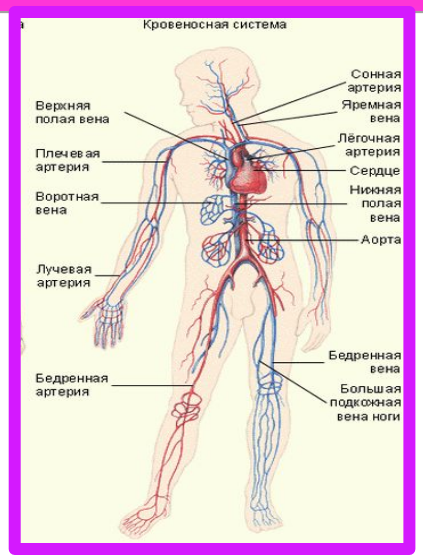
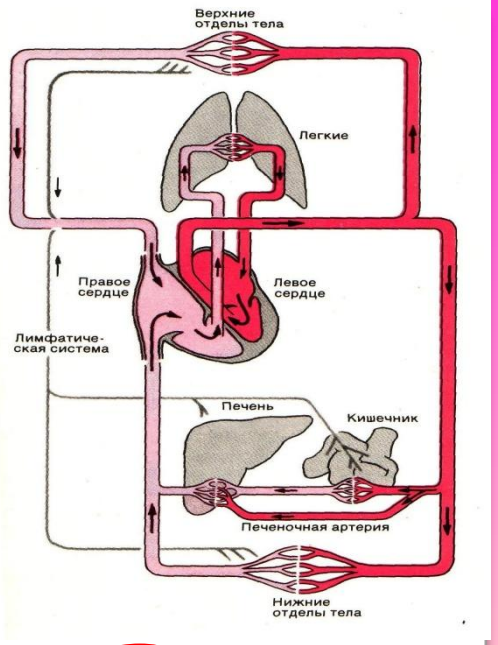


Лекция 4



Гемодинамика

Ростов-на-Дону
2012

Содержание лекции №4

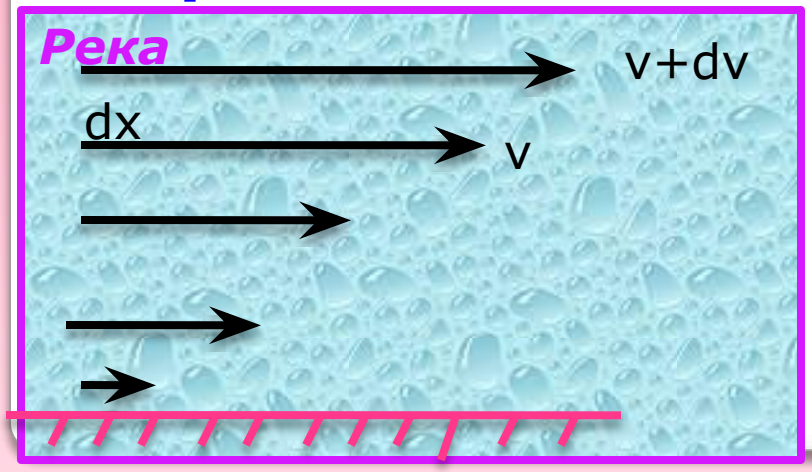
- Вязкость. Ньютоновские неньютоновские жидкости
- Ламинарное и турбулентное течение. Число Рейнольдса
- Формула Пуазейля
- Гемодинамика
- Механические свойства биологических тканей

Вязкость . Формула Ньютона

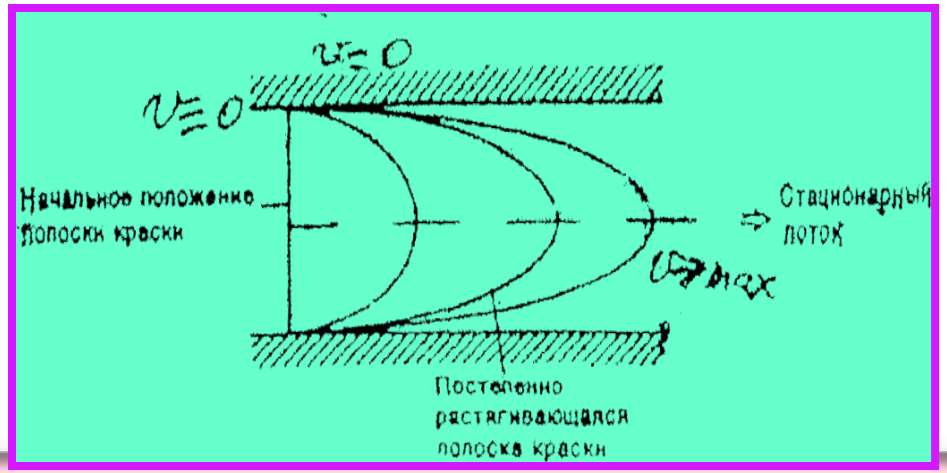
Вязкость (внутреннее трение) – это **свойство** текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению слоев. Вязкость возникает из-за **внутреннего трения** между молекулами жидкости.

Между слоями существует **градиент скорости** $grad\upsilon = \frac{d\upsilon}{dx}$

=скорость сдвига



Течение жидкости по трубе



Основной закон вязкого течения был установлен **Ньютоном** (1713)

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S$$

Уравнение Ньютона

Формулировка: сила внутреннего трения F между слоями движущейся жидкости прямо пропорциональна скорости сдвига $\frac{d\upsilon}{dx}$, площади поверхности соприкасающихся слоев S. Коэффициентом пропорциональности является коэффициент **вязкости η**.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$ -**напряжение** сдвига [Па]

Реология -(rheos – течение, поток)

учение о деформации и **текучести** вещества.

В ***реологических*** **характеристиках** уравнение Ньютона имеет вид:

$$\sigma = \eta \cdot \mathrm{grad}\, v$$

Напряжение сдвига прямо пропорционально **скорости сдвига**.

η – коэффициент динамической вязкости

СИ: $[\eta]$: **[Па•с]** = **паскаль•секунда**

СГС: [П] = **пуаз** 1 Па•с = 10 П **1мПа•с = 1сП**

Вязкость зависит от

температуры

t ⇧ η ↓ Для жидкостей

Природы жидкости

Формы молекул

Кинематическая вязкость

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\nu = \frac{м^2}{с}$$

[Ст] = стокс

Текучесть - величина,**обратная** вязкости

Вязкость некоторых веществ

Вещество	Температура, t^0, С	Вязкость, η, мПа•с
Воздух	20	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Вода	20	1
Глицерин	20	1,5
Масло	20	$1 \div 10^{4}$
Мыло	20	$10 \div 10^{14}$
Кровь	36	4÷5
Плазма	36	1,5

Вязкость η воды 1 мПа•с, а крови 4÷5 мПа•с

Они различаются и ***количественно*** и ***качественно***

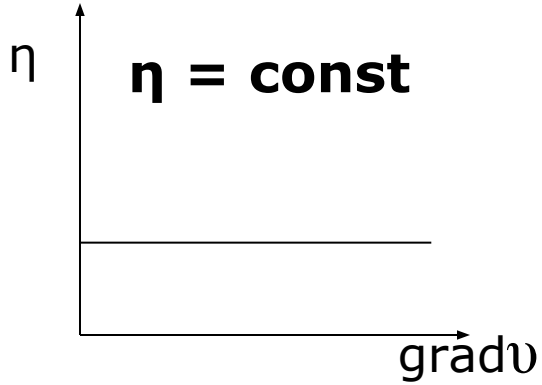
Ньютоновские и неньютоновские жидкости

$$\sigma = \eta \bullet \text{grad } v$$

η *не зависит* от gradυ

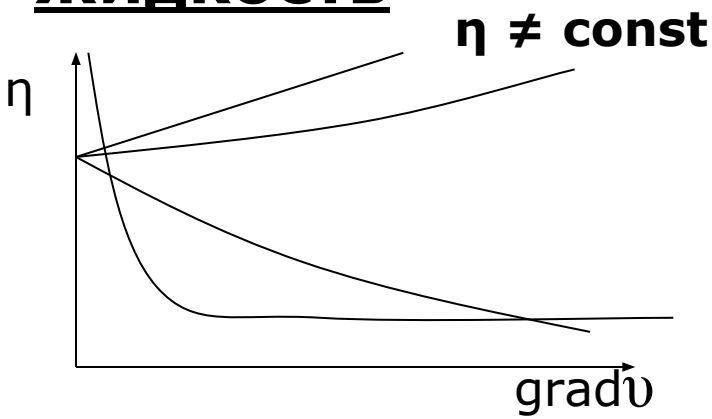
η *зависит* от gradυ

Ньютоновская жидкость



Пример*: *однородная жидкость, вода, ртуть, глицерин, лимфа, **плазма** крови, **сыворотка**

Неньютоновская жидкость



Пример*: *неоднородные жидкости, суспензии, **кровь**, эмульсии, замазка, крем.

Кровь как неньютоновская жидкость

Кровь = плазма + форменные элементы

Кровь является **неньютоновской** жидкостью, так как это **суспензия** форменных элементов в белковом растворе. Вязкость η крови **4÷5 мПа•с**

ВОПРОС: Каких форменных элементов?

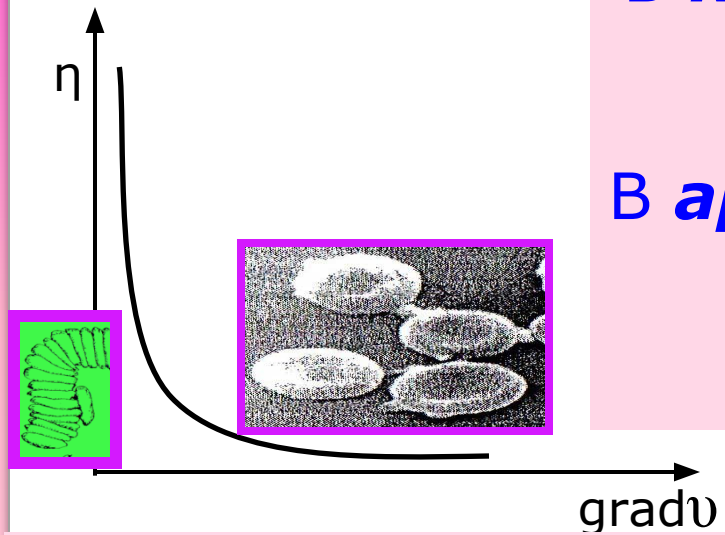
Эритроцитов.

ПОЧЕМУ эритроцитов?

Эритроциты составляют 93%

Вязкость крови зависит от режима течения.

Чем медленнее течет кровь, тем выше вязкость



Зависимость вязкости крови от режима течения

В ***капиллярах*** grad v ↓ ⟹ η ↑

η = **800 мПа•с**

В ***артериях*** grad v ↑ ⟹ η ↓

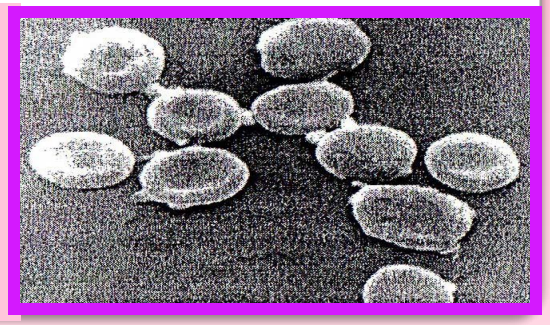
η = **4-5 мПа•с**

При **низких** скоростях сдвига эритроциты образуют **«монетные столбики»**

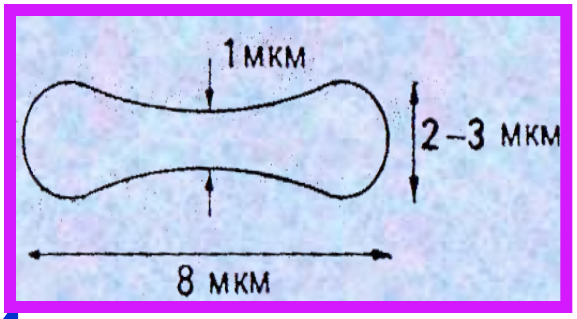
При **высоких** скоростях сдвига вязкость крови определяется

1) ***Концентрацией*** эритроцитов

2) Их ***физическими свойствами***.



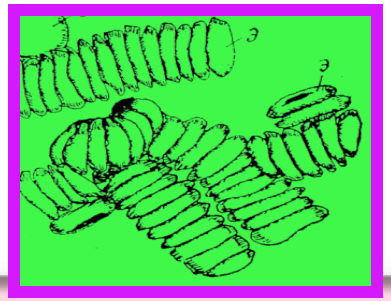
Влияние физических свойств эритроцитов на вязкость крови



1. **Форма** клеток
2. **Эластичность** оболочки
3. Способность к **деформации**
4. Наличие **двойного** электрического слоя.

Эритроциты заряжены **отрицательно**.

5. Способность образовывать **агрегаты** при низких скоростях сдвига.
6. **Адгезность**



Плазма крови – водно-солевой белковый раствор.

Плазма – **ньютоновская** жидкость.

