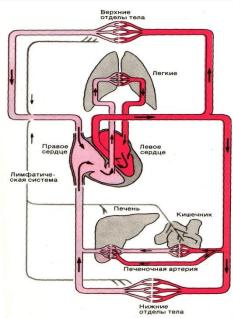


Лекция 4



Гемодинамика



Ростов-на-Дону **2012**

<u>Содержание лекции №4</u>

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

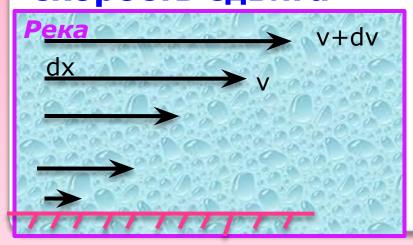
Вязкость . Формула Ньютона

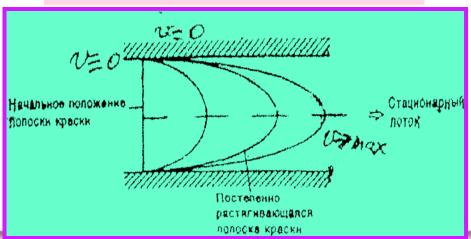
Вязкость (внутреннее трение) – это **свойство** текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению слоев. Вязкость возникает из-за **внутреннего трения** между молекулами жидкости.

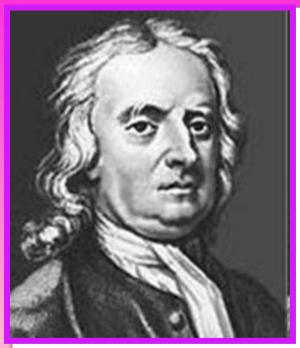
Между слоями существует

градиент скорости gradv = скорость сдвига

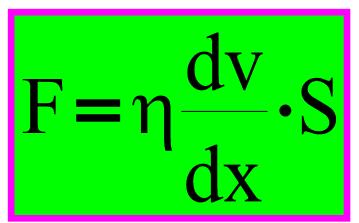
Течение жидкости по трубе







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



Уравнение Ньютона

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

$$\sigma = \frac{F}{S}$$
 -напряжение сдвига

Реология - (rheos - течение, поток)

учение о деформации и текучести вещества.

В *реологических* характеристиках уравнение Ньютона имеет вид:

 $\sigma = \eta \cdot gradv$

Напряжение сдвига прямо пропорционально скорости сдвига.

η – коэффициент динамической вязкости

СИ: [Па•с] = паскаль•секунда

СГС: $[\Pi]$ = пуаз 1 Па•с = 10 П 1мПа•с = 1сП



Кинематическая вязкость

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

$$v = \frac{M^2}{C}$$

$$[CT] = CTOKC$$

Текучесть - величина, **обратная** вязкости

Вязкость некоторых веществ

Вещество	Температура,	Вязкость,
	t ⁰ , C	η, мПа•с
Воздух	20	1,2•10 ⁻²
Вода	20	1
Глицерин	20	1,5
Масло	20	1÷10 ⁴
Мыло	20	10÷10 ¹⁴
Кровь	36	4÷5
Плазма	36	1,5

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

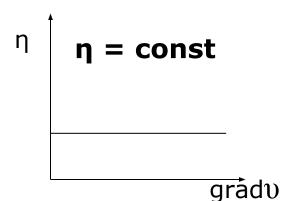
Они различаются и *количественно* и *качественно*

Ньютоновские и неньютоновские жидкости



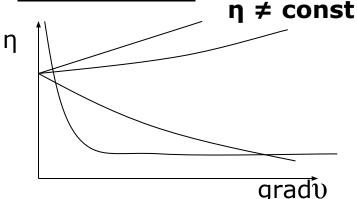
η *не зависит* от gradu η *зависит* от grad υ

Ньютоновская жидкость



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

<u>Неньютоновская</u> <u>жидкость</u>



Пример: **неоднородные** жидкости, <u>суспензии</u>, **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

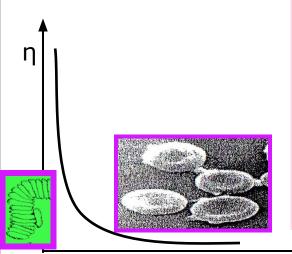
ВОПРОС: Каких форменных элементов?

Эритроцитов.

<u>ПОЧЕМУ</u> эритроцитов?

Эритроциты составляют 93%

Вязкость крови зависит от режима течения. <u>Чем медленнее течет кровь, тем выше вязкость</u>



В **капиллярах** grad v ↓ → η ↑

В *артериях* grad v ↑ _____ η ↓

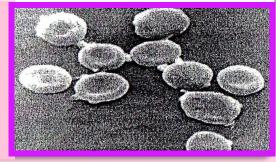
η = **4-5 мПа**•с

gradυ

Зависимость вязкости крови от режима течения

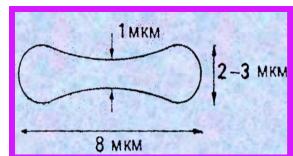
При <u>низких</u> скоростях сдвига эритроциты образуют **«монетные столбики»** При **высоких** скоростях сдвига вязкость крови определяется

- 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 <u>отрицательно</u>.

