

«Биофизика кровообращения»

Кафедра Физиология Человека

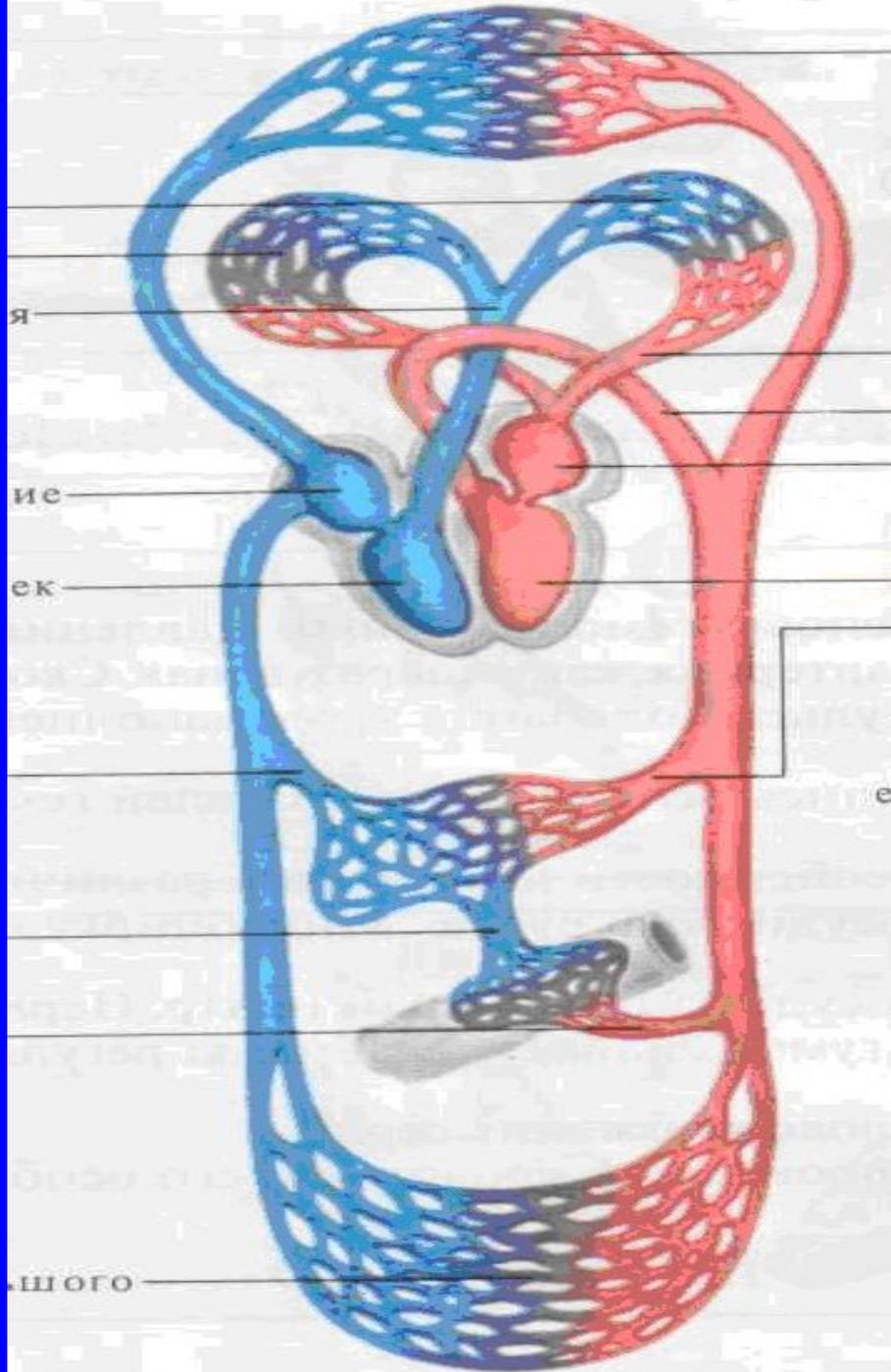
Учебная дисциплина

«Биофизика»

Классификация сосудистого русла

- ✓ *Морфологическая классификация предусматривает разделение сосудистого русла на артериальный и венозный отделы, выраженность гладкомышечного слоя (сосуды мышечного, эластичного и смешанного типов).*
- ✓ *Функционально подразделение сосудистого русла можно представить следующей последовательностью: сосуды котла (аорта), сосуды сопротивления (артерии, артериолы), сосуды капиллярного кровоснабжения, венулы и сосуды депо (крупные вены).*
- ✓ *Сосуды котла обеспечивают поступление из сердца потока крови с наименьшими потерями. По этой причине их стенки имеют преимущественно эластичные структуры и мало способны к регулируемому ФАВ изменению просвета.*

- ✓ *Сосуды сопротивления, к которым относятся артериолы или прекапиллярные сосуды сопротивления, играют значительную роль в поддержании гидростатического давления крови любого участка сосудистого русла. Это происходит за счет высокой способности к смене напряжения гладкомышечного слоя стенки сосудов. Смена напряжения происходит в результате воздействия гормонов или других биологически активных веществ на тонус кровеносных сосудов с последующими изменениями их просвета и скорости кровотока.*
- ✓ *Сосуды капиллярного кровоснабжения микроциркуляторного русла - непосредственные участники функции доставки питательных веществ и кислорода к тканям и выведения углекислого газа и продуктов метаболизма из организма. Особенности их организации и регуляции позволяют артериальной крови постоянно осуществлять этот необходимый обмен с тканевой жидкостью.*
- ✓ *Венулы и сосуды депо (крупные вены) обеспечивают возврат крови к сердцу. Более медленное течение в этот отделе кровеносного русла также обеспечивается морфологическими и функциональными особенностями. Например, наличие клапанного аппарата и спонтанной периодической активности мышечного слоя венозного отдела способствует возврату крови в предсердие правого отдела миокарда, прохождению через малый круг кровообращения и поступлению артериальной крови в аорту большого круга.*



Сосудистая система

Система кровообращения

В большинстве сосудов крови находится больше, чем их емкость, что создает давление крови на стенку сосуда - *кровенное давление (P)*. Его измеряют в мм рт. ст. по отношению к атмосферному: «+» - означает выше атм.

По сосудам кровь движется благодаря *градиенту давления* - из большего в меньшее ($\Delta P = P_1 - P_2$).

Начальное давление создается работой сердца. Поэтому самое высокое давление в отходящих от сердца артериях, а самое низкое - в приходящих венах.

Показатели гидродинамики

$$Q = (P_1 - P_2) / R \quad 2$$

$$P = F / S \quad 1$$

- Давление крови (гидродинамическое) зависит от соотношения емкости сосуда и объема крови, находящегося в нем (1), где:

F – сила, действующая на стенку,

S – площадь стенки.

- Объем крови, протекающий через сосуд можно вычислить по следующей формуле (2) где:

Q - объемный кровоток,

P₁ - давление в начальном отделе сосуда,

P₂ - давление на выходе из сосуда,

R - сопротивление кровотоку.

Основной двигатель переноса крови по сосудам – сердце.

Желудочки в момент систолы создают градиенты давления в малом и большом кругах кровообращения, причем левый желудочек выполняет работу в 6 раз больше, чем правый. Работа (A) по выбросу крови в аорту при выборе сердца аналогом насоса равна:

$$A = \int P dV,$$

P – давление в аорте, dV – ударный (систолический) объем крови – количество крови, выброшенное в аорту за одно сокращение (систола) желудочка

Влияние систолы желудочка на поступление крови в предсердие



- Присасывающее действие сокращающегося желудочка

Энергетика кровообращения

Согласно закону Бернулли, на движущуюся по сосудам кровь может оказывать свое влияние ряд факторов:

1. Гидростатическая составляющая (pV).
2. Гидродинамическая составляющая ($mv^2/2$) (m – масса и v – скорость движения крови).
3. Потенциальная составляющая (mgh) (h – высота, g – ускорение сводного падения).