η=1,2мПа•с

Вопрос:

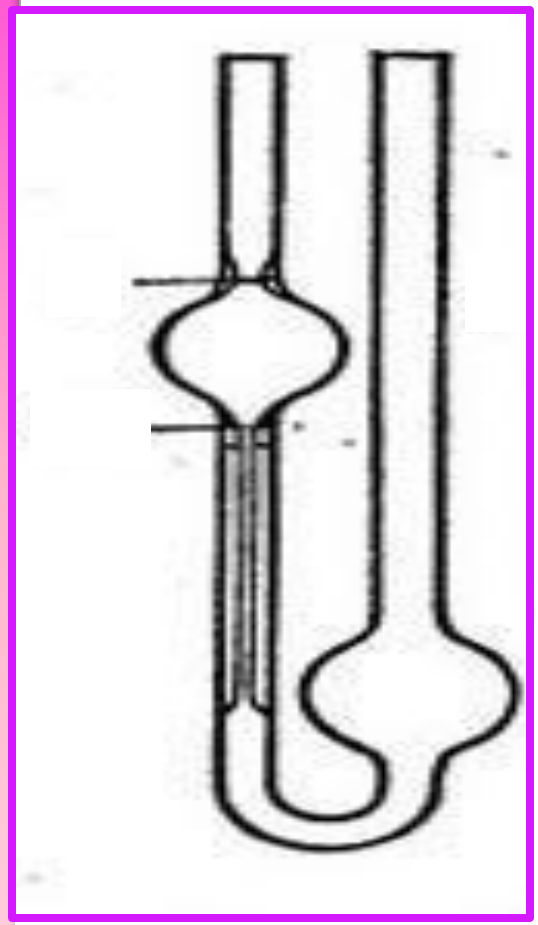
Эта цифра вязкости при **37^{0}С**. Что с ней произойдет при повышении температуры до 41^{0}С ?

Понизится на 10%

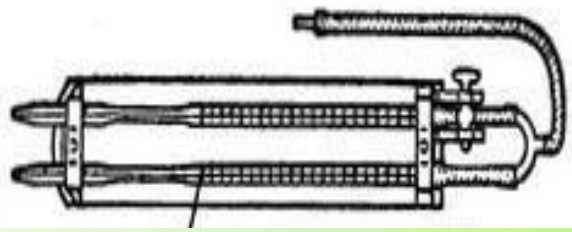
Сыворотка – это плазма без фибриногена

η=1,1мПа•с

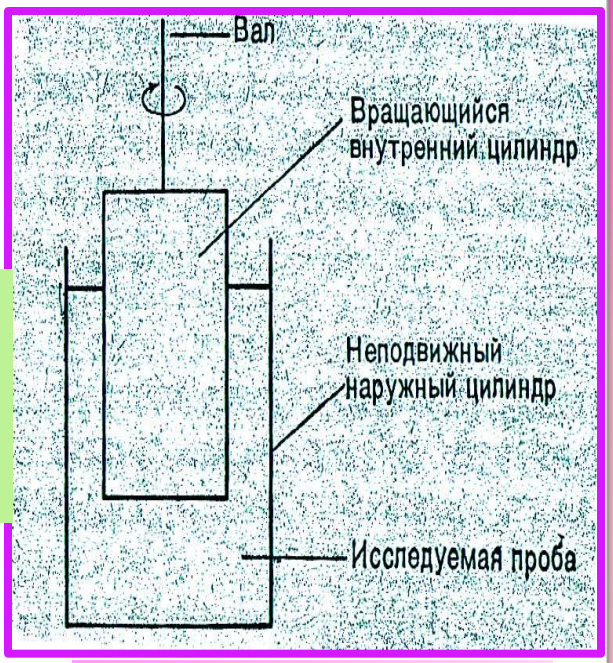
Методы определения вязкости жидкостей



Капиллярный вискозиметр Оствальда



Вискозиметр для определения относительной вязкости **крови**



Ротационный вискозиметр

Ротационный вискозиметр Rheotest RV2.1
Наиболее простая модель ротационного вискозиметра,
Устройство работает **без применения персонального компьютера,** имеет аналоговый дисплей и выход на самописец.

Вискозиметр VT550 - высокоточная модель с широким диапазоном измерения, ручной или автоматический режим **под управлением компьютера**.

Экспресс-анализатор- вискозиметр ротационный

Стационарный поток

Стационарный поток это такой поток, когда через каждый уровень поперечного сечения, протекает **одинаковый объем жидкости**

Q*- объемная скорость* – это объем жидкости, протекающий через поперечное сечение за единицу времени.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$\frac{м^3}{с}$$

$$Q = v \cdot S$$

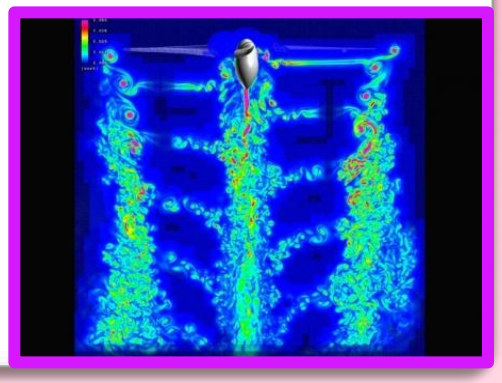
Условие ***стационарности*** *потока* **Q=const**

$$Q = v \cdot S = const$$

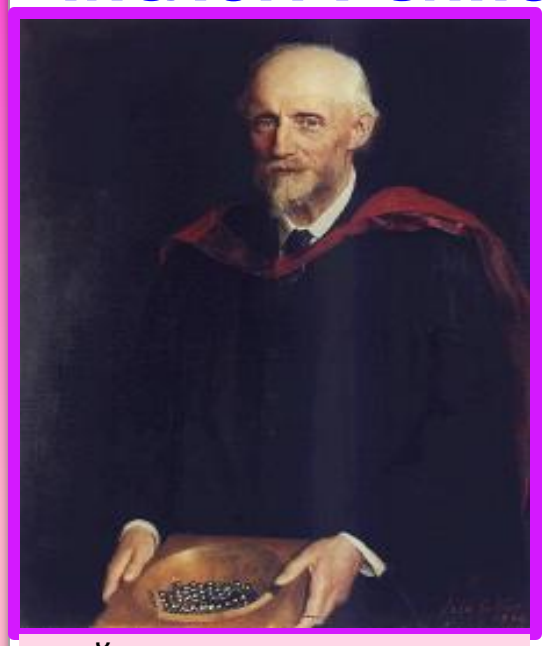
Ламинарное и турбулентное течения

Ламинарное течение- это слоистое течение. Слои жидкости движутся параллельно, не смешиваясь между собой

Турбулентное течение – это вихревое течение- жидкости сопровождающееся перемешиванием слоев, обусловленным образованием вихрей. Скорость частиц непрерывно меняется.



Характер течения жидкости определяется **числом Рейнольдса**



РЕЙНОЛЬДС, ОСБОРН
(1842–1912),

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Величина **безразмерная**

ρ- плотность;
v – скорость;
d- диаметр сосуда:
η - вязкость

Ламинарное течение **переходит в турбулентное**, когда введенное им число Рейнольдса **превышает** критическое значение.

Если **Re < Re$_{кр}$** => ***Ламинарное*** течение

Если **Re > Re$_{кр}$** => ***Турбулентное*** течение

Re$_{крит.}$ (H_2O)=2300 Re$_{крит.}$(**кровь**) = **970 ± 80.**

Re – **<u>критерий подобия</u>** двух потоков:
Два потока считаются тождественными, если равны числа Рейнольдса.

<u>Физический смысл</u> числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\textit{силы инерции}}{\textit{силы вязкого трения}} = \frac{d\mathbf{v}}{\nu}$$

Re (**капилляры**)<<1 Re $=10^{-3}$ - мало (вязкость ↑)

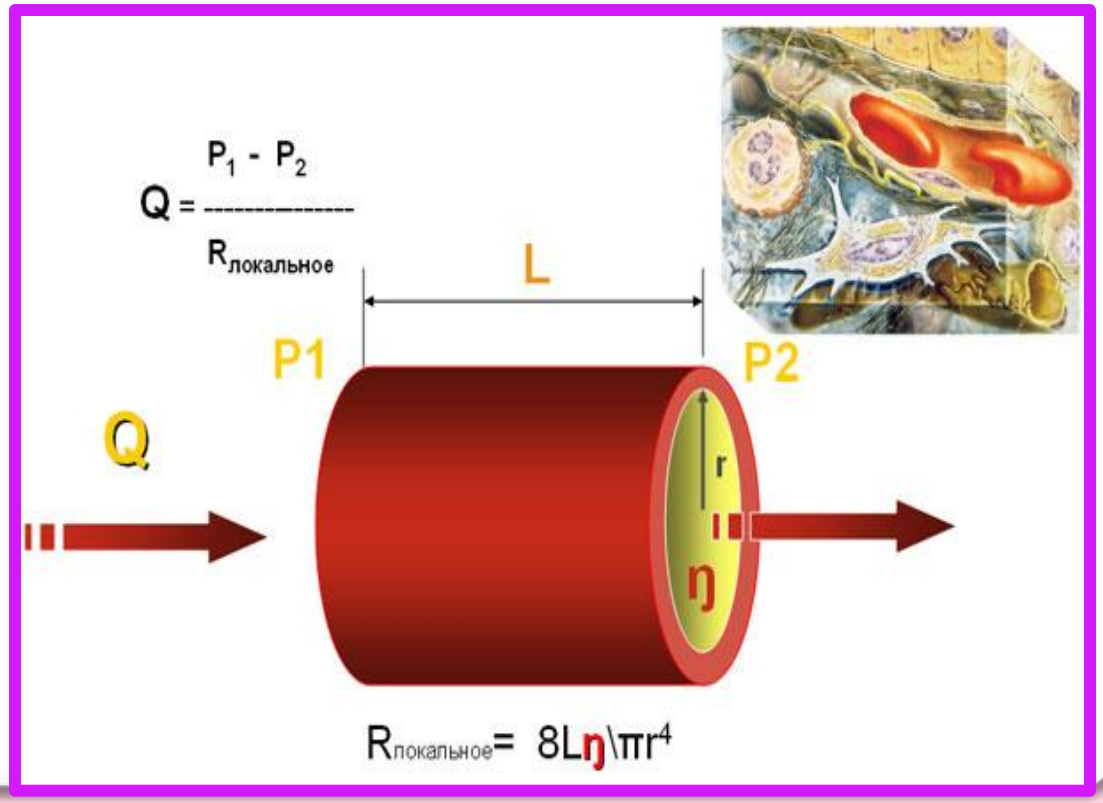
Re (**артерии**)>>1 Вязкость инерция ↑

Формула Пуазейля

Пуазейль Жан Мари французский
врач **+** ***физик*** **+ физиолог**

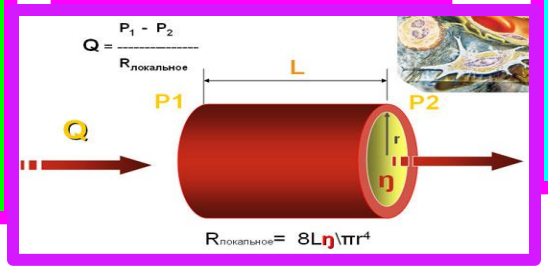
Преподавал **медицинскую физику**

Пуазейль
1799-1869



$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta l}$$

$$Q = \frac{V}{t}$$



$$V = \frac{\pi R^4 \Delta P t}{8\eta l}$$

Формулировка: Объём жидкости Q, протекающей по горизонтальной трубе небольшого сечения <u>за единицу времени</u>, <u>прямо</u> пропорционален <u>радиусу трубы R в четвёртой степени, разности давлений ΔP</u> на концах трубы, <u>обратно</u> пропорционален <u>коэффициенту вязкости η и длине трубы l</u>. Коэффициентом пропорциональности является π/8 (получен эмпирически).

Гидравлическое сопротивление

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta l}$$

$$x = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$$

$$\left[\frac{H \cdot c}{м^5}\right]$$

$$Q = \frac{\Delta P}{x}$$

=>

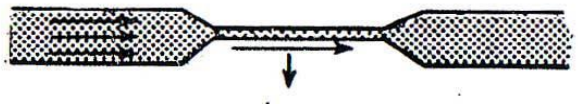
$$\Delta P = Q \cdot x$$

Основное уравнение гемодинамики

Перепад давлений прямо пропорционален гидравлическому сопротивлению

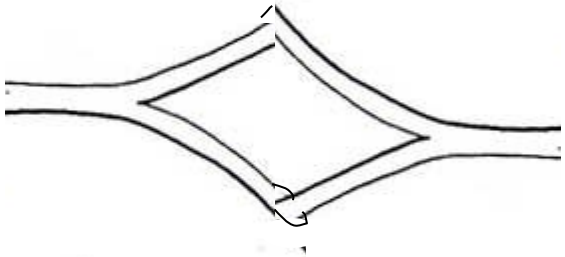
ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ТРУБОК. РАЗВЕТВЛЯЮЩИЕСЯ СОСУДЫ

