

Механические колебания и волны Акустика

•Периодические механические процессы в живом организме

Колебания – это процессы повторяющиеся во времени.

При этом система многократно отклоняется от своего состояния равновесия и каждый раз вновь к нему возвращается.



« Каждый человек – это сложная колебательная система.»

Н. Винер

Примеры :

- Дыхательные движения грудной клетки;
- Содержание двуокиси углерода в крови;
- Ритмические сокращения сердца;
- Кровенаполнение артерий (пульс);
- Звук – колебания голосовых связок;
- Перистальтика кишечника;
- Психика людей подвержена колебаниям
и т.д.

Механическая волна. Уравнение

ВОЛНЫ

Механическая волна-это распространение механических колебаний в упругой среде

Математическое
представление волны:

$$S = f(x, t)$$

Уравнение волны описывает
Зависимость смещения
частиц среды от координат
и времени

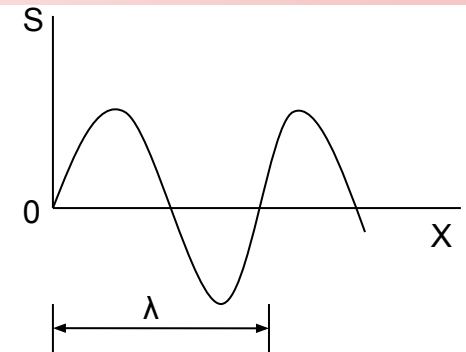
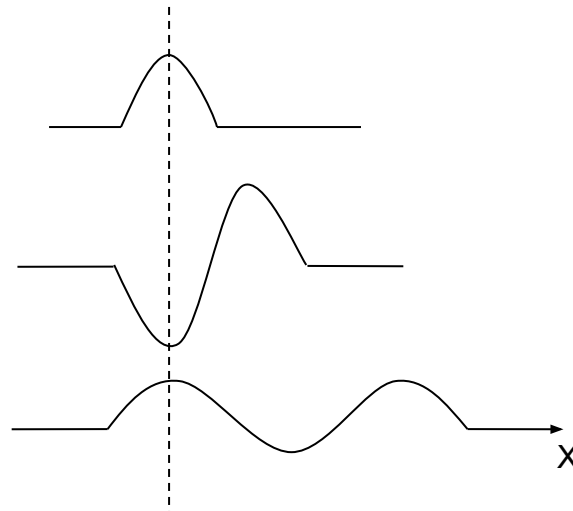
$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$$

Волновое уравнение

$$S = A \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right)$$

Его решение.

Уравнение плоской волны



Бегущая волна переносит энергию.

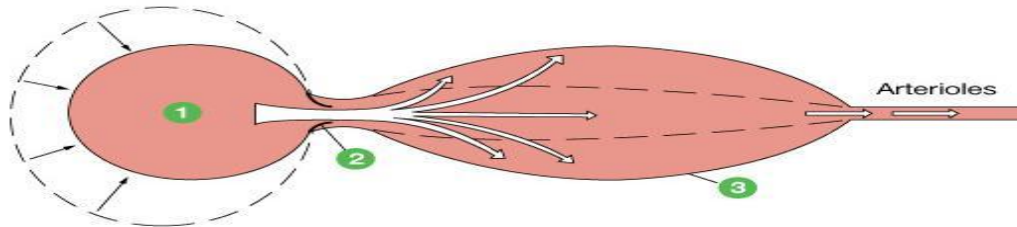
Условие существования волны:

1. Упругая среда
2. Инерция

Пример: Волна давления в артериях.

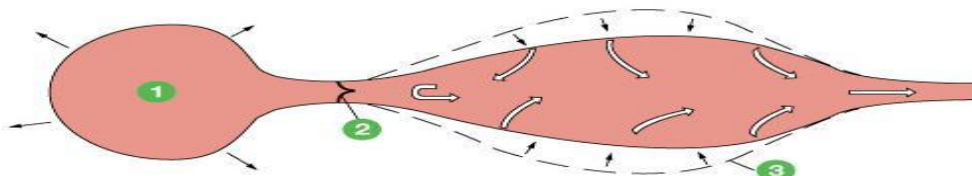
1. Упругость стенок
2. Кровь

(a) Ventricular contraction



- 1 Ventricle contracts.
- 2 Semilunar valve opens.
- 3 Aorta and arteries expand and store pressure in elastic walls.

(b) Ventricular relaxation



- 1 Isovolumic ventricular relaxation
- 2 Semilunar valve shuts.
- 3 Elastic recoil of arteries sends blood forward into rest of circulatory system.

Поток энергии и ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЛНЫ

Энергетические характеристики волны:

1. Энергия W , Дж

2. Поток энергии
(Мощность)

$$\Phi = \frac{W}{t} \quad \Phi = \frac{dW}{dt} \quad , \text{ Вт}$$

-это физическая величина, равная отношению энергии, переносимой волной, ко времени.

3. Плотность потока энергии =
= ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЛНЫ

$$I = \frac{\Phi}{S} \quad I = \frac{W}{t \cdot S} \quad I = \frac{dW}{dt \cdot S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

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

-это физическая величина, равная потоку энергии волны через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны.

4. Объемная плотность энергии волны

$$w_p = \frac{W}{V} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right]$$

-это средняя энергия колебательного движения, приходящегося на единицу объема среды

Или: это энергия в единице объема

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

Вектор Умова

Вектор Умова – это вектор плотности потока энергии волны, направленный в **сторону переноса** энергии волной

Он равен:

$$I = w_{\rho} v$$

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v$$

$$I \sim A^2$$



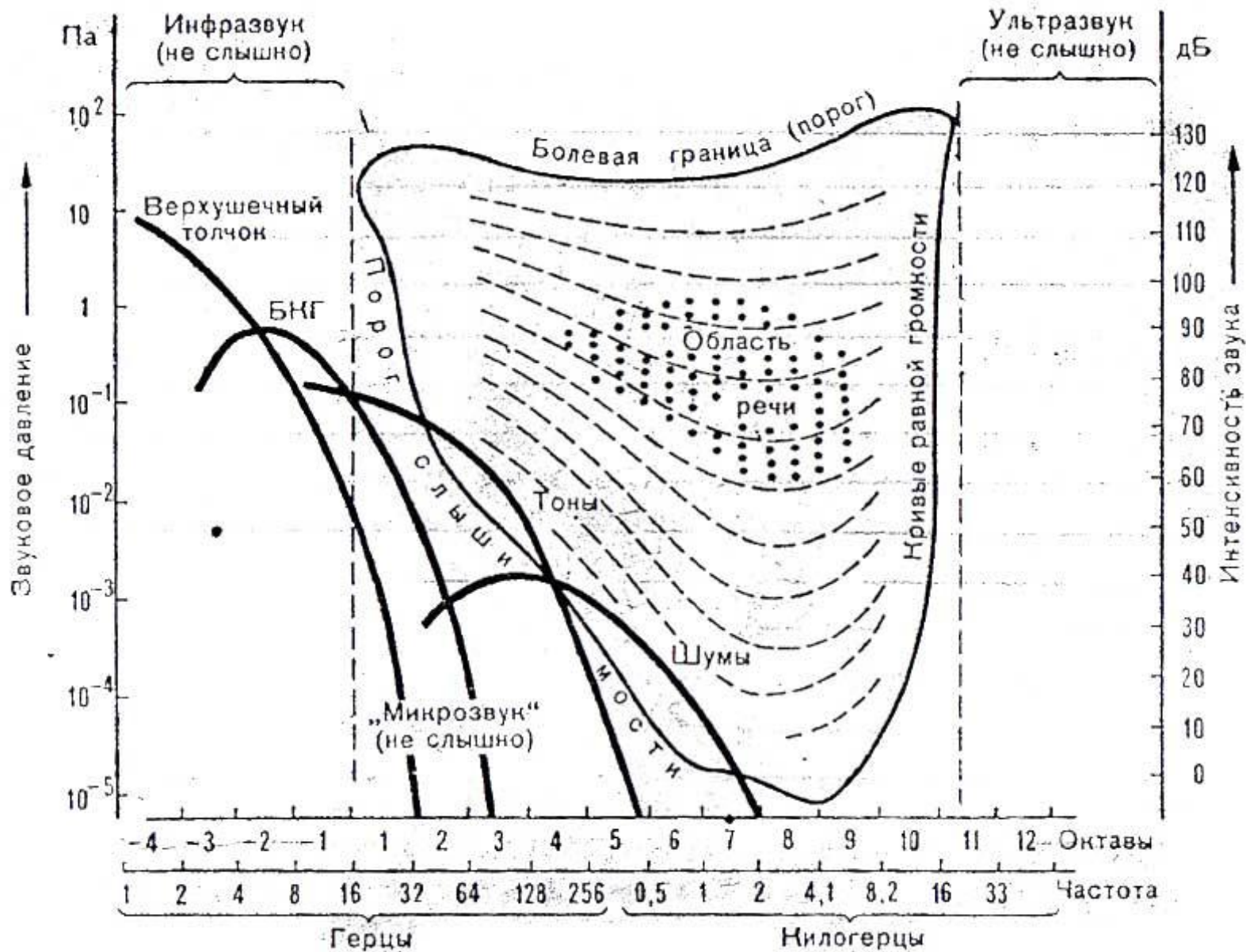
УМОВ Н. А. (1846-1915)

Акустика

-это раздел физики, изучающий механические колебания и волны от самых низких до высоких частот.