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

Плазма крови – водно-солевой белковый раствор.

Плазма – <u>ньютоновская</u> жидкость. $\eta = 1,2$ мПа•с

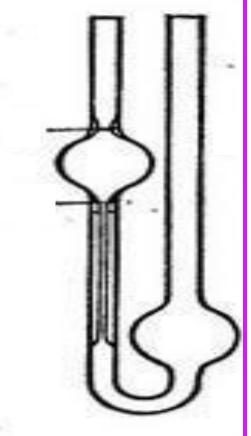
Вопрос:

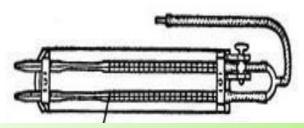
Эта цифра вязкости при 37^{0} С. Что с ней произойдет при повышении температуры до 41^{0} С?

Понизится на 10%

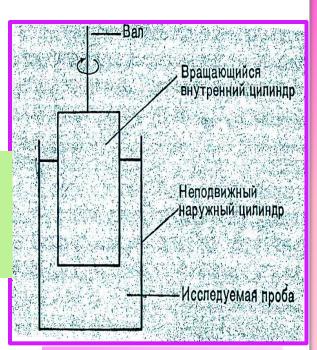
Сыворотка – это плазма без фибриногена η=1,1мПа•с

Методы определения вязкости жидкостей





Вискозиметр для определения относительной вязкости **крови**



Ротационный вискозиметр

Капиллярный вискозиметр Оствальда **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.



Экспрессанализаторвискозиметр

ротационный



<u>Стационарный поток</u>

Стационарный поток это такой поток, когда

через каждый уровень поперечного сечения, протекает одинаковый объем жидкости

Q<u>- объемная скорость</u> – это объем жидкости, протекающий через поперечное сечение за единицу времени.

$$Q = \frac{V}{t} \begin{bmatrix} M^3 \\ c \end{bmatrix}$$

$$Q = v \cdot S$$

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

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

<u>Ламинарное и турбулентное</u>

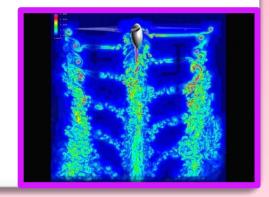
<u>течения</u>

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

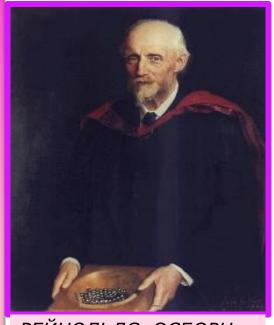


Турбулентное течение – это вихревое течениежидкости сопровождающееся перемешиванием слоев, обусловленным образованием <u>вихрей</u>. Скорость частиц непрерывно меняется.

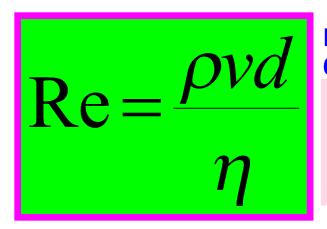




Характер течения жидкости определяется числом Рейнольдса



РЕЙНОЛЬДС, ОСБОРН (1842-1912),



Величина безразмерная

р- плотность;

V - СКОРОСТЬ;

d- диаметр сосуда:

η - ВЯЗКОСТЬ

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

Если **Re < Re_{кр}** => <u>Ламинарное</u> течение

Если $Re > Re_{\kappa p} = > \frac{Typ6yлентное}{Possible}$ течение $Re_{\kappa put}$ (H_2O)=2300 $Re_{\kappa put}$ ($\kappa possible$) = 970 ± 80.

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

Физический смысл числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{cuлы}{cuл} \frac{uнерции}{sss} = \frac{d^{v}}{v}$$

