

# 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

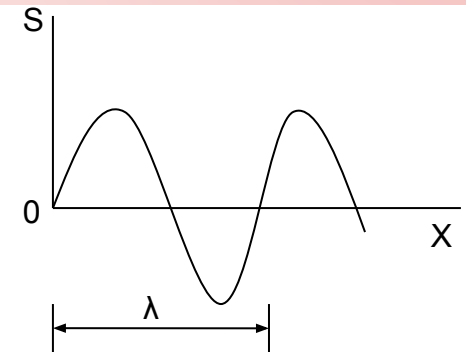
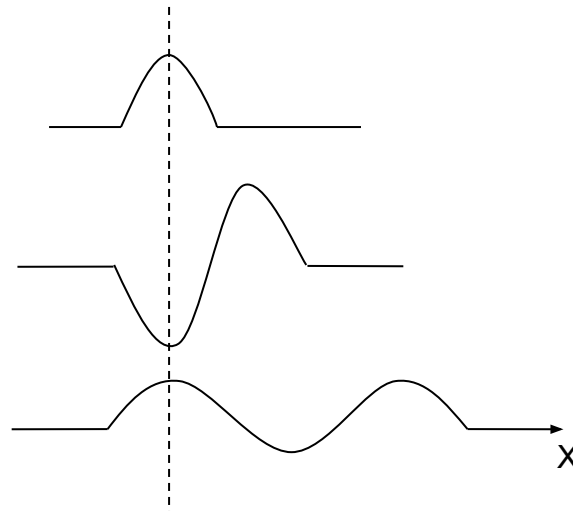
$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$$

**Волновое уравнение**

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

Его решение.

**Уравнение плоской волны**



# Бегущая волна переносит энергию.

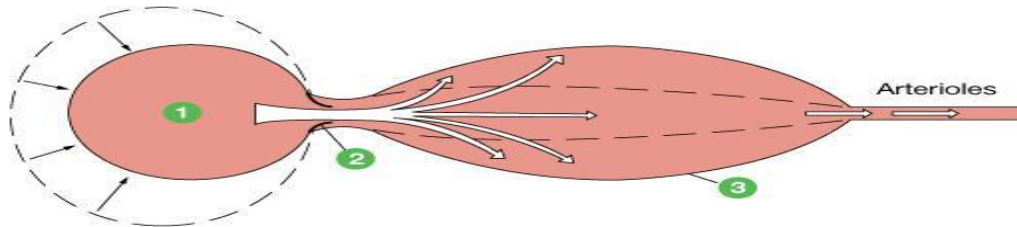
Условие существования волны:

1. Упругая среда
2. Инерция

Пример: Волна давления в артериях.

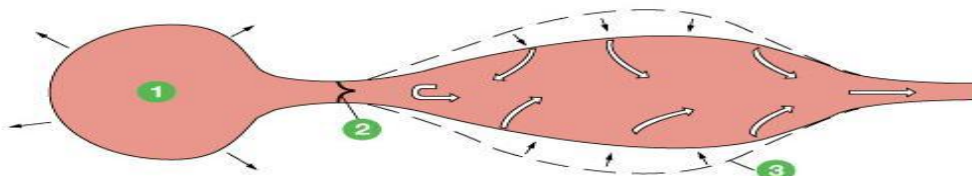
1. Упругость стенок
2. Кровь

(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)

