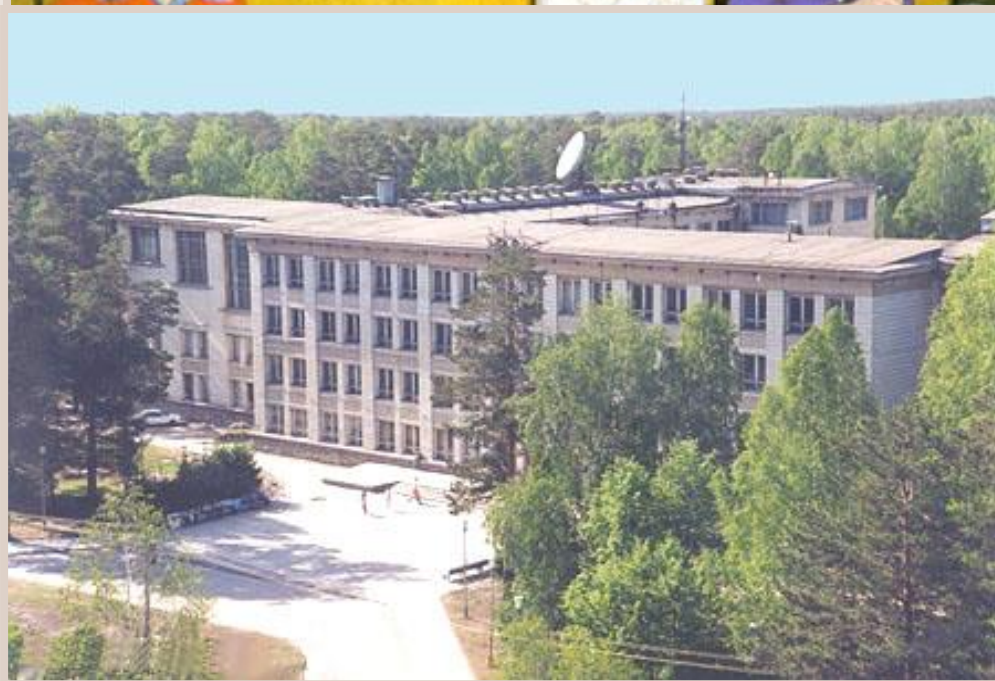
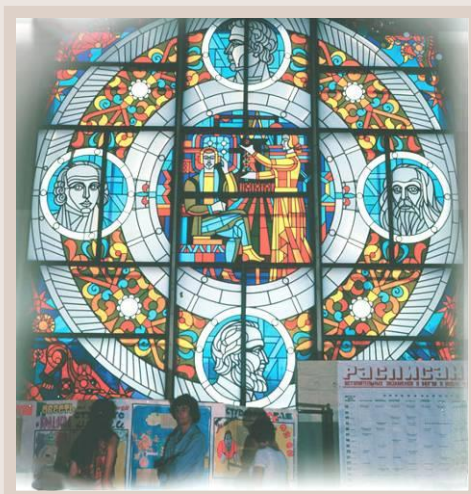
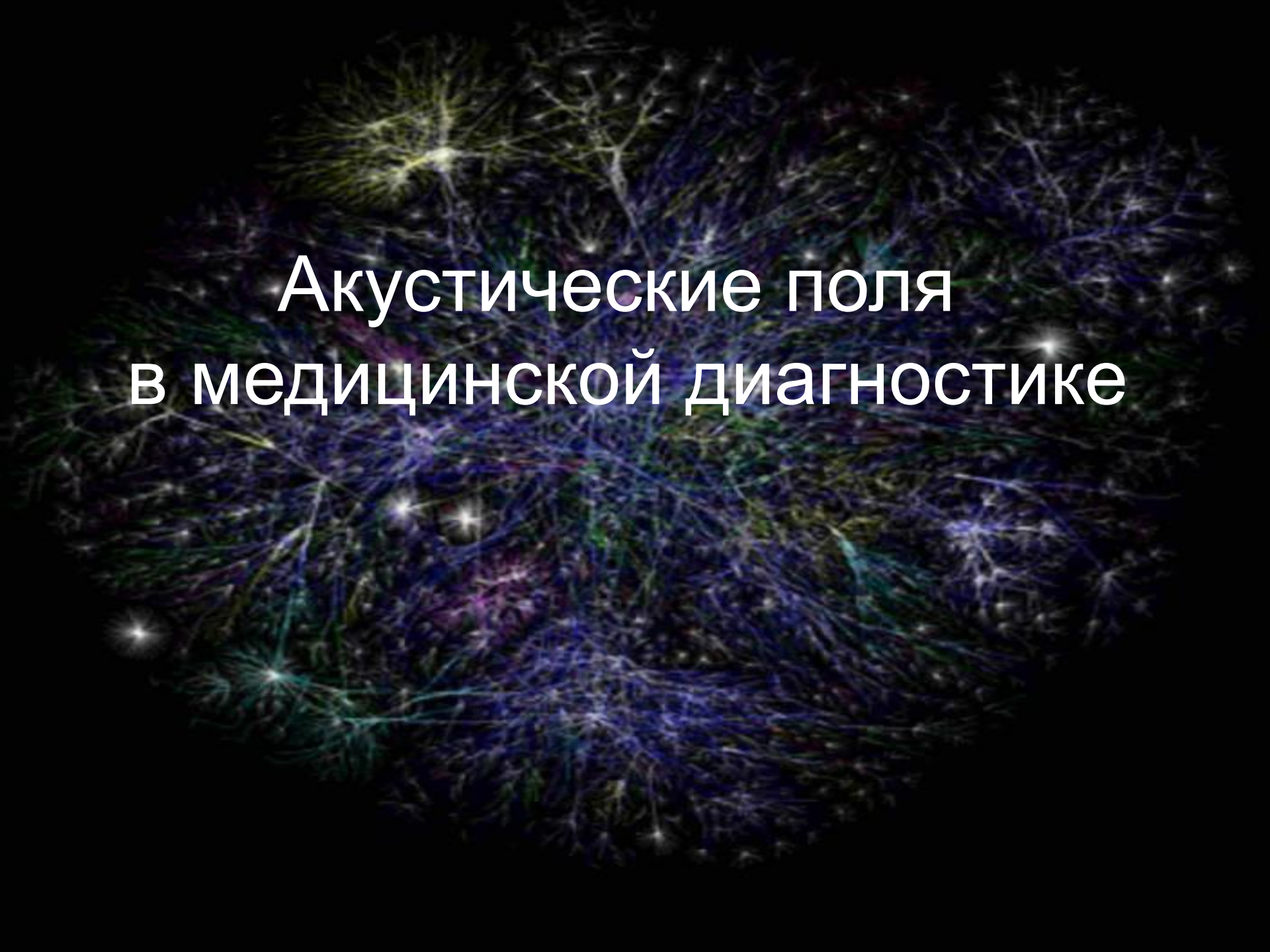


Новосибирский государственный университет



The background of the slide is a complex, abstract pattern of fine, fiber-like structures in shades of blue, green, and yellow, set against a dark, almost black background. These fibers are interconnected and radiate from various points, creating a dense, web-like appearance. Interspersed among these fibers are numerous bright, multi-pointed starburst or 'halo' effects, which appear as small, glowing clusters of light. The overall effect is reminiscent of a microscopic view of biological tissue or a complex network of data connections.

Акустические поля в медицинской диагностике

Типы волн

Волна - периодическое возмущение, которое перемещается в пространстве

Электромагнитные
Колебания.
Возмущение
напряженностей полей

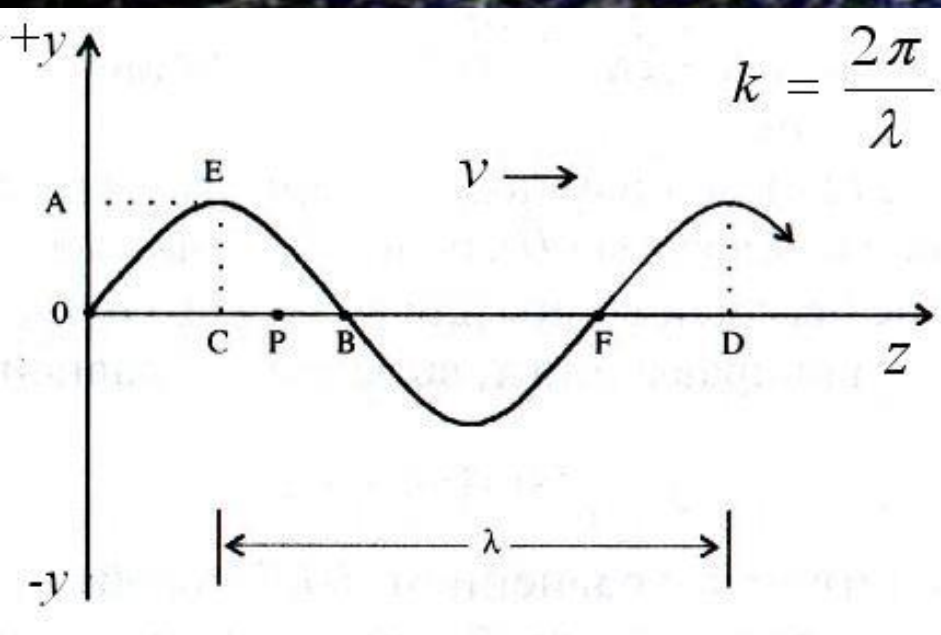
Распространяются
независимо от
наличия вещества
(вакуум)

Поперечные
колебания

Механические
Колебания
Возмущения давления и
плотности газа, жидкости
или твердого тела

Распространяются
только в упругой
среде

Продольные или
поперечные
колебания



Бегущая волна, движущаяся в направлении z

O – источник волны, OA- смещение частицы (например).

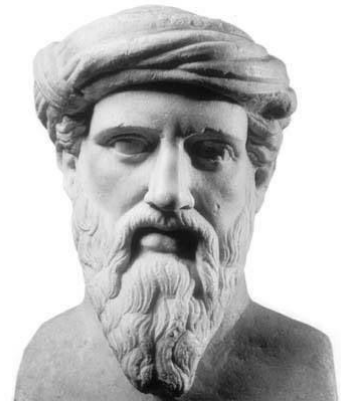
В точке O частицы водной среды совершают гармонические колебания. Следовательно, смещение частицы относительно точки O во времени можно записать в виде:

$$y = A \sin(\omega t - kz)$$

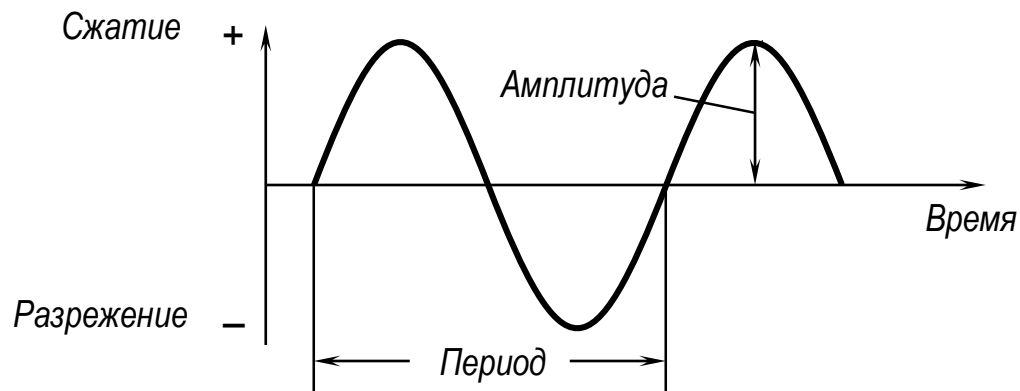
Параметры волны
скорость

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}$$

Физика звука



- Пифагор Самосский (580-500 до н.э.).
- Звук – распространяющиеся во все стороны колебания воздуха.
- Изменения давления P в воздухе, перенос механической энергии.
 - Сжатие (высокое давление = большая амплитуда сигнала).
 - Разрежение (низкое давление = малая амплитуда сигнала).



Давление

- Давление есть сила, действующая на единицу площади.
- Единица измерения давления – паскаль
 $1\text{Па}=1\text{Н}/\text{м}^2$
- Столб жидкости плотностью ρ и высотой h оказывает давление на дно сосуда равное ρgh .
- На уровне моря при 0°C столб атмосферного воздуха оказывает давление в одну атмосферу (1 атм). Такое же давление оказывает столб ртути 760 мм или столб воды 1033 см. Единицы мм. рт. ст. широко применяются в медицине.

Единицы измерения давления

	Паскаль (Pa, Па)	Бар (bar, бар)	Техническая атмосфера (at, ат)	Миллиметр ртутного столба (мм рт. ст., mm Hg, Torr, торр)	Метр водяного столба (м вод. ст., m H ₂ O)
1 Па	1 Н/м²	10^{-5}	$10,197 \cdot 10^{-6}$	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-4}$
1 бар	10^5	$1 \cdot 10^6$ дин/см²	1,0197	750,06	10,197
1 ат	98066,5	0,980665	1 кгс/см²	735,56	10
1 мм рт.ст.	133,322	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	1 мм рт. ст.	$13,595 \cdot 10^{-3}$
1 м вод. ст.	9806,65	$9,80665 \cdot 10^{-2}$	0,1	73,556	1 м вод. ст

Характеристики звука

Звуковое давление

$$P = P(t) - P_{\text{атмосферное}}$$

– гармонические колебания.

Единица измерения – паскаль [Па].

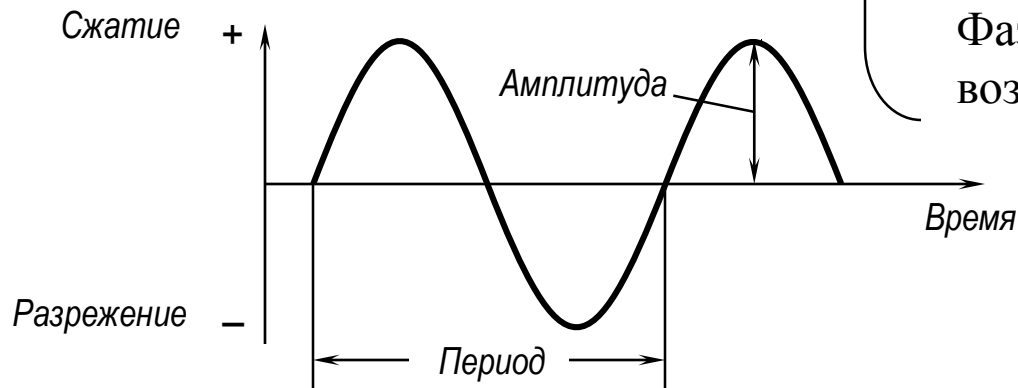
Длина волны (λ) [мм] или [мкм] – расстояние между фазами сжатия и разрежения.

Частота (f) [периодов в сек] = [Гц] – количество осцилляций за 1 сек. (скорость изменения давления).

Период ($1/f$) [сек] – временная протяженность одного цикла колебаний.

Амплитуда – сила давления, отражает смещение частиц среды.

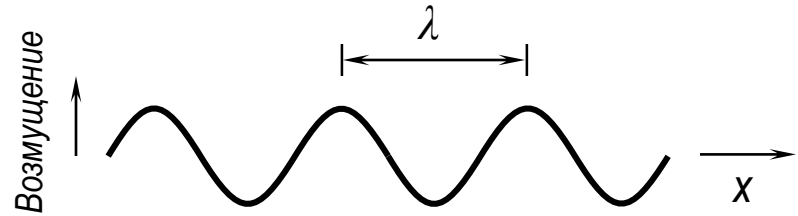
Фаза – отражает момент времени возникновения колебаний.



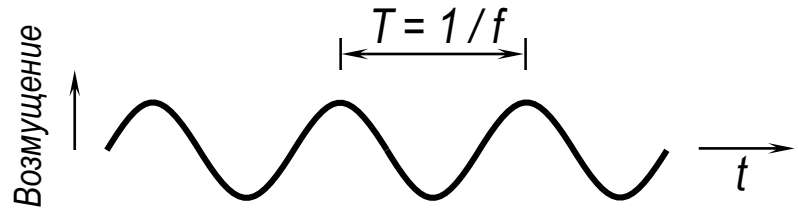
Характеристики звука

Распространение звука

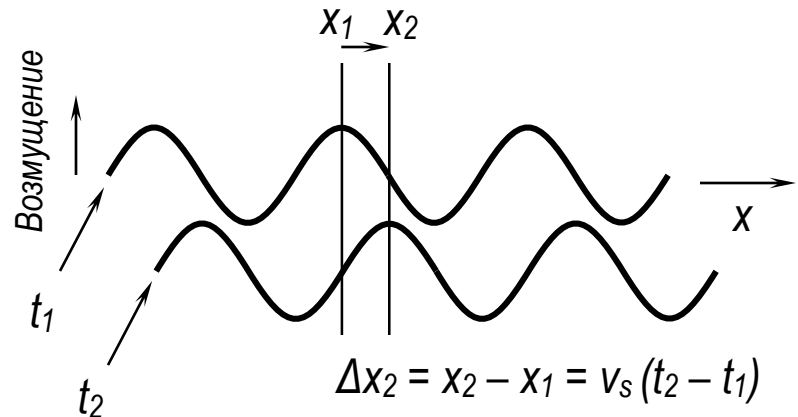
- Волна в данный момент времени t :



- Волна данной точке пространства z :

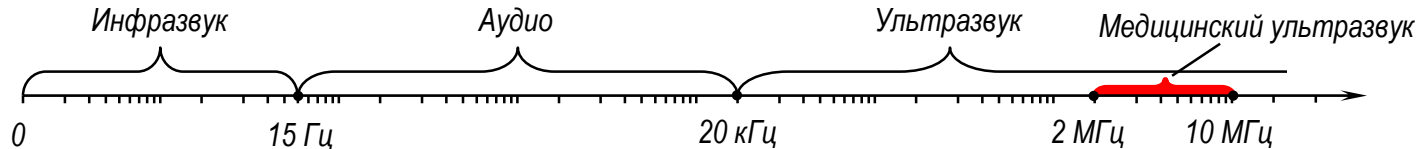


- Волна в два данных момента времени t , что отражает процесс распространения :



Звуковая волна

Распространение звука



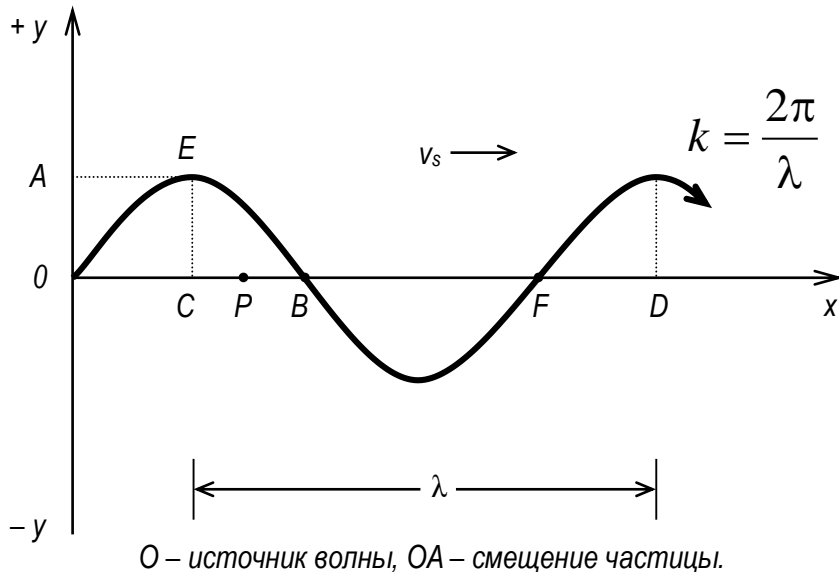
Инфразвук – $f < 15 \text{ Гц}$

Аудио – $15 \text{ Гц} < f < 20 \text{ кГц}$

Ультразвук – $f > 20 \text{ кГц}$

(обычно **медицинский ультразвук** 2-10 МГц)

Бегущая волна, движущаяся в положительном направлении оси x



В точке O частицы водной среды совершают гармонические колебания. Следовательно, смещение частицы относительно точки O во времени t можно записать в таком виде:

$$y = A \sin(\omega t - kx).$$

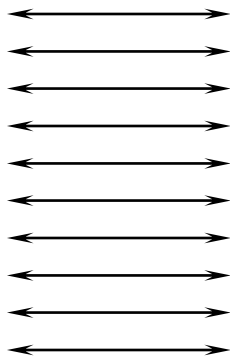
Скорость волны – расстояние, проходимое фронтом волны в единицу времени:

$$v_s = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}.$$

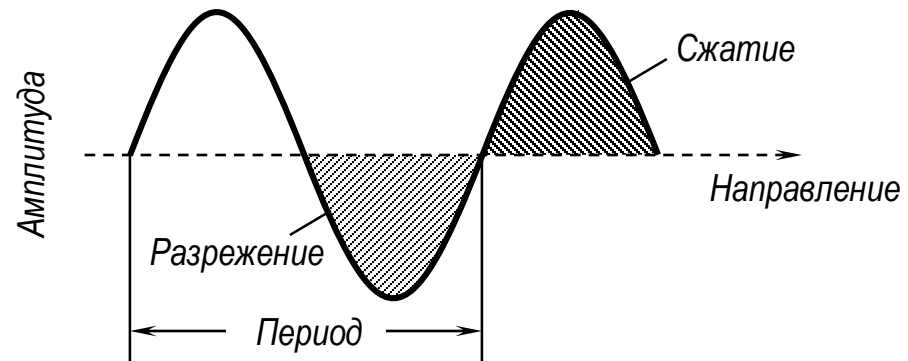
Продольные или волны сжатия

- Распространяются в твёрдых телах, жидкостях и газах.

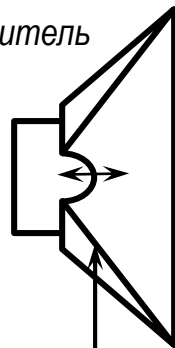
Колебание частиц



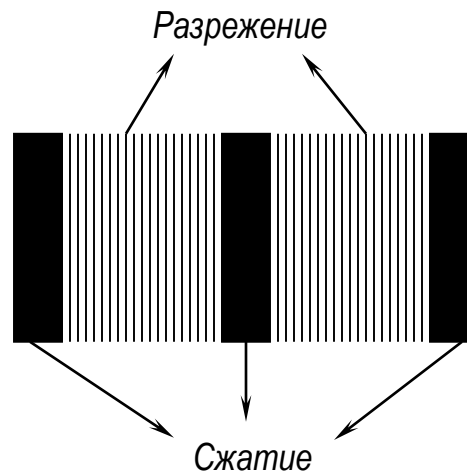
Распространение волны



Громкоговоритель



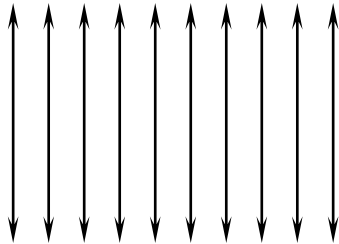
Разряжение



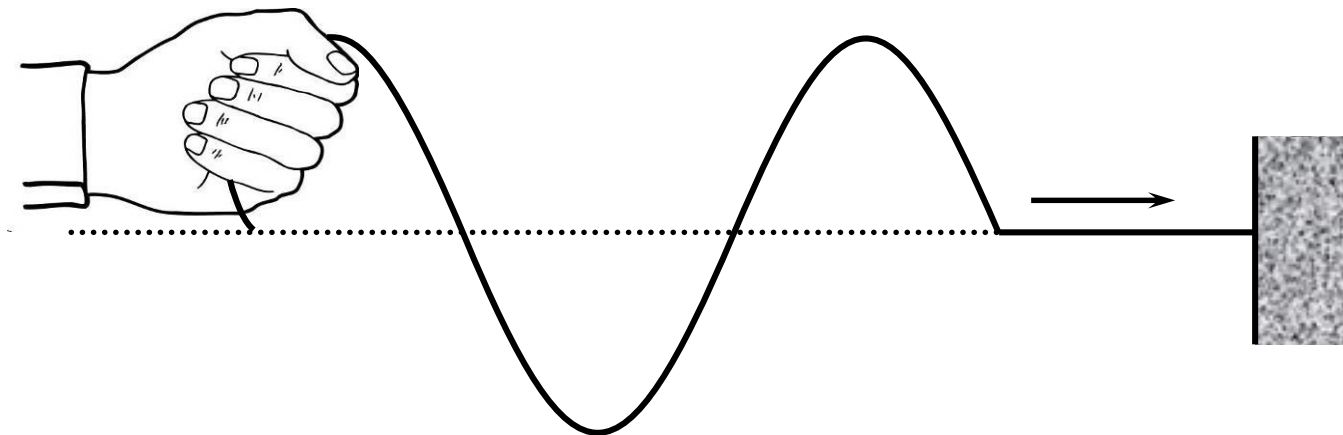
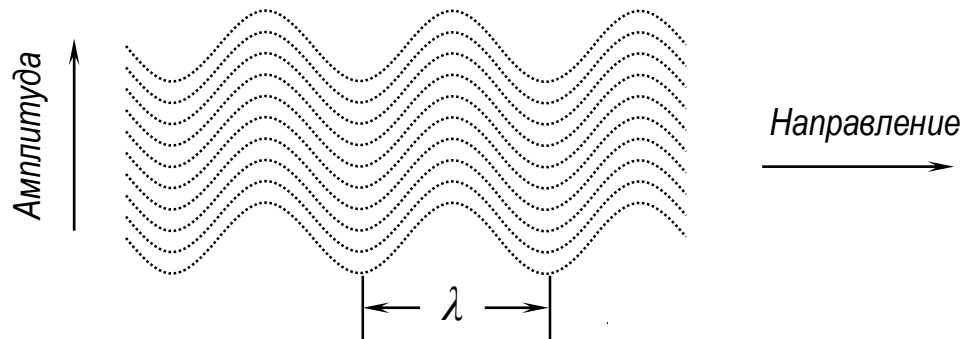
Поперечные или волны сдвига

- Колебания частиц направлены поперёк направления распространения волнового движения.
- Могут передаваться только в твёрдых телах.

Колебание частиц



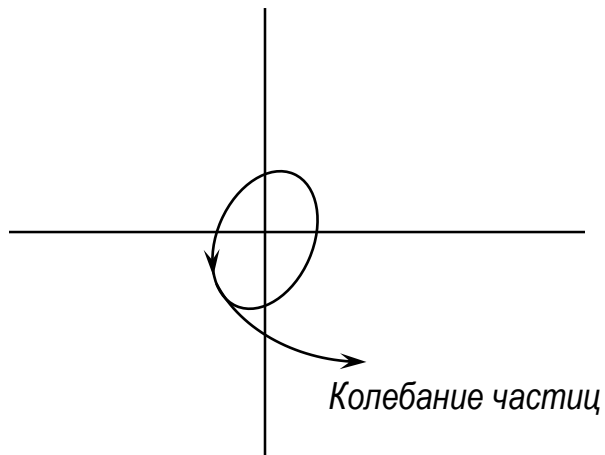
Распространение волны



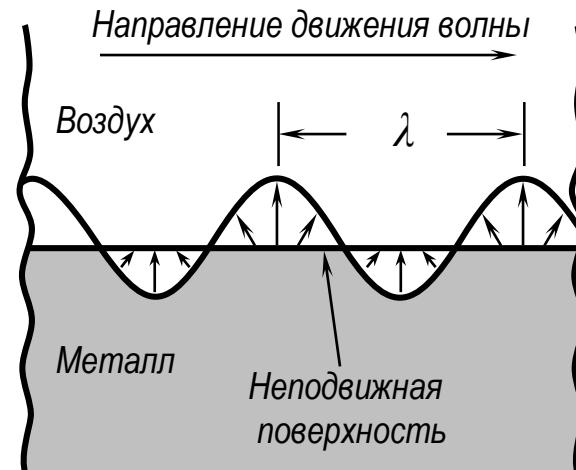
Поверхностные волны Рэлея

- Распространяются вдоль плоской границы упругого полупространства (твёрдое вещество) и вакуума.
- Быстро затухают вглубь среды.

