

ГЕМОДИНАМИКА

ДВИЖЕНИЕ КРОВИ ПО СОСУДАМ

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

Q ОБЪЁМНАЯ СКОРОСТЬ КРОВОТОКА (л/мин, мл/мин)

- Объём крови, который протекает через поперечное сечение сосудов за **1** мин.
- Является главным показателем гемодинамики.
Отражает транспорт-ные функции крови
(например, уменьшение объёма притекающей крови приводит к уменьшению снабжения тканей кислородом)

Q (л/мин)

5 л крови



4 л крови



3 л крови



ОБЪЁМНЫЙ КРОВОТОК РАЗНЫХ ОРГАНОВ

ОРГАНЫ	мл в мин на 1 г ткани
Головной мозг	0.50
Сердце	0.70
Почки	3.60
Печень	0.95
Мышцы (покой)	0.04

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

Р ДАВЛЕНИЕ КРОВИ (мм рт.ст.)

- Сила, с которой кровь действует на единицу площади стенки сосуда.
- **Р** является движущей силой кровотока: кровь течёт из области с высоким **Р** в область с низким **Р**: ($P_1 - P_2$)
- **Р** является движущей силой для фильтрации жидкости через стенку капилляра
(например, при снижении давления крови прекращается фильтрация в почечных клубочках)

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

V

ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ КРОВОТОКА

(м/сек, мм/сек)

- Скорость, с которой частицы крови движутся вдоль сосуда.
- От линейной скорости зависит время контакта крови со стенкой капилляра (в норме **2,5 сек**).
Если скорость движения крови увеличится, обмен не успеет произойти.

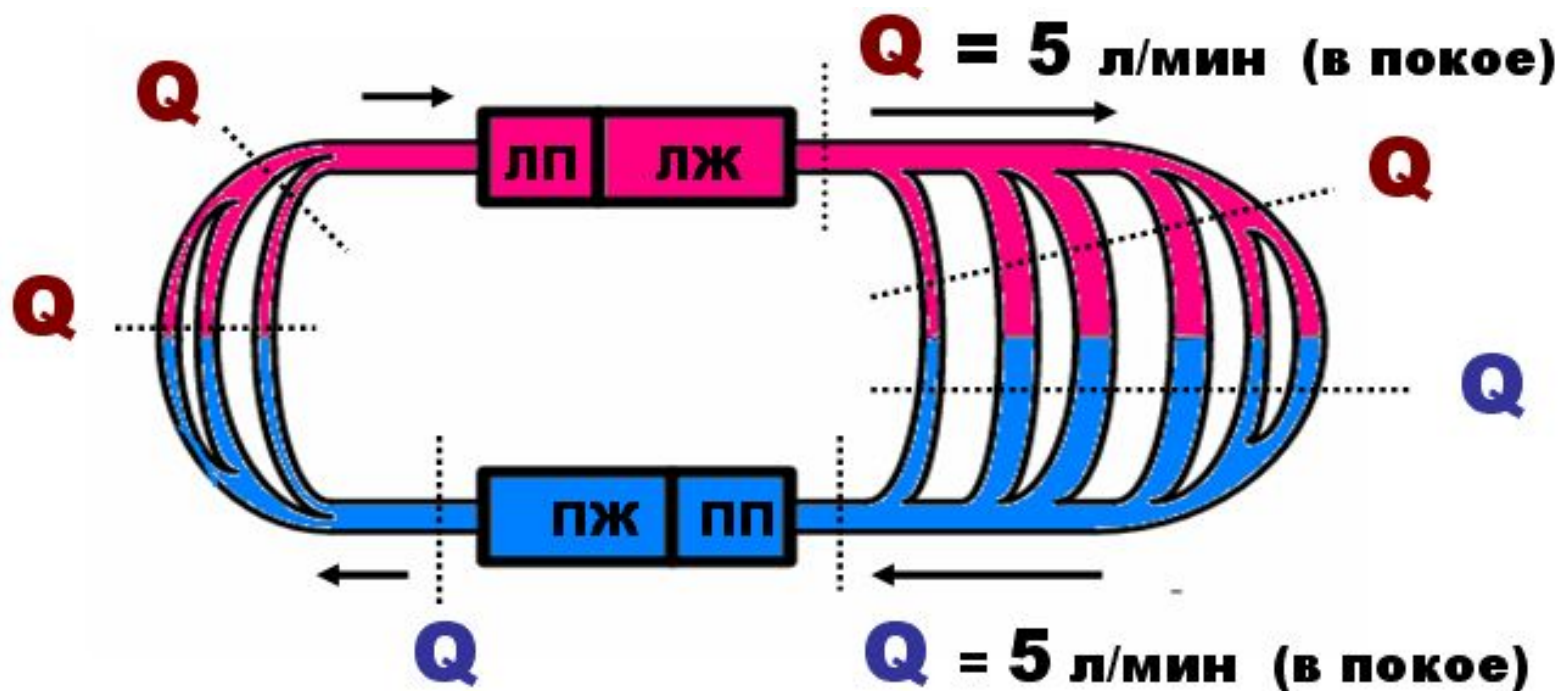
ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

R ПЕРИФЕРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

- Обусловлено трением между кровью и стенкой сосуда, а также между слоями движущейся крови.
- Зависит от вязкости крови, от радиуса сосуда, от характера течения крови (ламинарное или турбулентное)
- Периферическое сосудистое сопротивление невозможно измерить, его можно только рассчитать, зная другие показатели гемодинамики.

ЗАКОНЫ ГЕМОДИНАМИКИ

- **ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА ПОТОКА** – объём крови, протекающий через площадь поперечного сечения сосудов за минуту, одинаков во всех отделах сердечно-сосудистой системы.



ЗАКОНЫ ГЕМОДИНАМИКИ

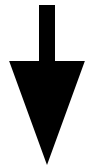
- **ОСНОВНОЙ ЗАКОН ГЕМОДИНАМИКИ** – объём крови, протекающий за минуту через поперечное сечение сосуда (**Q**), прямо пропорционален разнице давления на концах сосуда ($P_1 - P_2$) и обратно пропорционален величине периферического сопротивления (**R**).

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$

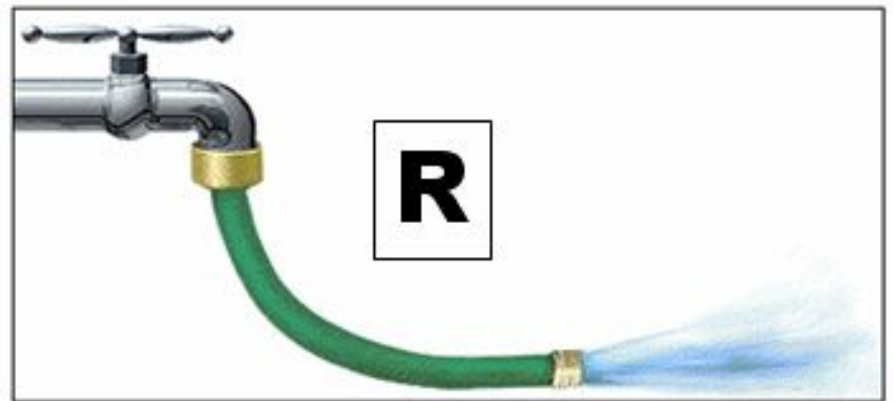
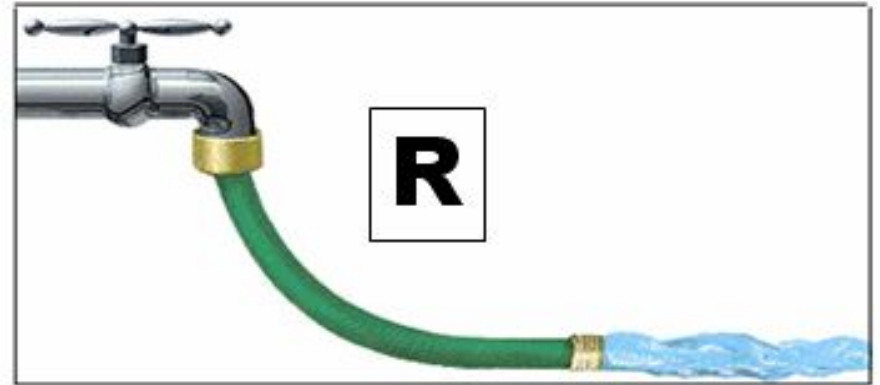
ДАВЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ЗАВИСИТ ОТ ОБЪЁМА ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Меньше объём, меньше давление

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$



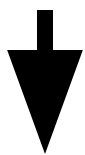
$$P = Q \times R$$



Больше объём, больше давление

ДАВЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ЗАВИСИТ ОТ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$



$$P = Q \times R$$



ИЗМЕРИВ ДАВЛЕНИЕ И ОБЪЁМНЫЙ КРОВОТОК,
МОЖНО РАССЧИТАТЬ
ВЕЛИЧИНУ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$



$$R = \frac{P_1 - P_2}{Q}$$

Если разница давления равна **1** мм рт. ст.,

а кровоток равен **1** мл/сек,

сопротивление составляет **1** единицу периферического сопротивления (**1** ЕПС)

R большого круга кровообращения, где $(P_1 - P_2) = 100$ мм **Hg**, а кровоток **100** мл/сек, равно **1** ЕПС

R малого круга кровообращения, где $(P_1 - P_2) = 14$ мм **Hg**, а кровоток **100** мл/сек, равно **0,14** ЕПС

ПЕРИФЕРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

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

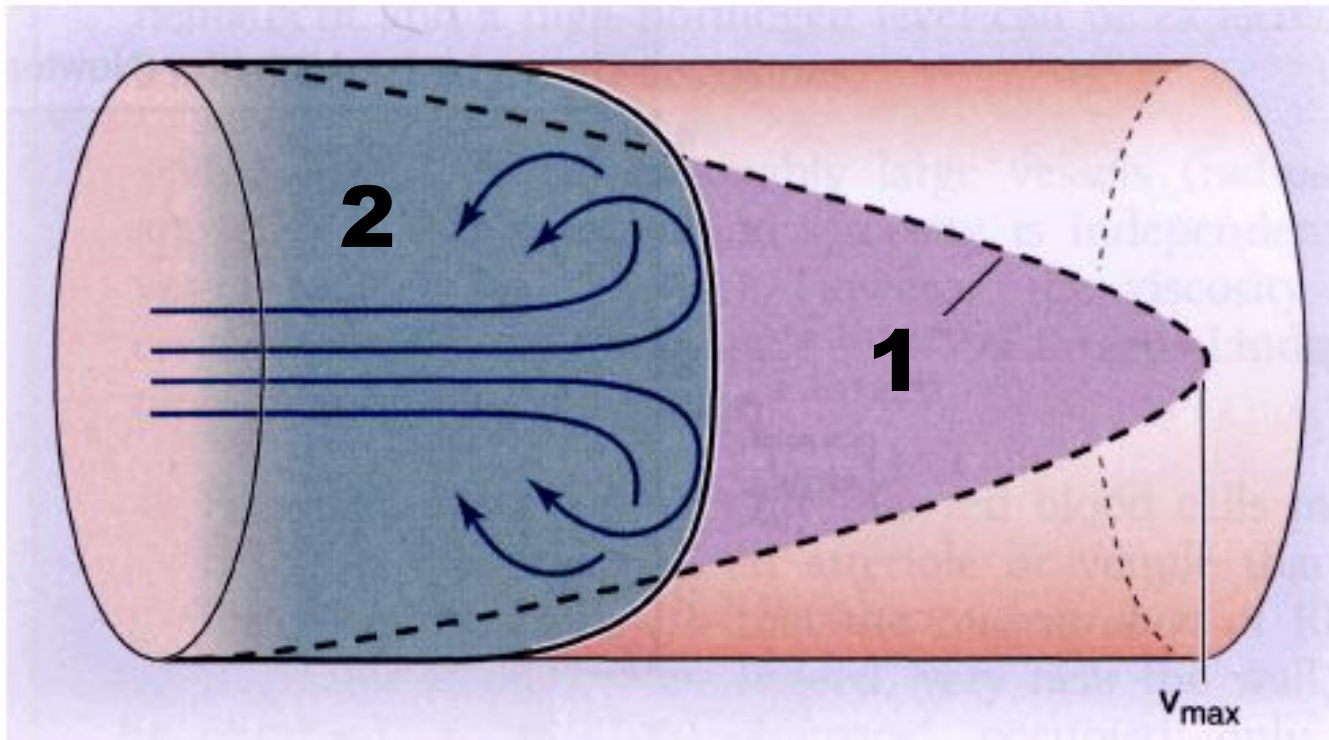
ПЕРИФЕРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