В узком смысле

акустика – наука о звуке.



Область звукового восприятия, звуки сердца и механические колебания инфразвуковой частоты, сопровождающие циклическую работу сердца.

Звук

-это механические колебания, распространяющиеся в форме продольной волны и имеющие частоту, воспринимаемую ухом человека (16 Гц – 20000 Гц).

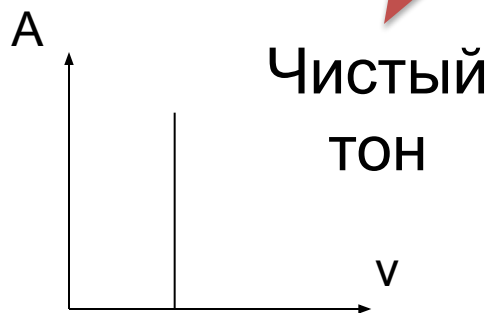
Виды звуковых колебаний

Тон – звук, являющийся периодическим процессом (если процесс **гармонический** – тон **чистый**, **ангармонический** – тон **сложный**).

Шум – звук, характеризующийся сложной, неповторяющейся временной зависимостью.

Звуковой удар – кратковременное звуковое воздействие.

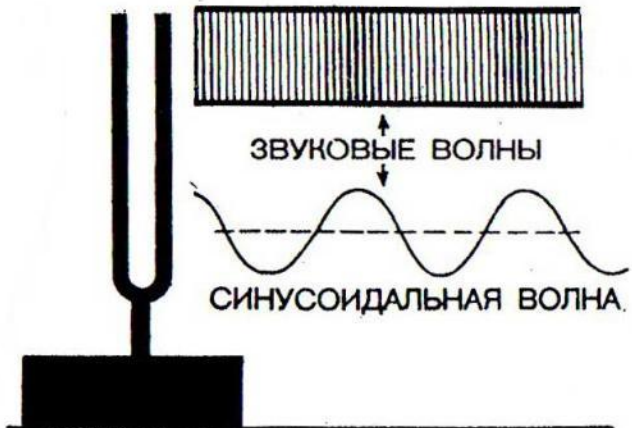
Акустический спектр



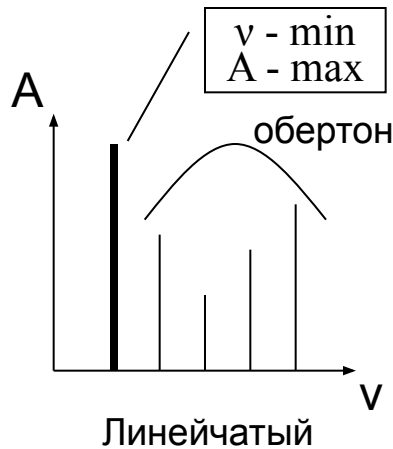
ЧИСТЫЙ
ТОН

Спектр

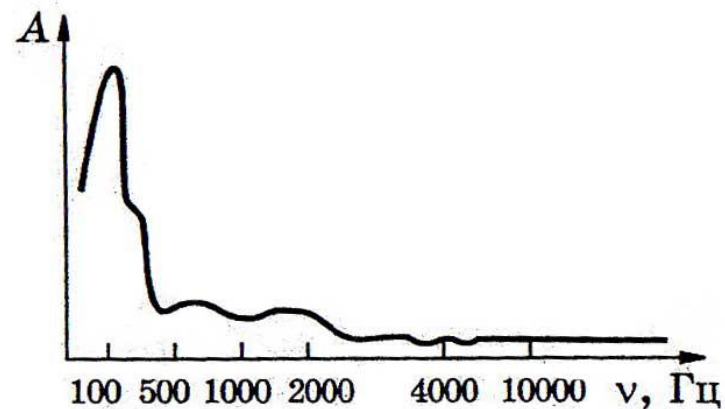
КАМЕРТОН



СЛОЖНЫЙ ТОН



Шум



Спектр сплошной

Физические характеристики звука (объективные)

1. Частота

$\nu = 16 - 20000$ Гц

Пример: тоны сердца до
800 Гц

2. Скорость звука:

Воздух	331.5 м/с (0°C)
	340 м/с (20°C)

Вода	1500 м/с
------	----------

Кость	≈ 4000 м/с
-------	------------

3. Звуковое давление

$$P = \rho v c$$

4. Интенсивность звука

$$I = \frac{\Phi}{S} \quad I = \frac{W}{t \cdot S}$$

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \quad Z = \rho \cdot c \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$$

Z – акустический импеданс

(характеризует свойство среды проводить акустическую энергию)