Колебание частиц



Распространение волны на поверхности металл – воздух



Скорость звуковых волн

Звуковые волны распространяются со скоростью v_s , которая определяется свойствами среды. В общем случае скорость звука равна

$$v_s = \sqrt{C/\rho},$$

где C – это константа, характеризующая жесткость (или упругость) материала (в отсутствие теплового потока, т. е. в «адиабатических» условиях), а ρ – массовая плотность. В твердых веществах константа упругости может зависеть от направления распространения звуковой волны. Она равняется модулю Юнга Y для распространения компрессионных волн по стержню, длина которого намного больше ширины. Для стали $v_s = 5960$ м/с. В текучей среде (жидкости и газы), C – это объемный модуль упругости B (адиабатический), который описывает, какой величины давление требуется для достижения данного уменьшения объема. В газах $B = \gamma P$, где γ – это постоянная адиабата, то есть отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении (c_p) и постоянном объеме (c_v). (Отношение c_p/c_v находится в диапазоне от 1 – для очень больших молекул – до $5/3$ для идеального одноатомного газа; для воздуха, который состоит из двухатомных газов, эта величина составляет 1,4.) скорость звука в газах

$$\sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{m}},$$

где R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/моль/К), а m – молекулярная масса. Скорость звука в воздухе составляет 343 м/с (при 20°C), что в 15 раз медленнее, чем в стали, тогда как скорость звука в воде равны 1482 м/с.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Интенсивность звуковой волны I – это энергия, переносимая волной через единицы поверхности за единицу времени (с размерностью Дж/м²/с или Вт/м²). На расстоянии R от изотропного источника средней звуковой мощности P_{power} , интенсивность составляет

$$I = \frac{P_{\text{power}}}{4\pi R^2}.$$

Интенсивность равна кинетической энергии волны на единицу объема, $\rho u_{\text{max}}^2/2$ умноженной на скорость звука v_s ,

$$I = \frac{1}{2} \rho u_{\text{max}}^2 v_s,$$

где $u_{\text{max}} = (\Delta x_{\text{max}}) \omega$ – максимальная скорость молекул при максимальном смещении Δx_{max} в ходе возмущения.

$$I = \frac{1}{2} \rho v_s [(\Delta x_{\text{max}x}) \omega]^2.$$

Акустический импеданс среды Z определяется как произведение массовой плотностью среды и скорости звука в ней,

$$Z = \rho v_s.$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Величина максимального изменения давления в звуковой волне связана с максимальным смещением уравнением

$$|P| = (\rho v_s) \omega |\Delta x_{\max}| = Z \omega |\Delta x_{\max}|.$$

Это вытекает из того факта, что давление – это сила, приходящаяся на единицу поверхности, а сила – это изменение импульса в единицу времени, и, таким образом, давление – это изменение импульса на единицу поверхности за единицу времени.

$$I = \frac{1}{2} Z (\Delta x_{\max})^2 \omega^2 = \frac{P^2}{2Z}.$$

I измеряется в [Вт/м²].

Физиологически обоснованное представление интенсивности звука

В аудиометрии за опорную величину принимается интенсивность I_{ref} звука, который на частоте 2000 Гц едва различим. Причем величины исчисляются в логарифмической шкале с основанием 10 (десятичный логарифм).

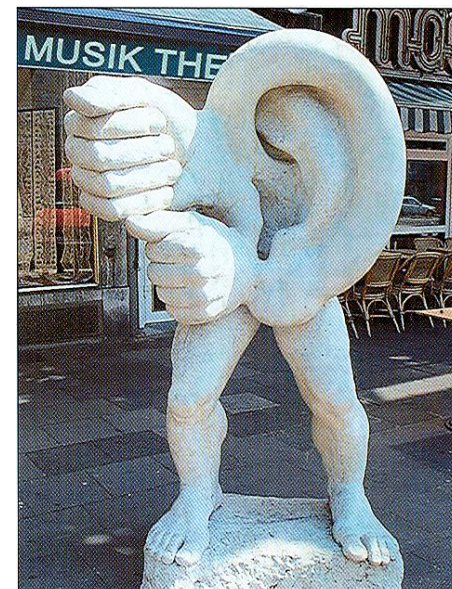
$$I_{ref} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

$$I_{db} \text{ (в дБ)} = 20 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^2 = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) \text{ дБ}$$

Соответствующее звуковое давление

$$P_{ref} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мкбар} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cong 2 \cdot 10^{-10} \text{ атм.}$$

$$1 \text{ Белл} = \lg \frac{I}{I_{ref}}; \quad \frac{1}{10} \text{ Белл} = 1 \text{ дБ}$$



Единицы измерения

$$1 \text{ Белл} = \lg \frac{I}{I_{ref}}; \quad \frac{1}{10} \text{ Белл} = 1 \text{ дБ} \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

При $I = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 = 10^4 I_{ref}$, I (в дБ) = $10 \lg (10^4) = 10 \cdot 4 = 40$ дБ.

Шкала децибел также применяется для того, чтобы показать относительные величины интенсивности, например I_2 к I_1 . При

$$I_1 \text{ (в дБ)} = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_{ref}} \quad \text{и} \quad I_2 \text{ (в дБ)} = 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_{ref}},$$

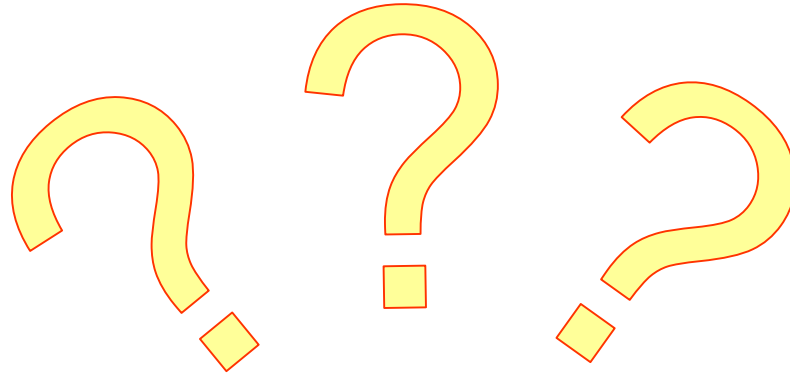
$$I_2 \text{ (в дБ)} - I_1 \text{ (в дБ)} = 10 \lg \frac{I_2}{I_{ref}} - 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_{ref}} = 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

Повышение интенсивности звука на 20 дБ соответствует множителю 10^2 или 100-кратному увеличению I .

В ультразвуковой диагностике интенсивность импульса излучения может превышать интенсивность эхо импульса в 10^6 раз.

Логарифмическая функция «сжимает» большие отношения и «растягивает» маленькие в более обозримый диапазон.

Контрольный вопрос

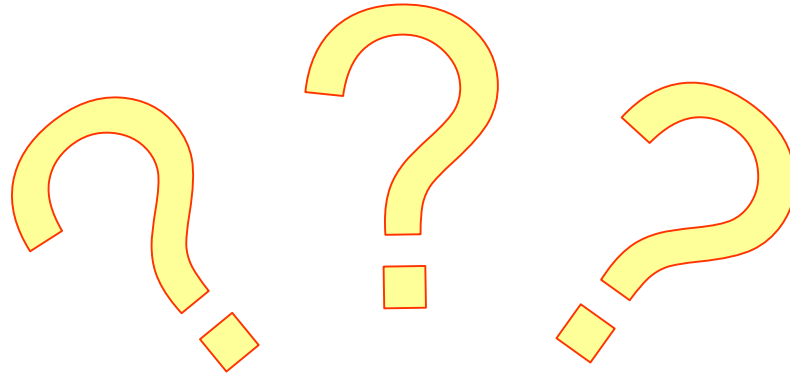


$$\text{Относительная интенсивность (дБ)} = 10 \cdot \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right).$$

$$\text{Относительная интенсивность (дБ)} = 20 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right).$$

Найдите относительную интенсивность ультразвука в децибелах на «глубине проникновения». «Глубина проникновения» обозначает толщину слоя в где интенсивность падает до 50% от первоначальной.

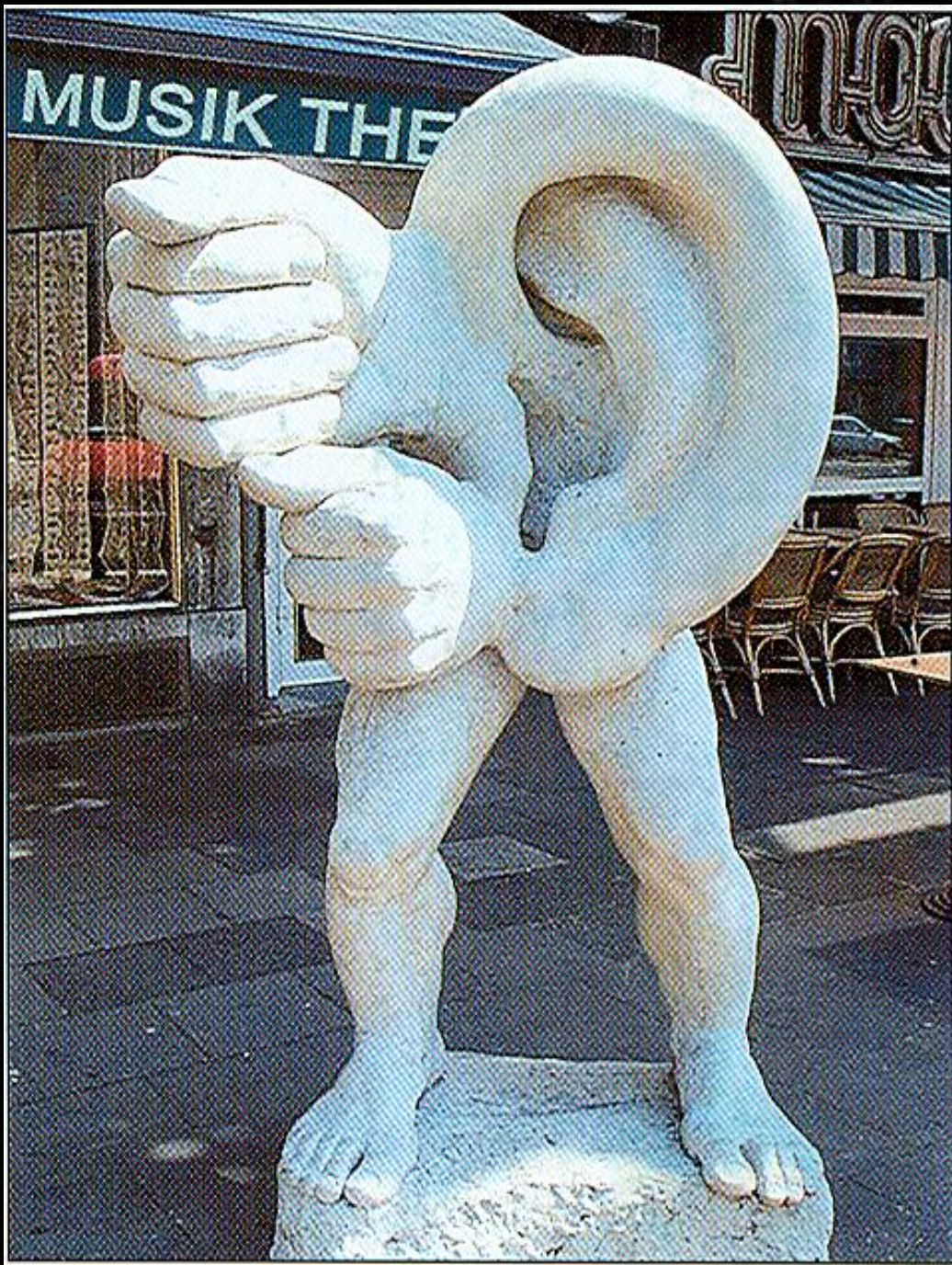
Контрольный вопрос



Рассчитайте остаточную интенсивность 100-милливаттного импульса, который потерял 30 дБ при прохождении через ткань.



Физические характеристики слухового анализатора



Памятник человеческому уху,
установленный на площади
Рудольфа в Кёльне. Правый кулак
этого символа по размерам
больше левого, что указывает на
преимущество правого уха перед
левым.

Разложение сложной волны

- Разложение Фурье: Любая сложная волна может быть представлена как сумма синусоидальных волн определённых частот и интенсивностей.
- **Акустический закон Ома:** аудио система человека разделяет сложную звуковую волну на составляющие ее компоненты. Функционально это означает, что человек слышит индивидуальные частоты, образующие сложный звук (аккорд). Т.е. ухо проводит анализ Фурье.
- Этот факт кардинально отличает слуховую и зрительную системы. Зрительная система не воспринимает по отдельности различные частоты, воздействующие на неё.

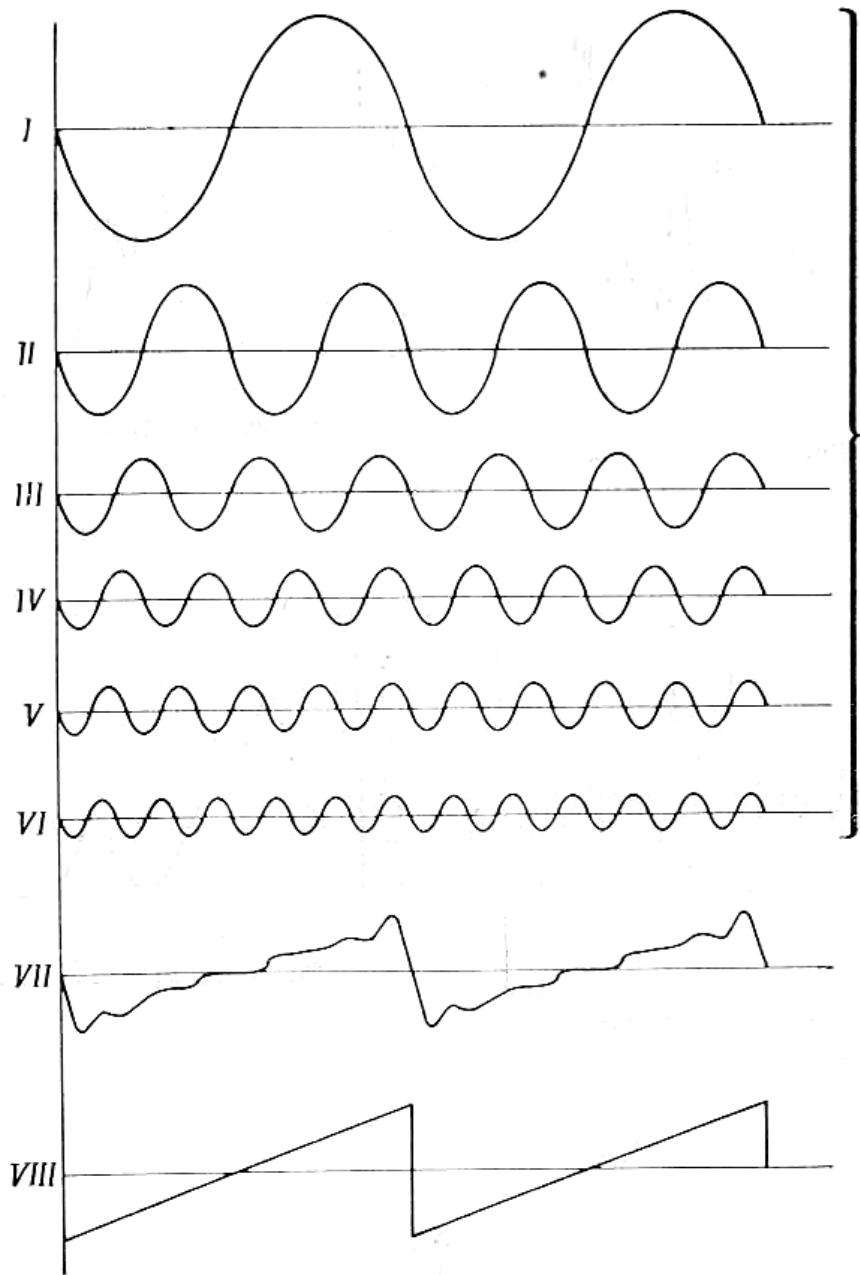


Рис. 151.

I — VI — отдельные синусоиды; VII — сумма шести синусоид, изображенных выше; VIII — сумма бесконечного числа синусоид с первыми шестью (синусоидами I — VI).

юе
,
, («ля»
«фа» 698
инимается
д, а не как
жнЫЙ звук,
вая
ит
ие
й
I на
е
ющие.

Ряд Фурье периодических функций

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1)$$

Где для диапазона от $-\pi$ до π коэффициенты ряда Фурье рассчитываются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx,$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Коэффициенты a_0, a_n и b_n называются **коэффициентами Фурье**, и если их можно найти,

то ряд (1) называется **рядом Фурье**, соответствующим функции $f(x)$. Для

ряда (1) член $(a_1 \cos x + b_1 \sin x)$ называется первой или **основной гармоникой**,

Диапазон интенсивностей

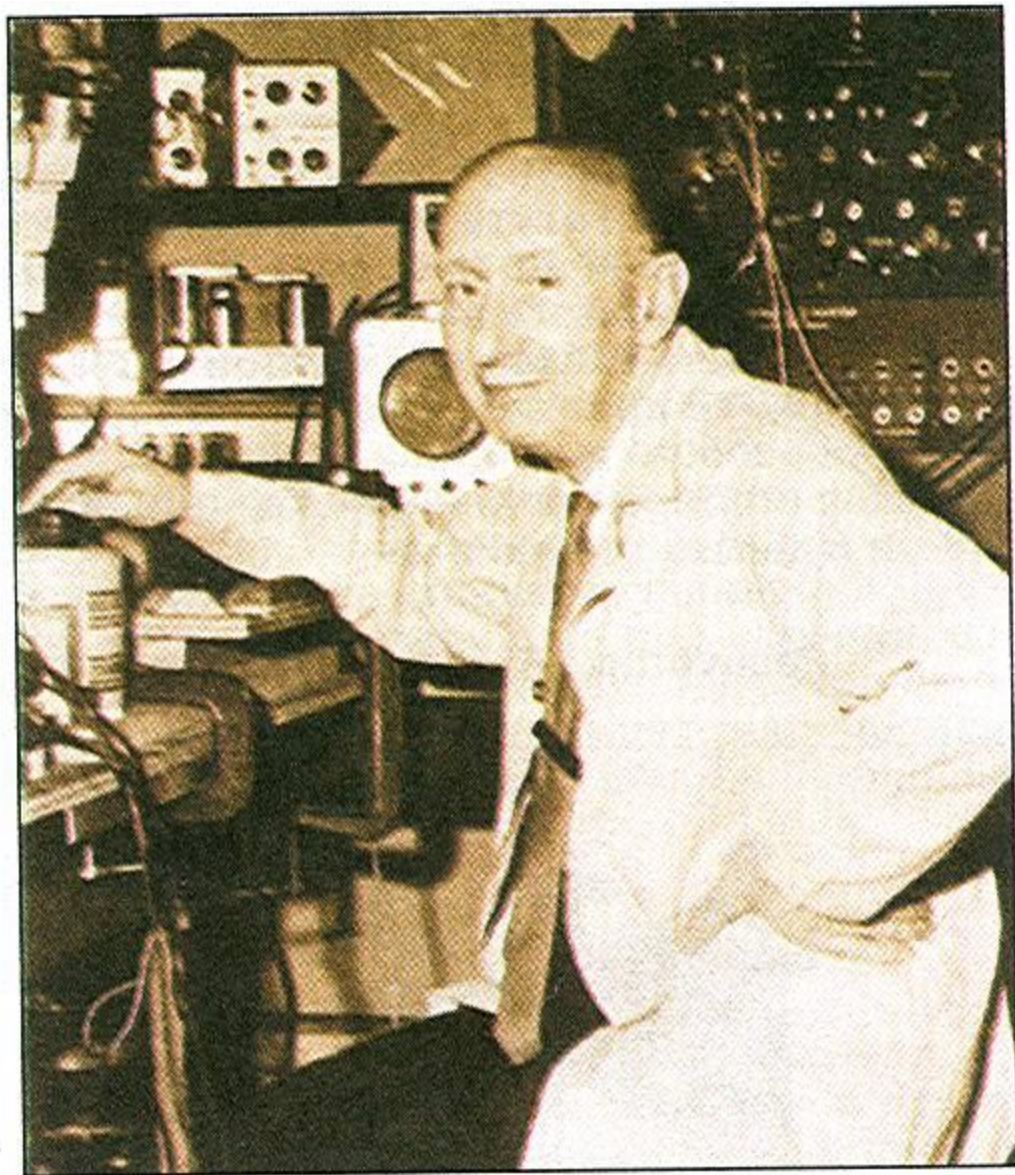
Звук	Интенсивность, дБ
	200
Запуск космического корабля с людьми на борту (на расстоянии 45 м)	● 180
	160
Порог болевой чувствительности	● 140
Сильный удар грома, шумовой оркестр	● 120
	100
Крик	● 100
Разговор	● 80
	60
	40
Тихий шепот	● 20
Порог слышимости при 1000 Гц	● 0

Высота звука

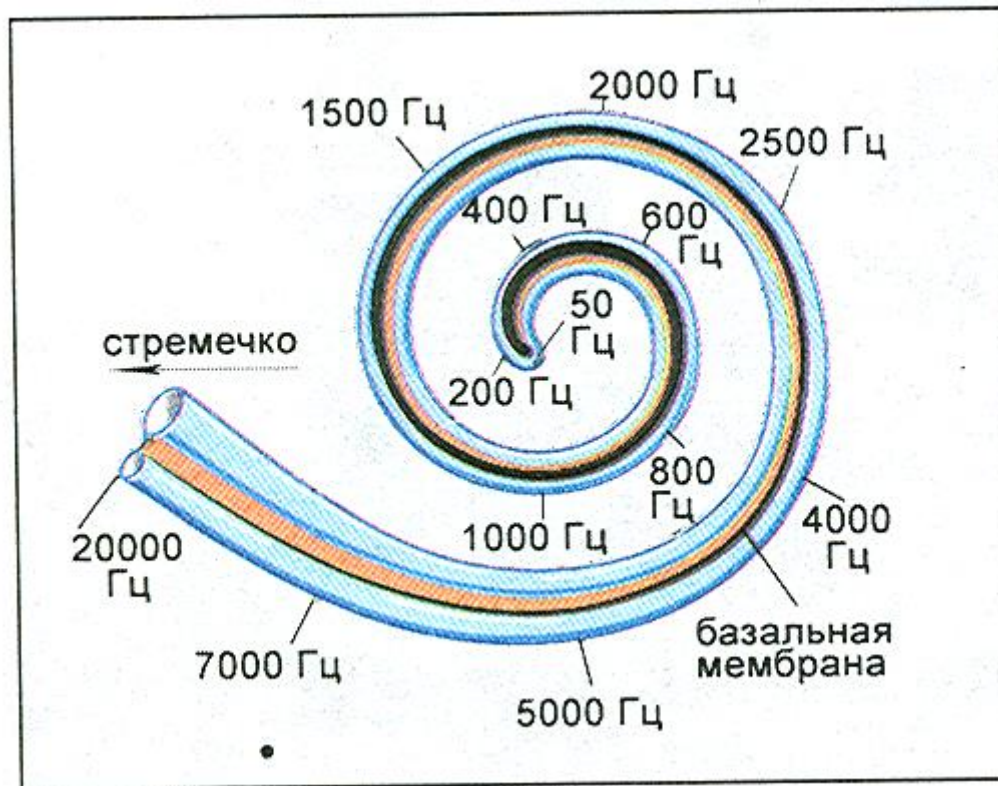
Звук	Частота, Гц
Самая низкая нота на рояле	27,5
Самая низкая нота певца (баса)	100
Самая низкая нота на кларнете	104,8
«До» первой октавы на рояле	261,6
«Ля» первой октавы	440
Самая высокая нота певицы (сопрано)	1000
Самая высокая нота на рояле	4180
Гармоники музыкальных инструментов	10 000
Предел слышимости для пожилых людей	12 000
Предел слышимости для человека	16 000—20 000



Итальянский анатом А. Корти (1822—1876), описавший строение улитки уха.



Д. Бекеша (1899—1972), получивший в 1961 году за исследования природы слуха Нобелевскую премию, в своей лаборатории.



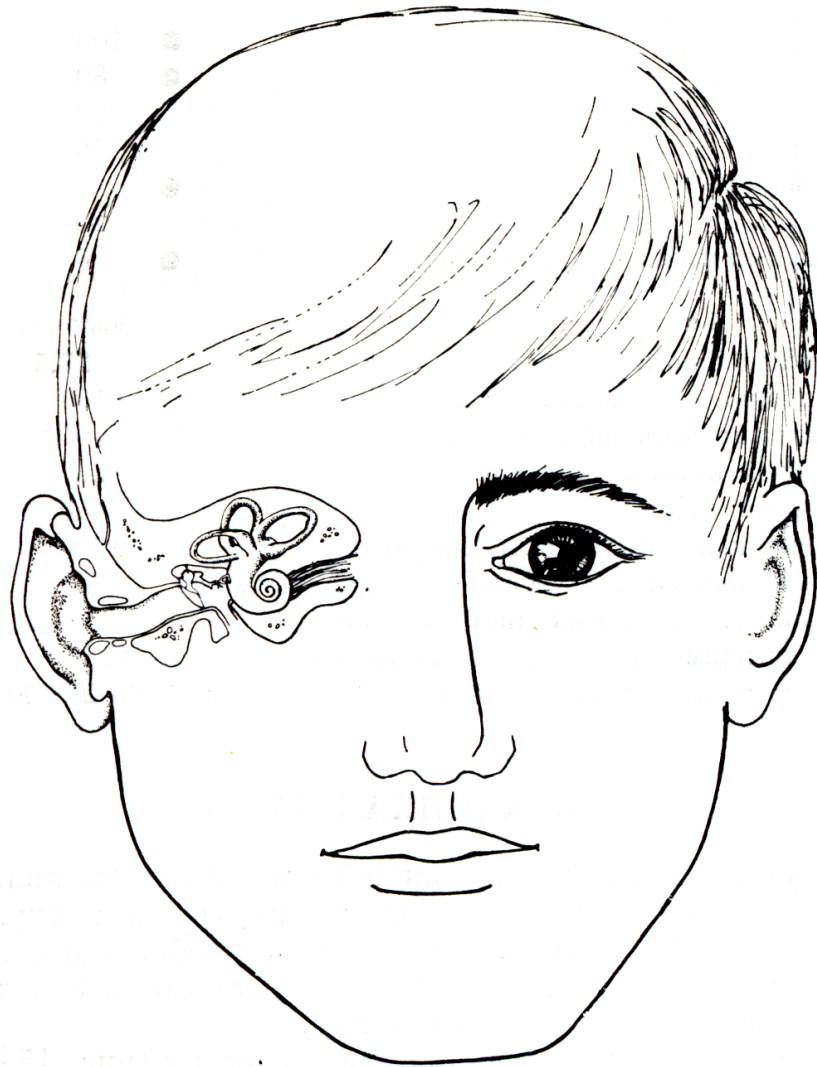
На схеме улитки уха указаны области базальной мембраны, возбуждаемые колебаниями различных частот. Начало улитки механически связано со стремечком, одной из косточек среднего уха.