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

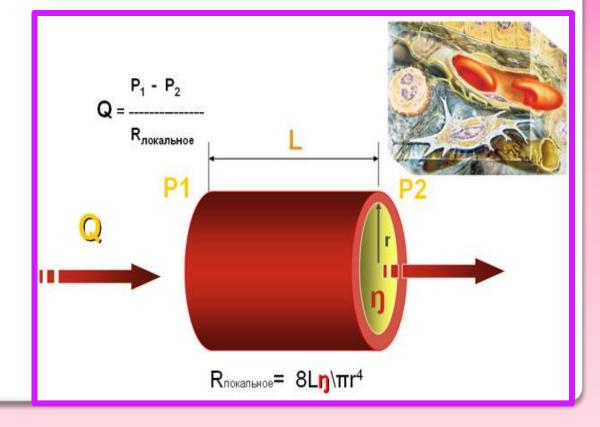
Формула Пуазейля

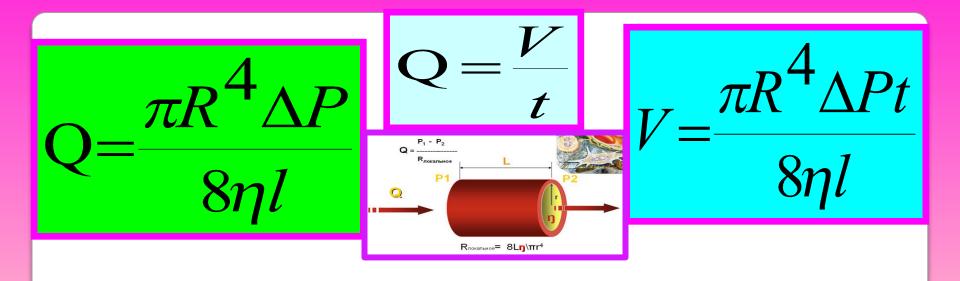
<u>Пуазейл</u>ь Жан Мари французский <u>врач</u> + физик + физиолог





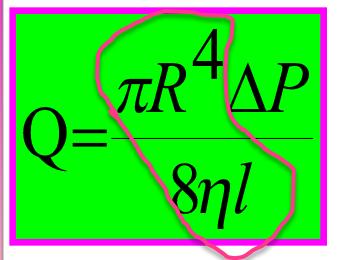
Пуазейль 1799-1869





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

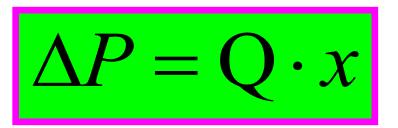
Гидравлическое сопротивление



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

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

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

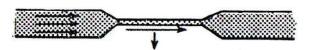


Основное уравнение гемодинамики

Перепад давлений прямо пропорционален гидравлическому сопротивлению

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

•<u>Гидравлическое сопротивление системы</u> последовательно соединенных труб

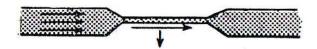


$$X = X_1 + X_2 + X_3$$

•<u>Гидравлическое сопротивление системы</u> <u>параллельно соединенных труб</u>

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

Сужение сосуда

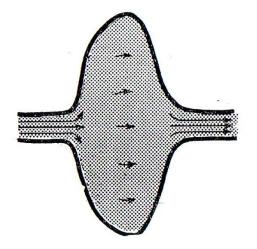


- Скорость потока возрастает
- Сопротивление увеличивается
- Перепад давлений увеличивается

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

$$\Delta P = Q \cdot x \mathbf{1}$$

Расширение сосуда

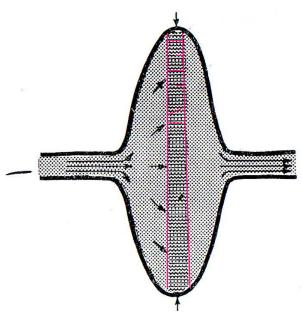


• Скорость потока уменьшается

• Сопротивление падает

• Перепад давлений уменьшается

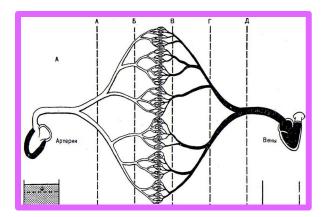
<u>Группа суженных сосудов, соединенных</u> <u>параллельно при большом суммарном</u> <u>поперечном сечении</u>



Замедление потока

- Сопротивление возрастает
- Перепад давлений увеличивается

Капиллярная сеть

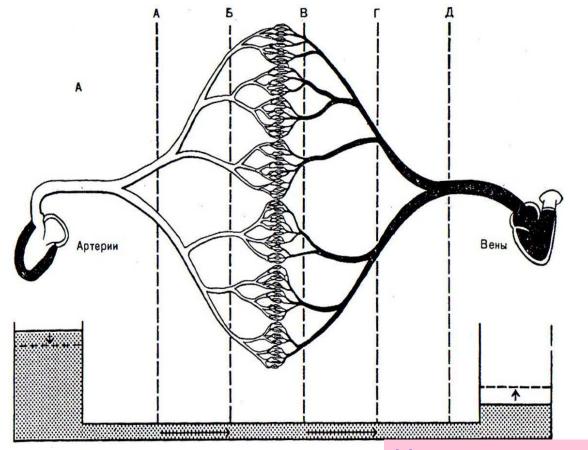


• **Скорость** потока U уменьшается из-за трения.

ВОПРОС:

Назовите самое <u>узкое</u> место ССС.

Аорта

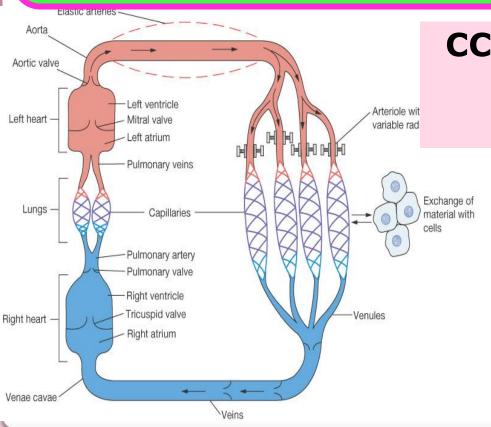


 $V_{\text{аорт.}} = 0,5 \text{ M/C}$ $V_{\text{капил.}} = 0,5 \text{ MM/C}$ Условие **стационарности** потока **Q=const**

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

<u>Физические основы гемодинамики</u>

•**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.