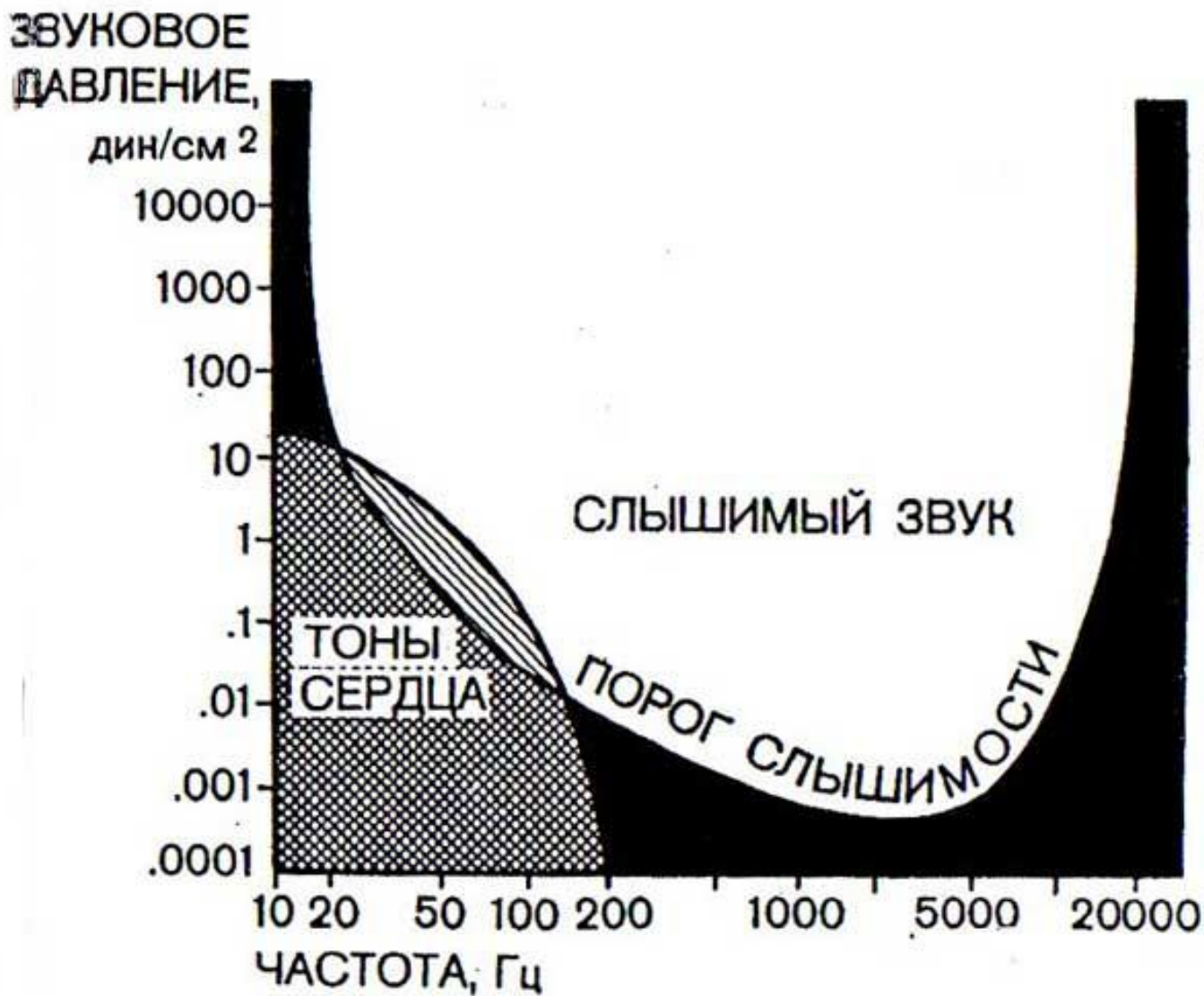
5. Уровень интенсивности

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \quad [Б] \quad L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad [дБ]$$

Скорость звука в различных средах и акустические сопротивления сред

Среда	Скорость звука, м/с	Плотность относительно воды, ρ_c / ρ_B	Акустическое сопротивление относительно воды, Z_c / Z_B
Воздух (при нормальных условиях)	343	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Дистиллированная вода (при +20°C)	1482	1,0	1,0
Легкие	400-1200		
Жировая ткань	1350-1470	-	-
Мозг	1520-1570	0,95	0,86-0,96
Кровь	1540-1600	1,03	1,06-1,09
Печень	1550-1610	1,06	1,04-1,08
Мышечная ткань	1560-1620	1,06	1,11-1,14
Почка	1560	1,07	1,13-1,18
Мягкие ткани (среднее значение)	1540	1,07	1,13
		1,06	1,11
Костная ткань	2500-4300		
Камни печени	1400-2200	1,2-1,8	2,2-5,0
			0,8-1,6

Слышимость на разных частотах



<i>Примерный характер звука</i>	<i>Интенсивность звука, Вт/м²</i>	<i>Звуковое давление, Па</i>	<i>Уровень интенсивности звука относительно порога слышимости, дБ (или уровень громкости звука для частоты 1 кГц, фон)</i>
Порог слышимости	10 ⁻¹²	0,00002	0
Сердечные тоны через стетоскоп	10 ⁻¹¹	0,000064	10
Шепот	10 ⁻¹⁰	0,0002	20
	10 ⁻⁹	0,00064	30
Разговор:			
тихий	10 ⁻⁸	0,002	40
нормальный	10 ⁻⁷	0,0064	50
громкий	10 ⁻⁶	0,02	60
Шум на оживленной улице	10 ⁻⁵	0,064	80
Крик	10 ⁻⁴	0,2	80
Шум:			
в поезде метро	10 ⁻³	0,64	90

<i>Приимерный характер звука</i>	<i>Интенсивность звука, Вт/м²</i>	<i>Звуковое давление, Па</i>	<i>Уровень интенсивности звука относительно порога слышимости, дБ (или уровень громкости звука для частоты 1 кГц, фон)</i>
мотоцикла (максимальный)	10 ⁻²	2	100
двигателя самолета	10 ⁻¹	6,4	110
То же, вблизи	10 ⁰	20	120
Порог болевого ощущения	10	64	130

Характеристики слухового ощущения (субъективные)

1. Высота

2. Тембр

3. Громкость

Частота

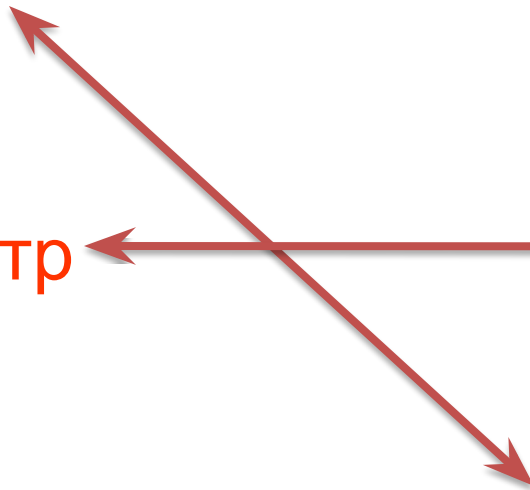
Высота

Акустический спектр

Тембр

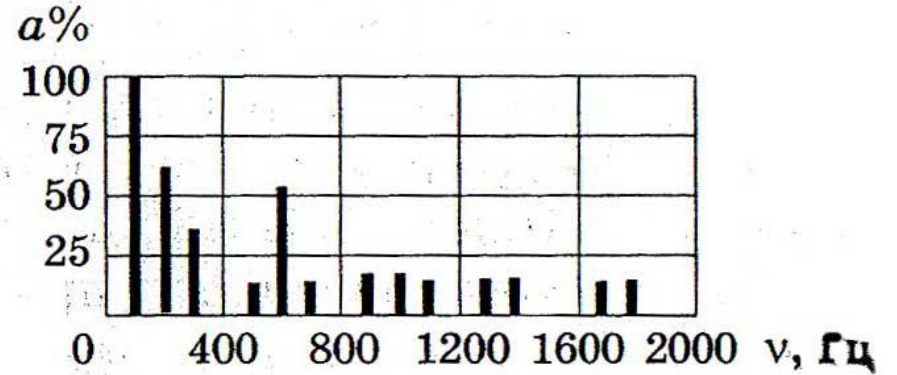
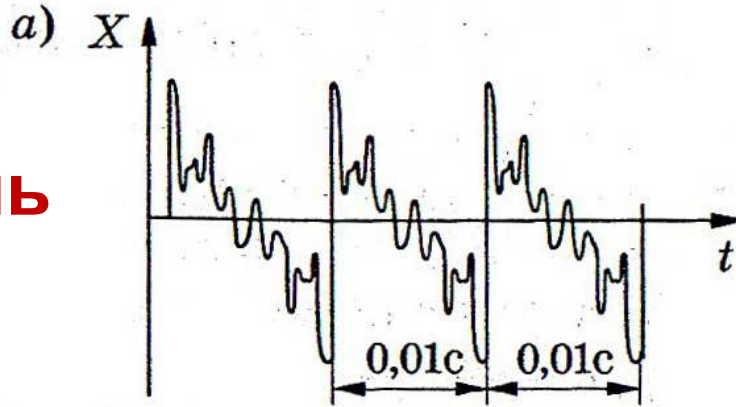
Уровень
ИНТЕНСИВНОСТИ

Громкость

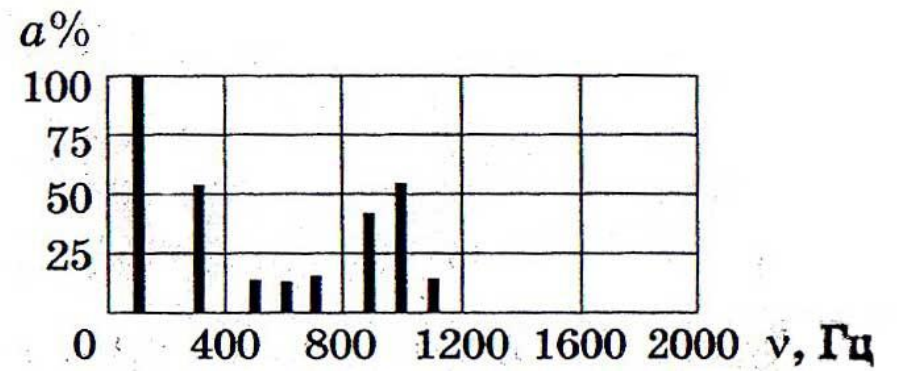
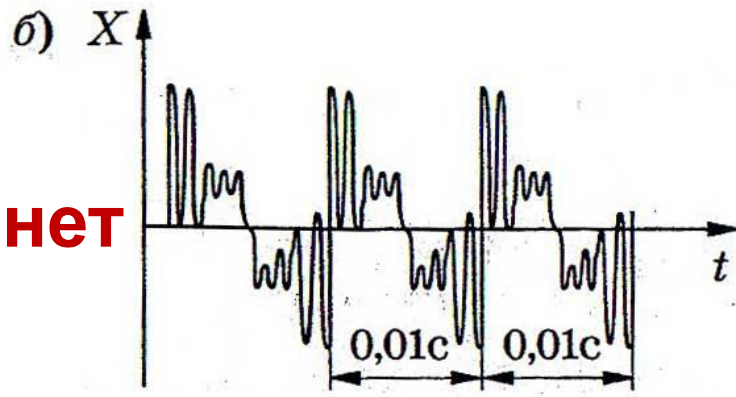


