

Гемодинамика



Кафедра нормальной физиологии

Доцент Зобенко В.Я.



■ *Гемодинамика* - раздел биомеханики, в котором исследуется движение крови по сосудистой системе. Физической основой гемодинамики является гидродинамика. Течение крови зависит как от свойств крови, так и от свойств кровеносных сосудов.



Виды течения жидкостей

- ▶ Движение жидкости (течение) считается установившимся (**стационарным**), если в каждой точке данного объема скорость ее частиц не изменяется со временем
- ▶ Течение, сопровождающееся образованием вихрей и перемешиванием слоев, называется **турбулентным**
- ▶ Течение жидкости называется **ламинарным**, если слои жидкости скользят друг относительно друга, не перемешиваясь.
- ▶ Стационарное течение может быть только ламинарным

Законы движения жидкостей

Условие неразрывности струи

- ▶ Для идеальной жидкости при установившемся течении в различных сечениях трубки тока выполняется **условие неразрывности струи**:
- ▶ где V_1 , V_2 , V_3 ... – объемы жидкости, проходящие через первое, второе, третье поперечное сечение за время t

$$\frac{V_1}{t} = \frac{V_2}{t} = \frac{V_3}{t} = \dots$$

Законы движения жидкостей

Условие неразрывности струи

- ▶ Если выразить объем через площадь поперечного сечения и длину, то можно записать выражение, используя скорость течения жидкости:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = S_3 v_3 = \dots = Q$$

- ▶ где S_i – площадь первого, второго, третьего и т.д. поперечного сечения, v_i – скорость течения жидкости в первом, втором, третьем и т. д. сечении трубы, Q – объем жидкости, проходящий в единицу времени через поперечное сечение трубы

Законы движения жидкостей

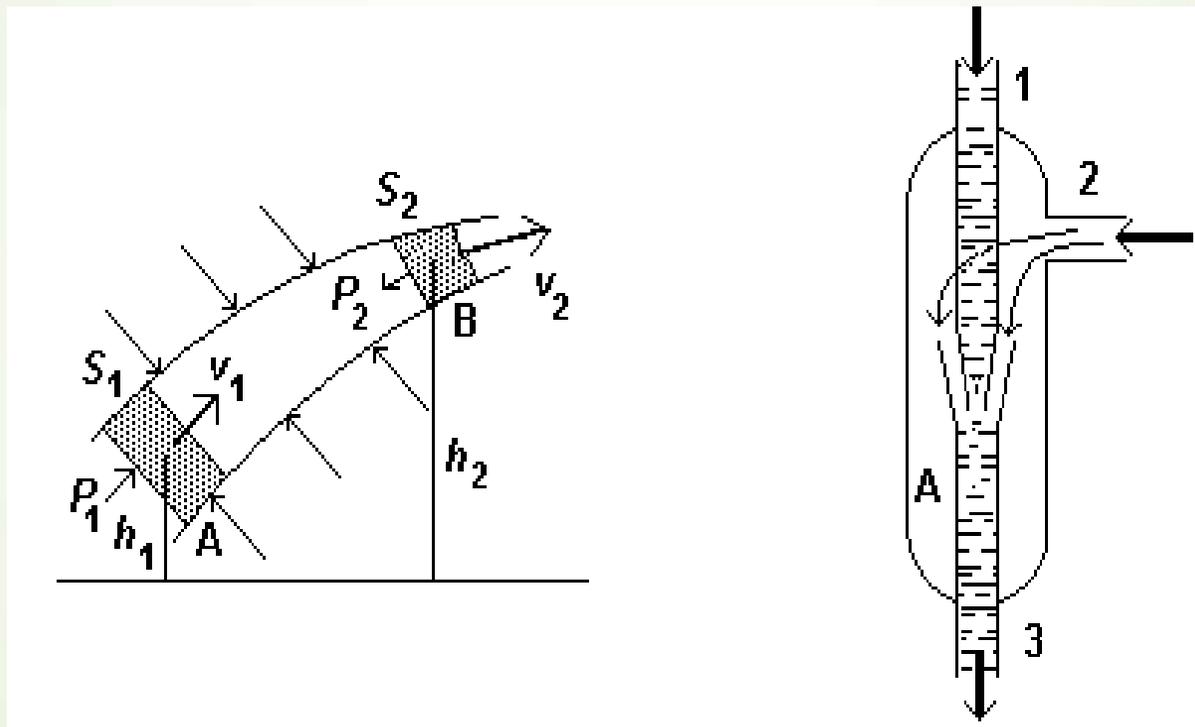
Уравнение Бернулли

► Для идеальной жидкости справедливо уравнение Бернулли:

$$P_1 + \rho g h_1 + \rho v_1^2 / 2 = P_2 + \rho g h_2 + \rho v_2^2 / 2$$

► где P - статическое давление, $\rho g h$ - гидростатическое давление, $\rho v^2 / 2$ - гидродинамическое давление

Уравнение Бернулли





Реальная жидкость

Силы внутреннего трения

- ▶ В отличие от идеальной жидкости, для реальной жидкости при течении в горизонтальной трубке постоянного сечения уравнение Бернулли не выполняется, т.к. имеется внутреннее трение (вязкость)
- ▶ **Силы внутреннего трения (вязкости)** направлены по касательной к слою. При ламинарном течении жидкости по трубе скорость слоев непрерывно меняется от максимальной (по оси трубы) до нуля (у стенок). Любой из слоев тормозит движение соседнего слоя, ближнего к оси трубы, и ускоряет слой, ближний к стенкам трубы. Силы вязкости объясняются силами взаимодействия между молекулами жидкости

Закон Ньютона:

$$\rightarrow F_{\text{вн.тр.}} = S \eta \frac{dv}{dz}$$

$$\rightarrow \text{или } F_{\text{вн.тр.}} = S \eta \frac{\Delta v}{\Delta z}$$

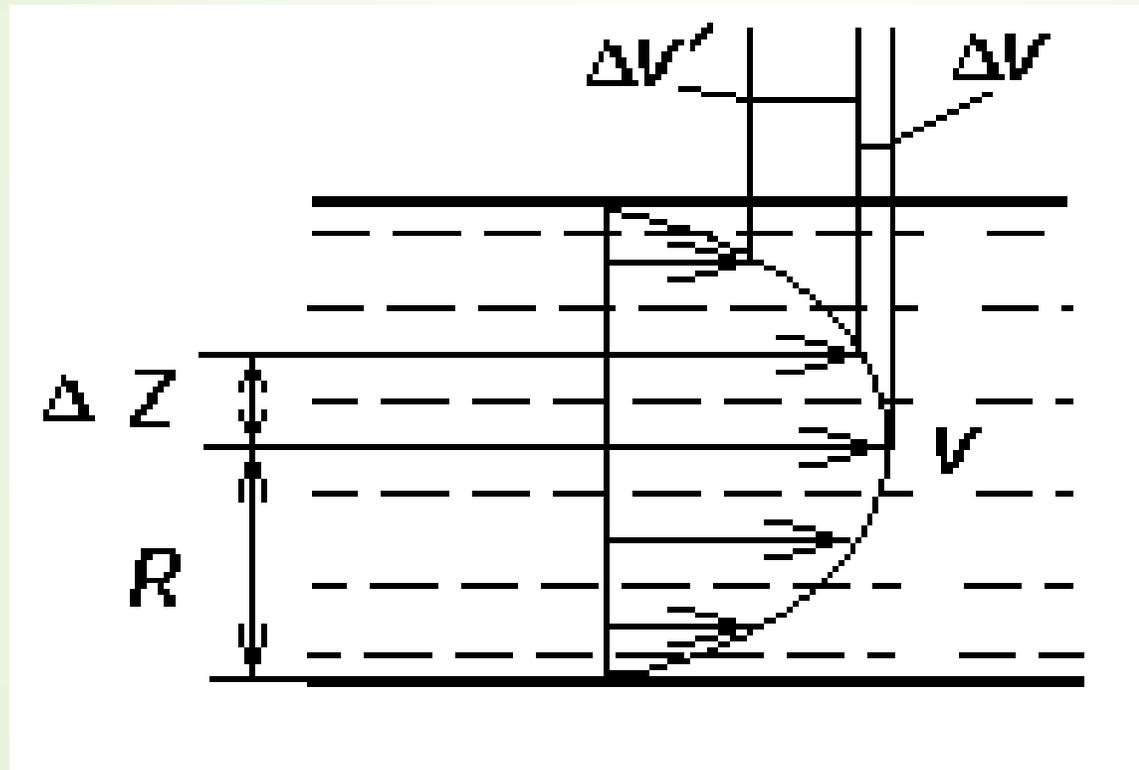
где - $F_{\text{вн.тр}}$ - сила внутреннего трения, S - площадь соприкосновения слоев,