Тогда общая энергия будет равна (с учетом $m = \rho V$):

$$E = PV + \frac{mv^2}{2} + mgh = PV + \rho V \frac{v^2}{2} + \rho Vgh$$

В любой точке кровеносного русла удельная энергия (E^1) имеет размерность давления и, разделив E на V , получим:

$$E^1 = P + \rho \frac{v^2}{2} + \rho gh$$

и, дополнительно разделив на ρg , получим:

$$E^1 = \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h$$

По закону непрерывности струи *Бернулли*: $E^1 = E^2$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

Лишь при переходе через сердце кровь получает дополнительную энергию:

$$H = E_1 - E_2 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_2 - h_1$$

Анализируя круги кровообращения на уровне входа и выхода из сердца, получим: $h_1 = h_2$, P_1 и $v_1 = 0$, в

$$H = \frac{P_{21}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$E = PV + \frac{1}{2} \rho v^2 V$$

Возвращая в уравнение $V\rho g$, получим, что гидростатическая энергия (E) равна

То есть гидростатическая компонента движения крови действительно

Основные положения гемодинамики. Закон Гагена–Пуазейля

На движущийся в сосуде удельный цилиндр крови по закону Ньютона влияет несколько сил:

1. Движущая – гидростатическая: $F_p = \pi r^2 \Delta P V$

$\pi r^2 = S$ - площадь цилиндра,

2. Препятствующая – вязкости: $F_v = 2\pi r l \eta \frac{dv}{dr}$

S - площадь соприкосновения цилиндра с окружающей жидкостью $S = 2\pi r l$, dv/dr - скорость движения жидкости.

после алгебраических преобразований и интегрирования

после алгебраических преобразований и интегрирования

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

закон Гагена-Пуазейля: расход крови в сосудах пропорционален градиенту давления и радиусу сосуда в четвертой степени и обратно пропорционален вязкости и длине сосуда.

-Периферическим сопротивлением является выражение:

$$- \quad w = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$$

Оно согласуется с уравнением Гагена-Пуазейля следующим образом:

$$- \quad Q = \frac{1}{w} \Delta P$$

Применимость закона Гагена–Пуазейля

1. Выведен для гомогенной жидкости, тогда как кровь суспензия и состоит из плазмы и форменных элементов и их соотношение определяет гематокрит – Φ . Вязкость суспензии (η_s) в этом случае рассчитывается с учетом K :

$$\eta = \eta_s (1 + K\Phi)$$

где: η – вязкость плазмы, K – коэффициент, который меняется в зависимости от формы, содержащейся в плазме структур: для сферы – 0,25; для дисков – 0,206.

2. Верен только для ламинарного течения жидкости, где $dv/dr = \text{const}$. При повышении скорости движения жидкости до критической величины ($v_{кр}$) вероятность перехода ламинарного движения в турбулентное возрастает и определяется безразмерным числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{2R\rho v_{кр}}{\eta}$$

r – радиус сосуда, ρ – плотность жидкости .

3. Периодичность деятельности сердца не может не влиять на градиент давления, хотя он и поддерживается клапанным аппаратом.

4. Изменение геометрии сосудистого русла (r и l), обусловленное упруго-вязкими свойствами стенок сосудов. Модуль упругости стенок сосудов – интегральный показатель жесткости стенок сосудов, имеет диагностическое значение, так как изменяется при атеросклерозе, увеличивая скорость распространения пульсовой волны.

Объем крови и диаметр сосуда



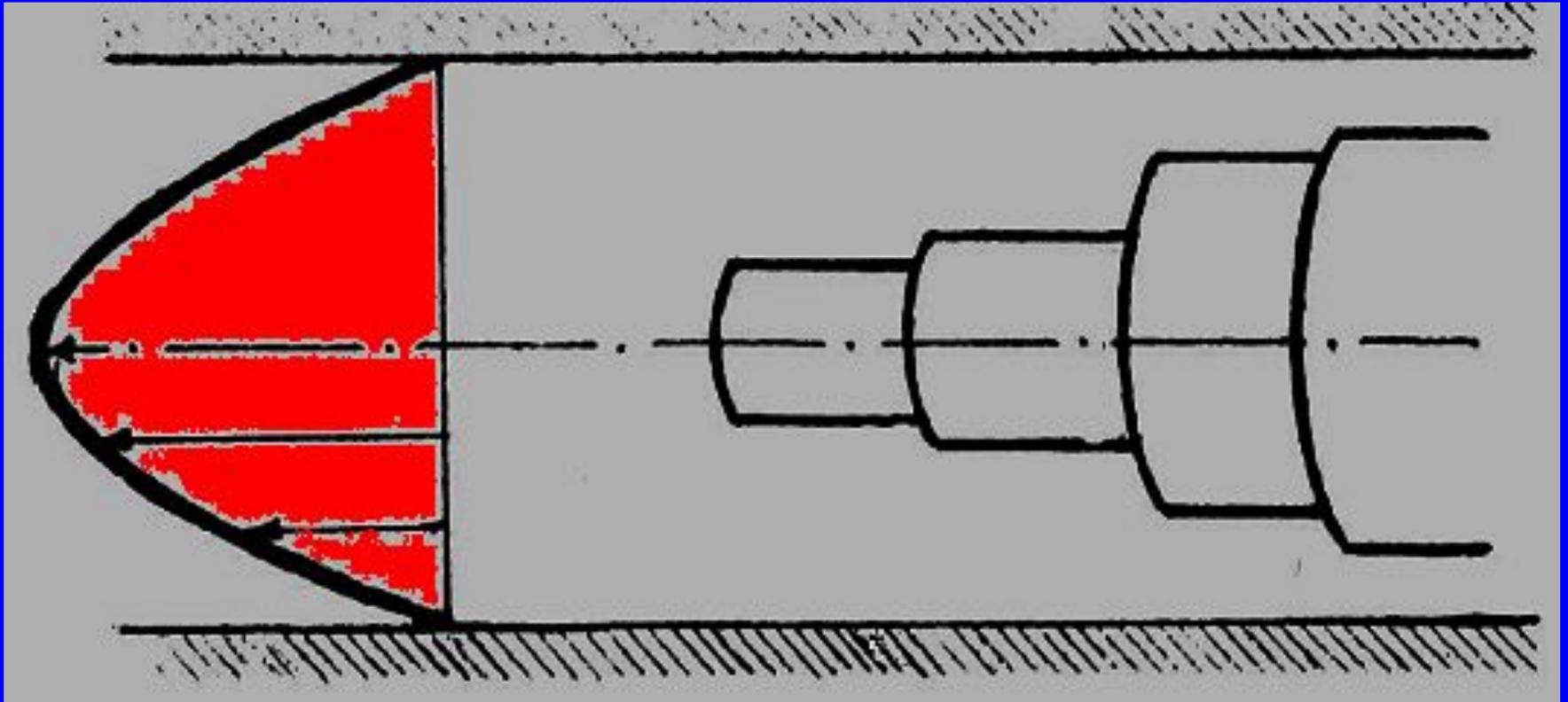
- Соотношение объема крови, поступающего в сосуд при его разветвлении, в зависимости от диаметра сосуда.