- ***Гидравлическое сопротивление системы последовательно соединенных труб***



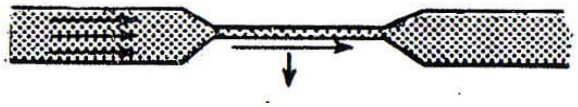
$$X = X_1 + X_2 + X_3$$

- ***Гидравлическое сопротивление системы параллельно соединенных труб***



$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

Сужение сосуда



- **Скорость** потока возрастает

$$S \cdot u = const$$

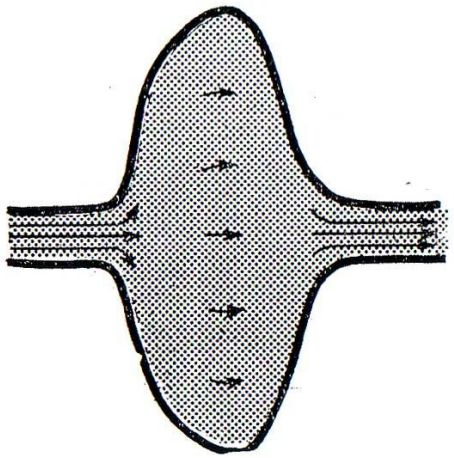
- **Сопротивление** увеличивается

$$x = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$$

- **Перепад давлений** увеличивается

$$\Delta P = Q \cdot x$$

Расширение сосуда



- **Скорость** потока уменьшается

$\uparrow S \cdot \upsilon \downarrow = const$

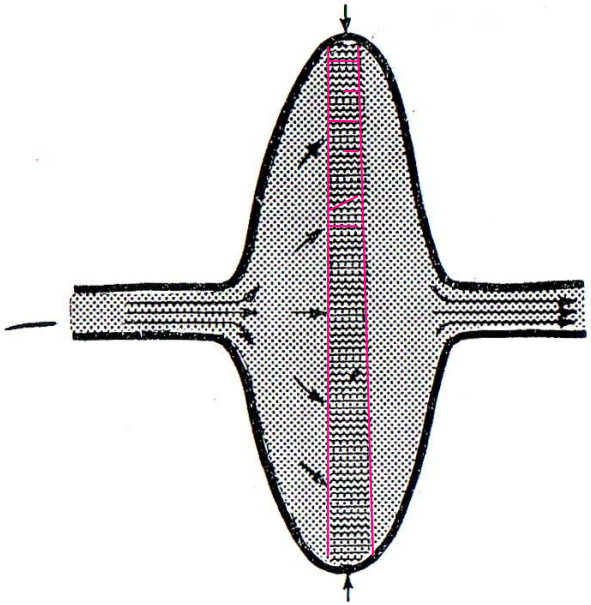
- **Сопротивление** падает

$$\downarrow x = \frac{8\eta l}{\pi R^4} \uparrow$$

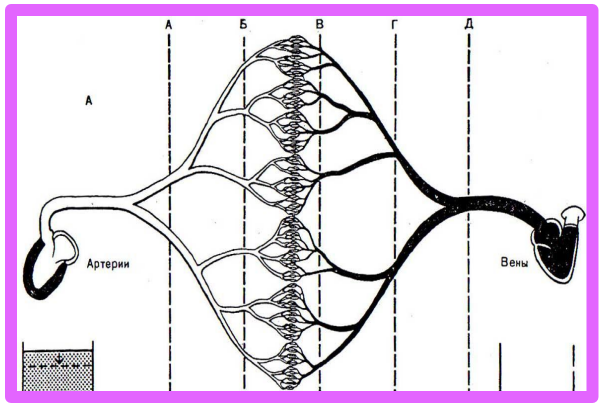
- **Перепад давлений** уменьшается

$\downarrow \Delta P = Q \cdot x \downarrow$

Группа суженных сосудов, соединенных параллельно при большом суммарном поперечном сечении



Капиллярная сеть



Замедление потока

- **Сопротивление** возрастает
- **Перепад давлений** увеличивается

- **Скорость** потока U ↓ уменьшается из-за трения.

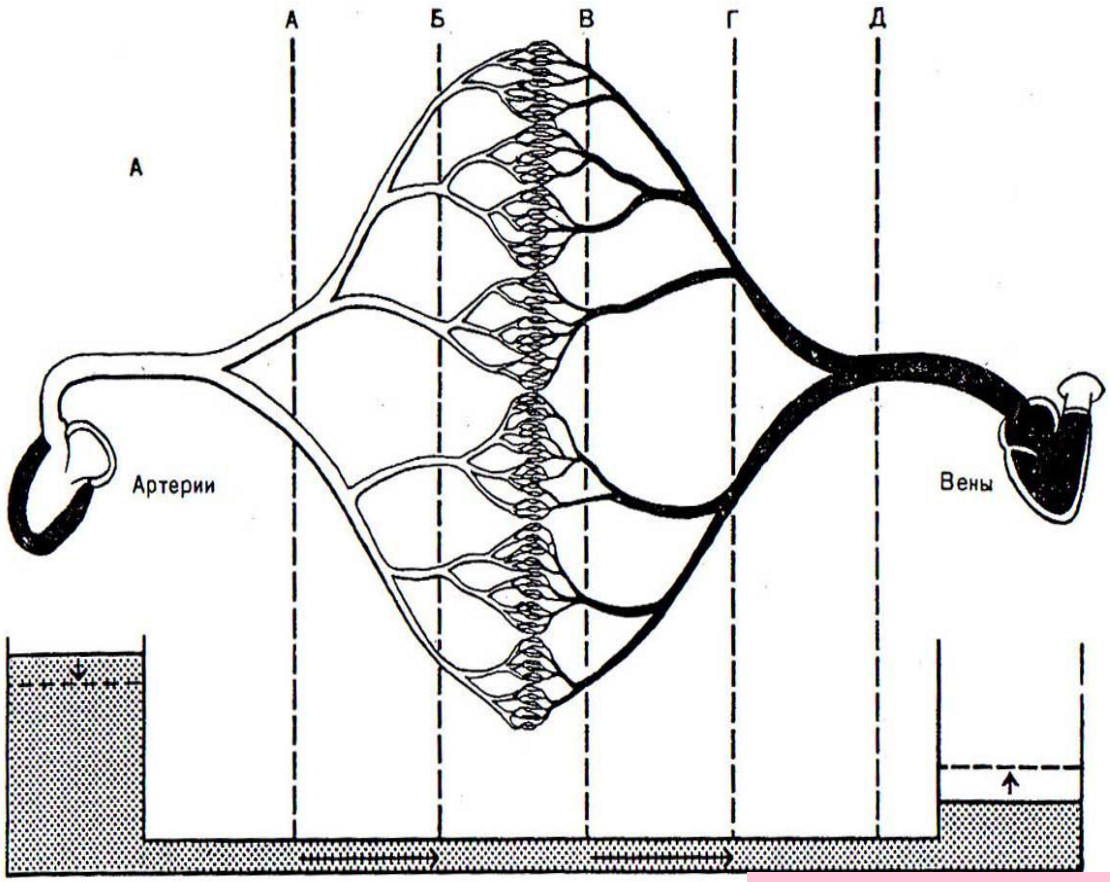
$$\uparrow x = \frac{8\eta l}{\pi R^4} \downarrow$$

$$\uparrow \Delta P = Q \cdot x \uparrow$$

ВОПРОС :

Назовите самое узкое место ССС.

Аорта



Условие ***стационарности*** *потока* ***Q=const***

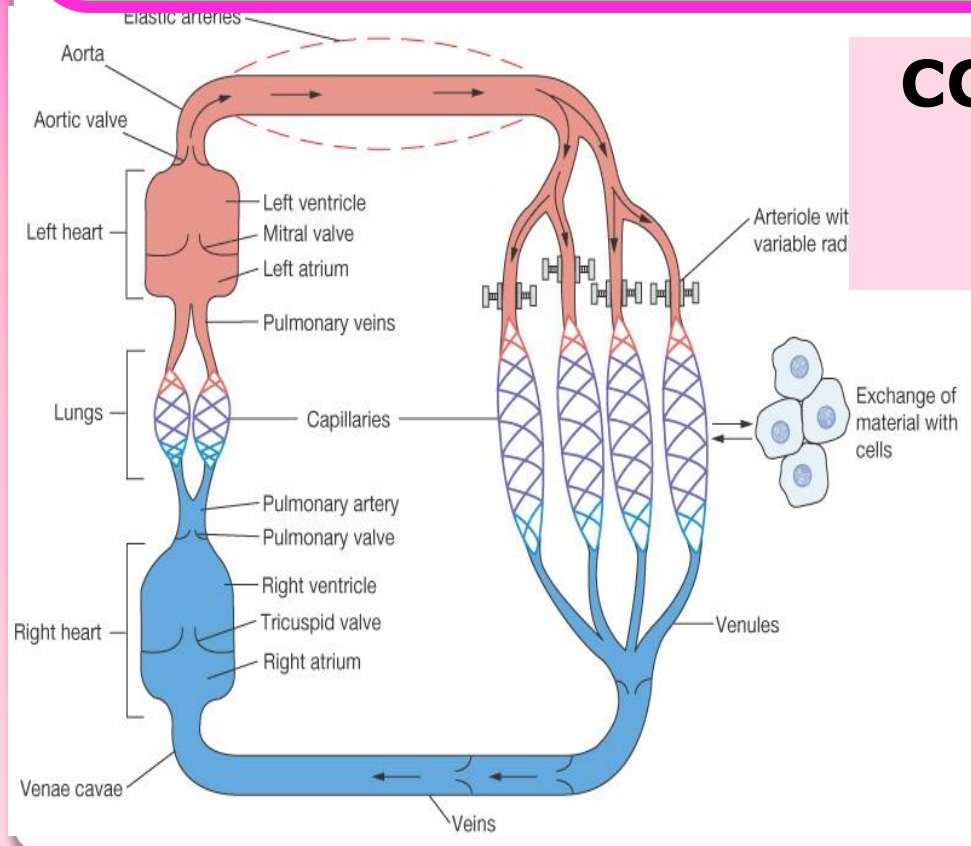
$$Q = v \cdot S = const$$

$V_{аорт.}$ =0,5 м/с

$V_{капил.}$ = 0,5 мм/с

Физические основы гемодинамики

•***Гемодинамика*** **–** раздел биофизики, в котором исследуется движение крови по сосудистой системе.



ССС состоит из **сердца и сосудов**: артерий, капилляров и вен.

Транспортная функция ССС:
Сердце (насос) обеспечивает *продвижение крови по замкнутой цепи сосудов.*

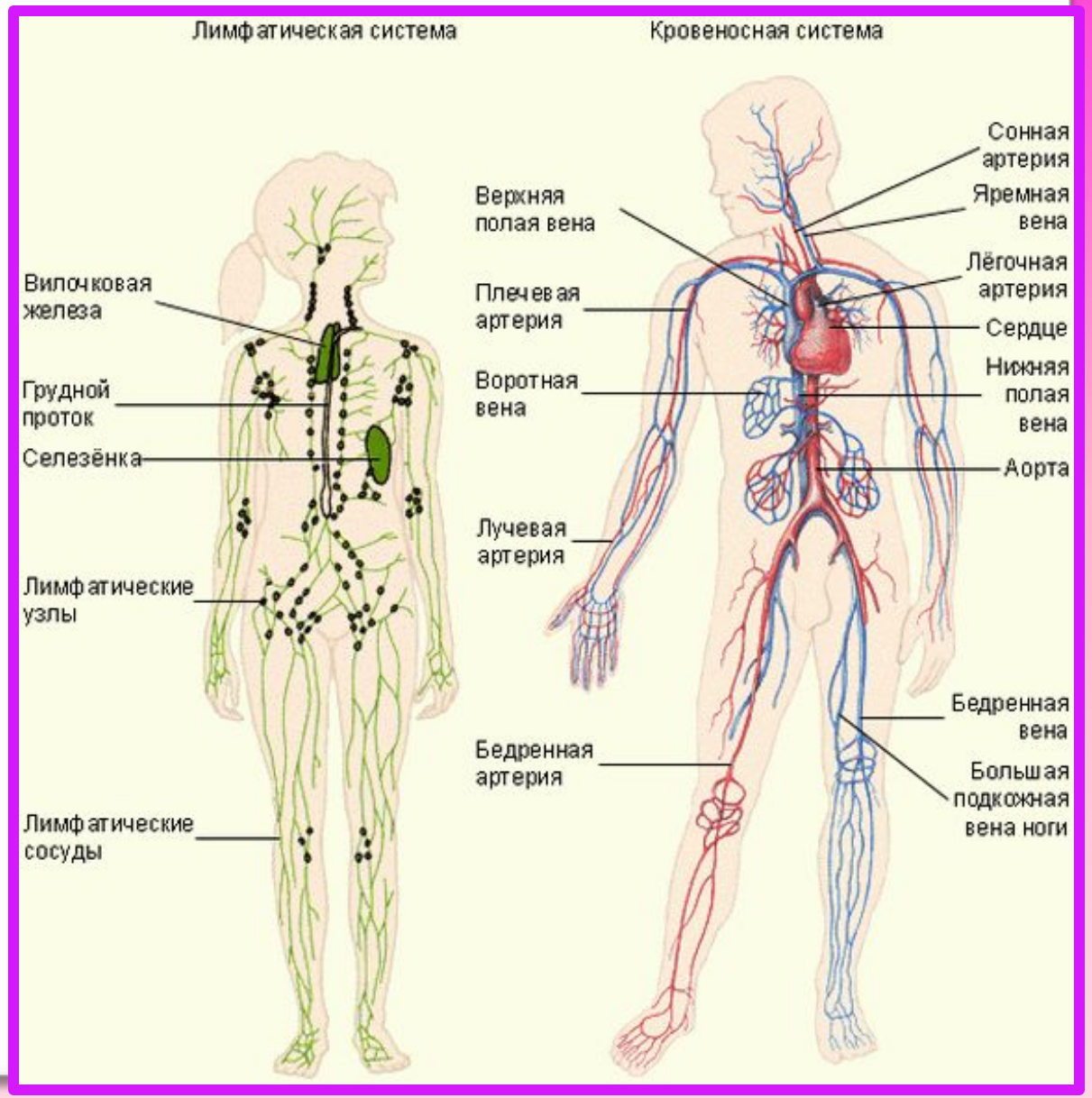
Основное назначение циркуляции крови:

Доставка

Кровь приносит всем клеткам ***субстраты***, необходимые для их нормального функционирования. ***Пример***: кислород, питательные вещества