прямо пропорционально длине сосуда (l),
а также вязкости крови (η)
и обратно пропорционально радиусу сосуда (r).

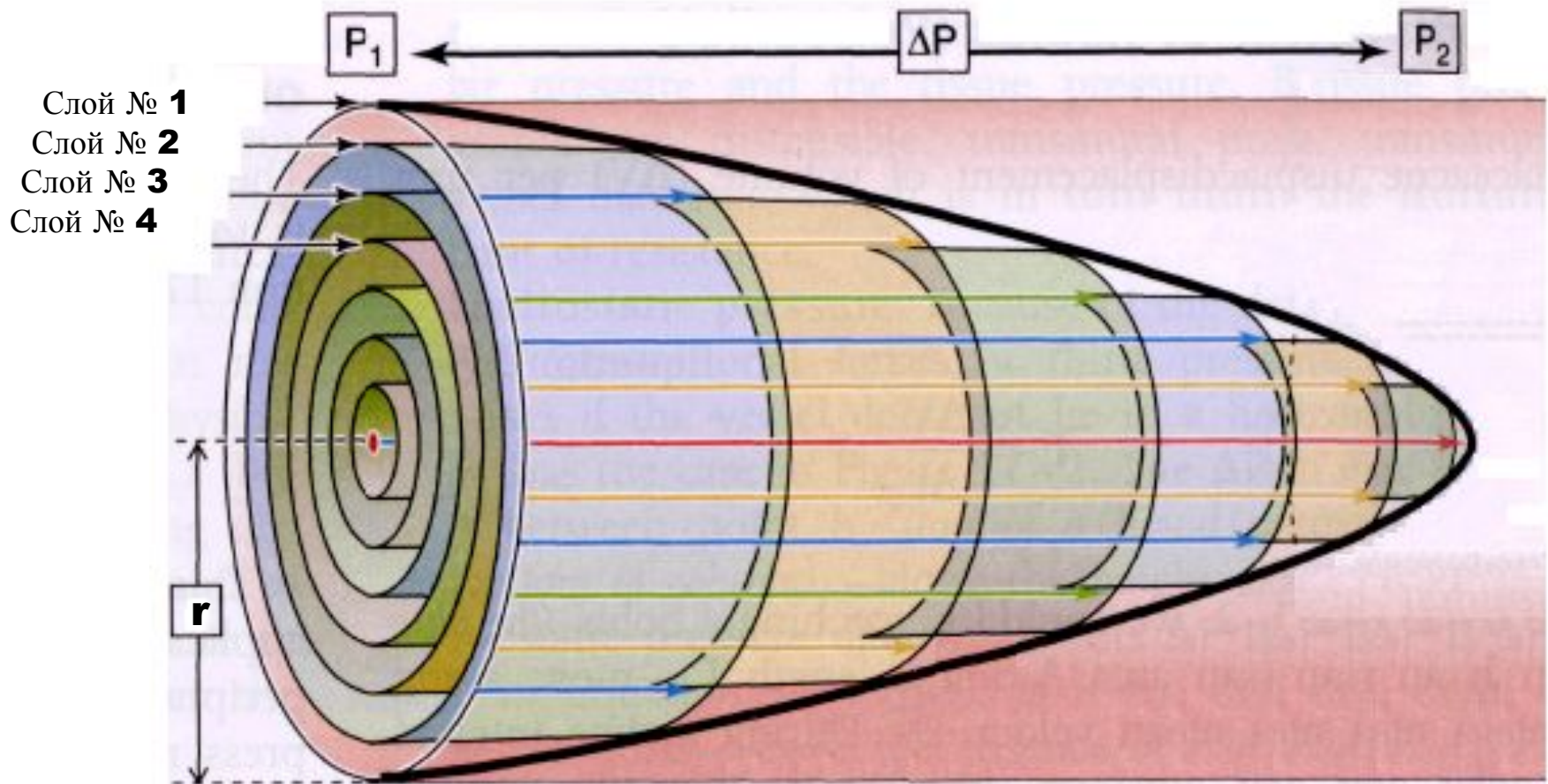
Вязкость крови в организме зависит не только от состава крови, но и от калибра сосуда, характера и скорости течения крови в сосудах:

- в сосудах диаметром меньше **200** мкм вязкость резко снижается (феномен Фареуса – Линдквиста);
- при турбулентном течении вязкость повышается.

ЛАМИНАРНОЕ (1) и ТУРБУЛЕНТНОЕ (2) ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ В СОСУДЕ



ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ



Число Рейнольдса (**Re**)

Отражает участие разных факторов, определяющих характер движения крови.

Re прямо пропорционально

- 1) радиусу сосуда,
- 2) линейной скорости кровотока,
- 3) плотности крови

$$\text{Re} = \frac{rv\rho}{\eta}$$

и обратно пропорционально 4) вязкости крови.

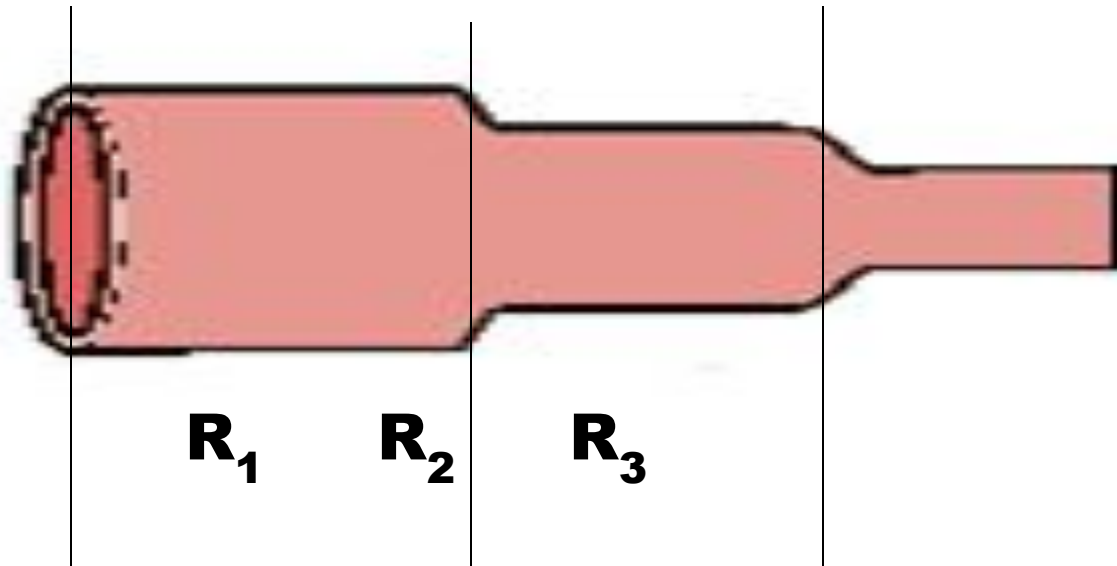
Если **Re** больше **200**, то в местах разветвления и резких изгибов артерий образуются вихри. Если **Re=1000-1200**, ток крови становится полностью турбулентным.

В норме это происходит в начальной части аорты и лёгочной артерии во время изгнания крови из желудочков.

Во время мышечной работы (увеличение скорости кровотока), при резкой анемии (снижение вязкости крови) кровотоки становятся турбулентными во всех крупных артериях.

ЗАКОНЫ ГЕМОДИНАМИКИ

1-ый закон
Кирхгофа

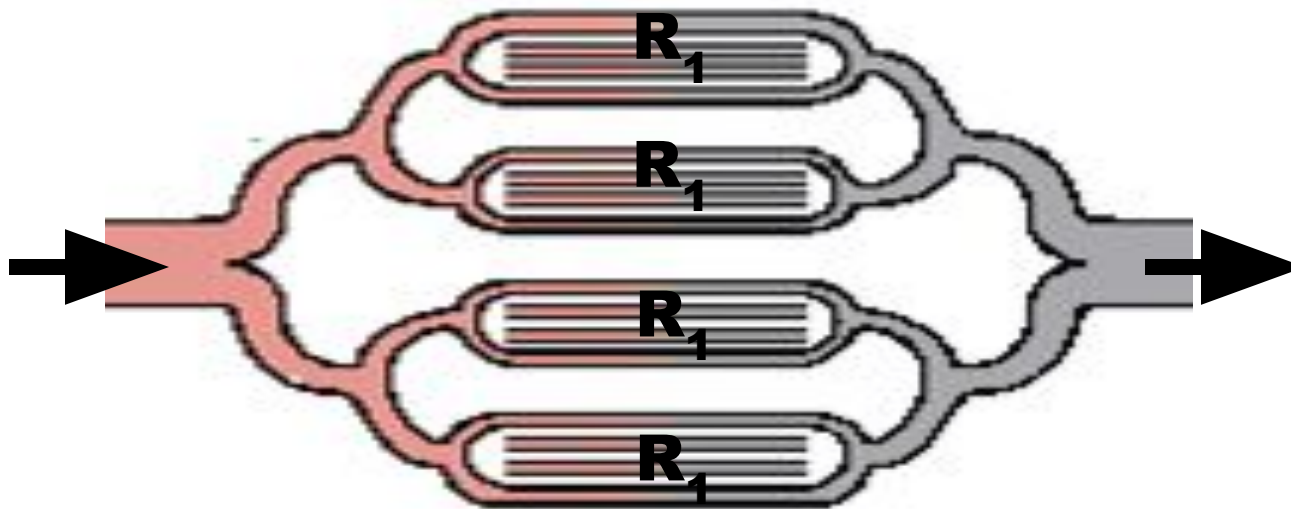


- СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО соединённых сосудов, равно сумме сопротивлений каждого отдельного сосуда.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

ЗАКОНЫ ГЕМОДИНАМИКИ

2-ой закон Кирхгофа



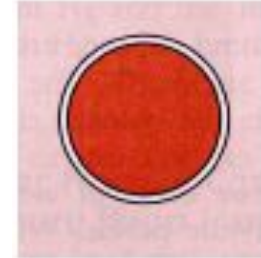
- ПРОВОДИМОСТЬ ($C = 1/R$) ПАРАЛЛЕЛЬНО соединённых сосудов равна сумме проводимостей каждого отдельного сосуда: $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$
или $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$
- Если сосуды одного калибра, то $R = R_1/n$.
 - Это значит, что сопротивление всей параллельной системы меньше, чем сопротивление одного сосуда,
 - и чем больше сосудов в системе, тем меньше её сопротивление (например, в сети капилляров).