Одна и та же нота:

Рояль



Кларнет



Психофизический закон

Вебера - Фехнера

Если раздражение (I) увеличивать в геометрической прогрессии (то есть в одинаковое число раз), то ощущение (E) этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (то есть на одинаковую величину).

$$aI_0, a^2I_0, a^3I_0$$

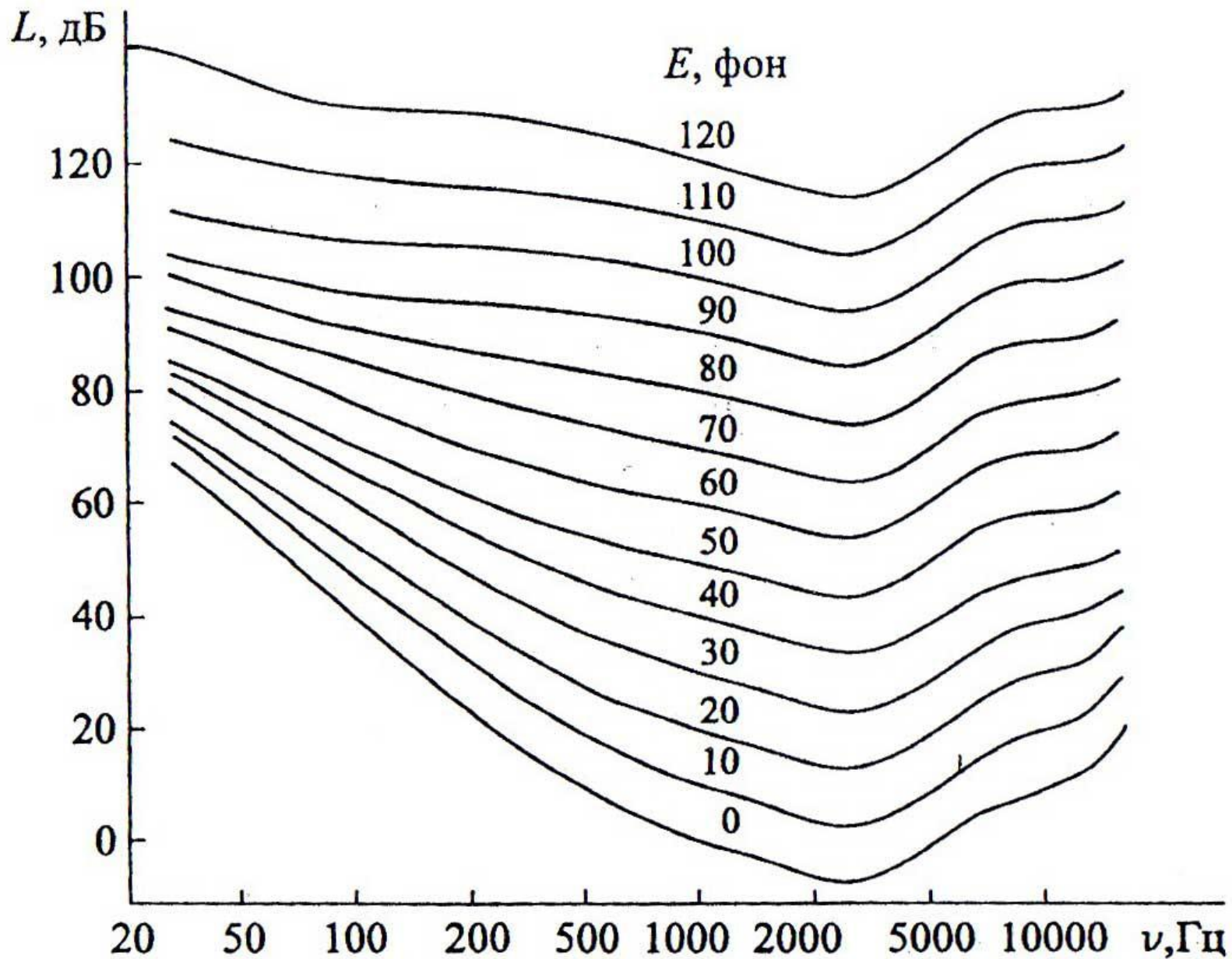
$$E_0, 2E_0, 3E_0$$

$$E = k \lg \frac{I}{I_0} \quad [\text{фон}]$$

на $\nu = 1 \text{ кГц}$ $k = 10$

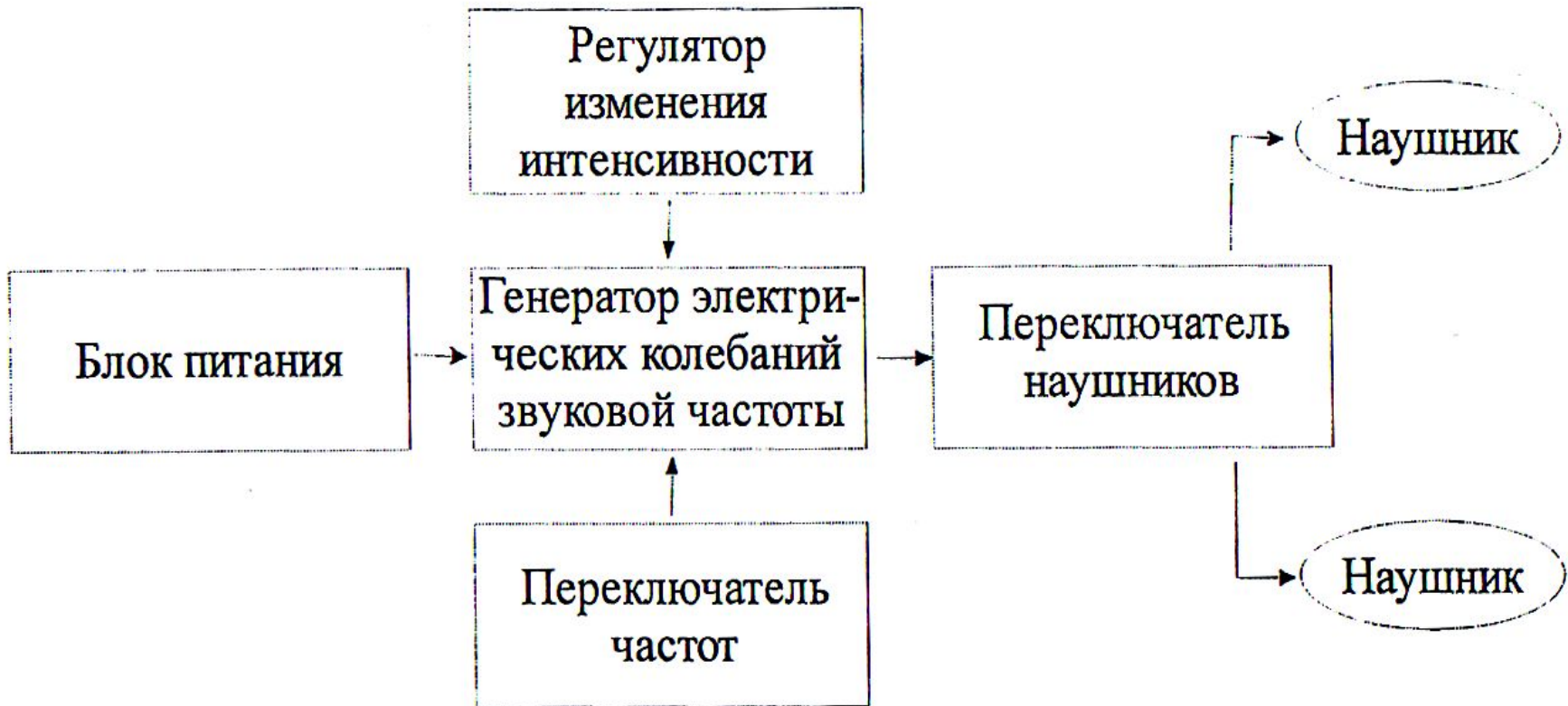
$$E = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad 1 \text{ фон} = 1 \text{ дБ}$$