Законы гидродинамики и реальная стенка сосуда

- Кровоток в конкретных сосудах во многом определяется свойствами их: *эластичностью, растяжимостью и сократимостью.*
- Так, зависимость объемной скорости от давления больше проявляется в сосудах с эластичной стенкой, чем в жестких трубках. Под влиянием давления крови сосуд растягивается, что с одной стороны уменьшает давление, а с другой - увеличивает объемный кровоток.
- В отличие от этого сосуды мышечного типа при возрастании давления могут активно препятствовать изменению кровотока. Так, например, за счет одной лишь реакции гладкомышечных волокон стенки может измениться объем протекающей по сосуду крови: при быстром нарастании давления и быстром растяжении гладких мышц они сокращаются, что уменьшает просвет, а значит - снижается и кровоток.

Параболический ток крови в артериальном кровеносном сосуде

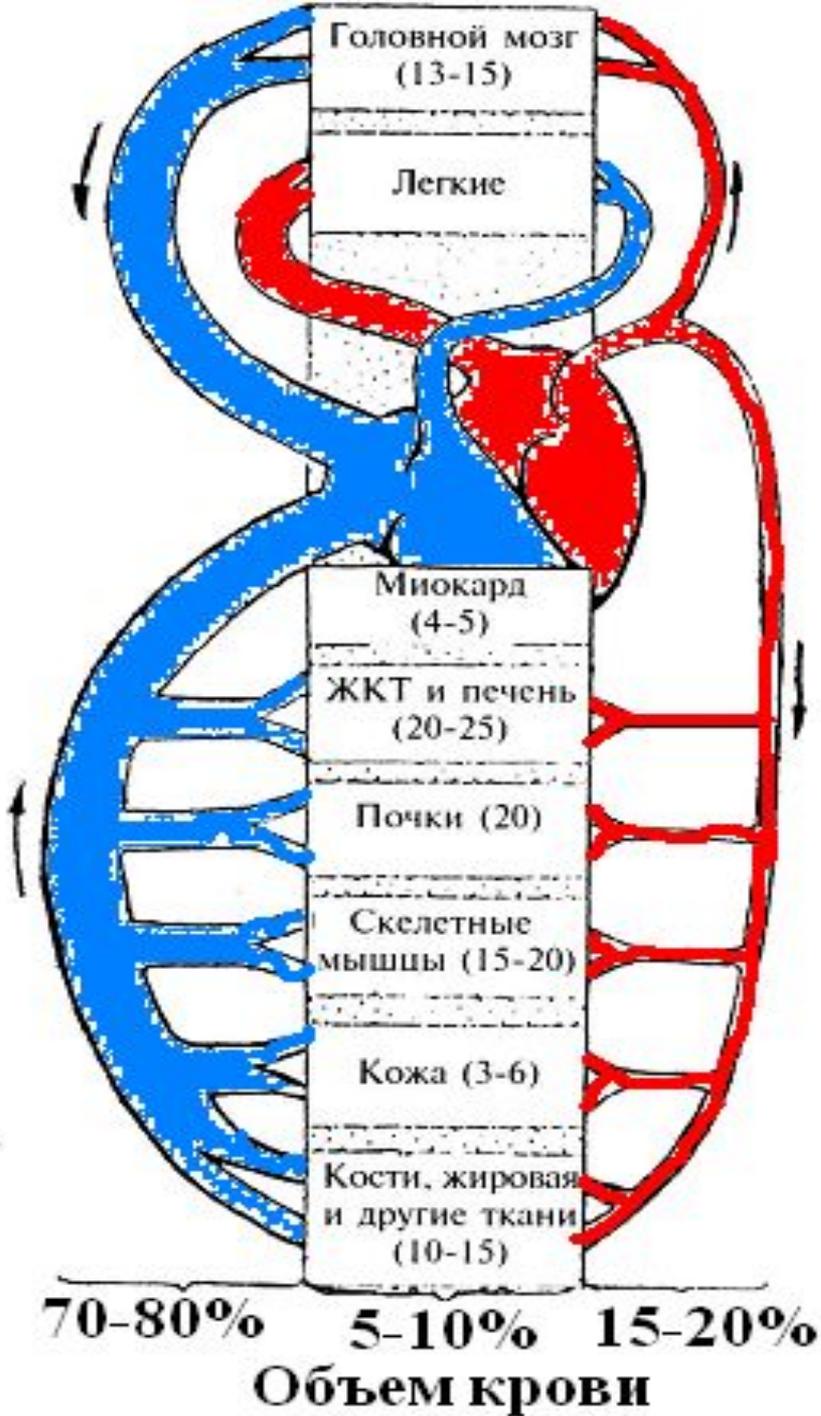
- Кровь течет слоями: у стенки сосуда скорость тока наименьшая (трение о стенку).
- В центре потока кровь течет быстрее всего.



Изменение потока крови при появлении препятствия



Появление турбуленций приводит к росту сопротивления кровотоку и замедлению линейной и объемной скорости.



• Функциональная схема сердечно-сосудистой системы

(цифры - % крови от МОК)

Сосудистое русло (функционально) подразделяется на:

- А – амортизирующие,
- Б – обменные,
- В – емкостные.

Гидродинамическое давление крови – создается сердцем

$$P = F/S$$

- 1 – Артериальное:
систолическое - P_c , (120 мм рт.ст)
диастолическое - P_d , (70 мм рт.ст)
пульсовое – $P_p = P_c - P_d$, (50 мм рт.ст)

-

Сфигмография – запись изменения артериального давления в динамике сердечного цикла



- Среднее давление - $P_{ср}$.
- Расчет среднего давления:

Для аорты

$$P_{ср} = P_{д} + (P_{с} - P_{д}) / 2$$

[100 мм рт.ст.]