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

- **АМОРТИЗИРУЮЩИЕ СОСУДЫ** – аорта и крупные артерии.

Сосуды эластического типа.

Принимают на себя гидравлический удар и обеспечивают непрерывный ток крови.



- **СОСУДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ** – средние и мелкие артерии.

Сосуды мышечно-эластического типа.

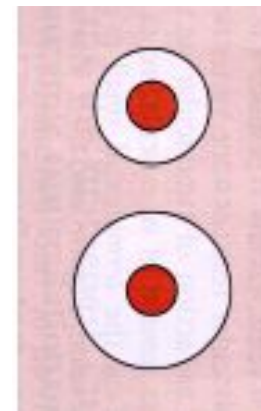
Распределяют кровоток по органам и тканям.



- **СОСУДЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ** – артерии диаметром менее **100** мкм, артериолы, прекапиллярные сфинктеры.

Сосуды мышечного типа.

Контролируют капиллярный кровоток.



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

- **ОБМЕННЫЕ СОСУДЫ – капилляры.** Стенка капилляра – базальная мембрана и слой эндотелия. Оптимальные условия для обмена.



- **ЁМКОСТНЫЕ СОСУДЫ – вены**
Растяжимость, прочность, пассивное и активное изменение ёмкости, депонирование крови.








Мелкие

Средние

крупные

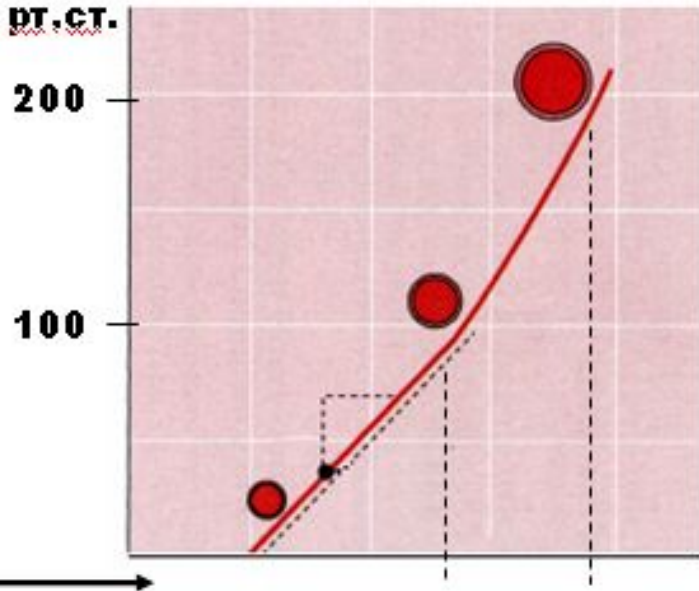


СООТНОШЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ И ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА СОСУДОВ

Диаметр 24 мм	4 мм	30 мкм	6 мкм	20 мкм	5 мм	30 мм	
Толщина стенки 2 мм	1 мм	20-30 мкм	1 мкм	2 мкм	0.5 мм	1.5 мм	
							
Аорта	средняя артерия	артериола и пре- капиллярный сфинктер	капилляр	венула	вена	портальная вена	

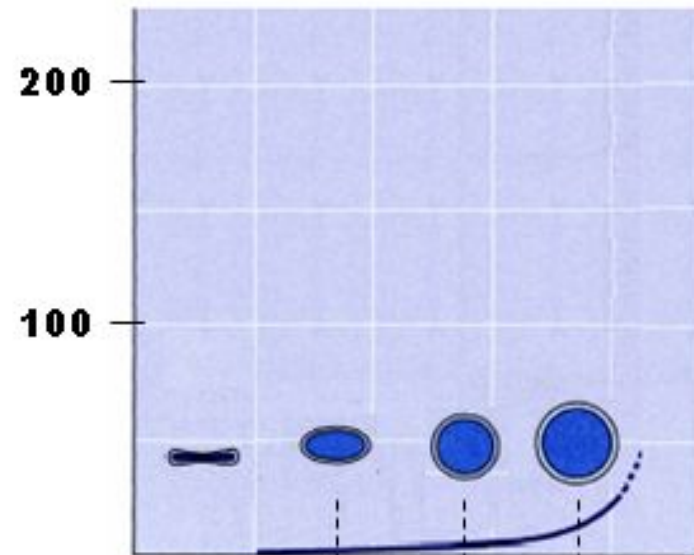
СООТНОШЕНИЕ ОБЪЕМА И ДАВЛЕНИЯ КРОВИ В АРТЕРИИ И ВЕНЕ

Давление
мм рт.ст.



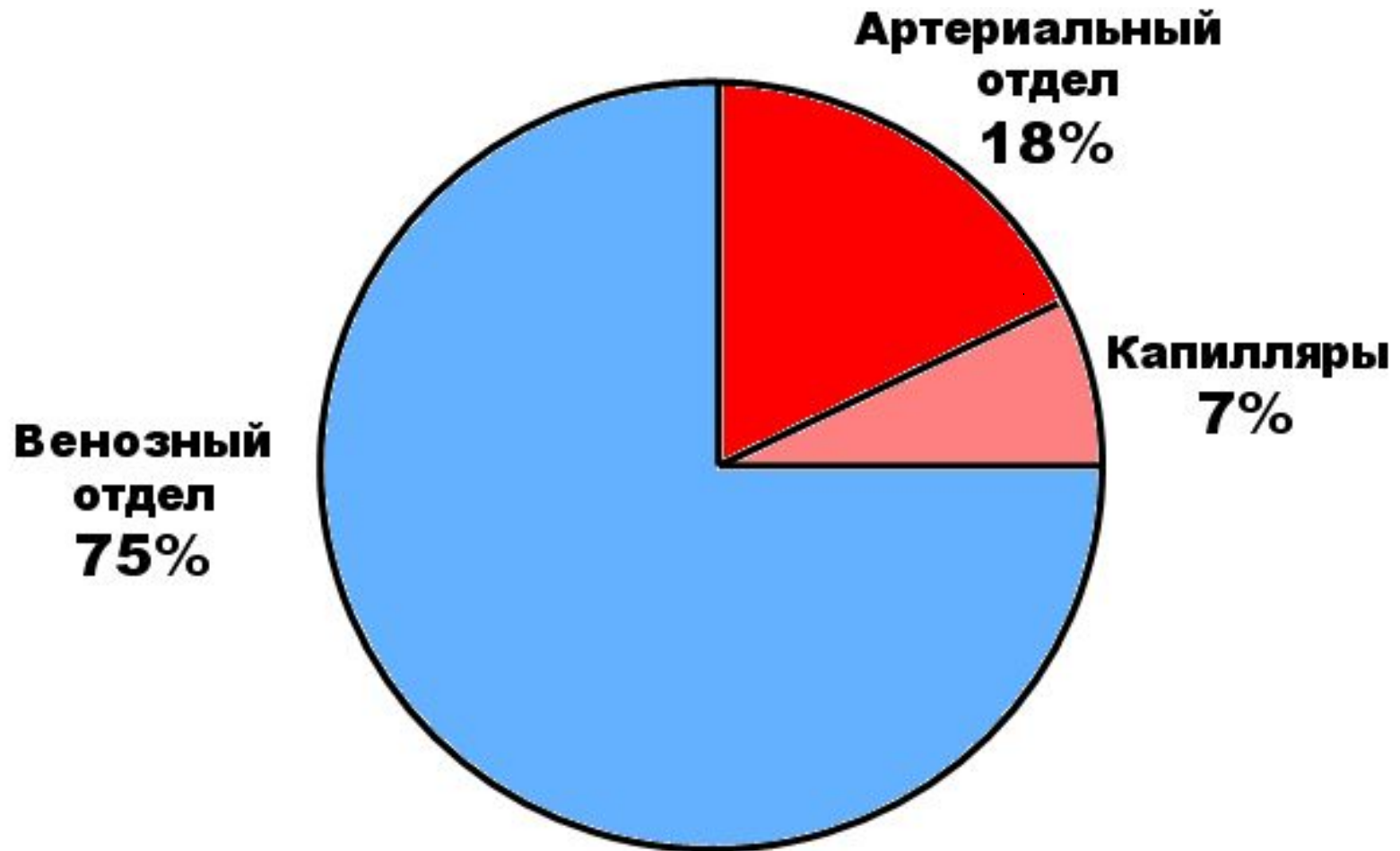
Увеличение объёма в 2, в 3 раза

Эластическая отдача и сокращение гладких мышц при растяжении артерии вызывают рост давления