Кривые равной громкости

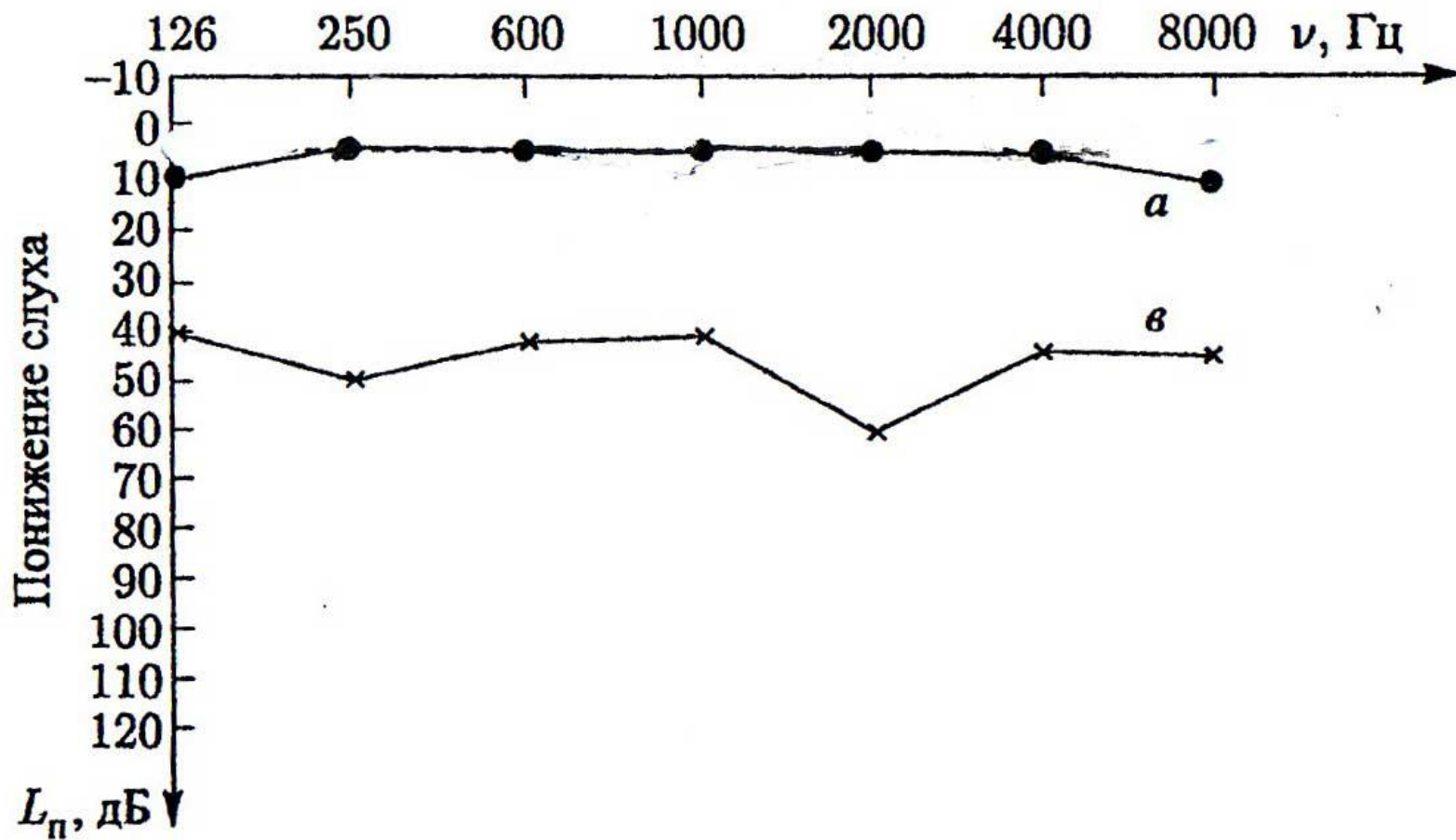


Аудиометрия

- метод измерения остроты слуха на пороге слышимости



Структурная схема аудиометра



Аудиограммы: а – воздушное проведение норма;
 в – воздушное проведение при заболевании

Физические основы звуковых методов исследования в клинике

1. Перкуссия
2. Аускультация
3. Фонокардиография

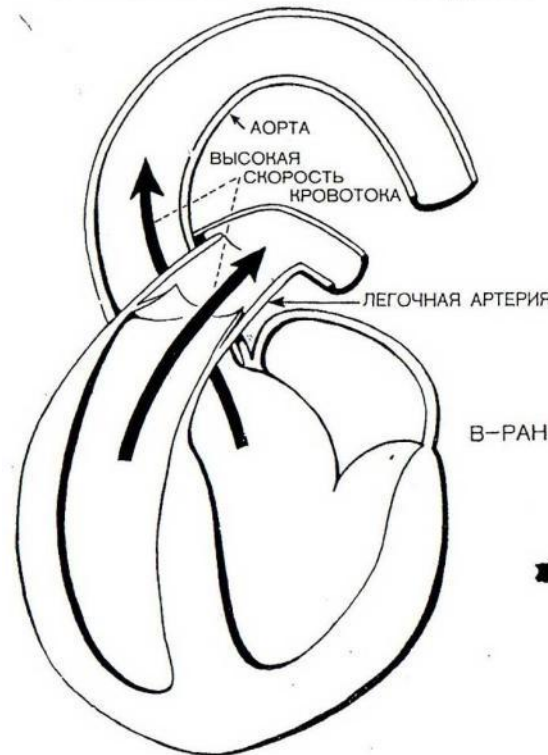
2. Аускультация

А-БЫСТРОЕ ИЗГНАНИЕ ИЗ ЖЕЛУДОЧКА

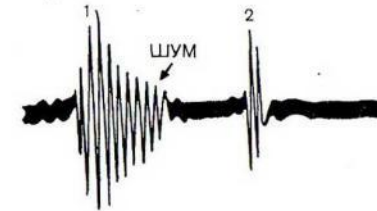
Б - ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ КОНУСА ЛЕГОЧНОЙ АРТЕРИИ



Фонендоскоп



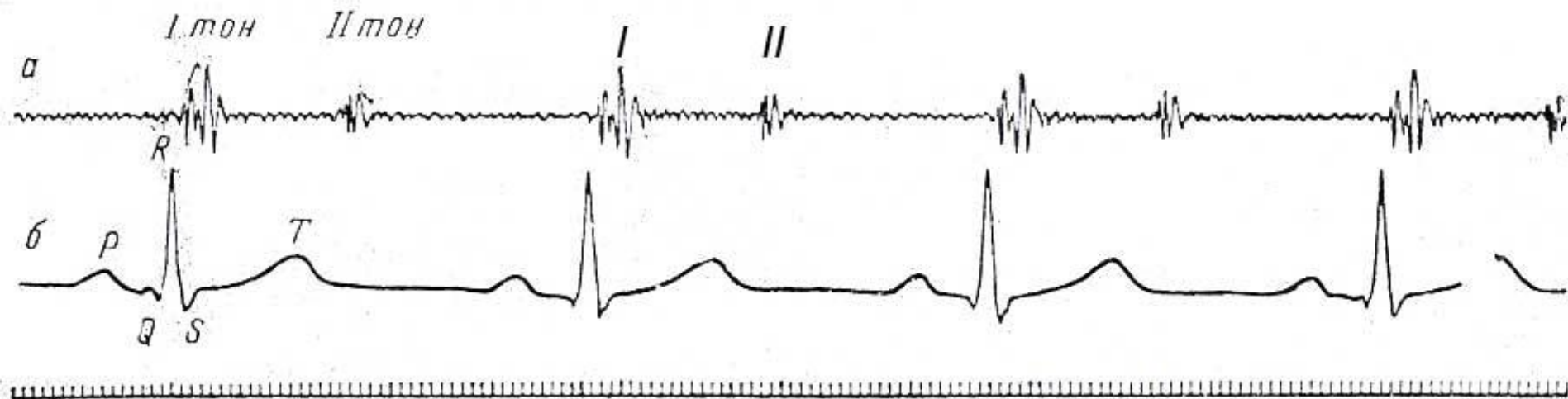
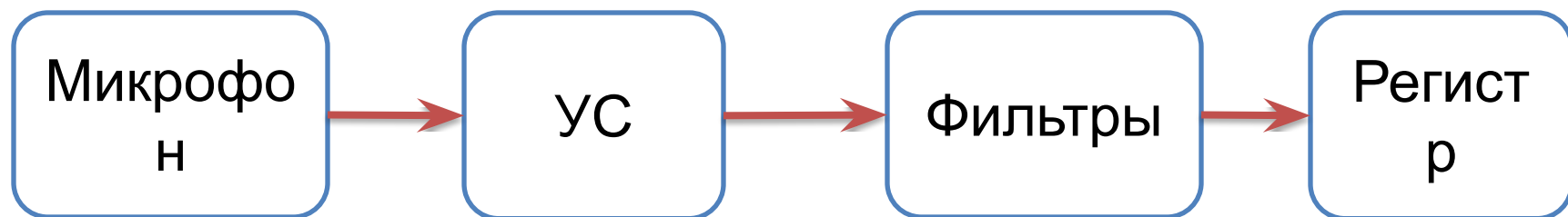
В-РАННИЙ СИСТОЛИЧЕСКИЙ ШУМ