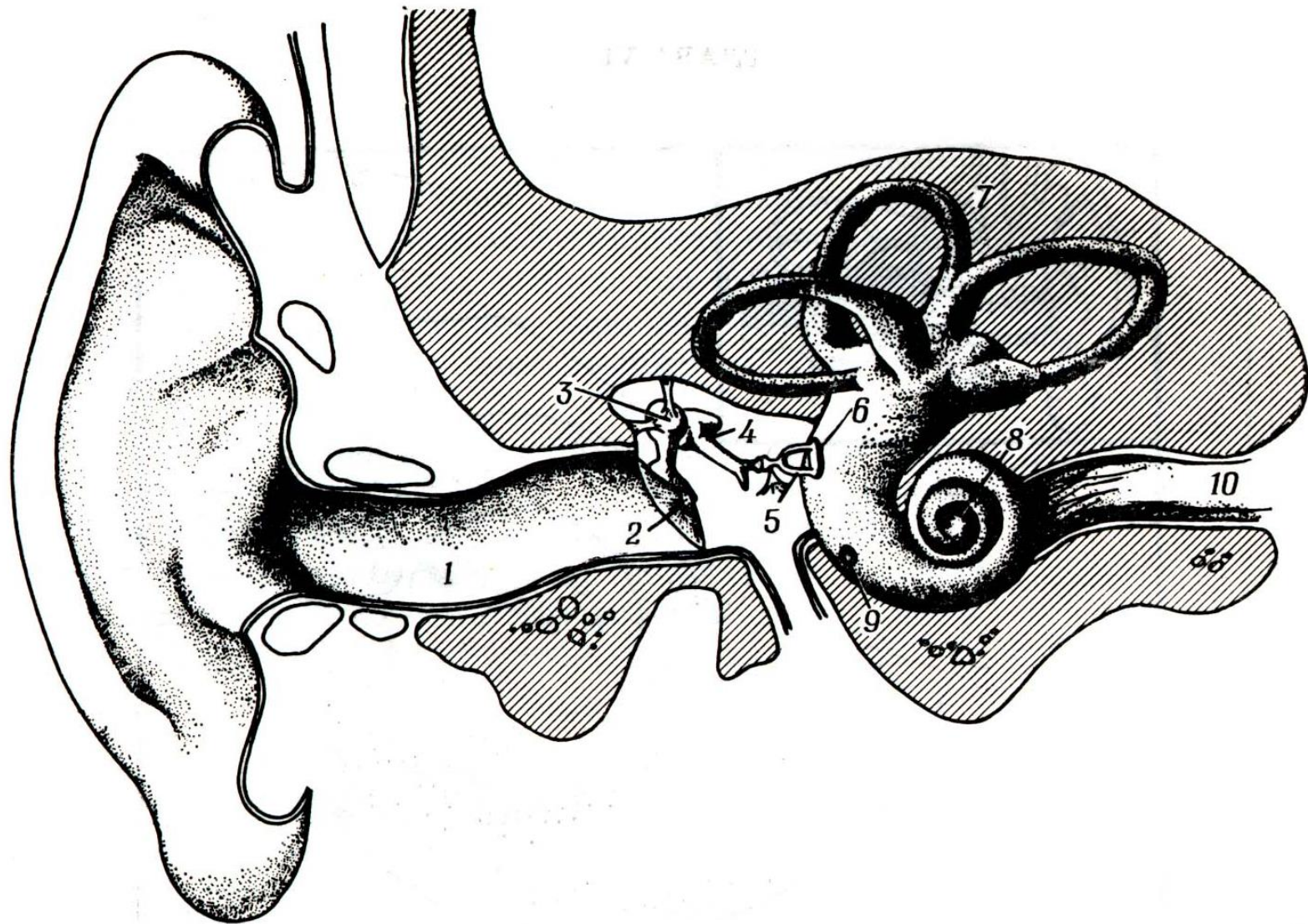
20 Гц – 20 кГц, пространств. разрешение 1° ,
диапазон интенсивностей ~ 140 дБ.

Механика уха

Ухо человека имеет поразительно сложное устройство.

Изменения давления воздуха преобразуются в длинной цепи приема и обработки слуховой системы.





1 — слуховой проход; 2 — барабанная перепонка; 3 — молоточек; 4 — наковальня; 5 — стремечко; 6 — овальное окно; 7 — полукружные каналы; 8 — улитка; 9 — круглое окно; 10 — слуховой нерв.

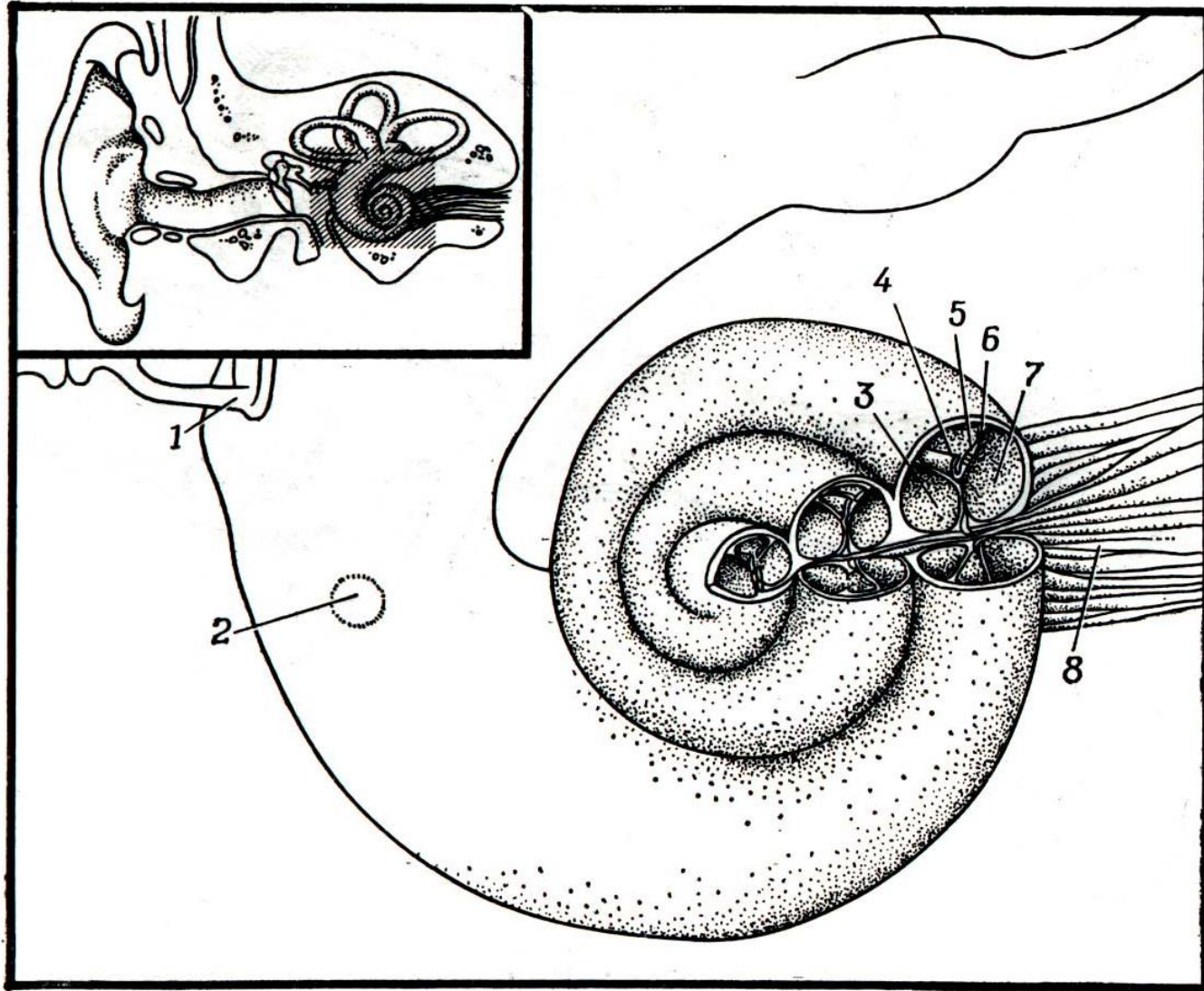
Внутреннее ухо

Спиралевидная костная структура в о внутреннем ухе называется улиткой. Это канал, образующий 2,5 витка и заполненный солевым раствором - несжимаемой жидкостью. Она имеет в длину 0,5 см и 1 см в ширину.

Две мембраны делят улитку на три узких хода, каждый из которых заполнен жидкостью. Основная мембрана имеет 3,2 см в длину.

Внутри улитки изменения давления преобразуются в электрический сигнал, передаваемый по слуховому нерву.

Улитка в разрезе



1 — стремечко над овальным окном; 2 — круглое окно; 3 — вестибулярная лестница; 4 — перепончатый канал; 5 — кортиев орган; 6 — основная мембрана; 7 — барабанная лестница; 8 — слуховой нерв.

Движения основной мембраны

Волна давления распространяется по всей длине улитки за 20 миллисек.

На основной мембране формируется бегущая волна. Мембрана выбухает у овального окна, затем это выбухание постепенно перемещается по мембране по направлению к вершине.

Свойства бегущей волны являются следствием упругих свойств мембраны и её геометрии (форма улитки). Мембрана расширяется по направлению от овального окна к вершине улитки. Её жёсткость так же возрастает – у вершины она в 100 раз менее упруга, чем у овального окна.

Амплитуда выбухания постепенно увеличивается по мере его продвижения. Точка на мембране, в которой оно достигает максимального размера, зависит от частоты звука. При дальнейшем продвижении к концу мембраны волна быстро затухает.

Для звуков высокой частоты максимальное смещение основной мембраны происходит возле овального окна, в остальной же части мембраны активность очень слаба. При звуках низкой частоты выбухание перемещается до самой вершины и достигает максимальной амплитуды непосредственно у конца мембраны.

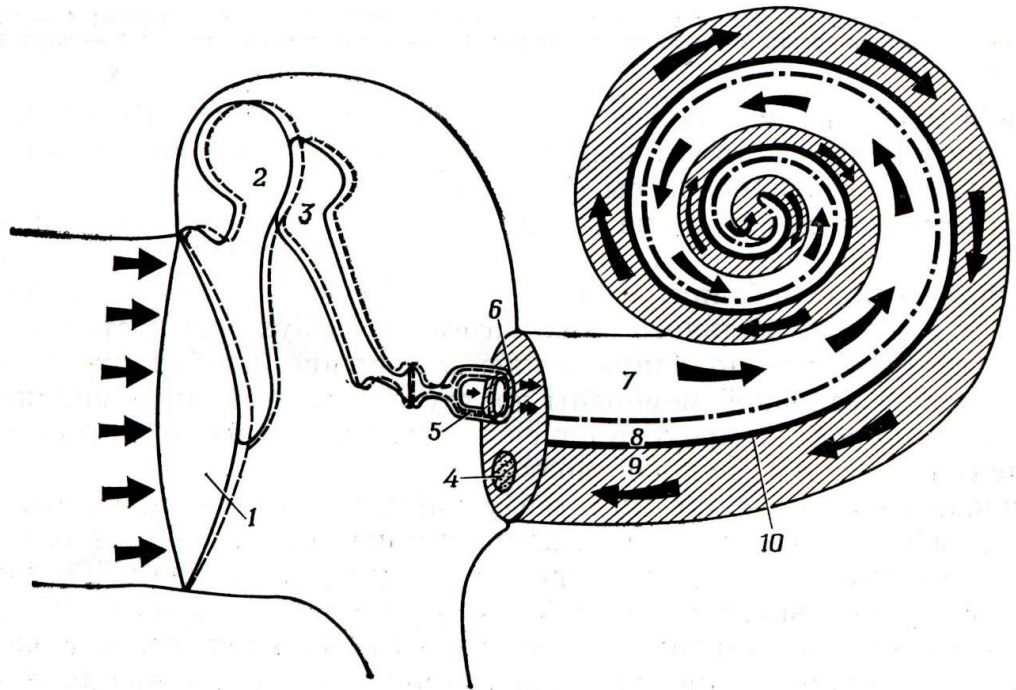
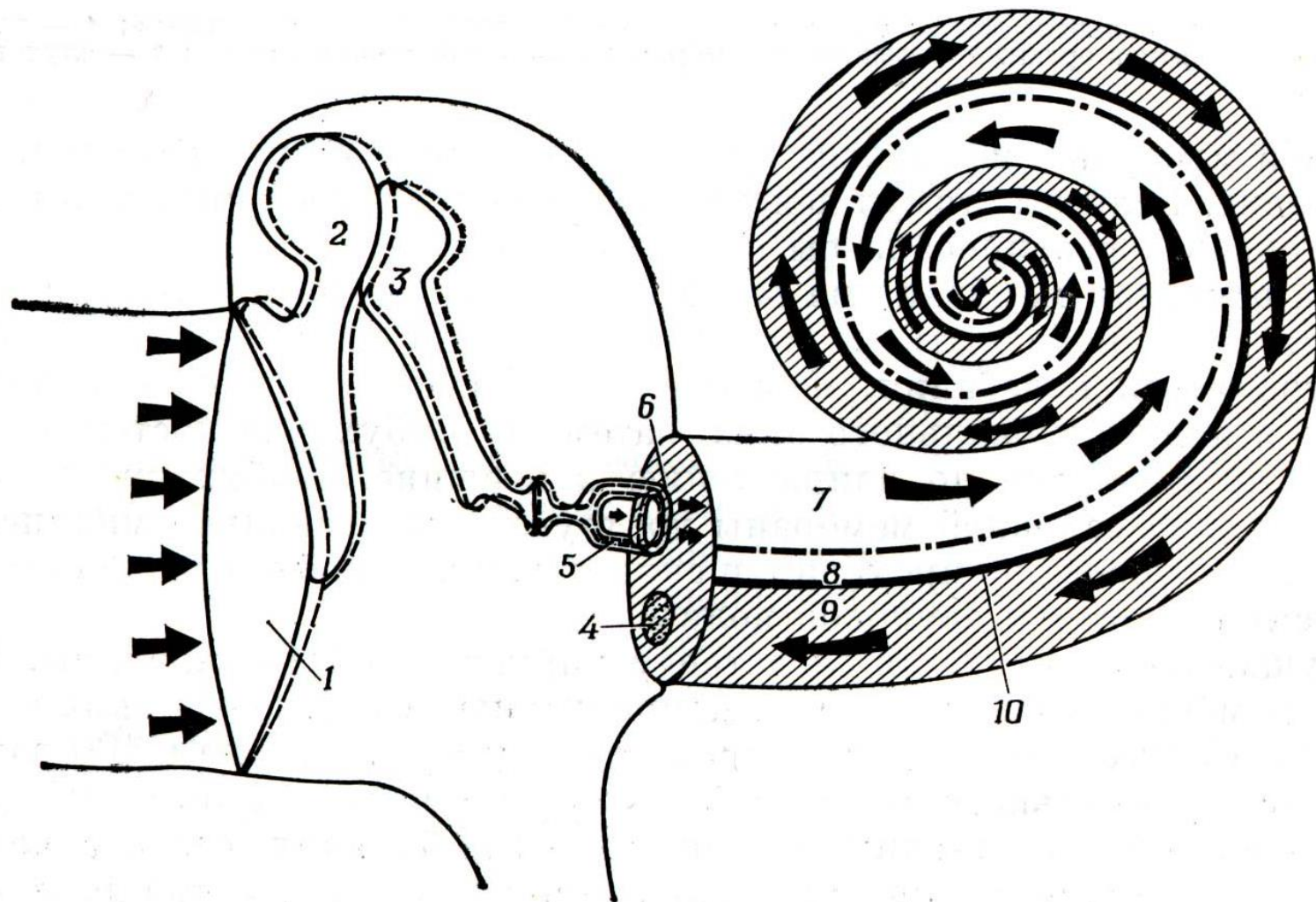


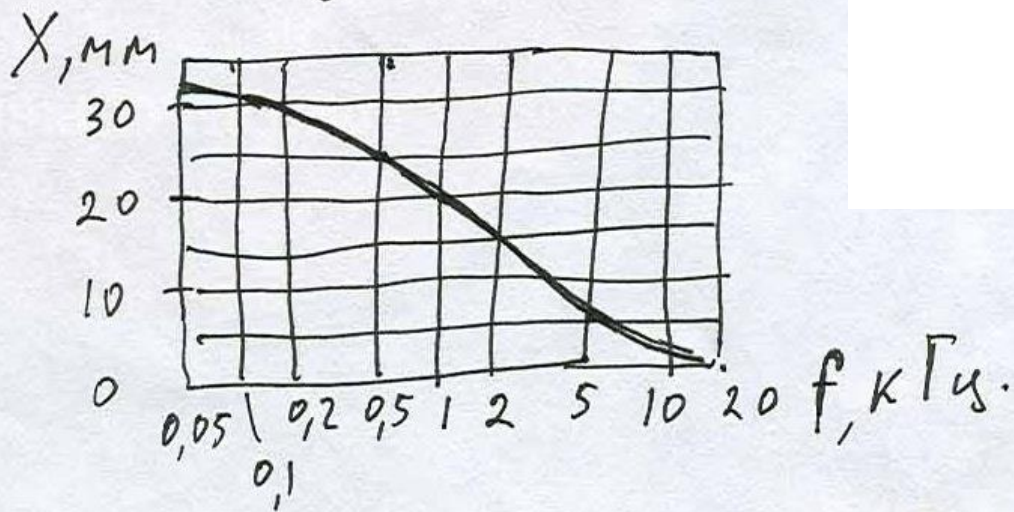
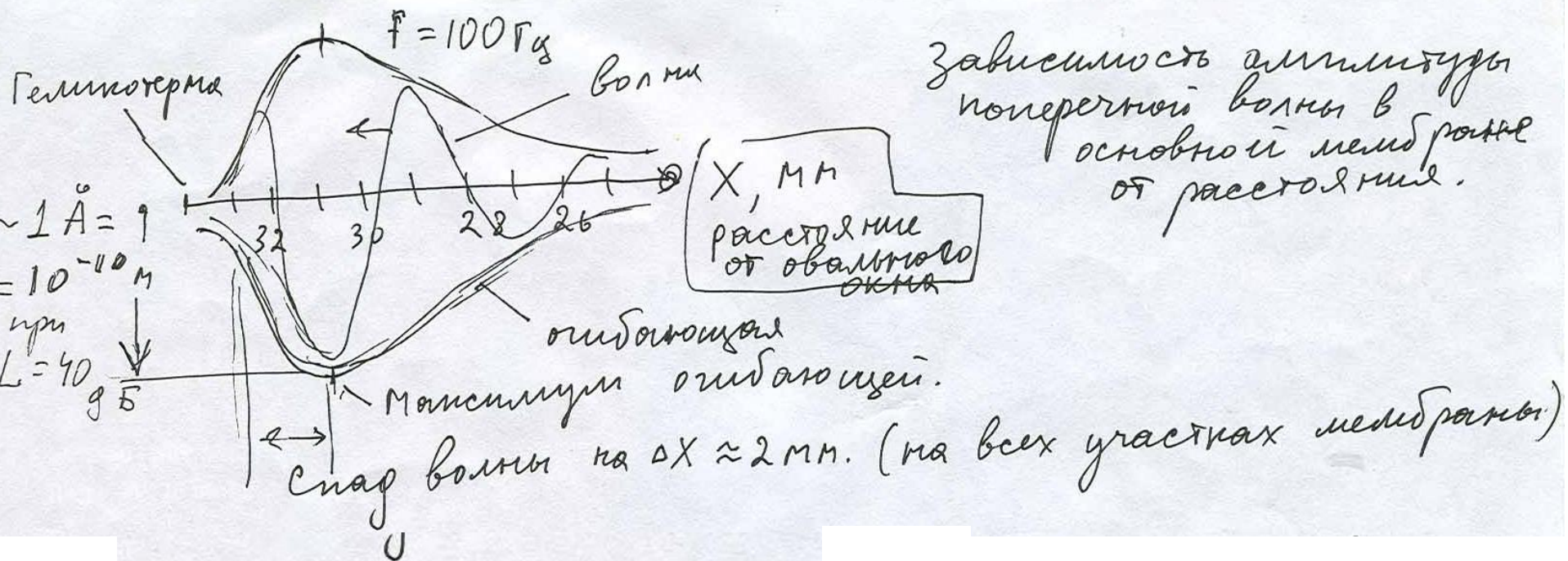
Рис. 154.

1 — барабанная перепонка; 2 — молоточек; 3 — наковальня; 4 — круглое окно 5 — стремечко; 6 — овальное окно; 7 — вестибулярная лестница; 8 — перепончатый канал; 9 — барабанная лестница; 10 — основная мембрана.

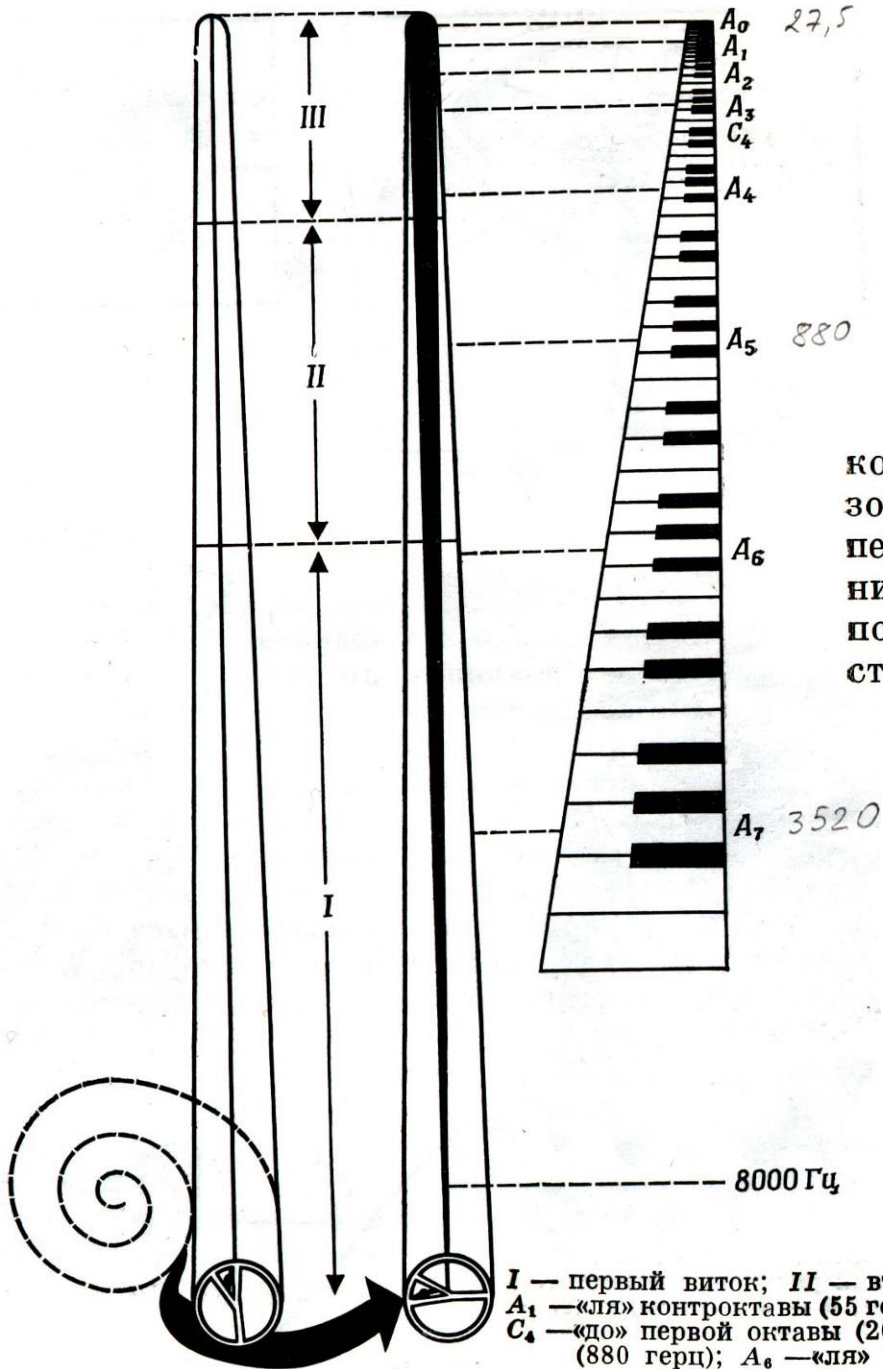


1 — барабанная перепонка; 2 — молоточек; 3 — наковальня; 4 — круглое окно 5 — стремечко;
 6 — овальное окно; 7 — вестибулярная лестница; 8 — перепончатый канал; 9 — барабанная лестница;
 10 — основная мембрана.

Положение максимума поперечных колебаний основной мембраны от частоты



Локализация активности



Характер этих колебаний таков, что разные звуковые частоты преобразуются в активность, локализованную в различных точках основной мембраны. Это перекодирование частоты звукового сигнала в колебания в определенном месте на основной мембране и позволяет утверждать, что ухо как бы разлагает поступающий сигнал в ряд Фурье.

I — первый виток; *II* — второй виток; *III* — третий виток. A_0 — «ля» субконтроктавы (27,5 герц); A_1 — «ля» контроктавы (55 герц); A_2 — «ля» большой октавы (110 герц); A_3 — «ля» малой октавы (220 герц); C_4 — «до» первой октавы (261, 63 герц); A_4 — «ля» первой октавы (440 герц); A_5 — «ля» второй октавы (880 герц); A_6 — «ля» третьей октавы (1760 герц); A_7 — «ля» четвертой октавы (3620 герц).

Волосковые клетки

- Основная мембрана представляет собой кусочек кожи с волосковыми клетками. Эти клетки являются частью кортиева органа.
- На мембране ~25000 волосковых клеток, которые образуют два слоя, разделённые дугой. Наружные волосковые клетки расположены в 3 – 5 рядов ближе к наружной стороне улитки (по одну сторону дуги). Внутренние волосковые клетки располагаются в один ряд.
- Волосковые клетки зажаты между двумя мембранами кортиева органа и любое движение основной мембраны заставляет их деформироваться, причём на наружные клетки оказывается более сильное воздействие, чем на внутренние. Эти деформации вызывают активность в соединяющихся с ними нервных волокнах, генерируя электрические импульсы, которые распространяются по слуховому нерву.

1. Конструкция внутренн. уха.

← Соединительной мембраны = 32 мм.; $20 \cdot 10^6$ сек - срок прохождения волны звука

4 ряда волосковых клеток по 3500 штук. } в кортеевом органе.

ниже 500 Гц → 140 различных градаций частот
от 500 до 16 кГц → 480 - " - " - " - "

Все 620 градаций равно мерно распределены по мембране

$$\frac{32 \text{ мм}}{620} = 52 \text{ мкм} \leftarrow \text{свободное пространство возбуждения на мембране, различное на слух.}$$

$$\frac{32 \text{ мм}}{3500 \text{ клеток}} = 9 \text{ мкм} \Rightarrow \text{эквивалентно свинцу на 6 волосковых клеток в одном из рядов}$$

Сигналы: все без исключения градаций высоты тона одинаковы и составляют $\frac{2400}{620} = 3,9 \text{ мел.} \Rightarrow 5,5$ волосковых клеток.

1 мел \Leftrightarrow 1,5 Волос. клеток.

1965 г.

Гарвардский университет (проф. Н. Кьянг), прорывные работы в области исследования физиологии слуха. Эксперименты по определению параметров сигналов, идущих от кортиева органа в соответствующие отделы полушарий головного мозга.

В волокна слухового нерва добровольцев и животных вводили тончайшие электроды. Удалось установить, что в ответ на звуковой раздражитель от улитки через отдельное волокно идут серии импульсов, тем более длинные, чем более высоким был звук. Волокно могло пропускать до 200 – 300 импульсов в секунду.

Поскольку человек способен слышать звуки до 20000 Гц, следует предположить, что в передаче информации в мозг даже для сигнала одной частоты участвуют множество нервных волокон.

1970 г.

Университет Джорджа Хопкинса. (проф. М. Сакс, Э. Янг). Исследования реакции слухового нерва на сложные сигналы (речь). Выявилось наличие обширной информации, закодированной в распределении импульсов в серии, которая позволяет нам улавливать речь среди шума или локализовать источник звука в пространстве.

Результаты большого количества опытов: кортиев орган совмещает в себе функции анализатора спектра и своеобразного аналого-цифрового преобразователя.

После того, как информация об основной частоте и интенсивности сигнала закодирована слуховыми волокнами, сигнал направляется к мозгу. При этом выполняются такие операции как: извлечение специфической акустической информации, определение локализации источника, громкости и высоты звука.

Мы не будем рассматривать обработку акустической информации в нейронах слуховой системы.

Параметры звука. Громкость

- Громкость тона зависит от его интенсивности и частоты. При постоянной частоте интенсивные звуки кажутся более громкими, чем слабые. Но при постоянной интенсивности звуки очень высокой и очень низкой частоты кажутся более тихими, чем звуки средней частоты.