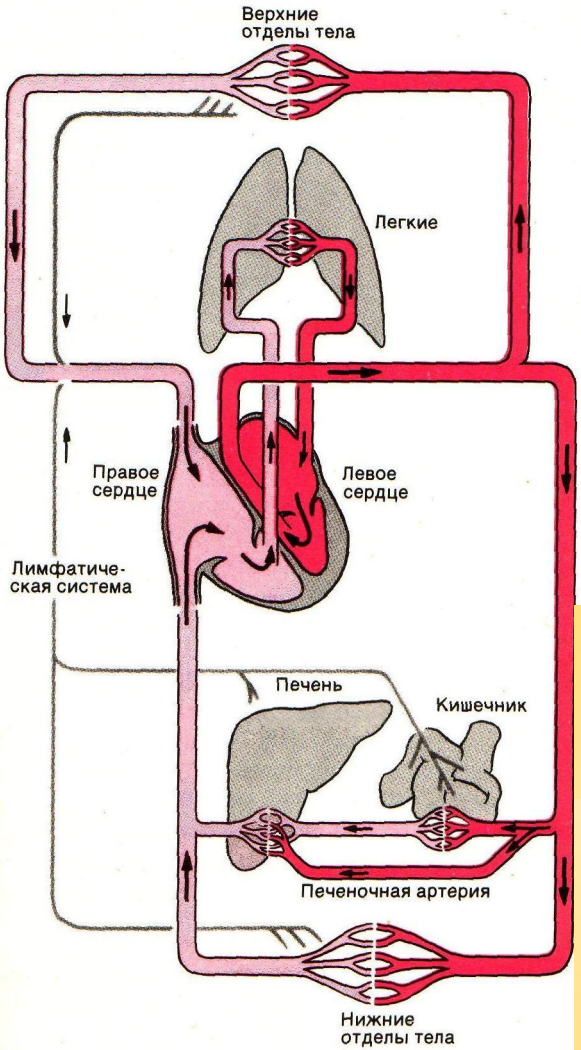
& Удаление

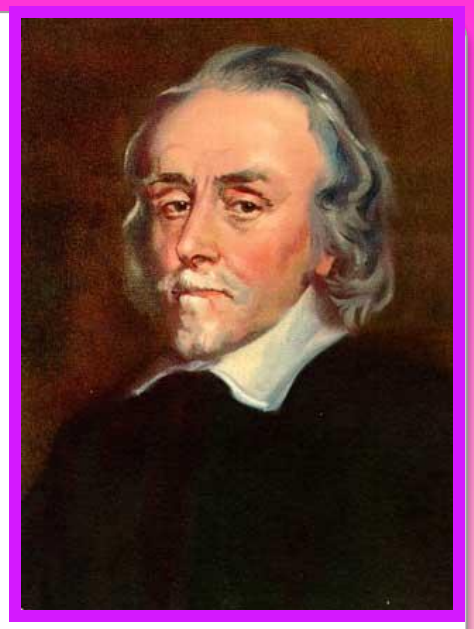
Продуктов жизнедеятельности. ***Пример***: углекислый газ



ССС состоит из **двух** последовательно соединенных отделов:

1. **Большой** круг кровообращения. Насосом для этого отдела служит **левое** сердце.
2. **Малый** (легочной) круг кровообращения. Движение в этом отделе обеспечивается **правым** сердцем





Гарвей 1628 год
Установил замкнутость кровообращения

Большой и малый круги соединены Следовательно, <u>выброс левого и правого</u> желудочков должен быть строго **одинаков.**

Ударный объем крови

Это объем крови, который выталкивается из сердца за одно сокращение

ВОПРОС:

$V_{уд}$ равен

6 мл

60 мл

6 л

Столовая ложка 15 г

600 мл

Ответ:
60 мл

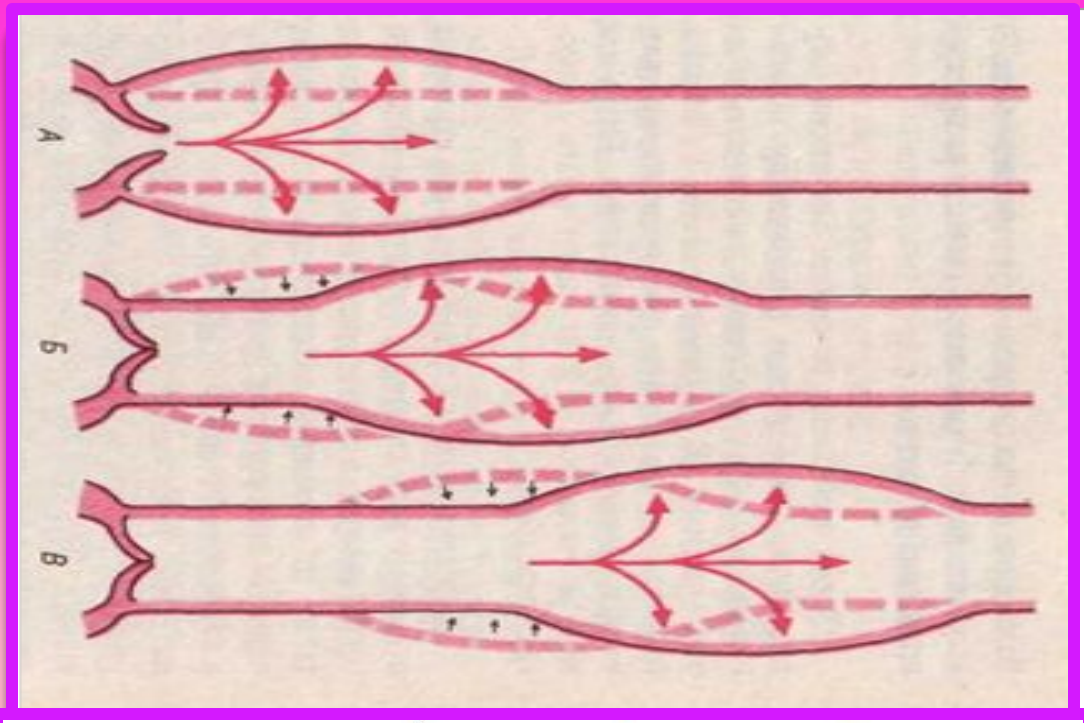
Пульсовая волна, скорость ее распространения

- **Пульсовая волна - это волна деформации стенок артерии.**

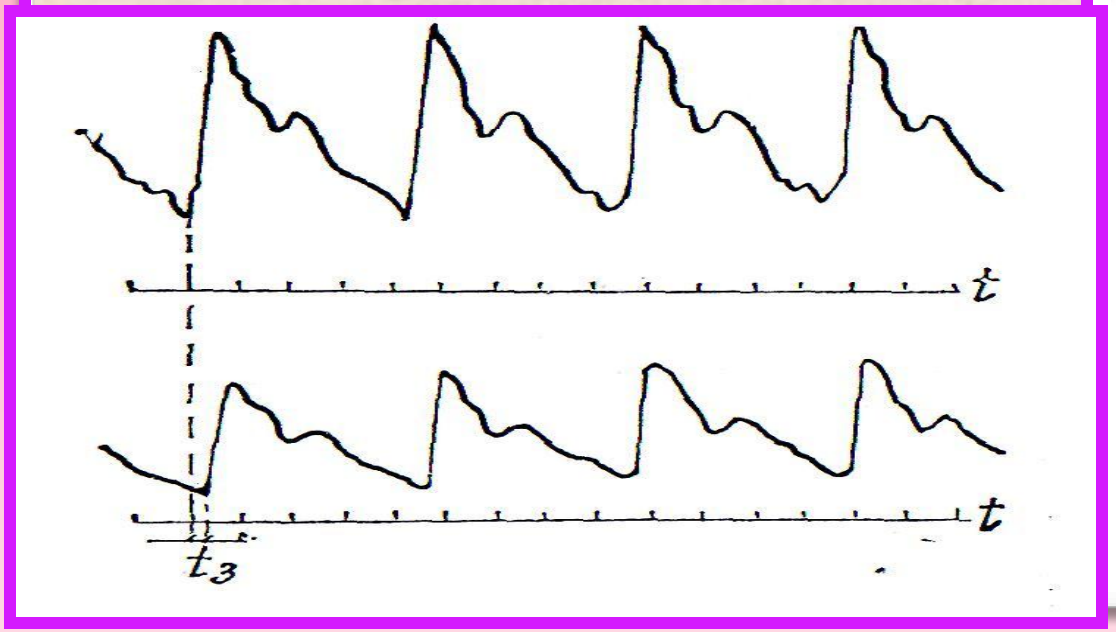
- **Пульсовая волна – это распространяющаяся по аорте и артериям волна повышенного давления, вызванная выбросом крови из левого желудочка в аорту в период систолы.**

Причина: упругость аортальной стенки

В **китайской** литературе **пульс** сравнивают с *плавающей по воде шелковой тканью.*



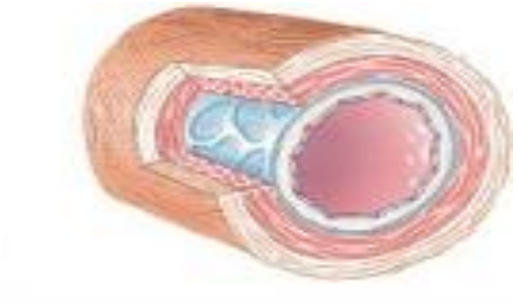
Пульсовая волна



tз -время **запаздывания** пульсовой волны, зарегистрированной **дистальнее.** Площадь под кривой – это ***ударный объем***.

Скорость распространения пульсовой волны v

СРПВ –**количественный** показатель упругих свойств артерии.



$$v = \sqrt{\frac{E \cdot h}{\rho_{крови} \cdot d}}$$

Формула Моенса- Кортевега

E –модуль Юнга
h- толщина стенки
d –диаметр сосуда
ρ – плотность крови

В норме 5-10 м/с.

Что происходит с СРПВ с возрастом? Она увеличивается

Давление крови в артериях колеблется от максимального во время сокращения ***сердца*** (систолы) до минимального во время расслабления (диастолы).

При каждом сердцебиении давление крови поднимается до систолического уровня, а между ударами падает до диастолического уровня

Поэтому артериальное давление определяют как **максимальное/минимальное** значения (**систолическое/диастолическое**). Обычно его измеряют в миллиметрах ртутного столба.

В норме **120/80** мм рт.ст. для здоровых взрослых людей.

ВОПРОС: А в комнате **760** мм рт.ст. – в 5 раз больше, и мы живы.

Пульсовые колебания давления:

АД: 120/80 мм рт.ст.

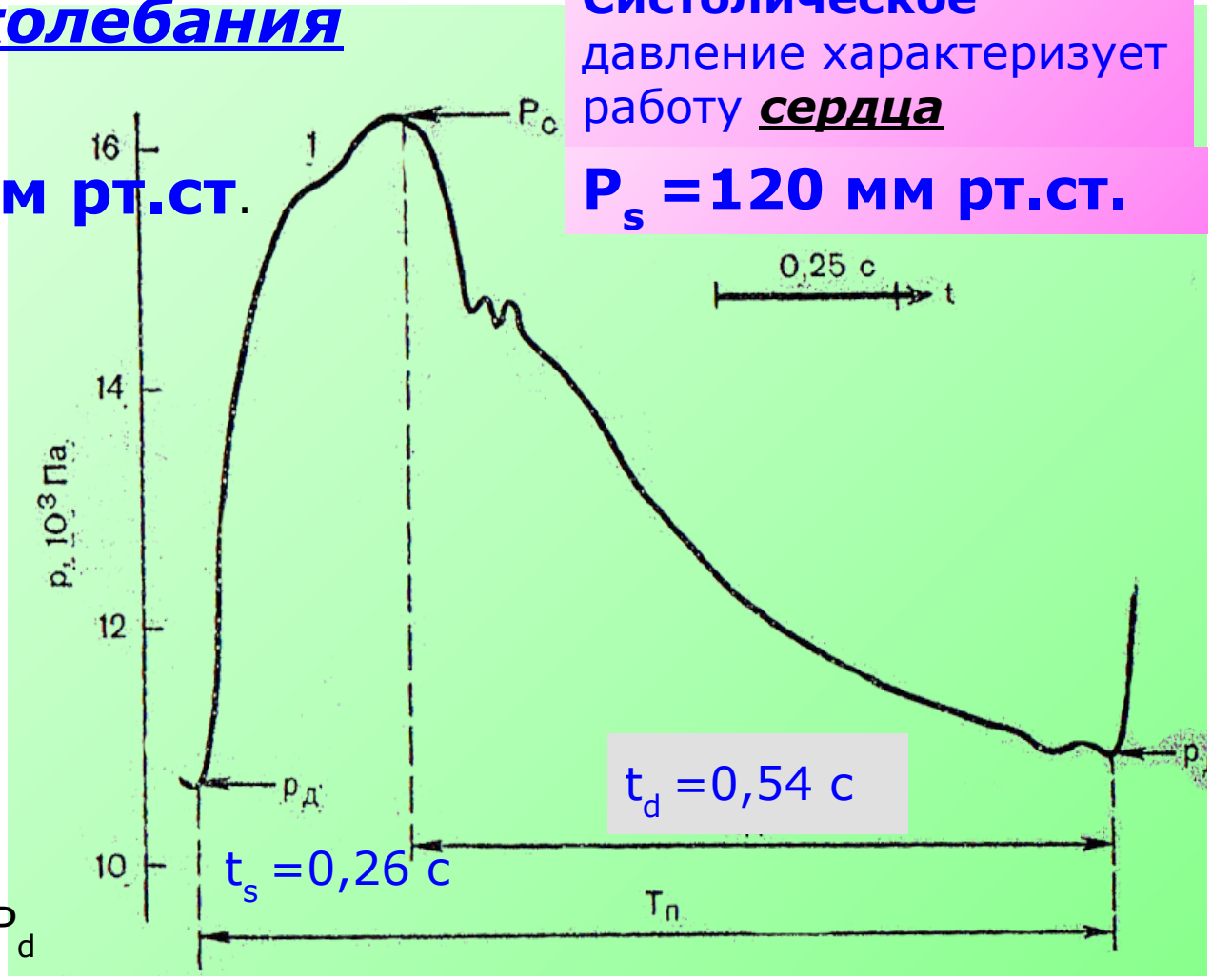
16/11 кПа

Систолическое давление характеризует работу ***сердца***

P_s =120 мм рт.ст.

Диастолическое давление - ***сосудистое*** давление

P_d =80 мм рт. ст.