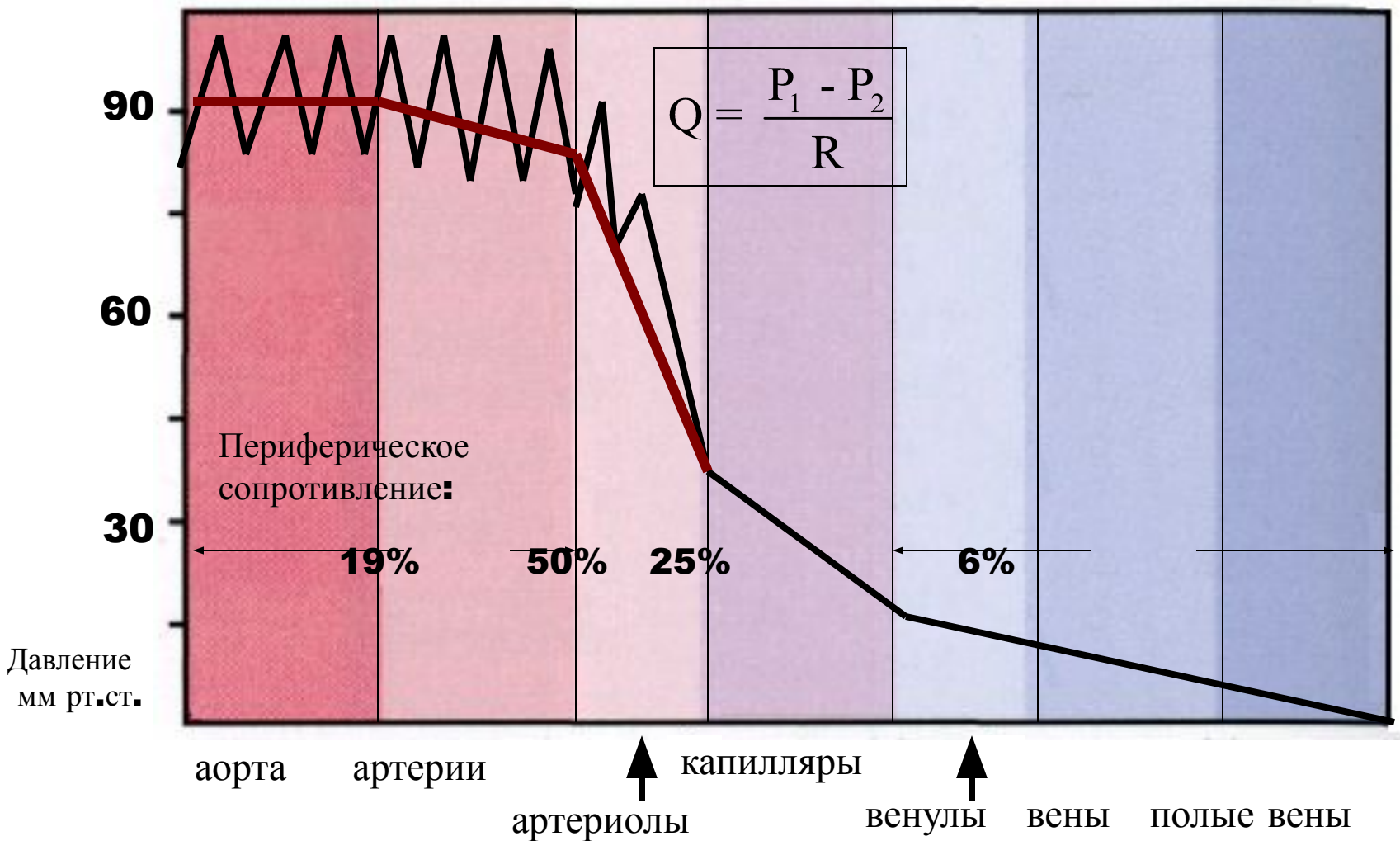


Вена наполняется кровью за счёт изменения геометрической формы поперечного сечения (при нулевом давлении). Только после этого давление начинает повышаться.

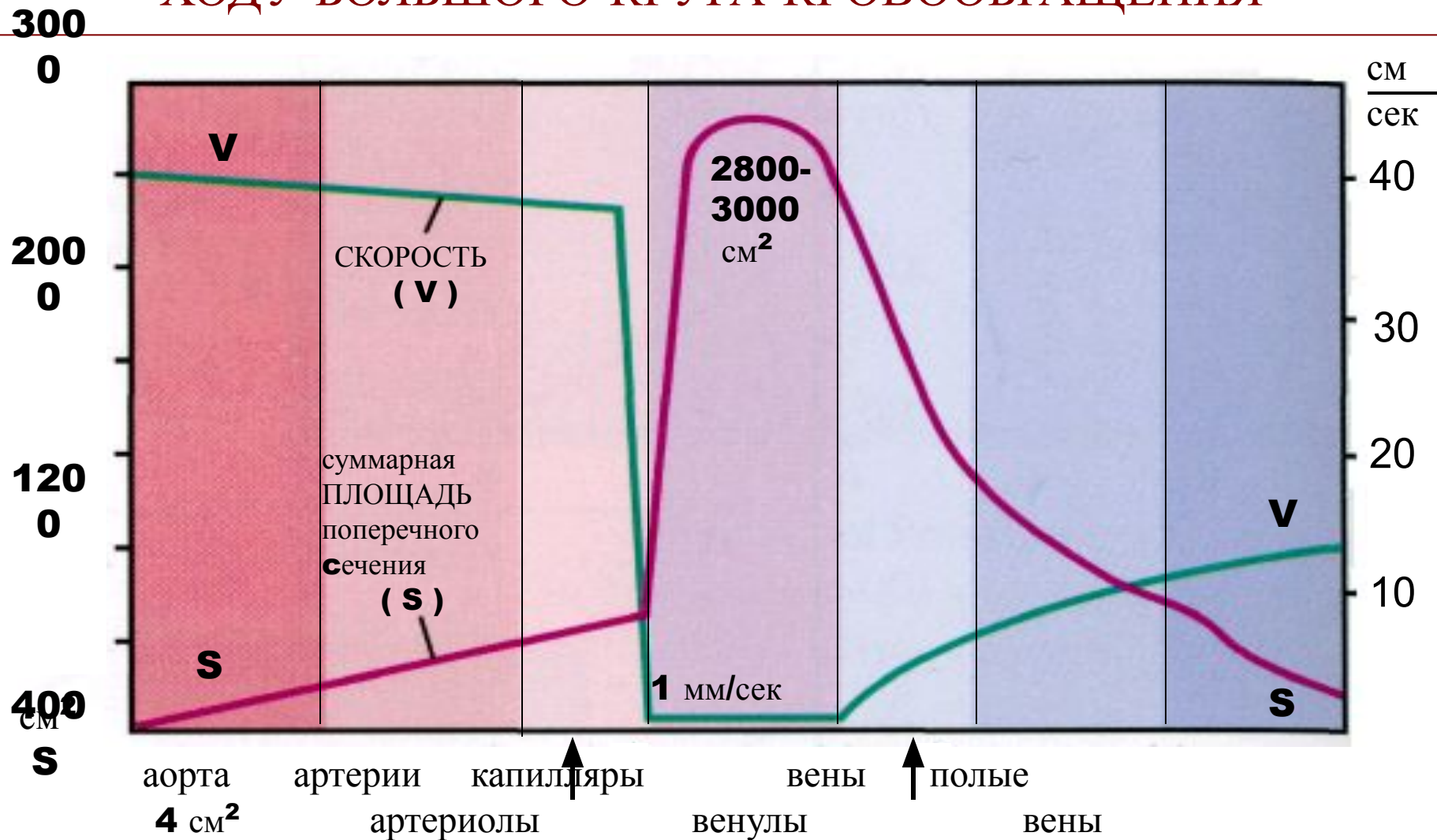
ОБЪЁМ КРОВИ В РАЗЛИЧНЫХ ОТДЕЛАХ СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ



ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ КРОВИ ПО ХОДУ СОСУДИСТОГО РУСЛА



ИЗМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ КРОВОТОКА ПО ХОДУ БОЛЬШОГО КРУГА КРОВООБРАЩЕНИЯ

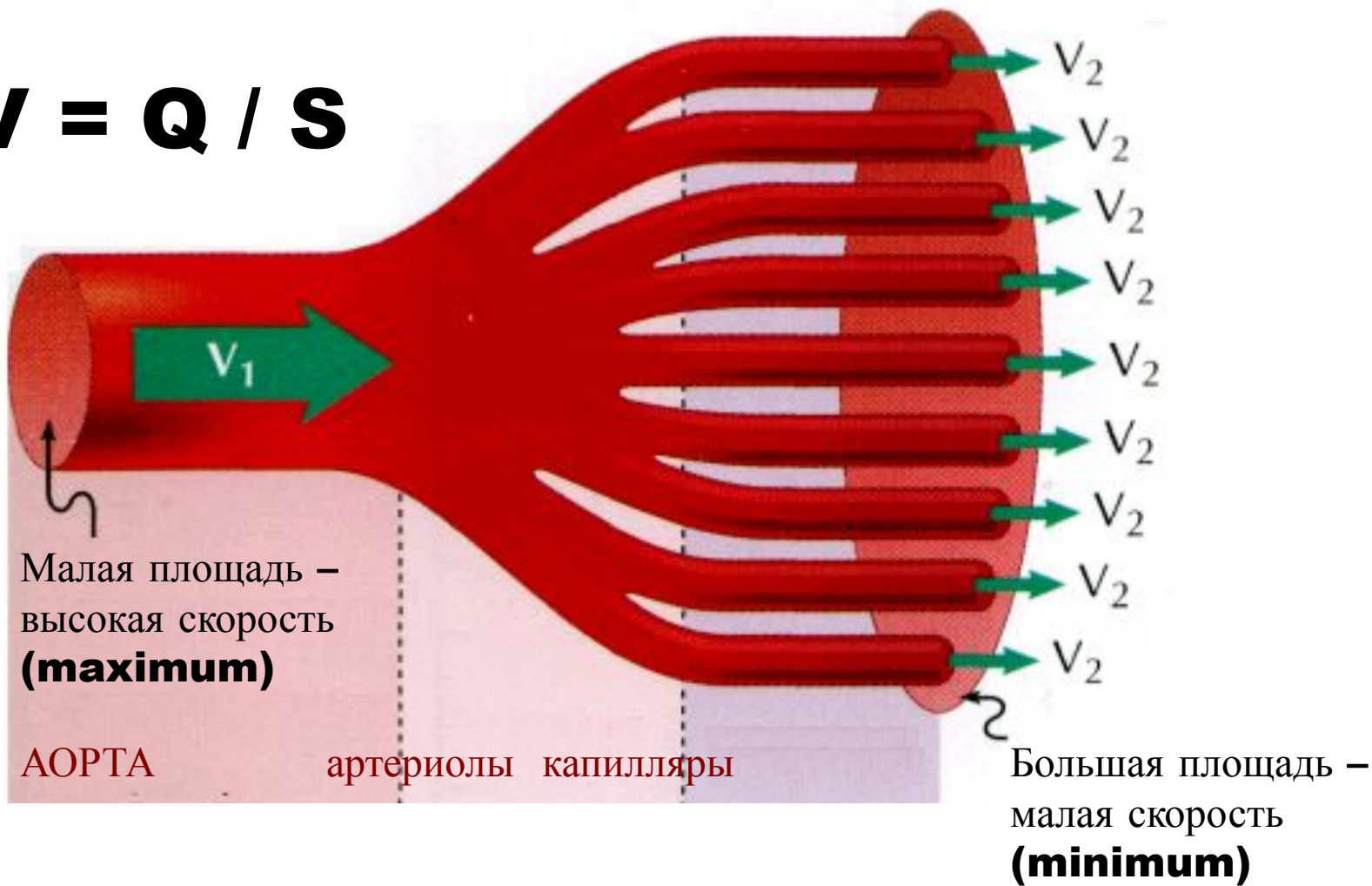


$$V = Q / S$$

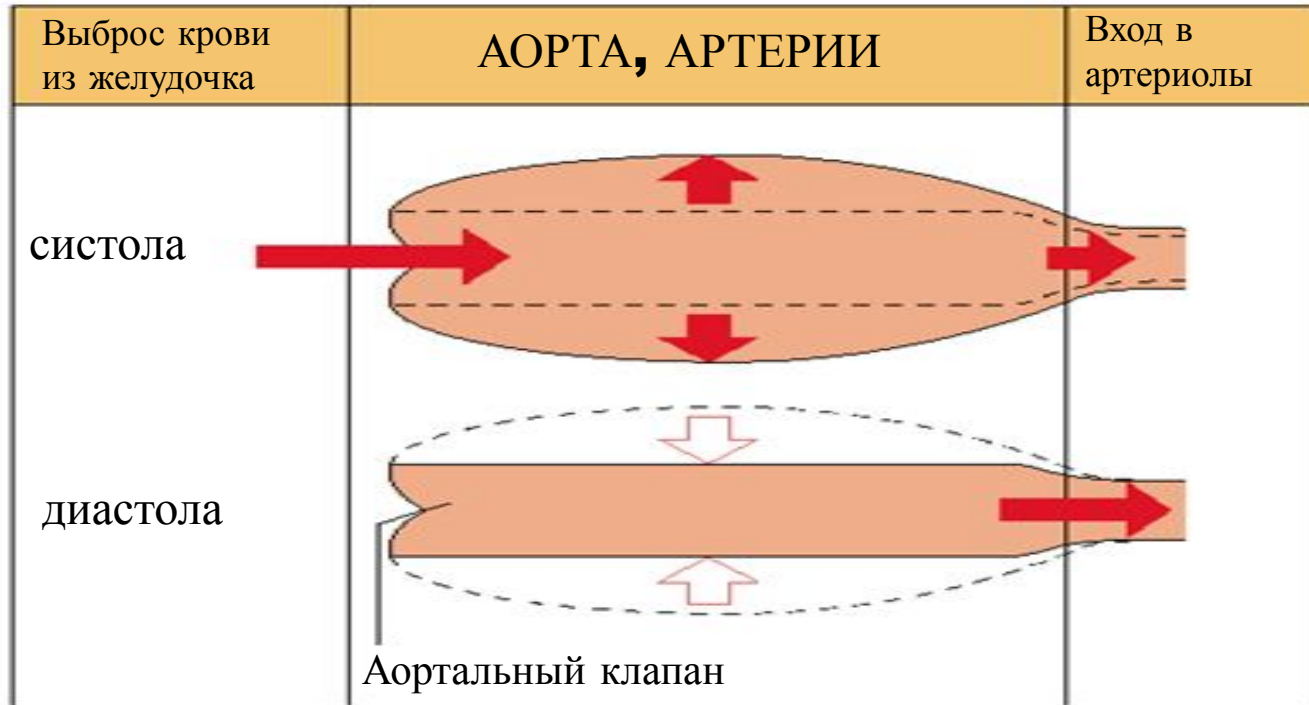
Линейная скорость обратно пропорциональна суммарной площади поперечного сечения сосудов

ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ КРОВОТОКА

$$V = Q / S$$



ДВИЖЕНИЕ КРОВИ ПО АРТЕРИЯМ

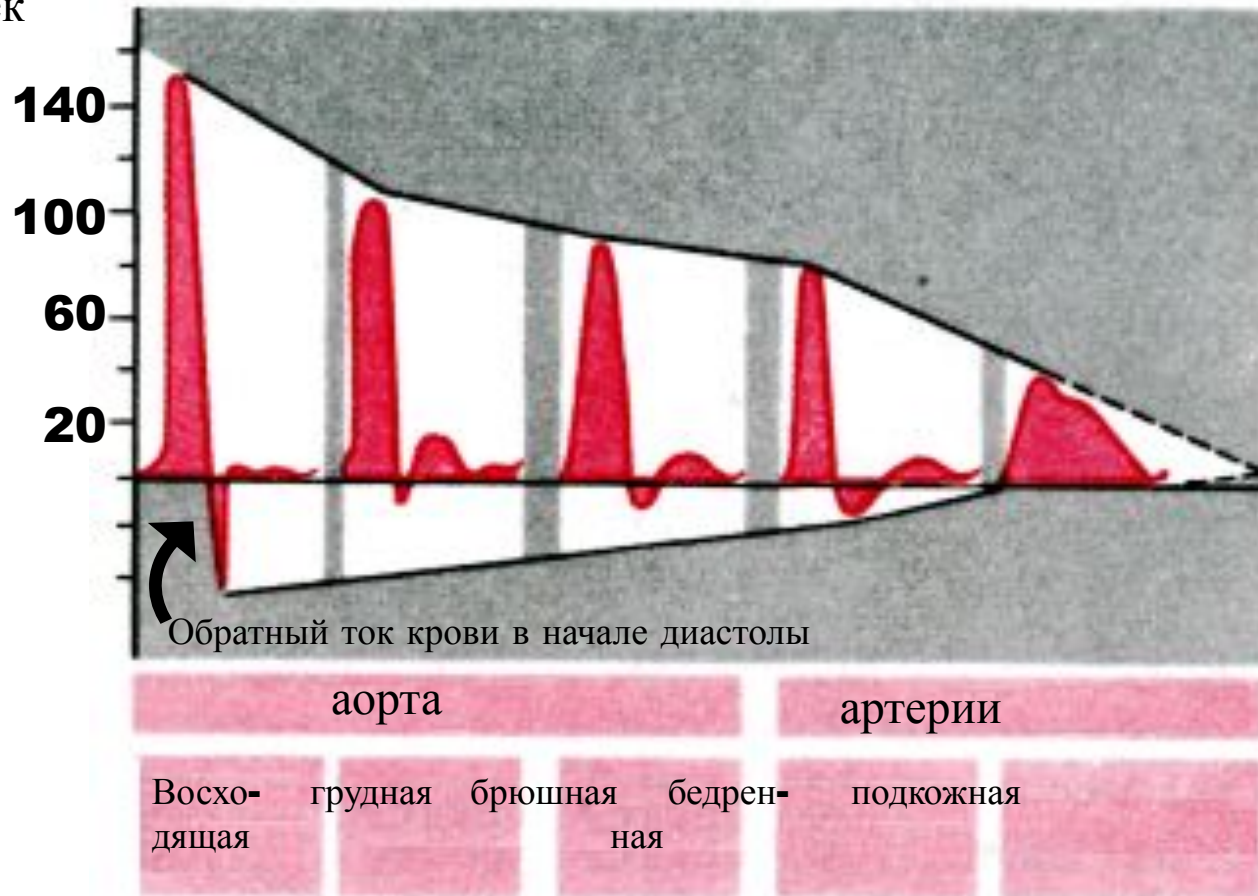


ОСОБЕННОСТИ АРТЕРИАЛЬНОГО КРОВОТОКА:

- (1) высокое кровяное давление
- (2) пульсовые колебания скорости кровотока, давления, объёма

ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ КРОВОТОКА В РАЗНЫХ ОТДЕЛАХ АРТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

См / сек

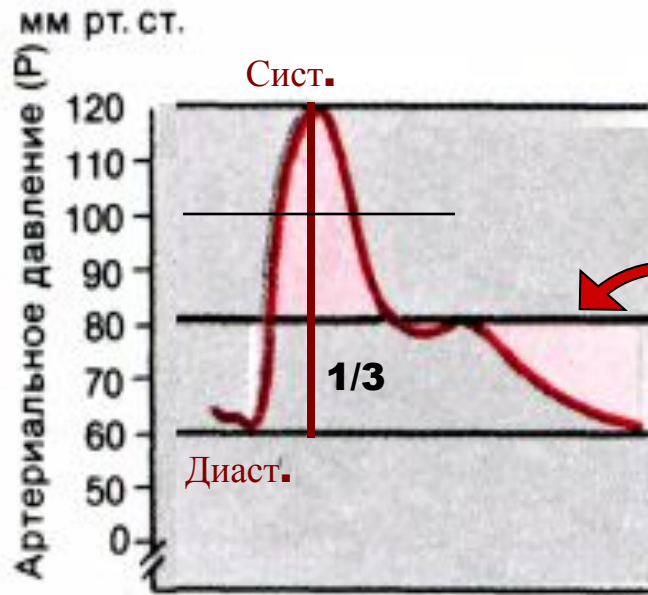


ДАВЛЕНИЕ КРОВИ В РАЗНЫХ ОТДЕЛАХ АРТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

мм рт.ст.



АРТЕРИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ



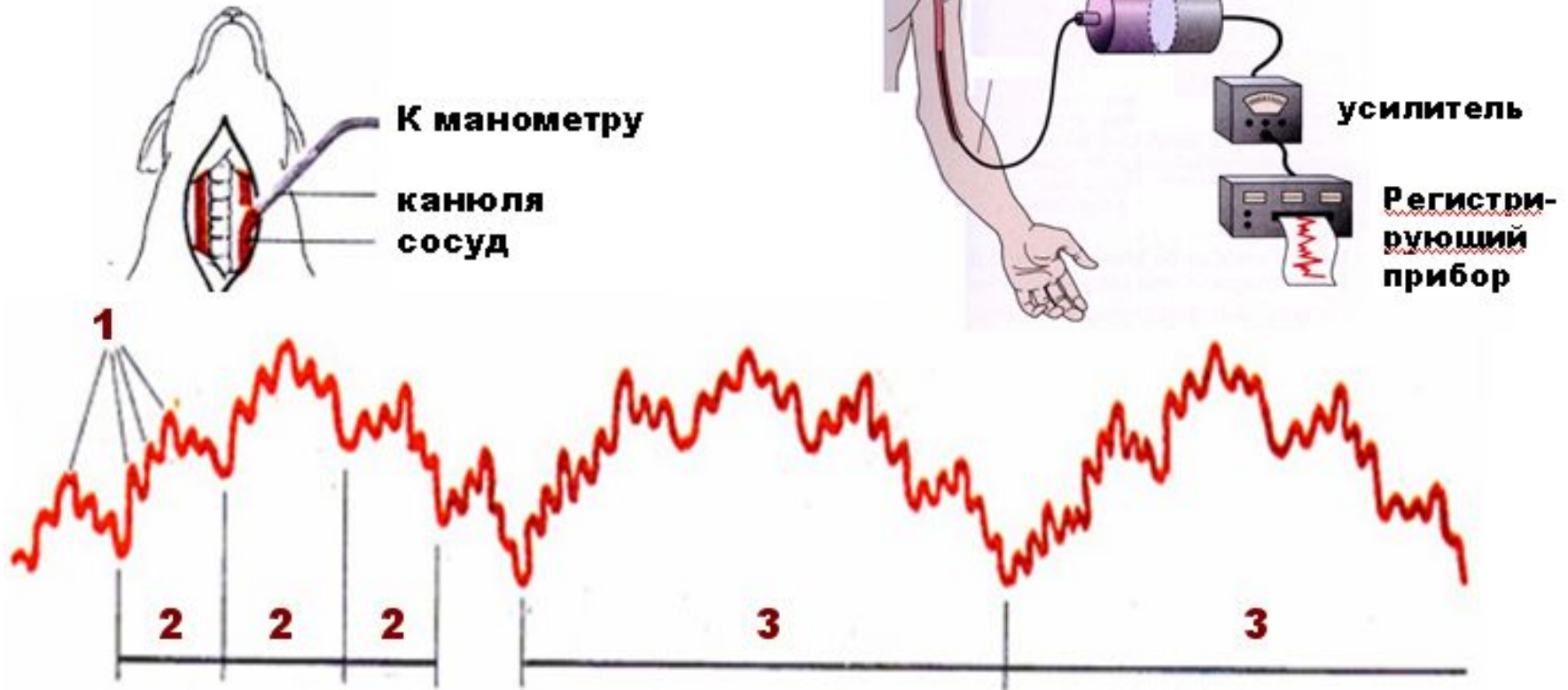
плечевая
артерия

- Систолическое давление (P_c) – максимальное
- Диастолическое давление (P_d) – минимальное
- Пульсовое давление = $P_c - P_d$
- **СРЕДНЕЕ АРТЕРИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ** – движущая сила кровотока (P_{cp}) – это постоянный уровень давления, который обеспечивает такой же гемодинамический эффект (Q), как и реальное пульсирующее давление.

$$P_{cp} = P_d + \frac{1}{3} (P_c - P_d)$$

ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

ПРЯМОЙ (КРОВАВЫЙ) МЕТОД



1 – волны **1-го** порядка (пульсовые) – **70-80** в минуту

2 – волны **2-го** порядка (дыхательные) – **12-16** в минуту

3 – волны **3-го** порядка (связаны с изменением тонуса сосудодвигательного центра, например, при гипоксии) –
1-2 в минуту.

НЕПРЯМЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АД (ПАЛЬПАТОРНЫЙ И АУСКУЛЬТАТИВНЫЙ)

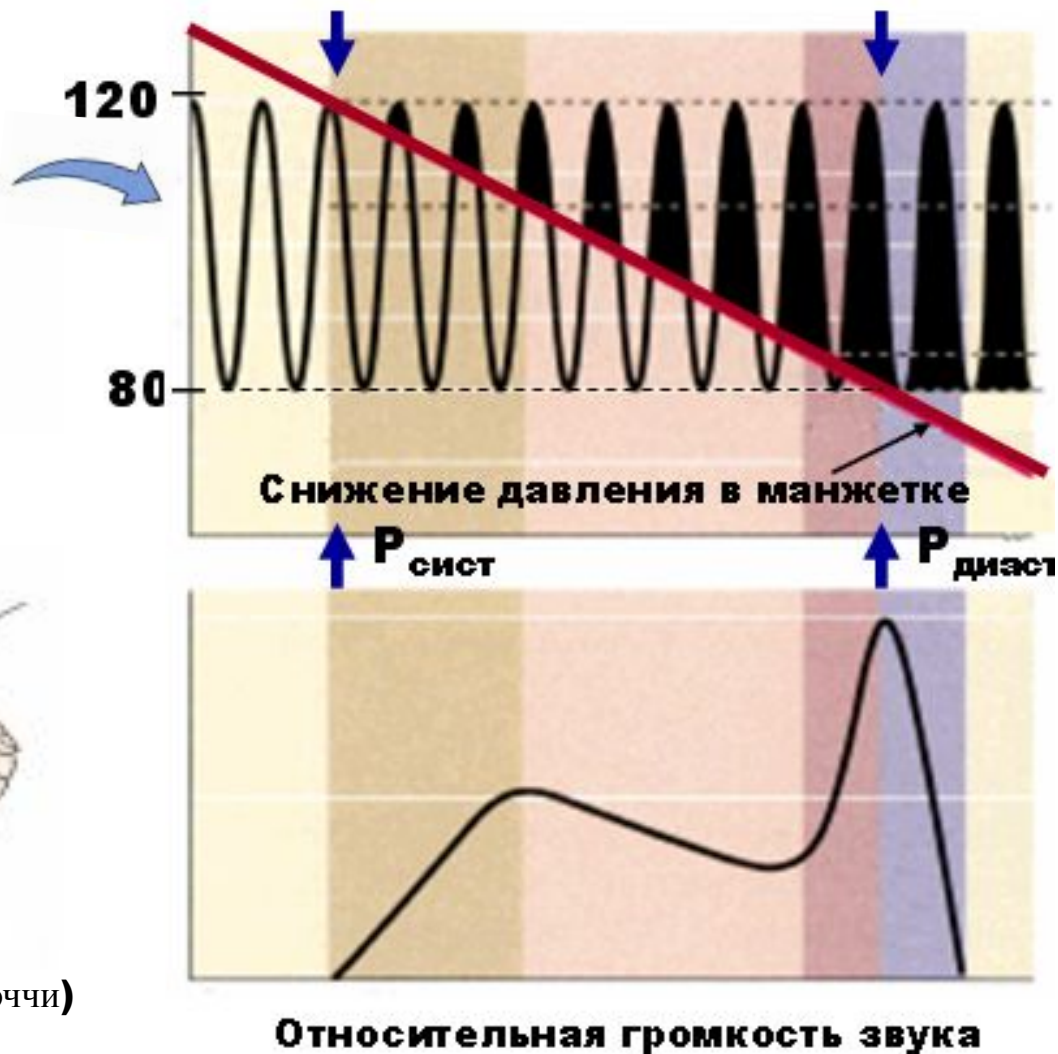


Ртутный манометр

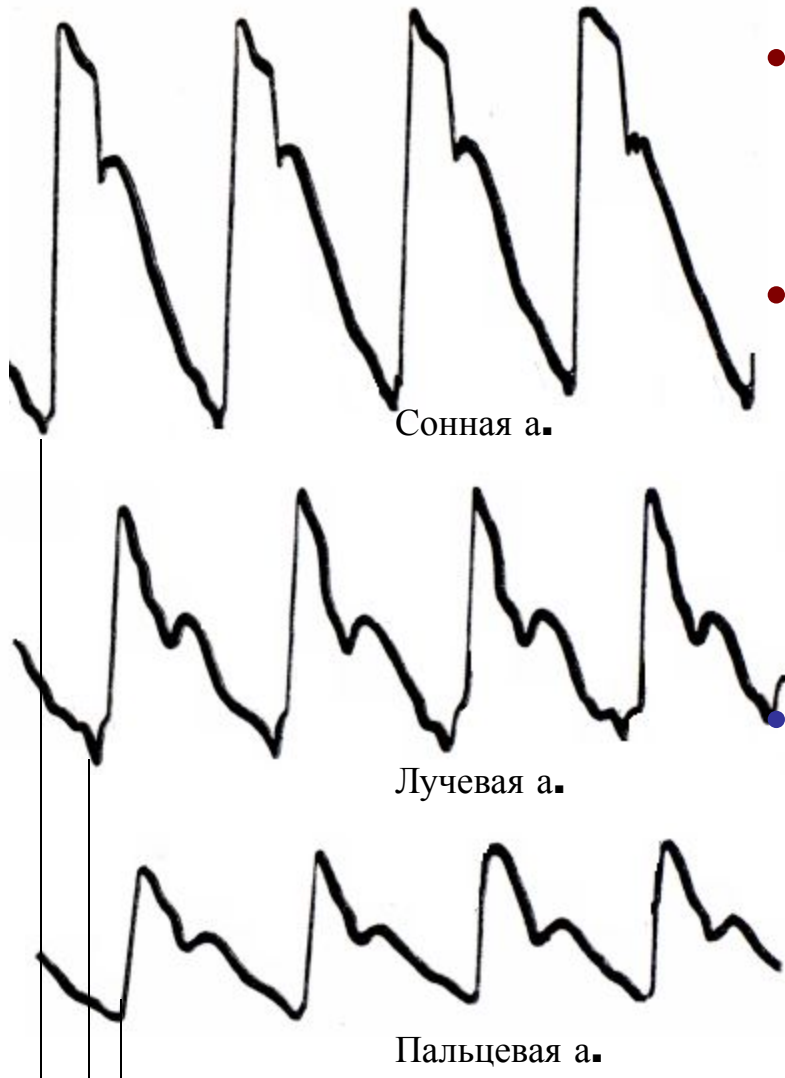


Аускультация (метод Короткова)

Пальпация пульса (метод Рива-Роччи)



АРТЕРИАЛЬНЫЙ ПУЛЬС СФИГМОГРАФИЯ



- **Артериальный пульс** – колебание стенки артерии, связанное с увеличением объёма и давления крови в ней.

- **Сфигмография** – запись артериального пульса (с помощью датчика, расположенного на поверхности кожи над пульсирующей артерией).

Датчик преобразует механические колебания в электрические.

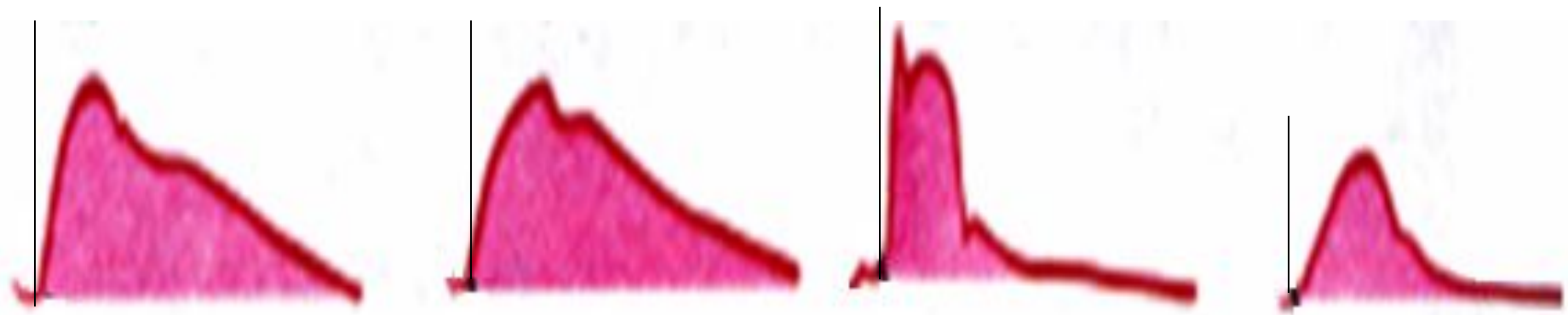
Амплитуда и форма СФГ зависят от растяжимости артерии (эластичность, тонус) и величины систолического выброса.

СФИГМОГРАММА



- **АНАКРОТА (а)** – восходящая часть кривой
- **КАТАКРОТА (к)** – нисходящая часть кривой
- **ИНЦИЗУРА** – захлопывание аортального клапана
- **ДИКРОТИЧЕСКИЙ ПОДЪЁМ** – колебание стенки сосуда, связанное с прохождением небольшого объёма крови, отражённого от аортального клапана

СФИГМОГРАММА ПОДКЛЮЧИЧНОЙ АРТЕРИИ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ГЕМОДИНАМИКИ



Норма

высокое
периферическое
сопротивление

низкое
периферическое
сопротивление

систолич.
объём

низкий

ПУЛЬСОВАЯ ВОЛНА

Пульсовые колебания кровотока, давления и объёма распространяются в упругой жидкой среде (в потоке крови) в виде пульсовой волны.

Скорость распространения пульсовой волны выше, чем скорость кровотока.

Она зависит **(1)** от растяжимости стенки сосуда, **(2)** от отношения толщины стенки сосуда к радиусу.