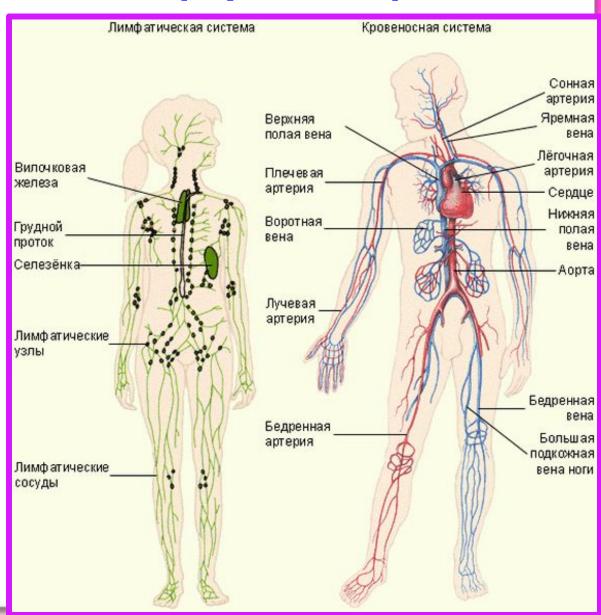
Основное назначение циркуляции крови:

Доставка

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

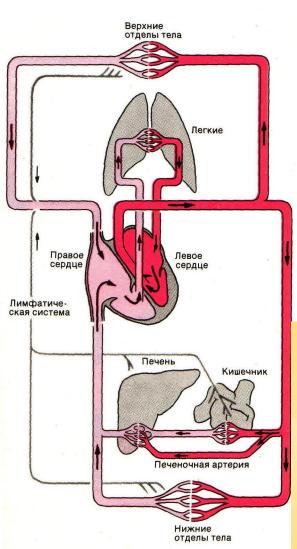
& Удаление

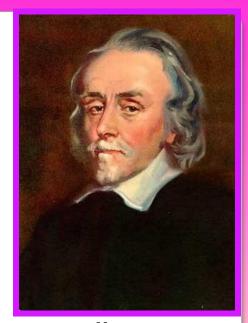
Продуктов жизнедеятельности. Пример: углекислый газ



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, выброс левого и правого желудочков должен быть строго одинаков.

Ударный объем крови

Это объем крови, который выталкивается из сердца за одно сокращение

ВОПРОС:

6 мл

V_{уд} равен





60 мл

Столовая ложка 15 г

600 мл

<u>Ответ:</u> 60 мл



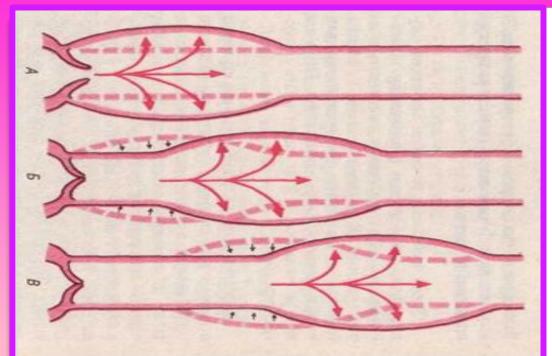
Пульсовая волна, скорость ее распространения

- 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 <u>пульс</u> сравнивают с плавающей по воде шелковой тканью.

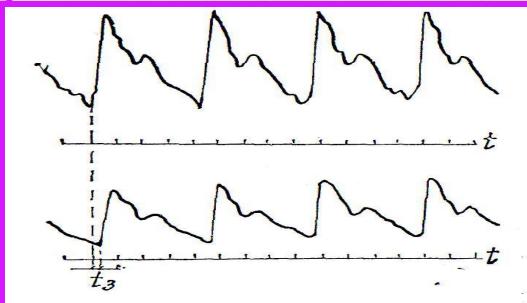




Пульсовая волна



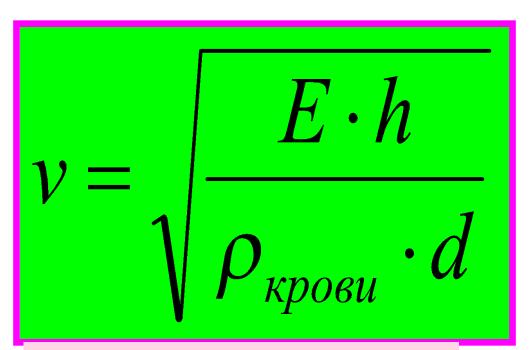


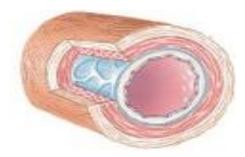


tз -время
запаздывания
пульсовой волны,
зарегистрированной
дистальнее.
Площадь под кривой –
это ударный объем.

Скорость распространения пульсовой волны у

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





Е -модуль Юнга

h- толщина стенки

d -диаметр сосуда

ρ – плотность крови

Формула Моенса- Кортевега

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).