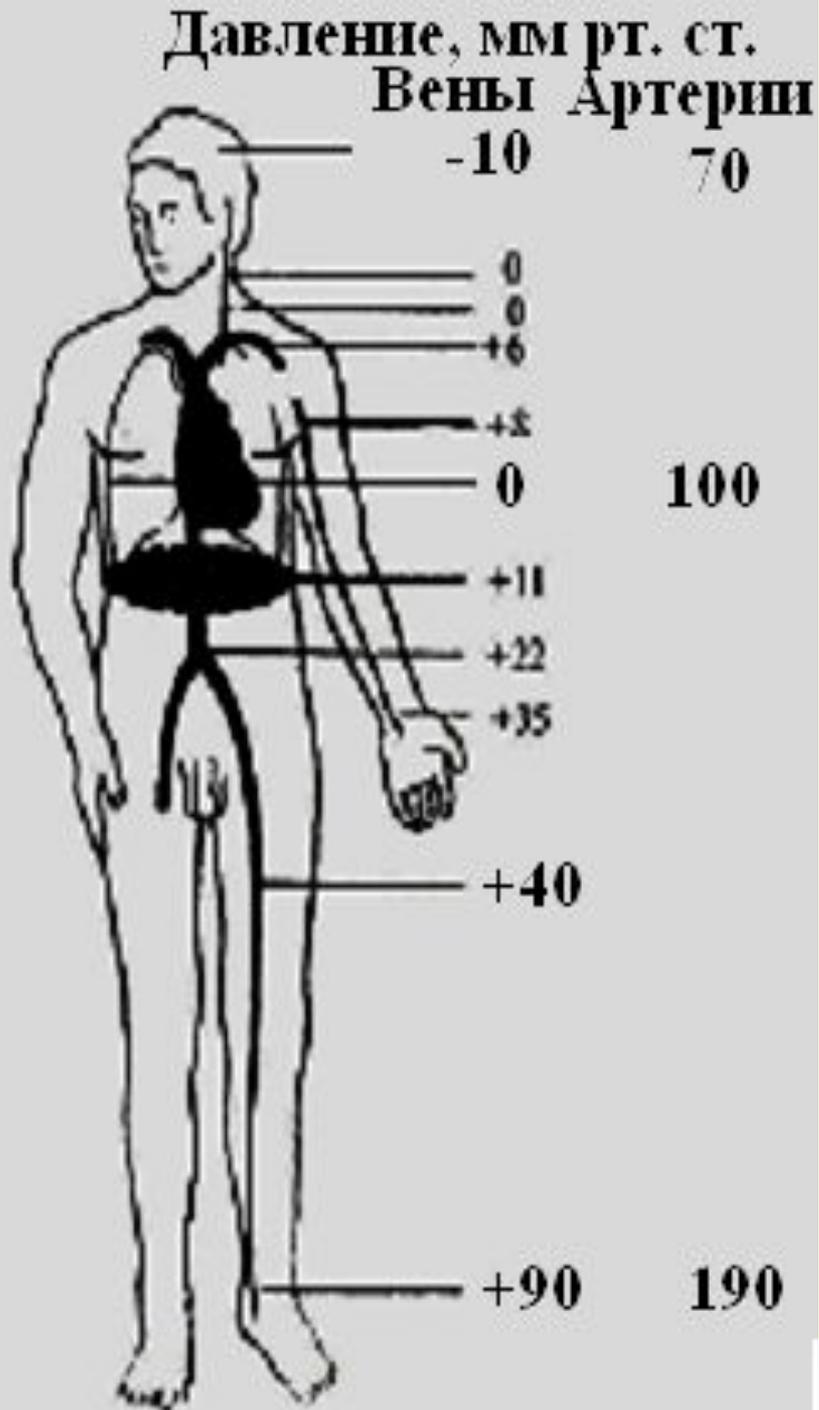
Для перифер. артерий

$$P_{ср} = P_{д} + (P_{с} - P_{д}) / 3$$

[86 мм рт.ст.]

Динамика давления и объемного кровотока

- Градиент уровней *среднего давления* по ходу сосудистого русла определяет направленность тока крови из аорты в артерии и далее до предсердий: в каждом последующем отделе среднее давление меньше предыдущего.
- При переходе артерий в артериолы в связи с резким увеличением сопротивления в них (артериолы называют *прекапиллярными сосудами сопротивления – 50% ОПС*) объемный кровоток снижается. В результате давление, особенно систолическое, резко падает и приближается к диастолическому, что приводит к уменьшению пульсового давления.
- В капилляры большинства органов кровь поступает почти под постоянным давлением.



Трансмуральное давление ($P_{тр}$): разность давления крови на стенку сосуда изнутри и снаружи

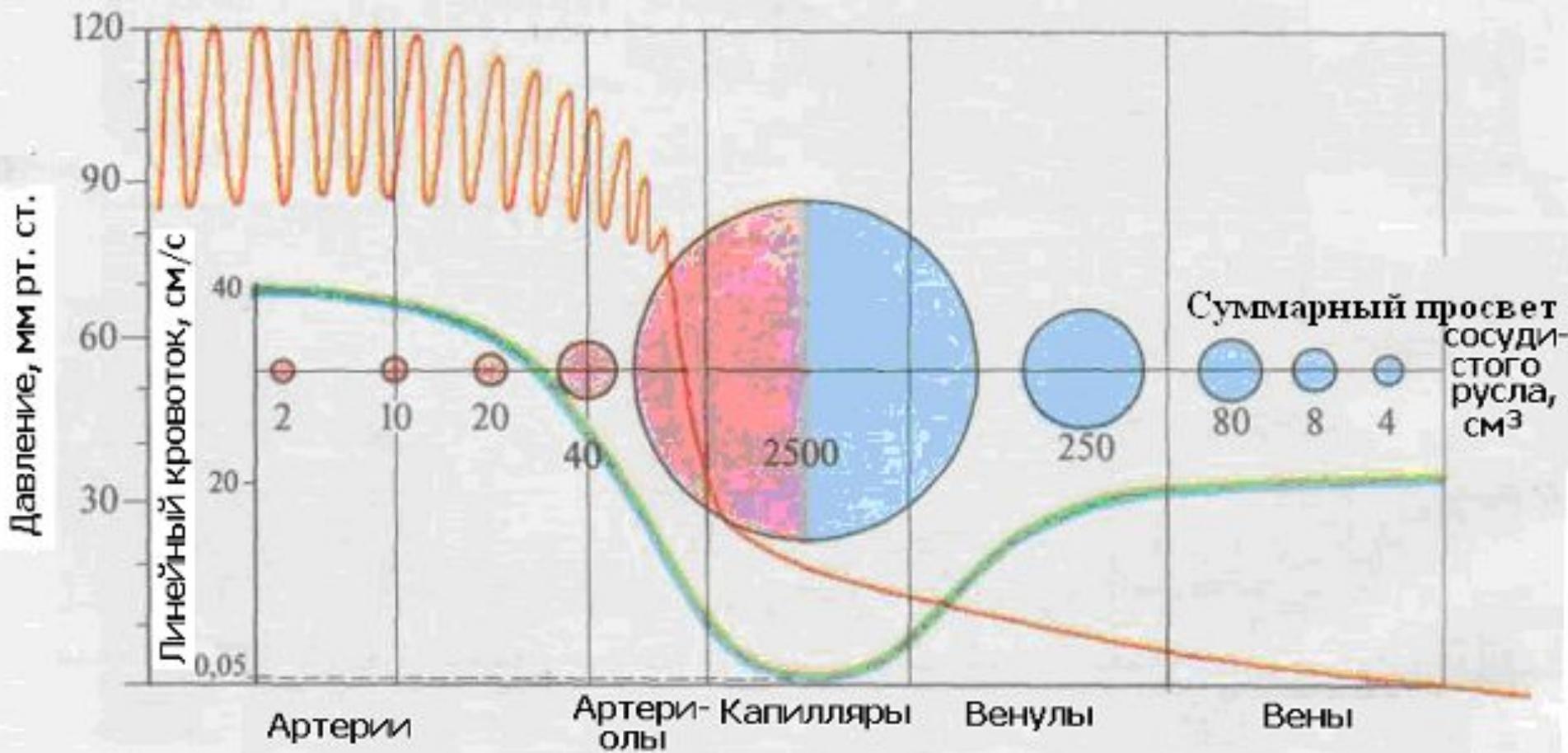
Необходимо учитывать действие сил гравитации на столб жидкости (крови) у вертикально стоящего человека.

Выше сердца давление на стенку сосуда уменьшается, а ниже – возрастает.

Функции амортизирующих сосудов:

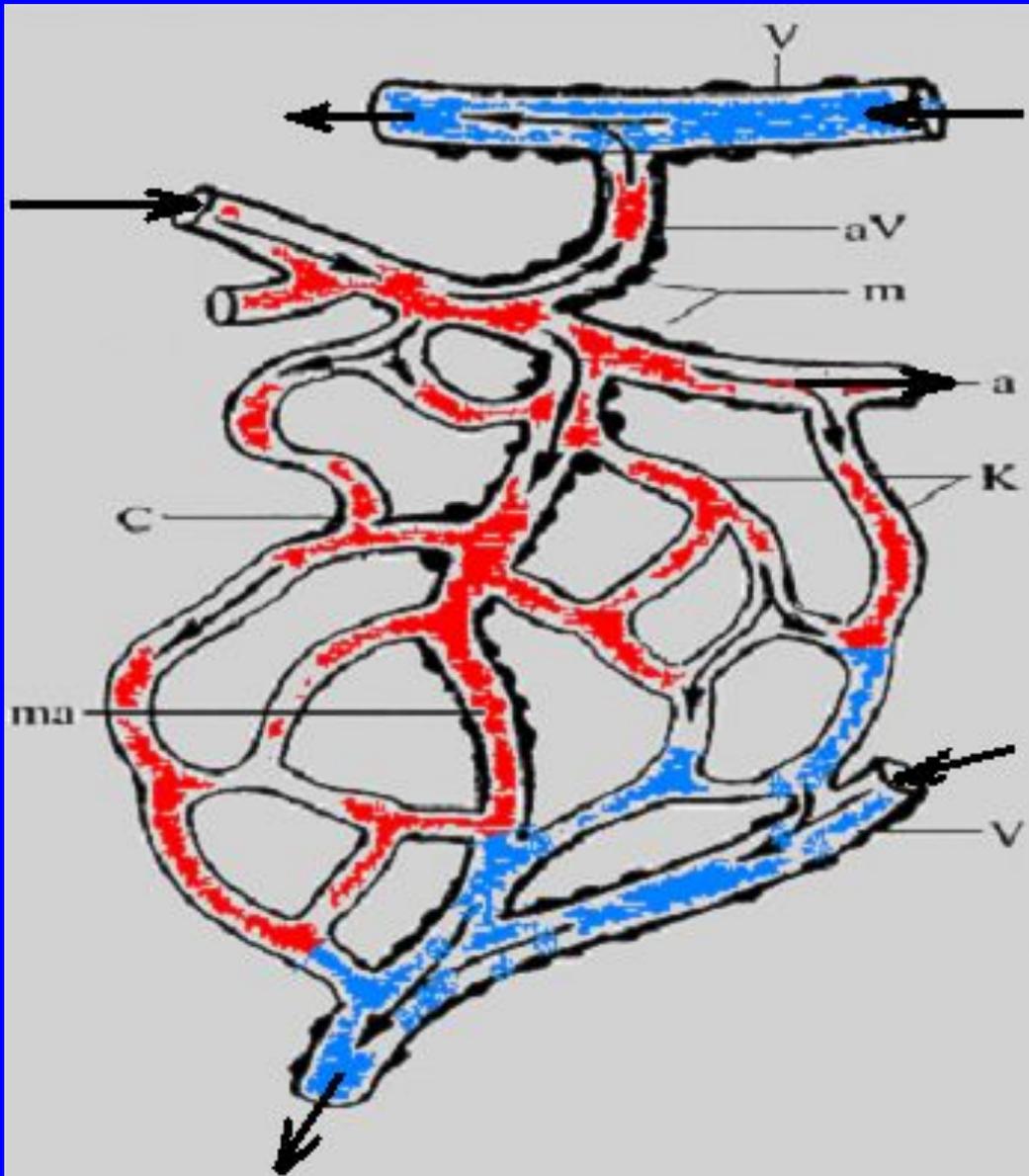
- Амортизация (сглаживание) ударного объема крови (в период систолы желудочков он весь поступить в следующие сосуды не может), часть его (25-35 мл) растягивает эластические сосуды, которые затем проталкивают кровь дальше (выполняют роль сердца при его диастоле).
- Амортизация давления крови (в обменные сосуды кровь должна поступать под постоянным давлением).
- Амортизация неравномерной линейной скорости кровотока.

Суммарная емкость участков сосудистого русла



ОБМЕННЫЕ СОСУДЫ

Микроциркуляторное русло

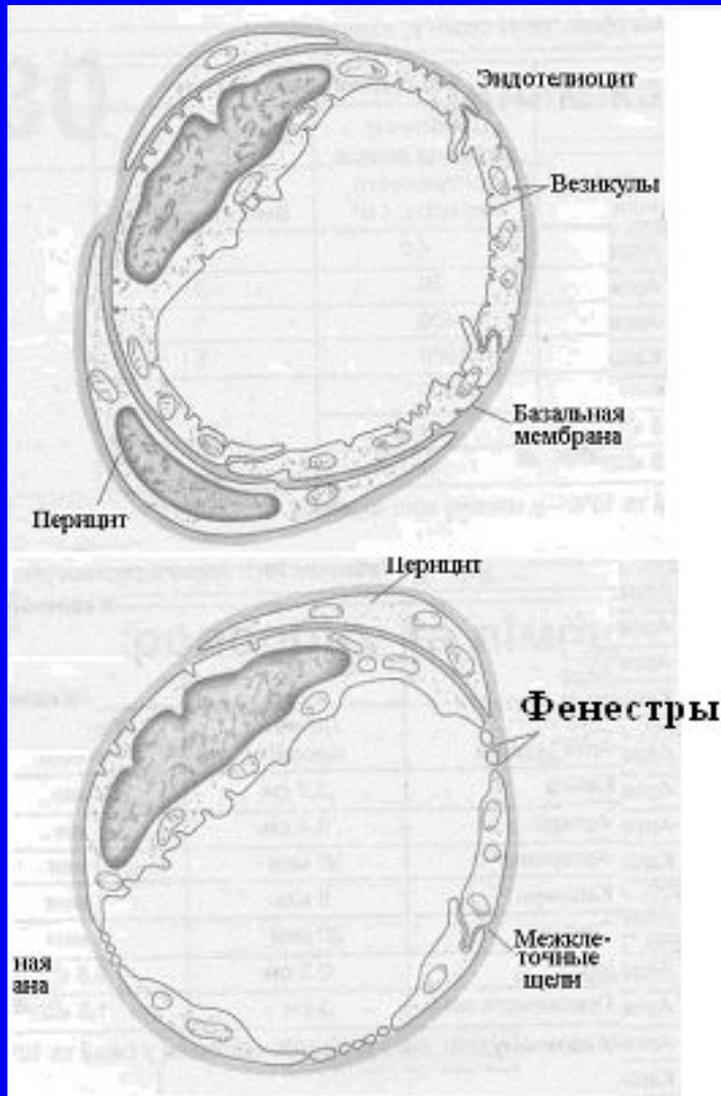


- v - венула
- av – артериоло-венозный шунт
- к - капилляр
- а – артериола
- m - гл. мышцы
- С - сфинктер

Функциональные группы обменных сосудов

- *резистивные (сопротивление) прекапилляры,*
- *сфинктеры,*
- *капилляры,*
- *резистивные посткапилляры,*
- *а в некоторых органах и тканях есть еще и сосуды-шунты.*

Стенка капилляра – идеально приспособлена для обеспечения обмена



- Стенка капилляра состоит из одного слоя эндотелиоцитов.
- Средний капилляр имеет радиус от 6 до 2-3 мкм, длину - 750 мкм.

При площади поперечного сечения капилляра 30 мкм^2 , обменная площадь составляет около 14000 мкм^2 .

- Скорость кровотока в капилляре самая малая - $0,3 \text{ мм/с}$, что позволяет каждой частице крови (например, эритроциту) находиться в капилляре 2-3 с.

Регуляция состояния капиллярного кровотока

- Объем крови, поступающей к капиллярам, зависит от просвета предшествующих и последующих сосудов.
- Расширение предшествующих артериол, интенсифицирует кровоток, повышает давление у устья капилляров. В результате капилляры пассивно открываются. Напротив, сужение указанных образований, уменьшая кровоток, обеспечивает закрытие капилляров.

Регуляция состояния капилляров



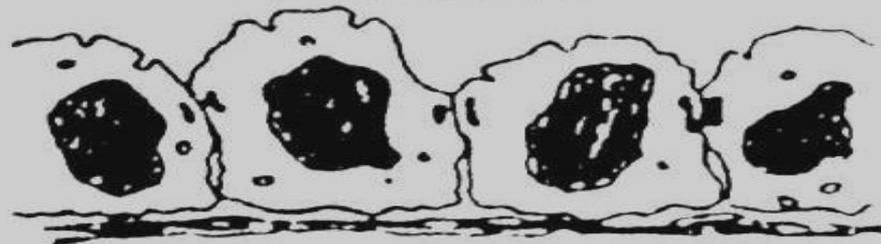
- В большом круге кровообращения закрытие капилляра происходит при давлении крови у устья капилляра около 5-10 мм рт.ст. В этом участвуют актомиозиновые структуры, имеющиеся в основании эндотелиоцитов. Активно сокращаясь, они перекрывают сосуд.