ΔP – **пульсовое** давление. ΔP =P_s -P_d

$P_{ср}$ - **среднее** динамическое давление. 13 кПа.

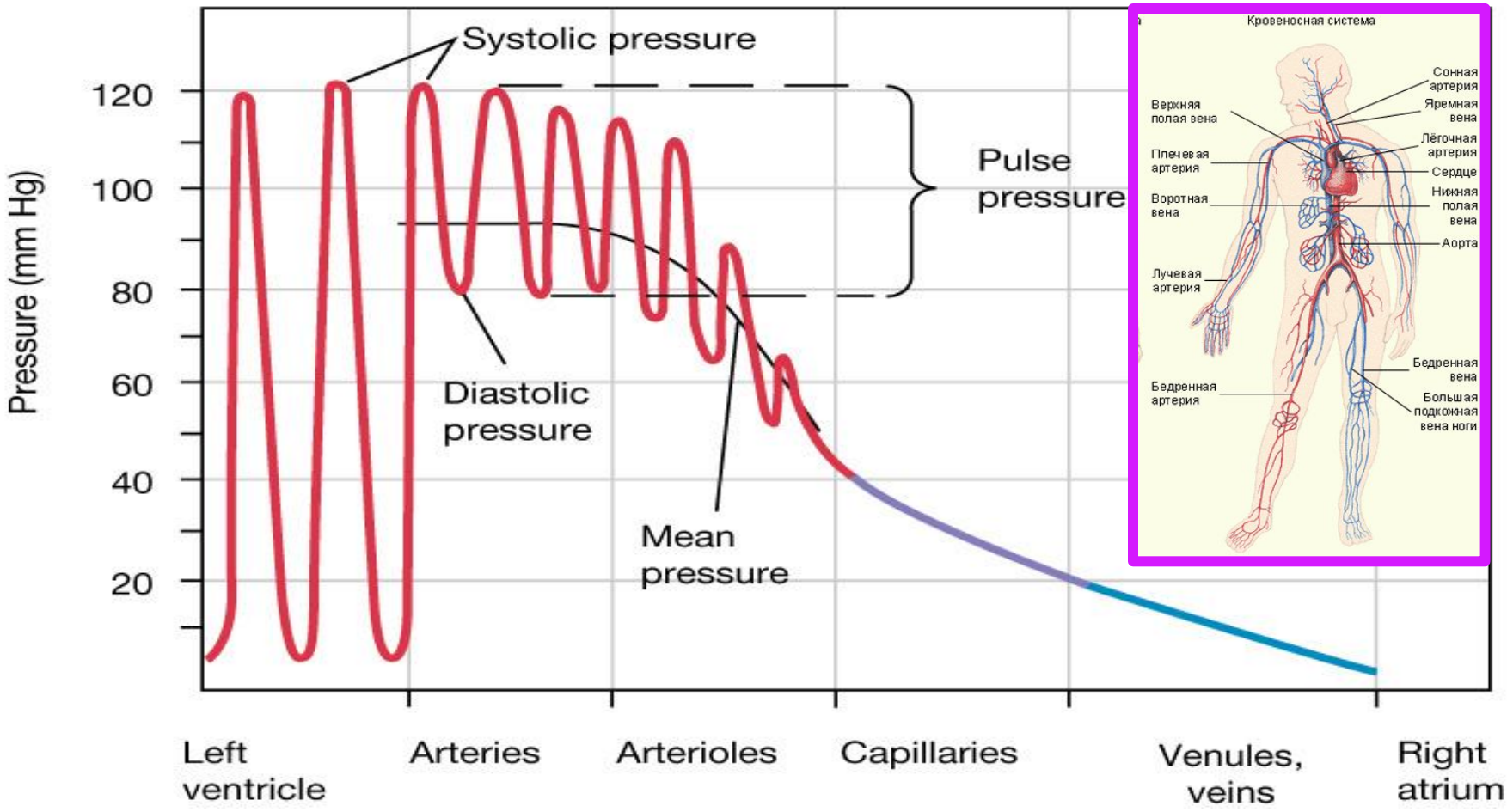
T= t_s + t_d

T=0,8 c

СВ=$V_{уд}$ЧСС

Ударный объем крови – это площадь под графиком

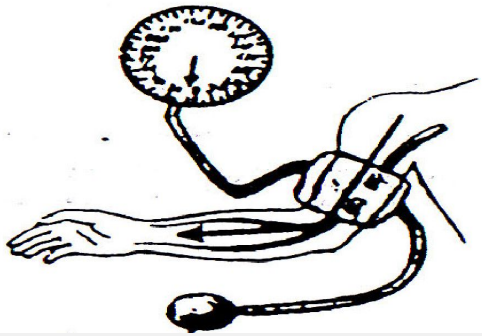
Давление крови в различных участках сосудистого русла

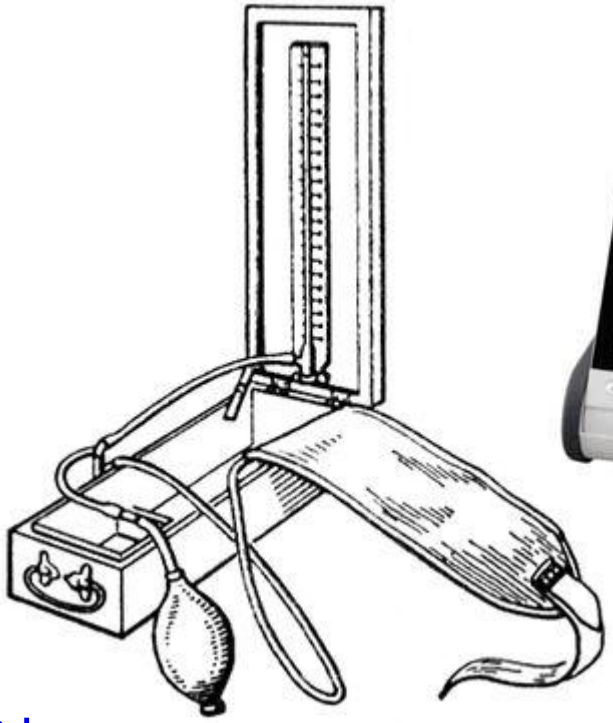


Физические основы клинического метода измерения давления крови.

Основан на измерении **внешнего давления**, необходимого, чтобы пережать артерию.

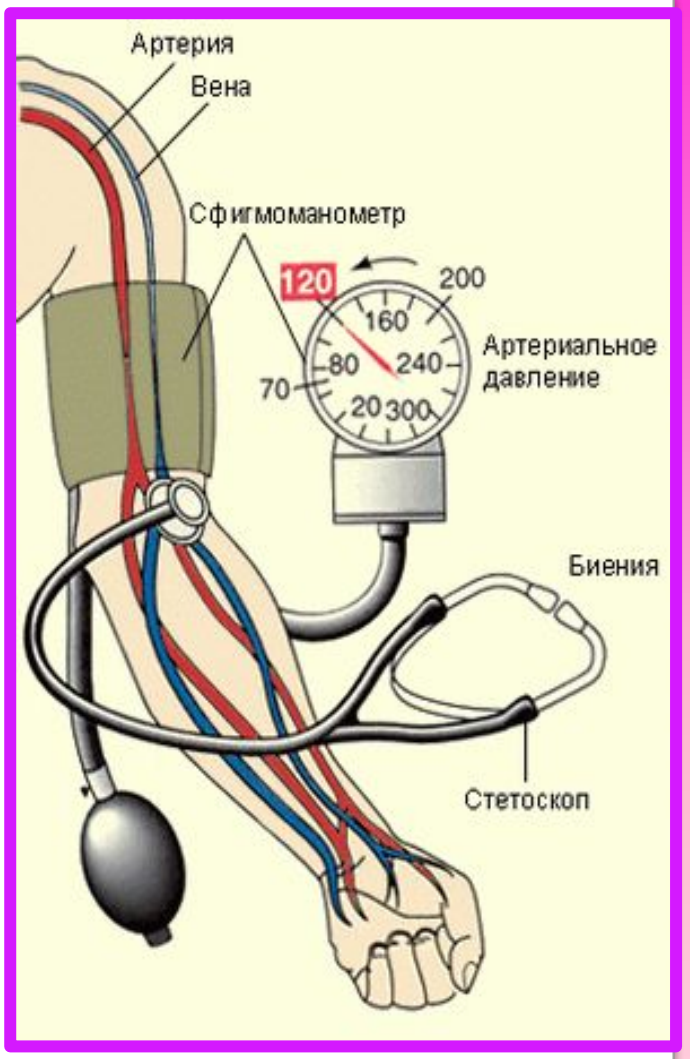
СФИГМОМАНОМЕТР=
= Манжета +груша + манометр





Сфигмоманометр ртутный

Сфигмоманометр UA-101, имитирует ртутный тонометр



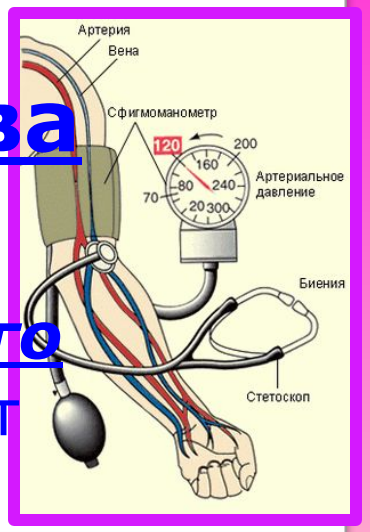
105-ЛЕТИЕ НАУЧНОГО ОТКРЫТИЯ ХИРУРГА ВОЕННО-МЕДИЦИНСКОЙ АКАДЕМИИ Н.С. КОРОТКОВА, СДЕЛАВШЕГО ЭПОХУ В РАЗВИТИИ МИРОВОЙ МЕДИЦИНЫ

Метод Короткова по измерению АД

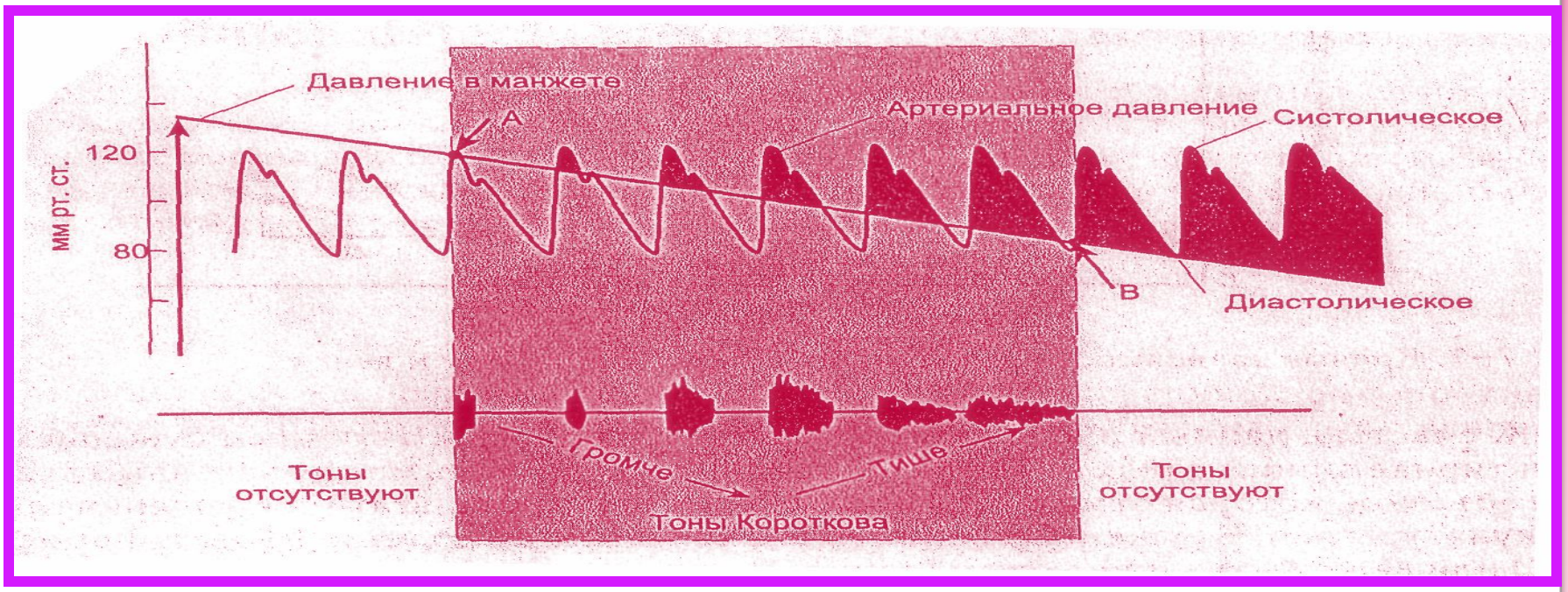
В созвездии имен великих медиков, заслуживших благодарность всего человечества за свои открытия в медицине, нашло свое место имя русского врача **Н. С. Короткова**. **8 ноября 1905 года Коротков (ему был 31 год)** в своем докладе на «Научном Совещании Клинического военного госпиталя Военно-медицинской академии» сообщил об открытом им звуковом методе бескровного определения максимального и минимального артериального давления (АД) у человека.