Функциональные систолические шумы при аускультации.

А. При нормальных условиях кровь течет через аорту и легочную артерию с достаточной скоростью, чтобы создать турбулентность во время фазы быстрого изгнания систолы желудочков. Ранние систолические шумы могут быть услышаны у многих здоровых детей в покое и почти у любого здорового человека после физической нагрузки.

3. Фонокардиография (ФКГ)



Фонокардиограмма (а) и электрокардиограмма (б) (отметка времени – 0,02 секунды)

Ультразвук

Ультразвук (УЗ)

-механические колебания и волны с частотой более 20 кГц.

Верхний предел УЗ - частот
 $10^9 - 10^{10}$ Гц.

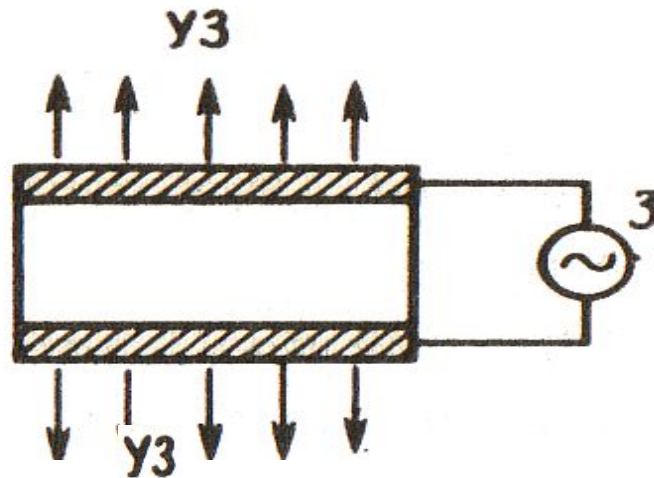
Особенности распространения УЗ в среде

- 1. УЗ - волна является продольной.**
- 2. Лучевой характер распространения.**
- 3. Проникновение в оптически непрозрачные среды.**
- 4. Возможность фокусировки энергии луча в малом объеме.**
- 5. Отсутствие дифракции на стенках внутренних органов человека.**
- 6. Отражение от границы раздела сред, отличающихся волновым сопротивлением.**
- 7. Способность поглощаться биологическими тканями.**

Источники и приёмники УЗ

УЗ излучатели:

1) Электромеханический

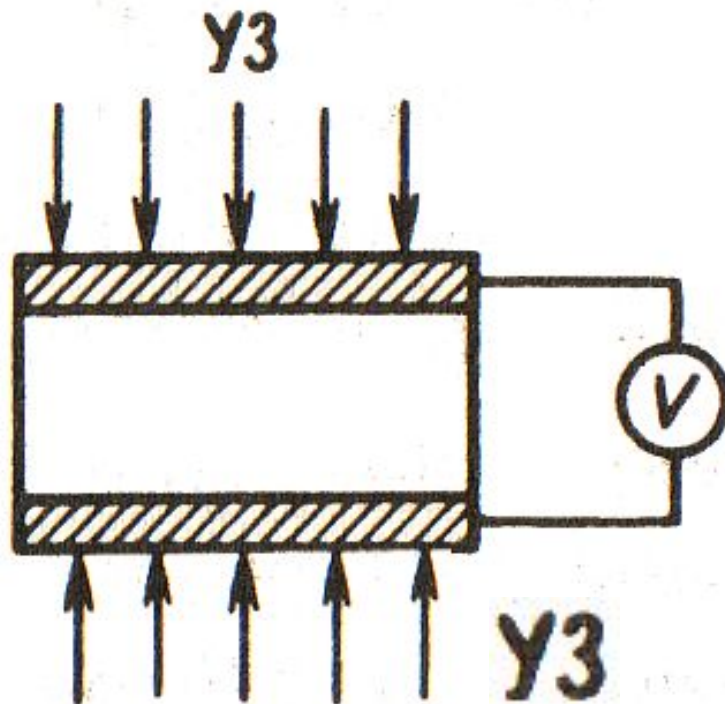


Обратный пьезоэлектрический эффект – механическая деформация под действием переменного электрического поля.

2) Магнитострикционный

Магнитострикция –
деформация
ферромагнитного сердечника
под действием переменного
магнитного поля.

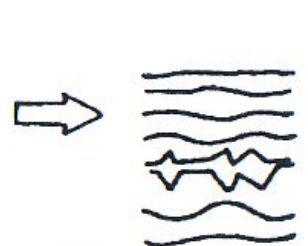
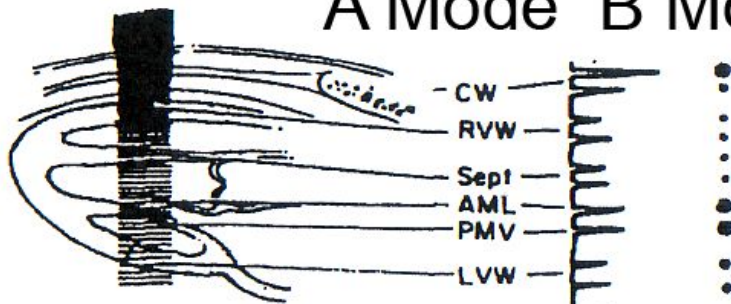
Приёмники УЗ



Прямой пьезоэлектрический эффект – возникновение переменного электрического поля под действием механической деформации.

Методы получения эхокардиограмм

A Mode B Mode M Mode

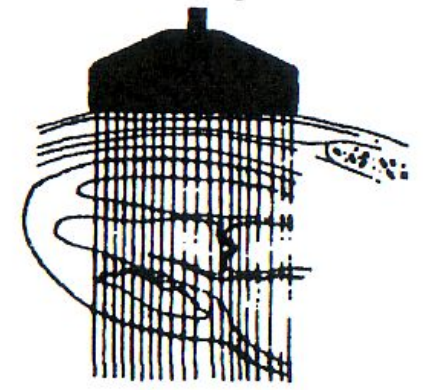
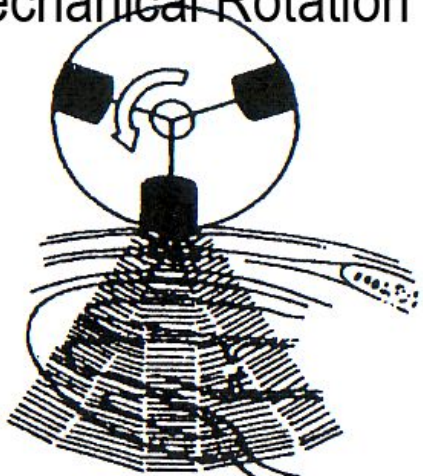
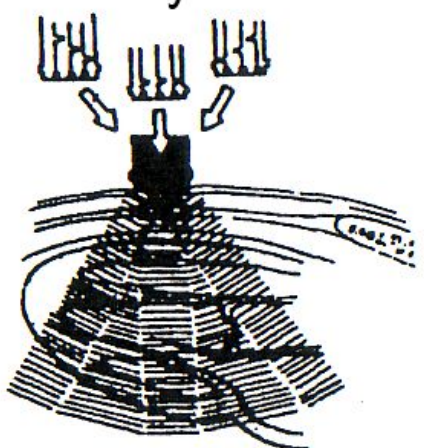