$\frac{dv}{dz}$ - **градиент скорости** (градиент - величина, характеризующая изменение

какого-либо параметра по направлению, в данном случае скорости по направлению z),

η - **коэффициент вязкости**

Градиент скорости





Ньютоновские жидкости и Неньютоновские жидкости

- Жидкости, у которых коэффициент вязкости зависит только от их природы и температуры, называются **НЬЮТОНОВСКИМИ**
- Для некоторых жидкостей (эмульсии, суспензии, растворы полимеров) вязкость зависит еще и от режима течения - давления, градиента скорости. Такие жидкости называют **НЕНЬЮТОНОВСКИМИ**

Формула Гаагена-Пуазейля

► формула Гаагена-Пуазейля:

$$Q = (p_1 - p_2) / Z$$

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

Z - это гидравлическое сопротивление

Число Рейнольдса

число Рейнольдса:

$$Re = v_{кр.} \frac{D\rho}{\eta}$$

где D - диаметр трубы,

ρ - плотность жидкости,

η - коэффициент вязкости,

Re - число Рейнольдса

Закон Стокса

закон Стокса:

$$F_{\text{тр.}} = 6 \eta \pi r v ,$$

где r - радиус шарика (сферы),

v - скорость движения шарика,

η - коэффициент вязкости



Движение крови в сосудистой системе

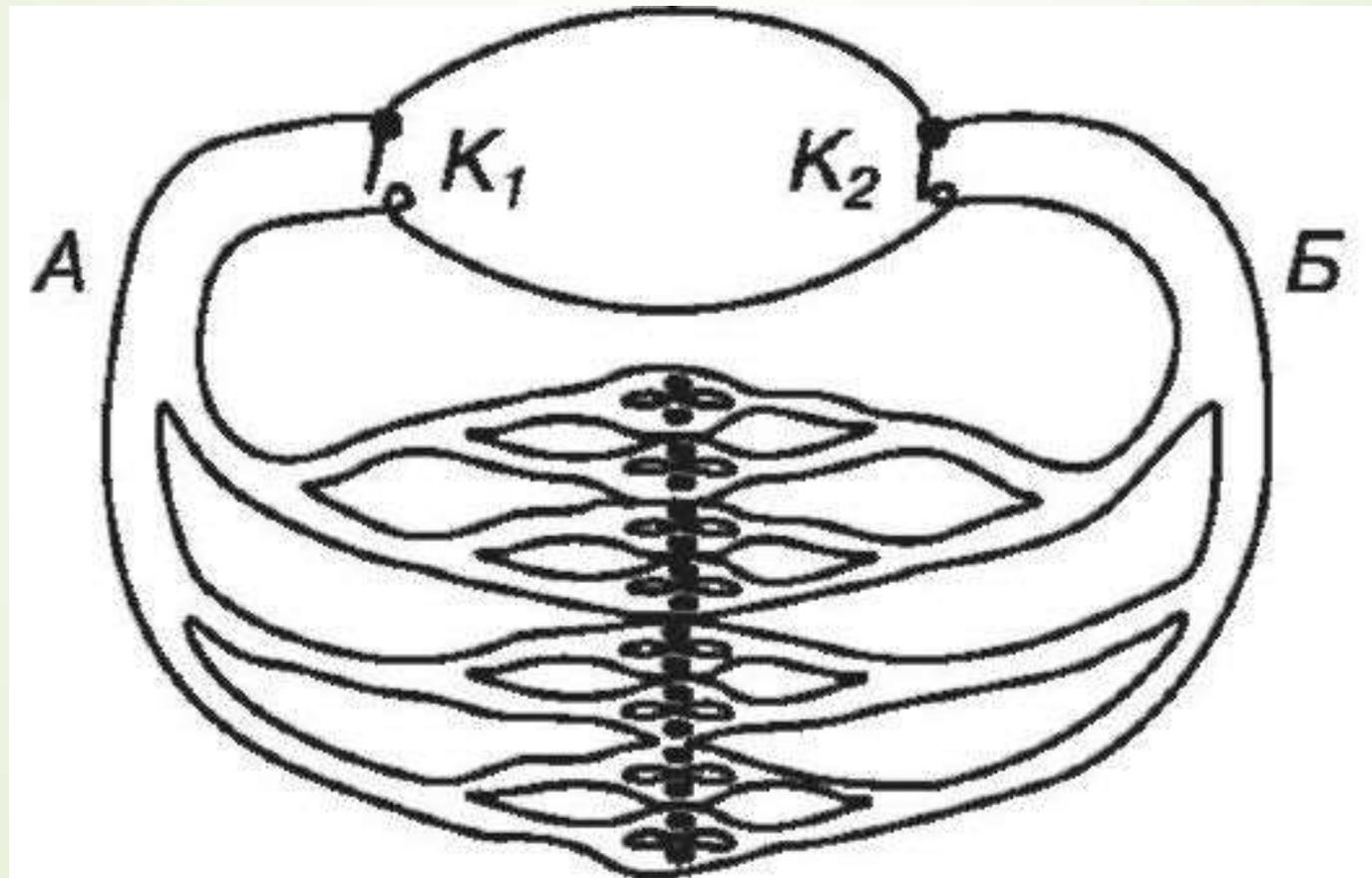
- Для поддержания движения жидкости в замкнутой гидродинамической системе требуется «насос», который создает разность давлений, необходимую для преодоления гидравлического сопротивления. Аналогично, как для поддержания электрического тока в замкнутой цепи требуется источник тока, который создает разность потенциалов, необходимую для преодоления сопротивления в цепи. В системе кровообращения роль такого насоса играет сердце.



Модель сердца

