

Система кровообращения. Л № 2

Физиология кровеносных сосудов

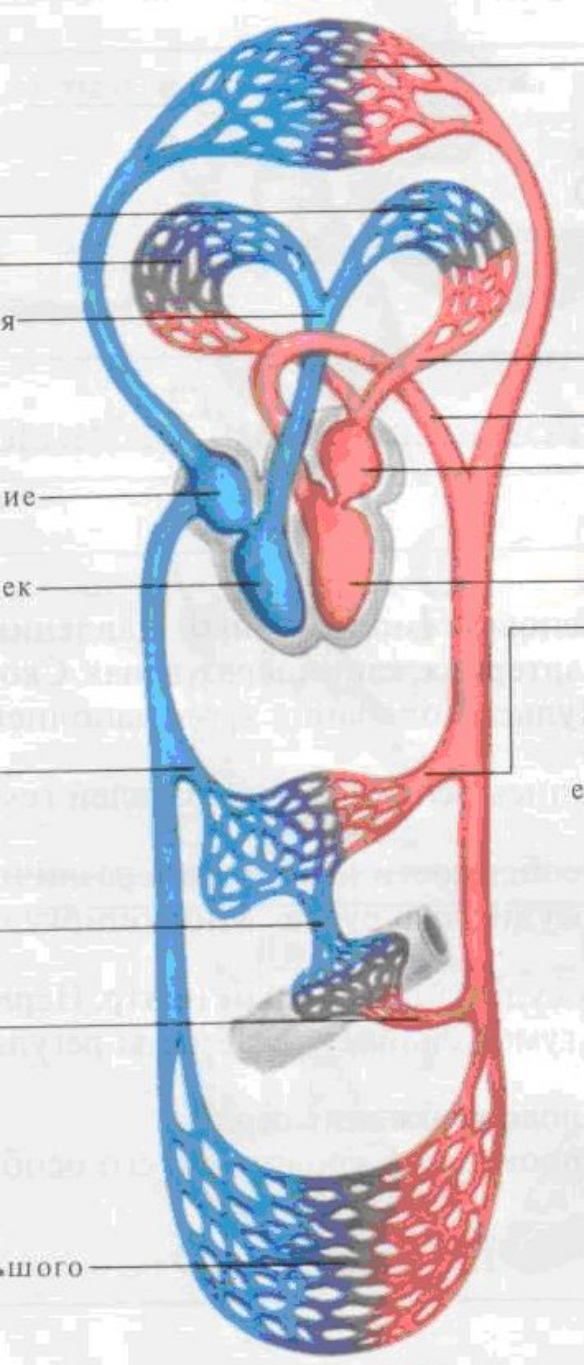
1. Основы гемодинамики (законы гидродинамики)
2. Физиологическая классификация сосудистого русла
3. Особенности кровотока в сосудах различного типа

Сосудистая система

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

- Давление крови (гидродинамическое) зависит от соотношения емкости сосуда и протекающего по нему объема крови (1), где:

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

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

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.

- Гидродинамическое сопротивление, которое каждый сосуд оказывает движущейся крови, вычисляется по формуле Пуазейля (3) где:

l - длина сосуда,

η - вязкость крови,

r - радиус сосуда.

- Среднюю линейную скорость кровотока можно определить по формуле (4).
- Общее периферическое сопротивление - (5).

(продолжение)

$$R = 8 \cdot l \cdot \eta / \pi \cdot r^4 \quad 3$$

$$V = Q / \pi \cdot r^2 \quad 4$$

$$R = Q : P_1 - P_2 \quad 5$$

U молодого человека
общее периферическое
сопротивление (ОПС):

$$R = 13300 : 95 \text{ Па/мл/с}$$

около 140 Па/мл/с

Объем крови и диаметр сосуда



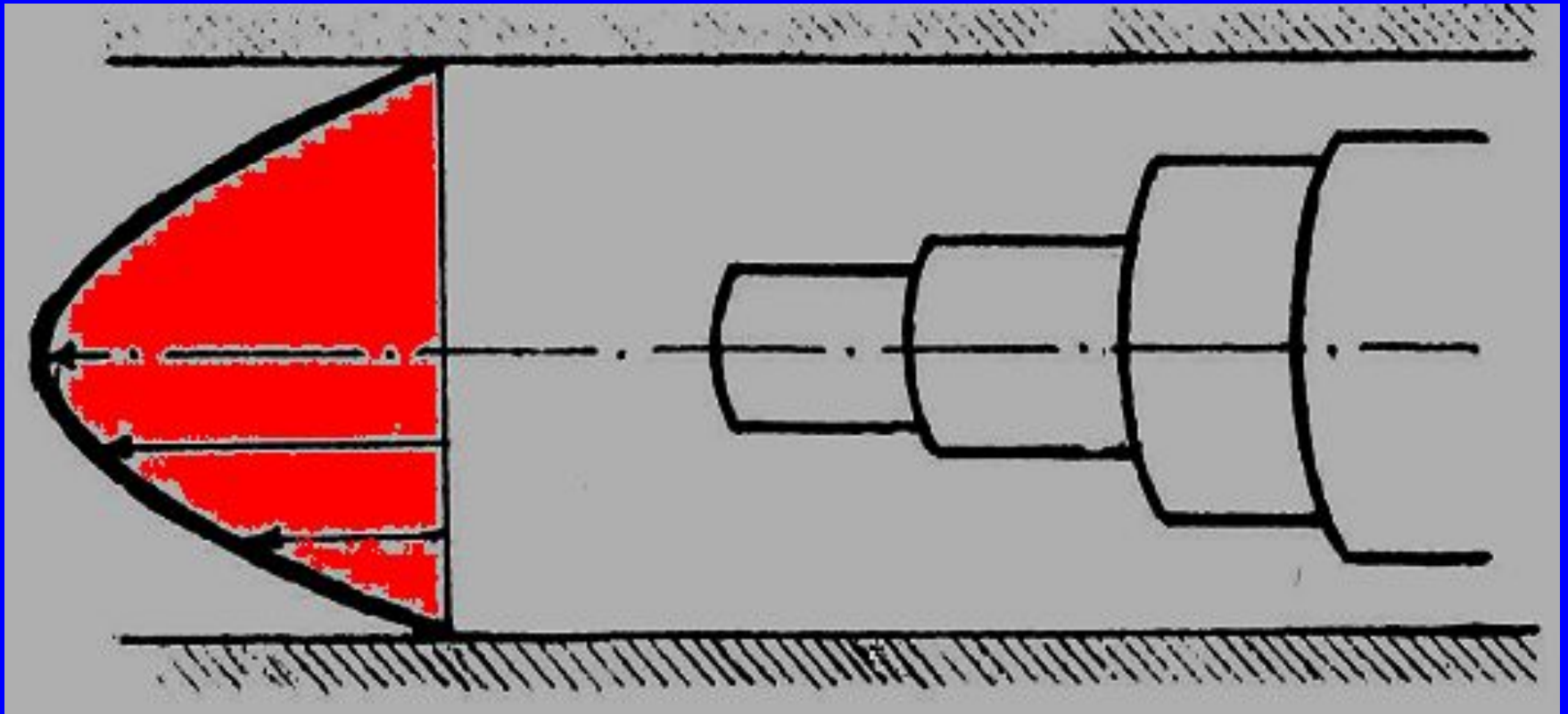
- Соотношение объема крови, поступающего в сосуд при его разветвлении, в зависимости от диаметра сосуда. Если диаметр меньше лишь в 2 раза, то объем уменьшается в 16 раз.