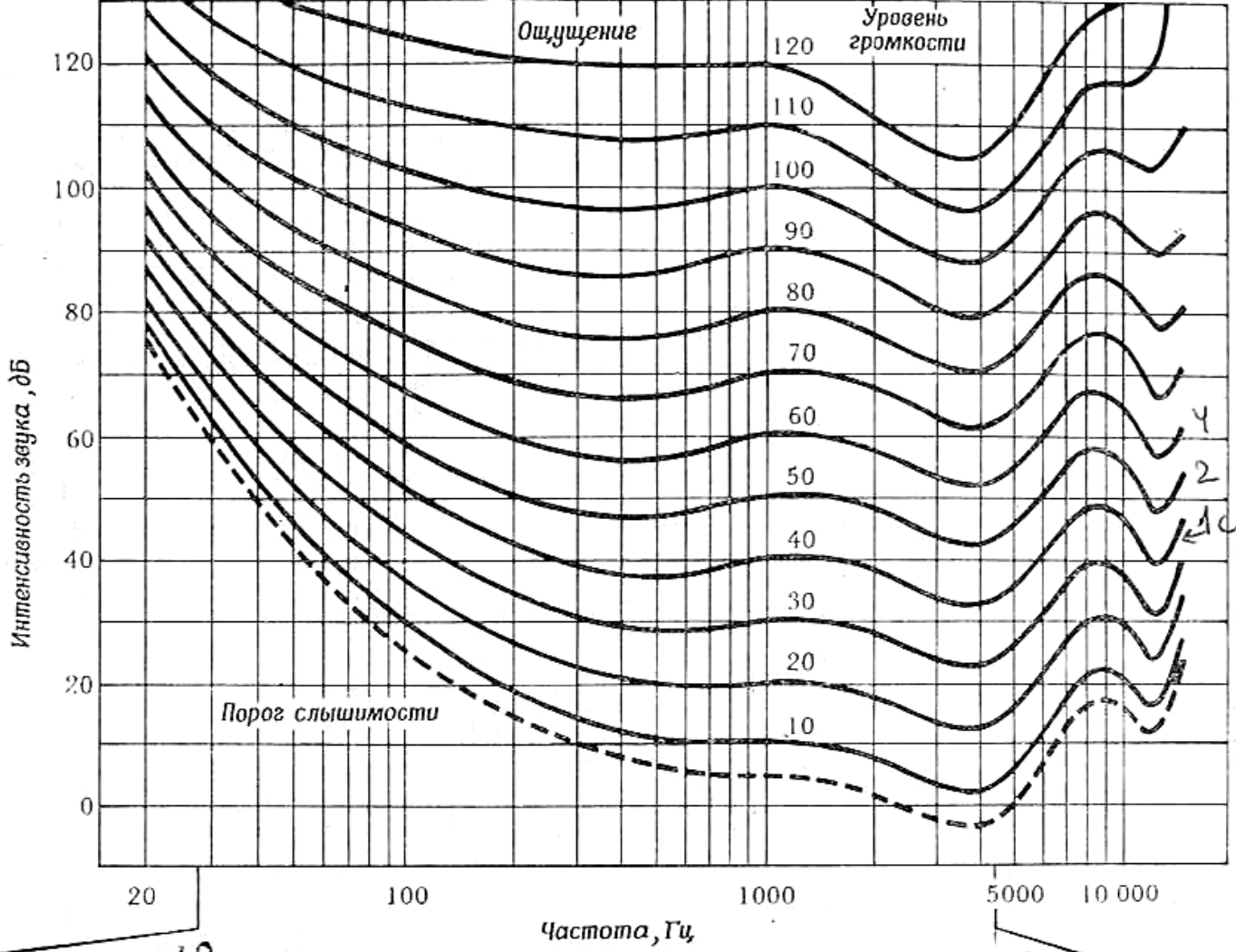
Х. Флетчер (1884—1981) построил кривые равной громкости, используемые в качестве международного стандарта.

Нью-Йорк, лаборатория Белла.

Исследования особенностей восприятия ухом звуковых частот.

Определение кривых равной громкости

Взаимодействие частоты и интенсивности при восприятии громкости можно обнаружить, если попросить испытуемых сравнить два тона, имеющие различные частоты и интенсивность. Пусть один тон служит эталоном и имеет фиксированную частоту, интенсивность и длительность, например частоту 1000 герц, интенсивность 40 децибел и длительность 0,5 секунды; назовем его *стандартным тоном*. Вторым тоном будет *тоном сравнения*. Пусть он также имеет длительность 0,5 секунды, но при иной частоте, скажем 3000 герц. Задача испытуемого заключается в том, чтобы попеременно прислушиваться то к стандартному тону, то к тону сравнения, регулируя интенсивность последнего, пока он не будет звучать с точно такой же громкостью, как и стандартный тон. Когда это будет достигнуто, установите тон сравнения на другую частоту и повторите всю процедуру. Типичный результат представлен на рис. 170. Кривые показывают интенсивности, при которых тоны различных частот имеют такую же громкость, как и стандартный тон. Эта кривая называется *контуром равной громкости*. Уровень громкости этой кривой равен громкости эталона, потому что при ее построении частота тона менялась и его громкость подстраивалась к громкости стандартного тона.



A₀ B₀ C₁ D₁ E₁ F₁ G₁ A₁ B₁ C₂ D₂ E₂ F₂ G₂ A₂ B₂ C₃ D₃ E₃ F₃ G₃ A₃ B₃ C₄ D₄ E₄ F₄ G₄ A₄ B₄ C₅ D₅ E₅ F₅ G₅ A₅ B₅ C₆ D₆ E₆ F₆ G₆ A₆ B₆ C₇ D₇ E₇ F₇ G₇ A₇ B₇ C₈



27,50
30,87
32,70
36,71
41,20
43,65
49,00
55,00
61,74
65,41
73,42
82,41
87,31
98,00
110,00
123,47
130,81
146,83
164,81
174,61
196,00
220,00
246,94
261,63
293,66
329,63
349,23
392,00
440,00
493,88
523,25
587,33
659,26
698,46
783,99
880,00
987,77
1046,50
1174,66
1318,51
1396,91
1567,96
1760,00
1975,53
2093,00
2349,32
2637,02
2793,83
3135,96
3520,00
3951,07
4186,01

Параметры звука. Слушание музыки

- Различные музыкальные инструменты имеют различные диапазоны частот, обычно в зоне, где восприятие громкости наиболее сильно зависит от изменений частоты.
- Т.е. 1. не при любых уровнях интенсивности можно услышать все частоты, издаваемые инструментами; 2. относительная громкость звучания различных инструментов зависит от уровня громкости, что приводит к искажению восприятия музыкального произведения.
- Необходимо выполнять тонкомпенсацию в радиоаппаратуре. Высококачественные усилители имеют регуляторы громкости с тонкомпенсацией.

Параметры звука. Маскировка

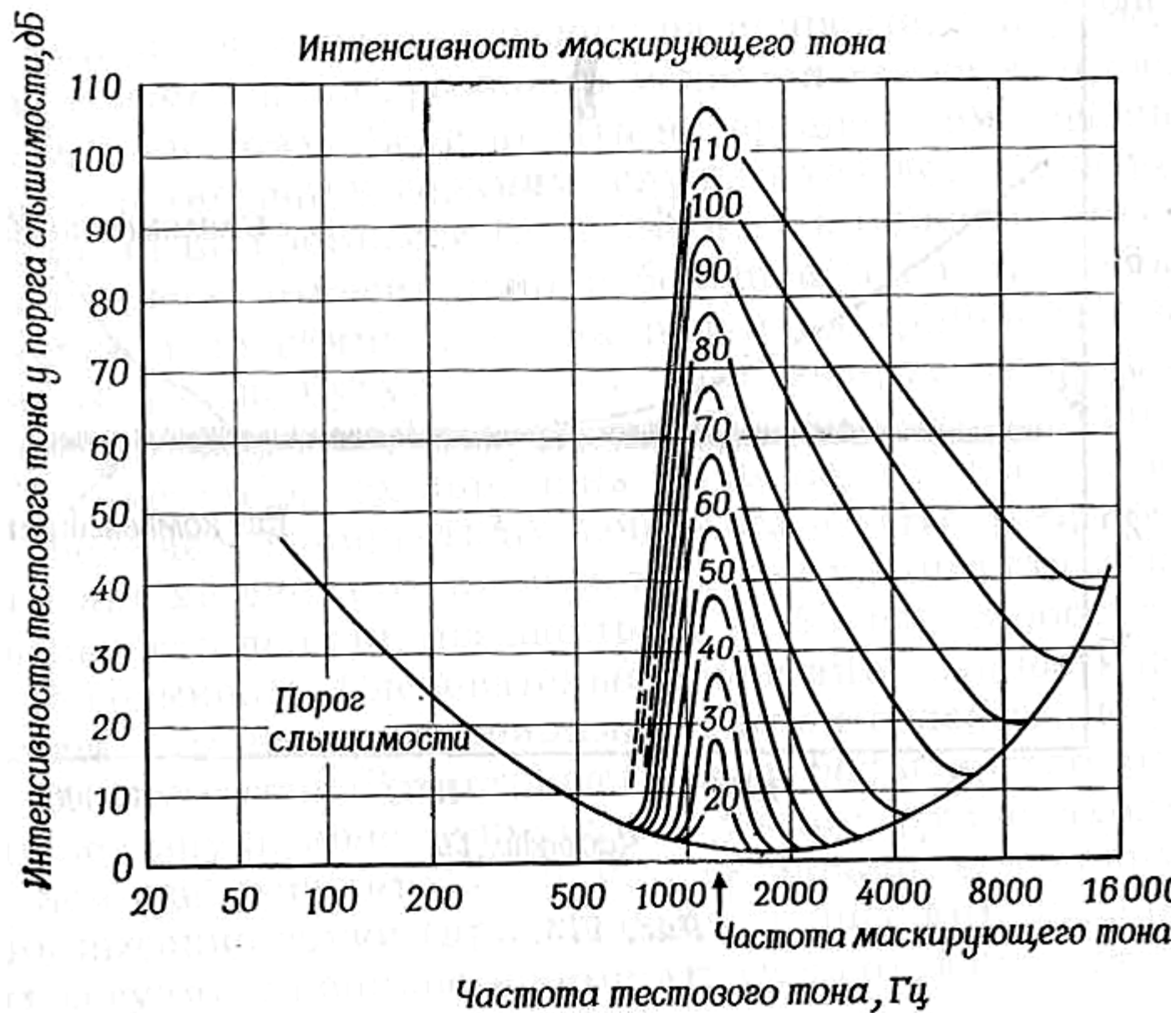
Воспринимаемая громкость звука зависит не только от его собственной интенсивности, но и от других звуков, действующих одновременно. Звуки маскируют друг друга. Для определения эффекта маскировки нужно измерить, насколько более интенсивным должен быть тестовый звук, чтобы он был слышен при наличии маскирующего звука.

Эксперимент по маскировке. Испытуемому предъявляют

2 тона = тестовый +маскирующий ($f=1200$ гц, интенсивность 20 - 110дб)

Маскирующий тон имеет фиксированную интенсивность и частоту. Тестовый тон имеет некоторую частоту, а его интенсивность меняют до тех пор, пока он не станет еле слышимым. Эту процедуру повторяют с тестовыми тонами и строят кривую маскировки.

Кривая маскировки показывает какой интенсивностью долже обладать при различных частотах тестовый тон, чтобы его можно было расслышать в присутствии маскирующего звука.



Наиболее удивительная особенность этих данных – их асимметричность. Маскирующий звук оказывает относительно небольшое влияние на тоны ниже его собственной частоты (1200 герц), но сильно затрудняет восприятие более высоких звуков.

Параметры звука. Маскировка

Механизм маскировки. Асимметрия кривых вытекает из распределения колебаний в основной мембране. Если тон слаб и несколько превышает по частоте маскирующий, он не воспринимается, так как высокие частоты действуют на ограниченный участок мембраны. Но тот же самый слабый тон, если он ниже маскирующего по частоте, вызывает активность в не перекрывающемся участке мембраны и оказывается слышимым. (Асимметрия геликотермы).

Маскировка в музыке. Громкозвучащие, низкочастотные инструменты маскируют звуки тихих, высокочастотных инструментов. Виолончели маскируют скрипки, ударные – маскируют виолончели, медные духовые маскируют деревянные и т.д.. При звукозаписи и воспроизведении характер маскировки может измениться.

Параметры звука. Единицы измерения субъективного восприятия громкости

Между психологическим восприятием громкости и физической интенсивностью звука нет прямого соответствия.

Испытуемому предъявляют 2 тона равной частоты и спрашивают во сколько раз один из них кажется ему громче другого.

Психологическая
оценка громкости

$$J = kI^{0,3}.$$

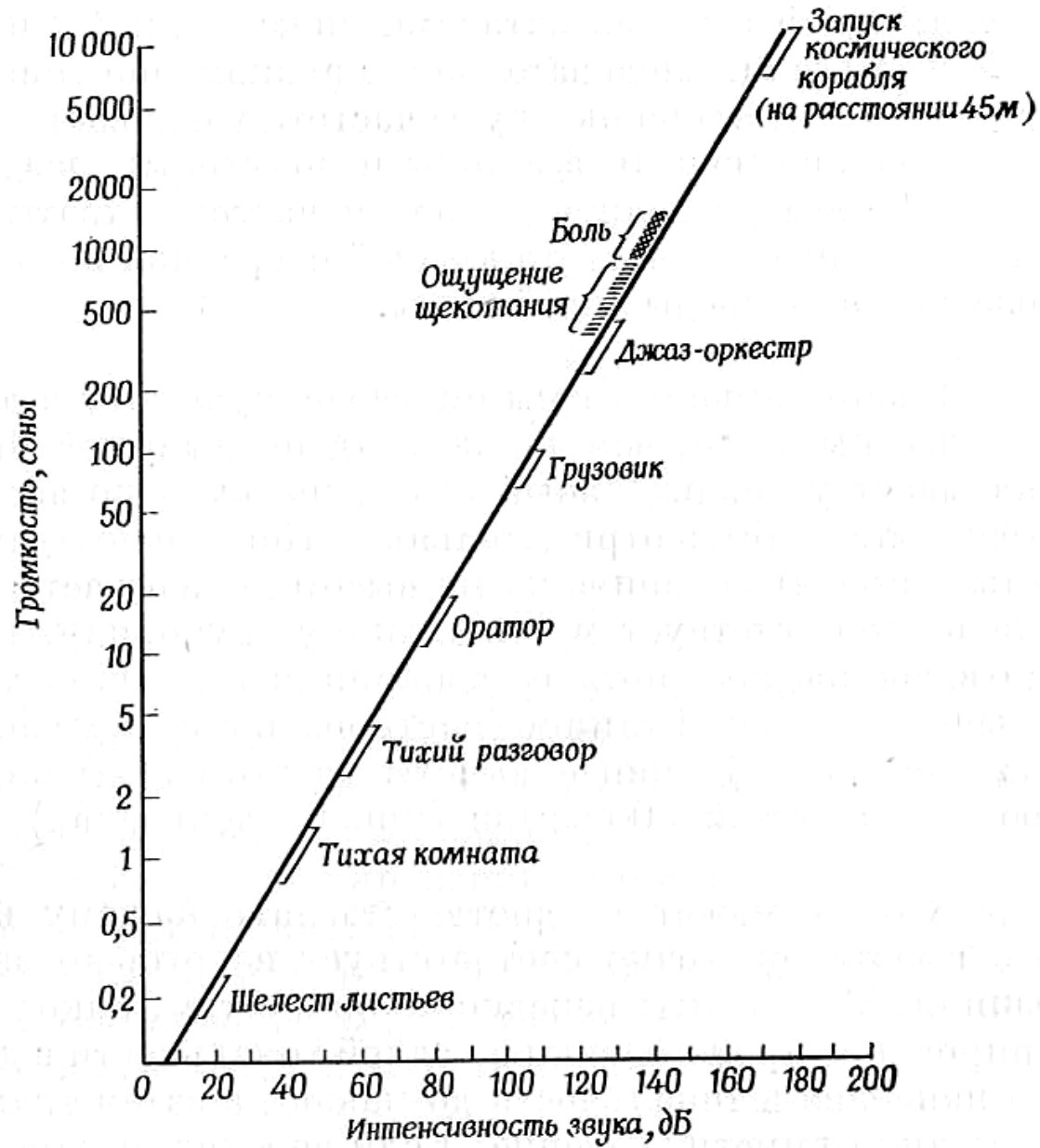
Физическая интенсивность
звуча

Это значение показателя степени (0,3) очень удобно. Получается, что если интенсивность звука выразить в децибелах, увеличение ее на 10 децибел всегда увеличивает громкость вдвое; при возрастании физической интенсивности в 10 раз психологическая громкость возрастает в 2 раза (рис. 178).

Международной организацией по стандартизации была введена единица громкости

1 сон – громкость тона при частоте 1000 гц и интенсивности 40 децибел.

Восприятие громкости



Следует различать

0. Интенсивность звука

1. f – частоту тона как физический параметр раздражения.
2. H_r – Гармоническую высоту тона \Rightarrow нотная запись $\sim \lg f$ – параметр раздражения.
3. Z – Высота тона как субъективный параметр ощущения.
4. По аналогии с 2 вводится H_M – мелодическая высота тона $\sim \lg z$.

Октавы

$$H_r = \frac{1}{0,301} \lg \left(\frac{f}{131} \right) \text{ октав.}$$

$$H_M = \frac{1}{0,301} \lg \left(\frac{Z}{131} \right) \text{ октав}$$

Музыкальный звукоряд

Гармонические октавы

- Музыкальный звукоряд связан логарифмической зависимостью с частотой звука. Каждая следующая октава ровно вдвое превышает по частоте предыдущую.
- A_4 (ля 1-ой октавы) – 440 гц. (A_5 (ля 2-ой октавы)- 880 гц, A_6 – 1760 гц)
- Октава содержит 12 звуков (считая тоны и полутоны), разделённые равными частотными интервалами. Частота очередной ноты в корень двенадцатой степени из 2 раз выше частоты предыдущей ноты.

$$\sqrt[12]{2}$$

- Do_1 Do_2 Do_3 Do_n
- f_1 $2f_1$ $4f_1$ $2^n f_1$

Единицы измерения субъективного восприятия

Когда испытуемым предъявляют разные ноты и просят сравнить их по высоте, то воспринимаемая высота не соответствует музыкальному звукоряду.

Высота
тона

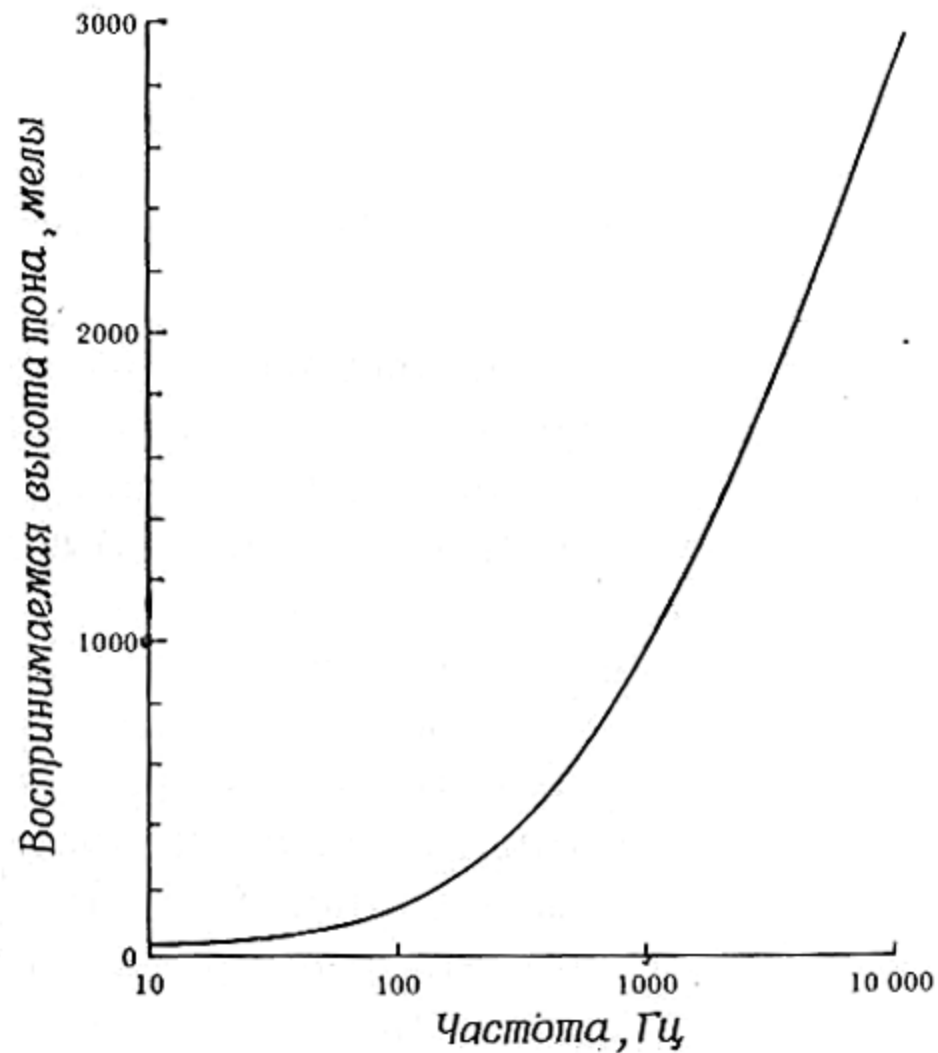
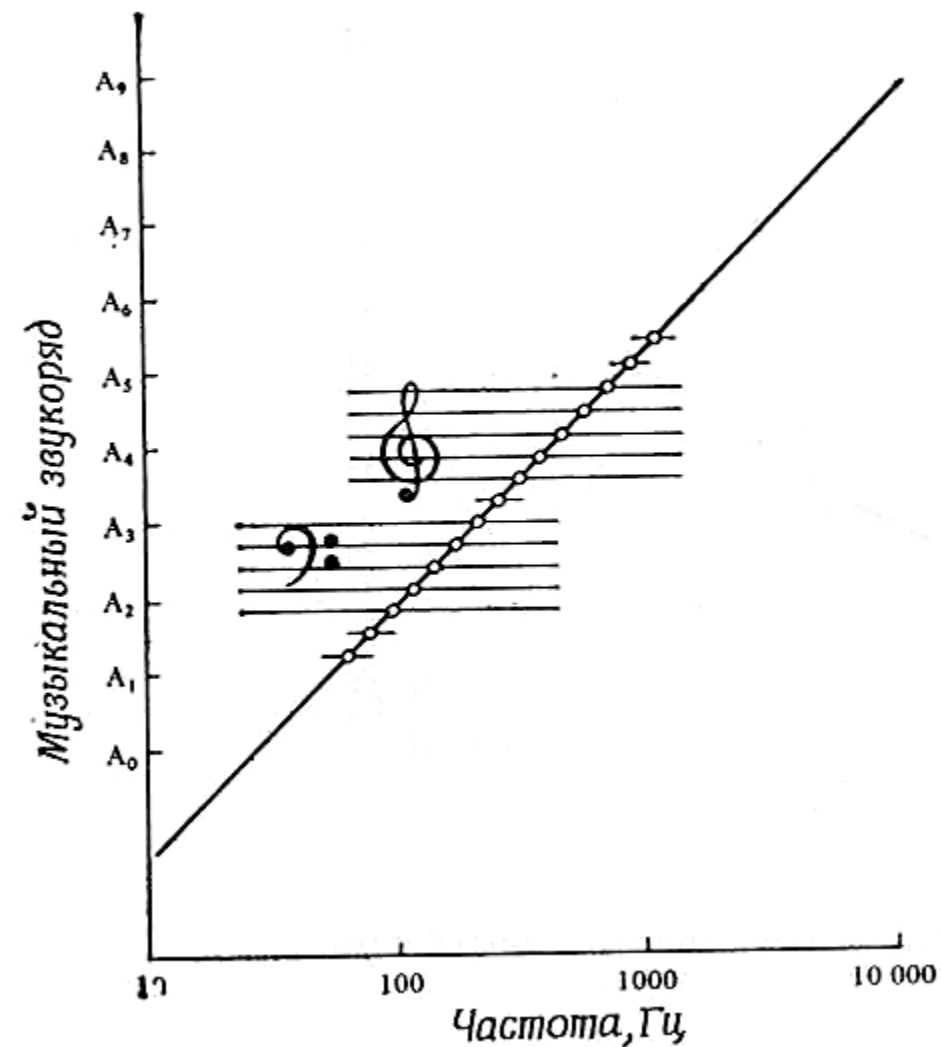
=

$$\begin{array}{l} L = 80 \text{ Дб}, \tau = 1 \text{ сек} \\ F = 131 \text{ Гц} \end{array}$$

= 131 Мел

Определение: тон частотой 1000 герц (при 60 дб) имеет высоту 1000 мел.

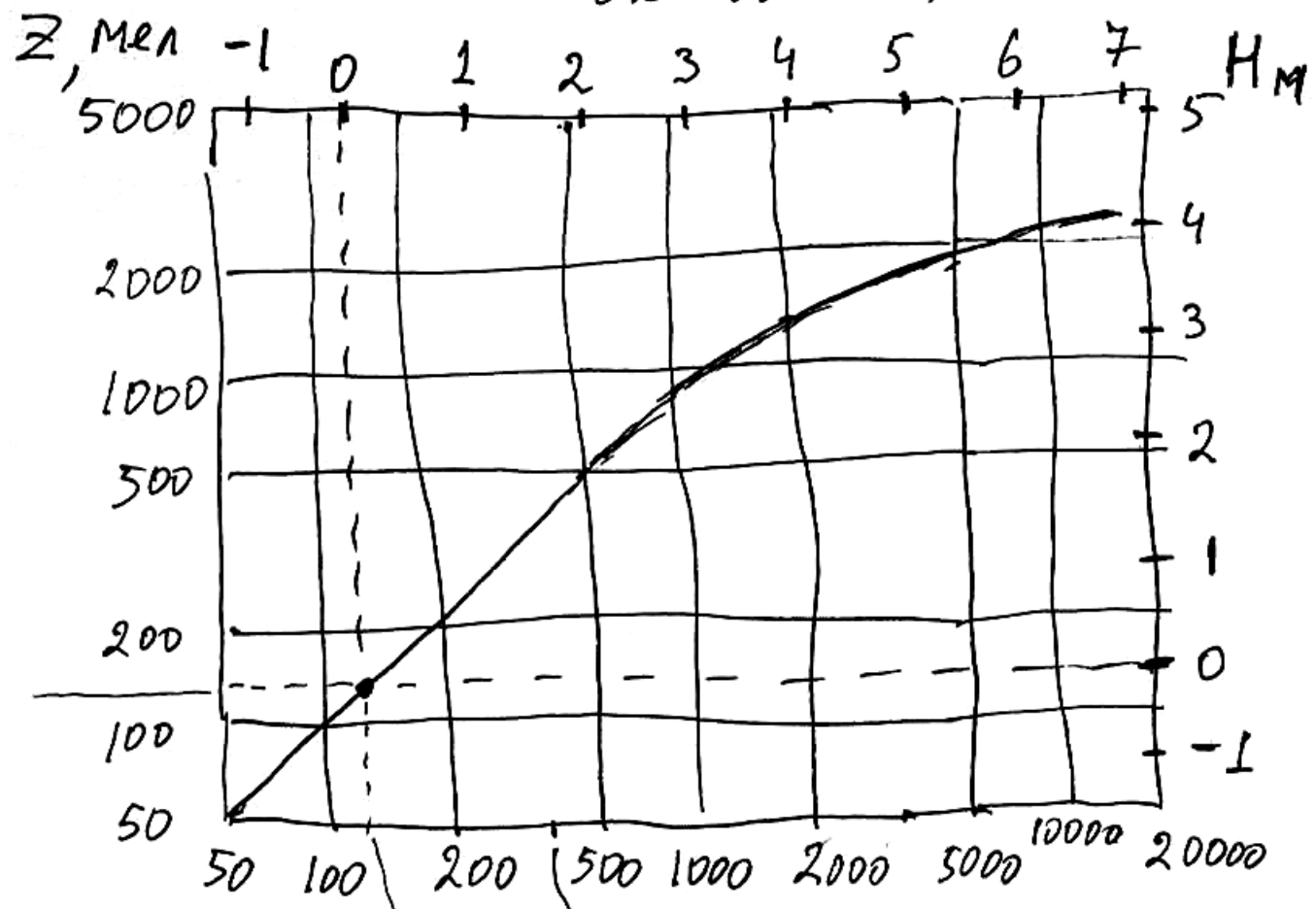
На более низких, чем 131 гц, частотах шкалы мелов и герц совпадают, а выше начинают заметно, но плавно расходиться.