Анакрота

При <u>каждом</u> сердцебиении давление крови <u>поднимается</u> до систолического уровня, а между ударами <u>падает</u> 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.

<u>Пульсовые колебания</u>

<u>давления:</u>

АД: 120/80 мм рт.ст.

16/11 кПа

Диастолическое

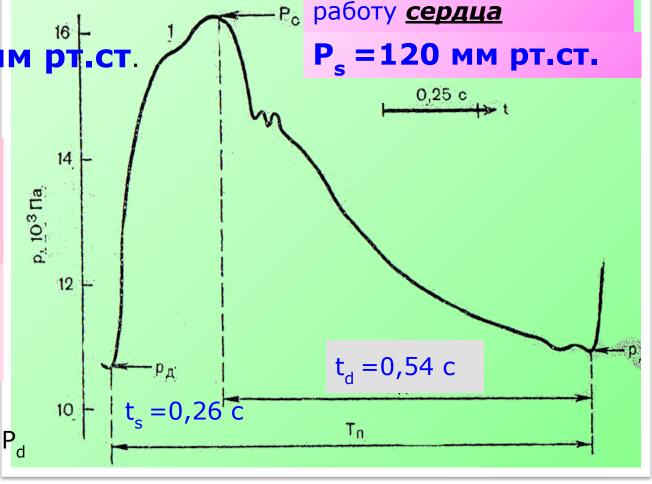
давление -

сосудистое

давление

 $P_d = 80 \text{ MM pt.}$ ct.

 ΔP – **пульсовое** давление. $\Delta P = P_s - P_d$ P_{cp} - **среднее** динамическое давление. 13 кПа.



Систолическое

давление характеризует

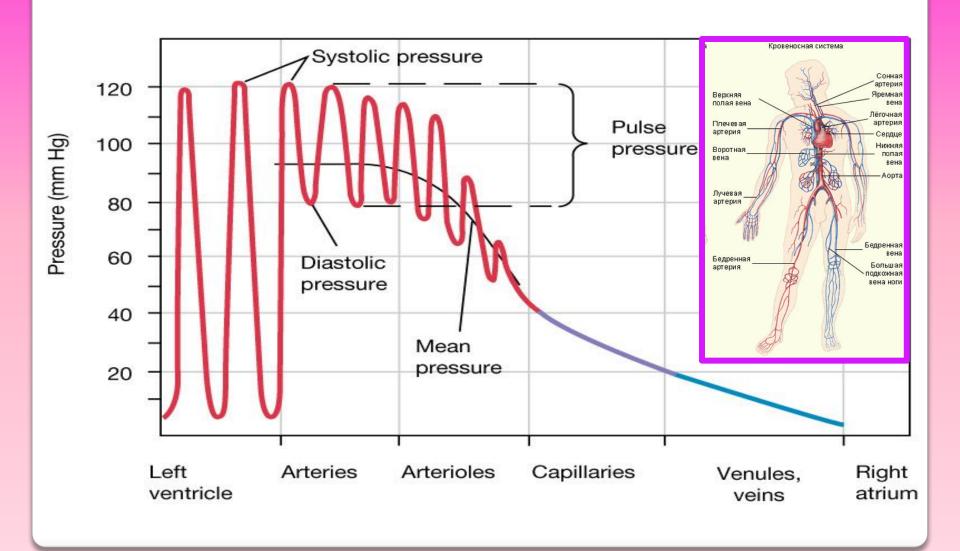
 $T = t_s + t_d$

T=0,8 c

CB=V_{yд}ЧCC

Ударный объем крови – это площадь под графиком

<u>Давление крови в различных участках</u> <u>сосудистого русла</u>

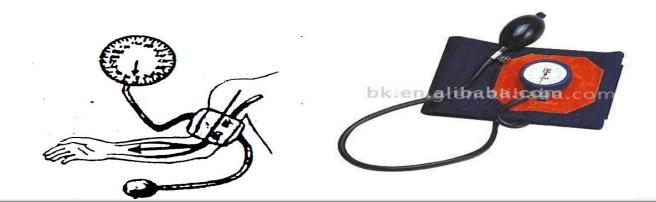


<u>метода измерения давления</u> <u>крови.</u>

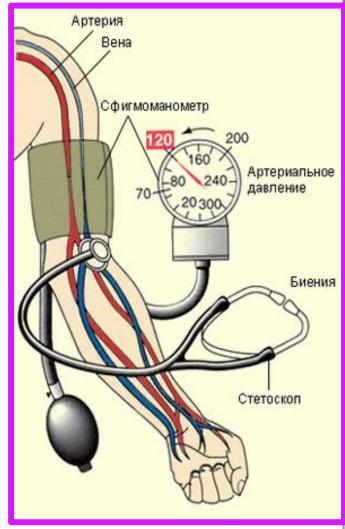
Основан на измерении <u>внешнего</u> <u>давления</u>, необходимого, чтобы пережать артерию.