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

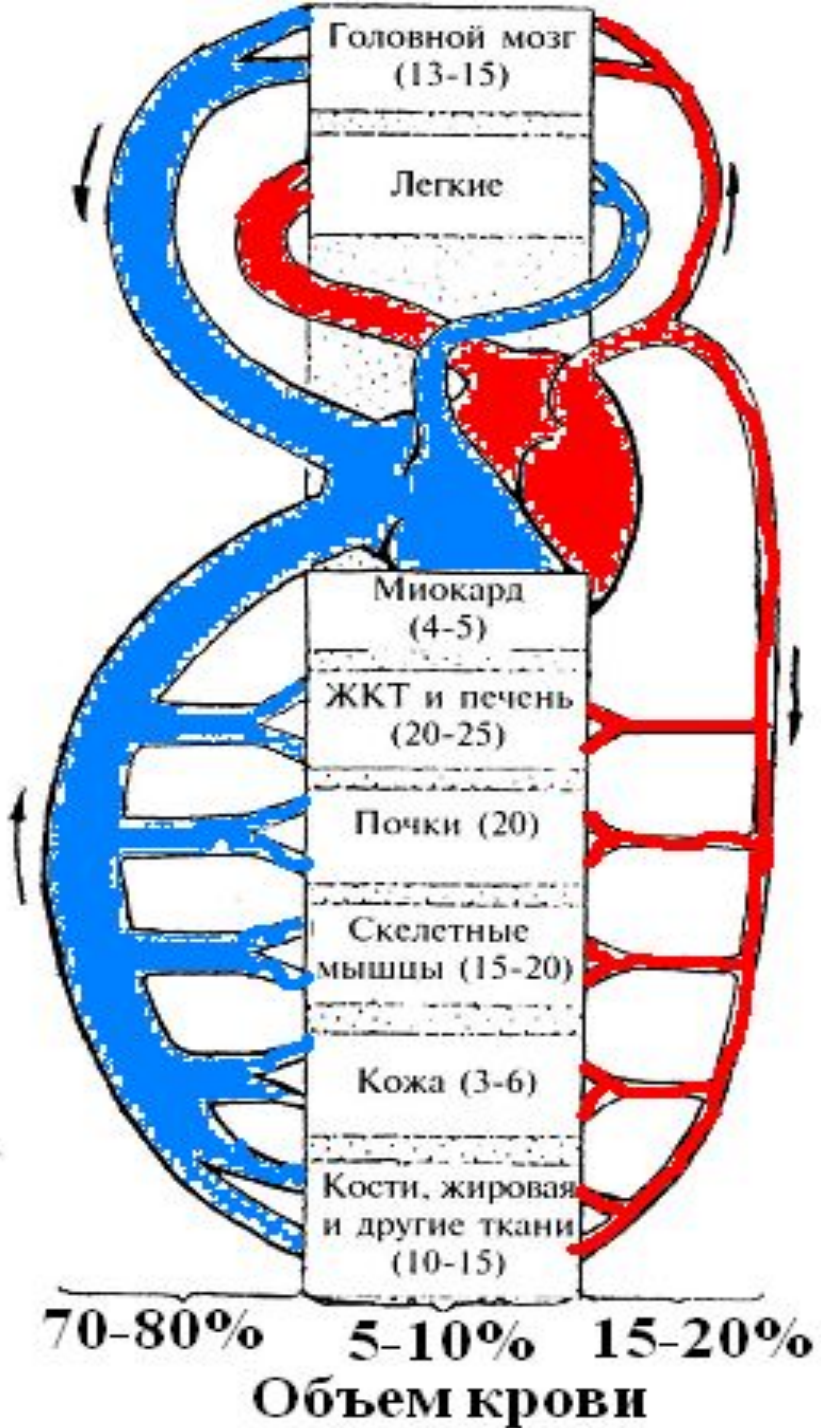
- Кровь течет слоями: у стенки сосуда скорость тока наименьшая (трение о стенку).
- В центре потока кровь течет быстрее всего.



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.

**Давление
крови**

```
graph TD; A[Давление крови] --- B[Гидродинамическое]; A --- C[Гидростатическое]; A --- D[Трансмуральное];
```

**Гидродина-
мическое**

**Гидроста-
тическое**

**Транс-
муральное**

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.

Пульс

Когда порция крови выбрасывается из сердца, то она, ударяясь о находящуюся в аорте кровь, порождает ударную волну - пульс. Эта волна распространяется на периферию по крови и стенке артерий.

Скорость распространения пульсовой волны зависит: от отношения толщины стенки к радиусу, от эластичности сосуда.

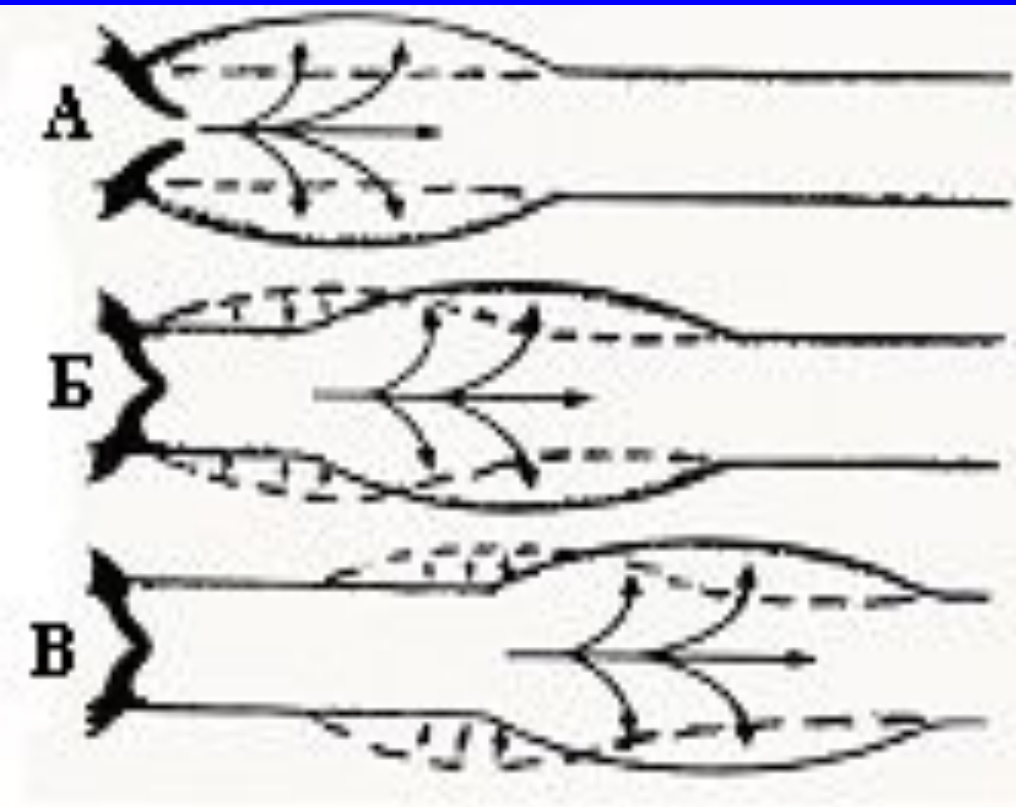
Чем эластичнее и шире сосуд, тем меньше скорость. Так, в аорте она составляет 4-6 м/с, а в менее эластичных артериях мышечного типа - 8-12 м/с.

