверхностей линзы (рис. 1.1) может быть определена по формуле:

$$D = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

где $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления линзы и окружающей среды; R_1 и R_2 – радиусы кривизны ее 1-й и 2-й (по ходу луча) поверхностей, которые считаются положительными, если их центры расположены справа (т.е. по ходу луча) от линзы, и отрицательными, если слева от нее.

1.3 Построение изображения в линзе

Чтобы получить изображение точки, создаваемое линзой, необходимо найти пересечение лучей, исходящих из этой точки, после их преломления. Для этого удобно использовать любую пару из следующих трех лучей (рис. 1.3):

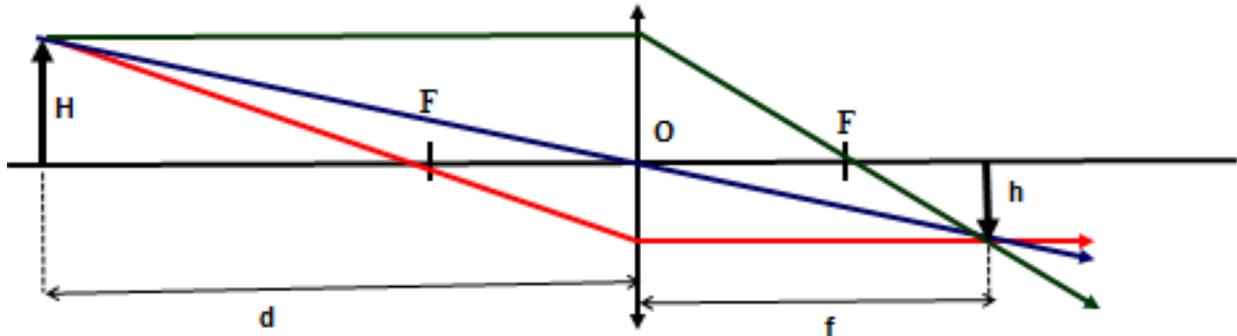


Рис. 1.3

а) луч, параллельный оптической оси, после преломления в линзе проходит через ее задний фокус;

б) луч, проходящий через передний главный фокус, после преломления идет параллельно главной оптической оси;

в) луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется, т.е. после преломления идет в том же направлении.

1.4. Формула линзы

Если предмет находится на расстоянии d , а его изображение на расстоянии f от линзы с фокусным расстоянием F (Рис. 1.3), то выполняется соотношение, называемое *формулой линзы*:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

Здесь фокусное расстояние F считается положительным для собирающих линз и отрицательным – для рассеивающих. Расстояние d от предмета до линзы всегда положительно, а расстояние f от линзы до изображения положительно для действительных изображений и отрицательно для мнимых.

Если предмет находится на бесконечности (т.е. удален на большое расстояние $d \rightarrow \infty$), то его изображение будет расположено в фокусе линзы ($f=F$), а по мере приближения предмета к линзе его изображение удаляется от линзы и $f>F$.

Собирающая линза может давать как действительные, так и мнимые изображения.

Действительные изображения предмета формируются в тех случаях, когда он расположен перед передним фокусом линзы, т.е. при $d > F$. При этом можно получить три вида действительных изображений: *уменьшенное* (если $d > 2F$), *равное* ($d = 2F$) и *увеличенное* ($F < d < 2F$). **Действительные изображения** всегда находятся по другую сторону линзы относительно предмета и **всегда перевернутые**.

2. Формирование изображения оптической системой глаза

2.1 Строение глаза

Зрение – это один из способов познавать окружающий мир и ориентироваться в пространстве. Несмотря на то что другие органы чувств тоже очень важны, с помощью глаз человек воспринимает около 90% всей информации, поступающей из окружающей среды.

Глаз — воспринимающий отдел зрительного анализатора, служащий для восприятия световых раздражений.

Строение глаза показано на рис. 2.1

Глазное яблоко имеет почти сферическую форму и окружено тремя оболочками.

1. **Склера** — достаточно прочная внешняя белковая оболочка, защищающая глаз от повреждений и придающая ему постоянную форму.
2. **Роговица** - передняя часть склеры, более выпуклая и прозрачная; действующая как собирающая линза с оптической силой +40 дптр. Склера обеспечивает до 75 % фокусирующей способности глаза. Ее толщина 0,6—1 мм, а показатель преломления $n=1,38$.
3. **Сосудистая оболочка** — с внутренней стороны склера выстлана сосудистой оболочкой. Это очень тонкая перепонка, содержащая кровеносные сосуды. В передней части она утолщается и принимает форму кольца. Здесь-то и прикрепляется радужная оболочка и ресничная мышца.
4. **Радужная оболочка** — в передней части сосудистая оболочка переходит в окрашенную радужную оболочку, цвет которой определяет цвет глаз.
5. **Зрачок** — круглое отверстие в радужной оболочке, пропускающее свет. Диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм. Радужная оболочка и зрачок играют роль диафрагмы, регулирующей поступление света внутрь глаза.
6. **Хрусталик** — природная эластичная двояковыпуклая линза диаметром 8-10 мм и оптической силой +20 дптр. Хрусталик имеет слоистую структуру с наибольшим показателем преломления $n = 1,41$; находится за радужной оболочкой. Хрусталик эластичен, он может менять свою кривизну с помощью специальной мышцы, благодаря чему обеспечивается фокусировка глаза на предметы, удаленные от него на разные расстояния.
7. **Кольцевая мышца** — мышца, которая охватывает хрусталик и может изменять кривизну его поверхностей. При сжатии кольцевой мышцы оптическая сила хрусталика увеличивается.
8. **Передняя камера** — камера с водянистой массой ($n = n_{\text{воды}}$), которая находится в передней части глаза между роговицей и хрусталиком.
9. **Зрительный нерв**, обеспечивающий передачу зрительной информации в мозг. Подходя к глазу, он разветвляется, образуя на задней стенке сосудистой оболочки

светочувствительный слой- сетчатку.

10. **Сетчатка** — светочувствительный слой, воспринимающий свет и преобразующий его в нервные импульсы. Сетчатка представляет собой разветвление зрительного нерва с нервными окончаниями в виде палочек и колбочек.

11. **Стекловидное тело** — студенистое вещество, заполняющее пространство между хрусталиком и сетчаткой (задняя глазная камера).

Желтое пятно (макула) — самая чувствительная область сетчатки, площадью около 3мм^2 . Человек видит ясно те предметы, изображение которых проецируется на желтое пятно.

13. **Центральная ямка** — наиболее чувствительная часть желтого пятна. Это область диаметром примерно полмиллиметра, в которой сетчатка углублена. Здесь палочки совсем отсутствуют, а концентрация колбочек максимальна.

14. **Слепое пятно** — расположено в том месте, где зрительный нерв входит в глаз. Здесь нет ни палочек, ни колбочек, и лучи, попадающие на эту область, не вызывают световых ощущений (отсюда и название «слепое пятно»).

15. **Конъюнктивa** — наружная оболочка глаза, выполняет барьерную и защитную роль.

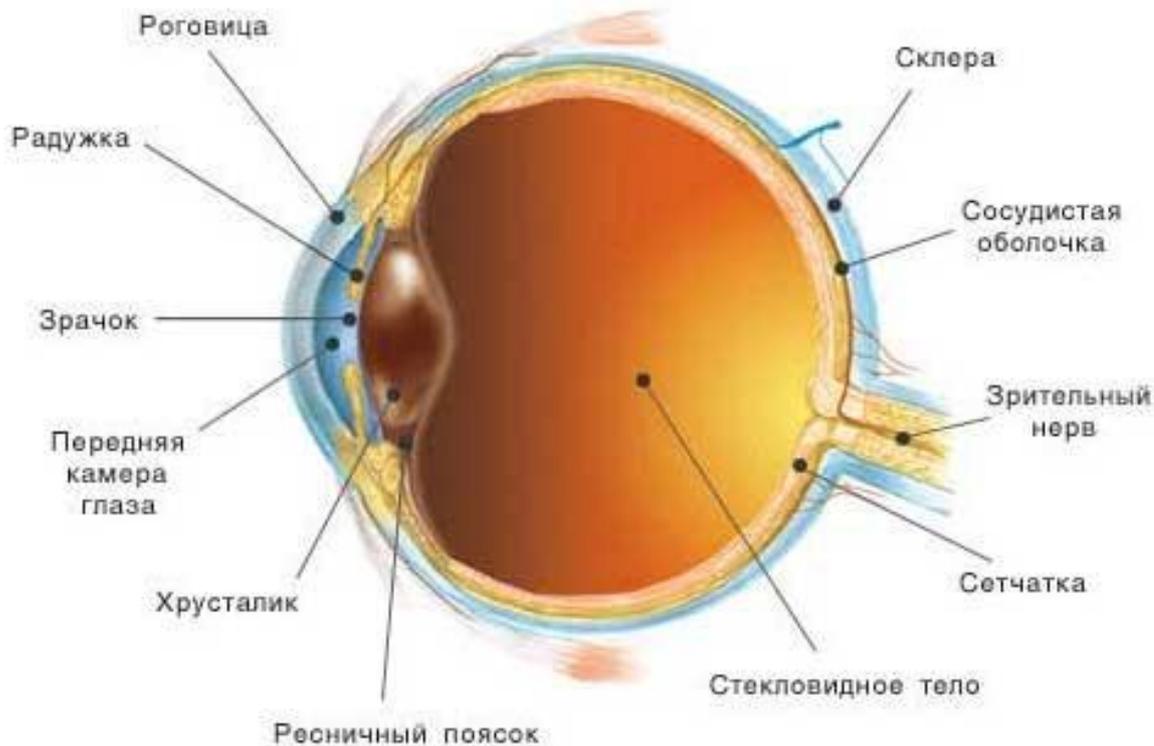


рис. 2.1

2.2 Оптическая система глаза, виды и характеристики библинз

Светопроводящий аппарат глаза образован роговицей, жидкостью передней камеры, хрусталиком и стекловидным телом. Первые три элемента подобны собирающим линзам, а последний - рассеивающей. Глаз — центрированная оптическая система, *главная оптическая ось* (00) которой проходит через центры роговицы, зрачка, хрусталика. **Оптическая сила глаза** складывается из оптических сил всех перечисленных элементов.

Преломляющие среды глаза

- $D_p = 40$ дптр
- $D_x = 20$ дптр
- $D_{пк+ст} = 3-5$ дптр

Среднее значение оптической силы глаза равно: $D_{гл} = 63-65$ дптр

При полностью расслабленной кольцевой мышце оптическая сила глаза - около +60 дптр, при максимальном напряжении кольцевой мышцы (рассматривании близких предметов) $D > 70$ дптр.

Таким образом, глаз приближенно можно рассматривать как тонкую линзу с переменной оптической силой в 60-70 дптр. Поскольку рассматриваемый предмет располагается, как правило, за двойным фокусным расстоянием, на сетчатке глаза получается *действительное, уменьшенное и перевернутое* изображение предмета.

2.3 Редуцированный глаз

Редуцированный глаз(рис. 2.1) — условная, сильно упрощенная оптическая система.

Наиболее точным является редуцированный глаз, предложенный В. К. Вербицким.

В редуцированном глазе только одна преломляющая поверхность—роговица, и весь глаз наполнен однородной средой с одним показателем преломления $n=1,4$.

Характеристика:

- радиус кривизны роговицы 6,8 мм;
- длина глаза 23,4 мм;
- радиус кривизны глаза 10,2 мм;
- фокус глаза 16мм;
- показатель преломления внутриглазной среды 1,4;
- общая преломляющая сила 63-65 дптр.
- внутриглазное давление $P=23-25$ мм.рт.ст.