СФИГМОМАНОМЕТР=

= Манжета +груша + манометр









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

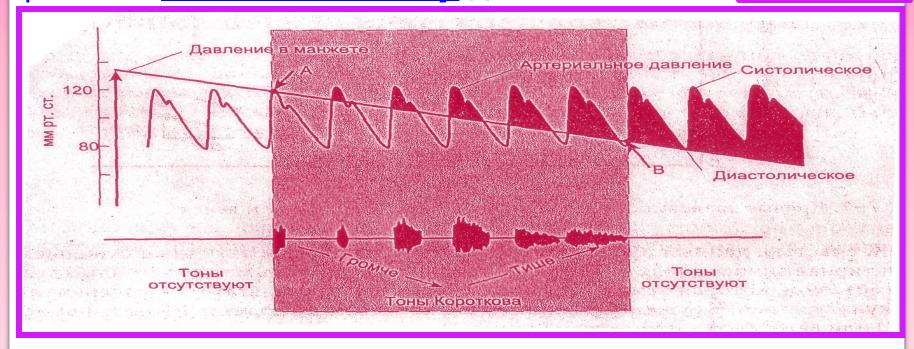
Метод Короткова по измерению АД

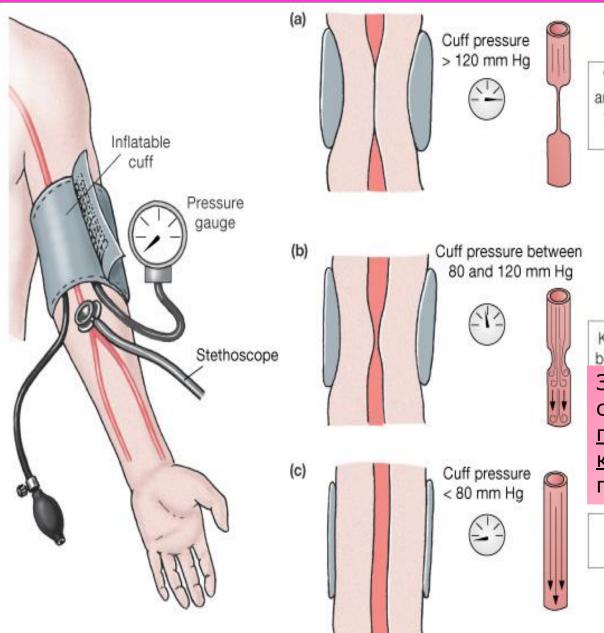
В созвездии имен великих медиков, заслуживших благодарность всего человечества за свои открытия в медицине, нашло свое место имя русского врача Н. С. Короткова. 8 ноября 1905 года Коротков **(ему был <u>31 год</u>)** в своем докладе на «Научном Совещании Клинического военного госпиталя Военно-медицинской 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 <u>турбулентног</u> течения, когда давление в манжете станет равным <u>систолическому</u> 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.

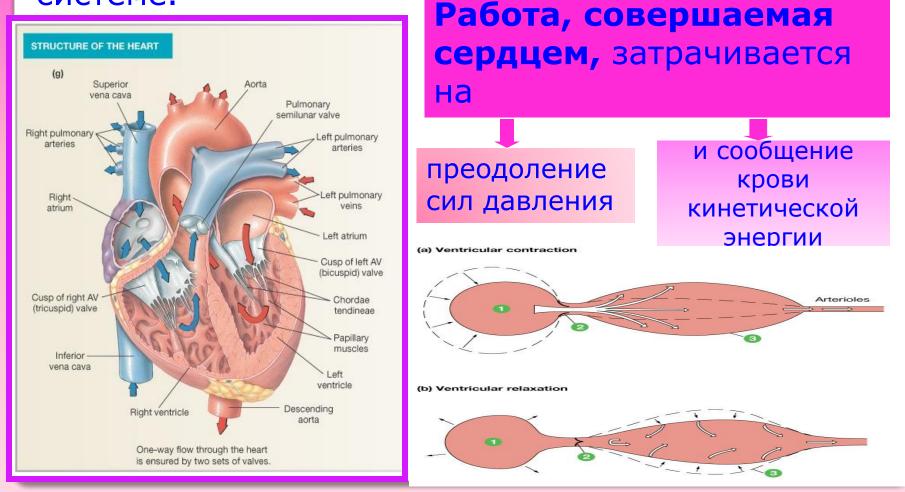
Звуки Короткова создаются пульсирующим кровотоком через пережатую артерию

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 левого желудочка Работа правого желудочка

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

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

$$A_{_{\Pi D}} = 0,2$$
 А лев.

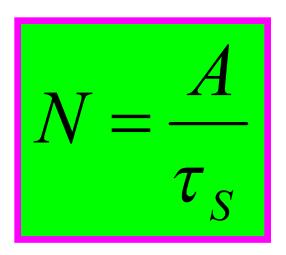
Р – среднее динамическое давление. 13 кПа V – ударный объем крови. 70 мл
Р Плотность крови 1050 кг/м³
1) -скорость кровотока 0,5 м/с

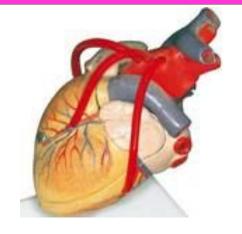
Всего: Работа сердца равна

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

Мощность сердца







•Больше или меньше мощность сердца, чем мощность электробритвы?