Ухо различает 24 тональные и частотные группы по $\Delta z = 100$ мел (не для мелодич чистых нот. Для маскировки узкополосного и широкополосного шумов (например, речь))

(высота тона)
Гармонические (7) октавы

Hr



131 м

131 Гц
C₀ ("Do")

440 Гц
a₁ (Ля)
1,75 октавы

f, Гц

Различение высоты тона

Для распознавания речи достаточно ввести 24 полосовых фильтра с Δf от 100 Гц до $\Delta f = 3,5$ кГц.

Для чистых музыкальных тонов

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt[12]{2}$$

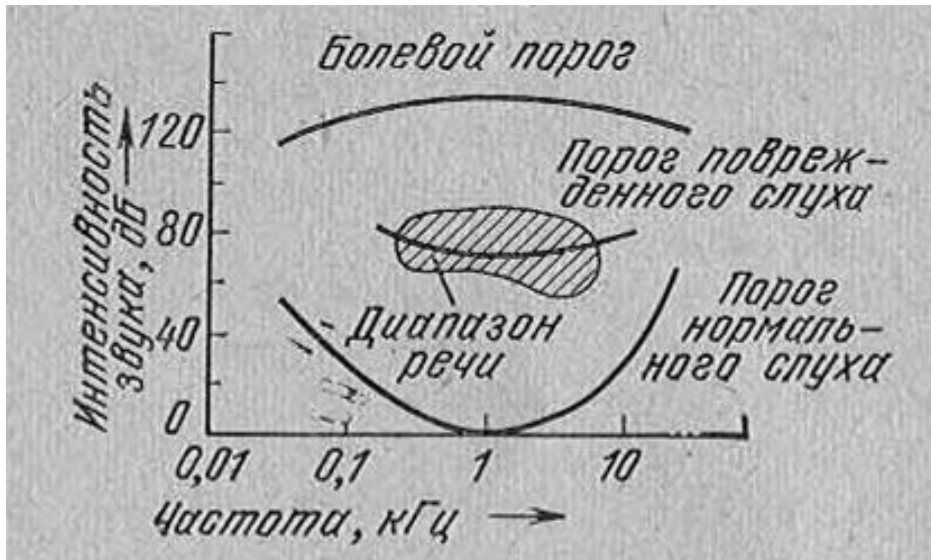
f_1, f_2 – разница в один полутон для N_r различима во всём диапазоне для тренированного слуха.

Пространственное восприятие звука

- Бинауральное восприятие. Точное время и интенсивность, с которой звуки достигают обеих ушей, позволяют локализовать источник. Слуховая система способна различать временные расхождения ~ 10 или 20 микросек.

Цели исследования слуха

- Определить область слышимости и причины её сужения
- Выяснить, нуждается ли слух пациента в в корректировке и можно ли её осуществить с помощью слухового аппарата



Плоскость слышимости

Диапазон слуха нормального человеческого уха.

Кривая порога поврежденного слуха на рис. пересекает диапазон речи. То есть пациент, имеющий такую кривую порога слуха, уже глухой. Он плохо понимает речь, поскольку не воспринимает звуки в диапазоне речи, по интенсивности находящиеся ниже кривой порога поврежденного слуха.

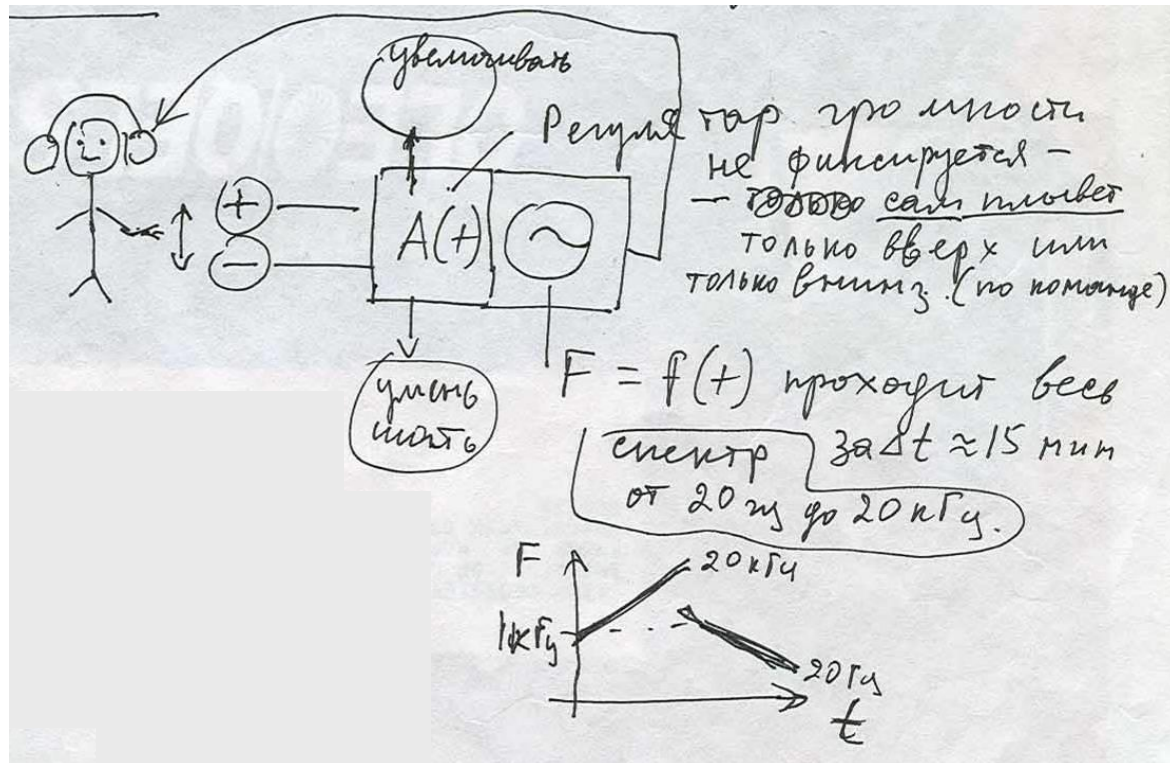
Аудиометр

Аудиометр – генератор звуковой частоты, частоту и интенсивность звука можно регулировать.

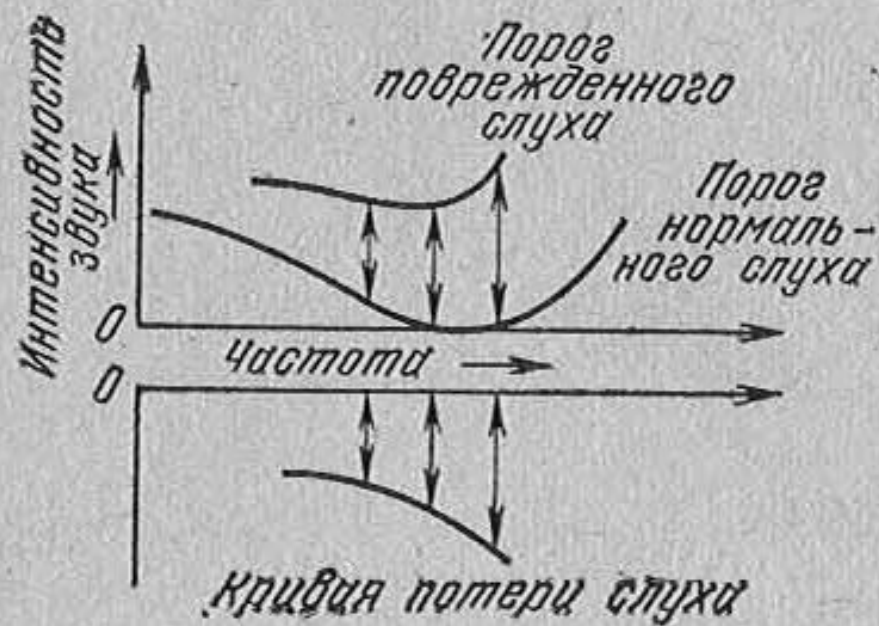
Чистый звуковой тон от аудиометра подаётся на наушники или кость позади уха.

«Маскировка» второго уха белым шумом.

Сурдокамера.



Итак, с помощью аудиометров можно определять, по сути дела, кривую порога слуха. Однако врача интересует скорее то, какова потеря слуха у больного на отдельных частотах по сравнению со

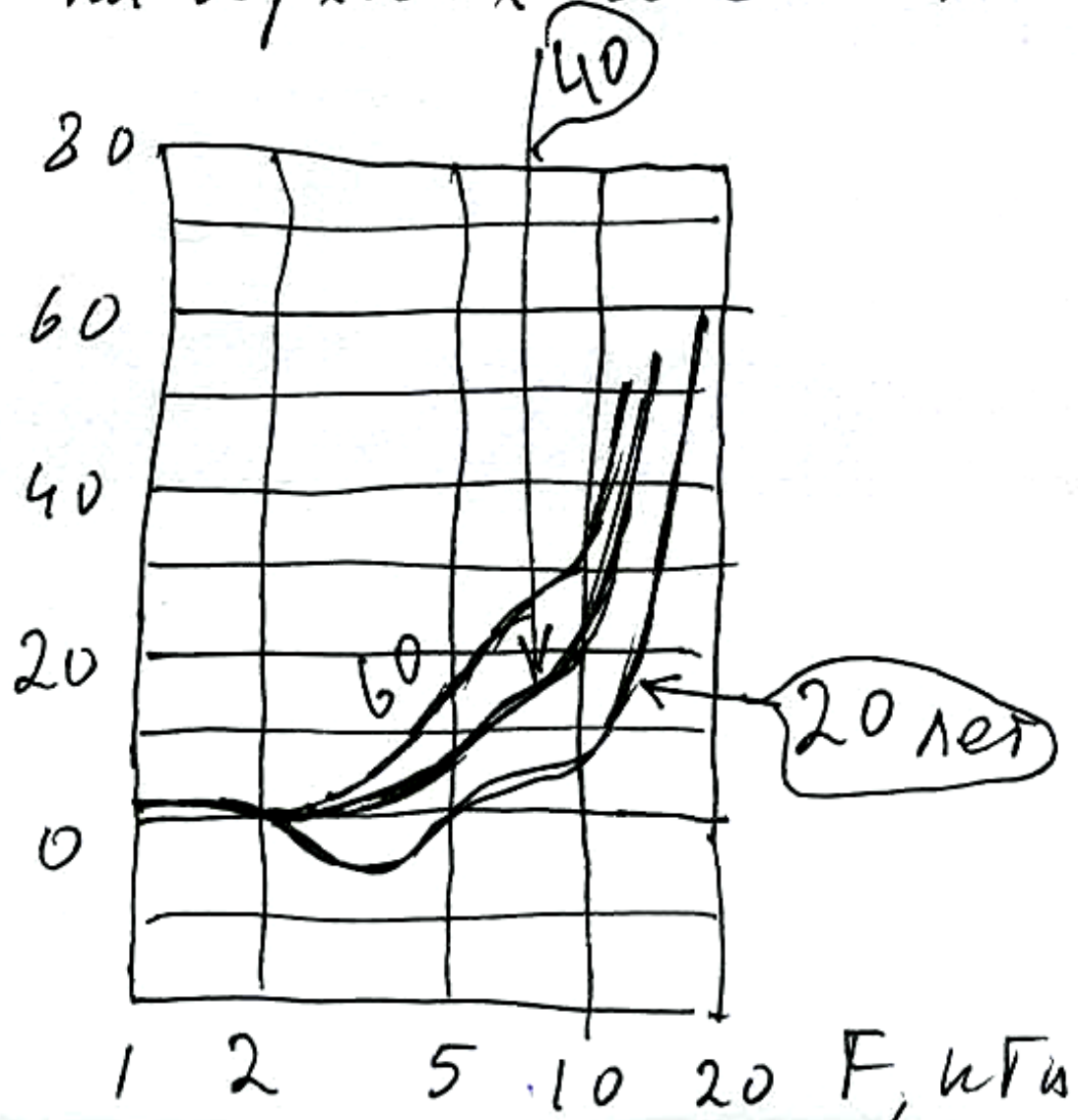


здоровым человеком. Это определяется разницей между кривой порога слышимости у больного и здорового человека (рис. 36). Именно поэтому аудиометры, изготовленные для установления потери слуха, генерируют на различных частотах звуки различной интенсивности, соответствующей ходу кривой порога нормального слуха. Это значит, что аудиометр в диапазоне 1...2 кГц дает звук меньшей интенсивности, чем на более низких или более высоких ча-

Рис. 36. Кривая потери слуха

стотах. Изменение интенсивности звука таково, что человек со здоровым слухом судит о звуках различной частоты как о звуках одинаковой громкости, хотя они имеют различную реальную в физическом смысле интенсивность. Следовательно, при изменении частоты оценка пациентом громкости остается постоянной.

18.4. Ухудшение порога слыш.
на верхних частотах с возрастом



Разновидности аудиометров

◆ Клинические (8 – 10 частот, до 110 дБ.

◆ Проверочные (3 – 4 частоты: 500, 1000, 2000, 4000 Гц; 0 – 60дБ).

◆ Автоматические (аудиометр Бекеша)
Спектр частот речевых сигналов: 200 – 300 Гц до 3 – 4 КГц.

используются для того, чтобы за короткое время обследовать как можно больше людей. Конечно, в подобных условиях нельзя предъявлять столь же высоких требований к точности, стабильности работы прибора, как в лабораторных. Но это и не нужно, ведь если

Иногда необходимо исследовать степень понимания больным обычной речи. Особенно обосновано такое аудиометрическое обследование на речь, когда пациент не доволен предписанным ему слуховым аппаратом, не слышит с его помощью достаточно хорошо, хотя его жалобы не подтверждаются аудиометром чистого звука.

Таков, например, аудиометр Бекеша, который автоматически записывает аудиограмму. Изменение частоты и интенсивности звука осуществляется автоматическим устройством, а фиксация соответствующей точки диаграммы происходит при нажиие больным кнопки. Такие аппараты нужны, главным образом, для проведения серии обследований.

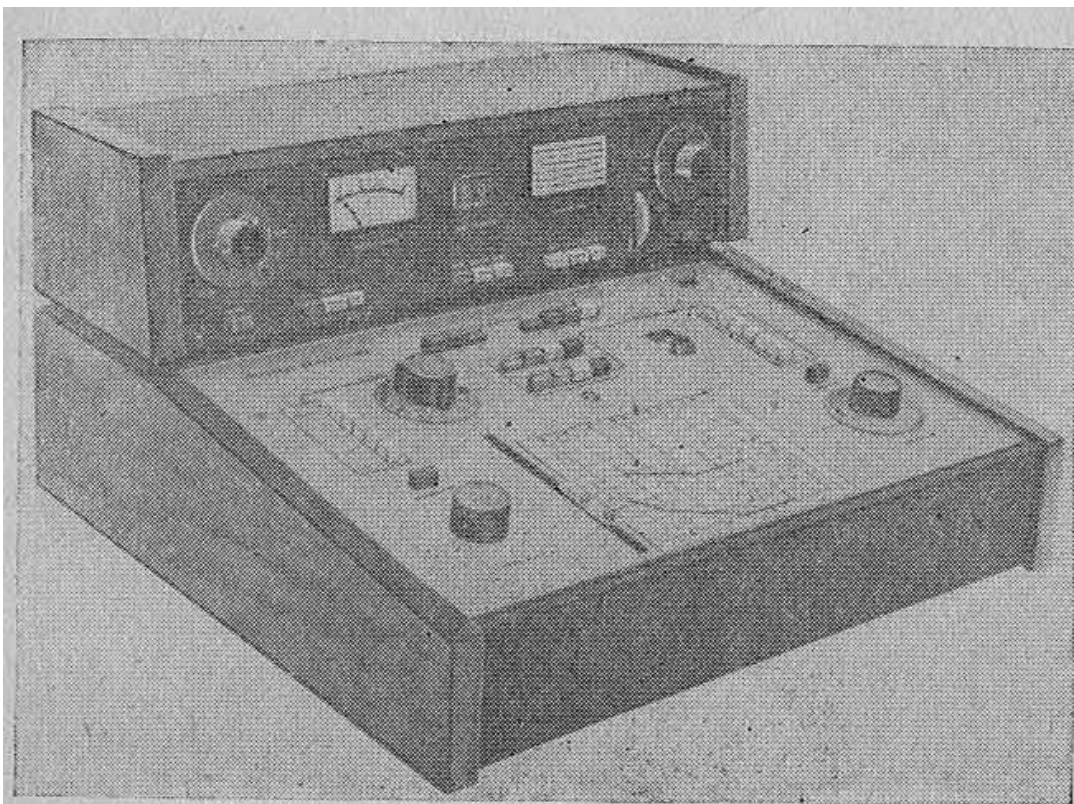


Рис. 35. Клинический аудиометр типа АТК-5

Существует много разновидностей аудиометров. Клинические аудиометры — это приборы, обладающие высокой точностью измерения, которые способны генерировать проверочные сигналы в очень широкой полосе частот и со многими градациями интенсивности. Для их использования обязательно необходимы лабораторные условия, например сурдокамера.

Клинический аудиометр АС 40 (Интеракстикс, Дания)

Клинический аудиометр АС 40 представляет собой два прибора в одном корпусе и состоит из двухканального **клинического аудиометра** и диагностического высокочастотного аудиометра. Возможно подключение **аудиометра** к компьютеру с помощью специального программного обеспечения.

Технические характеристики клинического аудиометра

Аудиометрия по воздушной и костной проводимости

Режим речевой аудиометрии

Диапазон частот 125-20000 Гц для воздушной проводимости, 250-8000 Гц для костной проводимости

Диапазоны громкости: 130 дБ (воздушная проводимость), 80 дБ (костная проводимость) и 110 дБ (речевая аудиометрия)

Шаг приращения громкости: 1 дБ или 5 дБ

Сохранение аудиограмм в памяти аудиометра

Возможность теста на автоматическое определение порога слуха

Вывод информации на большой ЖК-экран в реальном времени

Возможно присоединение **клинического аудиометра** к компьютеру

Напряжение питания 220 В, 50 Гц

Потребляемая мощность до 180 Ватт

Вес 13 кг

Размеры 50 см х 47 см х 20 см

Тесты Бекеша (от 125 Гц до 16 кГц), SISI, Stenger, DLF, ABLI исчезающего тона (TT-decay), Люшера, Hughson Westlake и др.

Стандартный комплект клинического аудиометра АС 40

TDH39 головные телефоны

Высокочастотный телефон R80

V71 костный телефон

APS3 кнопка ответа пациента - 2 шт

AF12 бланки аудиограмм - 100 шт

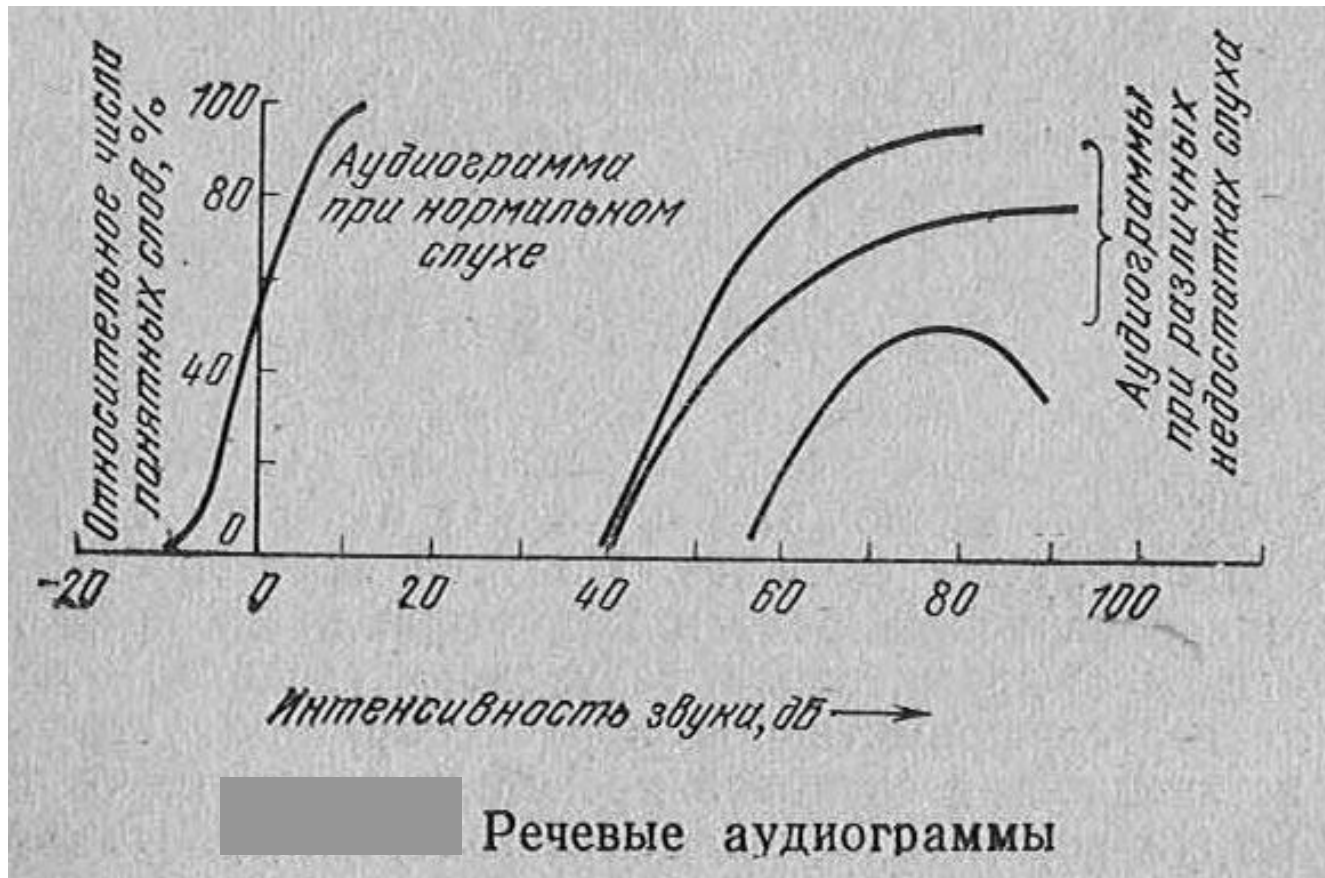
Набор ручек

PCR-AC40 пылезащитный чехол

Руководство пользователя на русском языке



Пример аудиограммы



Объективная аудиометрия

Рассмотренные выше аудиометрические исследования объективны только наполовину. Хотя аудиометры высокой точности дают физически равнозначное звуковое возбуждение, восприятие этого звукового импульса субъективно и сигнал о восприятии услышанного зависит от желания пациента. Точно так же субъективно при этом исследовании и то, как оценит врач сомнительный ответ, примет ли его или отнесется к нему критически. Нет уверенности в правильности аудиометрического исследования еще и потому, что пациент вдруг окажется неспособным к сотрудничеству с врачом (например, ребенок).

Был разработан остроумный метод исследований с применением электроэнцефалографии. Давно уже было подмечено, что ЭЭГ определенным образом меняется, если обследуемый пациент подвергается звуковому возбуждению. Если пациент глухой, то звуковые импульсы эффекта не дают, т. е. по изменению сигналов можно делать вывод о степени повреждения слуха. Совершенно очевидно, что при этом пациент не может повлиять на вид ЭЭГ, зависящий от звукового возбуждения. Следовательно, обследование действительно абсолютно объективно. Этим методом можно выявить повреждение слуха даже у младенца, и значит своевременно начать лечение.

Задача исследования слуха

Задача исследования слуха не только установление степени и причины повреждения слуха, но и определение того, какой слуховой аппарат наиболее пригоден для данного случая. Кроме того, исследование слуха позволяет решить, удалось ли с помощью слухового аппарата полностью скорректировать поврежденный слух.

Первые слуховые аппараты



готовили первое примитивное «слуховое» средство — слуховой рожок. Это первое примитивное воронкообразное устройство узким концом вставлялось в слуховой проход уха глухого человека, а широкий раструб воронки обращался к говорящему. Позже появилась

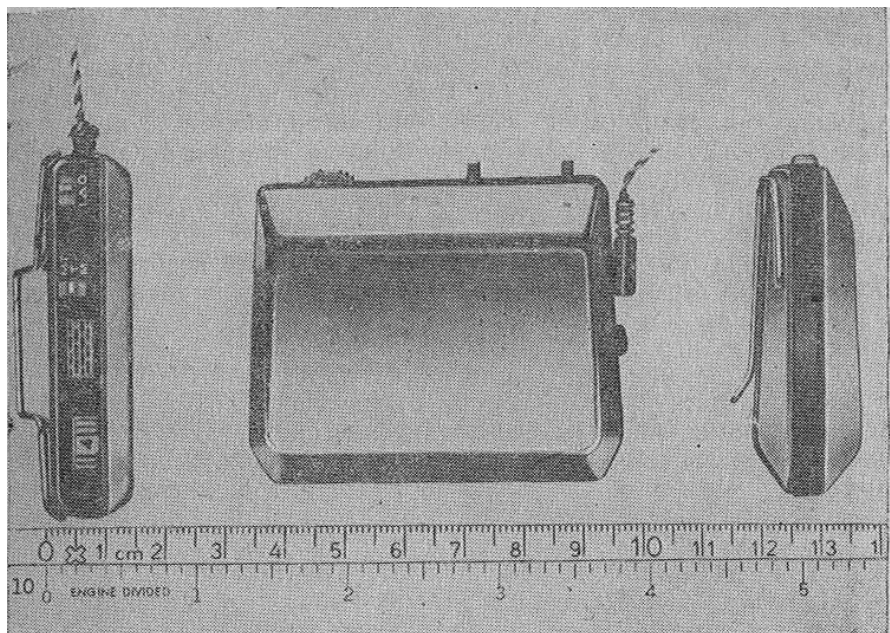
слуховая трубка, у которой конец, вставляемый в ухо, и звуковоспринимающая воронка соединялись резиновым шлангом. С помощью этого аппарата можно было следить за источником звука, не поворачивая головы.

Эти простые механические слуховые средства улучшали слух по следующим причинам:

- они уменьшали фоновые шумы, так как позволяли воспринимать звуки из очень узкой области;
- интенсивность звуков, распространяющихся сферическими волнами и попадающих в воронку, почти не уменьшается, ведь в трубке могут распространяться только плоские волны;
- в слуховых рожках происходят специфические резонансные явления.

Электронные слуховые аппараты

Появление транзисторов, а еще в большей мере интегральных микросхем позволили сделать важный шаг в развитии и совершенствовании слуховых аппаратов. Начался выпуск слуховых аппаратов с миниатюрными деталями, мощными и малыми батареями, аккумуляторами, микрофонами и наушниками, совсем маленьких (величиной с горошину), удобных, легко и незаметно носимых. По внешней форме слуховые аппараты делятся на четыре основных типа: коробочный, носимый в кармане, встроенный в оправу очков, заушный, помещаемый в ухо.



первоочередная цель — восстановление потери слуха. Именно поэтому следует исходить из степени и характера утраты слуха. Уже при потере слуха в 30 дБ нужен слуховой аппарат, хотя здесь можно говорить о приборе небольшой мощности.

Учитывая, что у большинства людей, страдающих повреждением слуха, болевой порог не меняется, при линейном усилении более громких звуков выходной уровень может превышать этот порог. Но, чтобы избежать болевых ощущений, нужно устанавливать небольшой уровень усиления, в результате чего более слабые звуки, несмотря на применение слухового аппарата, оказываются ниже порога слышимости. Для устранения этого больным требуются аппа-

раты, у которых выходной уровень не зависит от входного уровня линейно, а остается постоянным (с некоторым допуском). Это достигается с помощью автоматической регулировки усиления. При слабых сигналах такая система обеспечивает большее усиление, а при мощных — усиление постепенно уменьшается.

Диапазон частот, принимаемых слуховыми аппаратами, определялся исходя из того, что спектр частот речевых сигналов лежит в пределах от 200...300 Гц до 3...4 кГц. С точки зрения разборчивости речи важны в первую очередь частоты выше 1000 Гц, а более низкие частоты скорее способствуют хорошему звучанию. Для идеального приема речи требовались бы частоты в 200...8000 Гц, но, если эту полосу сузить до 300...3000 Гц, разборчивость речи почти не пострадает. Поэтому большинство слуховых аппаратов работает именно в этом диапазоне.