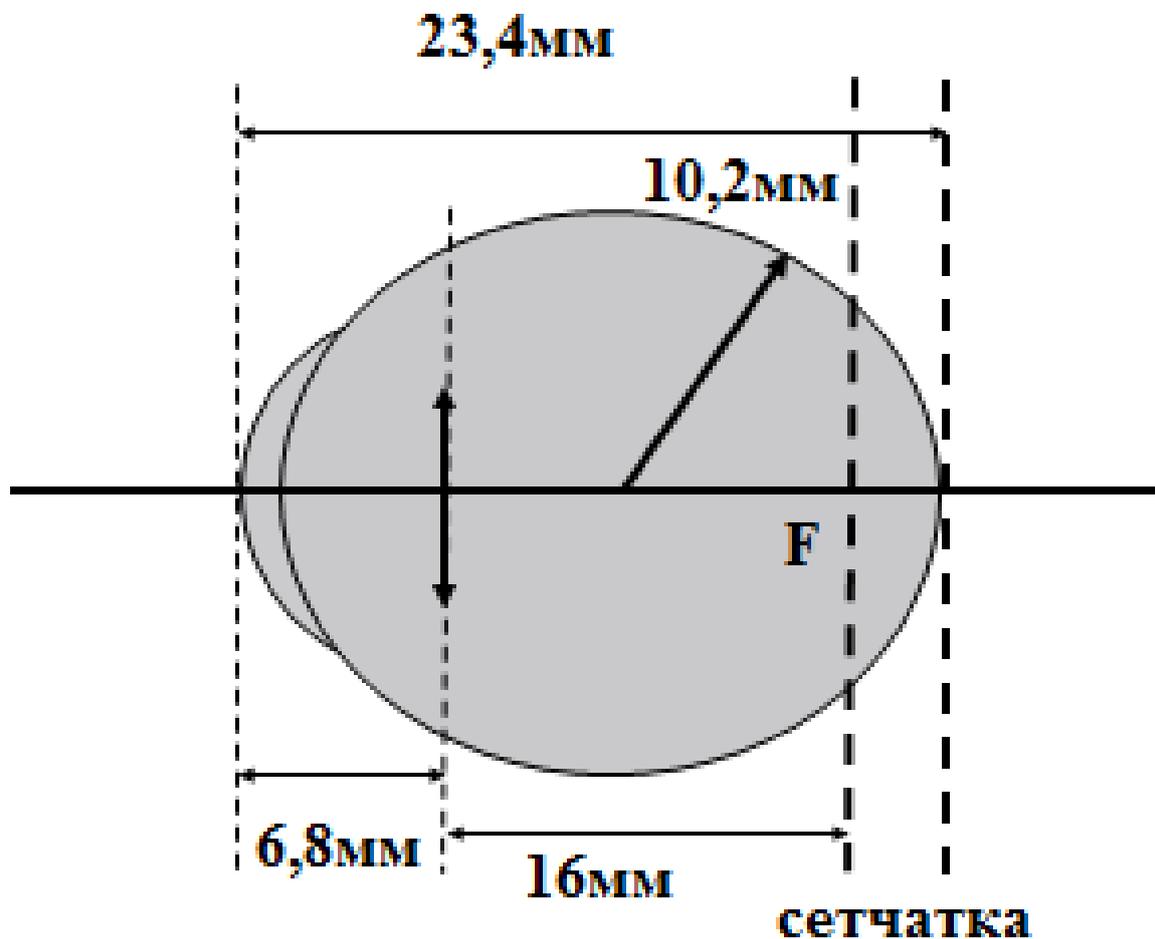


рис. 2.1

Хотя схема глаза по Вербицкому построена приближенно, с ее помощью можно производить расчеты с точностью, вполне достаточной для практических целей. Рассмотрим, как построить изображение предмета на сетчатке.

Построение изображения в глазу

Для получения изображения предмета высотой h в глазу достаточно провести два луча из конца этого предмета:

1. луч, параллельный оптической оси, после преломления в линзе проходит через ее задний фокус;
2. луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется, т.е. после преломления идет в том же направлении.

Пересечение этих лучей произойдет в т. B' . Восстановив перпендикуляр на оптическую ось, получим изображение этого предмета- h' на сетчатке глаза.

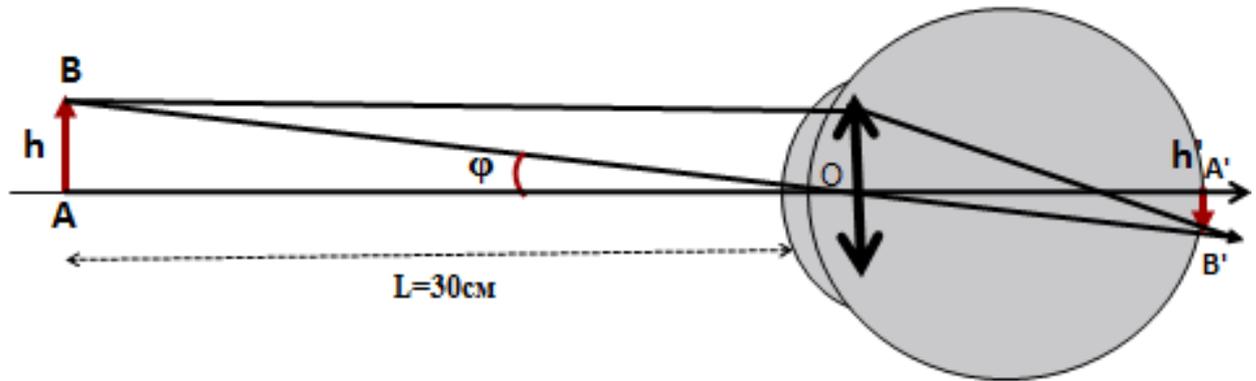


рис. 2.2 Угол зрения, построение изображения в глазу

2.4 Угол зрения, разрешающая способность, острота зрения

Угол зрения (φ)- это угол между лучами, идущими от крайних точек предмета через оптический центр глаза (рис. 2.2).

Разрешающая способность глаза — это величина, характеризующая его способность давать раздельное изображение двух близких друг к другу точек объекта.

Разрешающая способность глаза, т. е. способность раздельно видеть две точки, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга, называется *остротой зрения* и связана с раздельным и слитным восприятием светового изображения этих точек на сетчатой оболочке глаза. Если изображение точек попадает на два не рядом расположенных светочувствительных элемента: палочки и колбочки, - то они воспринимаются раздельно, т. е. разрешаются глазом, если изображения попадают на два соседних элемента, то они воспринимаются слитно, т. е. глазом не разрешаются.

Острота зрения характеризуется углом φ , под которым видны рассматриваемые точки A и B (рис. 2.2). Минимальный угол, необходимый для раздельного видения этих точек, φ_{min} составляет для среднего нормального глаза $1'$. Этот

соответствует расстоянию $A'B'$ между изображениями точек на сетчатке, равному примерно **5 мкм**.

Действительно, в центральной ямке желтого пятна сетчатки, куда обычно фокусируется изображение хорошо освещенного предмета, на отрезке длиной **5 мкм** сосредоточено в среднем **3 колбочки**, т. е. выполняется условие разрешения, приведенное выше, т. к. между двумя засвеченными колбочками, на которых формируются изображения точек, остается одна не засвеченная.

При отклонениях острота зрения во столько раз меньше нормы, во сколько раз наименьший угол зрения больше единицы.

В медицине острота зрения γ количественно оценивается отношением значения $\varphi_{min}=1'$ (что соответствует нормальному глазу) к φ_{min} , определяемому с помощью специальных таблиц для конкретного пациента:

$$\gamma = \frac{1'}{\varphi_{min}}$$

Например, если $\varphi_{min}=2'$, то острота зрения для такого пациента:

$$\gamma = \frac{1}{2} = 0,5.$$

Наименьшее расстояние AB между двумя точками предмета, видимое невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения L , называется **пределом разрешения глаза**. Для нормальной остроты зрения оно равно

$$AB = 70 \text{ мкм}.$$

Острота зрения – величина безразмерная. Она зависит от многих условий, прежде всего, от яркости фона. На остроту зрения также влияют диаметр зрачка, возраст человека, уровень цветового и яркостного контраста между рассматриваемым объектом и фоном.

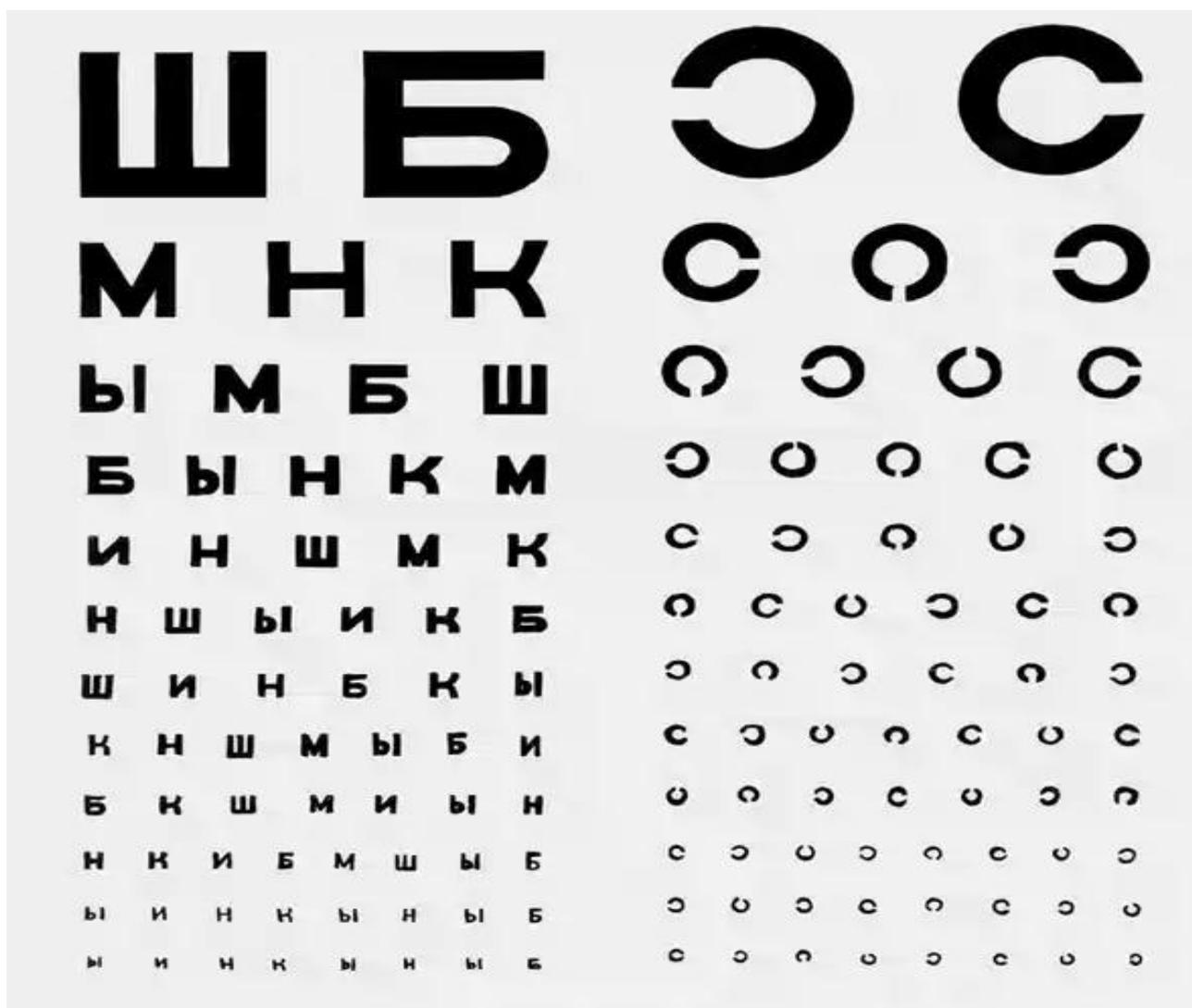
При нормальном освещении острота зрения максимальна, когда изображение предмета попадает на центральную ямку сетчатки, где плотность колбочек

наибольшая. В сумерках острота зрения максимальна при попадании света на тот участок сетчатки, где наибольшая плотность палочек, т. е. под углом 20° от центральной ямки.

Таблицы Сивцева для определения остроты зрения

Таблицы помещены в осветительный аппарат с лампой накаливания или двумя люминесцентными лампами. Освещенность таблиц 700 лк. Осветитель укрепляют на стене так, чтобы нижний край его находился на расстоянии 120 см от пола. Во время исследования больной должен держать голову прямо, веки обоих глаз открыты. Не исследуемый глаз прикрывают непрозрачным щитком белого цвета. В течение 2 — 3 с. показывают знак на таблице и просят исследуемого назвать его. Определение лучше начинать с мелких знаков, а затем переходить к более крупным.

В таблицах для определения остроты зрения (таблицы Сивцова) буквы и кольца с разрывами (кольца Ландольта), составляющие третью строку снизу, имеют разрывы, края которых образуют с оптическим центром глаза угол в $1'$, если таблица расположена на расстоянии 5 м от глаза. Следовательно, острота зрения человека, различающего буквы и кольца этой строки, равна 1. Поделенный на десять номер строки, которую испытуемый распознает еще безошибочно, является остротой зрения. Например, $\gamma = 0,3$, если испытуемый без ошибок читает третью строку таблицы. Здесь определяется способность распознавать *нечеткие* (несфокусированные) изображения. Норме соответствует чтение *десятой* строки. Естественно встречаются люди, способные различать более мелкие предметы, например, буквы и кольца второй и даже первой строки таблицы Сивцова. У столь зорких людей острота зрения выше среднестатистической нормы, но не потому что их глаз строит более крупное изображение на сетчатке. Просто в центральной ямке сетчатки такого человека колбочки расположены более плотно, чем у большинства людей, что и позволяет воспринимать изображение предметов, имеющих угловые размеры меньше $1'$.



Знаки для определения остроты зрения у детей

Для определения остроты зрения у детей дошкольного возраста обычно пользуются таблицами (Алейниковой или Орловой) с картинками. Целесообразно до исследования подвести ребенка к таблице и попросить назвать изображенные на ней предметы, чтобы он мог понять, что от него потребуют. Следует учитывать, что во время исследования дети быстро устают. Поэтому лучше, начав с верхнего ряда таблицы, показывать ребенку в каждом ряду только по одной картинке. Если он не сможет назвать ее, то указывают все остальные картинки данного ряда, затем выше расположенного ряда и т. д., пока не будет правильно названо подавляющее число картинок в одном ряду. Этот ряд и определит остроту зрения у обследуемого ребенка.