Особенности строения стенки капилляров в различных органах

Низкий



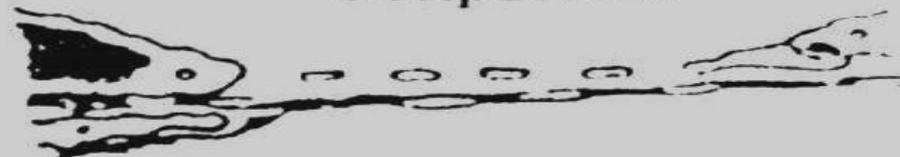
Высокий



Закрытый



Открытый



Печень, костный мозг



Селезенка



Условия обмена воды в капилляре

- Фильтрация: разность сил выталкивающих воду (давления – изнутри и снаружи) и удерживающих (онкотическое давление – изнутри и снаружи). Фильтрация происходит при «+» этой разности.
- Реабсорбция (возврат) – взаимодействие тех же сил. Реабсорбция происходит при «-» этой разности.

Схема обмена воды между кровью и тканями в капилляре



$P_{ОН}$ - онкотическое давление
 $P_{ГТ}$ - гидростатическое д. в тканях
 $P_{ГК}$ - гидростатическое д. крови

В артериальном конце капилляра:

$$(32,5 + 4,5) - (25 + 3) = \underline{+9 \text{ мм рт.ст.}}$$

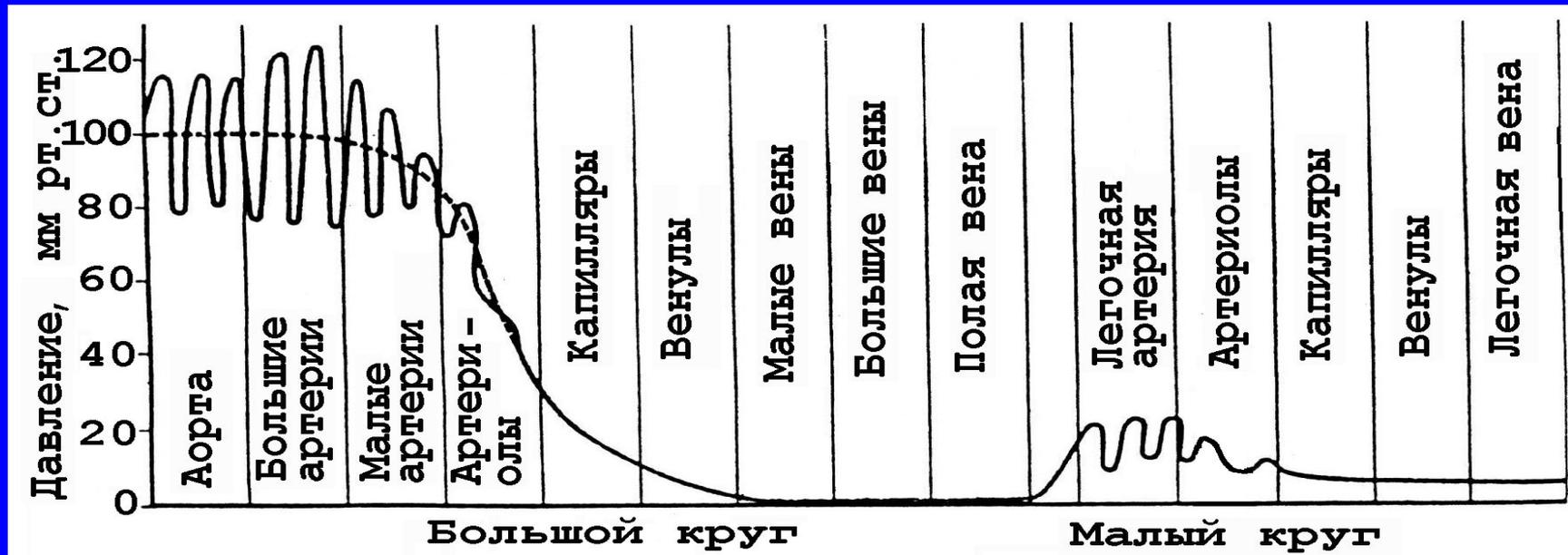
В венозном конце капилляра:

$$(17,5 + 4,5) - (25 + 3) = \underline{-6 \text{ мм рт.ст.}}$$

- В сутки фильтруется
- 20 л воды,
- а реабсорбируется 18 л.
- 2 л –возвращается лимфой.

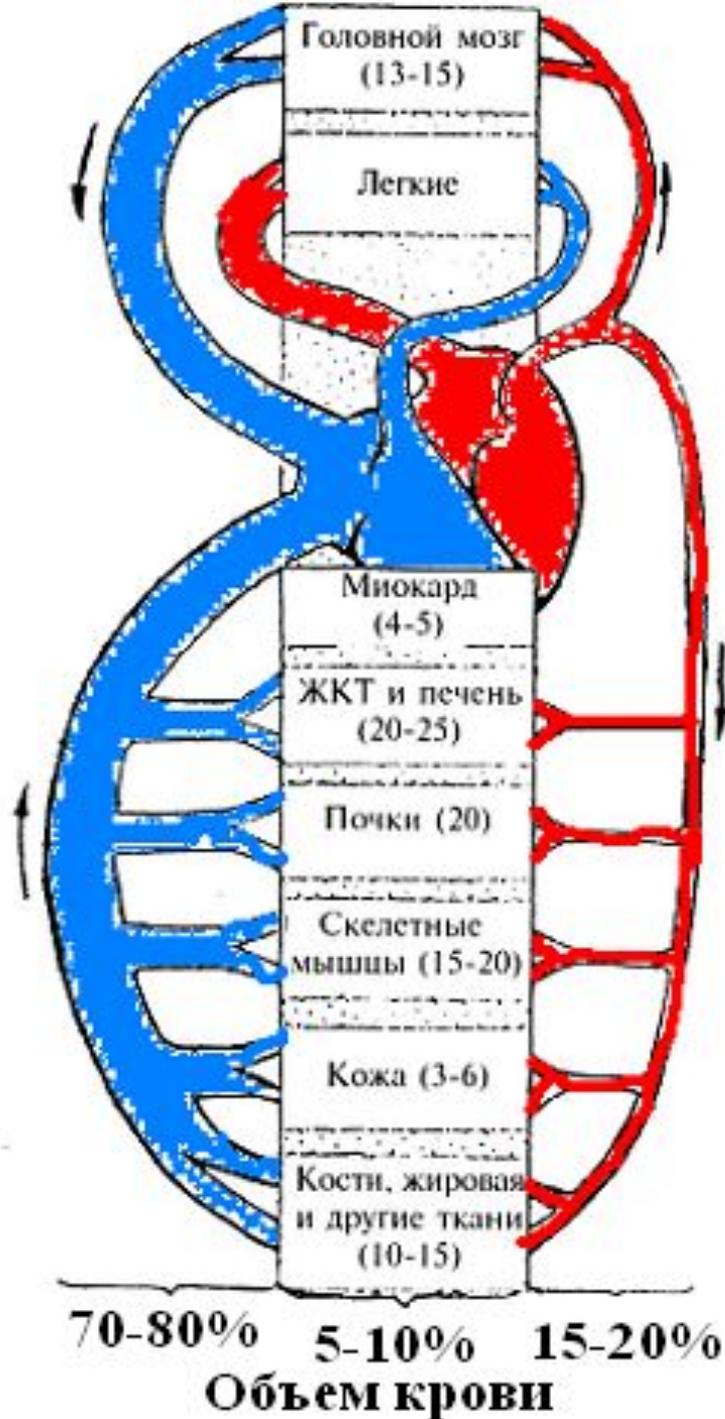
Распределение давления в сосудах

- Давление в крупных и средних артериях падает всего на 10%, а в артериолах и капиллярах на 85%, т.к. именно эти сосуды обладают наибольшим сосудистым сопротивлением, на преодоление которого и тратится основная часть энергии сокращающегося сердца.
- После капилляров давление продолжает снижаться, но уже не так резко.