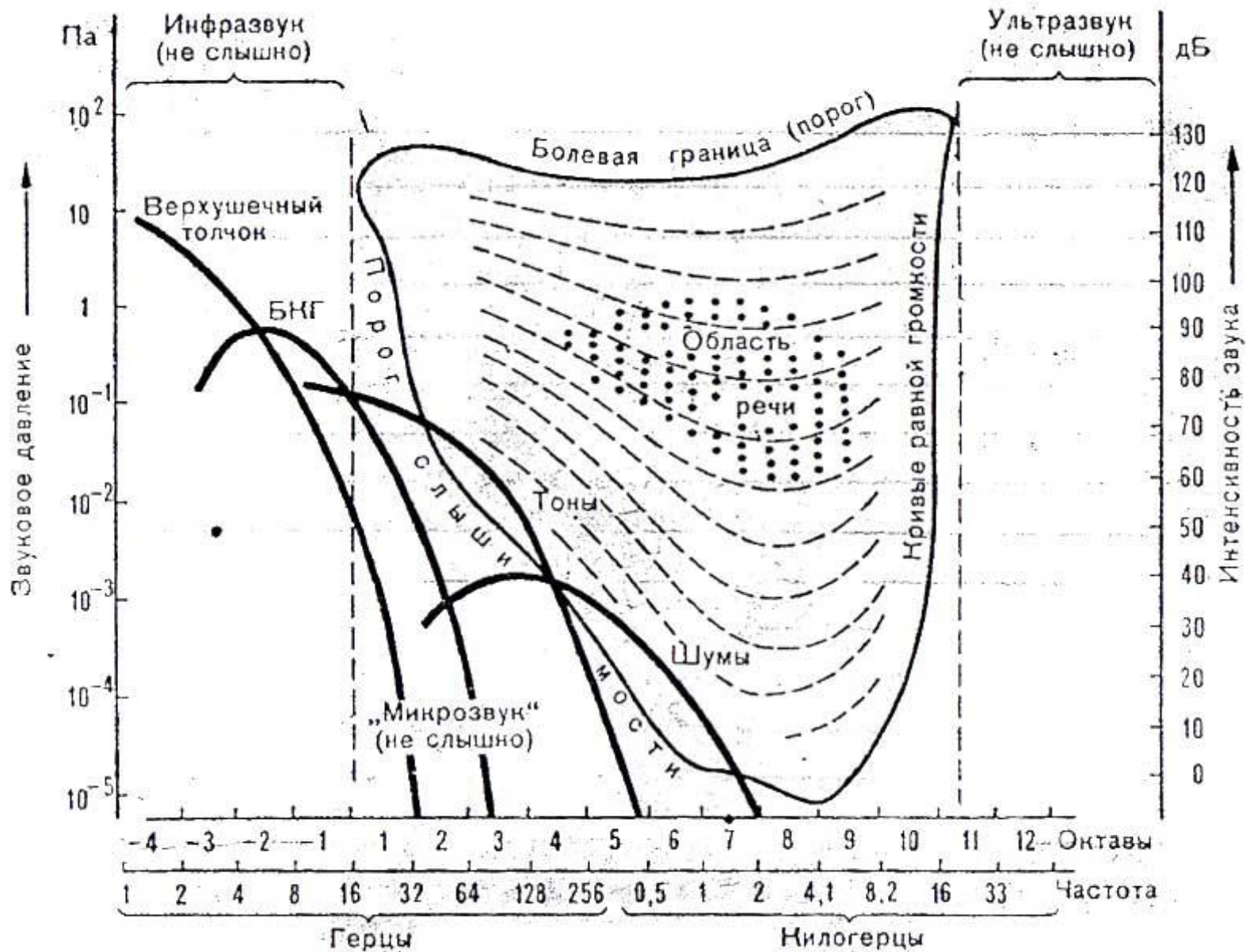


# Акустика

-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).**

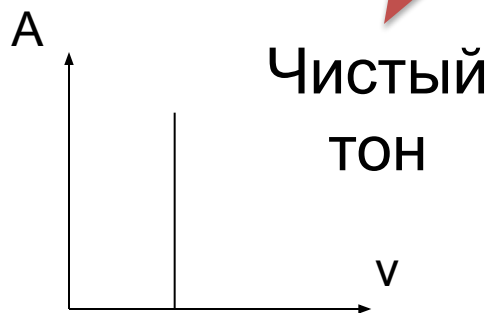
# Виды звуковых колебаний

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

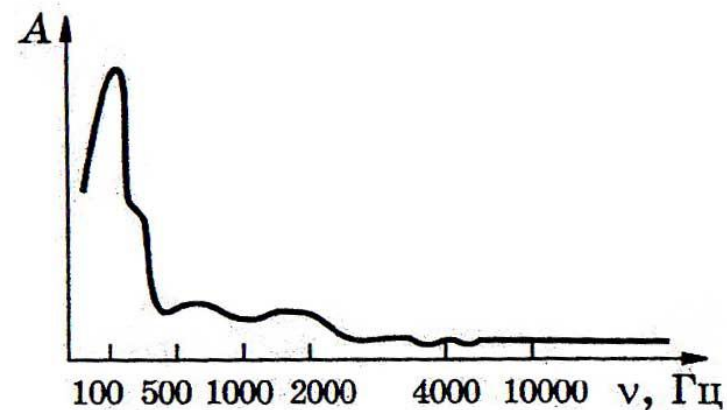
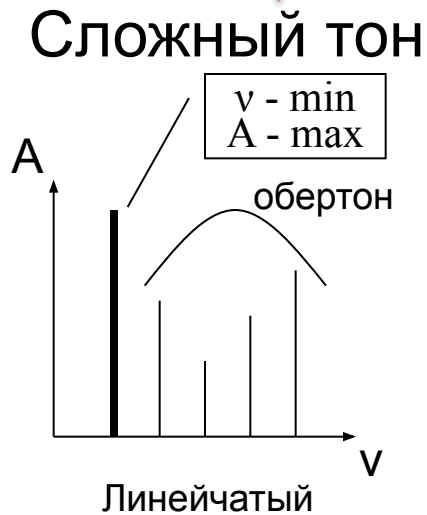
**Шум** – звук, характеризующийся сложной, неповторяющейся временной зависимостью.

**Звуковой удар** – кратковременное звуковое воздействие.

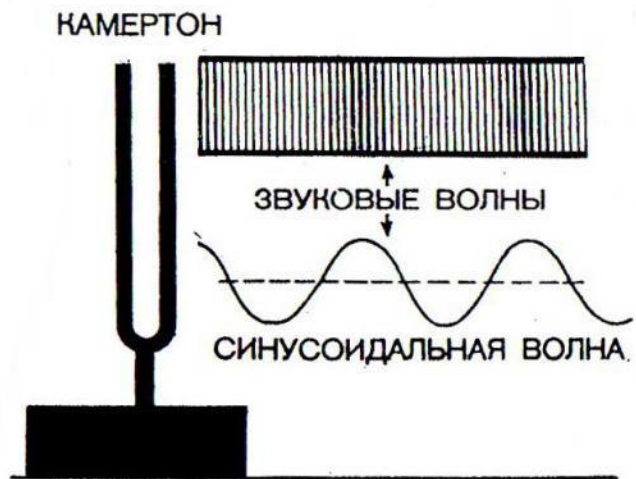
# Акустический спектр



Спектр



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             $\approx 4000$  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

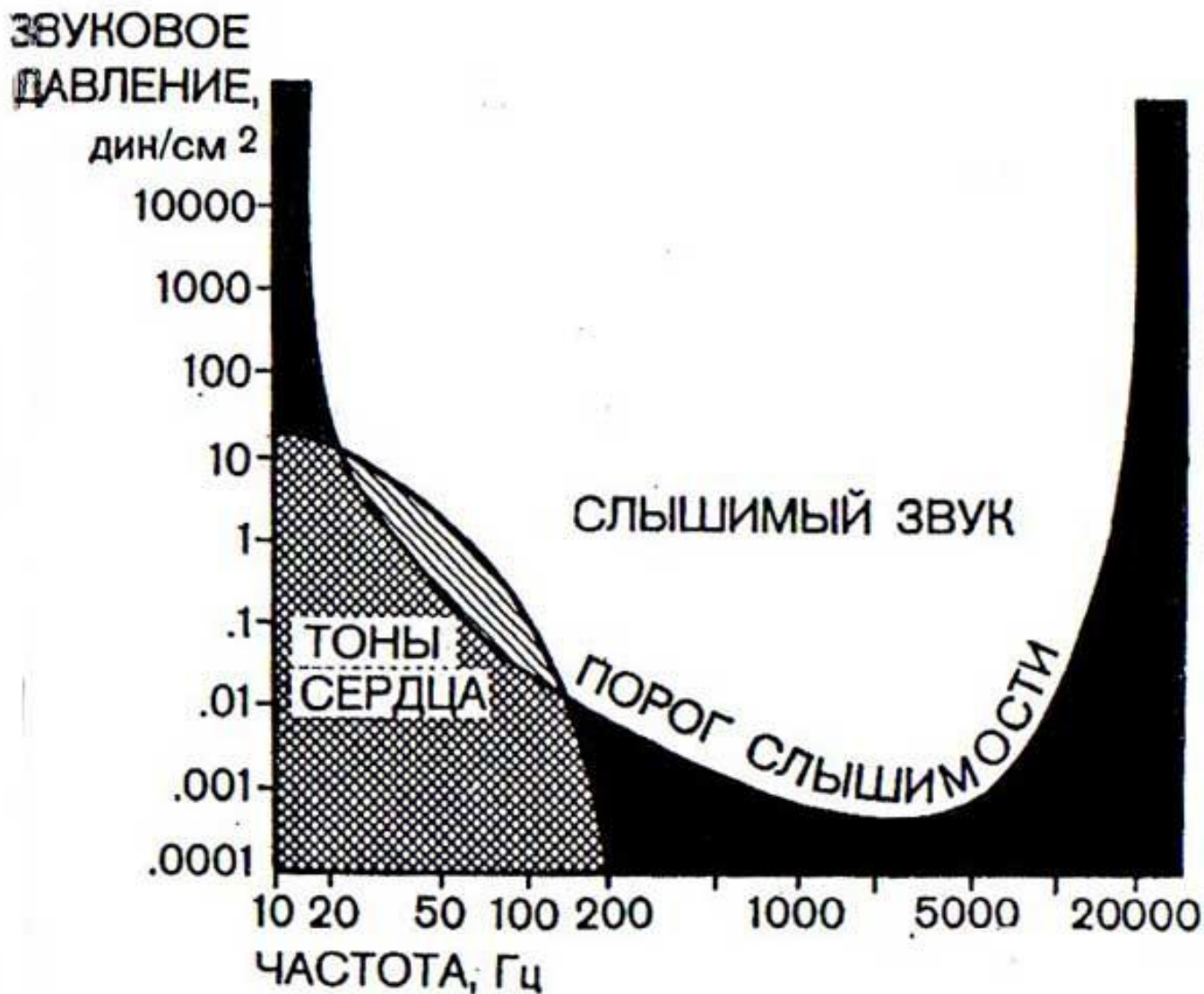
$$L = \lg \frac{I}{I_0} \quad [Б] \quad L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad [дБ]$$