Аккомодация

Аккомодация – способность глаза четко видеть предметы, находящиеся от него на различных расстояниях. К глазу (с некоторыми ограничениями) применима формула линзы: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$

Действительное изображение предмета, даваемое светопроводящим аппаратом глаза, проецируется на сетчатку, которая играет роль экрана.

Если рассматриваемый предмет находится на достаточно большом расстоянии ($d \rightarrow \infty$), то $\frac{1}{d} \rightarrow 0$ и, как следует из формулы, $F=f$, т.е. удаленные предметы проецируются непосредственно на сетчатку. При рассмотрении более близких предметов $\frac{1}{d} \neq 0$ плоскость их изображения перемещается за сетчатку, и изображение на сетчатке теряет резкость. Удержание четкого изображения на сетчатке возможно только путем увеличения оптической силы глаза **D**.

Процесс «наводки на резкость» называется *аккомодацией*.

Аккомодация осуществляется благодаря сокращению специальных цилиарных мышц – хрусталик увеличивает свою кривизну (в основном за счет передней поверхности), (радиус при этом уменьшается), увеличивая тем самым оптическую силу в соответствии с формулой:

$$D = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

и его оптическая сила может возрасть на 12-13 диоптрий. При расслаблении цилиарных мышц хрусталик наоборот принимает свою прежнюю более плоскую форму, и его оптическая сила уменьшается.

Так как изменение кривизны хрусталика может происходить только в определенных пределах, для всякого глаза существуют границы расположения предмета, в пределах которых глаз может его отчетливо видеть – *дальняя и ближняя точки аккомодации* (четкого видения).

В ненапряженном состоянии нормальный глаз аккомодирован на рассмотрение бесконечно удаленных предметов, т.е. дальняя точка ясного видения **R** для нормального глаза находится в бесконечности. При этом в глаз попадает параллельный пучок лучей, который после преломления фокусируется точно на его сетчатке. С приближением предмета к глазу увеличиваются размеры изображения предмета на сетчатке, что позволяет лучше видеть его мелкие детали. Однако при этом повышается напряжение мышцы, деформирующей хрусталик, и она быстрее утомляется. Расстояние, до которого приближение предмета к глазу совершается без значительного напряжения аккомодации, называется *расстоянием наилучшего зрения L*.

У близорукого глаза расстояние наилучшего зрения меньше 25 см, а у дальнозоркого больше.

При наибольшем напряжении аккомодации глаз четко фокусирует на сетчатке некоторую точку **P**, которая лежит от него на расстоянии примерно 7 см и называется *ближней точкой аккомодации*.

У некоторых животных, например у рыб, шарообразный хрусталик не изменяет своей кривизны, а перемещается под действием мышц вперед или вглубь глазного яблока, подобно объективу фотоаппарата.

Бинокулярное зрение

Два глаза — это два одинаковых органа зрения, расположенные на некотором расстоянии друг от друга и формирующие единый зрительный образ предмета. Способность к формированию единого образа из двух изображений называется **бинокулярным зрением** (*bini* — по два, *oculus* — глаз).

Основное назначение бинокулярного зрения - формирование **трехмерного** образа предмета. Благодаря бинокулярному зрению мы ощущаем три измерения: ширину, высоту, глубину; отличаем предметы близкие от далеких. Один глаз воспринимать глубину и разницу в расстояниях **неспособен**.

Механизм восприятия разницы в расстояниях заключается в следующем. Когда мы фокусируем взгляд на какой-либо точке, глазные яблоки поворачиваются так, чтобы на нее были направлены зрительные оси обоих глаз (рис. 3). Чем ближе находится точка, тем больше угол сведения осей и тем больше напряжение глазных мышц.

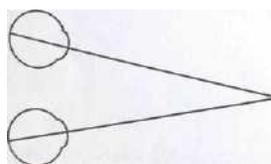


рис. 3а

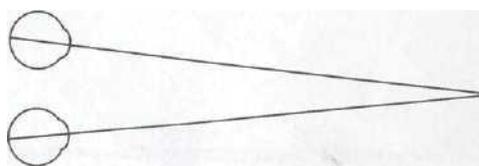


рис. 3б

рис. 3. Сведение зрительных осей на близкой (а) и далёкой (б) точках.

Величина этого напряжения и является тем признаком, по которому мозг оценивает удаленность предметов, особенно не знакомых нам.

Оба глаза человека работают как согласованная система, формируя единый зрительный образ видимого предмета. Способность создавать такой образ из изображений, формирующихся в двух глазах, называется *бинокулярным* зрением.

2.4 Недостатки оптической системы глаза и физические основы их исправления

К самым распространенным дефектам зрения относятся близорукость (миопия) и дальновзоркость (гиперметропия), связанные с излишней или недостаточной выпуклостью хрусталика.

Нормальный глаз (рис. 2.6) при покое аккомодации фокусирует изображение удаленных предметов на сетчатке — такой глаз называется *эмметропическим*, а если это условие не выполняется — *амметропическим*.

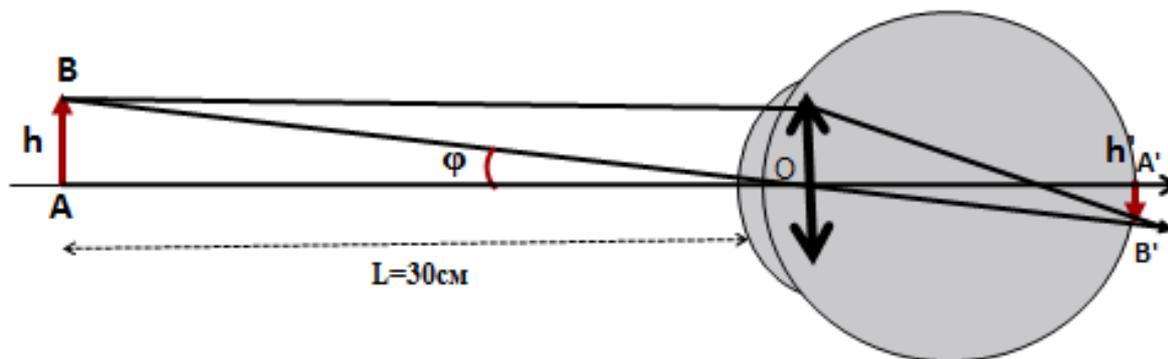


Рис.2.6. Глаз эмметропический;

Термин «амметропия» означает несоизмерное зрение. Помимо отклонения от нормы оптической силы глаза, амметропия обусловлена длиной глазного яблока. Наиболее распространенными видами амметропии являются близорукость (миопия) и дальновзоркость (гиперметропия).

1. Близорукость

При близорукости преломляющая сила глаза избыточна, поэтому лучи от далекого предмета фокусируются не на сетчатке, а перед ней и дальше расходятся, образуя размытое пятно (рис.2.7). Близорукость может являться следствием удлиненной формы глазного яблока или избыточной преломляющей способностью основных сред глаза. Такой глаз не может четко видеть удаленные

предметы. Даже при небольшой степени миопии **дальний предел аккомодации** уменьшается до нескольких десятков сантиметров (у нормального глаза он равен бесконечности). Ближний предел аккомодации при этом также уменьшается. Близорукий человек выполняет тонкую работу лучше, чем человек с нормальным зрением.

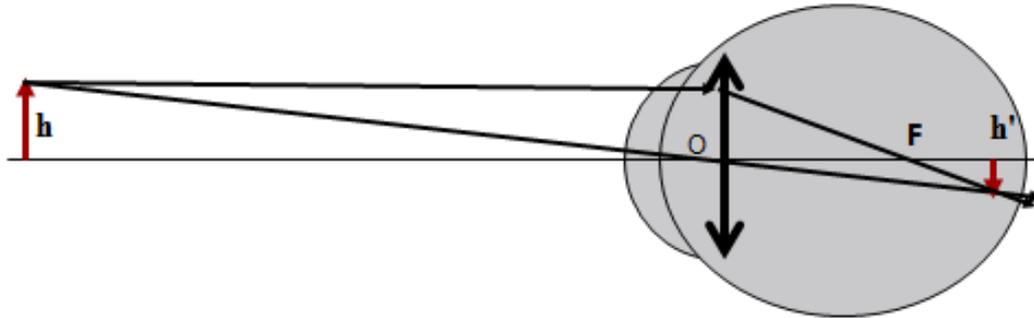


Рис.2.7. Глаз близорукий

Коррекция близорукости

Для коррекции близорукости применяют очки с рассеивающими линзами. (рис.2.7, а).

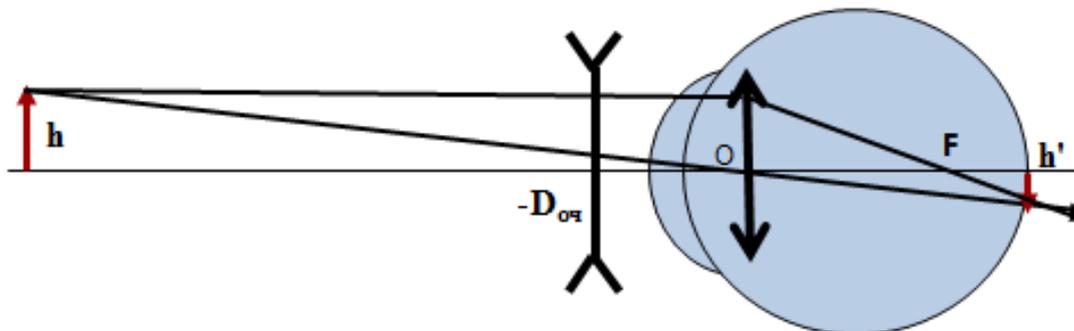


рис.2.7, а Коррекция близорукости

При этом результирующая оптическая сила уменьшается: $D_p = D_{\text{гл}} - D_{\text{оч}}$, фокусное расстояние F при этом увеличивается, изображение сдвигается на сетчатку и изображение предметов становится чётким.

2. Дальнозоркость

Дальнозоркость связана с недостаточной преломляющей способностью глаза или с укороченной формой глазного яблока (рис.2.8).

Вследствие этого лучи от далекого предмета фокусируются за сетчаткой.

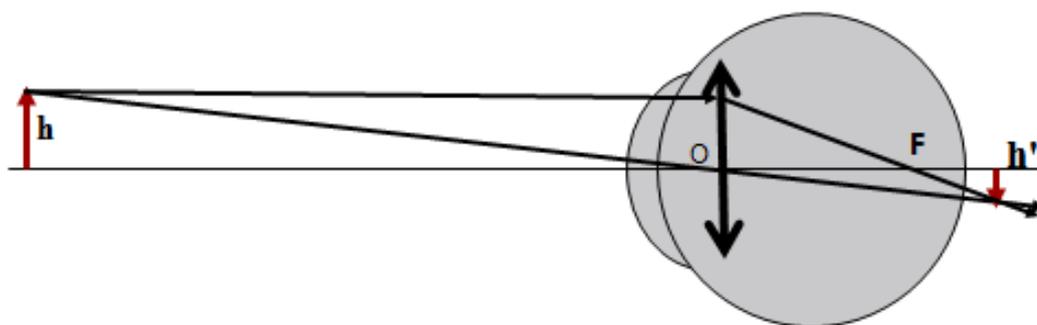


Рис.2.8 Глаз дальнозоркий

Человек, глаза которого дальнозорки, в покое аккомодации не видит ясно ни близких, ни далеких предметов. Ему приходится постоянно напрягать аккомодационный аппарат. Недостаток преломляющей силы может компенсироваться изменением формы и усилением преломления в хрусталике при помощи особой внутриглазной мышцы, напряжение которой должно быть тем сильнее, чем ближе находится рассматриваемый объект. При достаточной силе мышцы глаз справляется с усилением преломления и вдаль, и вблизи, однако при ослаблении мышцы, а также с возрастом (уплотнение и повышение ригидности хрусталика) напряжение мышцы становится недостаточным, и происходит ухудшение зрения (сначала вблизи, а затем и вдаль).

Коррекция дальнозоркости

Для коррекции дальнозоркости в очках применяют собирающие линзы (рис.2.8, а), при этом результирующая оптическая сила увеличивается: $D_p = D_{\text{гл}} + D_{\text{оч}}$, фокусное расстояние F при этом уменьшается, изображение сдвигается на сетчатку.