С возрастом, в связи с развитием склеротических изменений стенки сосуда, скорость распространения пульсовой волны возрастает.

Пульс

- Характер *пульса*, позволяет врачу путем простой пальпации получить важные сведения об особенностях состояния сердечно-сосудистой системы:
- частоте средних сокращений,
- ритмичности,
- по высоте пульсовой волны можно судить о величине ударного объема и эластичности сосудов: при одинаковом объеме амплитуда пульса тем меньше, чем больше эластичность сосудов;
- по скорости нарастания пульсовой волны можно сказать как о состоянии сосудов, так и об активности сокращения сердца,
- и т. д. (КИТАЙСКАЯ МЕДИЦИНА!).

Появление пульса – следствие распространения ударной волны по стенке сосуда и крови

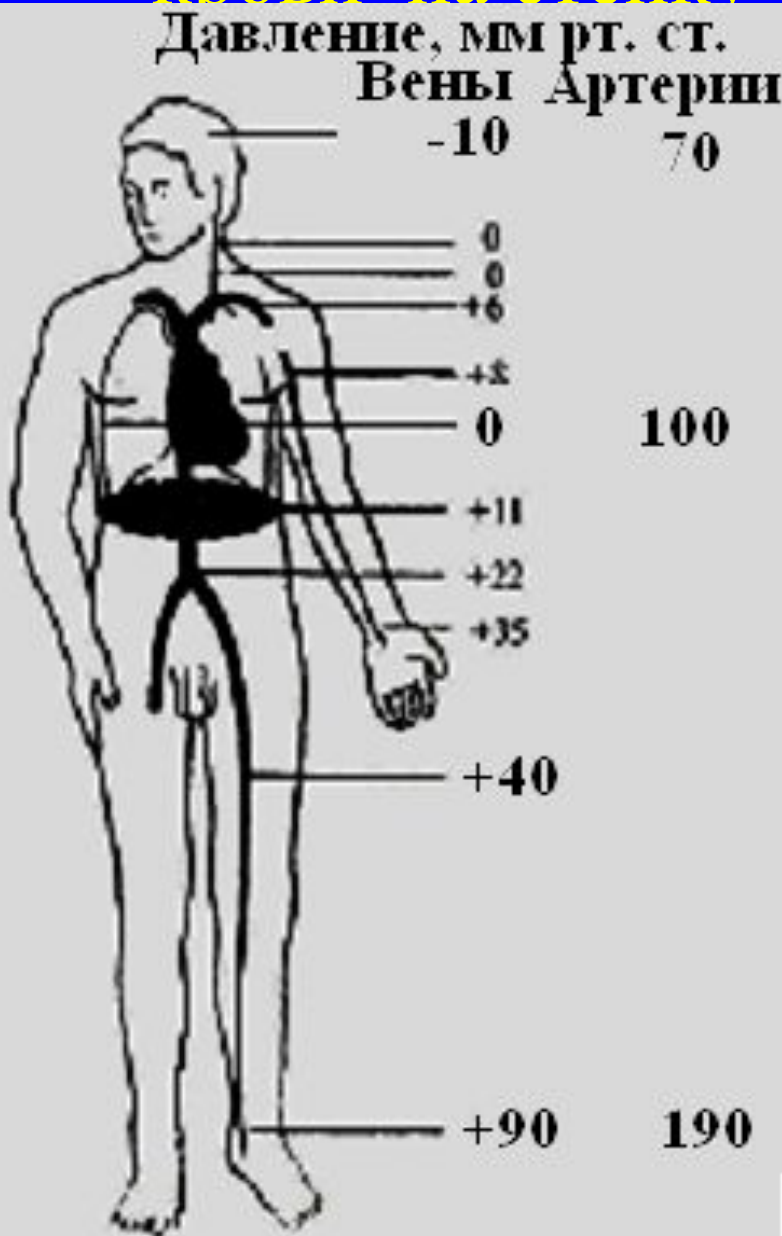


последовательные
этапы распространение
объема крови по
начальному отделу
аорты

Функции амортизирующих сосудов:

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

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

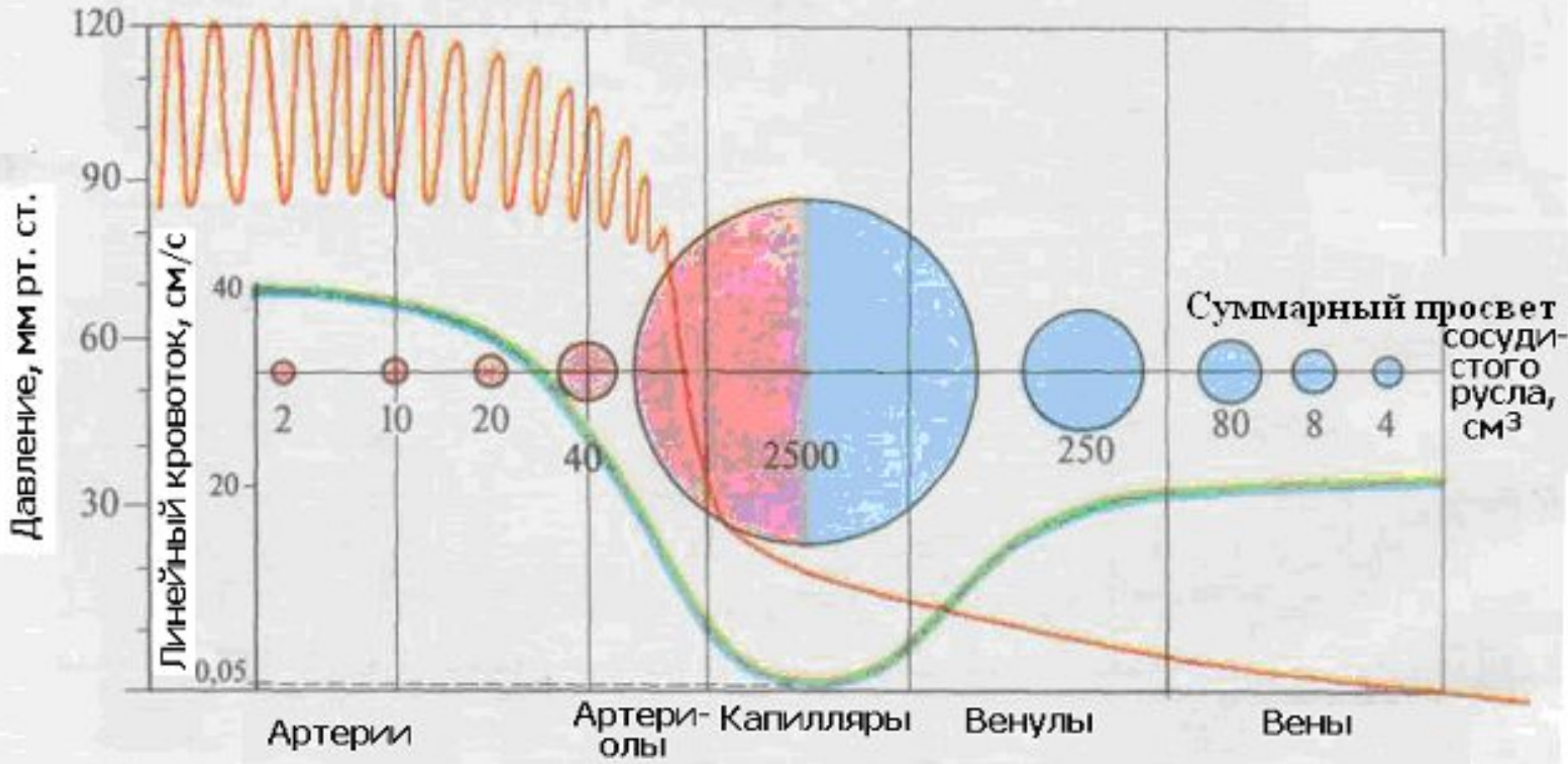


У вертикально стоящего человека под влиянием сил гравитации создается дополнительно давление столба крови на ее стенку это *гидростатическое давление*). Оно изнутри суммируется с гидродинамическим давлением. А снаружи на стенку сосуда же действуют силы (органы, ткани и т.д.).