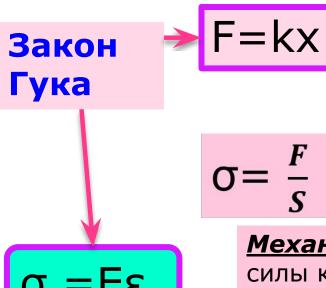
OTBET:

$$N = \frac{1 \cancel{\square} \cancel{\cancel{3}} \cancel{\cancel{6}}}{0,3c} = 3,3Bm$$



12 BT

Закон Гука. Модуль упругости



В пределах упругой деформации величина деформации прямо пропорциональна деформирующей силе.

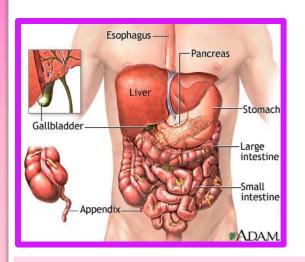
Механическое напряжение – это отношение силы к площади поперечного сечения

<u>В области упругих деформаций</u> величина деформации ε прямо пропорциональна механическому напряжению σ.

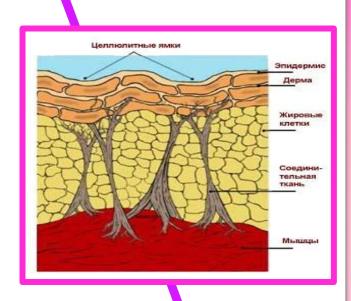
Е – **МОДУЛЬ УПРУГОСТИ** или модуль Юнга – это напряжение, которое нужно приложить к стержню, чтобы удвоить его длину.

Механические свойства биологических тканей

Биологические ткани являются анизотропными композитами



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



Объемное **сочетание разнородных** компонентов

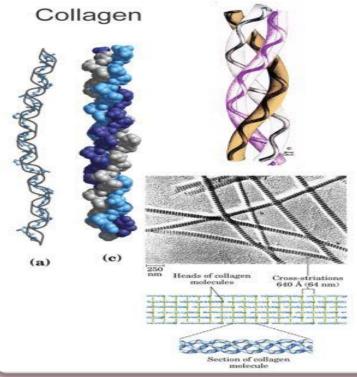
Механические свойства биологических

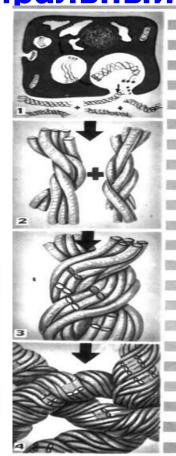
тканей обусловлены коллагеном

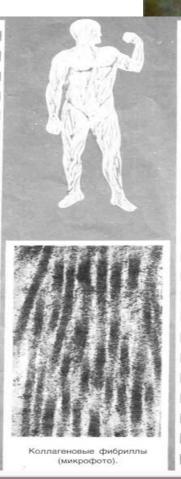
Коллаген входит во все ткани

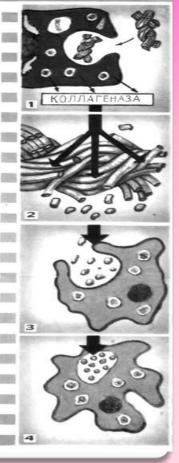
Коллаген – трехспиральный

<u>прочный</u> белок. Диаметр 4 мкм









Механические свойства биологических тканей

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

Прочность

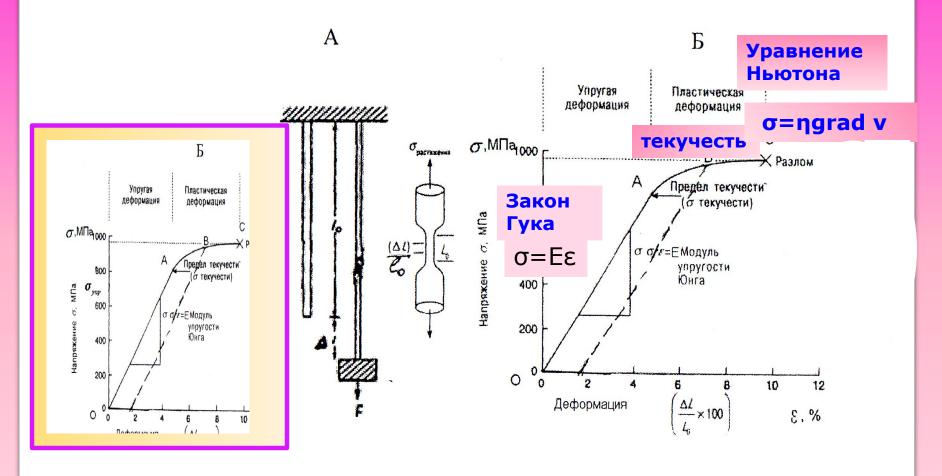
Модуль Юнга **не** постоянен

Пластичность

Нелинейная

зависимость напряжениедеформация Противостояние механической усталости

Кривая напряжение-деформация



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

Механические модели живых тканей

Механические модели:

а) Упругий элемент (пружина)



б) Вязкий элемент (поршень)



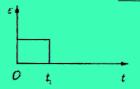
в) Модель Максвелла

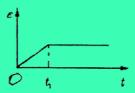


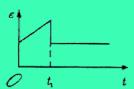
г) Модель Кельвика-Фойтта

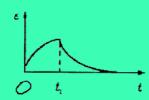


Динамика развития деформации при постоянном напряжении $\sigma = const$







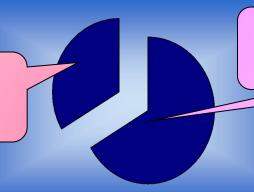


Упругие и прочностные свойства костной ткани

Это **твёрдое упругое** тело.

 $\rho = 2,4 \cdot 10^3 \text{ KF/M}^3$

1/3 коллаген (орг.)



2/3 гидроксиапатит (неорг.)

Минеральные соли Са, Р

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

Роль коллагена:

Придает вязкость.



Свойства костной ткани

1. Твердость

3. Прочность

2. Упругость

σ_{прочности}=100МПа



4. **Осевая** анизотропия

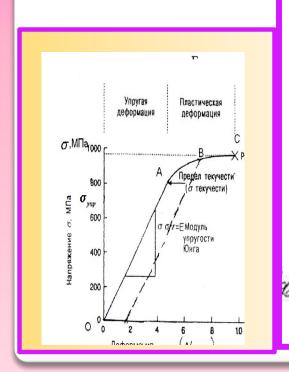


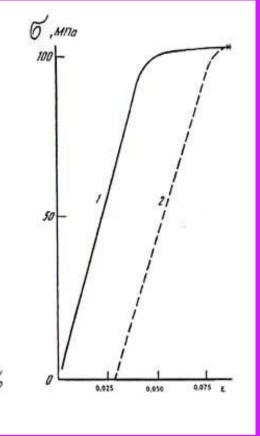
$$E_{KOCTH} = 10^{10} \Pi a$$

График зависимости напряжения σ от

деформации є для бедренной кости человека

(кривая 2 – остаточная деформация)







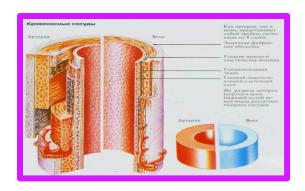
Гуковская область **для** кости 0,8%.

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 E=10⁸Па

Эластин E=3·10⁵Πa



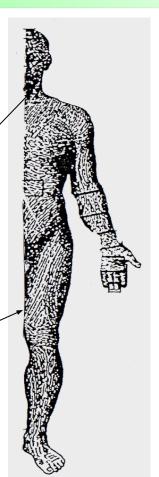


Гладкие мышцы $E=1.10^{5} \div 20.10^{5}\Pi a$

Эластин: коллаген

Сонная артерия 2:1

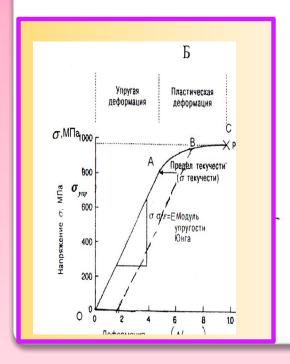
Бедренная артерия 1:2

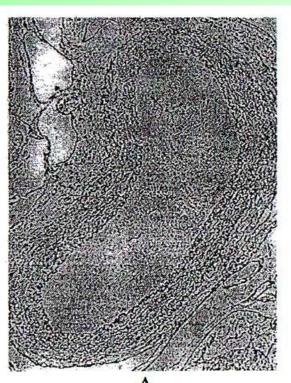


Стенка сосуда вязкоупругая

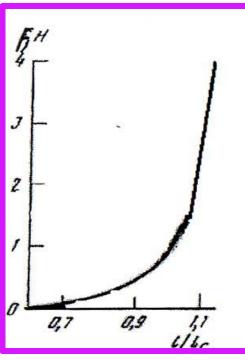
Гладкие мышцы и коллаген

эластин



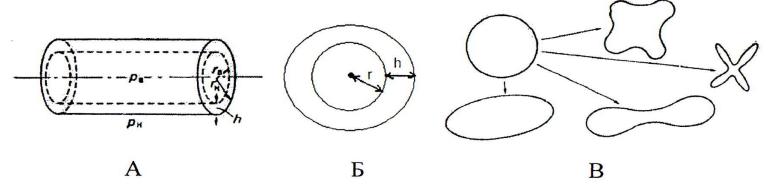


А Поперечный разрез артерии под микроскопом (A).



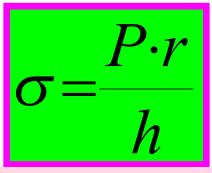
Кривая рае яжения образцов стенки бедренной артерии собаки (Б).

Геометрия сосуда



Фрагменты сосуда

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



- Уравнение Ламе

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