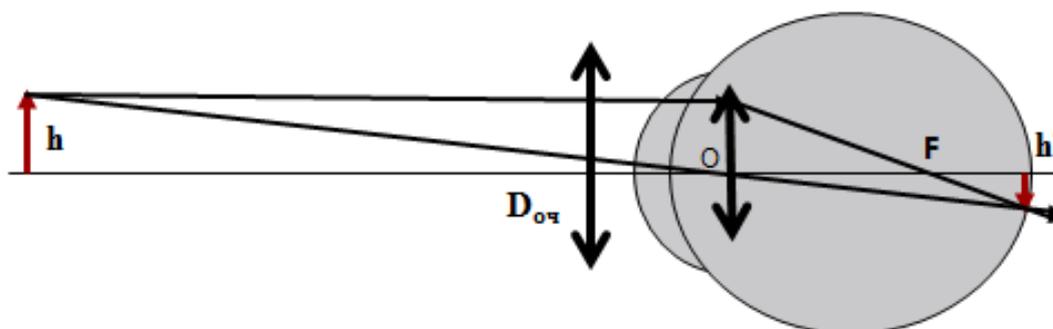


рис.2.8, а Коррекция дальнозоркости

Линзы уменьшают фокус глаза и делают изображение предметов на сетчатке резким.

Дефекты зрения различаются не только по виду, но и по степени. Чем дальше находится фокус от сетчатки, тем выше степень амметропии.

Очки или контактные линзы лишь *компенсируют* близорукость и дальнозоркость. *Лечение* этих недостатков зрения возможно только хирургическим путем. В настоящее время достаточно хорошо отработана методика лечения путем коррекции формы роговицы с помощью лазерного луча. При этом, например, избыточность оптической силы хрусталика (миопия) компенсируют путем уменьшений кривизны роговицы.

3. Биофизические основы зрительной рецепции

3.1 Морфо-функциональные слои сетчатки глаза

Сетчатка (retina) - это истинная ткань мозга, выдвинутая на периферию.

В функциональном отношении в оптической части сетчатки различают два слоя:

1. Наружный световоспринимающий, представленный палочками и колбочками.

2. Внутренний светопроводящий или мозговой слой (биполярные, ганглиозные и другие клетки).

Световоспринимающим (рецепторным) аппаратом глаза является сетчатка, в которой находятся светочувствительные зрительные клетки. Сетчатка — это часть мозга, отделившаяся от него на ранних стадиях развития, но все еще связанная с ним посредством пучка волокон - зрительного нерва. Она имеет форму пластинки толщиной приблизительно в четверть миллиметра.

Светочувствительными элементами в сетчатке являются палочки и колбочки. В центральной части желтого пятна имеется углубление, называемое *центральной ямкой*. Желтое пятно и в особенности центральная ямка являются наиболее чувствительными местами сетчатки (при дневном зрении), в них достигается

наибольшая острота зрения, и лучше всего различаются цвета. Поэтому при рассмотрении предмета человек непроизвольно старается расположить глаз таким образом, чтобы изображение рассматриваемого объекта попадало в область желтого пятна. При этом детали предмета различаются наиболее отчетливо.

Направление наибольшей чувствительности глаза определяет его **зрительная ось** (O'O'), которая проходит через центры роговицы и желтого пятна. В направлении этой оси глаз имеет наилучшую разрешающую способность. Различают также *главную оптическую ось*, проходящую через геометрические центры роговицы, зрачка и хрусталика. Угол между оптической и зрительной осью составляет 5° (рис. 3.1).

Глазодвигательный аппарат включает наружные мышцы глаза – по 6 мышц на каждый глаз, благодаря согласованной работе которых глаз постоянно совершает поисковые движения и при появлении в поле зрения объекта совершает поворот таким образом, чтобы изображение этого объекта попадало на центральную ямку.

Место вхождения зрительного нерва в глазное яблоко называется *слепым пятном*, т.к. здесь нет ни палочек, ни колбочек.

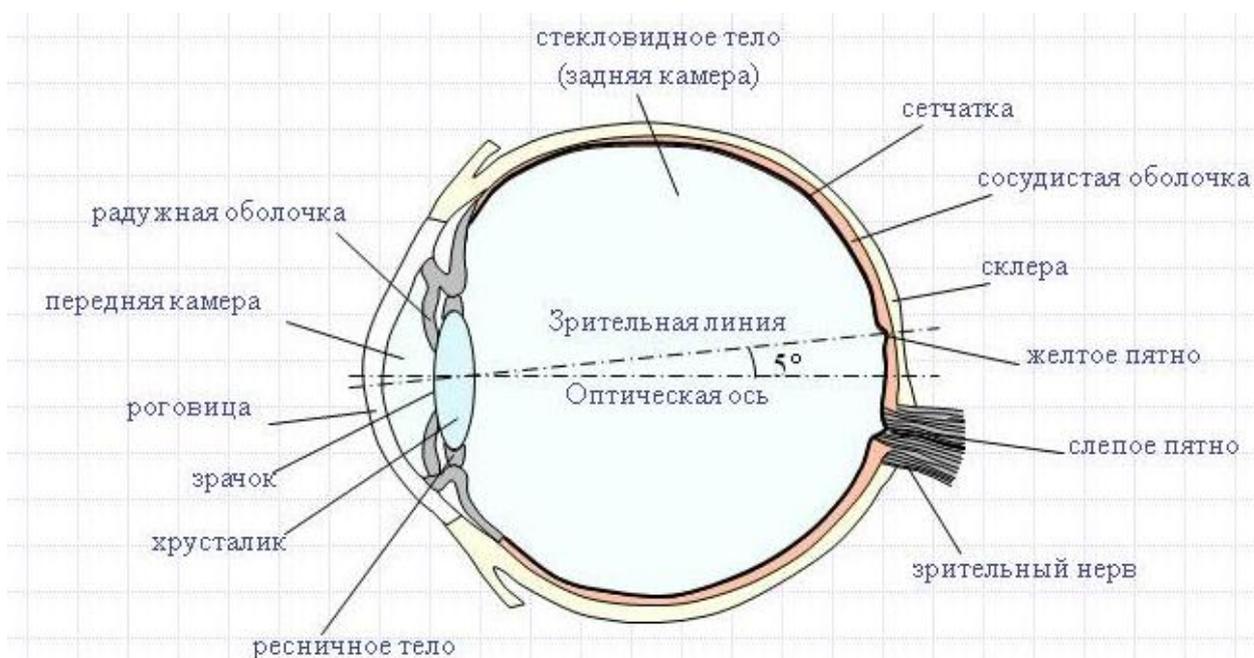


Рис.3.1

Строение сетчатки

Строение сетчатки человека достаточно сложно (рис. 3.2.). Обычно в ней различают десять слоев, причем светочувствительные клетки находятся в самом внутреннем ее слое. Рассмотрим основные слои сетчатки.

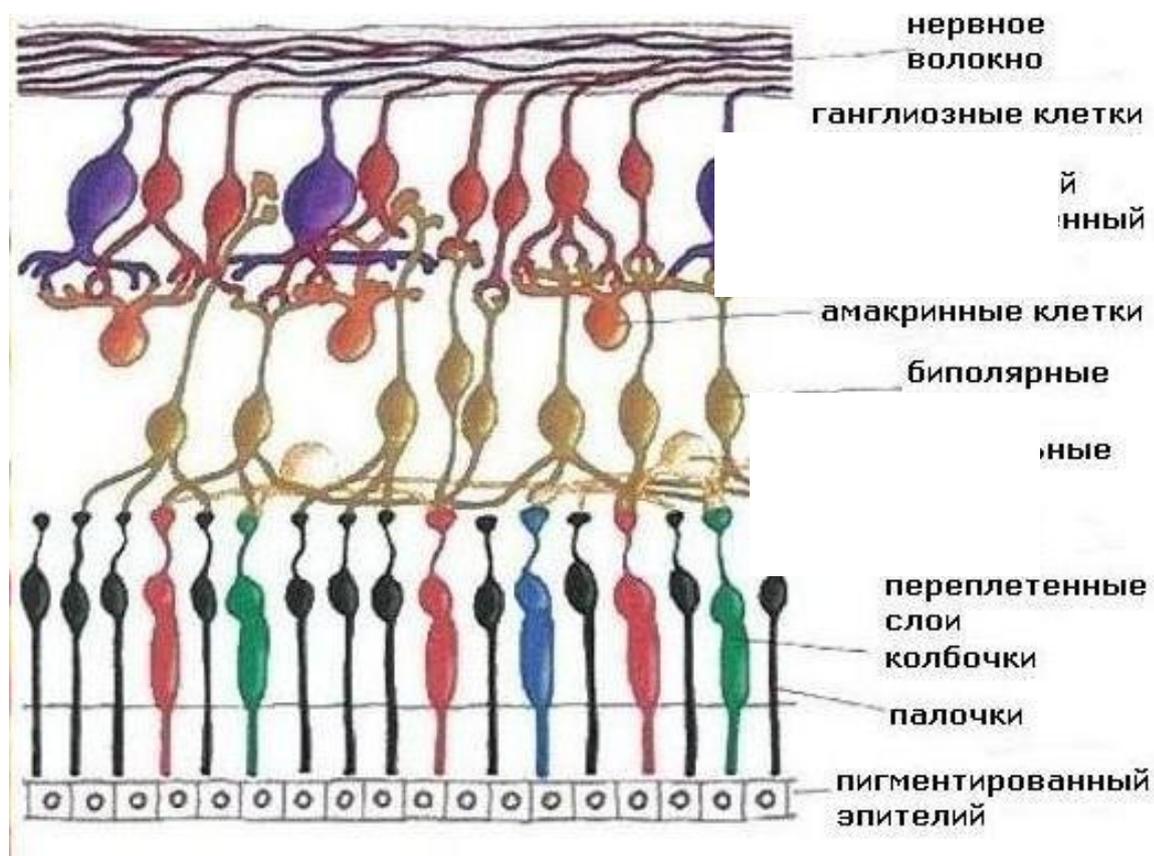


Рис.3.2 Строение сетчатки

1. Слой светочувствительных клеток граничит с **пигментным эпителием**, который поглощает остатки света, избавляя сетчатку от засветки лишним рассеянным светом.

- Клетки пигментного эпителия имеют форму шестигранной призмы и расположены в один ряд.
- В них содержится пигмент фусцин.

- Пигментный эпителий поглощает и трансформирует лучи света, устраняя его диффузное рассеивание внутри глаза.

2. Слой палочек и колбочек

- Палочки (125 млн.) расположены по всей поверхности сетчатки, при чем на периферии их концентрация выше, чем в центральной части. Палочки не различают цветов, но обладают очень высокой чувствительностью в условиях слабой освещенности (сумеречное зрение).
- Колбочки (около 6,5 млн.) отвечают за цветное (дневное) зрение, они концентрируются в центральной части сетчатки, особенно много их в желтом пятне и вокруг него.
- Внутренние членики палочек и колбочек переходят непосредственно в нервное волокно, по ходу которого располагаются ядра зрительных клеток, составляющие наружный ядерный слой. Нервное волокно заканчивается синапсом, обеспечивающим функциональную связь с биполярными клетками.

3. Внутренний ядерный слой -это биполярные клетки, которые содержат ядро и два отростка.

- Здесь находятся амакриновые клетки, горизонтальные ядра мюллеровых волокон.
- Биполяры объединяют от 1 до 30 колбочек или до 500 палочек.

4. Слой ганглиозных клеток образован крупными клетками с двухконтурным ядром и большим ядрышком.

- Ганглиозная клетка вступает в контакт с группой биполяров, а один биполяр - с гроздьями палочек и колбочек.
- Свет, прежде чем попасть на светочувствительные элементы палочки и колбочки, должен пройти через слой ганглиозных нейронов, которые одновременно являются дополнительным светофильтром, отсекающим губительную для тканей и рецепторов УФ область спектра.

5. **Зрительный нерв** (п. opticus) обеспечивает передачу нервных импульсов, вызванных световым раздражением, от сетчатки к зрительному центру в коре затылочной доли мозга.

- Зрительный нерв имеет форму округлого тяжа и состоит приблизительно из 1 млн. волокон.
- Слой нервных волокон состоит из осевых цилиндров ганглиозных клеток, которые образуют зрительный нерв.

Строение палочки

Палочка представляет собой правильное цилиндрическое образование длиной от 40-60 микрон, делится на два сегмента: наружный, имеющий цилиндрическую форму и внутренний, имеющий слегка вздутую форму (рис. 3.3). Палочки и колбочки ориентированы к свету своими внутренними сегментами, не содержащими зрительного пигмента, а поглощение света, приводящее к возникновению нервных импульсов, начинается в наружных сегментах рецепторов. Однако это не снижает чувствительности глаза к свету, т. к. внутренние структуры сетчатки прозрачны для видимого света.

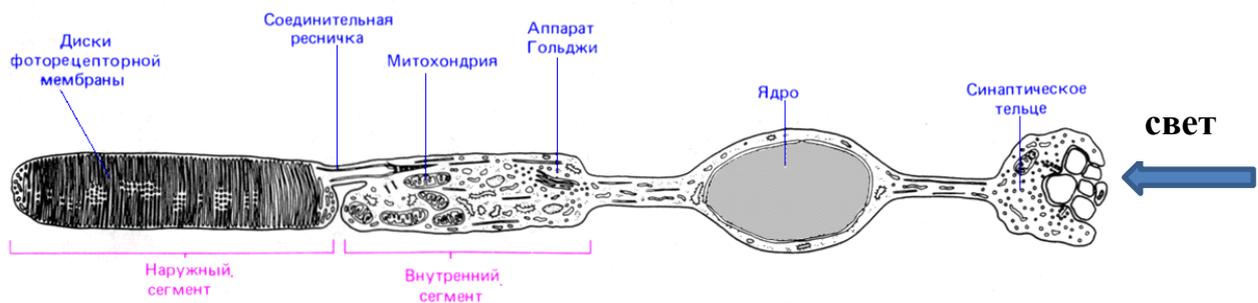


Рис.3.3 Строение палочки

- За поглощение квантов света отвечает зрительный пигмент палочек — родопсин.
- Родопсин состоит из ретиналя (альдегида витамина А1) и гликопротеида (опсина).