# Скорость звука в различных средах и акустические сопротивления сред

Среда	Скорость звука, м/с	Плотность относительно воды, $\rho_c / \rho_B$	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/м<sup>2</sup></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 <sup>-12</sup>	0,00002	0
Сердечные тоны через стетоскоп	10 <sup>-11</sup>	0,000064	10
Шепот	10 <sup>-10</sup>	0,0002	20
	10 <sup>-9</sup>	0,00064	30
Разговор:			
тихий	10 <sup>-8</sup>	0,002	40
нормальный	10 <sup>-7</sup>	0,0064	50
громкий	10 <sup>-6</sup>	0,02	60
Шум на оживленной улице	10 <sup>-5</sup>	0,064	80
Крик	10 <sup>-4</sup>	0,2	80
Шум:			
в поезде метро	10 <sup>-3</sup>	0,64	90

<i>Приимерный характер звука</i>	<i>Интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup></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 <sup>-2</sup>	2	100
двигателя самолета	10 <sup>-1</sup>	6,4	110
То же, вблизи	10 <sup>0</sup>	20	120
Порог болевого ощущения	10	64	130

# Характеристики слухового ощущения (субъективные)

1. Высота

2. Тембр

3. Громкость

Частота

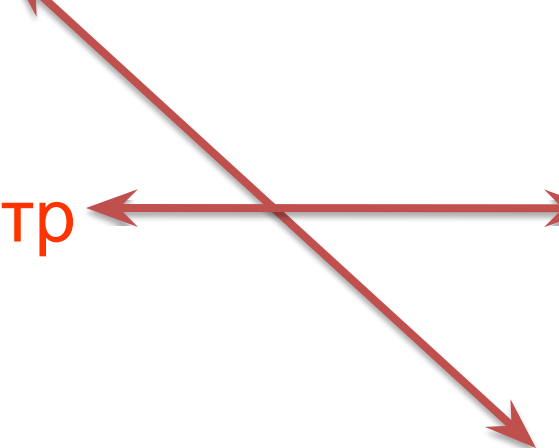
Высота

Акустический спектр

Тембр

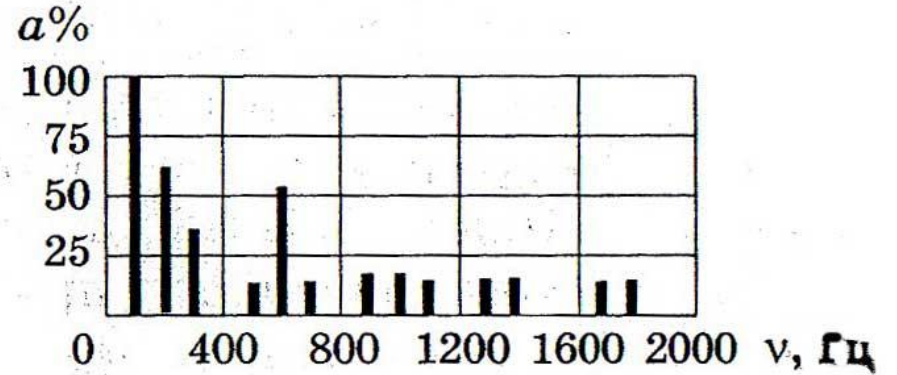
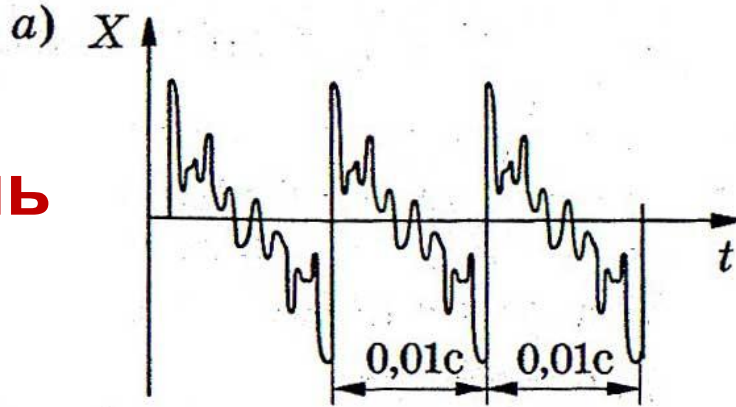
Уровень  
ИНТЕНСИВНОСТИ

Громкость

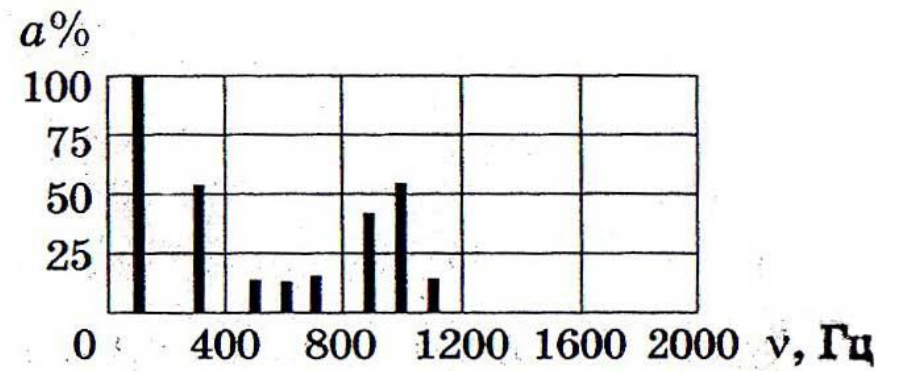
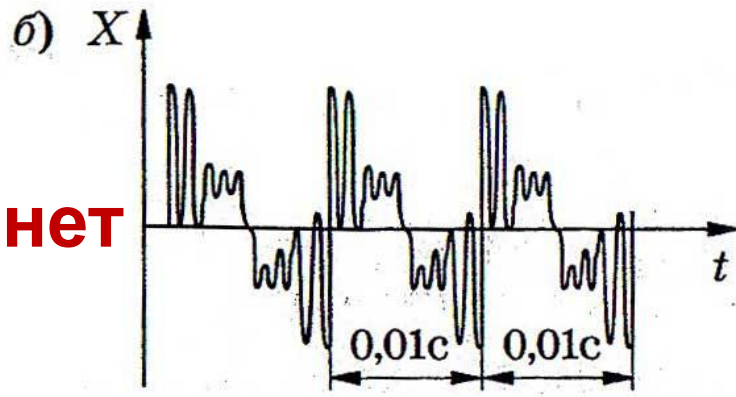


# Одна и та же нота:

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).