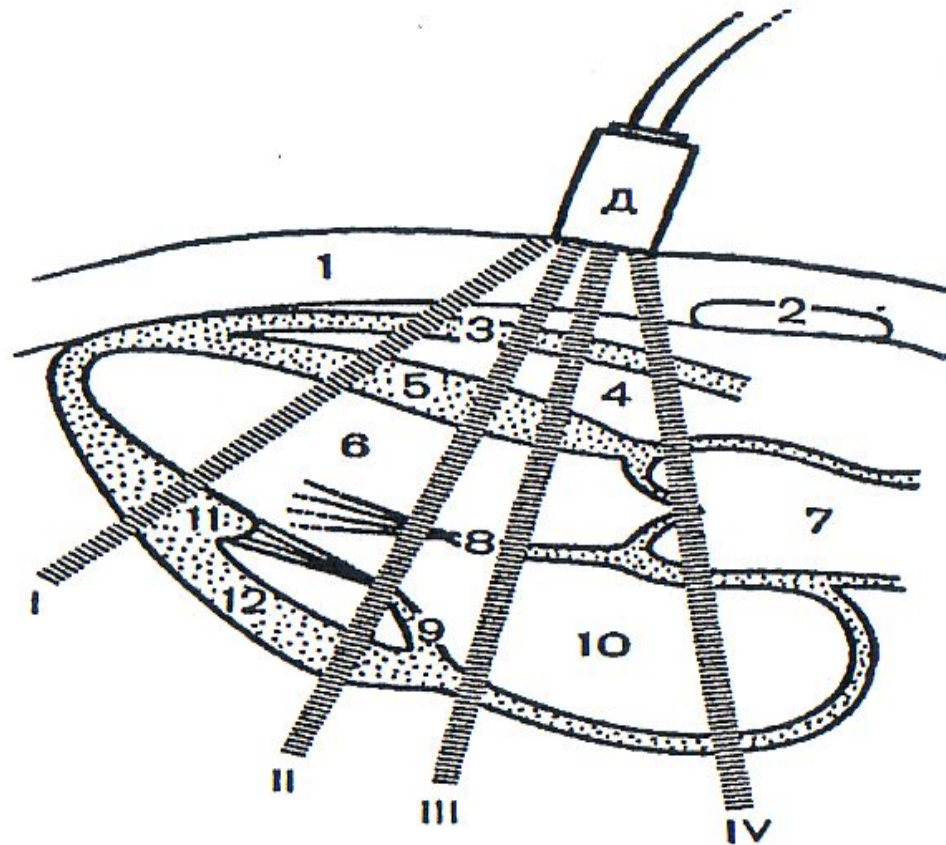
Phased
Array

Mechanical Rotation

Oscillation

Multicrystal

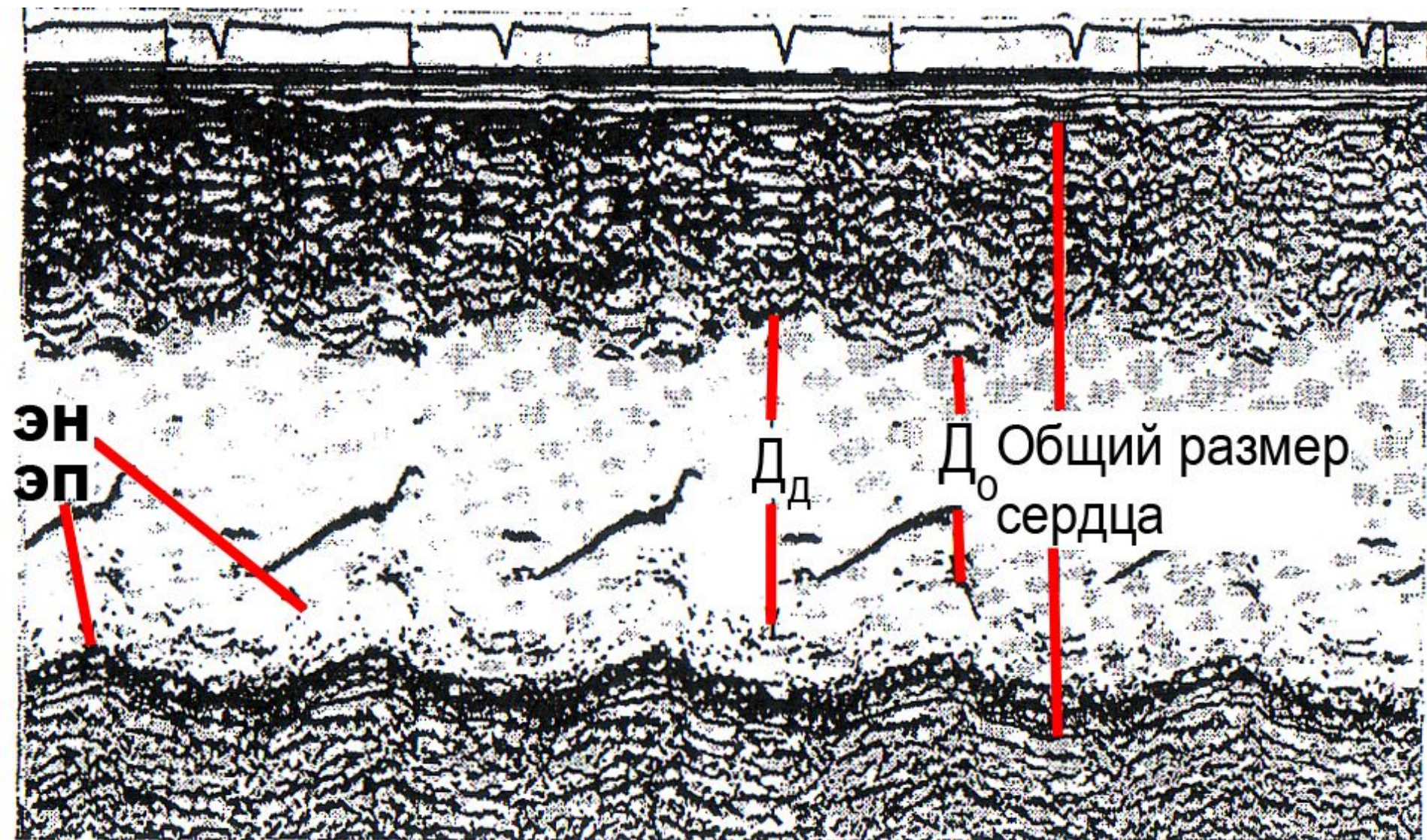




Сагиттальное сечение сердца (схема).

1 — передняя грудная стенка; 2 — грудина; 3 — передняя стенка правого желудочка; 4 — полость правого желудочка; 5 — межжелудочковая перегородка; 6 — полость левого желудочка; 7 — аорта; 8 — передняя створка митрального клапана; 9 — задняя створка митрального клапана; 10 — полость левого предсердия; 11 — папиллярные мышцы; 12 — задняя стенка левого желудочка; I, II, III, IV — направления ультразвукового луча при стандартных позициях датчика (Д).

Эхограмма левого желудочка здорового человека



•Эффект Доплера и его использование в медико-биологических исследованиях



Жил в Зальцбурге. Директор первого в мире физического института.

Доплер
Христиан
(1803-1853) -
австрийский
физик,
математик,
астроном.