- Родопсин сосредоточен в наружных сегментах палочек и встроен в зрительные диски фоторецепторной мембраны (рис 3.4).
- Диски представляют собой «сплюснутые» шарики, образованные бислоем липидов.
- Число дисков в наружном сегменте палочек достигает 1000, а диаметр наружного сегмента примерно равен 2 мкм.
- Диаметр рецепторов определяет остроту зрения.
- Наружный сегмент палочки соединен с остальной клеткой тонкой соединительной ножкой.

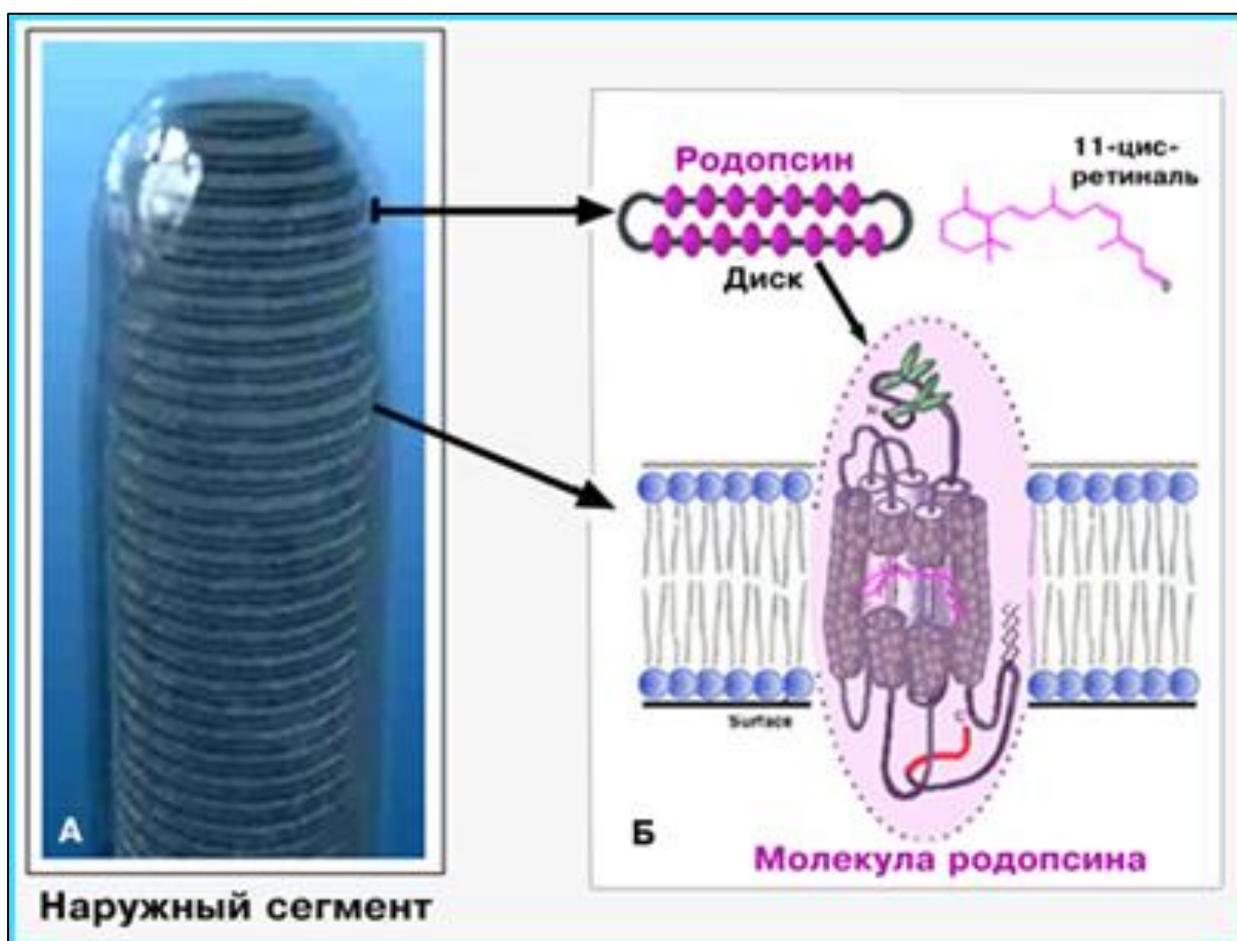


рис3.4

3.3 Первичные механизмы свето- и цветовосприятия

Каким же образом энергия поглощенного родопсином света превращается в нервный импульс?

Единственной фотохимической реакцией, которая приводит к появлению ощущения света в зрительном рецепторе, является фотоизомеризация ретиналя. При поглощении светового кванта, происходит разрыв родопсина на опсин и трансретиналь, протекающий через ряд промежуточных стадий.

Развивается рецепторный потенциал. В темноте он составляет от -25 до -40 мВ.

Поглощение света родопсином дает начало процессу, в результате которого получается нервный импульс. После того как этот этап преобразования завершен, электрическим импульсам предстоит проделать путь к мозгу через цепочку промежуточных нейронов. Сначала реакции палочек и колбочек передаются биполярным клеткам, а от них — к другим нейронам, которые называются ганглиозными клетками. Длинные аксоны ганглиозных клеток тянутся от глаза к мозгу, образуя зрительный нерв.

Таким образом сетчатка выполняет важную функцию глаза, т.е. преобразовывает световой импульс в нервное возбуждение, производит первичную обработку сигнала и направляет его в мозг.

Зрительный пигмент родопсин, распадающийся под действием света на опсин и ретиналь, может затем опять восстанавливаться

Этот процесс может осуществляться и на свету, и в темноте.

Абсолютный порог чувствительности глаза человека соответствует примерно 60–150 квантам сине-зеленого света. При этом из них только 5–15 квантов поглощаются непосредственно молекулами зрительного пигмента, остальные рассеиваются или поглощаются другими структурами сетчатки. Все кванты света, достигающие сетчатки при пороговой интенсивности, поглощаются отдельными палочками, которые обладают гораздо большей чувствительностью к свету, чем колбочки.

Поскольку чувствительность палочек к свету значительно выше, чем колбочек, то в темноте слабые световые стимулы лучше различаются не центральной ямкой, а окружающей ее частью сетчатки.

При повышении же освещенности скорость распада родопсина быстро растет, а его концентрация и чувствительность глаза к свету быстро уменьшаются (*световая адаптация*). Световая адаптация протекает намного быстрее темновой, т.

к. при большой интенсивности освещения распад родопсина в палочках идет очень интенсивно и его концентрация резко снижается. В этих условиях палочки «слепнут», и в процессе зрения участвуют почти исключительно колбочки. Таким образом, в зависимости от освещенности зрение «переключается» с колбочковой системы на палочковую. Дневное зрение характеризуется высокой остротой зрения и хорошим восприятием цвета, т. к. колбочки способны различать цвета, а палочки этой способностью практически не обладают.

Кроме перехода от колбочкового зрения к палочковому и наоборот и изменения концентрации родопсина следует отметить еще один механизм адаптации — изменение диаметра зрачка (от 2 до 8 мм, т. е. в 4 раза), из-за чего освещенность сетчатки может измениться быстро ($<0,3$ с), но не более, чем в 16 раз. Также следует отметить увеличение чувствительности мозговых центров зрения.

Таким образом, *адаптация* — это перестройка зрительной системы для наилучшего приспособления к данному уровню яркости.

3.4 Цветовое зрение

Цветовое зрение - способность зрительного анализатора реагировать на изменения длины световой волны с формированием ощущения цвета. Определенной длине волны электромагнитного излучения соответствует ощущение определенного цвета.

Чувствительность глаза к излучениям разных длин волн видимого диапазона характеризуется *кривой видности* (рис. 3.5). Здесь μ – *относительная видность* – безразмерная величина, характеризующая чувствительность глаза к свету разных длин волн.

Суммарная кривая спектральной чувствительности для случая яркого освещения, т.е. цветного зрения имеет максимум в желто-зеленой части спектра при $\lambda = 555$ нм, условно принимаемый за единицу.

При сумеречном зрении, когда работает только палочковый аппарат, максимум кривой видности смещается в сторону коротких волн с максимумом около 500 нм. Поскольку колбочки уже «не работают», то в сумер-

ках изменяется и цветовосприятие, поэтому «ночью все кошки серы».

Так как палочки чувствительны в основном к сине-голубой области спектра, красный цвет ($\lambda = 630\text{--}760\text{ мкм}$) при низких уровнях освещенности будет выглядеть практически черным или темно-серым.

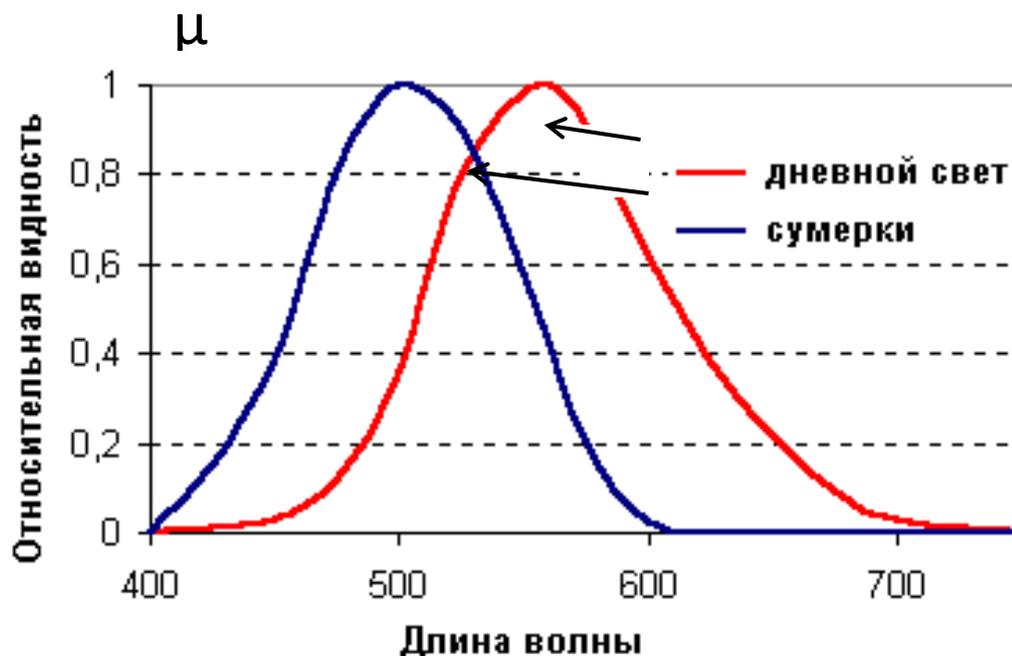


Рис. 3.5 Кривая видимости

Пигмент колбочек содержит тот же самый 11-цис-ретиналь, как и родопсин, но белковая часть пигментов отличается, поэтому пигмент колбочек называется **йодопсин**. Причем в сетчатке имеется 3 типа колбочек, которым отвечают три вида йодопсина в них. Они отличаются друг от друга строением белка-матрицы, в который встроена хромофорная группа 11-цис-ретиналь. Имеется три типа колбочек с максимумами поглощения на **440, 540 и 590 нм** (рис. 3.6), условно их называют красными, синими и зелеными. Монохроматический свет возбуждает один (иногда два) вида колбочек, а свет сложного спектрального состава — все три типа колбочек, но в различной степени, в зависимости от формы этого спектра, что и приводит в конечном итоге к возникновению цветового ощущения.

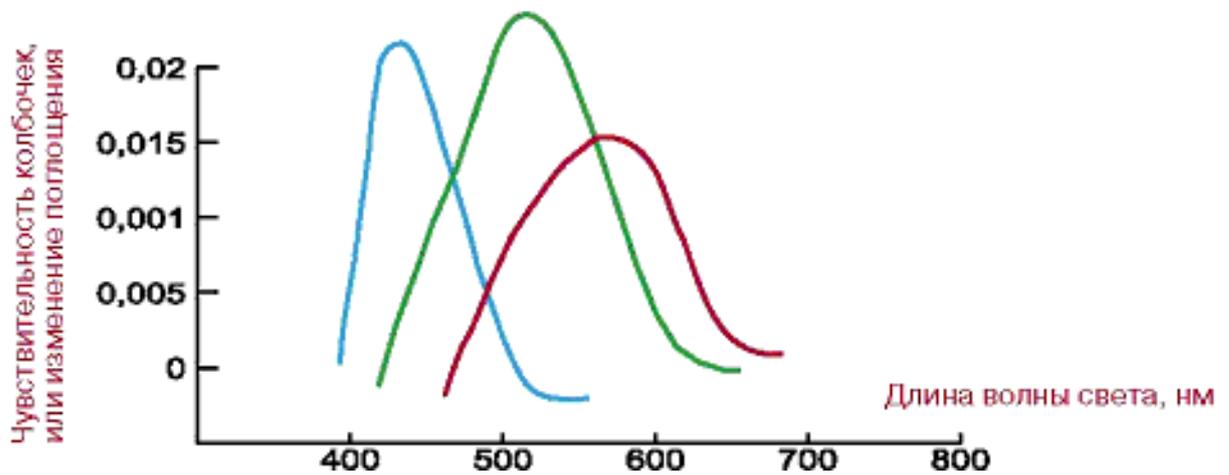


Рис. 3.6 Максимумы поглощения для трех типов колбочек.