Результирующая сила и составляет *трансмуральное давление*.

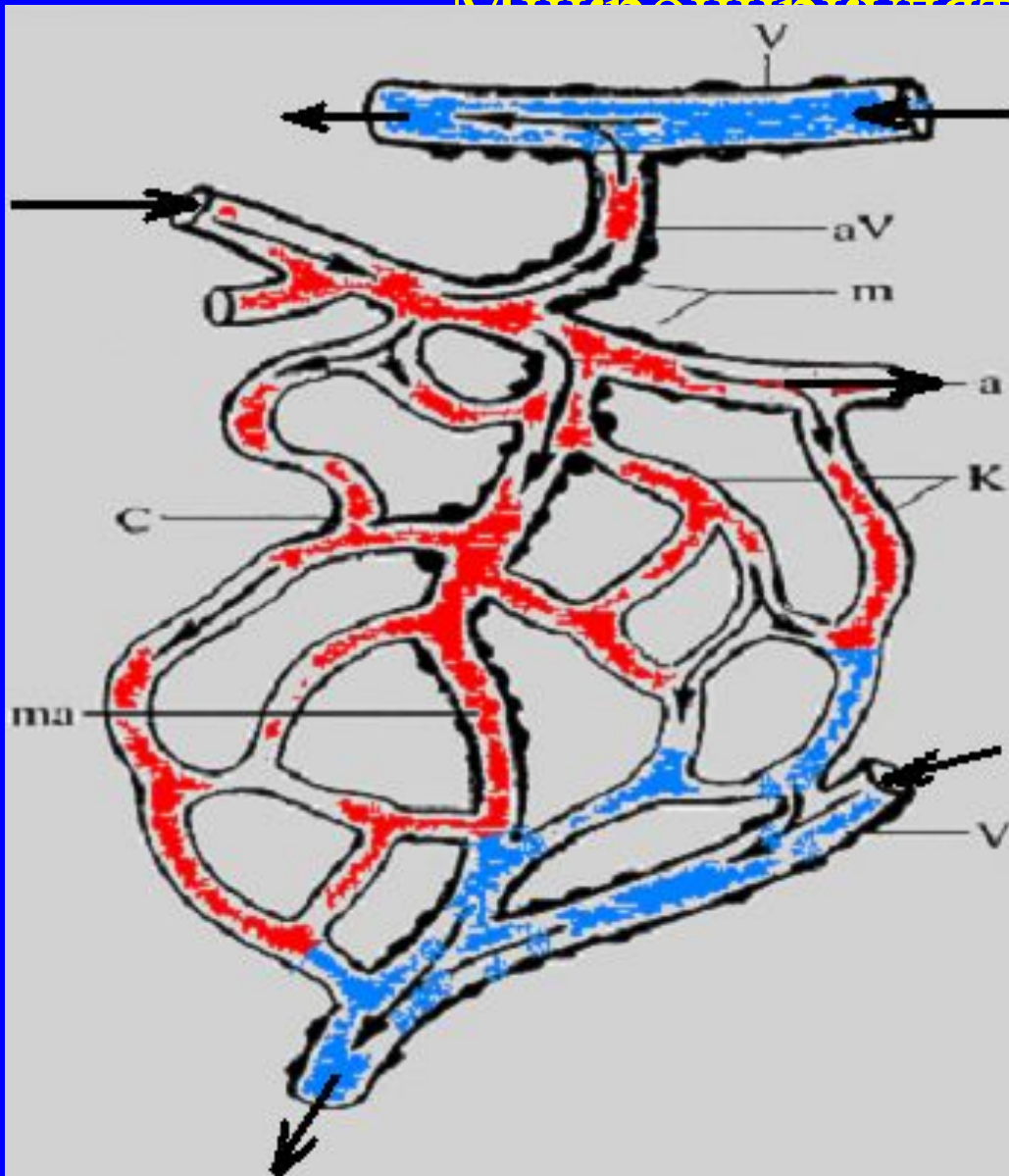
На рис. показано изменение уровня трансмурального давления в сосудах в зависимости от гидростатического давления.

Емкость отделов сосудистого русла



ОБМЕННЫЕ СОСУДЫ

Микроциркуляторное русло

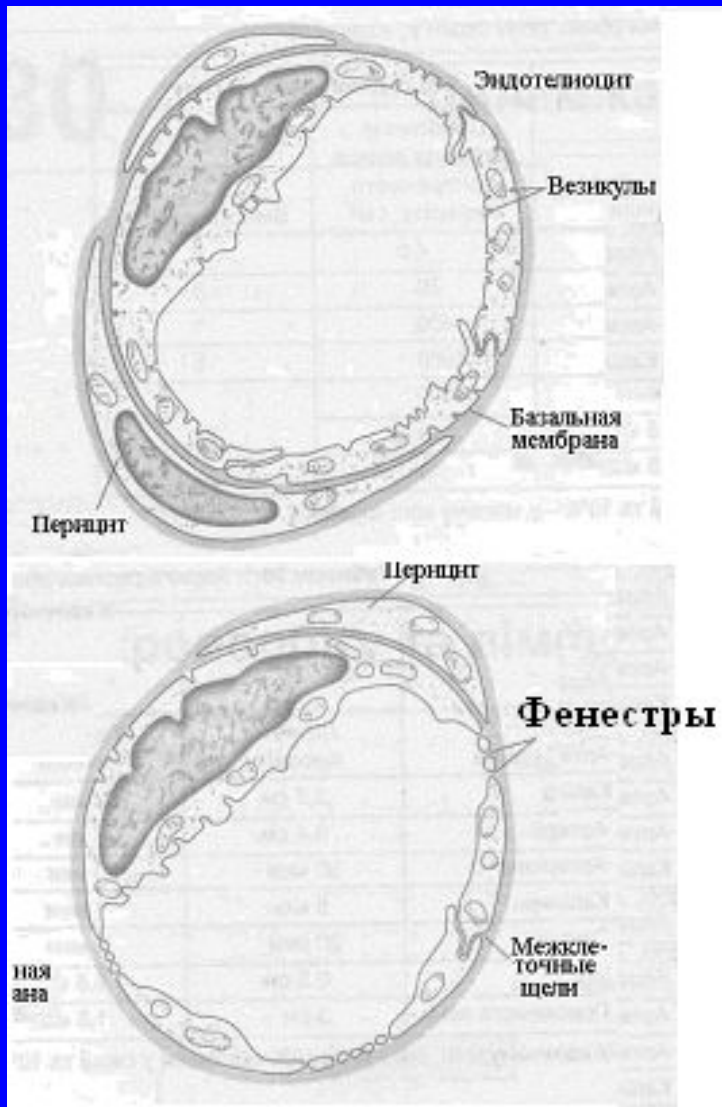


- V - венула
- aV – артериоло-венозный шунт
- к - капилляр
- а – артериола
- m - гл. мышцы
- С - сфинктер

Функциональные группы обменных сосудов

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

Стенка капилляра – обеспечение 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.