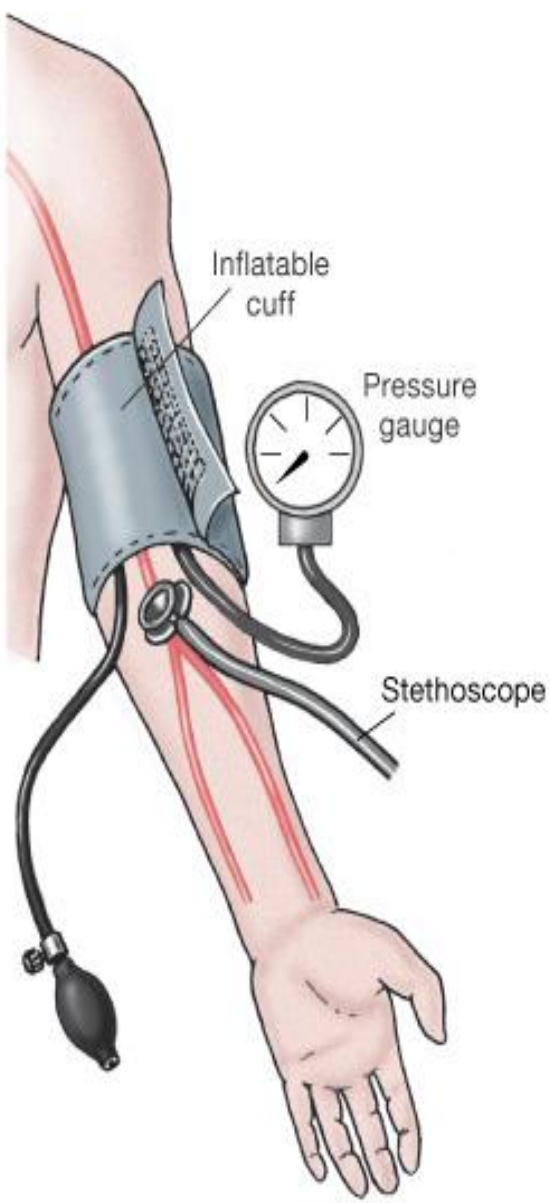
Korotkoff's method.

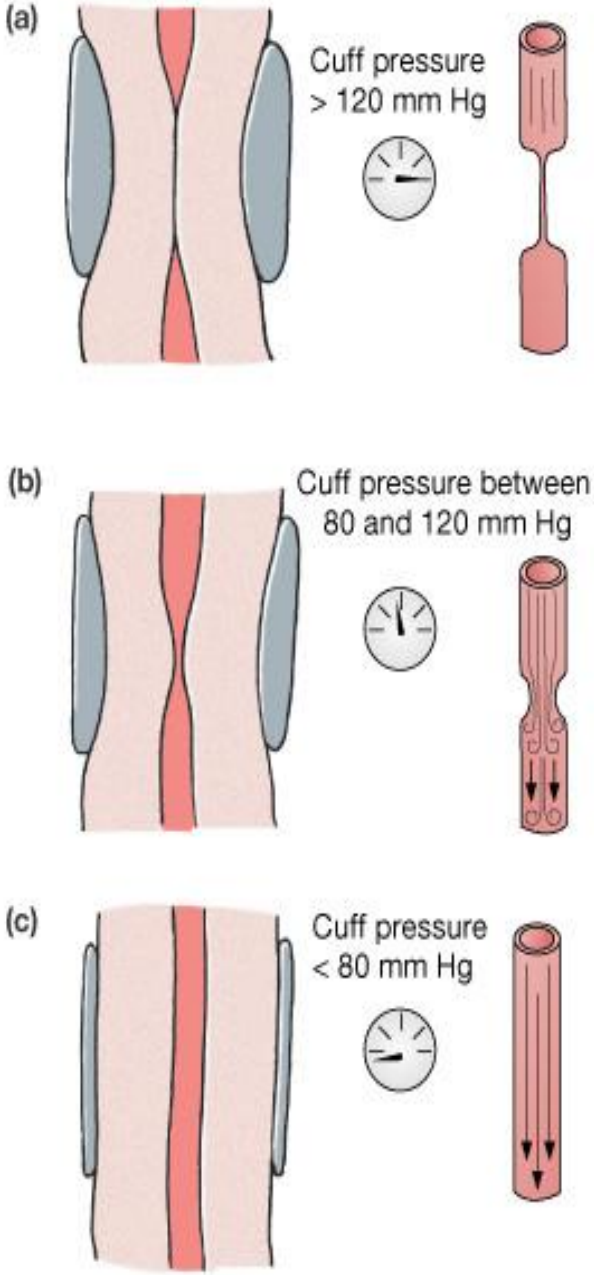
Измерение артериального давления методом Короткова (аускультативный метод)



Основан на возникновении ***турбулентного*** течения, когда давление в манжете станет равным ***систолическому*** давлению.







When the cuff is inflated so that it stops arterial blood flow, no sound can be heard through a stethoscope placed over the brachial artery distal to the cuff.

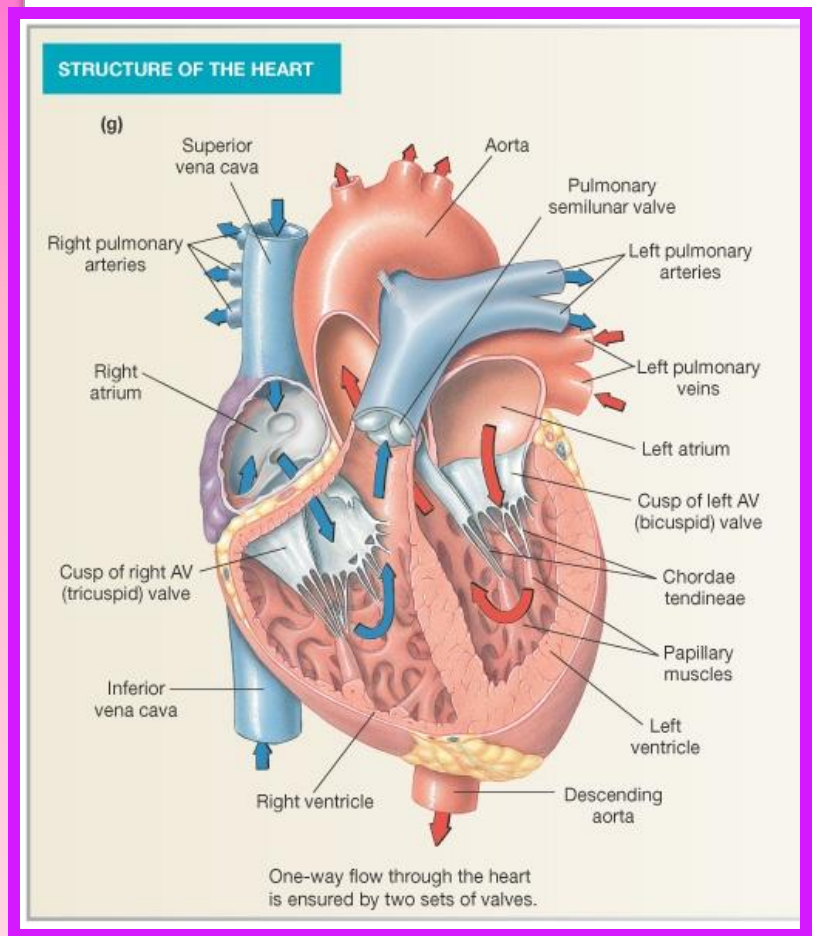
Korotkoff sounds are created by pulsatile blood flow through the compressed artery.

Звуки Короткова создаются <u>пульсирующим кровотоком</u> через пережатую артерию

Blood flow is silent when the artery is no longer compressed.

Работа и мощность сердца

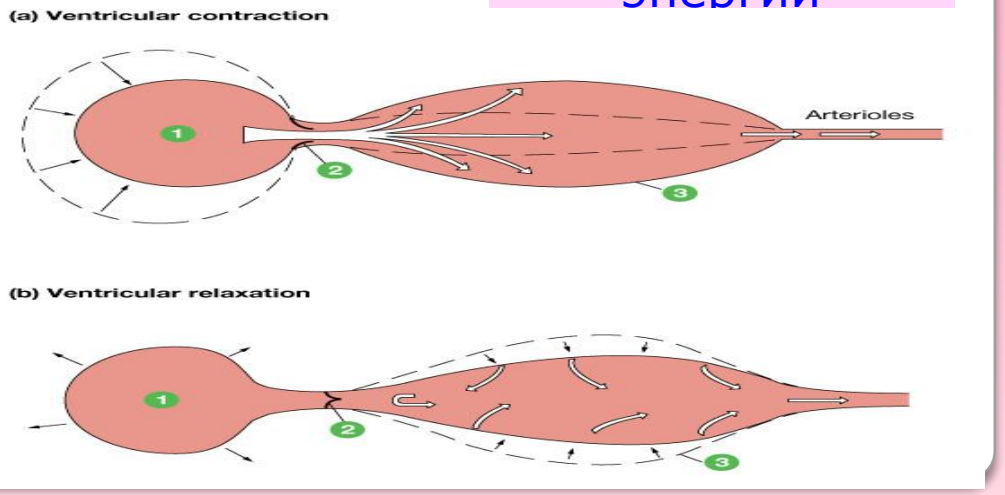
Миокард- источник энергии. Обеспечивает **непрерывное** движение крови по сосудистой системе.



Работа, совершаемая сердцем, затрачивается на

преодоление сил давления

и сообщение крови кинетической энергии



Работа **левого** желудочка Работа **правого** желудочка

$$A = P \cdot V + \frac{m\upsilon^2}{2}$$

$$A = P \cdot V + \frac{\rho \cdot V \cdot \upsilon^2}{2}$$

$A_{пр}$ = ***0,2*** *А лев.*

P – среднее динамическое давление. 13 кПа

V – ударный объем крови. 70 мл

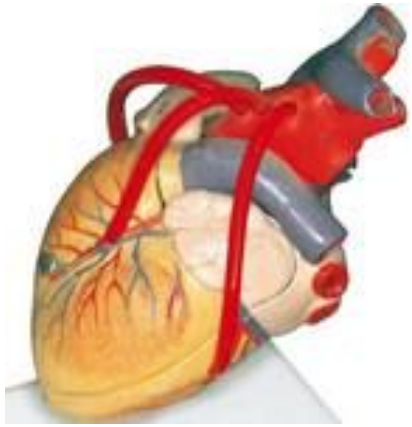
ρ Плотность крови 1050 кг/м^3

υ -скорость кровотока 0,5 м/с

Всего: Работа сердца равна

$$A = 1{,}2\left(PV + \frac{\rho V \upsilon^2}{2}\right) \approx 1{,}1 Дж$$

Мощность сердца



$$N = \frac{A}{\tau_S}$$

- Больше или меньше мощность **сердца**, чем мощность **электробритвы**?

ОТВЕТ:

$$N = \frac{1Дж}{0,3c} = 3,3Вт$$

12 Вт

Закон Гука. Модуль упругости

Закон Гука

$$F=kx$$

В пределах упругой деформации величина деформации прямо пропорциональна деформирующей силе.

$$\sigma=\frac{F}{S}$$

Механическое напряжение – это отношение силы к площади поперечного сечения

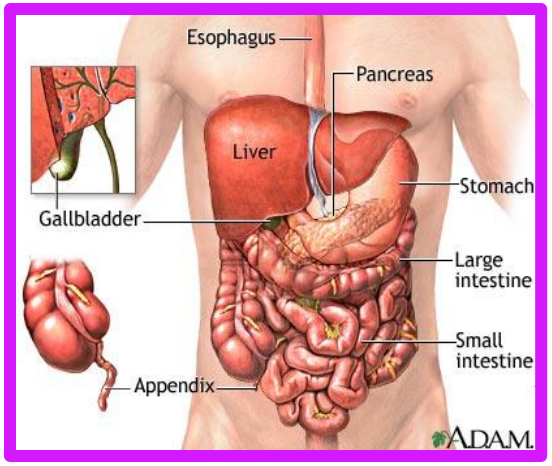
$$\sigma=E\varepsilon$$

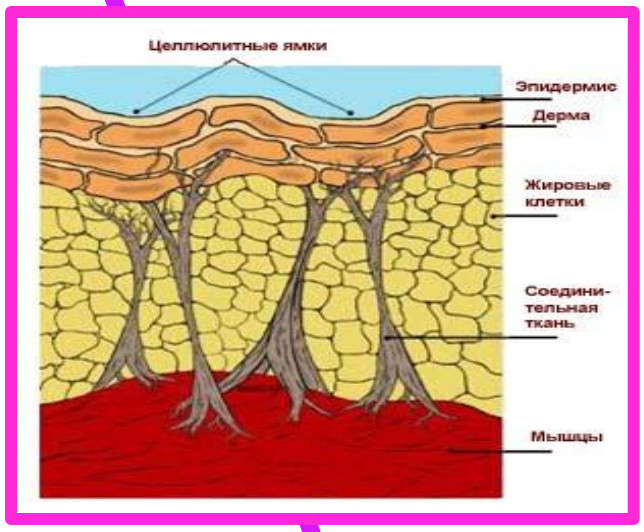
В области упругих деформаций величина деформации ε прямо пропорциональна механическому напряжению σ .

E – модуль упругости или модуль Юнга – это **напряжение**, которое нужно приложить к стержню, чтобы **удвоить** его длину.