Отсутствие в сетчатке одного или двух видов колбочек ведет к потере глазом способности правильно различать цвета (дальтонизм).

Область, доступная зрительному восприятию глаза, не обрывается резко на волнах, длиной 400 и 760 нм. В условиях темновой адаптации глаз может видеть в очень слабой степени интенсивные инфракрасные лучи с длинами волн до 950, а ультрафиолетовые — до 300 нм.

Границы видимой области, а так же сама форма кривой видности человеческого глаза не случайны. Глаз сформировался в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещения земных предметов солнечным светом, а также к условиям сумеречного и ночного освещения.

В природе постоянно встречаются объекты одинаковой яркости, которые глаз, тем не менее, хорошо отличает друг от друга. Они отличаются длиной волны отраженного от них света, и мы воспринимаем их поверхность как разноцветную (например, зеленый лист и красная роза). Зрение базируется на восприятии как контрастов светлого и темного, так и цветовых контрастов. Именно за счет последнего мы различаем объекты, между которыми нет яркостного контраста.

Цвет — одно из свойств объектов материального мира, воспринимаемое как зрительное ощущение. Под восприятием света понимают способность дифференцировать различные длины волн и их композиции. Если свет,

попадающий на сетчатку глаза, имеет примерно одинаковое распределение интенсивностей по длинам волн, то он воспринимается как белый или серый (в зависимости от яркости). Если же распределение интенсивности света по спектру неоднородно, то мы воспринимаем его как определенный цвет.

Цвет характеризуется такими свойствами, как цветовой тон (длина волны), яркость и насыщенность, которые могут быть измерены соответствующими инструментами.

Любые три по-разному окрашенных пучка света могут образовать любой цвет, если их смешать в разной пропорции (рис. 3.7):

$$C = rR + gG + bB,$$

где r – количество цвета R ; g – количество цвета G ; b – количество цвета B (в некоторых случаях необходимо брать отрицательные коэффициенты).

При этом если при смешении трех цветов один непрерывно изменяется, а другие остаются постоянными, то и результирующий цвет будет меняться непрерывно.

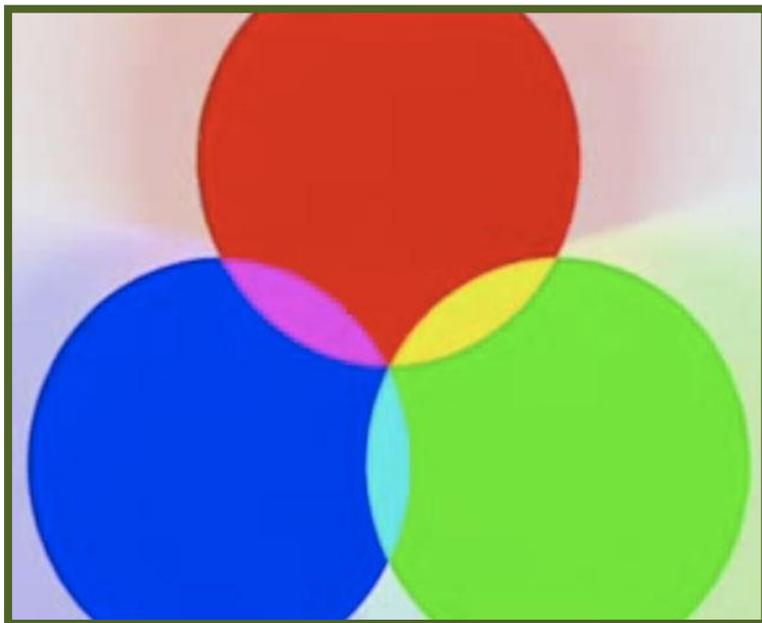


рис. 3.7

Таким образом, любой цвет может быть получен смешением трех разных цветов. Цвета считаются основными, если ни один из них нельзя получить смешением двух других. Вообще говоря, можно создать много вариантов трех основных цветов. Но чаще всего в качестве основных цветов берут *зеленый, синий и красный*.

В общем случае восприятие цвета предмета обусловлено следующими факторами: его окраской и свойствами его поверхности; оптическими свойствами

источников света (их яркостью и спектром) и среды, через которую свет распространяется; свойствами зрительного анализатора человека.

Контрольные вопросы

1. Что изучает оптика?
2. Дать определение света.
3. Дать определение геометрической оптики.
4. Дать определение светового луча.
5. Дать определение линзы. Виды линз.
6. Дать определение главной оптической оси и фокуса линзы.
7. Объяснить построение изображения в собирающей линзе.
8. Формула линзы, её смысл.
9. Дать определение оптической силы линзы. Единица измерения, её определение.
10. Написать формулу, отражающую связь оптической силы линзы с радиусами кривизны поверхностей линзы.
11. Строение глаза.
12. Оптические среды глаза, их характеристика.
13. Оптическая система глаза. Виды и характеристики библинз.
14. Угол зрения, определение, его схематическое изображение.
15. Определение остроты зрения.
16. Определение предела разрешения глаза.
17. Определение разрешающей способности глаза.
18. Дать определение аккомодации. Как она осуществляется?
19. Недостатки оптической системы глаза и физические основы их исправления.
20. Объяснить смысл бинокулярного зрения.
21. Редуцированный глаз. Модель Вербицкого.
22. Перечислить морфо-функциональные слои сетчатки глаза и дать им характеристику.

- 23.Объяснить строение палочки.
- 24.Первичные механизмы свето- и цветовосприятия.
- 25.Как осуществляется цветное зрение?

Литература:

1. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика, М., «Высшая школа»,1999, гл. 26. стр. 457-469.
2. Ливенцев Н.М. «Курс физики» (1-часть), Москва, «Высшая школа», 1978г, гл. 16. стр. 249-266.
3. Владимиров Ю.А., Рошупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.М. «Биофизика», «Медицина», 1983г, гл. 13, стр. 244-252.
4. Рошупкин.Д.И., Фесенко.Е.Е. Новоселов.В.И. «Биофизика органов», Москва, «Наука», 2000, гл. 9, стр.222-231.
5. Н.И. Губанов «Медицинская биофизика», Москва, «Медицина», 1978г., гл.13, стр. 304-310.

Тестовые задания по теме: «Биофизика глаза»

1. Глаз представляет собой:

1. простую оптическую систему
2. оптическую систему, состоящую из трёх одинаковых тонких линз
- 3. центрированную оптическую систему**
4. оптическую систему, состоящую из двух одинаковых тонких линз

2. Наибольшей преломляющей способностью в глазу обладает:

1. хрусталик
- 2. роговица**
3. жидкость передней камеры
4. стекловидное тело

3. Скорость распространения света в вакууме..... скорости света в

любой среде:

1. меньше
2. больше
3. равна

4. Укажите единицу оптической силы линзы:

1. люмен
2. диоптрия
3. метр
4. кандела

5. Оптическая сила рассеивающей линзы:

1. отрицательна
2. равна нулю
3. положительна

6. Луч света, падающий на собирающую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления идёт:

1. параллельно главной оптической оси
2. через фокус линзы
3. через оптический центр линзы
4. перпендикулярно главной оптической оси

7. Для коррекции дальновзоркости применяют:

1. рассеивающие линзы
2. сложную систему линз
3. собирающие линзы
4. цилиндрические линзы

8. Аккомодацией называют:

1. приспособление глаза к видению в темноте
2. приспособление глаза к четкому видению различно удаленных

предметов

3. приспособление глаза к восприятию различных оттенков одного цвета
4. величину, обратной пороговой яркости

9. Для характеристики разрешающей способности глаза используют:

1. угол зрения
2. расстояние наилучшего зрения
3. оптическую силу глаза
4. расстояние между двумя соседними колбочками сетчатки глаза
5. **наименьшее расстояние между двумя точками предмета, которые воспринимаются глазом отдельно**

10. Близорукость - недостаток глаза, состоящий в том, что:

1. **преломляющая сила глаза избыточна**
2. преломляющая сила глаза недостаточна
3. фокус лежит впереди сетчатки
4. переднее и заднее фокусное расстояние глаза равны

11. Остроте зрения 0,5 соответствует наименьший угол зрения:

1. 2'
2. 5'
3. 1'
4. 0,5'

12. Свет воспринимают структуры глаза:

1. хрусталик
2. роговица, хрусталик и сетчатка
3. **сетчатка**

15. Палочки расположены:

1. в центральной части сетчатки (желтом пятне)

2. равномерно по всей поверхности

3. по всей поверхности сетчатки, причем на периферии их концентрация выше, чем в центральной части

4. по всей поверхности сетчатки, причем на периферии их концентрация меньше, чем в центральной части

16. Приспособление глаза к четкому видению различно удаленных предметов называют:

1. аккомодацией

2. остротой зрения

3. адаптацией

4. миопией

18. У взрослого здорового человека расстояние наилучшего зрения равно:

1. 70 мкм

2. 25см

3. 12,5см

19. Наиболее близкое расстояние предмета от глаза, при котором еще возможно четкое изображение на сетчатке, называют:

1. расстоянием наилучшего зрения

2. ближней точкой глаза

3. пределом разрешения

4. разрешающей способностью

20. Определите фокусное расстояние хрусталика, если его оптическая сила равна 20 дптр.

1. 0,05м

2. 0,017м

3. 0,0224м

21. Оптическая сила глаза пациента 65 дптр, оптическая сила нормального глаза 60 дптр. Определите оптическую силу очков.

1. 5дптр

2. 0,5дптр
3. 20 дптр
4. 5дптр
5. -0,5дптр

22.Основные элементы светопроводящей части оптической системы

глаза:

1. склера, зрачок, хрусталик
2. зрачок, сетчатка, глазные мышцы, размеры хрусталика
3. **роговица, передняя камера, хрусталик, стекловидное тело**
4. зрительный нерв, палочки, колбочки, желтое пятно

23.Острота глаза:

1. **величина, обратная наименьшему углу зрения**
2. величина, определяемая как наименьший угол зрения
3. отношение геометрических размеров изображения на сетчатке к истинному размеру тела
4. отношение размеров изображения тела на сетчатке к расстоянию наилучшего зрения

22. Размеры изображения на сетчатке предмета, находящегося на расстоянии наилучшего зрения, при условии, что угол, под которым предмет виден равен 1':

1. 1000 мкм
2. 1 см
3. **5мкм**
4. **73 мкм**

27.Палочка состоит из:

1. фосфолипидных молекул
2. **светочувствительного наружного сегмента, внутреннего сегмента, содержащего ядро и митохондрии, которые обеспечивают функционирование клетки**
3. светочувствительного наружного сегмента, большого числа

миофибрилл

28. Цветное зрение является результатом существования трех типов колбочек, которые имеют спектры поглощения видимого света с максимумами:

1. 400, 500 и 700 нм
2. 220, 350 и 555 нм
3. **445, 535 и 570 нм**
4. 425, 555 и 760 нм

29. Причина близорукости (миопия)?

1. укороченная форма глазного яблока
2. **удлиненная форма глазного яблока**
3. способность хрусталика к аккомодации
4. изменение размеров зрачка

30. Сетчатка выполняет важную функцию глаза:

1. **преобразовывает световой импульс в нервное возбуждение, производит первичную обработку сигнала и направляет его в мозг**
2. преобразование светового воздействия в тепловое
3. отражение световой энергии
4. поглощение световой энергии

31. Зрительная ось-это линия, определяющая направление наибольшей светочувствительности и проходящая через:

1. зрачка и хрусталика
2. роговицы, зрачка и хрусталика
3. **центры роговицы и желтого пятна**
4. роговицы и слепого пятна

32. Слепое пятно-это место где:

1. много палочек
2. **нет ни палочек, ни колбочек**
3. много колбочек
4. мало палочек

34. Величина наименьшего угла зрения для нормального глаза:

1. 10'
2. 5'
3. 3'
4. 1'

35. Спектральный диапазон чувствительности глаза:

1. 400-800 нм
2. 200-400 нм
3. 800-1000 нм
4. 40-200 нм

Глоссарий по биофизике зрения

1. **Глаз** — центрированная оптическая система, *главная оптическая ось* (OO) которой проходит через центры роговицы, зрачка, хрусталика.
2. **Склера** — достаточно прочная внешняя белковая оболочка, защищающая глаз от повреждений и придающая ему постоянную форму.
3. **Роговица** - передняя часть склеры, более выпуклая и прозрачная; действующая как собирающая линза с оптической силой 40 дптр.
4. **Сосудистая оболочка** — с внутренней стороны склера выстлана сосудистой оболочкой.
5. **Пигментная оболочка**, содержащая темные пигментные клетки, препятствующие рассеиванию света в глазу.
6. **Радужная оболочка** — в передней части сосудистая оболочка переходит в окрашенную радужную оболочку, цвет которой определяет цвет глаз.
7. **Зрачок** — круглое отверстие в радужной оболочке, пропускающее свет. Диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм.