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

$$E_0, 2E_0, 3E_0$$

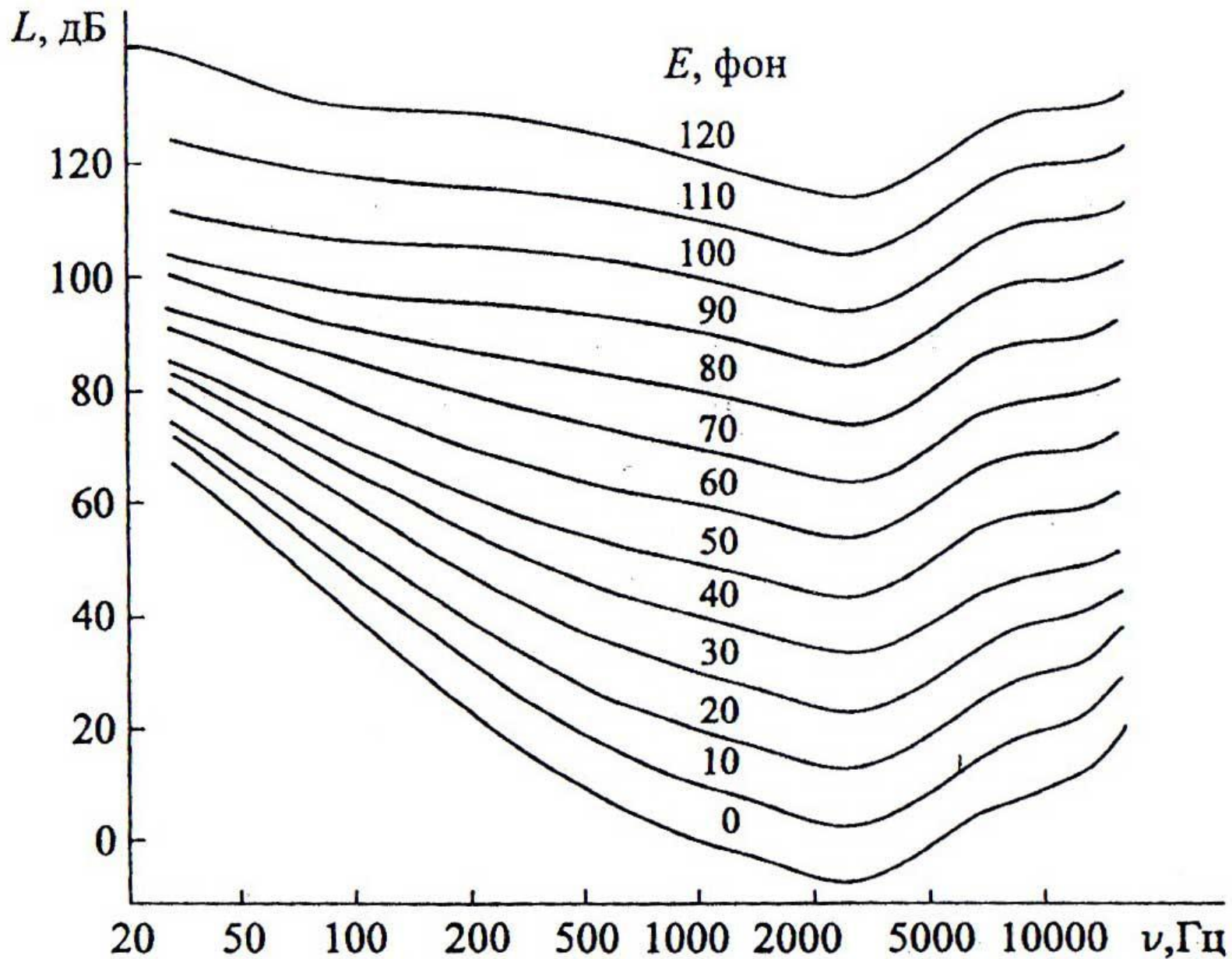
$$E = k \lg \frac{I}{I_0} \quad [\text{фон}]$$