Механические свойства биологических тканей

Биологические ткани являются **анизотропными композитами**





Свойства **различны** в **различных** направлениях

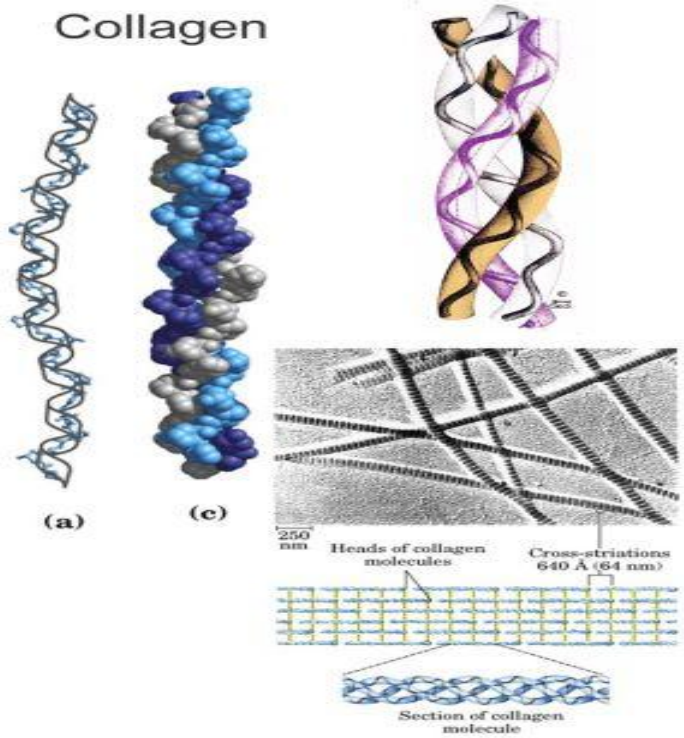
Объемное **сочетание разнородных** компонентов

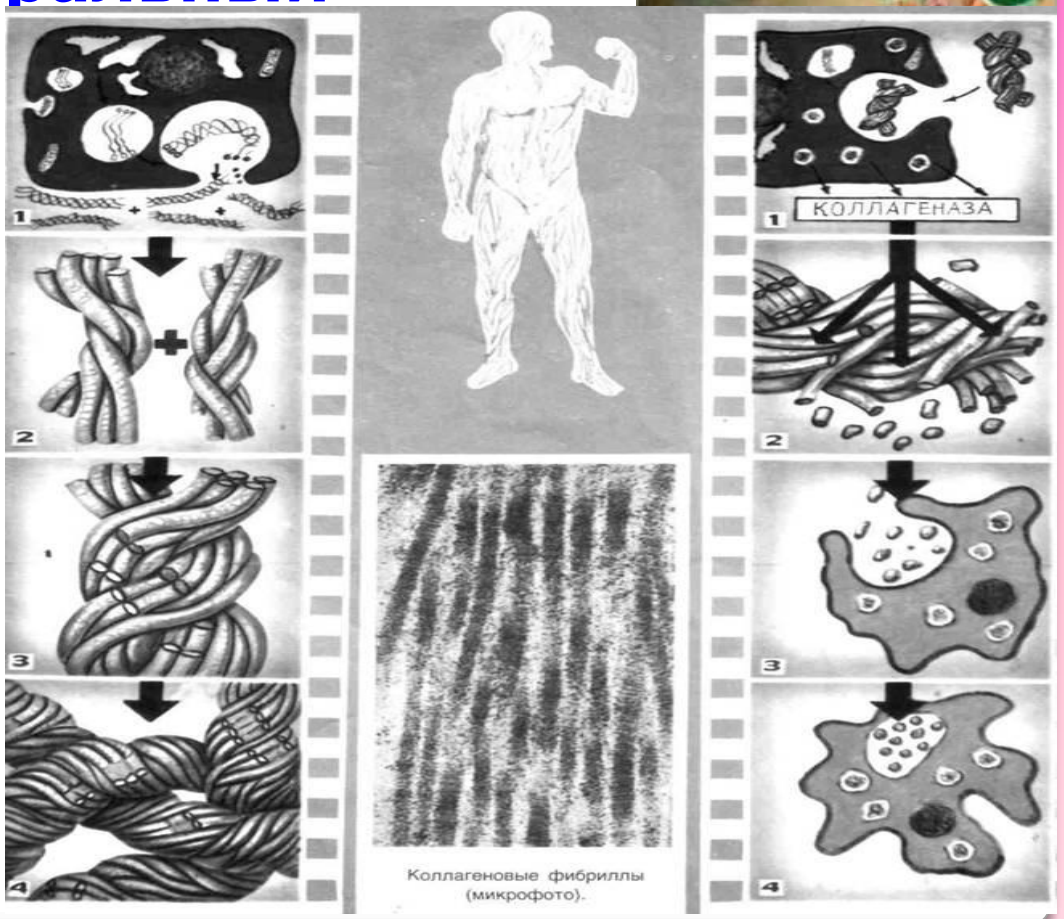
Механические свойства биологических тканей обусловлены **коллагеном**

Коллаген входит во все ткани

Коллаген – трехспиральный прочный белок.

Диаметр 4 мкм





Механические свойства биологических тканей

Это **вязко** - упругие и **упруго**-вязкие системы

Прочность

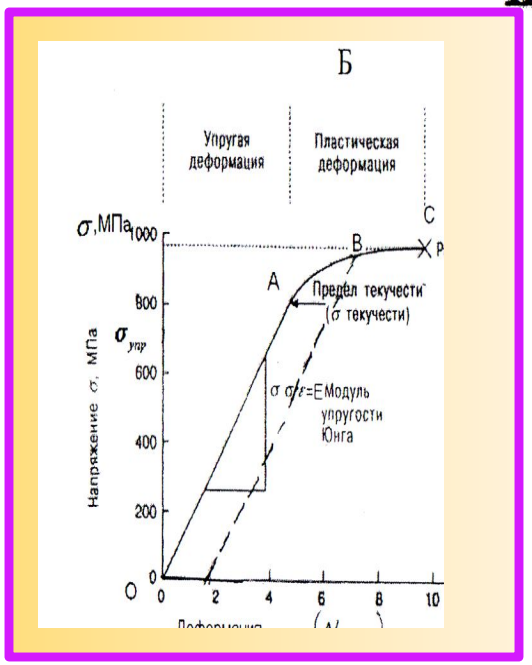
Модуль Юнга **не** постоянен

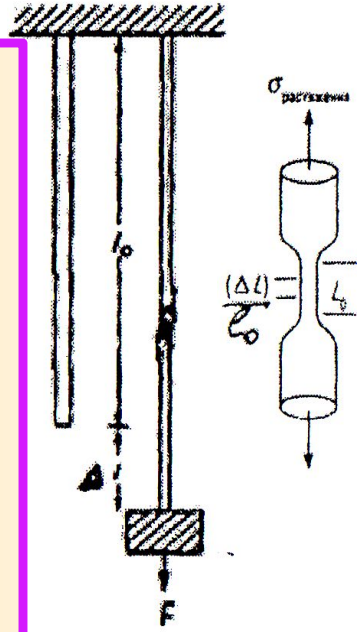
Пластичность

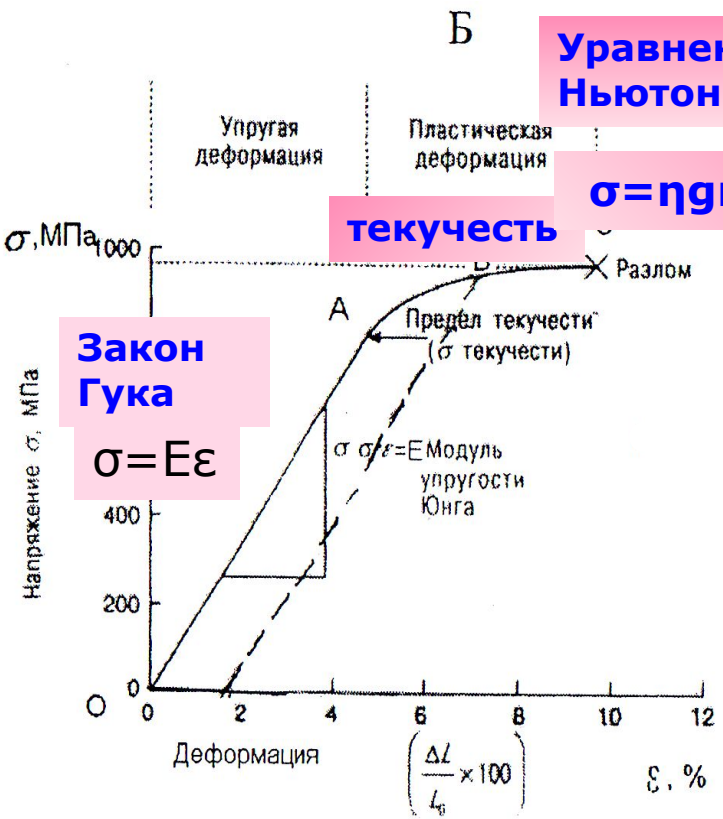
Нелинейная зависимость напряжение-деформация

Противостояние механической усталости

Кривая напряжение-деформация







Уравнение Ньютона

σ=ηgrad v

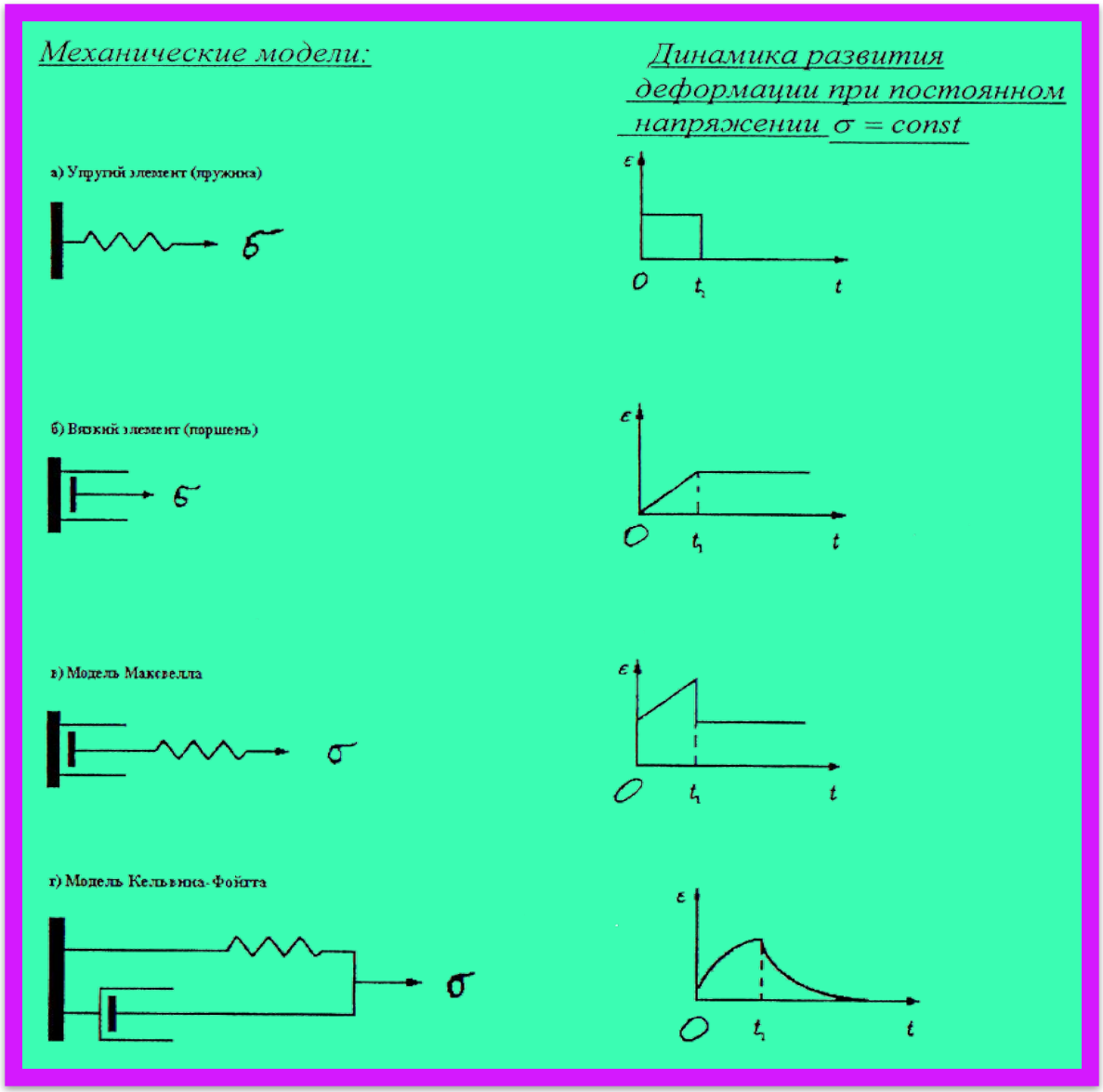
текучесть

Закон Гука

σ=Eε

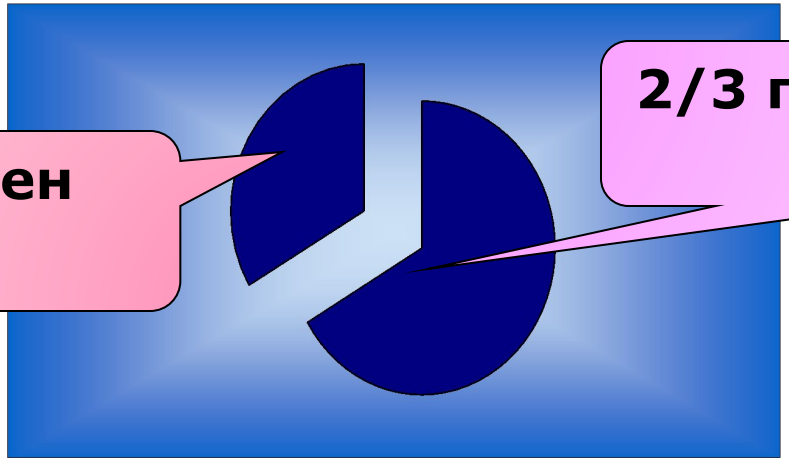
А – Эксперимент с растяжением проволоки из **ортопедического сплава** титана TiU Б – Результаты эксперимента.