8. **Светопроводящий аппарат** глаза образован роговицей, жидкостью передней камеры, хрусталиком и стекловидным телом.
9. **Конъюнктивa** — наружная оболочка глаза, выполняет барьерную и защитную роль.
10. **Слепое пятно** — расположено в том месте, где зрительный нерв входит в глаз.
11. **Хрусталик** — природная эластичная двояковыпуклая линза
12. **Кольцевая мышца** — мышца, которая охватывает хрусталик и может изменять кривизну его поверхностей.
13. **Передняя камера** — камера с водянистой массой, которая находится в передней части глаза между роговицей и хрусталиком,
14. **Зрительный нерв**, обеспечивающий передачу зрительной информации в мозг.
15. **Сетчатка** — светочувствительный слой, воспринимающий свет и преобразующий его в нервные импульсы
16. **Колбочки** (их примерно 10 млн) служат для восприятия мелких деталей предмета и различения цветов
17. **Палочки** (120 млн клеток) не воспринимают различия в цвете и мелкие детали, но они высокочувствительны к слабому свету, с помощью палочек человек различает предметы в сумерках и ночью
18. **Стекловидное тело** — студенистое вещество, заполняющее пространство между хрусталиком и сетчаткой
19. **Желтое пятно** (макула) — самая чувствительная область сетчатки, площадью около 3 мм².
20. **Центральная ямка** — наиболее чувствительная часть желтого пятна.
21. **Слепое пятно** — расположено в том месте, где зрительный нерв входит в глаз.
22. **Зрительная ось**-направление наибольшей чувствительности глаза, которая проходит через центры роговицы и желтого пятна.
23. **Главная оптическая ось** – это ось, которая проходит через центры роговицы, зрачка, хрусталика.

24. **Сетчатка** — светочувствительный слой, воспринимающий свет и преобразующий его в нервные импульсы/
25. **Световоспринимающим (рецепторным) аппаратом** глаза является сетчатка, в которой находятся светочувствительные зрительные клетки.
26. **Аккомодация** — приспособление глаза к четкому видению различно удаленных предметов.
27. **Расстояние наилучшего зрения (видения)**- это расстояние, на котором аккомодация осуществляется без существенного напряжения на расстояние до 25 см у взрослого человека с нормальным зрением.
28. **Угол зрения** — угол между лучами, идущими от крайних точек предмета через узловую точку (оптический центр глаза).
29. **Разрешающая способность глаза** — это величина, характеризующая его способность давать раздельное изображение двух близких друг другу точек объекта.
30. Наименьшее расстояние между двумя точками, при котором их изображения воспринимаются раздельно, называется **пределом разрешения**.
31. **Острота зрения** равна отношению минимального углового размера символа, распознаваемого нормальным глазом, к угловому размеру символа, распознаваемого пациентом.

Вопросы для подготовки к занятию:

I. Механические колебания

1. Колебания, виды колебаний.
2. Гармонические колебания. Основные параметры гармонического колебания.
3. Вибрация.
4. Механотерапия.

II. Механические волны

1. Механические волны, частота волны. Продольные и поперечные волны.
2. Волновой фронт. Скорость и длина волны.
3. Уравнение плоской волны.
4. Энергетические характеристики волны. Вектор Умова.
5. Ударные волны.

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.
7. Факторы, определяющие профилактику шума. Защита от шума.

Физические основы звуковых методов исследования в клинике

Аускультация

Фонокардиография (ФКГ)

Перкуссия

Биофизика слуха

1. Звукопроводящая и звуковоспринимающая части слухового аппарата.

2. Роль наружного уха.
3. Роль среднего уха.
4. Роль внутреннего уха.

5. Инфразвук и его источники

6. Воздействие инфразвука на человека. Использование инфразвука в медицине

7. Использование инфразвука в медицине

8. Ультразвук

9. Свойства ультразвука

10. Источники ультразвука:

11. Биологическое действие ультразвука

12. Химическое действие

13. Применение ультразвука

14. Вопросы для самоконтроля по теме: Биофизика звука и органа слуха

15. 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, электро-магнитные 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

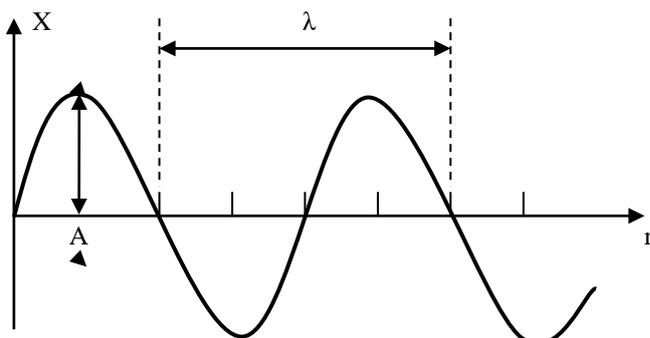


рис.1

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 двуплечный 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

10^7-10^9	Высокочастотный ультразвуковой	Колебания пьезоэлектрических излучателей
10^9-10^{13}	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 ν остается прежней.

Уравнение плоской волны

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

$$x_{\text{н}} = A \cdot \cos(\omega t)$$

где $x_{\text{н}}$ — 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: $I = \frac{E}{t \cdot S}$ [Вт/м²]

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):

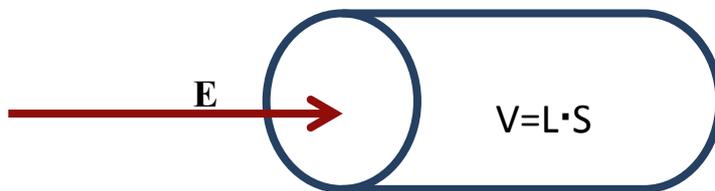


рис 2

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

$\omega = \frac{E}{V}$ - **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:

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

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 электрический 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

8. Звук, виды звука.

9. Физические характеристики звука.

10. Характеристики слухового ощущения. Звуковые измерения.

- 11.Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука.
- 12.Прохождение звука через границу раздела сред.
- 13.Звуковые методы исследования.
- 14.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**. Обертонны имеют частоты, кратные основной частоте: 2ω , 3ω , 4ω , ...

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

Акустический спектр шума является **сплошным**.

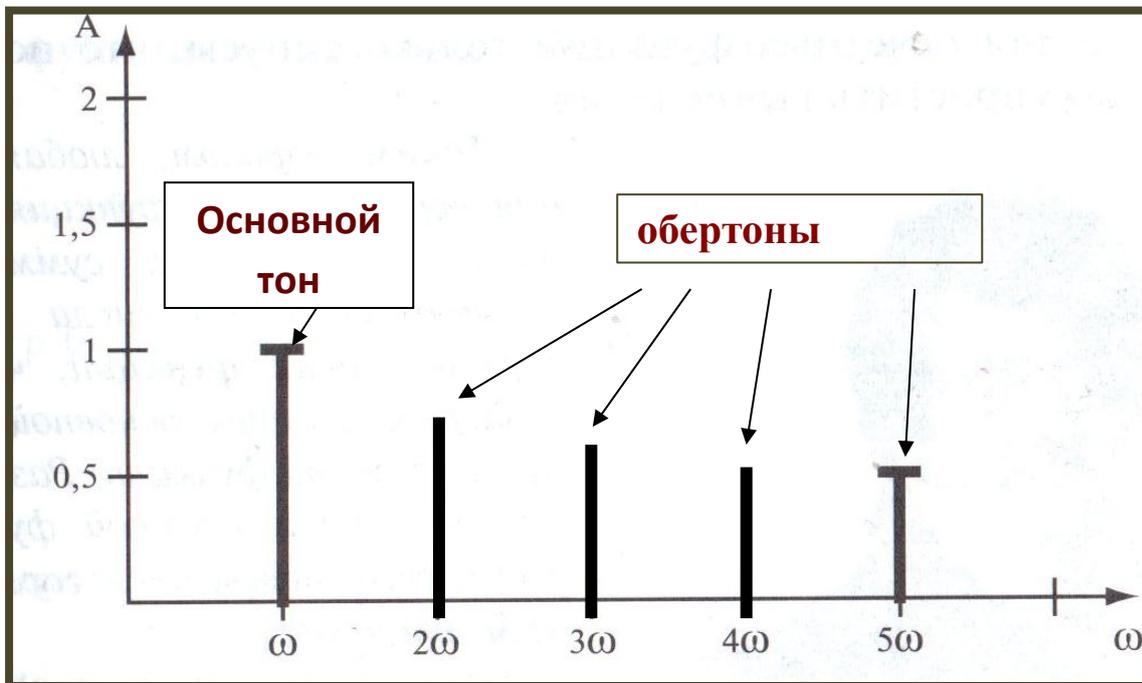


рис 3

Физические характеристики звука

1. Звуковое давление

Распространение звука сопровождается изменением давления в среде (рис.4).

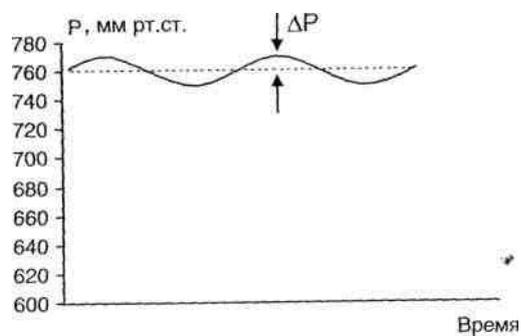


Рис. 4

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**.

1Фон=1дБел на частоте 1000Гц.

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 интенсивность L_n , при котором у испытуемого появляются слуховые ощущения. Меняя частоту звука, получают экспериментальную зависимость $L_n(\nu)$, которую называют аудиограммой (рис. 5).

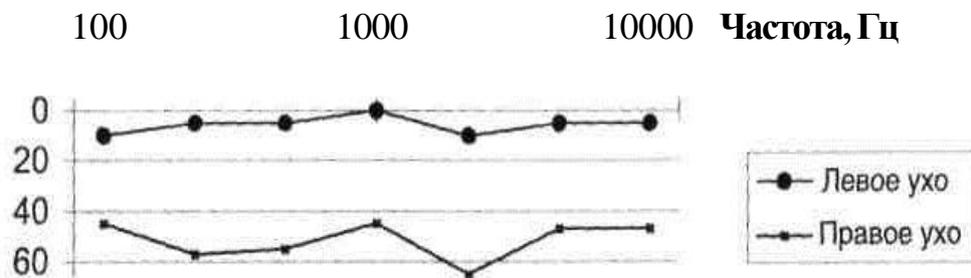


Рис. 5. Аудиограммы

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.

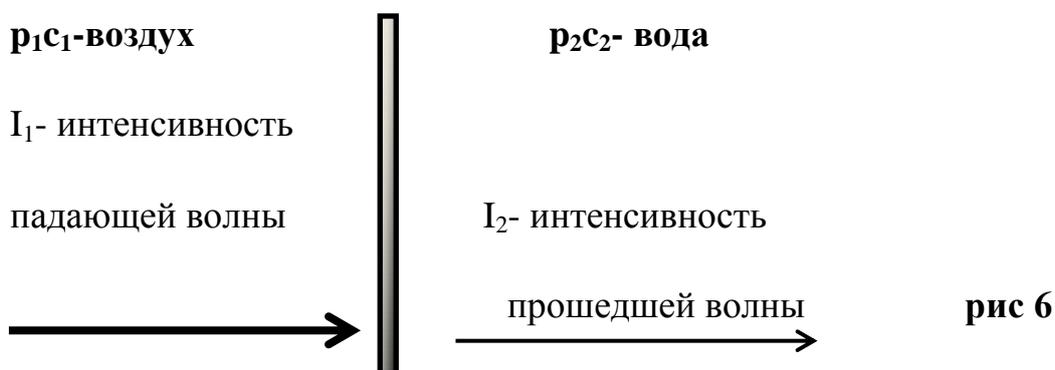
Произведение $\rho \cdot c$ называют **удельным акустическим импедансом**, для плоской волны его называют также **волновым сопротивлением**,

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

16. Звукопроводящая и звуковоспринимающая части слухового аппарата.

17. Роль наружного уха.

18. Роль среднего уха.

19. Роль внутреннего уха.

Слух — восприятие звуковых колебаний, которое осуществляется органами слуха.

По выполняемым функциям в слуховом аппарате человека выделяют **звукопроводящую** и **звуковоспринимающую** части.

По анатомическому признаку в слуховом аппарате человека выделяют **наружное ухо**, **среднее ухо** и **внутреннее ухо**.