Классификация слуховых аппаратов

- **1. По внешнему виду (по месту ношения):**
- **Заушные (ВТЕ)**, располагаются за ухом:
 - миниатюрные, рассчитанные на потерю слуха от минимальной до тяжелой;
 - обычного размера, способные компенсировать любую степень **потери слуха**.
- **Внутриушные (ИТЕ)**, располагаются частично в наружном **слуховом проходе**, частично в ушной раковине. Компенсируют потерю слуха от легкой до тяжелой (80 дБ)
- **Внутриканальные (ИТС и СИС)**, располагаются полностью в слуховом проходе, практически незаметны. Рассчитаны на компенсацию потери слуха от легкой до умеренной (60-70 дБ)
- **Карманные**
Рассчитаны на компенсацию глубокой потери слуха (до 90 дБ)
- **2. По способу настройки.**
 - **Триммерные** аппараты, в которых параметры настройки регулируются с помощью специальных миниатюрных переключателей (триммеров), поворачиваемых при помощи отвертки.
 - **Программируемые** аппараты, в которых параметры настройки устанавливаются с помощью специального программатора через компьютер.
- **3. По технологии обработки звука**
 - **Аналоговые**
 - **Цифровые**
И аналоговые **слуховые аппараты**, и аппараты [с цифровой обработкой звука](#) могут быть как триммерными, так и программируемыми.
- **4. По возможностям обработки звука**
- **Аппараты базового уровня протезирования**
Это **аналоговые и цифровые слуховые аппараты** с 1 или 2 независимыми каналами настройки, линейным или нелинейным усилением (т.е. с возрастанием громкости звука уменьшается усиление), но с ограниченным количеством параметров настройки и ручным управлением громкостью. При наличии у пациента удовлетворительной разборчивости речи эти аппараты обеспечивают достаточно комфортное восприятие звуков в тишине.
- **Аппараты комфортного уровня протезирования**
Это **цифровые слуховые аппараты** с нелинейным усилением, независимой настройкой низко- и высокочастотного диапазона и автоматической регулировкой громкости (АРУ). Обеспечивают более комфортное звучание окружающих звуков в тишине за счет достаточного количества параметров настройки и более высокого качества усиления.
- **Аппараты высокого уровня протезирования**
К этой группе относятся **цифровые слуховые аппараты**, обладающие высокой гибкостью настройки за счет наличия 3 и более каналов и использующие специальные цифровые алгоритмы автоматической подстройки в разных акустических ситуациях с подавлением окружающих шумов для улучшения **разборчивости речи**

Устройство слухового аппарата



Основным элементом **слухового аппарата** является усилитель звука. К нему подключены микрофон, воспринимающий внешние звуки, и телефон (динамик), воспроизводящий усиленный звук. Кроме того, имеются элементы управления (регулятор громкости, выключатель, переключатель программ) и батарейка. По мере усложнения **слуховых аппаратов** и уменьшения их размеров число регуляторов сокращается, и в настоящее время остался, в сущности, только выключатель питания, который совмещен с крышкой **батарейного отсека**.

Пример конструкции



Современные **цифровые слуховой аппарат** способен по-разному усиливать громкие и тихие звуки, а также звуки в определенных частотных диапазонах (для более точной компенсации индивидуальных особенностей **снижения слуха**), подавлять шумы и обратную связь (свист). Постоянно анализируя входящие звуковые сигналы, такой **слуховой аппарат** автоматически изменяет настройку своих параметров (а их может быть более 300) в соответствии с окружающей звуковой обстановкой. Кроме того, при **цифровой обработке сигнала** практически отсутствуют искажения и собственные шумы аппарата.

Цифровая обработка звука

- Современный **цифровой слуховой аппарат** – это **миниатюрный компьютер**, созданный специально для одной задачи: уловить внешние звуки, а затем обработать и усилить их. Как и всякий компьютер, слуховой аппарат преобразует звуки в цифровые данные – последовательность нулей и единиц. Затем эти данные обрабатываются сложными **цифровыми** алгоритмами, что позволяет выделять полезный сигнал, например, звуки речи или музыки, и отсеивать нежелательный (фоновый) шум, например, шум автомобиля. В подобных **слуховых аппаратах** количество настраиваемых параметров достигает нескольких сотен, что позволяет обеспечить хорошую **разборчивость** полезного сигнала (звуков речи или музыки) даже в сложных акустических условиях.



Бинауральное протезирование

- У большинства людей, страдающих снижением слуха, потеря слуха двусторонняя. Бинауральное протезирование (когда слуховые аппараты надеваются на оба уха) является физиологичным и естественным.
- При протезировании только одного уха на другом ухе гораздо быстрее теряется разборчивость речи, тем более что слуховой аппарат обычно подбирается для того уха, которое слышит лучше.
- Когда «работает» только одно ухо, человек теряет способность локализовать звук, то есть определять направление и расстояние до источника звука, что создает трудности в повседневной жизни
- Улучшается разборчивость речи в шумной обстановке и при разговоре с несколькими собеседниками
- Улучшается качество звука
- Более высокий уровень слухового комфорта

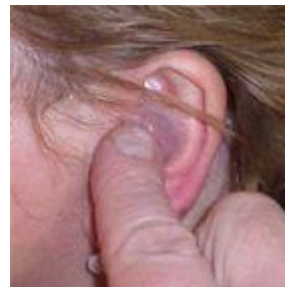


Заболевания, вызывающие нарушение слуха

- Функционально слуховой анализатор человека можно разделить на две части – **звукпроводящий и звуковоспринимающий аппарат**.
- Заболевания, вызывающие нарушения слуха, также делятся на две основные группы. К первой группе относятся **заболевания, связанные с нарушением проведения звука по звукпроводящим структурам**: ушная раковина, наружный слуховой проход, барабанная перепонка и цепь слуховых косточек. Такая потеря слуха называется **кондуктивной**.
- Самыми частыми и распространенными заболеваниями этой группы являются **острые и хронические воспаления среднего уха (отиты)**. Как правило, воспалительные заболевания сопровождаются скоплением жидкости или гноя в барабанной полости и, как следствие, нарушением подвижности слуховых косточек. Реже встречаются **воспалительные заболевания наружного слухового прохода** (наружные **отиты**, фурункулы и др.), а также избыточное образование ушной серы (**серные пробки**). К числу редких заболеваний относят **отосклероз**, при котором основание стремени становится неподвижным и теряет способность передавать звуковые колебания на жидкие среды улитки. И, наконец, при травмах черепа могут возникать механические нарушения в цепи слуховых косточек. А также редко встречающиеся наследственные недоразвития отдельных структур **наружного, среднего и внутреннего уха, обусловленные генетическими факторами**.
- Ко второй группе относятся **заболевания, возникающие в результате нарушения функции рецепторного аппарата улитки и проведения электрического импульса по слуховому нерву до слуховой зоны коры головного мозга**. Такая потеря слуха называется **сенсоневральной или нейросенсорной**. Она может возникнуть еще до рождения ребенка, если мать во время беременности перенесла **инфекционное заболевание** или злоупотребляла **алкоголем и курением**. В первый год жизни причиной **снижения слуха** могут стать **детские инфекции и лечение ототоксичными (вредными для слуха) антибиотиками**, такими как **стрептомицин, канамицин, мономицин** и др.
- У взрослых людей поражение рецептора **слухового анализатора** может быть вызвано **акустическими травмами, ототоксическим действием антибиотиков, остеохондрозом, гипертонией, атеросклерозом, опухолями**, сосудистыми нарушениями кровоснабжения улитки (особенно для людей старшего возраста) Самой распространенной причиной нарушения функций **внутреннего уха** является деградация волосковых клеток по мере старения организма. Такое **возрастное снижение слуха** называется **пресбиакузис (старческая тугоухость)**, оно проявляется в **нарушении разборчивости слов и речи**.

Индивидуальные ушные вкладыши

- изготавливаются по слепку ушного прохода пациента, поэтому они не давят, не свистят, не выпадают из ушного прохода. Индивидуальный ушной вкладыш не искажает звук слухового аппарата. Срок использования вкладыша не меньше 2 лет. Вкладыши могут изготавливаться с различных материалов: силикон, биопор, твердые, мягкие, комбинированные.
- Средства защиты от шума изготавливаются по слепку ушного прохода заказчика





Аллегорическая скульптура, изображающая женщину, которая слушает звуки Вселенной и передает эти звуки лежащему мужчине. И она и он воспринимают звуки правым ухом.

Акустические характеристики состояния человека

Не имеют электрической природы, например, тоны сердца, шумы лёгких.

Для измерения их электрическим путём сначала их нужно преобразовать в электрический сигнал, например, с помощью пьезодатчиков (микрофонов).

Вибрации также могут вызывать болевые ощущения, проиллюстрированные на рисунке 10.54.

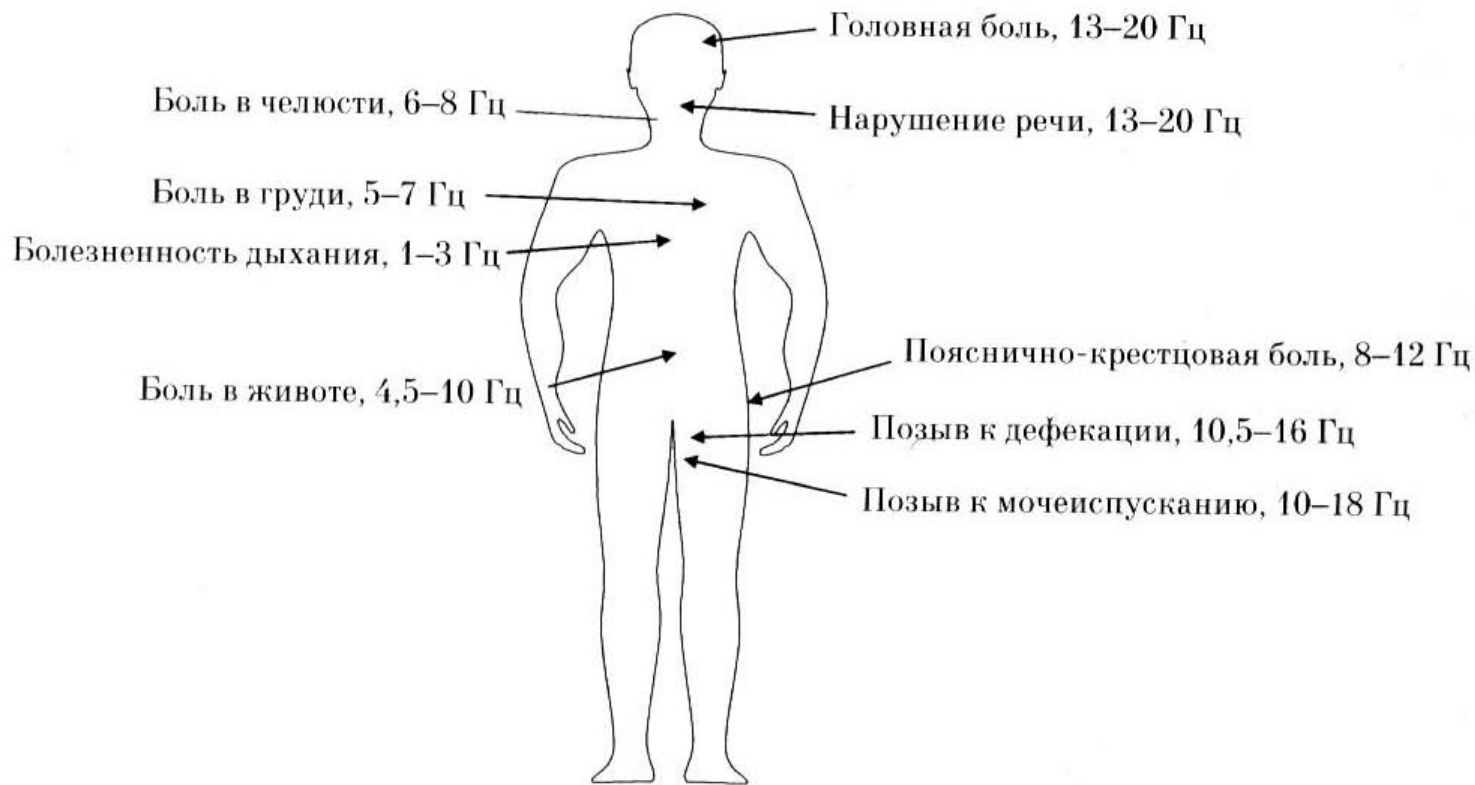


Рис. 10.54. Болевые симптомы, обусловленные вибрациями в диапазоне частот от 1 до 20 Гц. (На основе [455, 487])



Тоны сердца

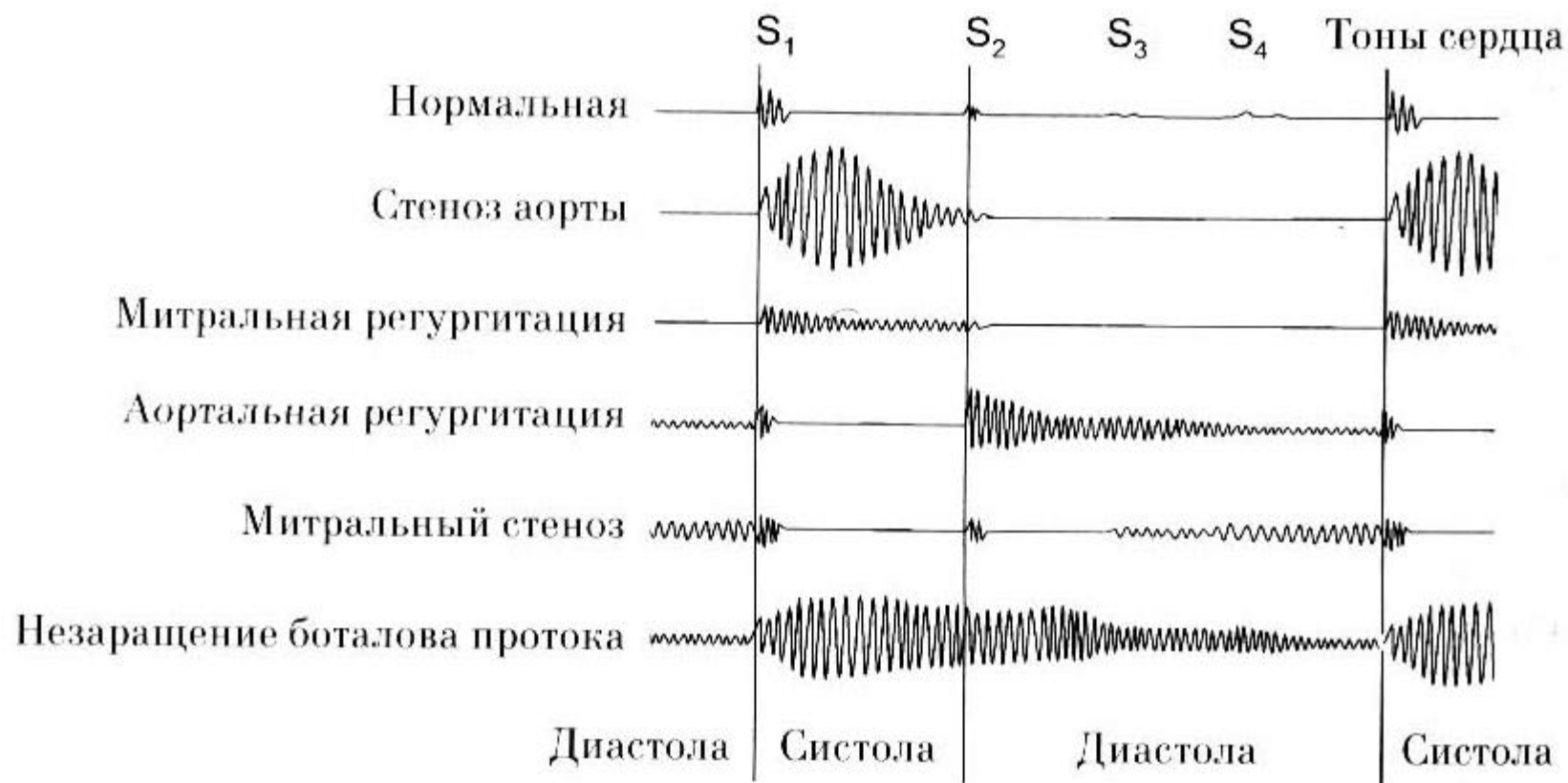
Источники тонов сердца (механических колебаний) – мышцы, клапаны, сухожилия, сосуды, поток крови. Характер тонов зависит от состояния системы.

Спектр частот тонов 10 – 8– Гц.

Распространённый прибор – фонэндоскоп. Недостаток – субъективизм метода. Изменение порога и частотных характеристик слуха с возрастом врача. Часть тонов входят в диапазон инфразвуков.

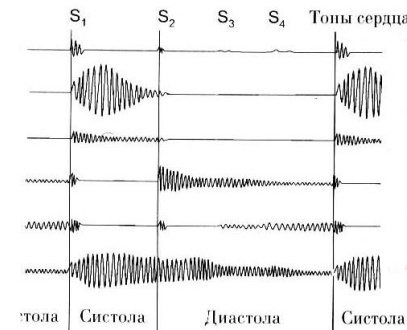
Грудная клетка – фильтр низких акустических частот тонов сердца, т.е. амплитуды тонов на поверхности грудной клетки резко уменьшаются по мере увеличения их частоты.

При аускультации (прослушивании ухом) эти искажения демпфируются за счёт частотной характеристики самого уха. (чувствительность растёт до частот 2 – 3 кГц).



55. Идеализированная фонокардиограмма нормальной и патологической работы сердца (при стенозе клапана левого желудочка, обратном забросе или *при* незаращении боталлова протока. (Незаращение боталлова протока — патология, при которой боталлов проток, являющийся у плода шунтом из легочной артерии в аорту, не закрывается после рождения). Показаны времена первого (S_1), второго (S_2), третьего (S_3), и четвертого (предсердного) (S_4) сердечных тонов.

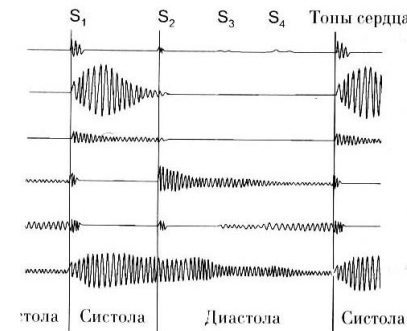
Аускультация



Аускультация (выслушивание) — это прослушивание звуков, производимых внутренними органами, для целей медицинской диагностики. Современные фонендоскопы имеют две отдельные части для такой диагностики: «раструб» — для выслушивания грудной клетки, специализированную для обнаружения низкочастотных звуков, и «диафрагму» — которая при легком прижатии к коже минимизирует низкочастотный звук и, таким образом, выделяет высокочастотные составляющие.

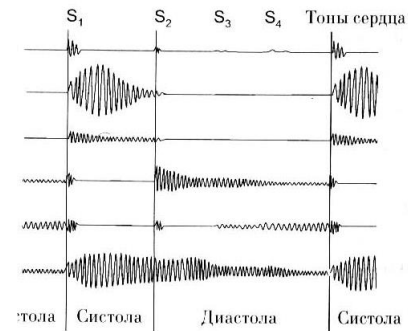
Звук нормально работающего сердца легко прослушивается фонендоскопом (рис. 10.55) [484]. Это — результат открывания и закрывания сердечных клапанов и потока крови через сердце. Первый сердечный тон (S_1) — это высокочастотный звук, образующийся в ранней систоле в результате закрытия митрального и трехстворчатого атриовентрикулярных клапанов, которое происходит, когда желудочковое давление превышает предсердное. Митральный клапан закрывается приблизительно за 10 мсек до трехстворчатого, вследствие более раннего электрического возбуждения и сокращения левого желудочка. Разница во времени закрытия клапанов становится заметна только в случае какого-либо заболевания, как, например, блокада правой ножки пучка Гиса, которая задерживает закрытие трехстворчатого клапана. Интенсивность тона S_1 может усиливаться или ослабляться при некоторых заболеваниях сердца.

Аускультация



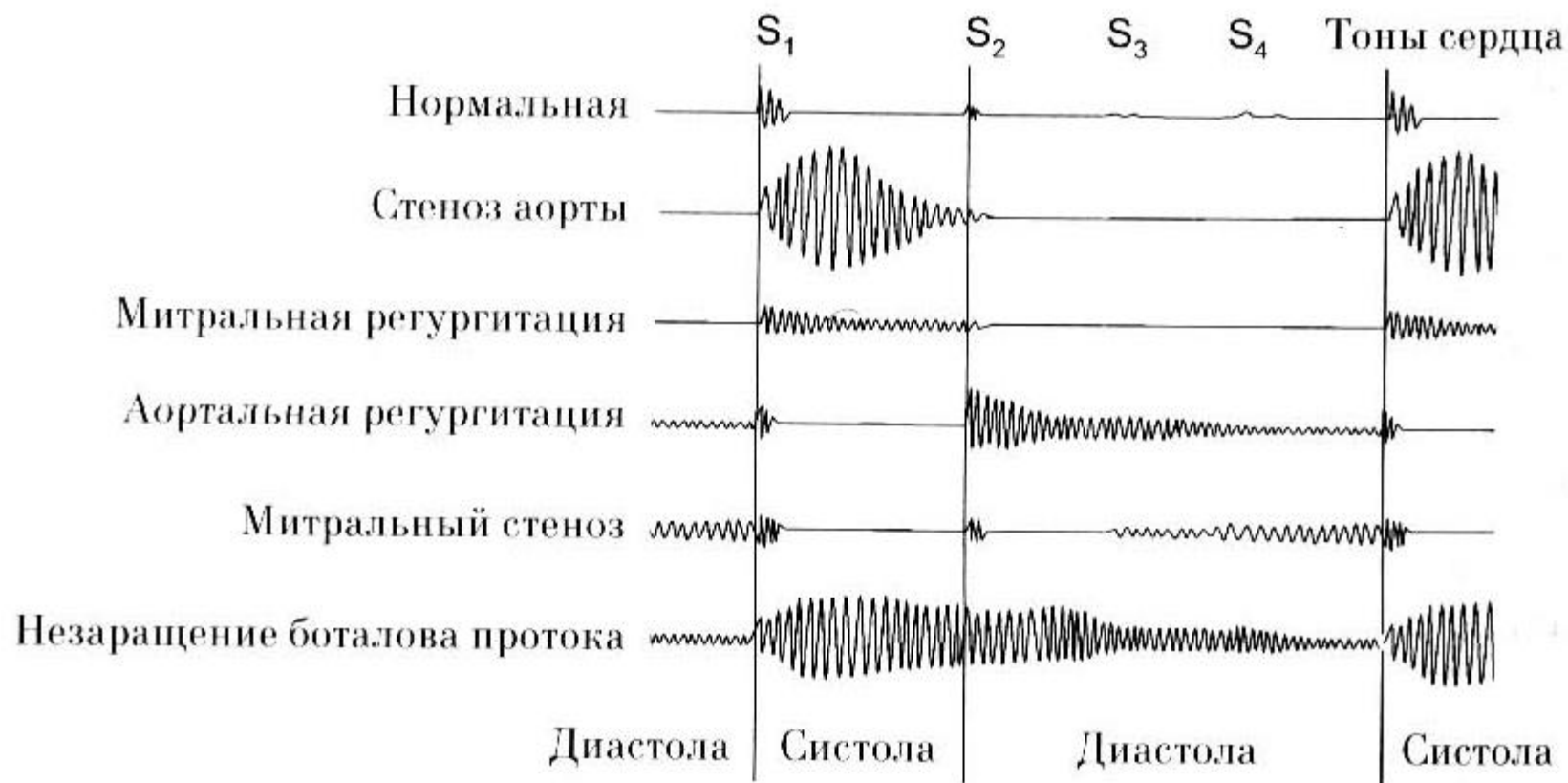
Второй тон (S_2) слышен в конце фазы изгнания крови из желудочка, то есть в момент окончания систолы, когда закрываются легочный и аортальный клапаны. Аортальный компонент (A_2) предшествует легочному (P_2), вследствие того, что градиент давления между аортой и левым желудочком больше, чем между легочной артерией и правым желудочком. Эти два компонента обычно сливаются при выдохе, но в норме на слух различимы при вдохе из-за снижения внутригрудного давления, что задерживает P_2 и ускоряет A_2 . Снижение внутригрудного давления вызывает большее снижение давления снаружи и внутри легочных артерий и вен, и эти эластичные сосуды увеличиваются в объеме при одном и том же внутреннем давлении. Таким образом, задержка P_2 вызвана более длительным временем, необходимым для заполнения легочной артерии. Ускорение A_2 происходит из-за меньшего кровотока из медленнее переполняющихся кровью легочных вен в левое предсердие и далее — в левый желудочек, что приводит к уменьшению объема выброса и уменьшению времени, необходимого для опорожнения левого желудочка. Систола происходит приблизительно между S_1 и S_2 , а диастола — между S_2 и S_1 следующего цикла. Основные тоны сердца S_1 и S_2 — это высокочастотные звуки, лучше слышимые диафрагмальной частью фонендоскопа.

Аускультация



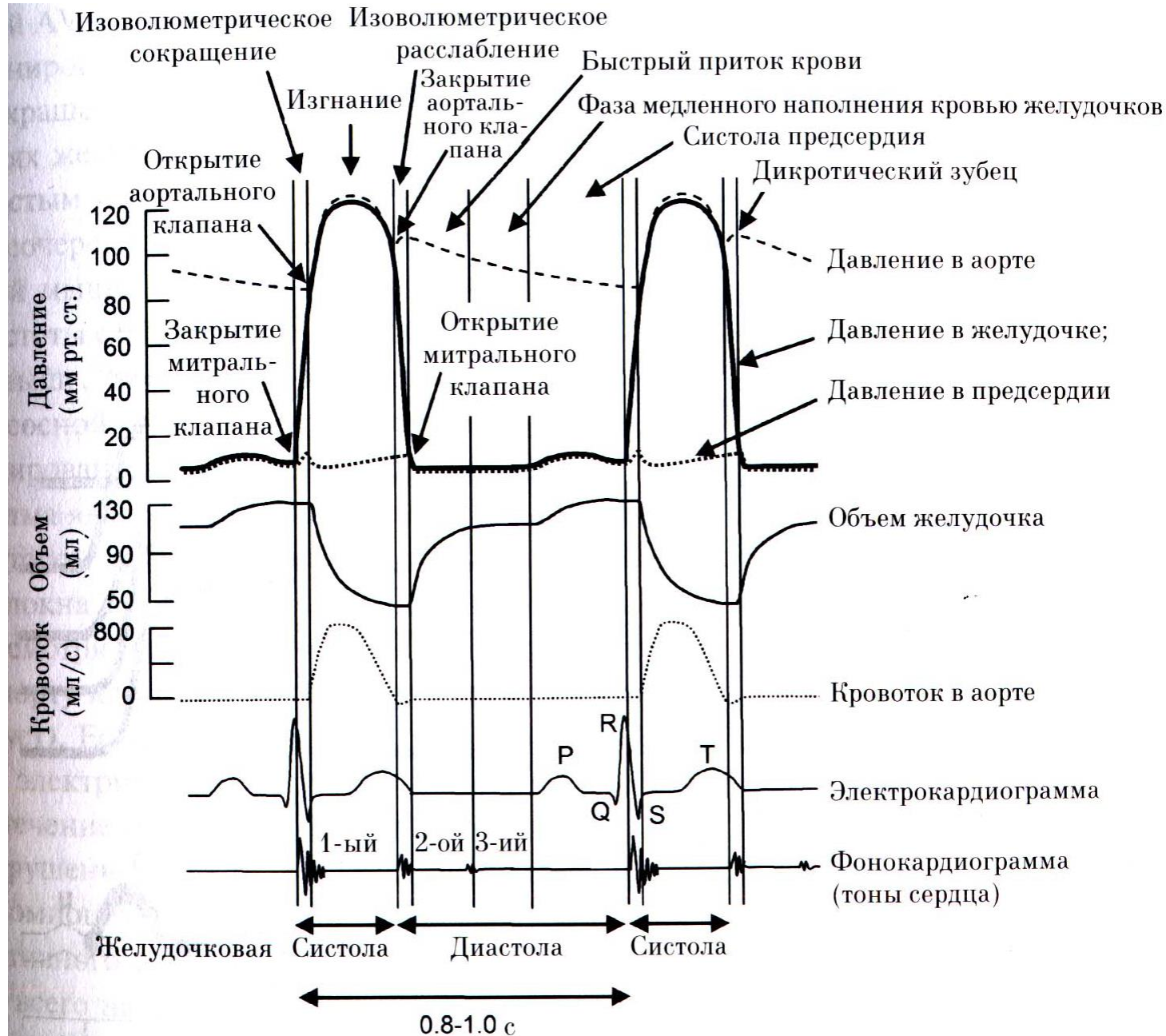
Третий тон сердца (S_3) — это тупой звук низкого тона, лучше слышимый рас-
трубом фонендоскопа после открывания атриовентрикулярных клапанов при за-
полнении желудочков. Этот тон обычен у детей и молодых людей, но является
патологическим признаком у людей среднего возраста и пожилых. Четвертый тон
сердца (S_4), который обычно является признаком заболевания сердца, генерирует-
ся предсердием, сокращающимся в конце диастолы при напряженном желудочке.
Шумы в сердце образуются при возникновении турбулентных, а не ламинарных

потоков и могут указывать на наличие препятствий кровотоку в сердце, таких, на-
пример, как стеноз (сужение) аорты. Шумы выслушиваются при повышенной ско-
рости кровотока, обратном забросе крови вследствие дефекта сердечного клапана
или патологического сброса крови из камеры с повышенным давлением в камеру с
пониженным давлением через дефект в перегородке
что поток в аорте иногда может быть турбулентным, а, следовательно, слышимым.)
Как видно из рисунка 8.5, наиболее громкие звуки, производимые сердцем, в основ-
ном, имеют частоты ниже 30 Гц, а потому не слышимы.