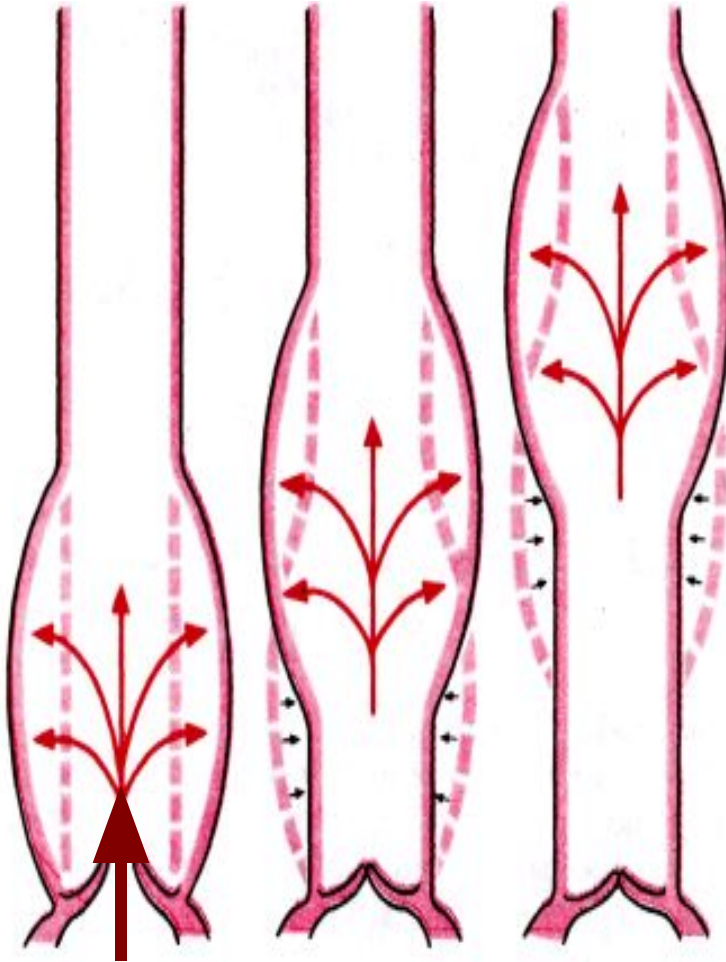
Чем меньше растяжимость и толще стенка, тем больше скорость распространения пульсовой волны:

аорта – **4-6** м/сек

лучевая а. – **8-12** м/сек

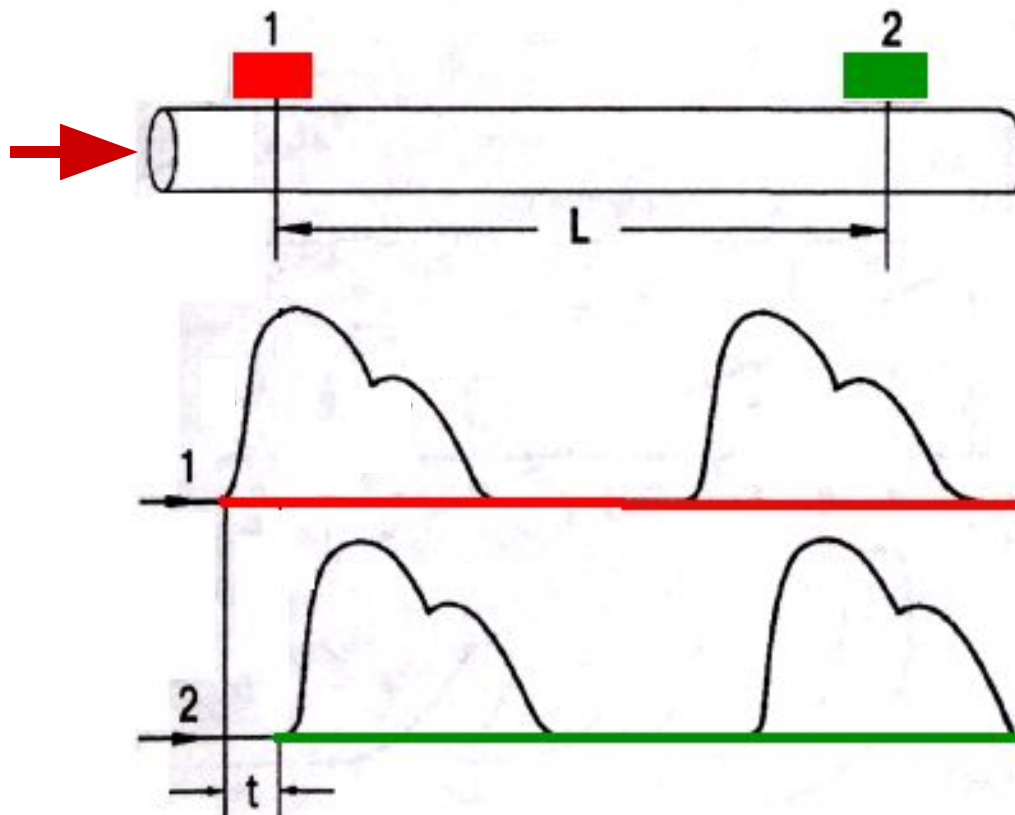
С возрастом скорость увеличивается, т.к. развивается склероз сосудов.

При гипертонии напряжение сосудистой стенки (тонус) увеличивается, поэтому скорость распространения пульсовой волны также увеличивается.



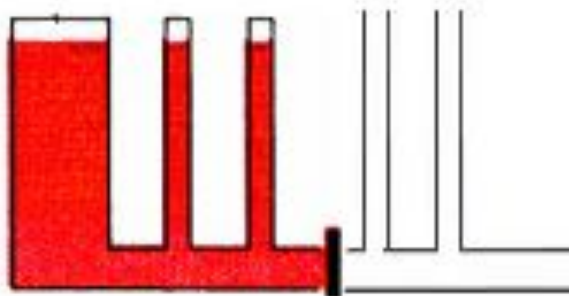
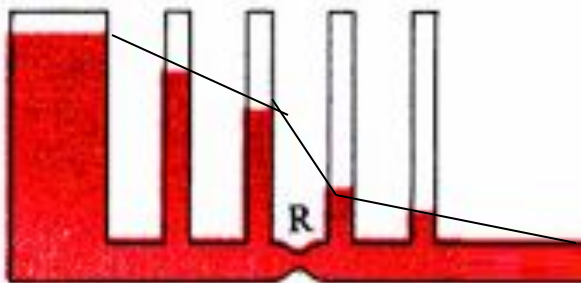
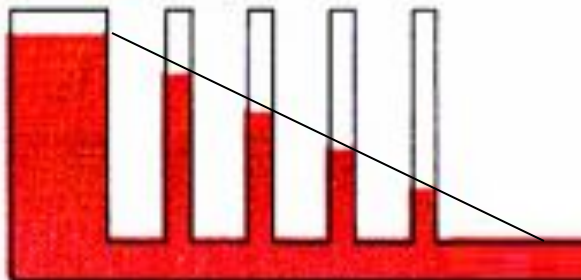
аортальный клапан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ (С ПОМОЩЬЮ ДВУХ СФИГМОГРАФИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ)



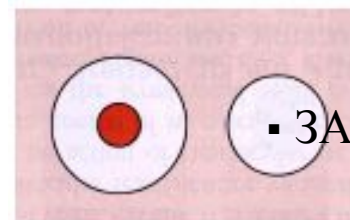
$$V = \frac{L}{t} \text{ м/с}$$

АРТЕРИОЛЫ – КРАНЫ СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ



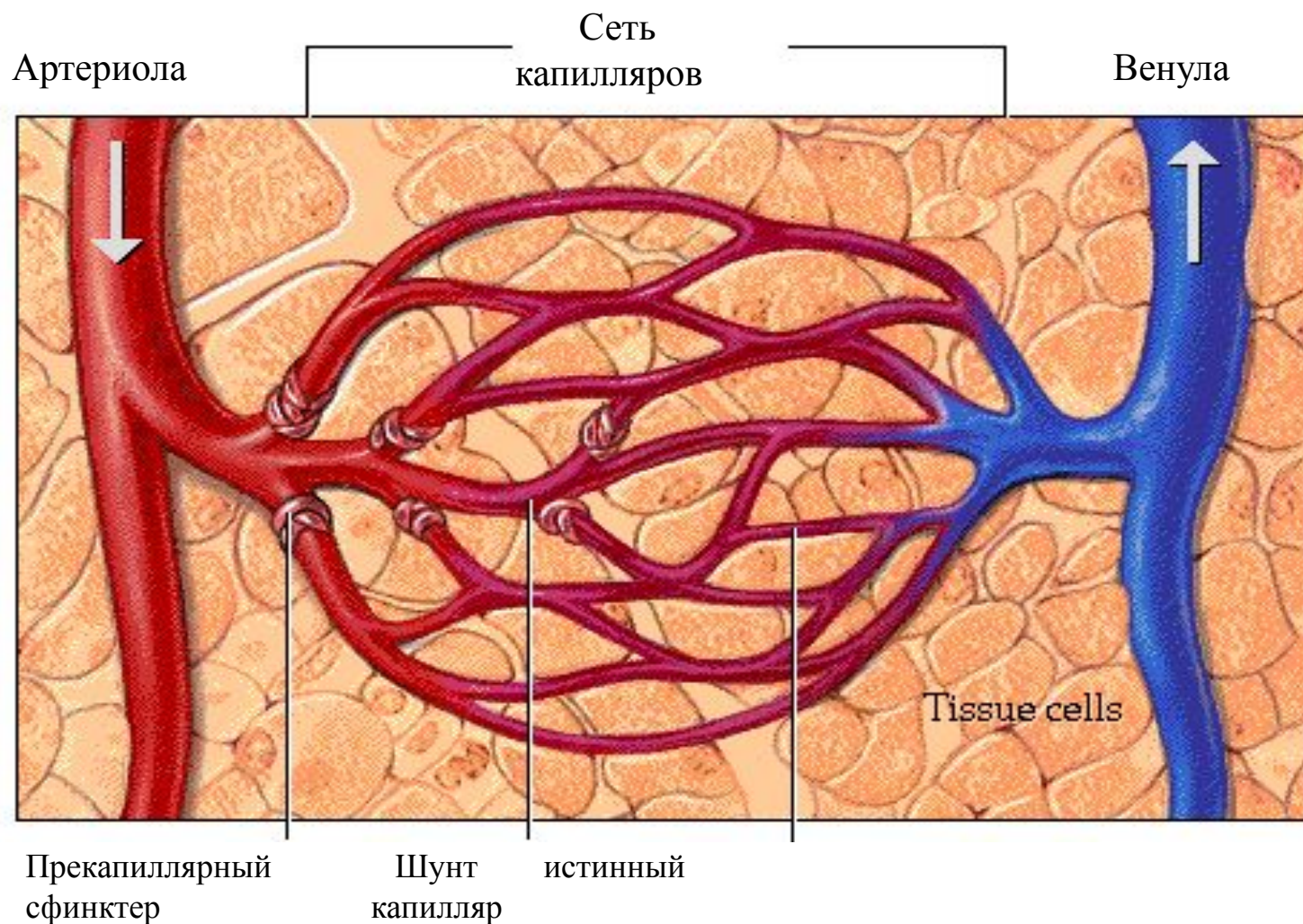
- АРТЕРИОЛЫ – микрососуды с толстой мышечной стенкой
- Оказывают максимальное сопротивление кровотоку (**R**)
- С одной стороны, поддерживают высокое давление в крупных артериях
- С другой стороны, регулируют давление и кровотоки в капиллярах
- Артериолы при спазме могут полностью закрываться.
- В таком случае кровь в капилляры не течёт, капилляры не действуют.