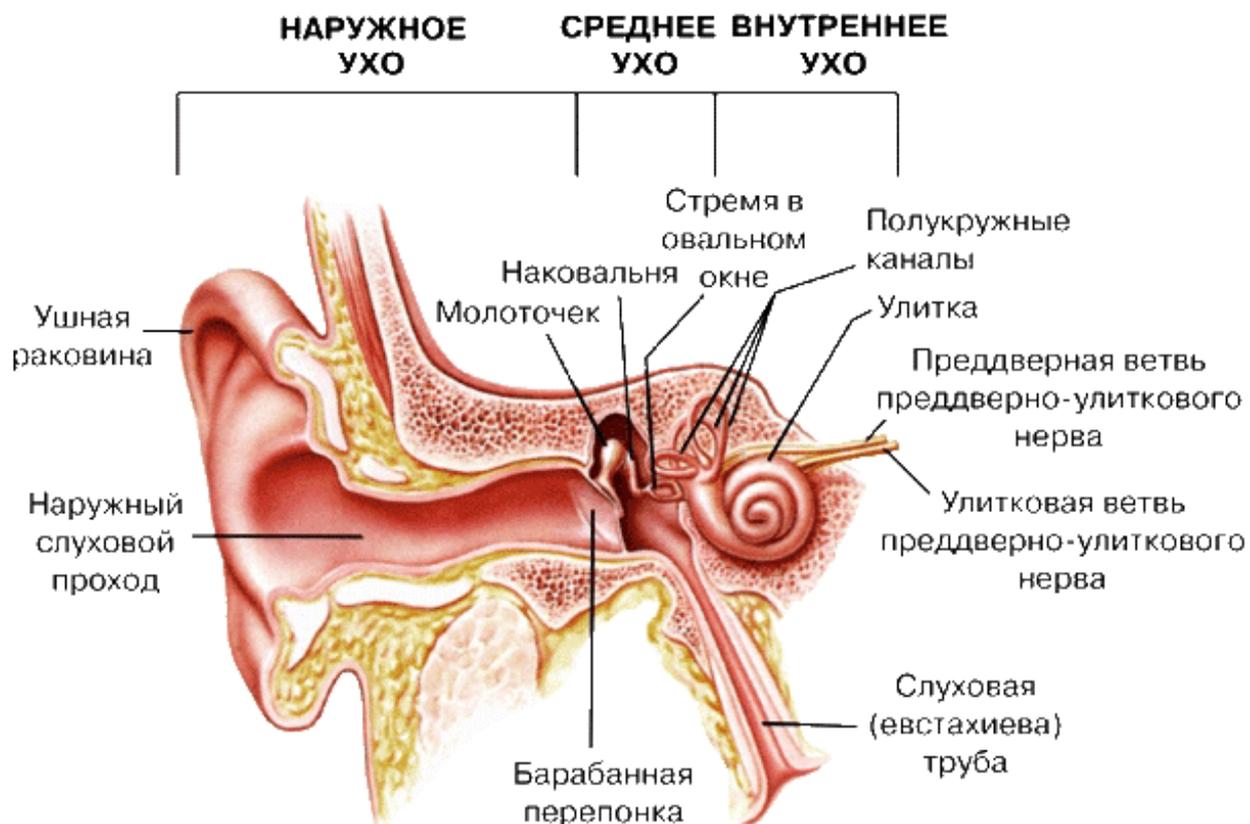


рис. 7

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:

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

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).

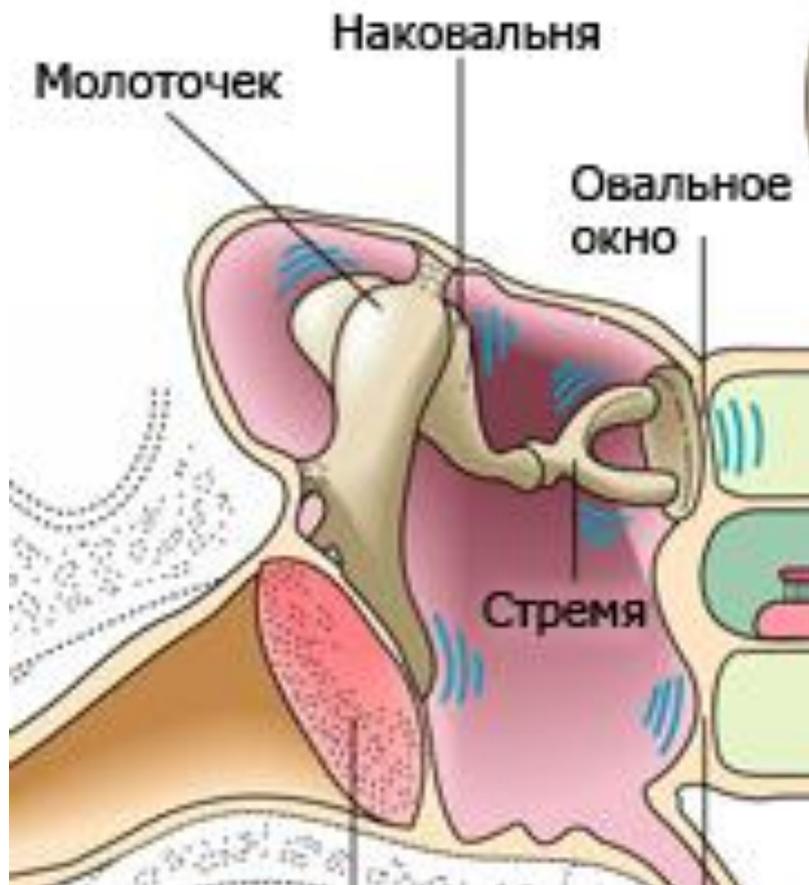


рис 8

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 $S_{\text{бп}} = 64 \text{ мм}^2$, а площадь овального окна $S_{\text{оо}} = 3 \text{ мм}^2$.

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

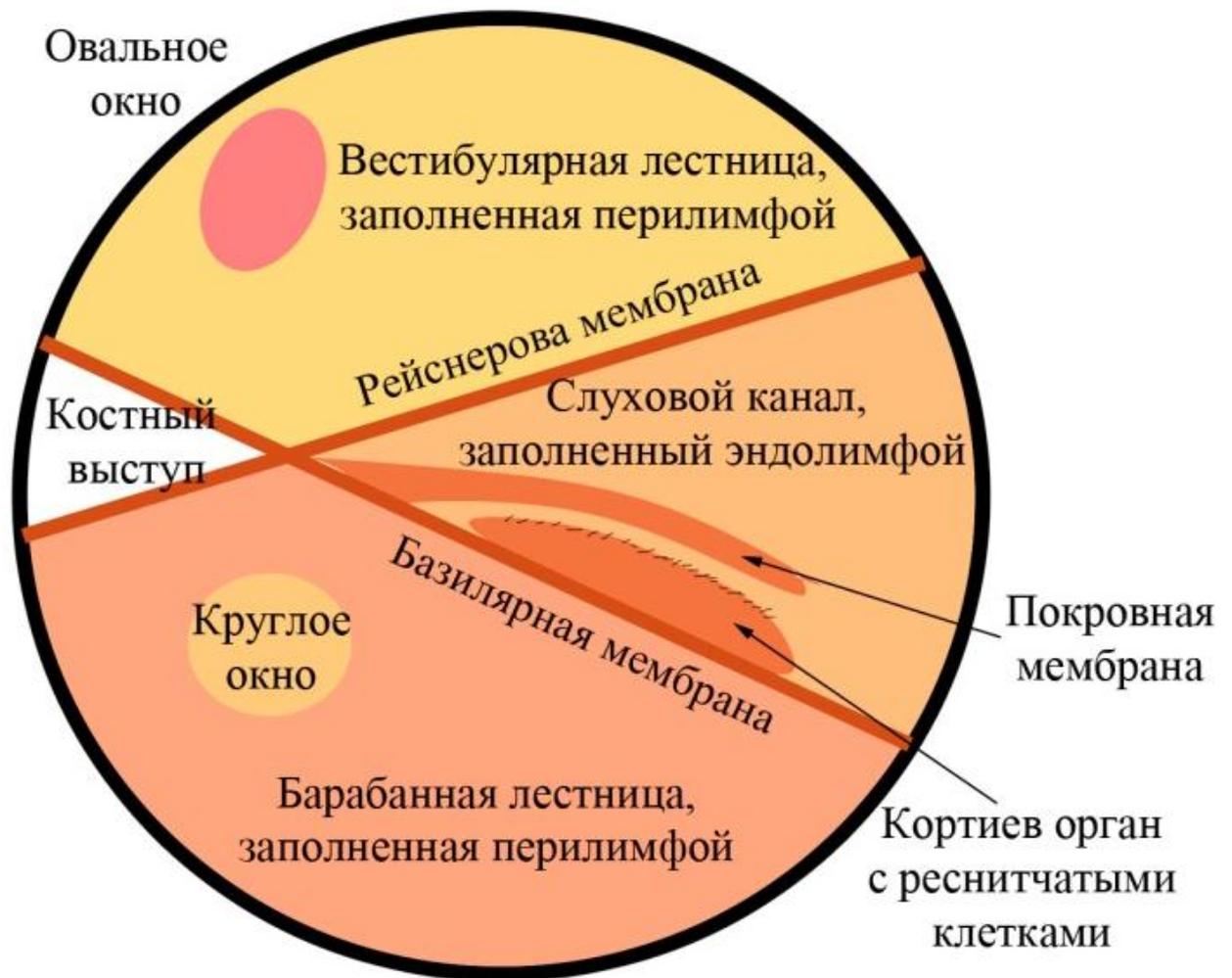
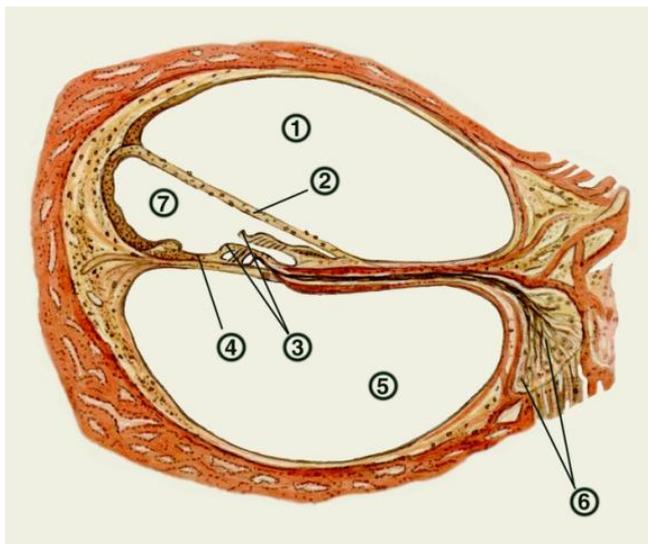


Рис.9



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 вершущке 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 $\nu > 10-15$ 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.

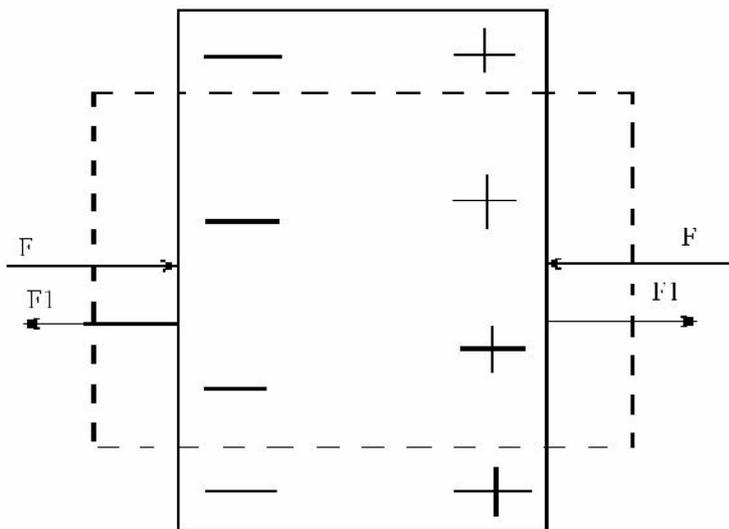
Если из них определенным образом вырезать пластинку, то при сжатии или растяжении такой пластинки на ее поверхности появятся электрические заряды — с одной стороны положительные, с другой — отрицательные. В этом и состоит пьезоэлектрический эффект. Этот эффект обратим.

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, удается 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 разрежения 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 биомакромолекул
- 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 канцерогенезной 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 и органа слуха

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 белых 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 звука и органа 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, 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, 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. Основной 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. $L = k \cdot L_g \frac{I}{I_0}$
2. $\Delta E = 20 \cdot L_g \frac{I}{I_0}$
3. $\Delta E = 10 \cdot L_g \frac{I}{I_0}$

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

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

Литература:

1. В.Н. Федорова, Е.В. Фаустов. Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами : учеб. пособие - 2008г., 592 с.
2. Антонов В.Ф., Коржуев А.В. Курс лекций для студентов медицинских вузов, ГЭОТАР – Медиа, 2007г., 256с.