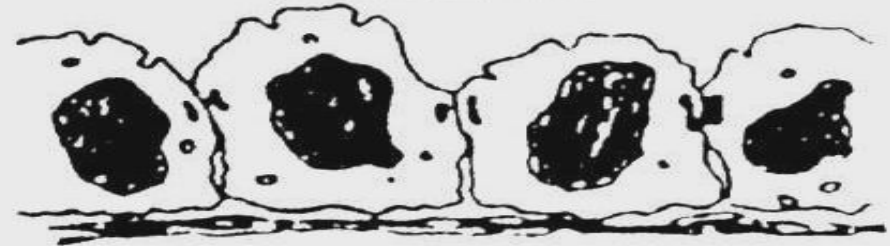
- В большом круге кровообращения закрытие капилляра происходит при давлении крови у устья капилляра около 5-10 мм рт.ст.

Особенности строения стенки капилляров в различных органах

Низкий



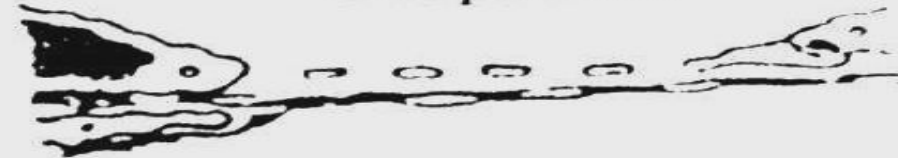
Высокий



Закрытый



Открытый



Печень, костный мозг



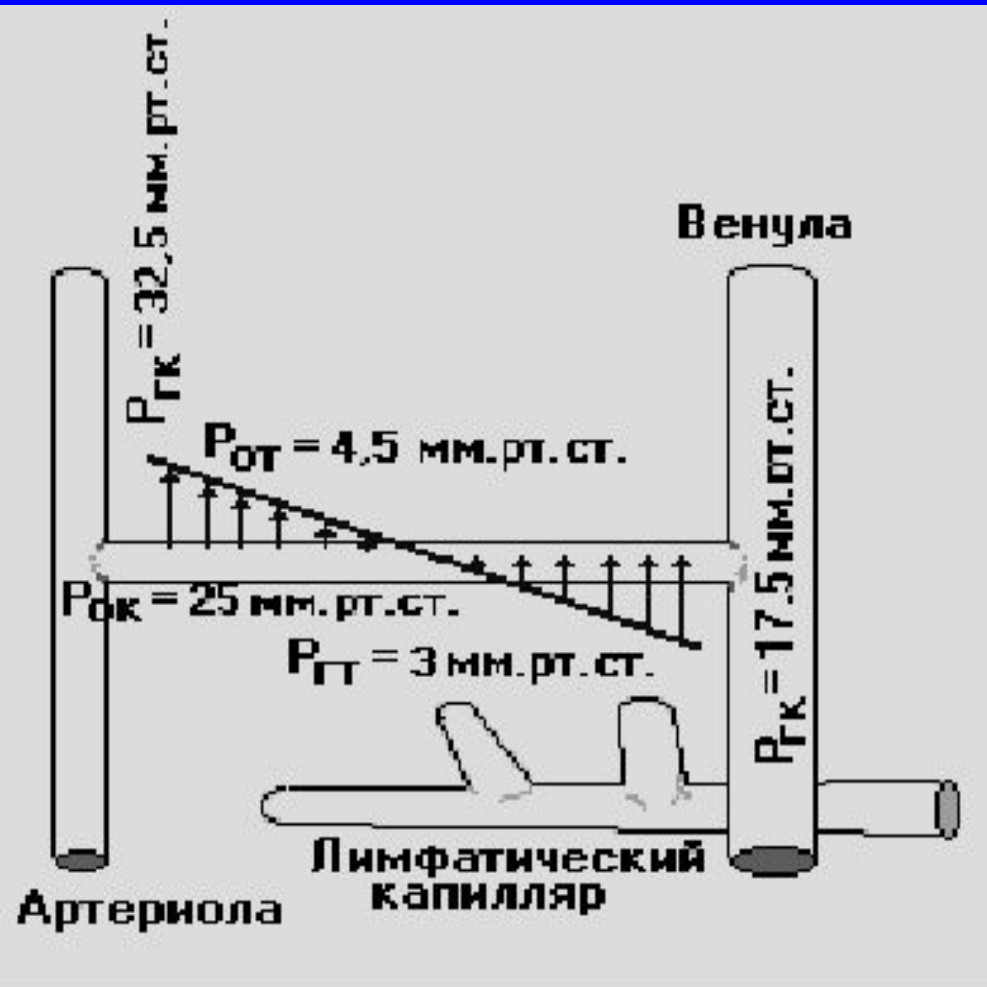
Селезенка



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:

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

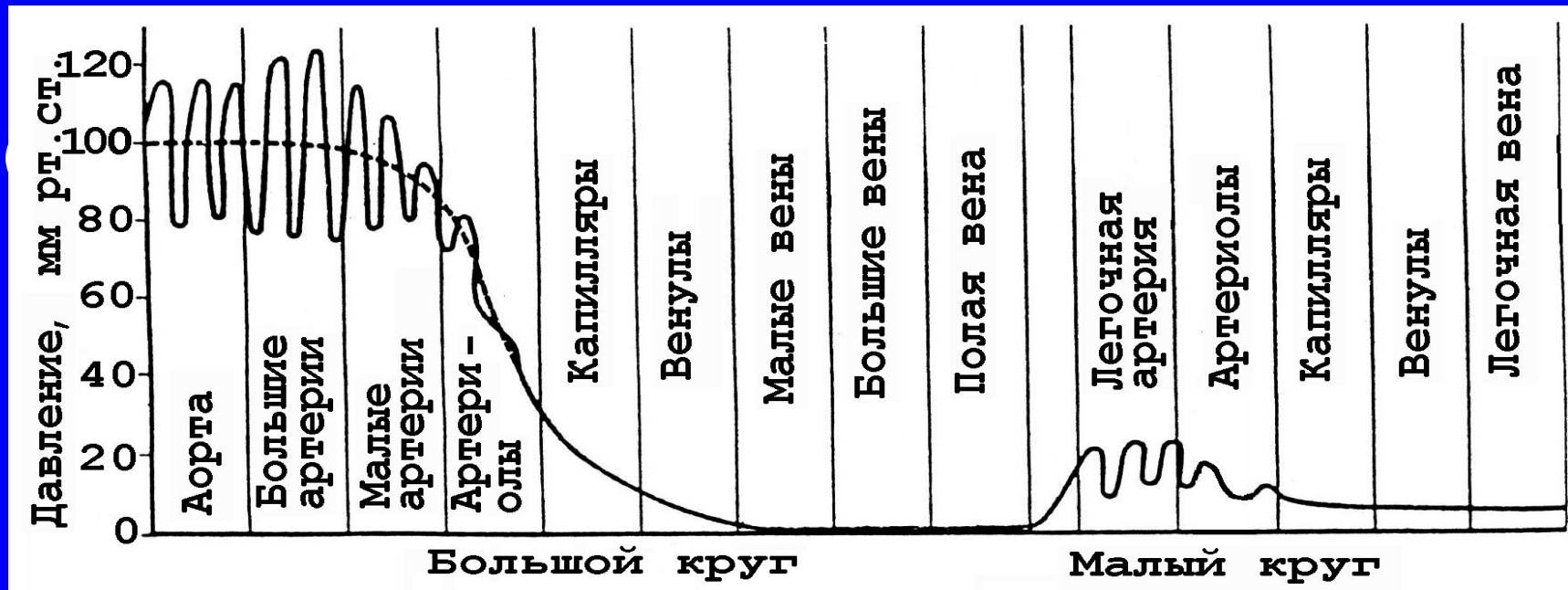
В венозном конце капилляра:

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

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

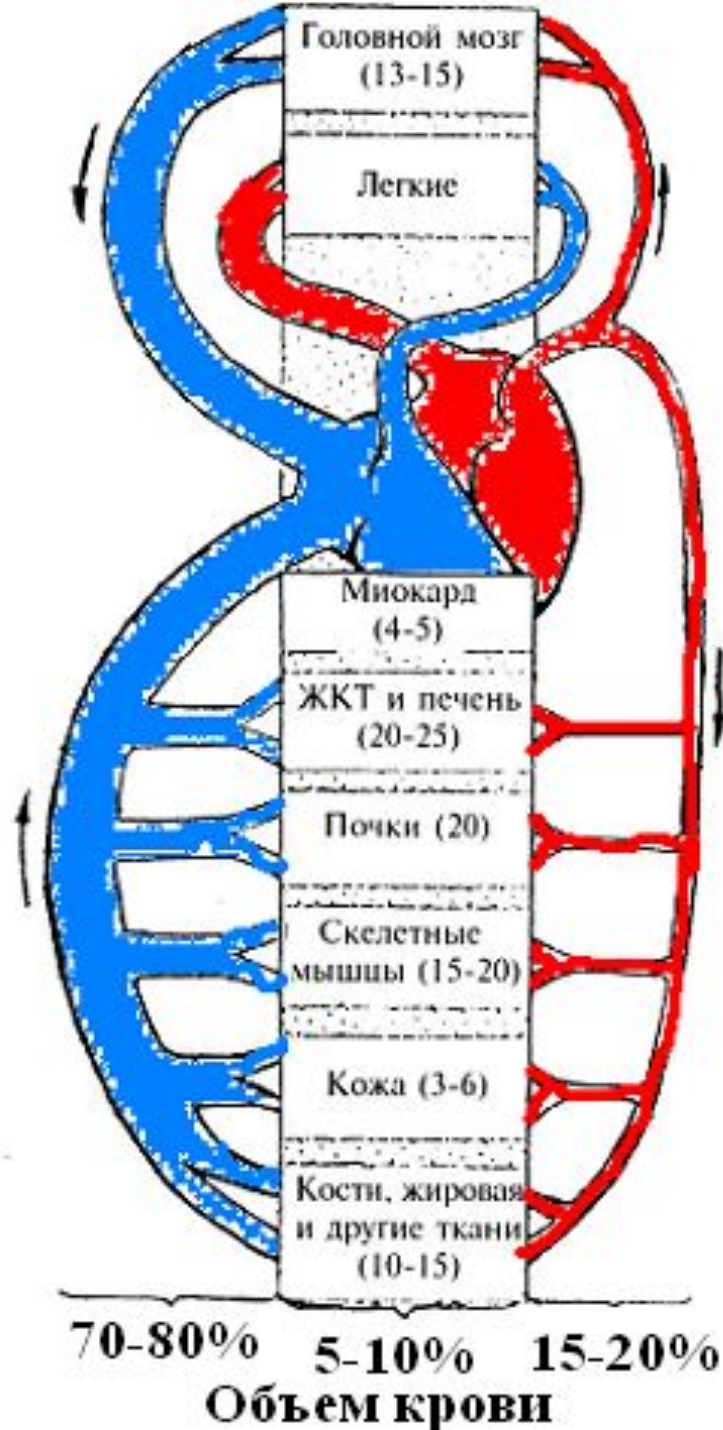
Распределение давления в сосудах

- 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.