- В качестве наглядной модели сердечно-сосудистой системы рассматривают замкнутую, заполненную жидкостью систему из множества разветвленных трубок с эластичными стенками. Движение жидкости происходит под действием ритмично работающего насоса в виде груши с двумя клапанами

Модель сердца



Модель сердца

- При сжатии груши (сокращение левого желудочка) открывается выпускной клапан K_1 и содержащаяся в ней жидкость выталкивается в трубку А (аорта). Благодаря растяжению стенок объем трубки увеличивается, и она вмещает избыток жидкости. После этого клапан K_1 закрывается. Стенки аорты начинают постепенно сокращаться, прогоняя избыток жидкости в следующее звено системы (артерии). Их стенки сначала также растягиваются, принимая избыток жидкости, а затем сокращаются, проталкивая жидкость в последующие звенья системы. На завершающей стадии цикла кровообращения жидкость собирается в трубку Б (полая вена) и через впускной клапан K_2 возвращается в насос. Таким образом, данная модель качественно верно описывает схему кровообращения.

Пульсовая волна

- Сердце представляет собой ритмически работающий насос, у которого рабочие фазы - систолы (сокращение сердечной мышцы) - чередуются с холостыми фазами - диастолами (расслабление мышцы). В течение систолы кровь, содержащаяся в левом желудочке, выталкивается в аорту, после чего клапан аорты закрывается. Объем крови, который выталкивается в аорту при одном сокращении сердца, называется *ударным объемом* (60-70 мл). Поступившая в аорту кровь растягивает ее стенки, и давление в аорте повышается. Это давление называется *систолическим* (САД, P_s). Повышенное давление распространяется вдоль артериальной части сосудистой системы. Такое распространение обусловлено упругостью стенок артерий и называется **пульсовой волной**.