55. Идеализированная фонокардиограмма нормальной и патологической работы сердца (при стенозе клапана левого желудочка, обратном забросе или *при* незаращении боталлова протока. (Незаращение боталлова протока — патология, при которой боталлов проток, являющийся у плода шунтом из легочной артерии в аорту, не закрывается после рождения). Показаны времена первого (S₁), второго (S₂), третьего (S₃), и четвертого (предсердного) (S₄) сердечных тонов.

Давление, ЭКГ и фонокардиограмма



Фонокардиографы

- Фонокардиограммы делаются с помощью линейного микрофона и усилителя. Иногда в схему добавляют фильтры с перестраиваемой частотной характеристикой (фильтрация мешающих шумов, компенсация влияния грудной клетки, дифференциация диагноза и т.п.)
- Основной преобразующий элемент прибора – пьезоэлектрический микрофон. Воздушные и контактные микрофоны.
- Применяют несколько микрофонов одновременно на различных участках тела. Наиболее эффективно- одновременно с ЭКГ.

Кровяное давление

Давление необходимо для того, чтобы «проталкивать» кровь по сосудистому руслу. На рисунке 8.13 дано схематическое представление о величинах среднего артериального и венозного давления в различных отделах кровеносной системы у лежащего горизонтально человека. Колебания кровяного давления в крупных артериях большого круга кровообращения обусловлено колебаниями давления в аорте, где оно изменяется в ходе сердечного цикла от 80 мм рт. ст. (в конце диастолы) до 120 мм рт. ст. (во время систолы) (рис. 8.13). Поскольку длительность систолы составляет примерно 1/3 длительности сердечного цикла, а диастола занимает примерно 2/3 сердечного цикла, *среднее артериальное давление* определяется по формуле

$$P_{\text{среднее}} = (1/3) (P_{\text{систола}} + 2P_{\text{диастола}}), \quad (8.1)$$

то есть для указанных выше значений систолического и диастолического давлений $P_{\text{среднее}} = (1/3) \cdot 120 \text{ мм рт. ст.} + (2/3) \cdot 80 \text{ мм рт. ст.} \approx 94 \text{ мм рт. ст.}$ Разница между систолическим и диастолическим давлением называется *артериальным пульсовым давлением* $P_{\text{пульс}}$. Наибольшее падение давления в артериальной системе наблюдается в мельчайших артериях, артериолах (так называемых прекапиллярных сосудах сопротивления или резистивных сосудах), а также в капиллярах. В дальнейшем мы увидим, что это значительное падение давления связано с большими вязкими потерями при течении крови по этим сосудам.

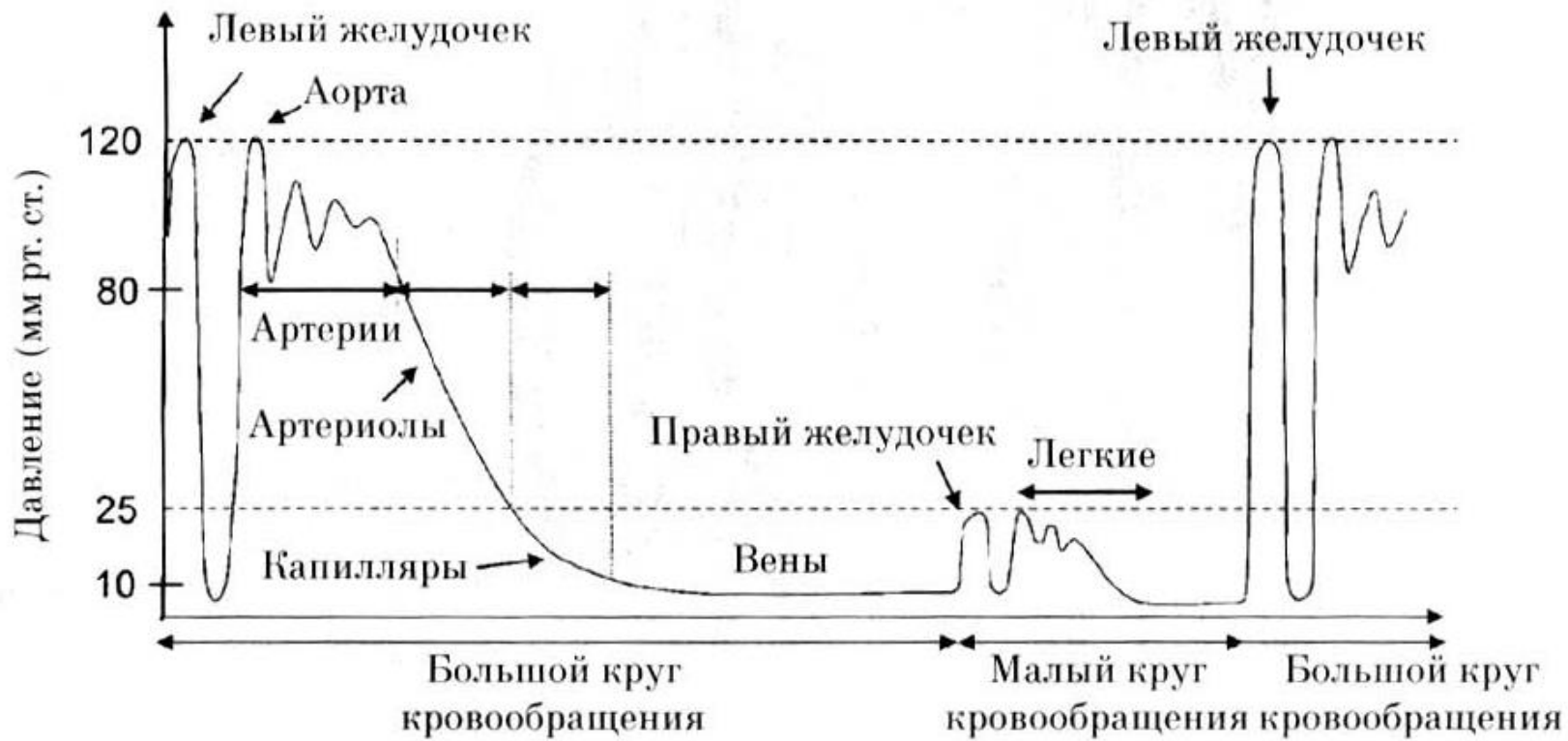


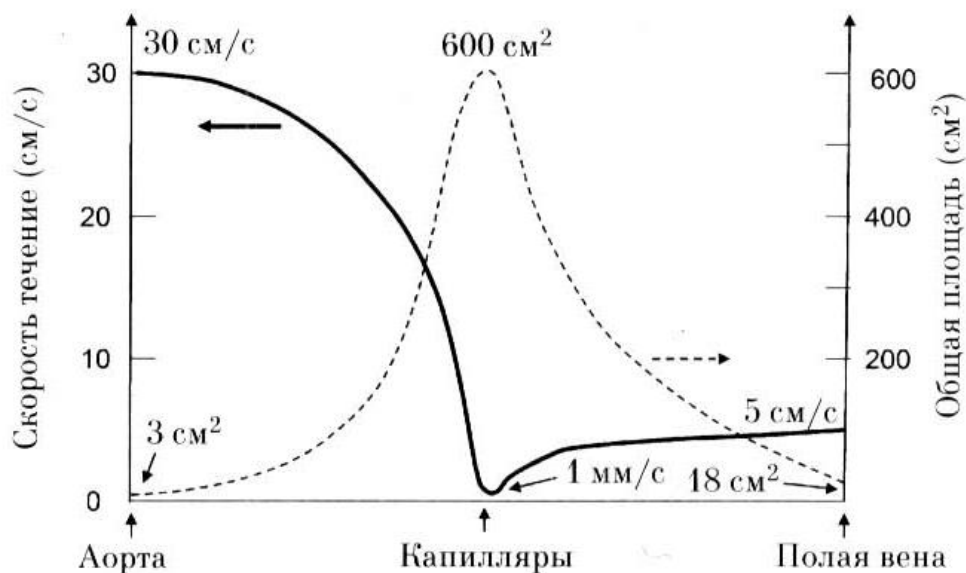
Рис. 8.13. Кровяное давление в различных отделах сосудистой системы лежащего горизонтально человека. (Основано на [371])

Кровяное давление

Давление в венах очень низкое. Оно настолько низкое, что его не должно хватать для обеспечения возврата крови к сердцу, невзирая на то, что вены имеют большой диаметр, и значит, оказывают незначительное сопротивление току крови (7.24). Существует, однако, ряд механизмов, облегчающих венозный приток крови к сердцу. Одним из таких механизмов является периодическое сокращение мышц, окружающих крупные вены, которые обеспечивают перистальтическое перемещение крови по направлению к сердцу. Обратному току крови при расслаблении этих мышц препятствуют венозные клапаны, обеспечивающие однонаправленность потока (рис. 8.14). Кровоток в капиллярах также не является непрерывным, что связано с работой прекапиллярных сфинктеров. Эти гладкомышечные сфинктеры периодически пережимают терминальные артериолы, тем самым, препятствуя кровотоку в капиллярах, берущих начало от этих артериол.

Кровяное давление

(Этот процесс называется *вазомоцией*.) Таким образом, сфинктер то «разрешает» кровоток в данном капилляре (гладкие мышцы расслаблены), то «запрещает» его (мышцы сокращены). Такие изменения кровотока в капиллярах происходят каждые несколько секунд или минут. Распределение давления между сосудами разных уровней в малом круге кровообращения сходно с таковым в большом круге. Основное отличие здесь состоит в том, что давление в малом круге значительно ниже давления в большом круге кровообращения. На рисунках 8.13, 8.15 и 8.16 показано кровяное давление и скорость течения крови в различных участках сосудистого русла.

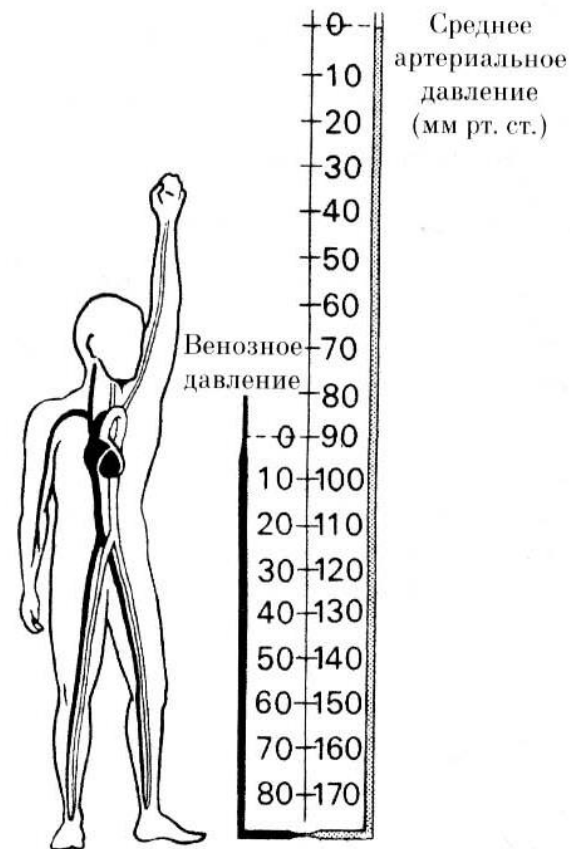


- Скорость течения крови (сплошная линия) и общая площадь поперечного сечения (пунктирная линия) в сосудистом русле большого круга кровообращения. (Основано на [371])

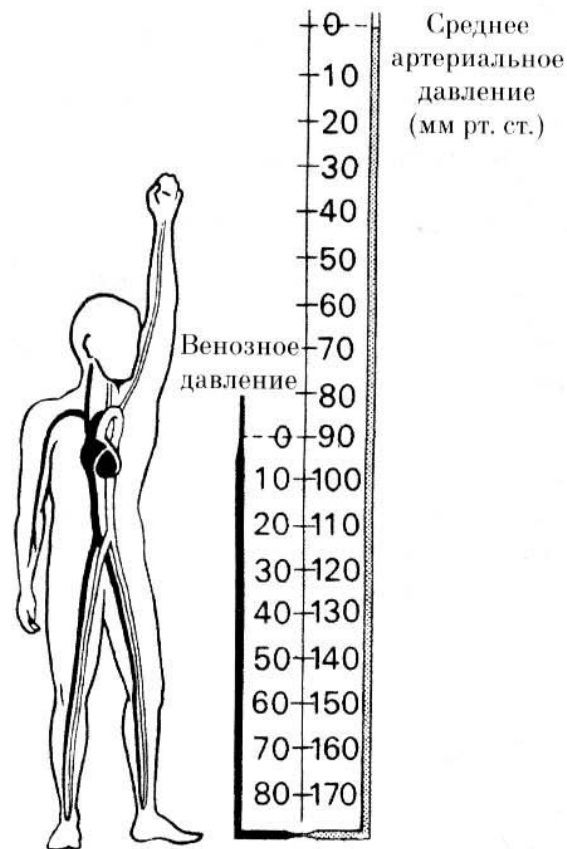
Кровяное давление

Изменения давления в сосудах определяются не только изменениями гидростатического давления (определяющегося положением тела относительно вертикали), но и тем обстоятельством, что сердце нагнетает кровь в сосудистое русло периодически (систола сменяется диастолой). Это создает пульсовое давление, и по сосудам распространяется пульсовая волна. Скорость распространения этой волны значительно превосходит скорость течения крови. Так, у взрослого молодого человека скорость пульсовой волны в аорте составляет примерно 4 м/с, в крупных артериях — 8 м/с, а в мелких артериях она примерно равна 16 м/с.

У вертикально стоящего человека (рис. 8.17), нужно учитывать ещё одно давление — давление столба крови, равное ρgh , где h — высота относительно уровня сердца. Учитывая, что $\rho = 1,06 \text{ г/см}^3 = 1060 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, а расстояние от сердца до стоп примерно равно $h = 1 \text{ м}$, можно оценить гидростатическое давление этого столба; оно примерно равно $10400 \text{ Н/м}^2 = 10400 \text{ Па} = 79 \text{ мм рт. ст.}$ (1 МПа = 7600 мм рт. ст.). Вообще говоря, это давление не должно влиять на течение крови в сосудах, поскольку на каждом уровне (при каждой величине h) оно одинаковым образом влияет на величины и артериального, и венозного давлений. Следовательно, разность между артериальным и венозным давлением, которая, собственно, и обуславливает течение крови, не зависит от гидростатического давления столба жидкости.



Кровяное давление



Среднее артериальное и венозное давление (относительно атмосферного) при вертикальном положении человека. (Из [372], цит. по [412]. Используется с разрешения Oxford University Press.)

Кровяное давление

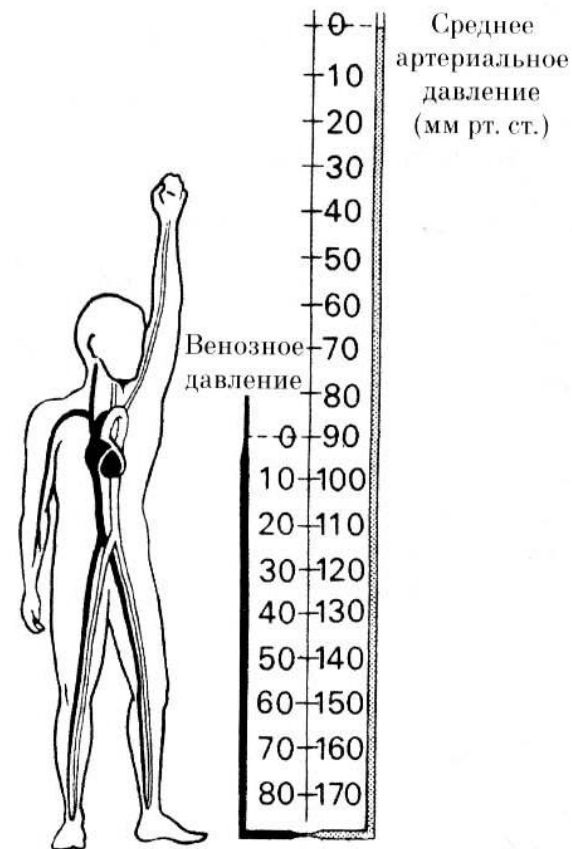
Однако, на самом деле, существуют ситуации, когда это давление, обусловленное действием силы тяжести, существенно. Действительно, понятно, что давление в аорте должно быть достаточно высоким, для того чтобы обеспечить кровоснабжение головного мозга. Расстояние от сердца до верхних отделов головного мозга составляет примерно 40 см; гидростатический столб такой высоты создает давление, примерно равное 30 мм рт. ст. Значит, если диастолическое давление упадет ниже этого уровня, мозг окажется в состоянии ишемии (недостаточного кровоснабжения).

Основным проявлением действия силы тяжести на сердечно-сосудистую систему человека является головокружение, слабость или даже обморок, возникающие когда человек переходит из горизонтального положения (или из положения сидя) в вертикальное. Дело в том, что когда человек встает, объем крови в венах его ног значительно и быстро возрастает. Соответственно, падает венозный возврат крови к сердцу. Это приводит к уменьшению ударного объема (объема крови, выбрасываемого сердцем за одно сокращение) и, следовательно, к уменьшению кровоснабжения головного мозга. В реальной жизни такое случается довольно редко, поскольку, благодаря рефлексорным влияниям, при увеличении давления в венах нижних конечностей, эти сосуды суживаются, их жесткость значительно увеличивается, что препятствует накоплению в них крови. Помимо этого, при вставании происходит констрикция (сужение) артериол, что увеличивает сопротивление току крови и также препятствует значительному снижению артериального давления.

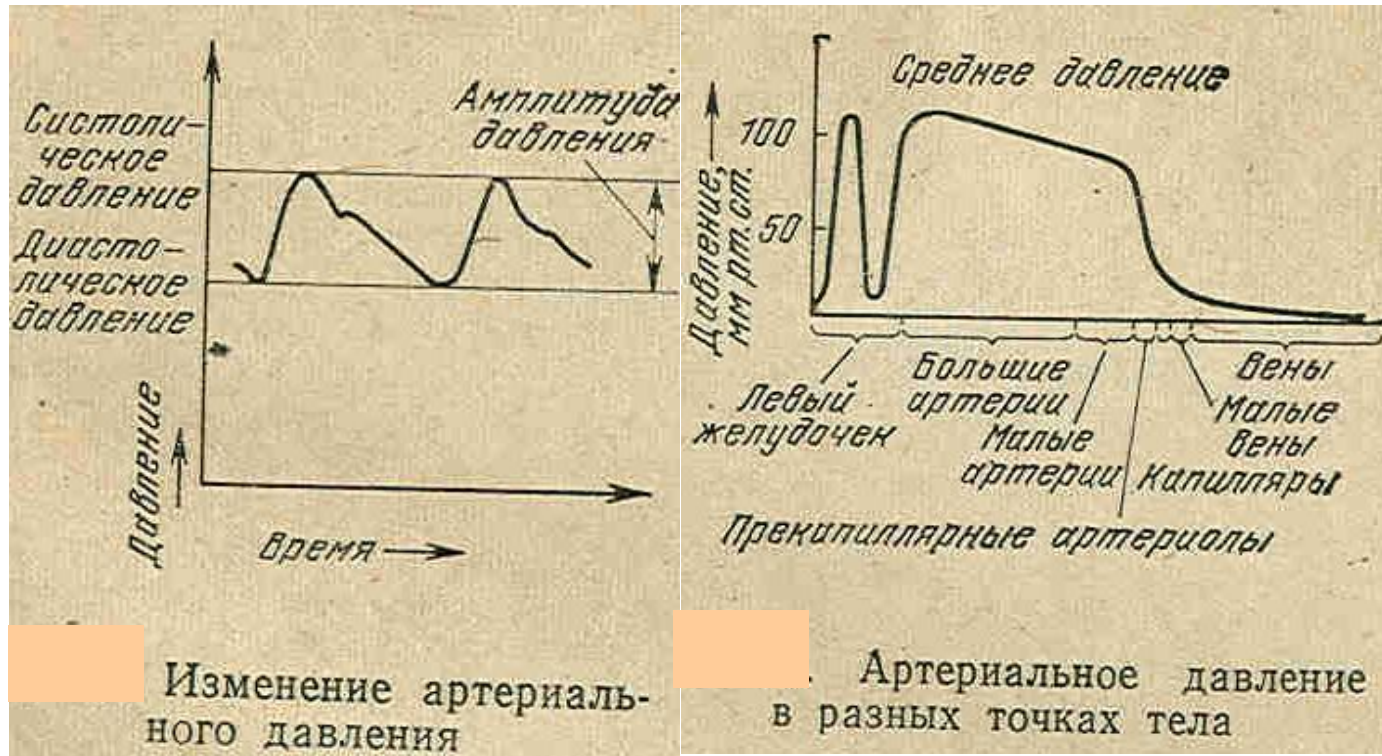
Иная ситуация возникает, когда человек, привыкший стоять вертикально вверх головой, пытается в течение длительного времени стоять на голове (вверх ногами). (Этот вопрос рассматривается в задаче 8.3.) Ведь вены головы, в отличие от вен нижних конечностей, не приспособлены к тому, чтобы суживаться при повышении растягивающего давления и обеспечивать возврат крови к сердцу. Кроме того, в такой позе может значительно ухудшиться кровоснабжение оказавшихся вверху ног.

Таблица 7.1. Типичные значения (относительного) давления в организме.
(Давления даны в мм рт. ст. Использованы данные из работы [345]).

Артериальное давление	
Максимальное (систолическое)	100–140
Минимальное (диастолическое)	60–90
Давление крови в капиллярах	
На артериальном конце	30
На венозном конце	10
Венозное давление	
В среднем	3–7
В крупных венах	<1
Давление в среднем ухе	
Нормальное	< 1
Вызывающее разрыв барабанной перепонки	120
Давление в глазу	
Нормальное давление в жидкости	20 (13–23)
Порог развития глаукомы	21–30
Давление спинномозговой жидкости	
В мозге, в положении лежа	5–12
Давление в желудочно-кишечном тракте	
	10–12
Скелет	
Длинные кости ноги в положении стоя	7600 (10 атм)
Давление в мочевом пузыре	
В опорожненном состоянии	15–30 (20–40 см H ₂ O)
Кратковременное повышение до	120 (150 см H ₂ O)
Внутрилегочное давление	
Между легкими и грудной клеткой	–10



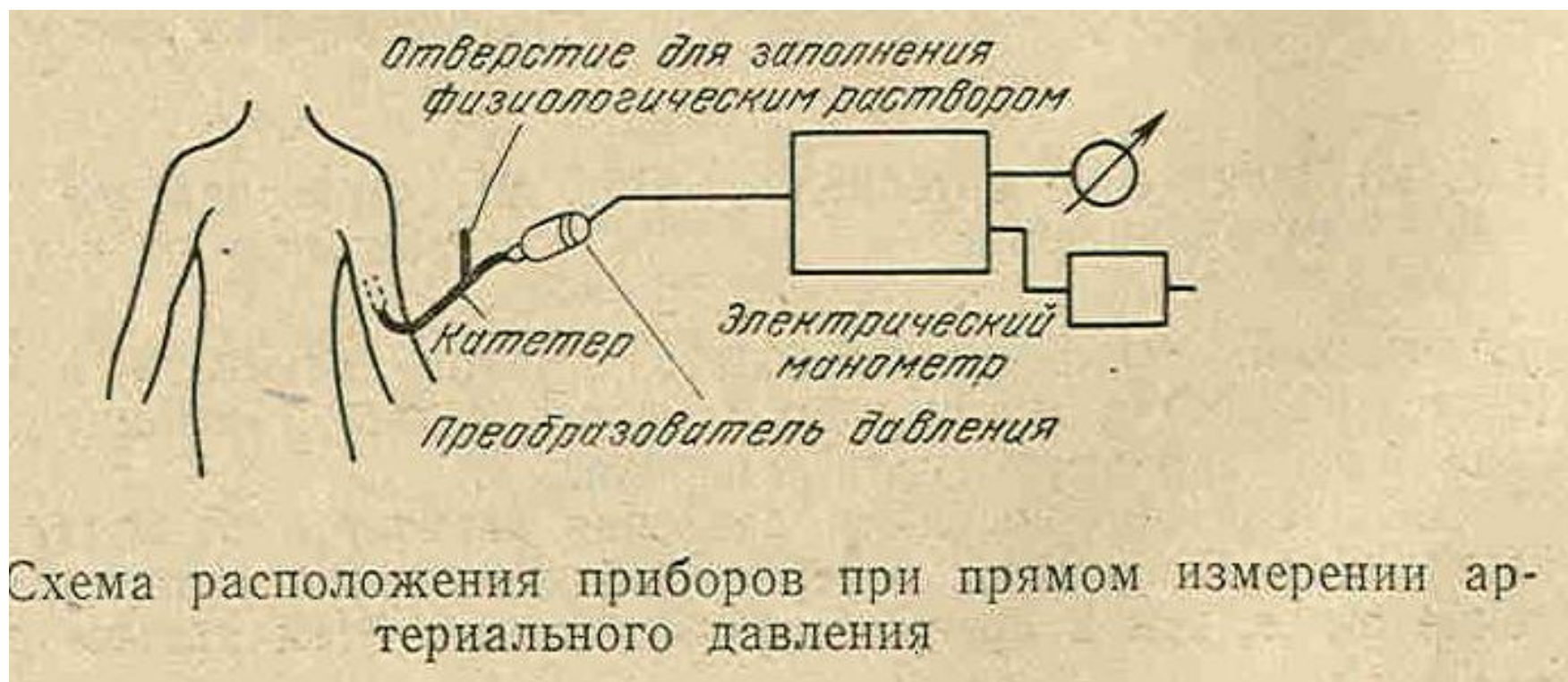
Артериальное давление



- Амплитуда давления – разница систолического и диастолического.
- Скорость распространения волны давления ~ 100 м/с.
- Необходимо указывать точное место измерения и временной график давления.

Прямое измерения артериального давления

- Применяют в ходе операций, при катетеризации сердца, в палатах интенсивной терапии.
- Конструкция – катетер диаметром несколько мм или канюля.
- Материал – резина, тефлон, полиэтилен.
- Длина катетера зависит от места введения. (Вена, артерия, полость сердца). Минимальный диаметр 0,9 -1 мм.
- Катетер заполняется физиологическим раствором без пузырьков. Этот столбик жидкости передаёт давление на микрофон, преобразующий давление в электрический сигнал. Колебания давления деформируют и смещают мембрану. Движения мембраны регистрируются , например, емкостным датчиком ($C = S\epsilon / 4\pi d$) или полупроводниковыми элементами. (R(P)).
- Частотный диапазон 50 – 80 – 100гц.