Механические модели живых тканей



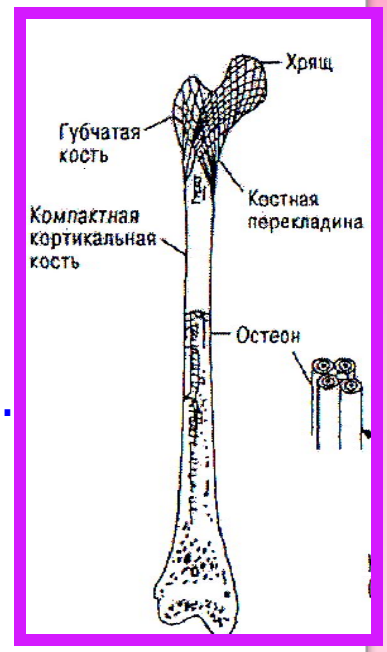
Упругие и прочностные свойства костной ткани

Это **твёрдое упругое** тело. $\rho = 2{,}4 \cdot 10^3$ **кг/м^3**



Минеральные соли Ca, P

Волокнистая структура коллагеновой матрицы пронизана игольчатыми кристаллами гидроксиапатита. Там кальций. Он держит воду. Кость гидрофильна.



Роль коллагена: Придает **вязкость.**

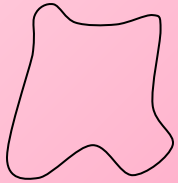
Свойства костной ткани

1. **Твердость**

2. **Упругость**

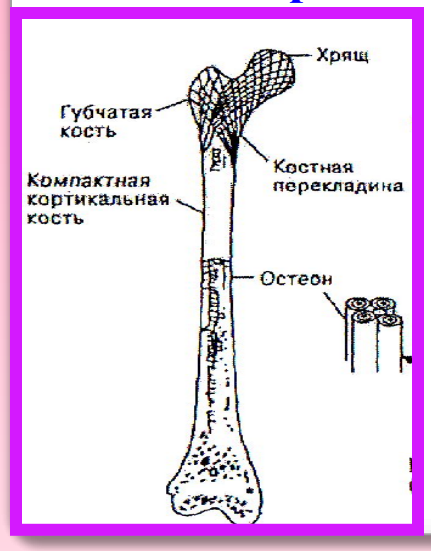
3. **Прочность**

4. **Осевая анизотропия**



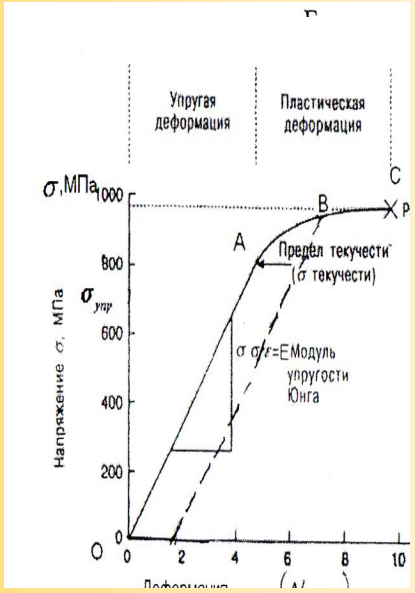
E↑, если кривизна ↑

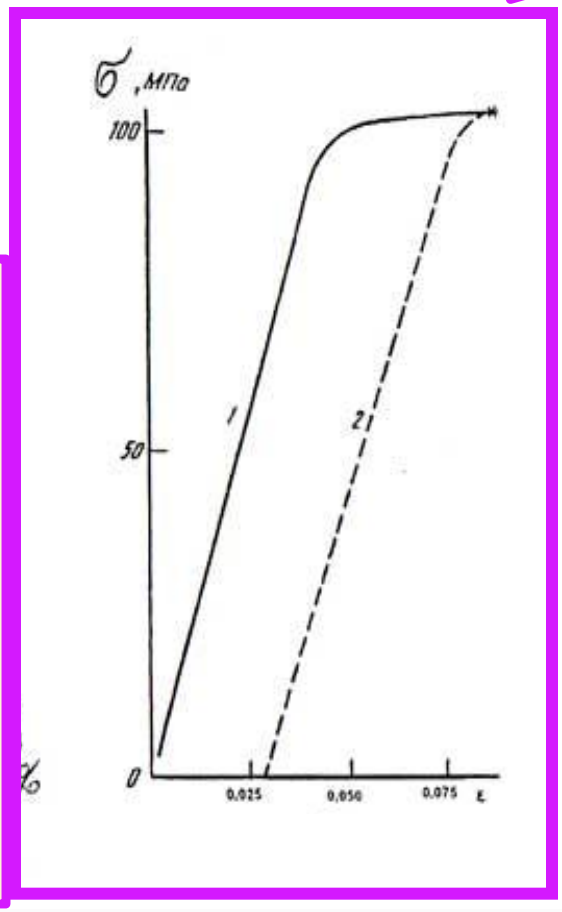
$\sigma_{прочности}$=100МПа

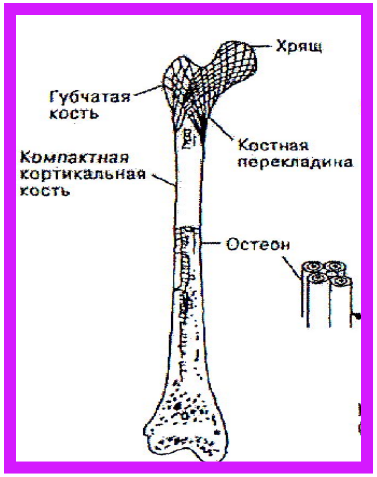


$E_{кости}=10^{10}$Па

График зависимости **напряжения σ от деформации ε** для бедренной **кости** человека (кривая 2 – остаточная деформация)





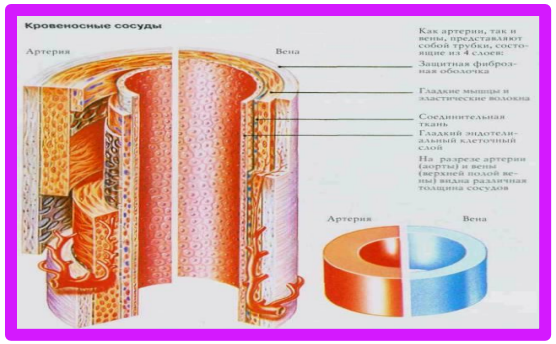


<u>Гуковская</u> область **для кости 0,8%.**

Для стали 1%

Механические свойства тканей кровеносных сосудов

Кровеносный сосуд с холестериновой бляшкой



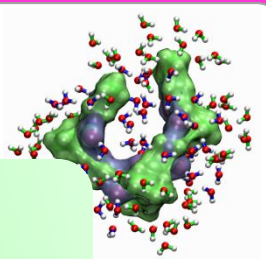
Артерия и вена

Поведение стенки сосуда определяется

Упругими свойствами материала

Геометрией сосуда

Стенки сосудов состоят из

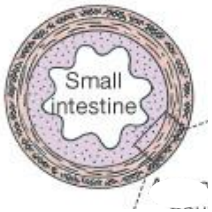


Коллаге н

$E=10^8$Па

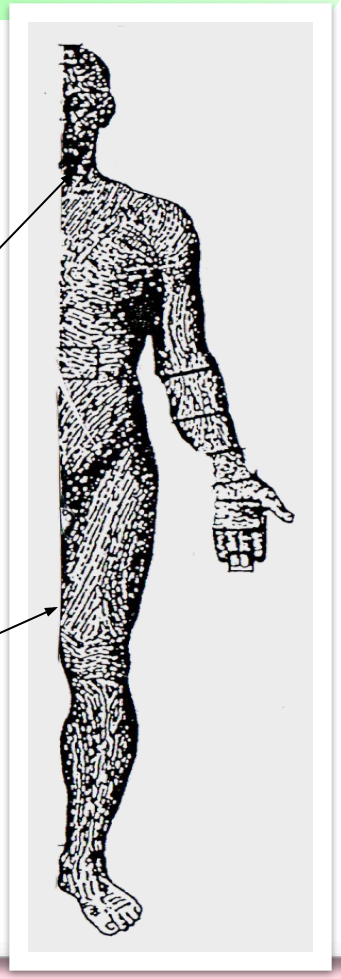
Эластин

$E=3\cdot10^5$Па



Гладкие мышцы

$E=1\cdot10^5 \div 20\cdot10^5$Па



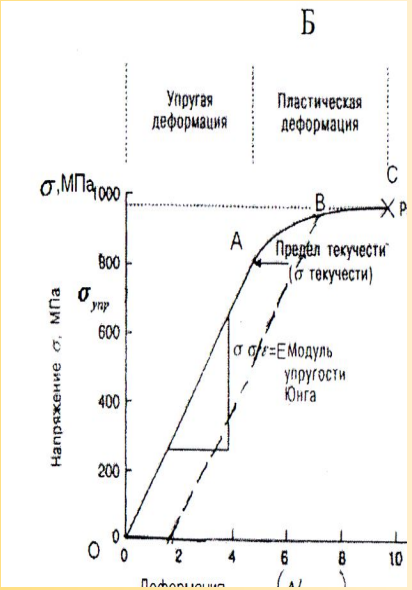
Эластин : коллаген

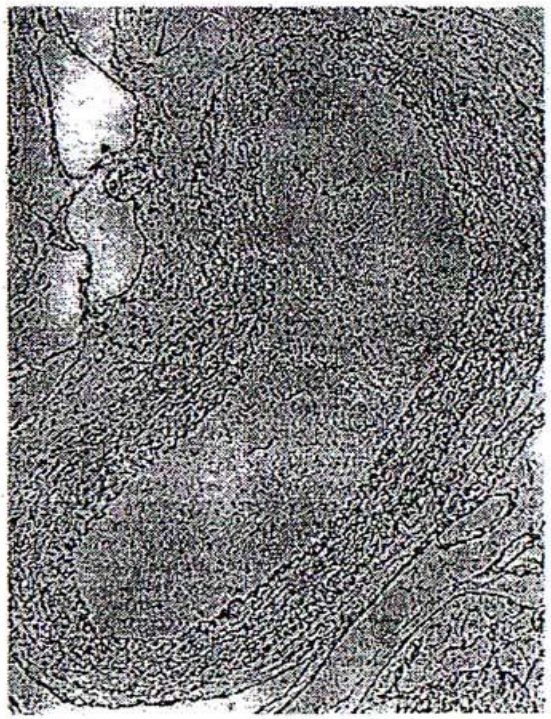
Сонная артерия 2:1

Бедренная артерия 1:2

Стенка сосуда **вязкоупругая**

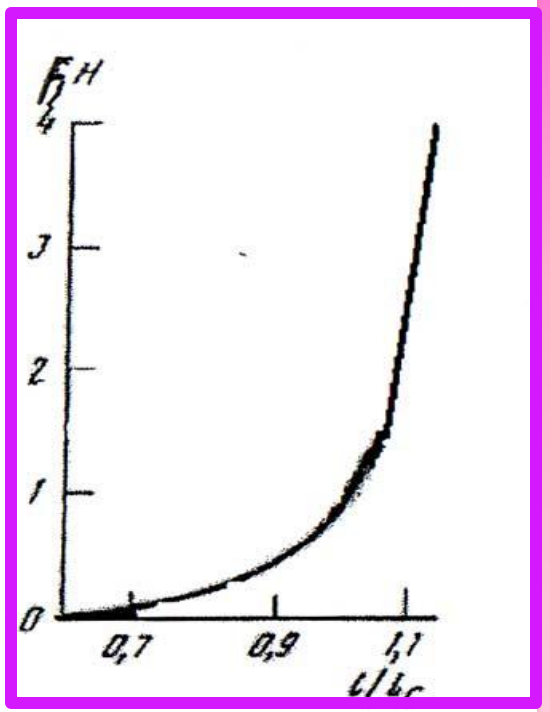
Гладкие мышцы и коллаген | **эластин**





А

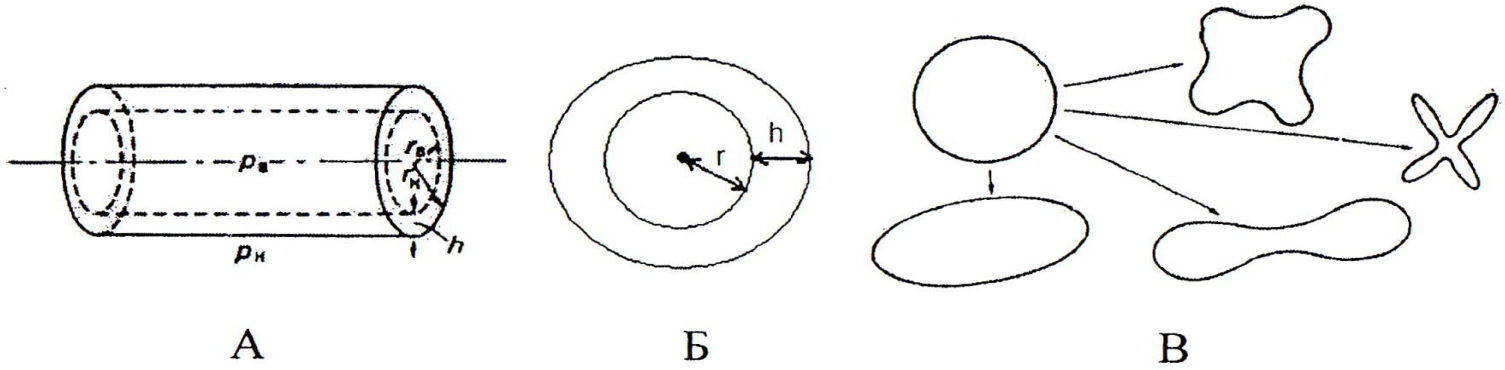
Поперечный разрез артерии под микроскопом (А).



Б

Кривая растяжения образцов стенки бедренной артерии собаки (Б).

Геометрия сосуда



Фрагменты сосуда

А – Продольный; Б – вид с торца; В – формы, которые может принимать спавшийся исходно круглый сосуд

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{h}$$

- **Уравнение Ламе**

P – внутрисосудистое давление; r – радиус сосуда;
σ – механическое напряжение; h – толщина стенки.