на  $\nu = 1 \text{ кГц}$   $k = 10$

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

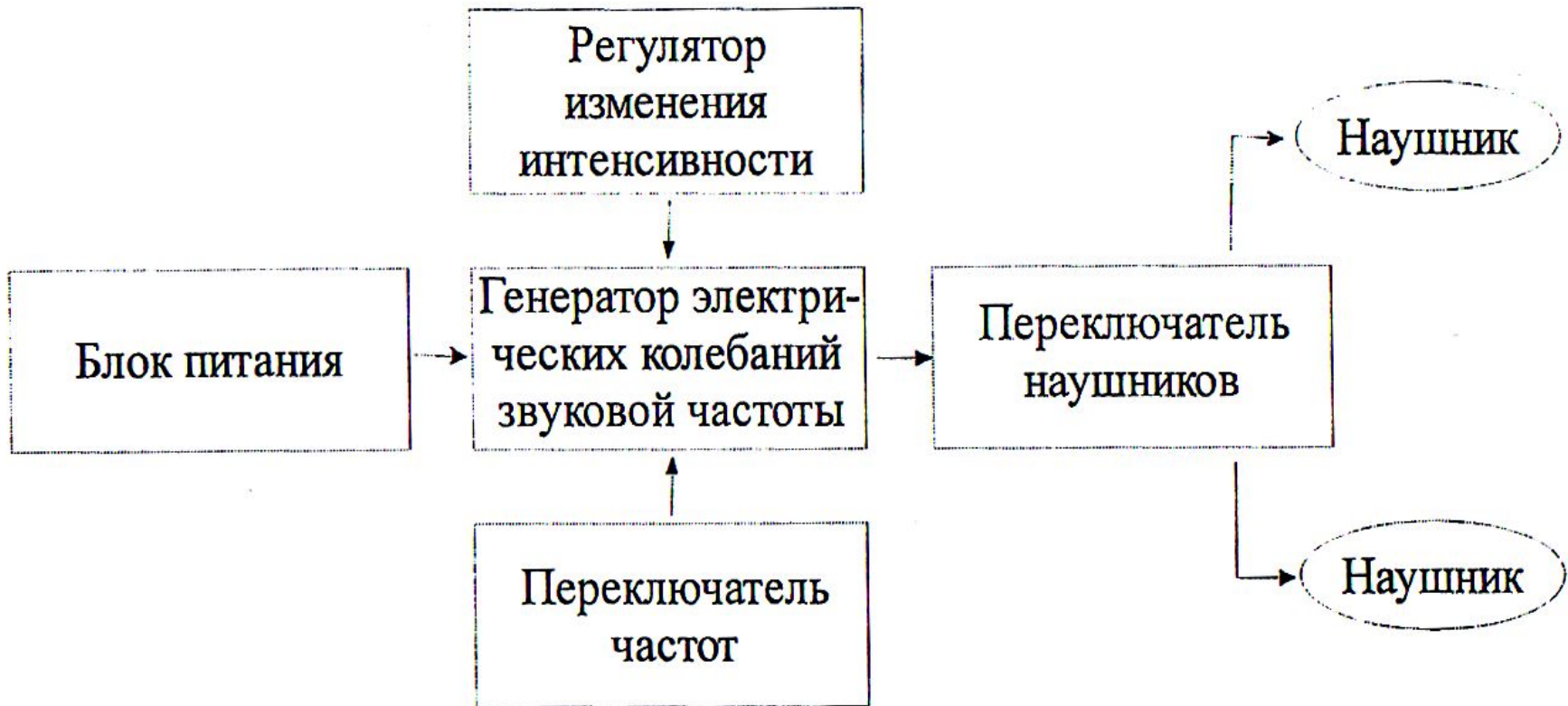


# Кривые равной громкости

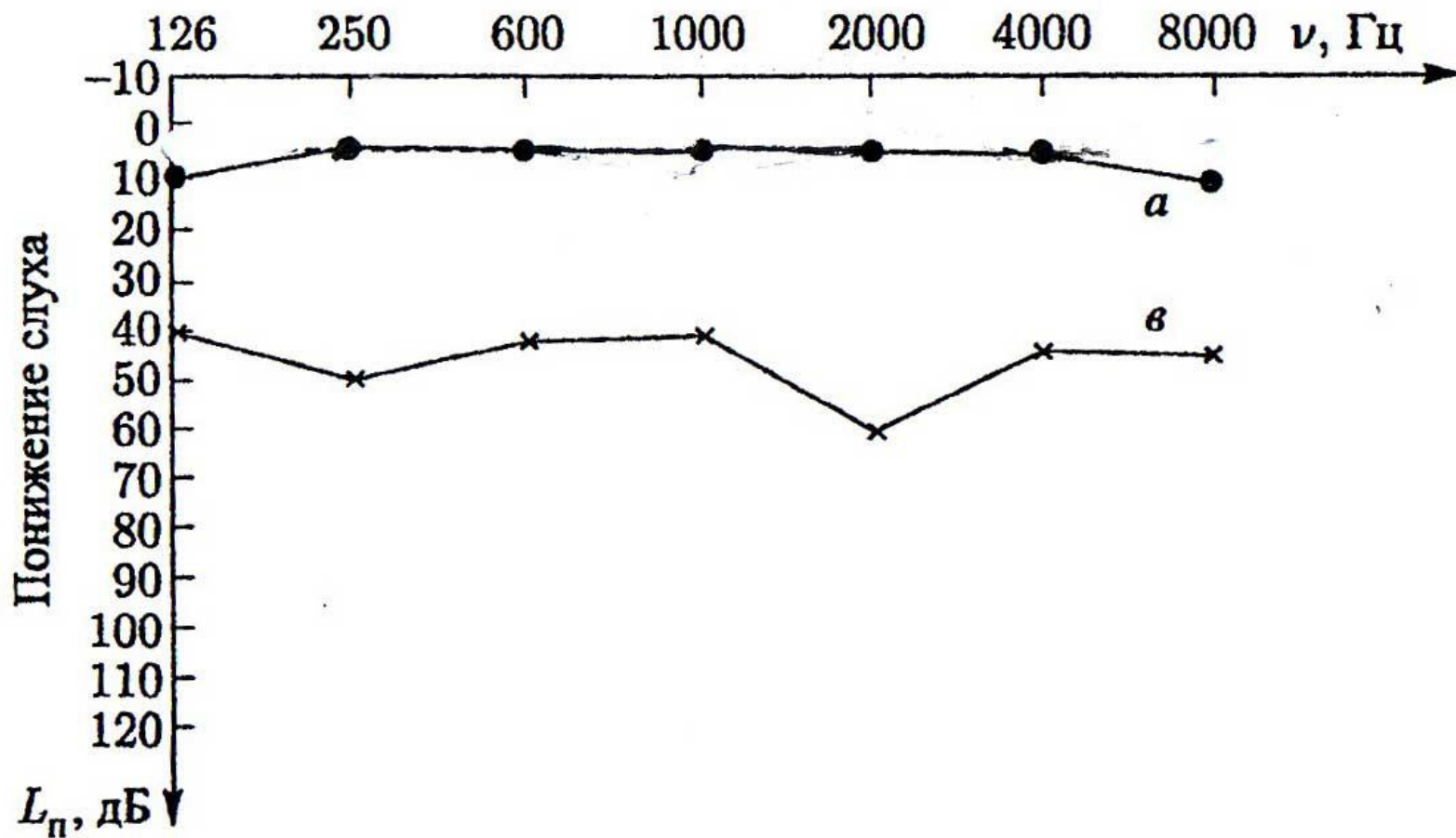


# Аудиометрия

- 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

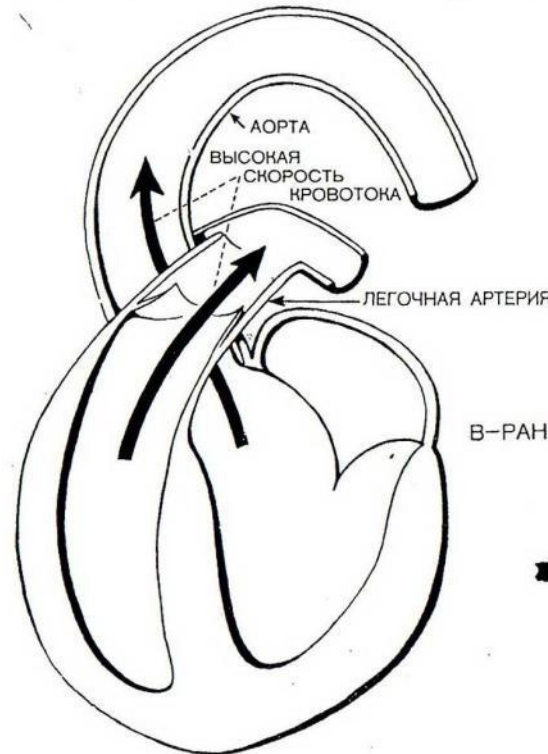
# 2. Аускультация

А-БЫСТРОЕ ИЗГНАНИЕ ИЗ ЖЕЛУДОЧКА

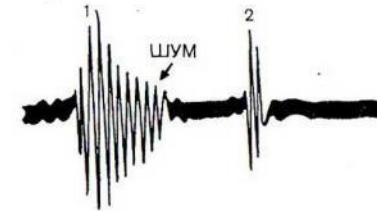
Б - ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ КОНУСА ЛЕГОЧНОЙ АРТЕРИИ