Пульсовая волна

- ▶ **Пульсовая волна** - распространяющаяся по аорте и артериям волна повышенного (над атмосферным) давления, вызванная выбросом крови из левого желудочка в период систолы.
- ▶ Пульсовая волна распространяется со скоростью $v_{\text{п}} = 5-10$ м/с. Величина скорости в крупных сосудах зависит от их размеров и механических свойств ткани стенок

Механические свойства стенок сосудов



Перед прохождением
пульсовой волны



Через артерию начинает
проходить пульсовая волна



В артерии пульсовая
волна



Спад пульсового давления,
кровь проталкивается
сокращением стенок

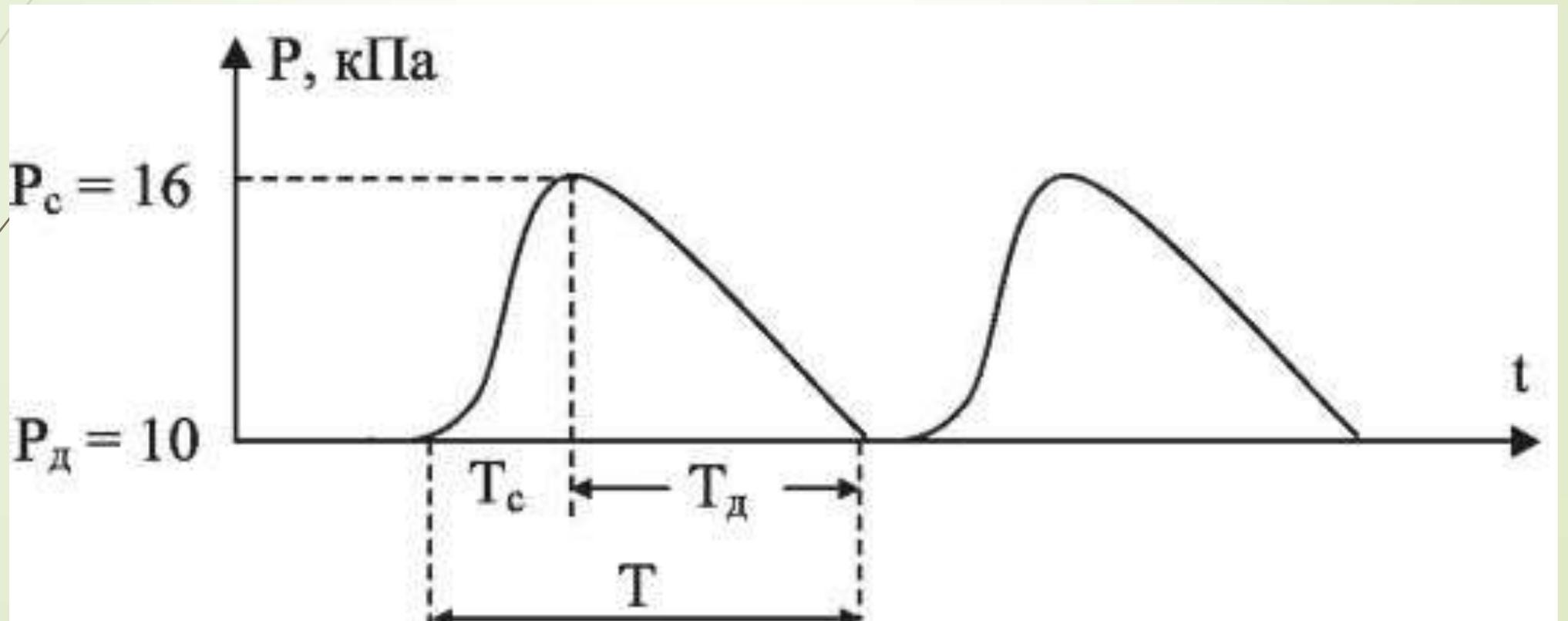


Прохождение пульсовой
волны закончено

Диастолическое давление

- ▶ После прохождения пульсовой волны давление в соответствующей артерии падает до величины, которую называют *диастолическим давлением* (ДАД или P_d). Изменение давления в крупных сосудах носит пульсирующий характер.