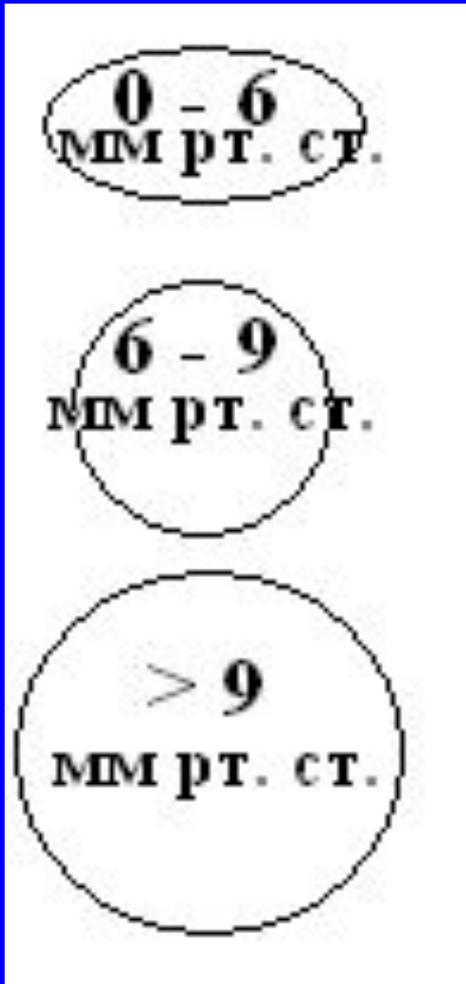


Емкостные сосуды

- В крупных венах, расположенных вне грудной клетки, давление составляет 5-6 мм рт.ст.
- в венах грудной полости давление колеблется в достаточно широких пределах в ритме дыхательных движений: *при вдохе давление уменьшается, а при выдохе увеличивается.*