Фонендоскоп



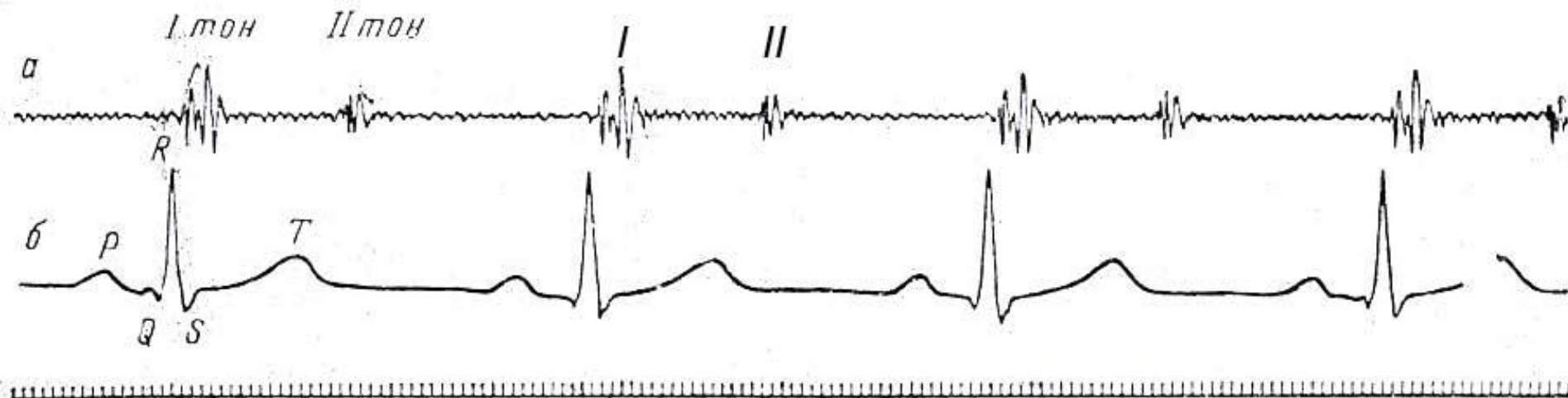
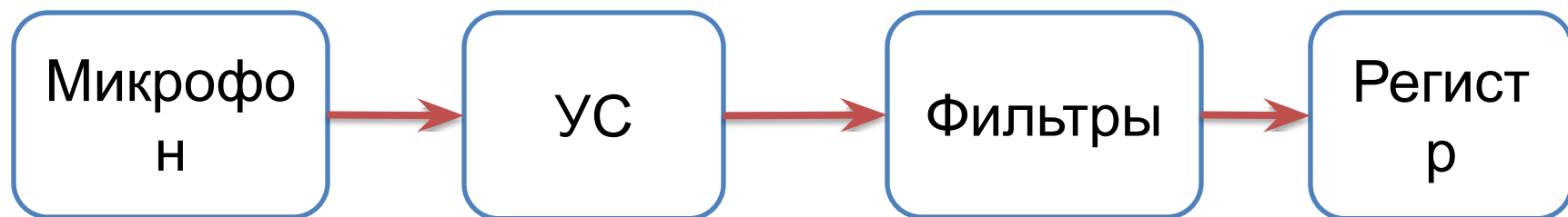
В-РАННИЙ СИСТОЛИЧЕСКИЙ ШУМ



## 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**

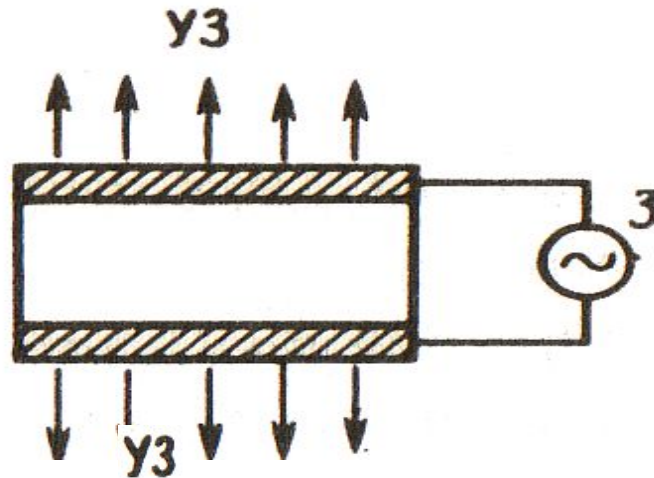
- 1. УЗ - волна является продольной.**
- 2. Лучевой характер распространения.**
- 3. Проникновение в оптически непрозрачные среды.**
- 4. Возможность фокусировки энергии луча в малом объеме.**
- 5. Отсутствие дифракции на стенках внутренних органов человека.**
- 6. Отражение от границы раздела сред,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



# Источники и приёмники УЗ

## УЗ излучатели:

### 1) Электромеханический

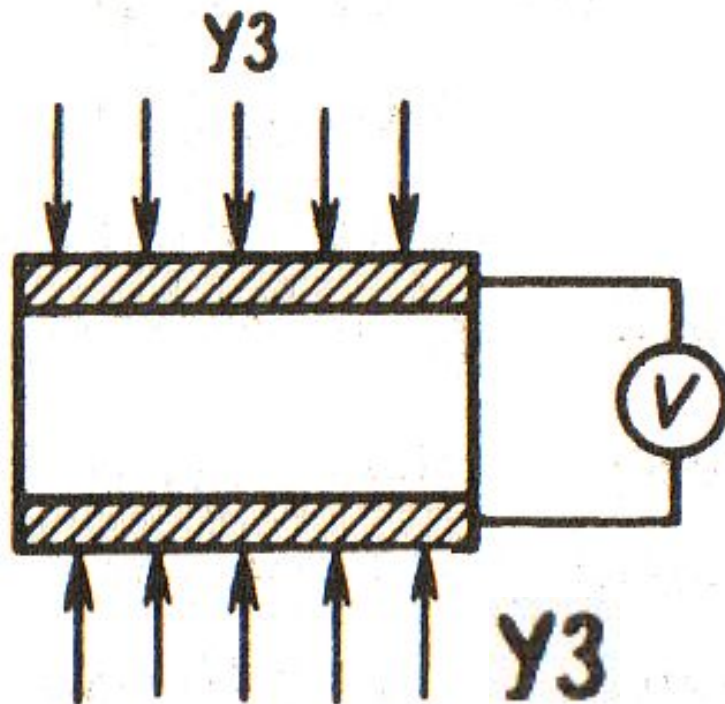


Обратный пьезоэлектрический эффект – механическая деформация под действием переменного электрического поля.

## 2) Магнитострикционный

Магнитострикция –  
деформация  
ферромагнитного сердечника  
под действием переменного  
магнитного поля.