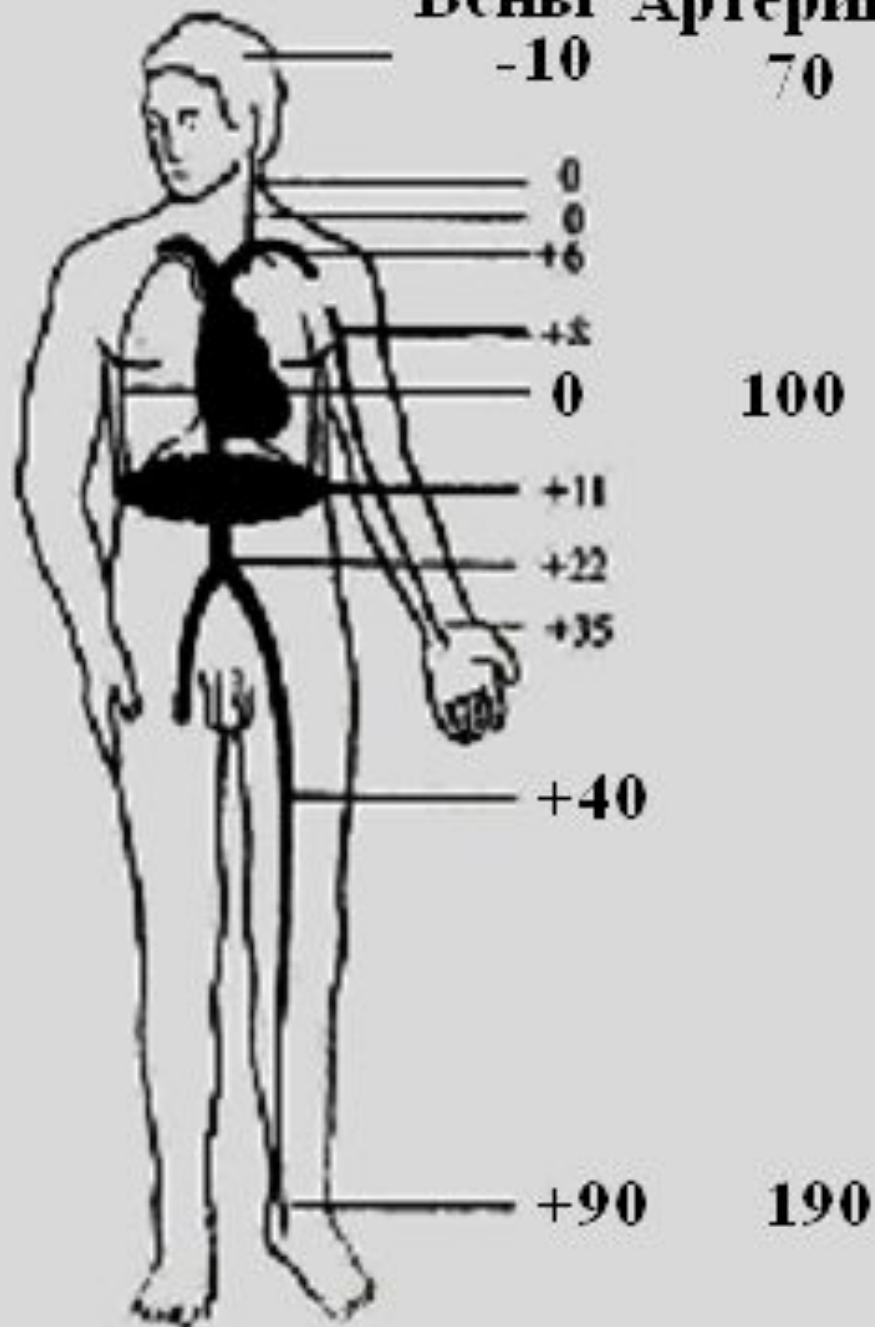


Емкостные сосуды

- 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.*

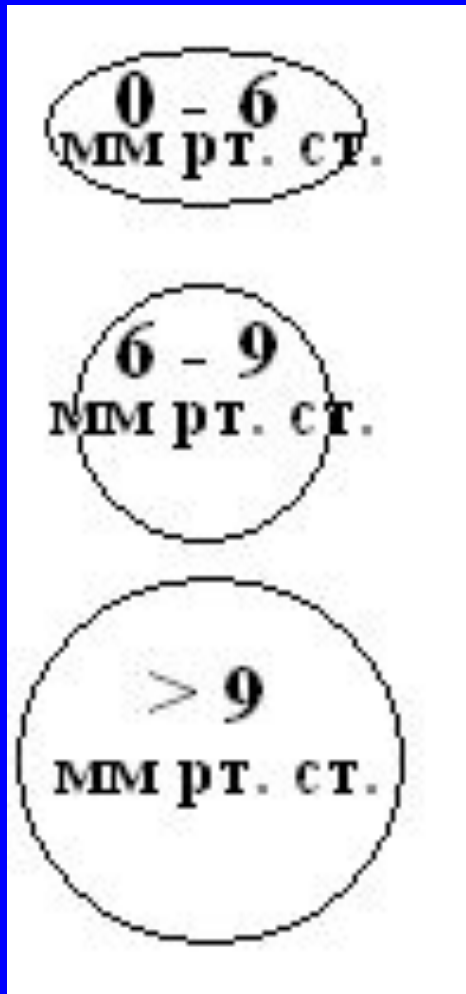


Давление, мм рт. ст.
Вены Артерии



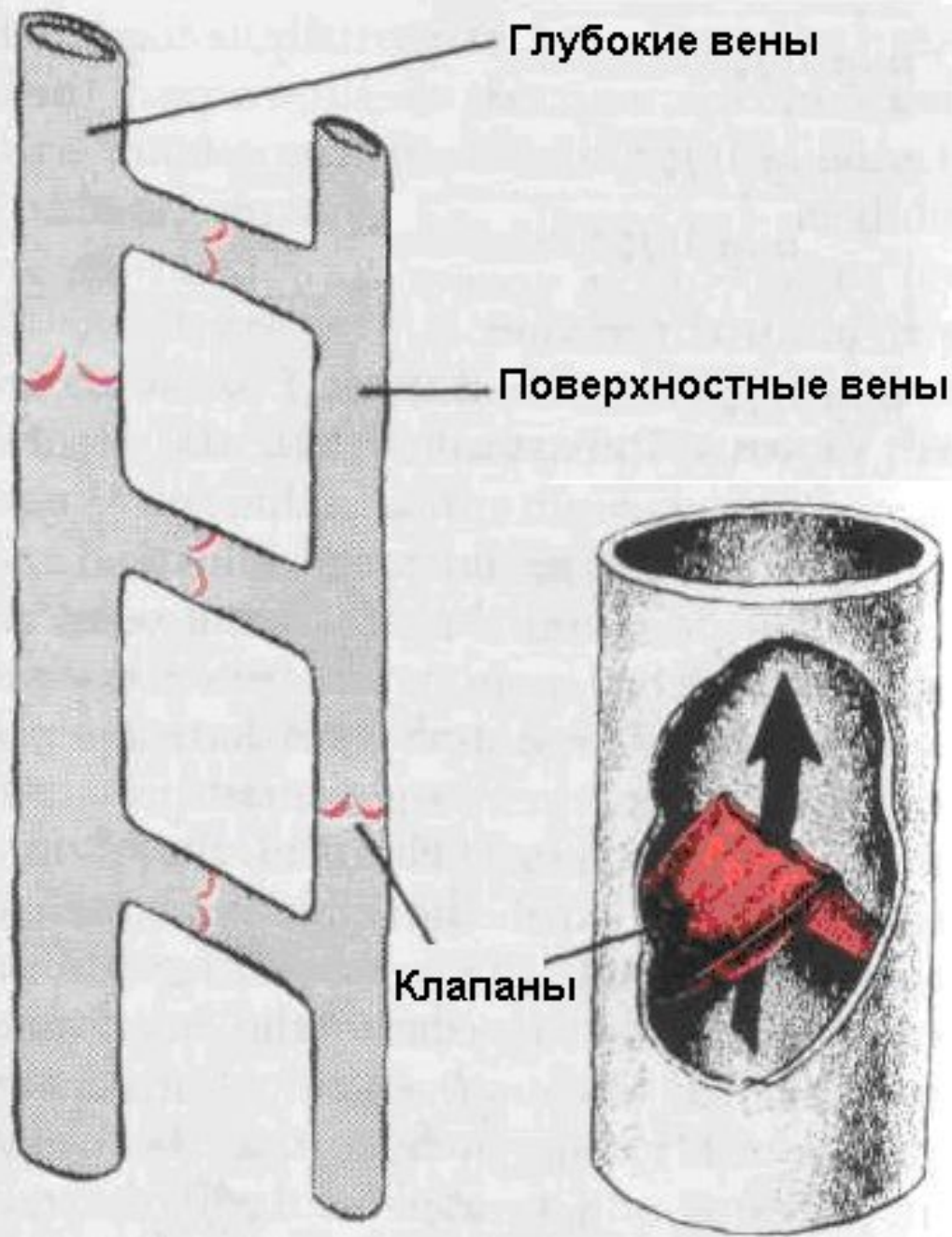
Трансмуральное давление и вены

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.

Клапаны и венозный кровоток



- Благодаря клапанам снижается величина трансмурального давления (столб разбивается на отдельные фрагменты).
- Но ... 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.***