Эффект Доплера заключается в **изменении частоты колебаний**, воспринимаемых наблюдателем, вследствие движения источника волн и наблюдателя относительно друг друга.

$$v_{набл} = \frac{v_{зв} \pm v_{набл}}{v_{зв} \mp v_{ист}} \cdot v_{ист}$$

При **сближении** источника и наблюдателя – **верхние** знаки,
 при **удалении** – **нижние** знаки

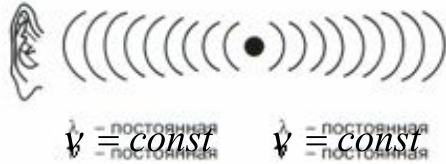
**Классический
пример этого
 феномена: Звук
 свистка от
 движущегося
 поезда.**



Источник звука неподвижен

Источник звука приближается к уху

A



B



Источник звука удаляется от уха

C



Когда звук **отражается** от движущегося объекта, частота отраженного сигнала **изменяется**. Происходит **сдвиг частоты**. При наложении первичных и отраженных сигналов возникают биения, которые прослушиваются с помощью наушников или громкоговорителя.

$$\Delta \nu \uparrow = \frac{2\nu_0 \uparrow}{\nu_{уз}} \nu_{ген}$$

Доплеровский **сдвиг** $\Delta \nu$ - это разность между отраженной и переданной частотами.

Эффект Доплера используется для определения:

- скорости движения тела в среде,
- скорости кровотока,
- скорости движения клапанов и стенок сердца (доплеровская эхокардиография)

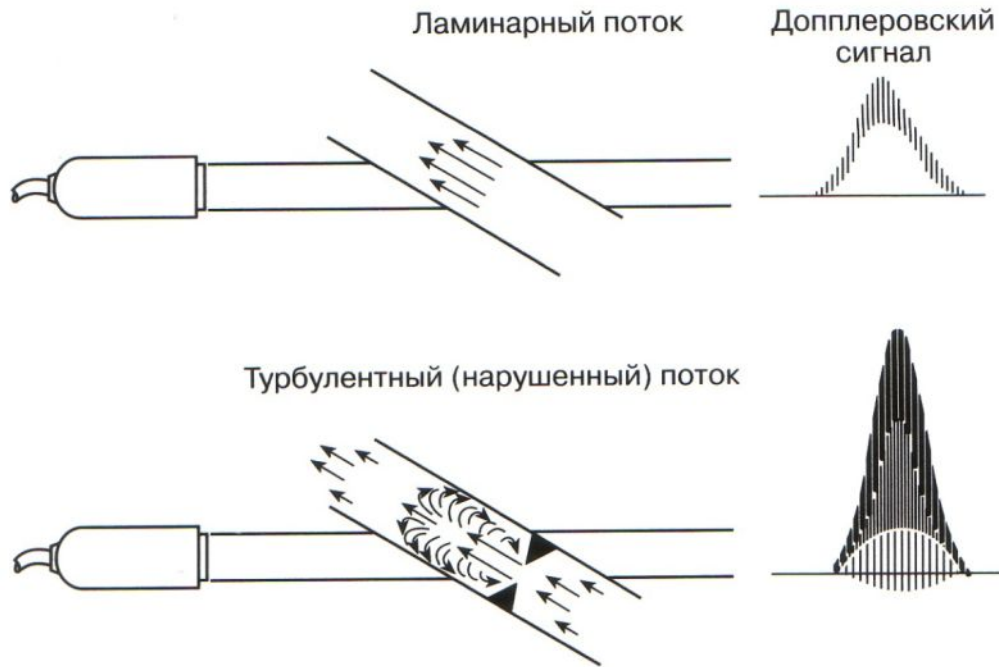


Допплерометрия

Благодаря аппарату Дплера гинеколог, ведущий беременность, делает вывод о том, есть ли угроза для развития ребенка, насколько хорошо его состояние, сильное сердце, нормальный ли кровоток к сердцу и каково состояние кровообращения в организме малыша, все ли хорошо с пуповиной у мамы в системе мать-плод-плацента, нет ли у младенца пороков сердца, анемии или гипоксии.



Спектральный доплер позволяет выявить 2 типа течения крови: **ламинарное** и **турбулентное**.

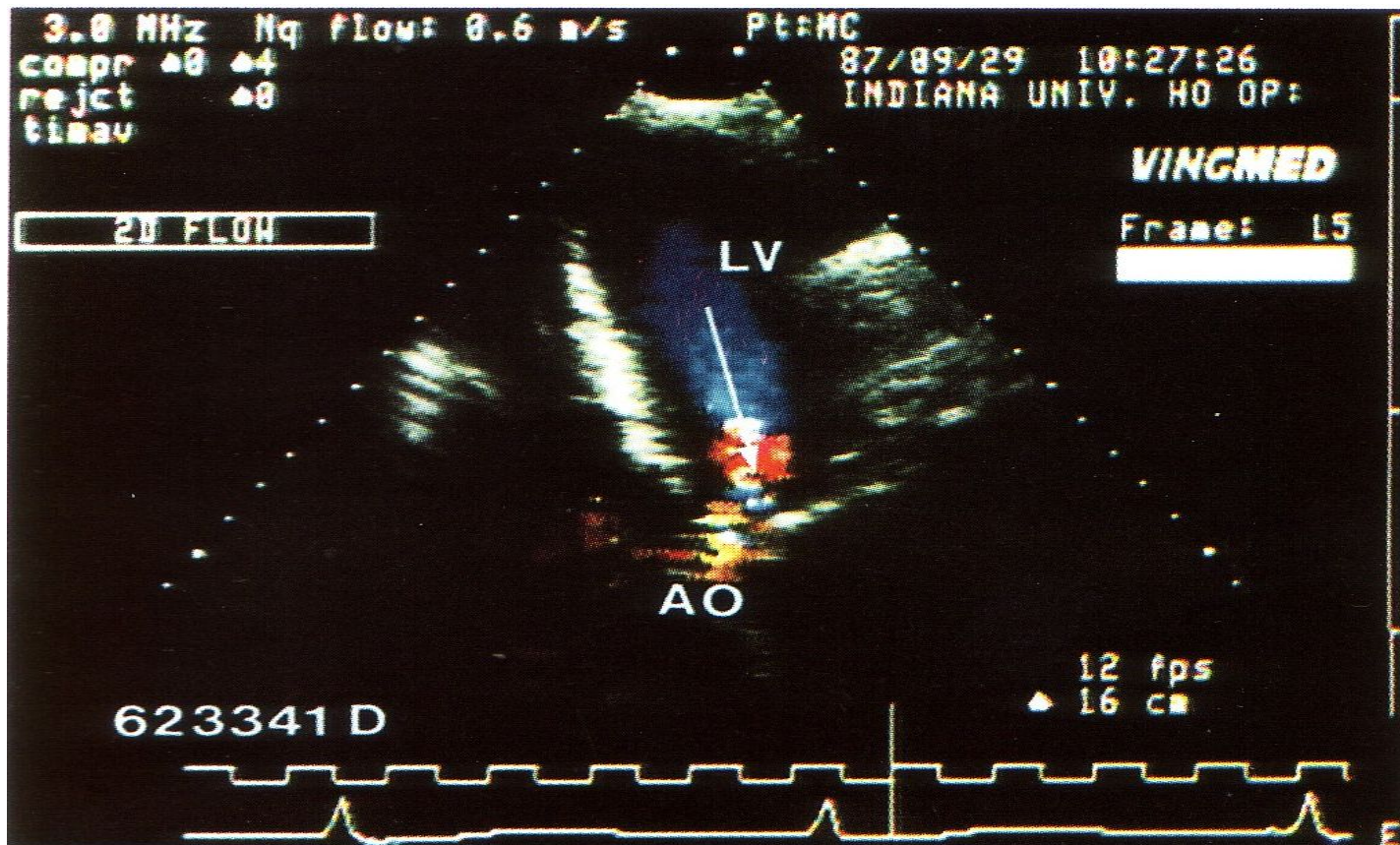


В ламинарном потоке все скорости эритроцитов примерно одинаковы по направлению, а в центральной части и по величине.

Доплеровский сигнал формирует относительно **тонкую кривую** с **минимальным спектральным расширением**.

Когда кровь течет через область со значительным изменением диаметра сосуда, создается поток, в котором множество элементов движется с различными по величине и направлению скоростями. Такой нарушенный поток создает **доплеровский сигнал с множеством частот и заметным спектральным расширением**.

Двухмерное цветное доплеровское картирование при нарушении оттока из левого желудочка. Относительно низкая скорость выходного потока левого желудочка кодируется **синим** цветом. В области **сужения** скорость возрастает, возникает наложение спектров (aliasing), и кодировка сигнала потока меняется на **красную**. На участке обструкции регистрируется относительно узкий турбулентный поток.



LV – левый желудочек

AO – аорта