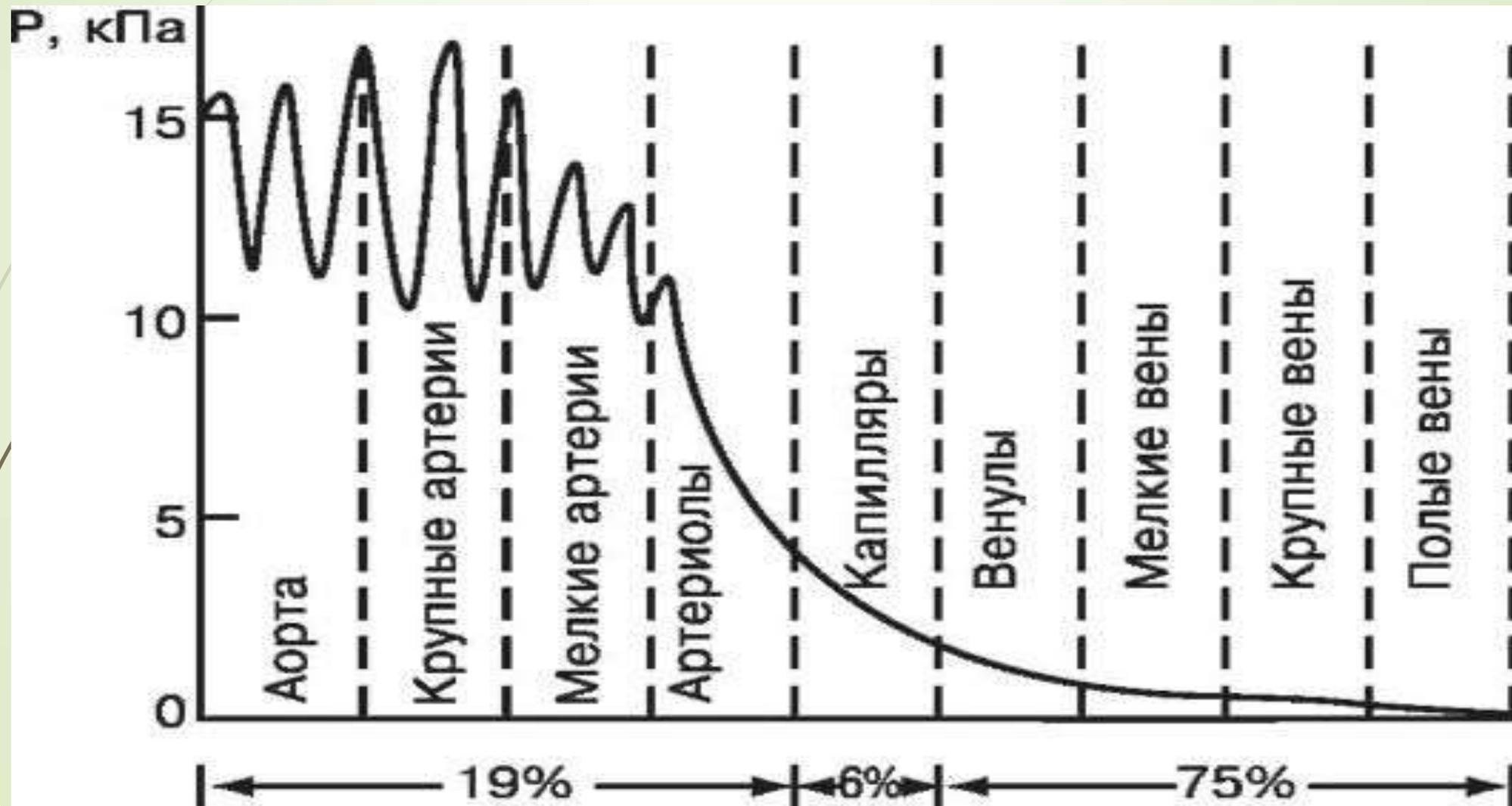
Два цикла изменения давления крови в плечевой артерии



Пульсирование скорости кровотока

- ▶ Пульсовой волне будет соответствовать пульсирование скорости кровотока. В крупных артериях она составляет 0,3-0,5 м/с. Однако по мере разветвления сосудистой системы сосуды становятся тоньше и их гидравлическое сопротивление быстро (пропорционально R^4) растет. Это приводит к уменьшению размаха колебаний давления. В артериолах и далее колебания давления практически отсутствуют. По мере разветвления падает не только размах колебаний давления, но и его среднее значение.