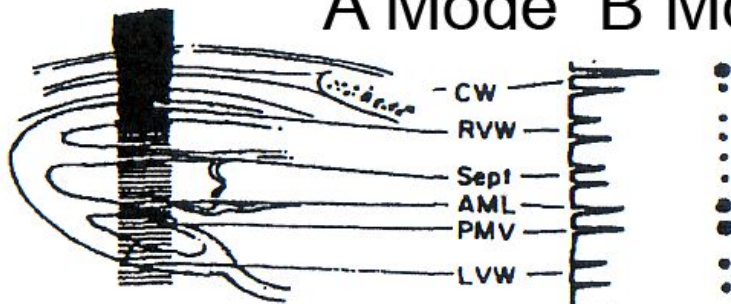
# Приёмники УЗ



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

# Методы получения эхокардиограмм

A Mode B Mode M Mode

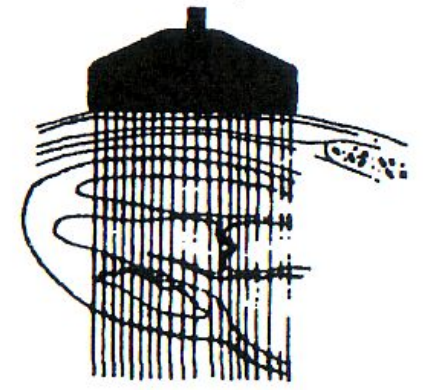
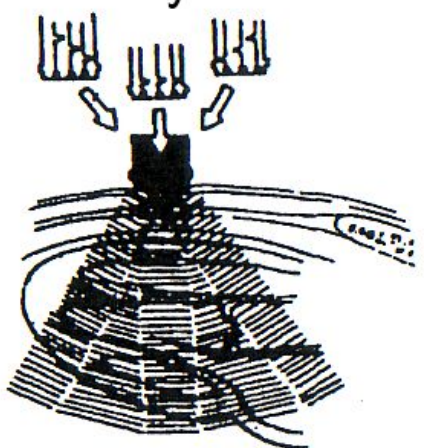


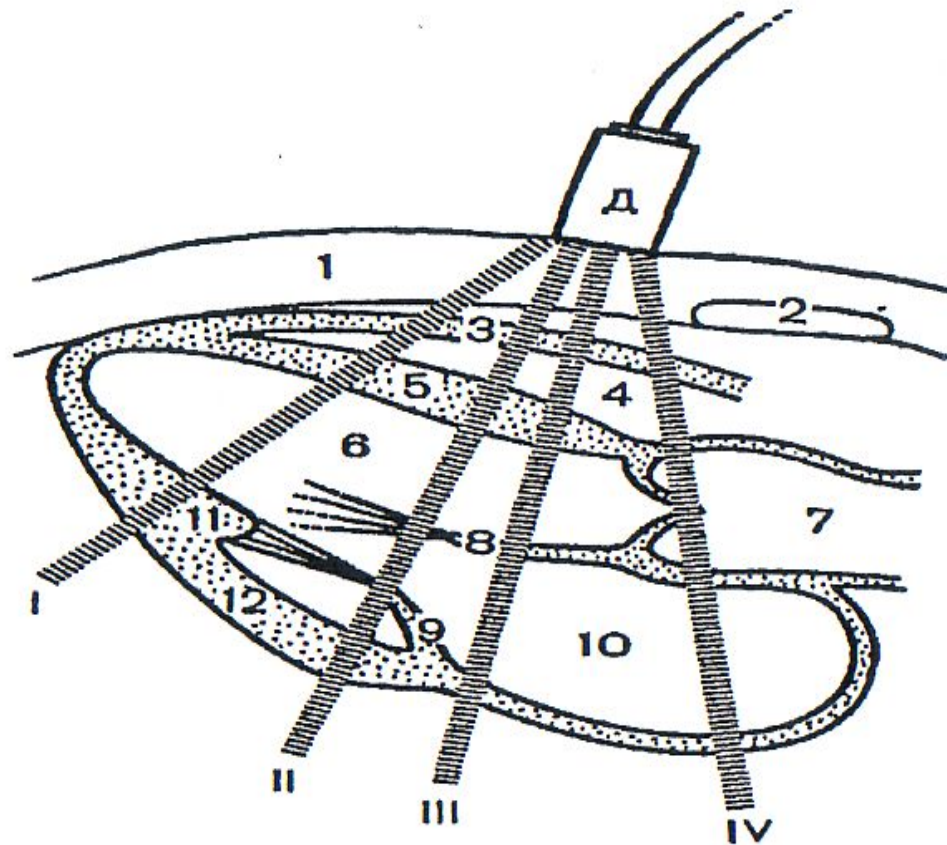
Phased Array

Mechanical Rotation

Oscillation

Multicrystal

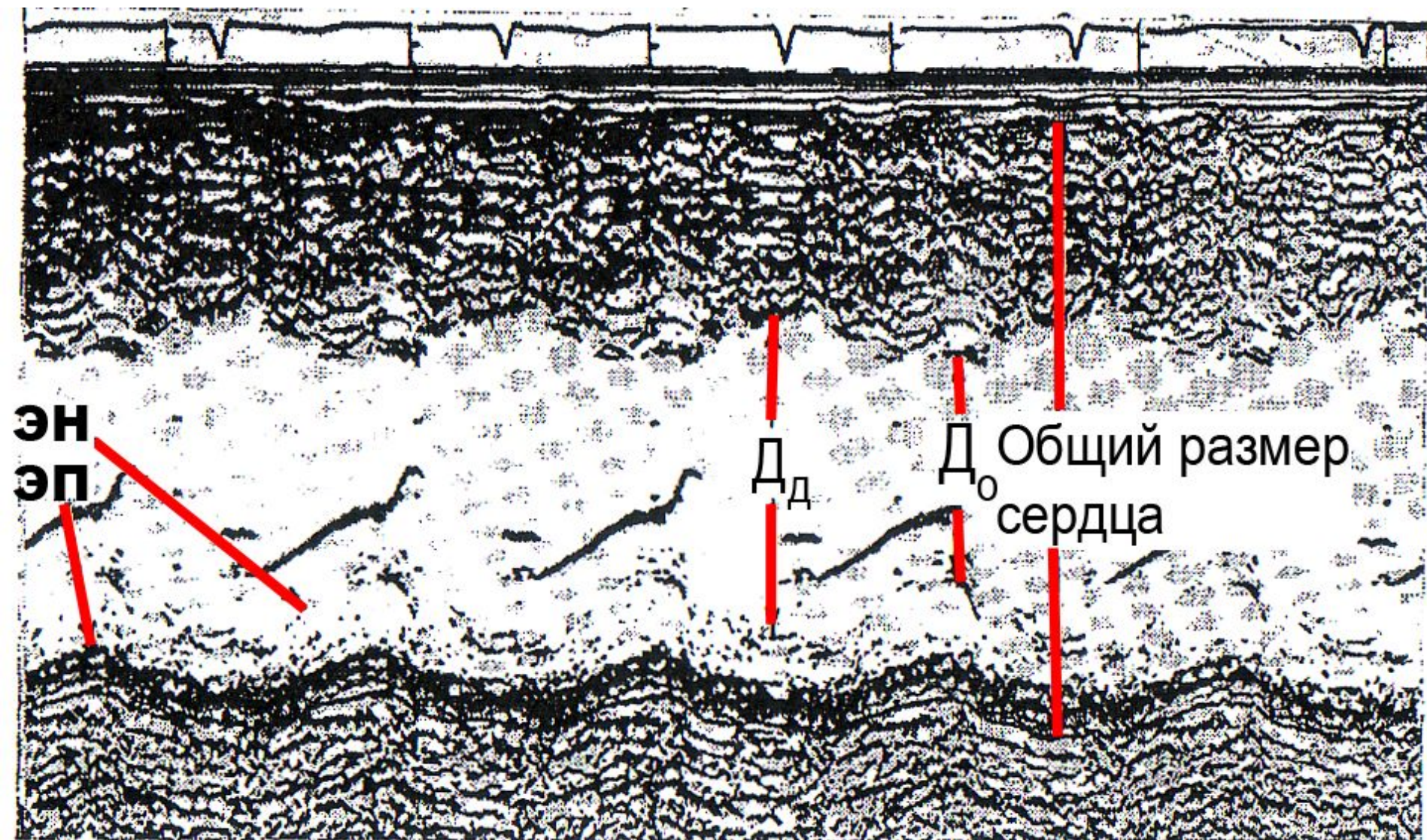




Сагиттальное сечение сердца (схема).