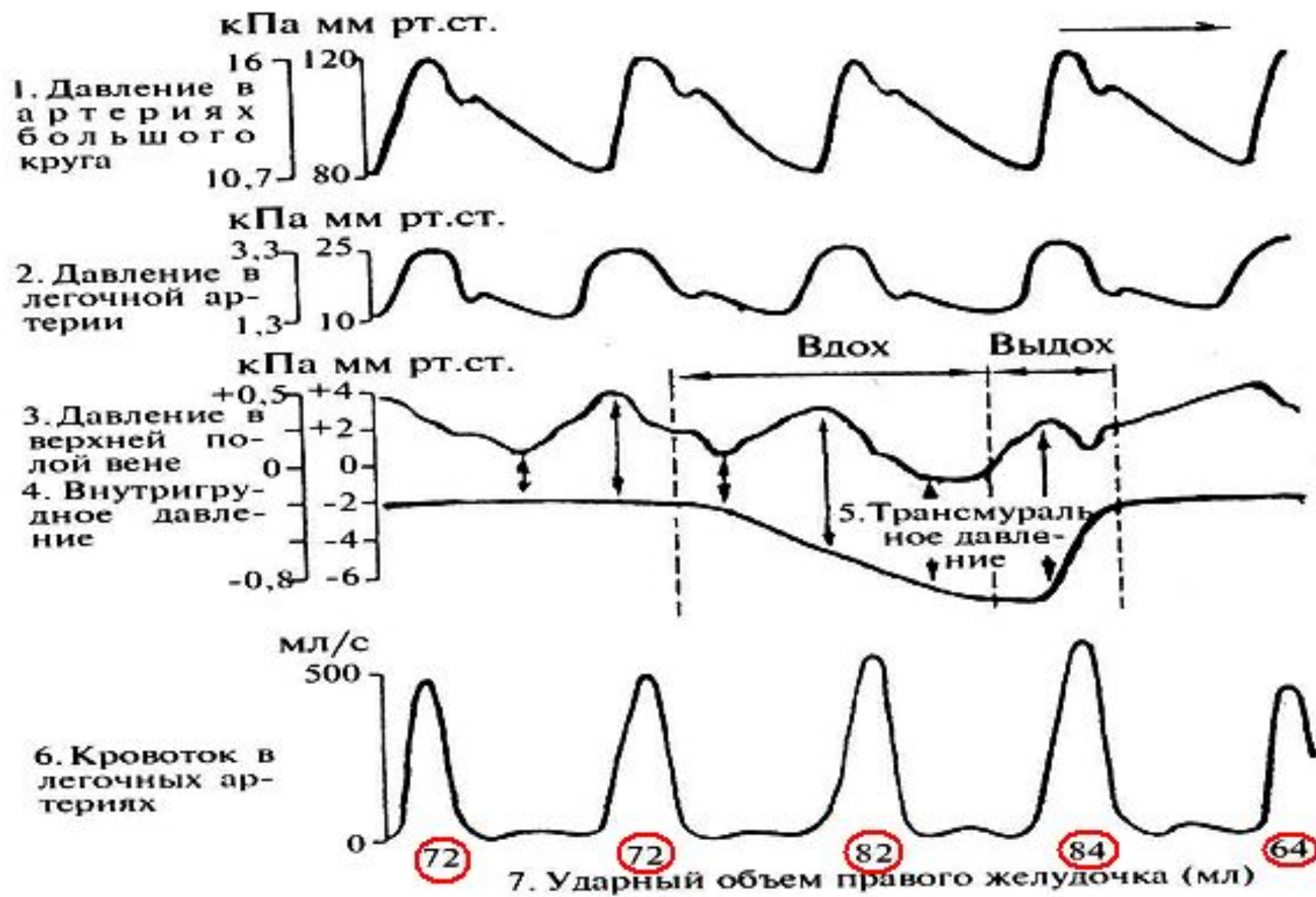
Функции (относительного) депо крови

- **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.**
- **И эта кровь используется для перераспределения кровотока при выполнении физической нагрузки к мышцам или после кровопотери к мозгу и миокарду.**

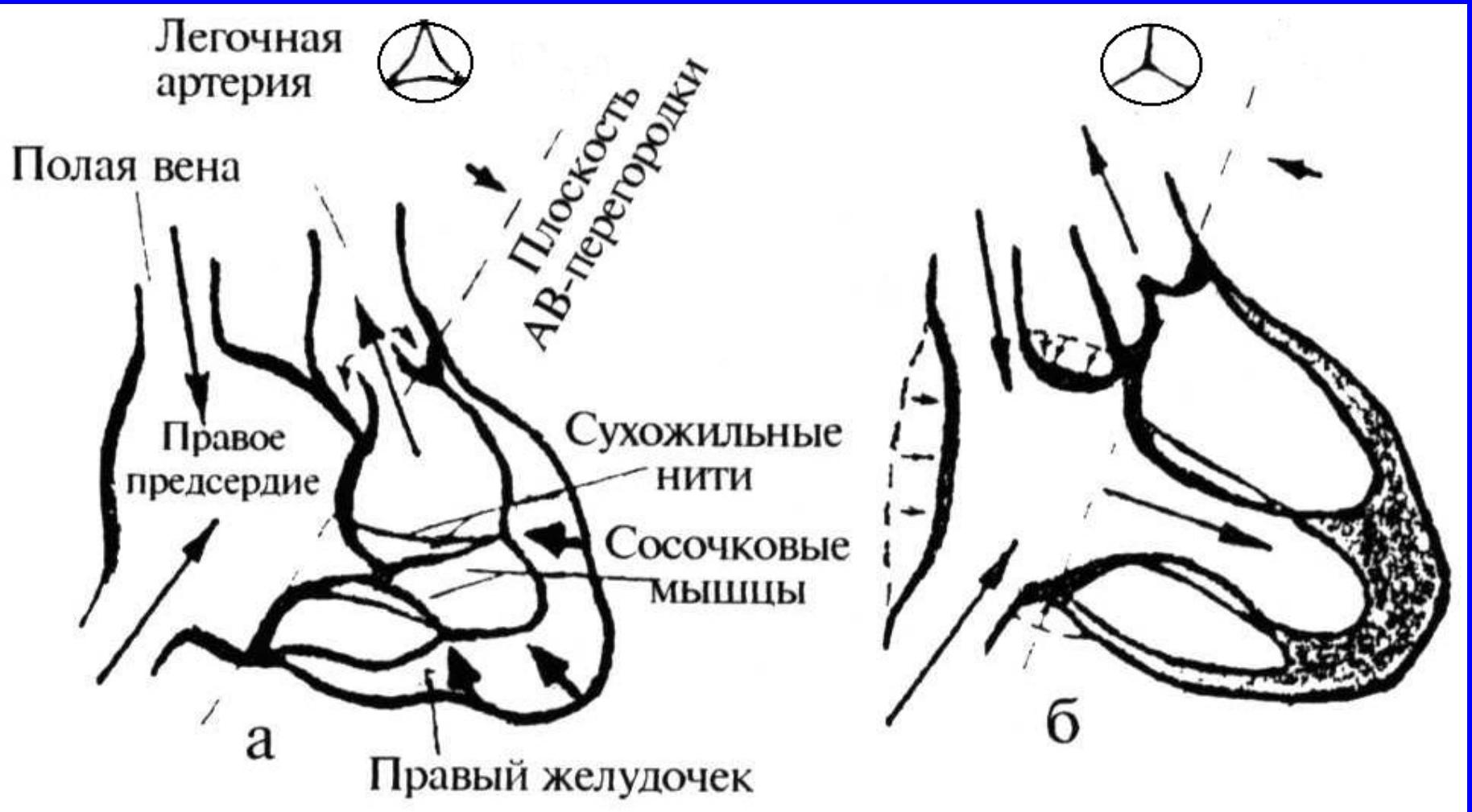
Возврат крови к сердцу

- 1. Градиент давления в венозной системе (вначале около 10, а у предсердия – 0 мм рт.ст.)
- 2. Присасывающее влияние грудной полости, где внутриплевральное давление отрицательное.
- 3. Сокращение скелетных мышц, которые выдавливают кровь из вен.
- 4. Присасывающее влияние сокращающегося желудочка (см. рис. далее).

Влияние дыхательных движений на кровоток



Влияние систолы желудочка на поступление крови в предсердие



Присасывающее действие сокращающегося желудочка (а).