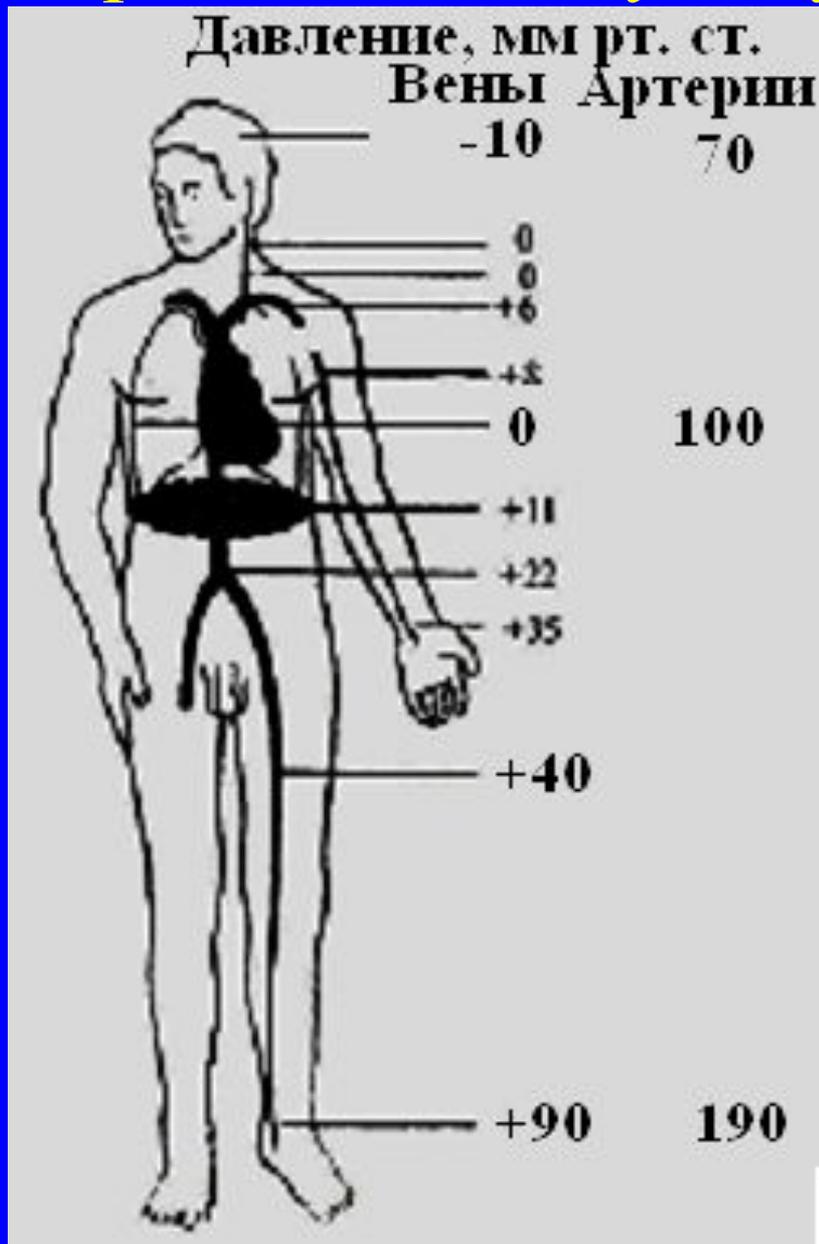


Состояние просвета вен в зависимости от уровня трансмурального давления



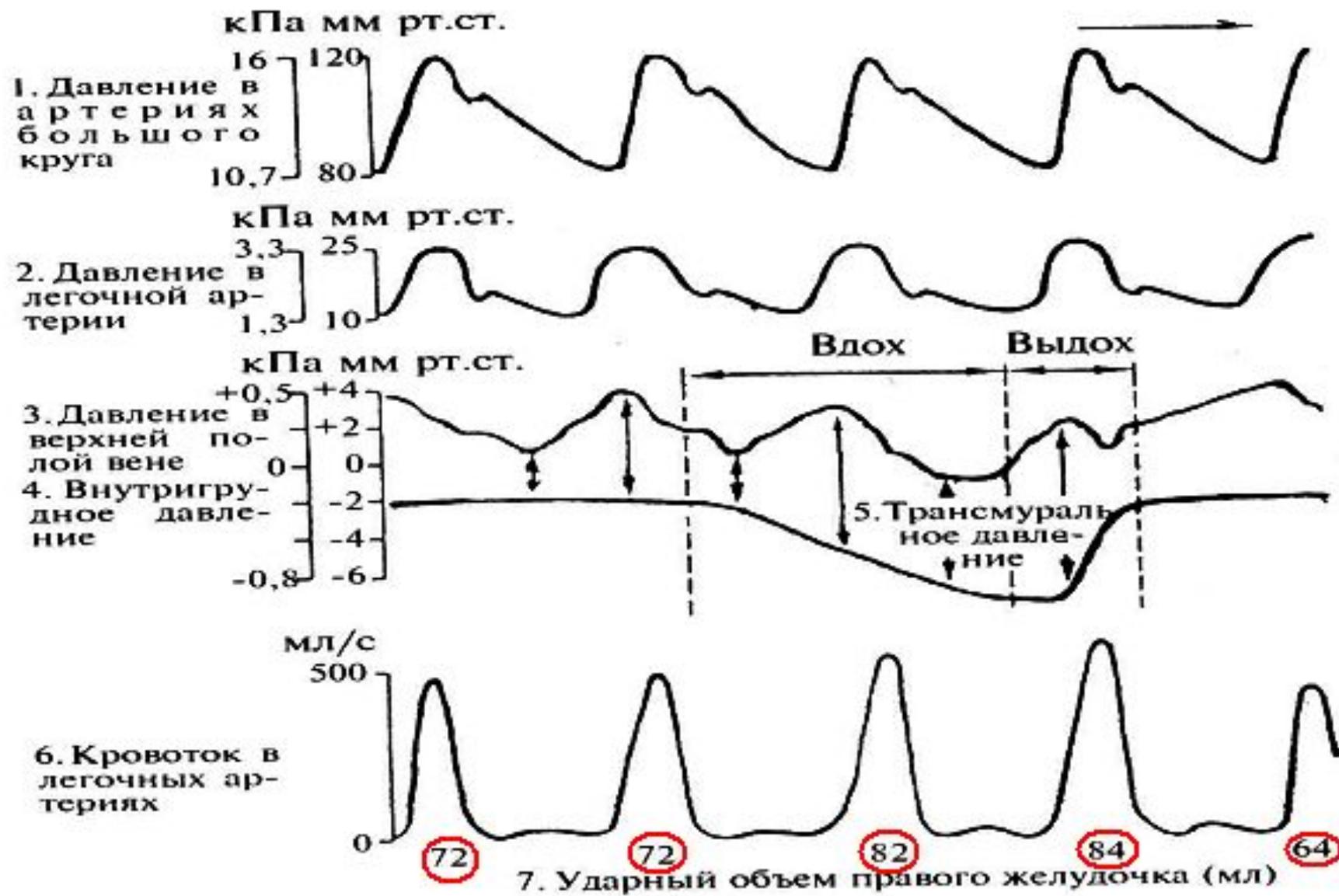
- При нулевом трансмуральном давлении вены спадаются.
- Изменение давления в пределах от 0 до 6-9 мм рт.ст. происходит при эллипсоидном просвете вен.
- Вены, начиная с давления 6-9 мм рт.ст., приобретают округлое поперечное сечение, то есть полностью расправляются.
- Более высокое давление растягивает вены.

Трансмуральное давление (P_{tr}): разность давления крови на стенку сосуда изнутри и снаружи



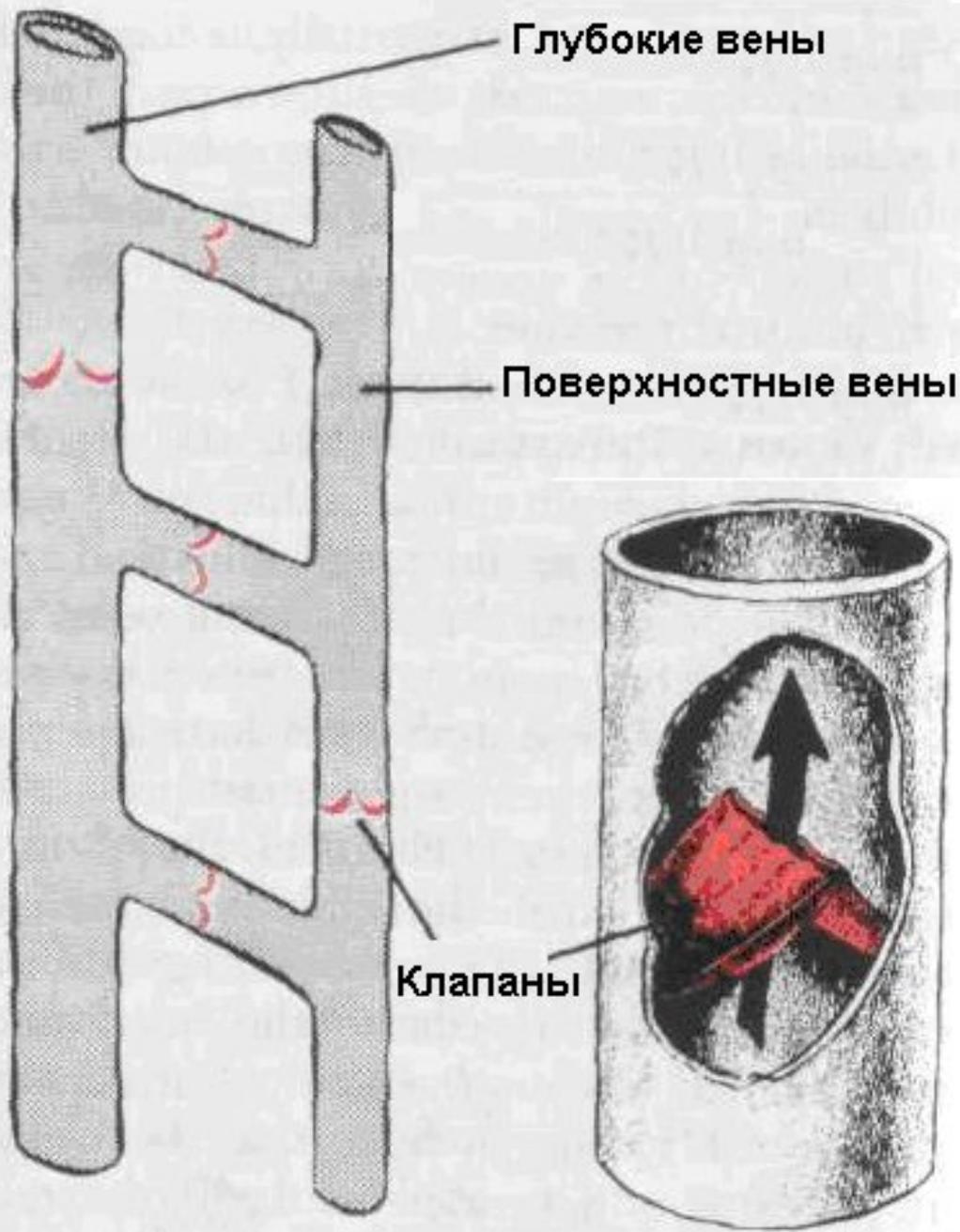
Изменение уровня трансмурального давления в сосудах в зависимости от гидростатического давления, которое создается в положении стоя под влиянием гравитационных сил.

Влияние дыхательных движений на кровоток



Клапаны и венозный кровоток

- При затруднении оттока крови из вен нижней конечности у клапанов возможно развитие варикозных расширений.



Вены и депо крови

- **Емкостная функция вен обусловлена суммарно большим просветом данного отдела сосудистого русла, их высокой растяжимостью. В то же время наличие в стенках вен гладкомышечных клеток при низком уровне гидродинамического давления создает благоприятные условия для уменьшения их просвета при сокращении. Это дает возможность *перераспределять объем крови между венами и другими отделами сосудистого русла.***
- **В замкнутой сосудистой системе изменение емкости какого-либо одного отдела обязательно должно сопровождаться перераспределением объема крови в другой. Сокращение гладких мышц венозной стенки легко изменяет ее просвет, так как противодействующая сила давления крови невелика. Если, к примеру, емкость вен уменьшится лишь на 2-3 %, то венозный возврат к сердцу возрастет практически вдвое.**