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.

$$\Delta \nu \uparrow = \frac{2v_0 \uparrow}{v_{уз}} \nu_{ген}$$

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)

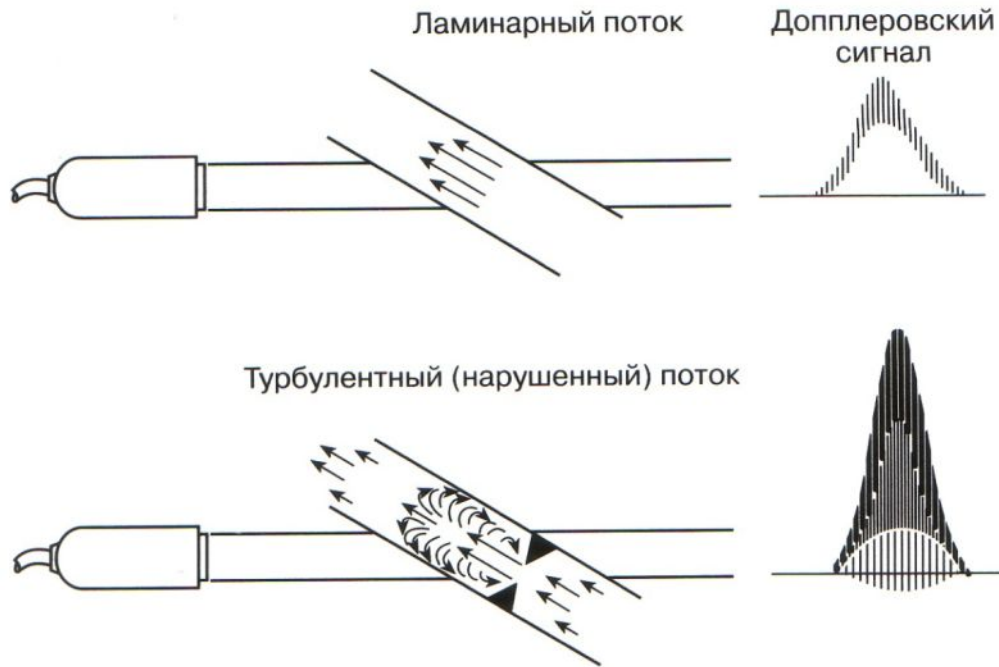


## Допплерометрия

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.**

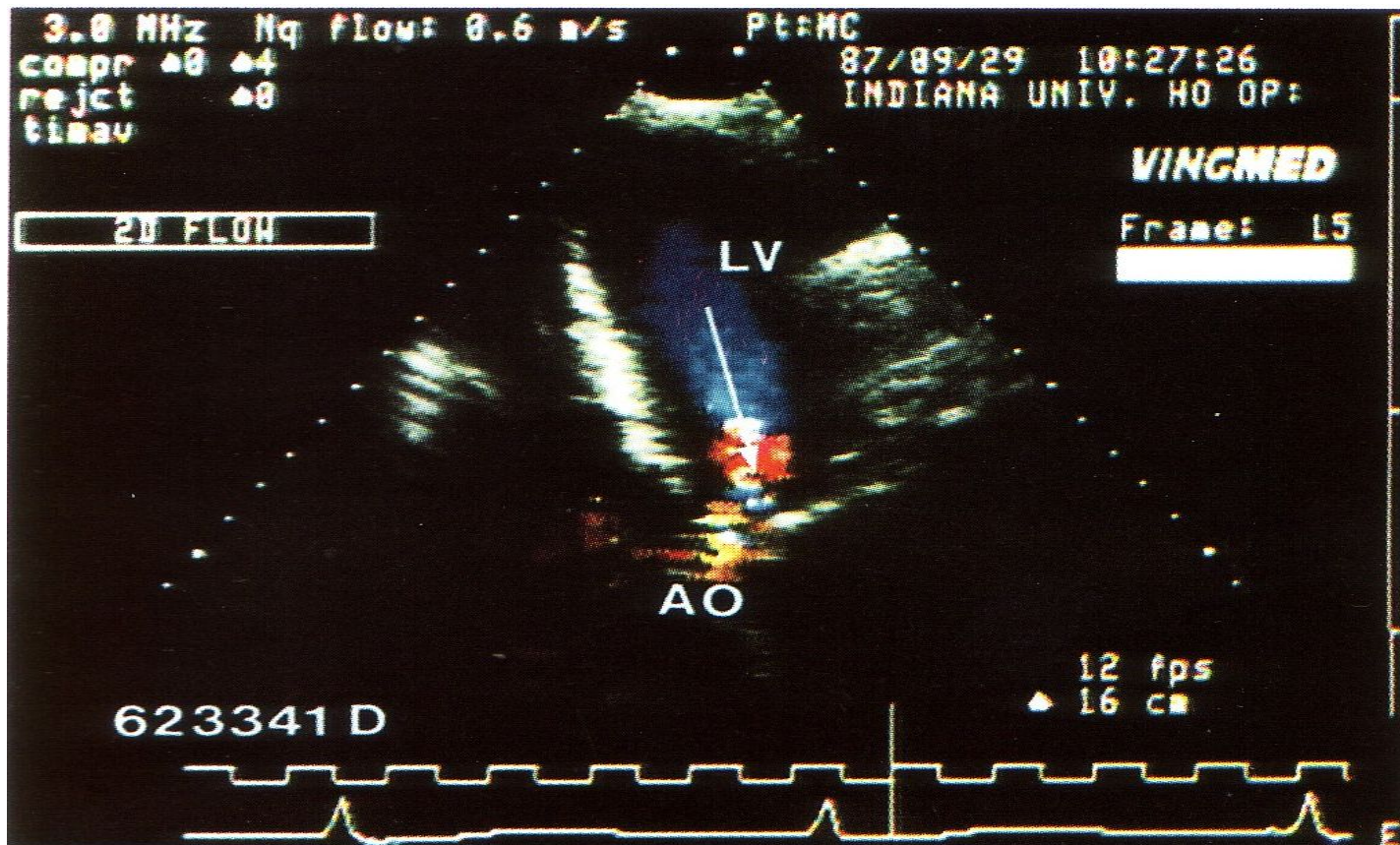


В ламинарном потоке все скорости эритроцитов примерно одинаковы по направлению, а в центральной части и по величине.

**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