Косвенное измерение артериального давления

Особенность аппаратов для косвенного измерения давления крови состоит в том, что они позволяют осуществлять измерение без вскрытия кровеносных сосудов. В основном применяются два метода:

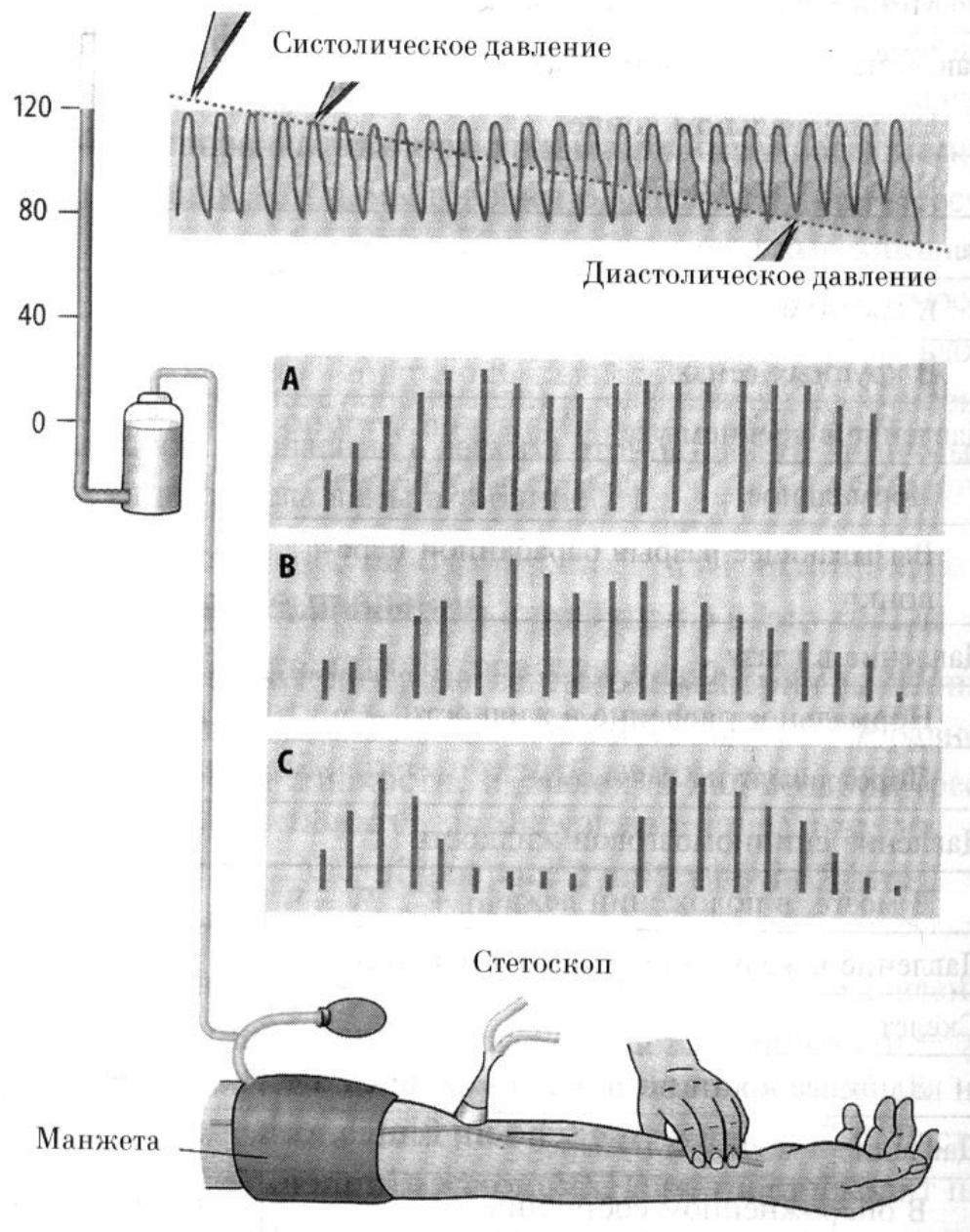
— искусственно создают нарушение кровообращения и по реакции на известную помеху определяют давление;

— выбирают и измеряют некоторый параметр, зависящий от давления крови в сосудистой системе, и, зная взаимосвязь, по измерениям выбранного параметра определяют давление на основе градуировки, получаемой опытным путем.

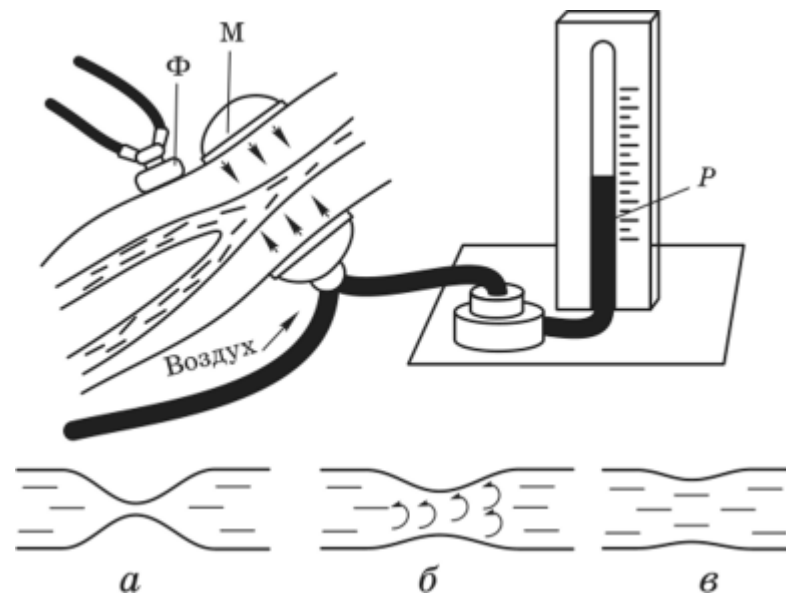
С помощью манжеты

При измерениях по методам, относящимся к первой группе, на верхнюю часть руки пациента помещают полую манжету и, надувая ее, нарушают кровообращение. Реакция на помеху в кровообращении соответствующим образом отмечается прибором. Из многих возможных реакций используют те, которые обозначают момент, когда давление в манжете совпадает с систолическим или диастолическим давлением в артерии, проходящей под ней. Поскольку в такие моменты давление в манжете компенсирует давление в артерии, то с точки зрения техники измерения способ измерения давления можно назвать компенсационным. Этот метод наглядно демонстрирует использование традиционных ручных приборов для измерения артериального давления.

Давление
(мм рт. ст.) Давление в манжете



Давление воздуха в манжете измеряется с помощью манометра. Накачиванием воздуха в манжету давление в ней быстро поднимается до значения, превышающего систолическое. Затем воздух из манжеты медленно выпускают, одновременно наблюдая за появлением пульса в лучевой артерии. Зафиксировав пальпаторно появление пульса, отмечают в этот момент значение давления в манжете, которое и принимают за систолическое давление.

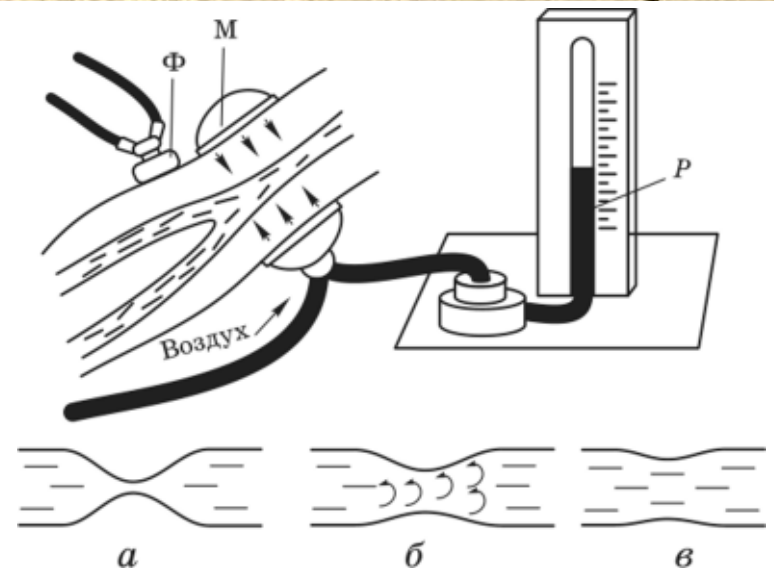


Манжета ручного прибора для измерения давления помещается, как правило, на верхнюю часть руки пациента. С помощью резиновой груши, снабженной клапанами и соединенной с манжетой, в последней создается давление, явно большее, чем систолическое давление пульсирующего под манжетой сосуда. При этом давление манжеты во время всего сердечного цикла перекрывает артерию, поток крови в ней останавливается. Открыв игольчатый клапан, постепенно снижают давление в манжете. Когда оно становится равным систолическому, прижатая артерия на очень короткое время открывается и по ней устремляется кровь в направлении нижней части руки. Если продолжать снижать давление в манжете, то артерия в ритме деятельности сердца будет открываться на все более длительное время до тех пор, пока давление в манжете не снизится ниже диастолического. С этого момента артерия открыта в течение всего сердечного цикла и действие манжеты, мешающее кровообращению, практически прекращается.

Различные способы измерения давления с помощью манжеты, по сути дела, основаны на наблюдении за помехой в кровообращении, вызванной манжетой. Если удастся определить те два момента, когда давление в манжете совпадает с систолическим и диастолическим, то измерение сводится к замеру давления в манжете.

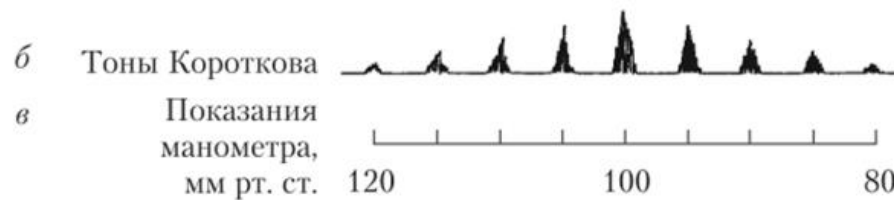
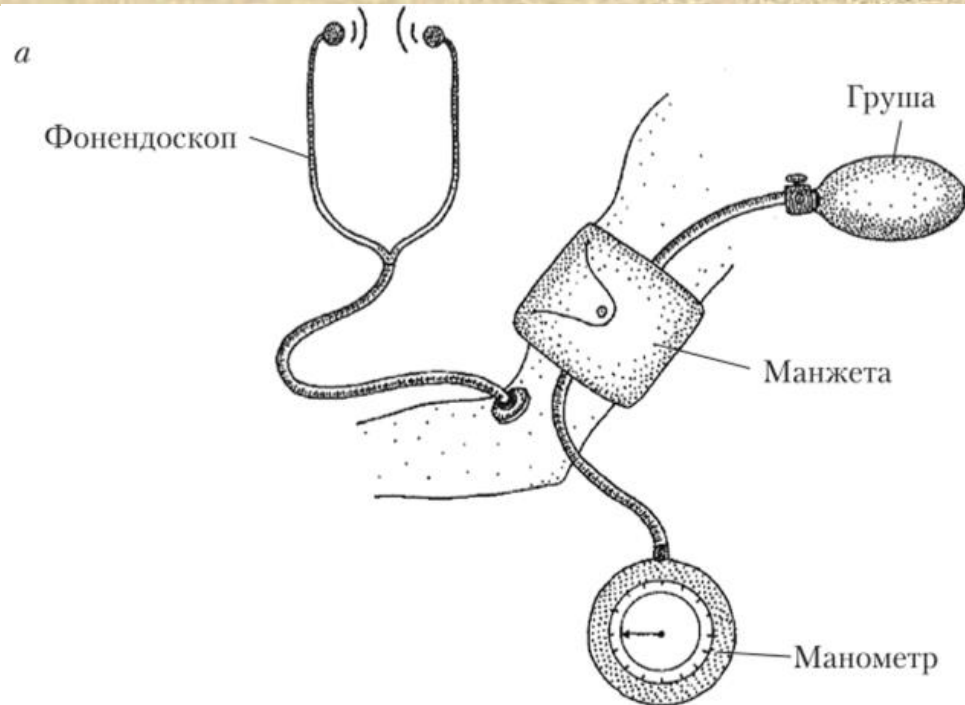
Методы индикации

Для установления того момента, когда давление манжеты совпадает с систолическим и диастолическим давлением в артерии, применяют различные методы. Наиболее старый — метод прощупывания, введенный Рива-Роччи. Он подметил: если давление манжеты становится ниже систолического, то в артерии у запястья вследствие резко начавшегося кровообращения прощупывается волна пульса. Этим методом можно относительно точно определить систолическое давление. Диастолическая точка в принципе обозначается моментом, когда кровообращение становится беспрепятственным. Однако это практически пальцем не прощупывается.

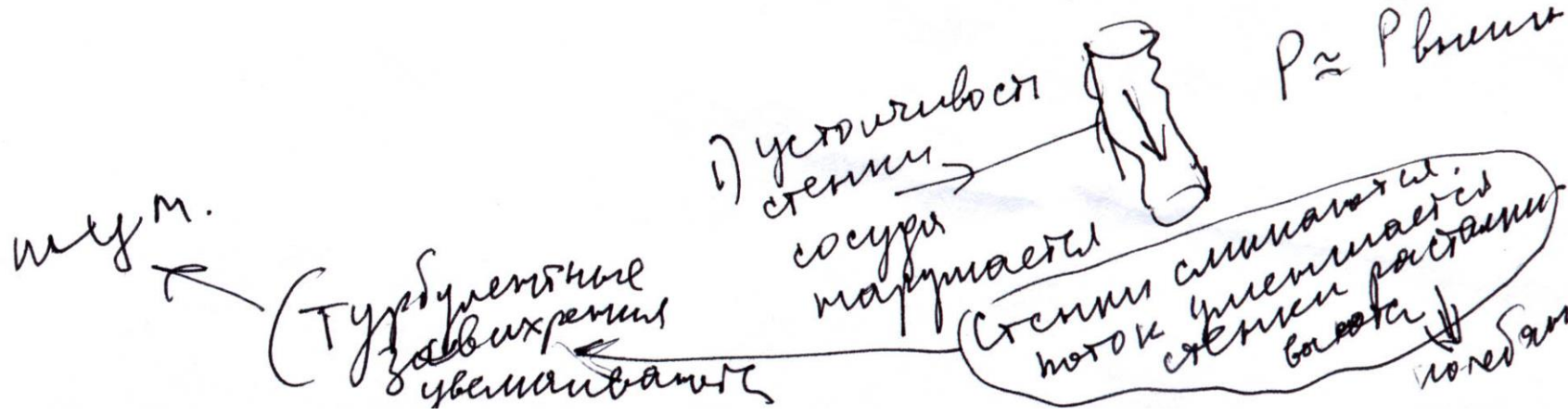
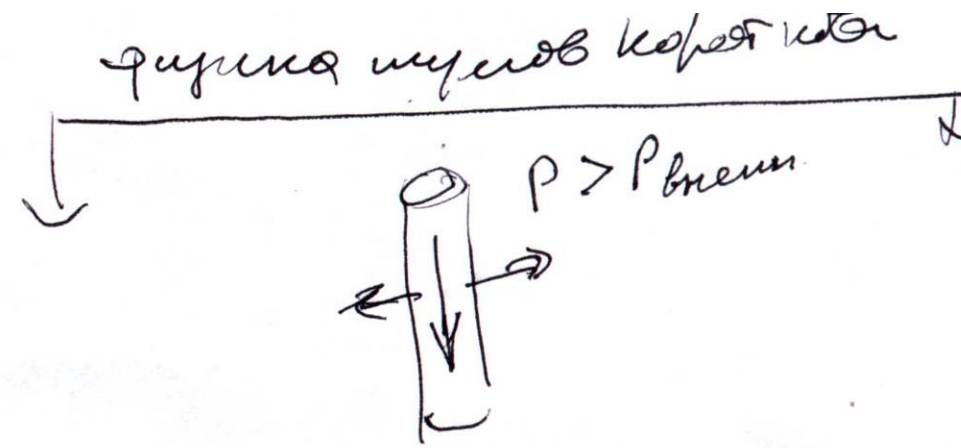
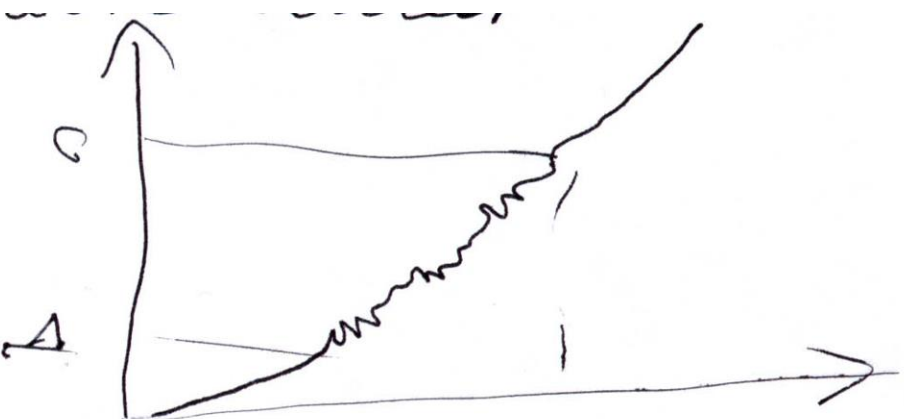


Тоны Короткова

При косвенном измерении артериального давления наиболее широко применяемый метод индикации — прослушивание тонов Короткова. Эти тоны открыл петербургский физиолог Коротков в начале века. Механизм их возникновения по сей день не выяснен, тем



- Механизм возникновения



Тоны Короткова

При косвенном измерении артериального давления наиболее широко применяемый метод индикации — прослушивание тонов Короткова. Эти тоны открыл петербургский физиолог Коротков в начале века. Механизм их возникновения по сей день не выяснен, тем не менее этот метод применяется врачами до сих пор. Применяя ручной прибор для измерения кровяного давления, тоны Короткова можно проследить фонэндоскопом, размещенным на локтевом сгибе. Преимущество индикации тонов Короткова состоит в том, что позволяет точнее измерить диастолическое давление, чем методом прощупывания, поскольку исчезновение или затухание тонов при снижении давления в манжете можно оценить с большей надежностью, чем восстановление биения пульса. Однако необходимо заметить, что и при этом методе определение диастолического давления менее надежно, чем систолического. Точными наблюдениями удается подтвердить, что тоны Короткова, прослушиваемые фонэндоскопом, не исчезают даже при диастолическом давлении, наблюдается лишь внезапное уменьшение интенсивности, изменяется и частотный спектр прослушиваемых тонов, начинают доминировать более низкие тона. Следовательно, надо говорить скорее о неожиданном пропадании звука и притуплении тонов.

Индикация движения стенки сосуда

Дело в том, что нарушение кровообращения наступает в результате того, что манжета в какой-то мере прижимает проходящую под ней артерию и поток крови, до этого непрерывный и ламинарный, становится прерывистым и турбулентным, затем затухает в части конечности, зажатой манжетой, а временами вообще прекращается. Это связано с периодическим открытием-закрытием артерии под манжетой, иначе говоря, с движением стенки артерии. Следовательно, логично попытаться определить давление с помощью индикации движения стенки сосуда.

Практически ультразвуковая индикация выглядит так: в расположенную на верхней части руки манжету монтируется ультразвуковая приемная и передающая головки, причем передающая головка направлена на участок артерии под манжетой. Частота ультразвукового сигнала, отражаемого от стенки сосуда, изменяется в соответствии с принципом Доплера. Причем, когда стенка сосуда приближается к источнику излучения, частота отраженных волн выше, при удалении ниже основной частоты источника звука. Следовательно, можно точно определять движение сосудов, соответствующее систолическим и диастолическим точкам.

Большое преимущество измерения движения стенки сосуда с помощью ультразвука состоит в том, что оно не чувствительно к акустическим шумам окружающей среды или организма, при этом можно пренебречь и мешающим действием промежуточной среды (например, жирового слоя).

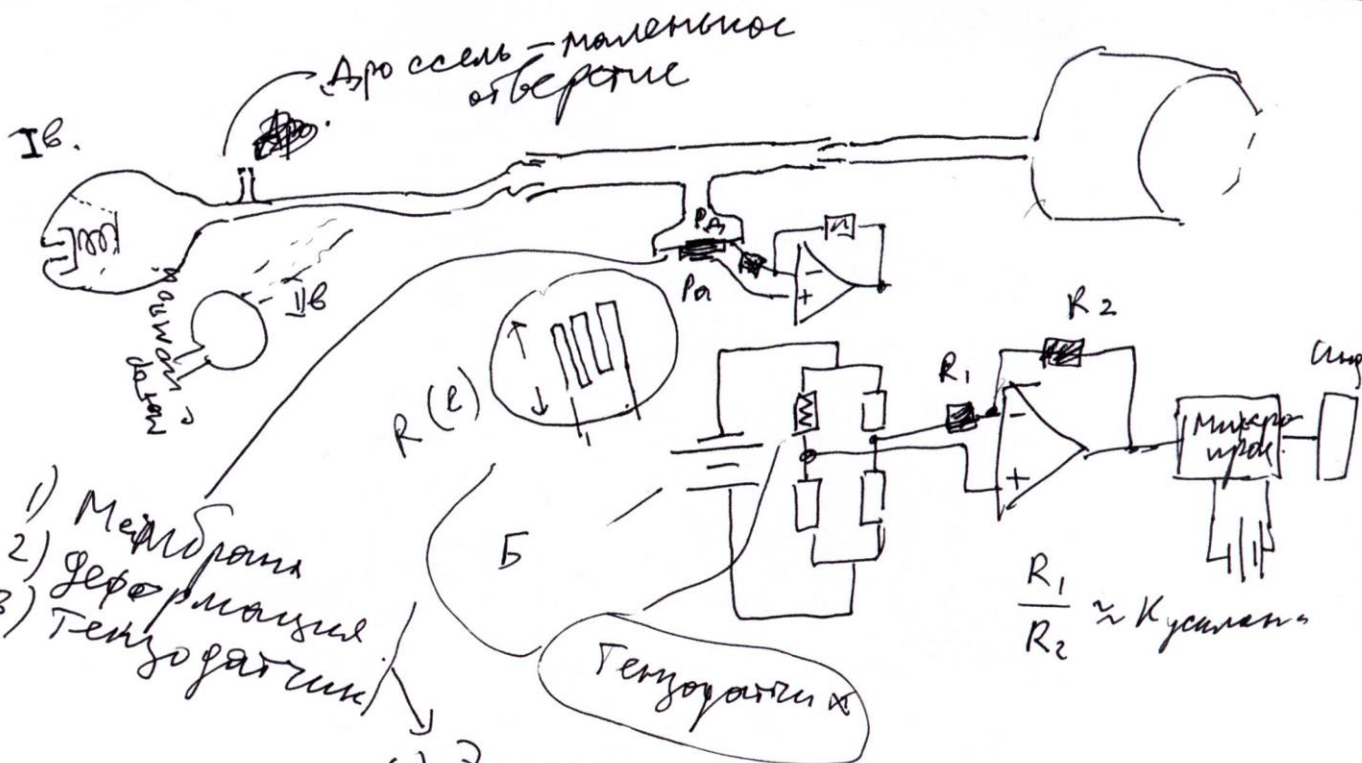
Автоматическое измерение давления

- Основывается на перечисленных выше методах.
- Аппарат повторяет процесс по заданной программе.

Для успешного прослушивания тонов Короткова применяют специальный микрофон и подключенный к нему селективный усилитель, параметры которого выбирают с учетом частотного спектра тонов Короткова.

Совершенствуя измерение артериального давления по системе Рива-Роччи—Короткова, удалось добиться точности измерения в пределах ± 5 мм рт. ст. (по сравнению с точными данными прямого измерения давления в артерии).

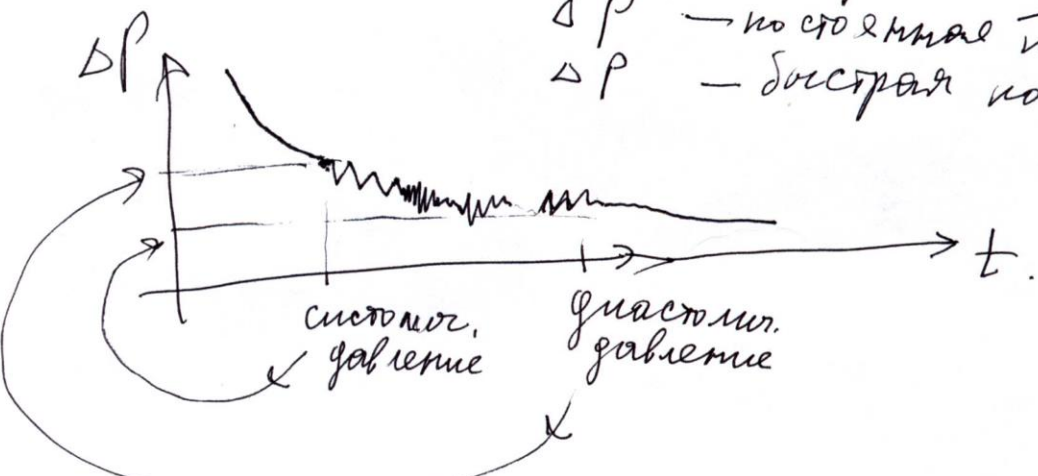
Пояснения к схеме устройства



- 4) Электросигнал - $f(\Delta P) = f(\frac{\Delta P}{P_0 - P_A})$
- 5) Микропроцессор.

ΔP — постоянная \rightarrow давление

ΔP — быстрая пом. \rightarrow шум







Спасибо за внимание

аускультация.

Одной из наиболее простых и информативных диагностических медицинских процедур является аускультация. Этот метод, о котором упоминал еще Гиппократ, заключается в выслушивании шумов, производимых человеческими органами. Аускультация применяется настолько широко, что инструменты, используемые врачами для выполнения исследования, стали узнаваемым символом профессии.

Диагностика, выполненная при помощи стетоскопа, фонендоскопа или [стетофонендоскопа](#), позволяет быстро и точно оценить состояние внутренних органов пациента. При схожести конструкции и выполняемых функций эти медицинские инструменты все же имеют некоторые отличия.

Стетоскоп был изобретен Рене Лазэннеком в 1816 году. Врачу пришлось использовать свернутые в трубку листы бумаги для того, чтобы услышать сердцебиение девушки, обладавшей слишком пышными формами (обычной практикой было просто приложить ухо к груди больного). Доктор Лазэннек не только диагностировал состояние пациентки, но и отметил, что звук, услышанный благодаря простым листам бумаги, свернутым в трубку, стал отчетливее. Позднее Рене Лазэннек смог усовершенствовать форму этого инструмента, представляющего собой трубку из дерева или другого подходящего материала с воронкообразными расширениями на концах. Сегодня классический стетоскоп используется только в отдельных сферах медицины, к примеру, в акушерстве. Наиболее распространенными являются бинауральные стетоскопы, появившиеся в 1851 году. Их создание является заслугой Артура Лиреда. Такой стетоскоп состоит из звукопринимающей камеры и двух трубок, оливы на концах которых вставляются в уши. Стетоскопы более удобны для выслушивания низкочастотных звуков и применяются для диагностики состояния сердечной мышцы.

Фонендоскоп был создан Николаем Сергеевичем Коротковым. Это устройство является оптимальным средством для выслушивания высокочастотных шумов, производимых легкими. Фонендоскоп, в отличие от конструктивно более простого стетоскопа, может быть только бинауральным. Звукоулавливающая камера этого инструмента снабжена мембраной, которая усиливает выслушиваемые звуки.

Современные медики используют в своей практике устройство, соединившее достоинства изобретений Лазэннека, Лиреда и Короткова – [стетофонендоскоп](#). Этот прибор снабжен стетоскопическим (без мембраны) и фонендоскопическим (с мембраной) сменными (или комбинированными в одном) наконечниками. Конструктивно современные стетофонендоскопы сложнее своих предшественников. Их функционал значительно шире. Они способны эффективно отсекают посторонние шумы, что позволяет при необходимости выполнить аускультацию не только в кабинете врача, но и в любом, даже довольно шумном, месте.

Существуют также [цифровые стетофонендоскопы](#), предоставляющие возможность сохранять получаемую в ходе исследования информацию, передавать ее на жесткий диск ПК для дальнейшего анализа или сравнения с результатами предыдущих исследований. Такие устройства снабжаются компактными аккумуляторами, которые позволяют прибору долгое время функционировать автономно.