Характер распределения давления в различных участках сосудистой системы имеет вид



Сечения сосудов

- Длительность цикла кровообращения у человека составляет приблизительно 20 с, и в течение суток кровь совершает 4200 оборотов.
- Сечения сосудов кровеносной системы в течение суток испытывают периодические изменения. Это связано с тем, что протяженность сосудов очень велика (100 000 км) и 7-8 литров крови для их максимального заполнения явно недостаточно. Поэтому наиболее интенсивно снабжаются те органы, которые в данный момент работают с максимальной нагрузкой. Сечение остальных сосудов в этот момент уменьшается. Так, например, после приема пищи наиболее энергично функционируют органы пищеварения, к ним и направляется значительная часть крови; для нормальной работы головного мозга ее не хватает, и человек испытывает сонливость.

Работа и мощность сердца

- В течение одной систолы правый желудочек выбрасывает в аорту ударный объем крови (60-70 мл). На столько же уменьшается и объем желудочка: $\Delta V \approx 65 \times 10^{-6} \text{ м}^3$. Полезная работа, совершенная сердечной мышцей за одно сокращение, может быть оценена по формуле: $\Delta A = P_{\text{cp}} \Delta V_{\text{уд}}$, где $\Delta V_{\text{уд}}$ - среднее значение ударного объема крови, а P_{cp} - среднее давление, которое создается внутри желудочка. Оно немного выше систолического давления в артерии: $P_{\text{cp}} \approx 17 \text{ кПа}$. Отсюда получаем оценку для работы сердечной мышцы за одно сокращение: $\Delta A \approx 17 \times 10^3 \times 65 \times 10^{-6} = 1,1 \text{ Дж}$. Полезная мощность, развиваемая сердечной мышцей во время систолы, $N_c = \Delta A / T_c$, где $T_c \approx 0,3 \text{ с}$ - длительность систолы. Отсюда получаем: $N_c = 1,1 / 0,3 = 3,7 \text{ Вт}$. Время одного цикла сердечной деятельности $T \approx 0,85 \text{ с}$. Средняя мощность за весь цикл равна $N_{\text{cp}} = 1,1 / 0,85 = 1,3 \text{ Вт}$.

Измерение давления

- В медицине широко используется предложенный Н.С. Коротковым (1905) аускультативный метод измерения артериального давления (АД). Типичный прибор для определения давления по методу Короткова (сфигмоманометр или тонометр) состоит из окклюзионной пневмоманжеты, груши для нагнетания воздуха с регулируемым клапаном для стравливания воздуха и устройства, измеряющего давление в манжете. В качестве подобного устройства используются ртутные манометры, стрелочные манометры anerоидного типа или электронные манометры. Аускультация производится стетоскопом либо мембранным фонендоскопом с расположением чувствительной головки у нижнего края манжеты над проекцией плечевой артерии без значительного давления на кожу.



Принцип работы прибора состоит в следующем. Вокруг руки между плечом и локтем накладывают манжету, в которую накачивают воздух. Как только давление в манжете превысит давление крови в плечевой артерии, кровоток прекращается. При стравливании воздуха из манжеты кровоток возобновляется сначала частично, а потом полностью. По манометру фиксируют давления, при которых начинается и заканчивается восстановление кровотока. САД определяют при декомпрессии манжеты в момент появления первых тонов, а ДАД - по моменту их исчезновения. Аускультативная методика в настоящее время признана ВОЗ как эталон неинвазивного определения АД, несмотря на несколько заниженные значения для САД и завышенные - для ДАД по сравнению с цифрами, полученными при инвазивном измерении (введение в артерию пациента зонда с гидрофоном для контроля уровня давления). Манжету накладывают всегда в области плечевой артерии





■ Благодарю за внимание