ОТКР

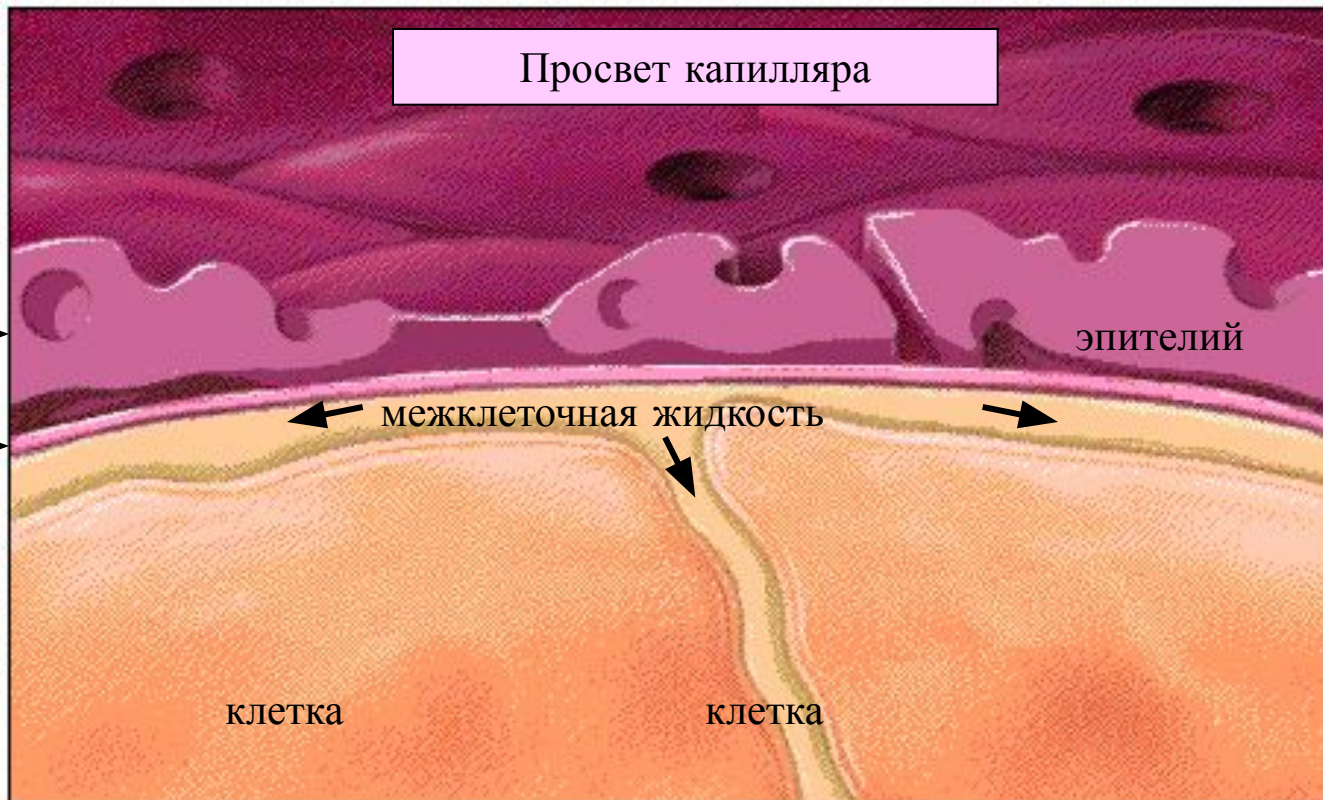


▪ ЗАКР

МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОЕ РУСЛО КАПИЛЛЯРЫ

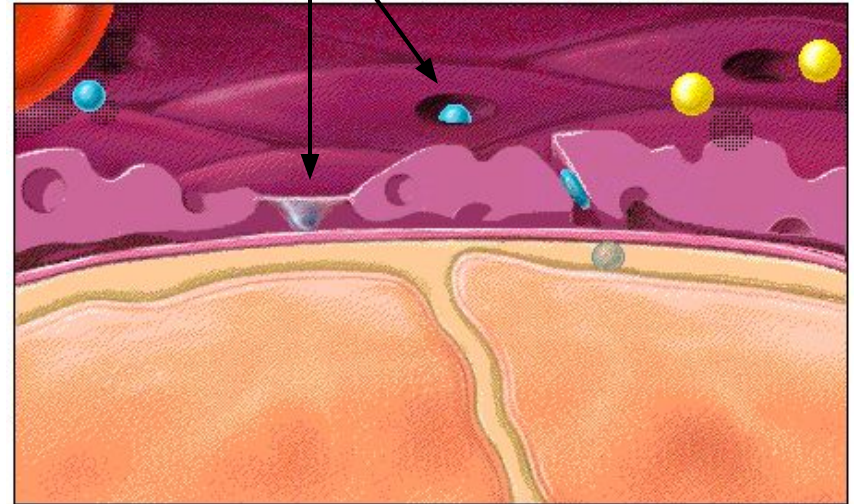
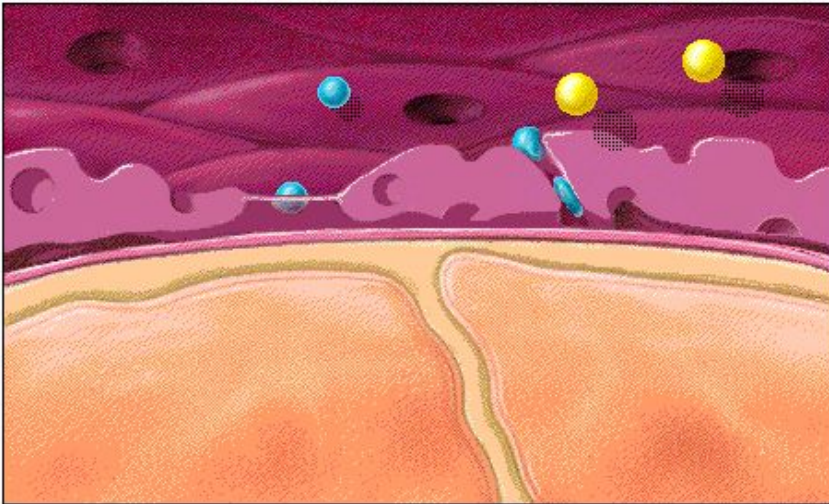


СТЕНКА КАПИЛЛЯРА

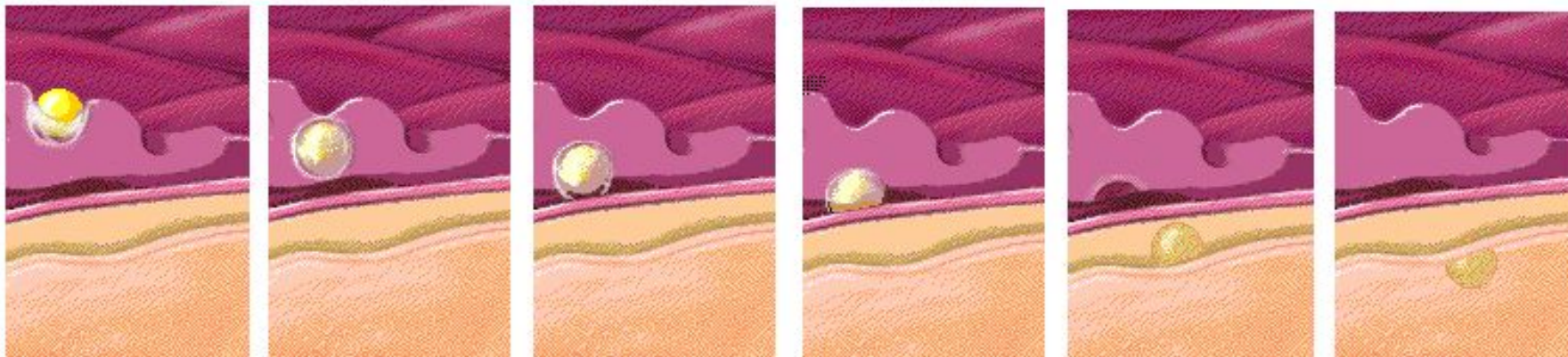


ДИФФУЗИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ МОЛЕКУЛ ЧЕРЕЗ МЕЖКЛЕТОЧНЫЕ ЩЕЛИ И ФЕНЕСТРЫ

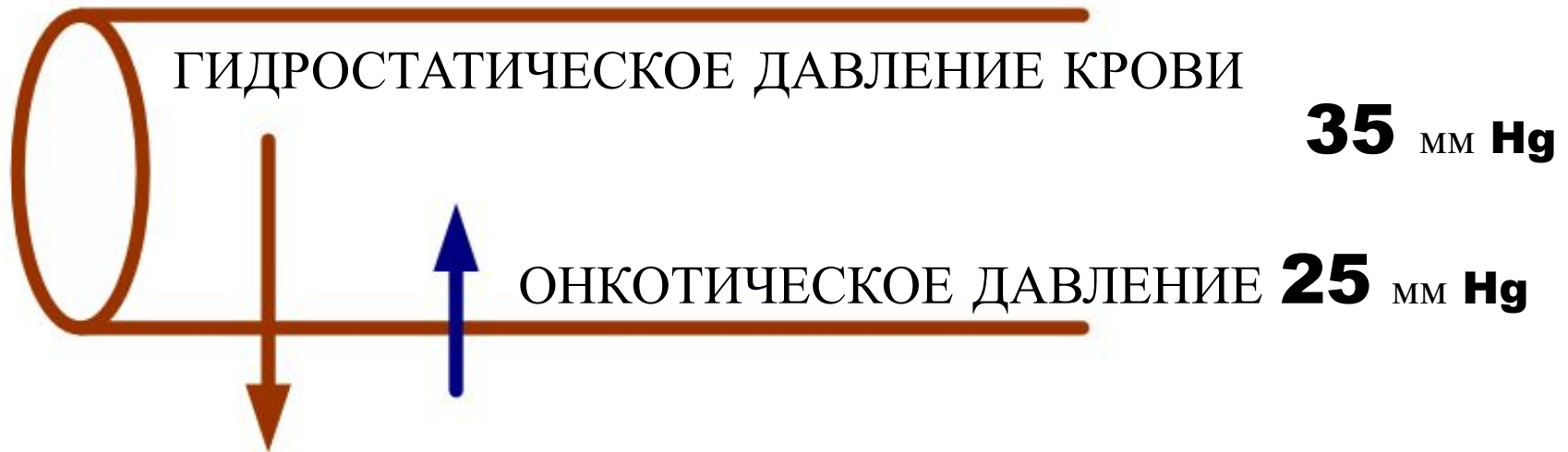
Фенестра (окно)



ТРАНСПОРТ КРУПНЫХ МОЛЕКУЛ ПУТЁМ ЭНДО- ЭКЗОЦИТОЗА



АРТЕРИАЛЬНЫЙ КОНЕЦ КАПИЛЛЯРА

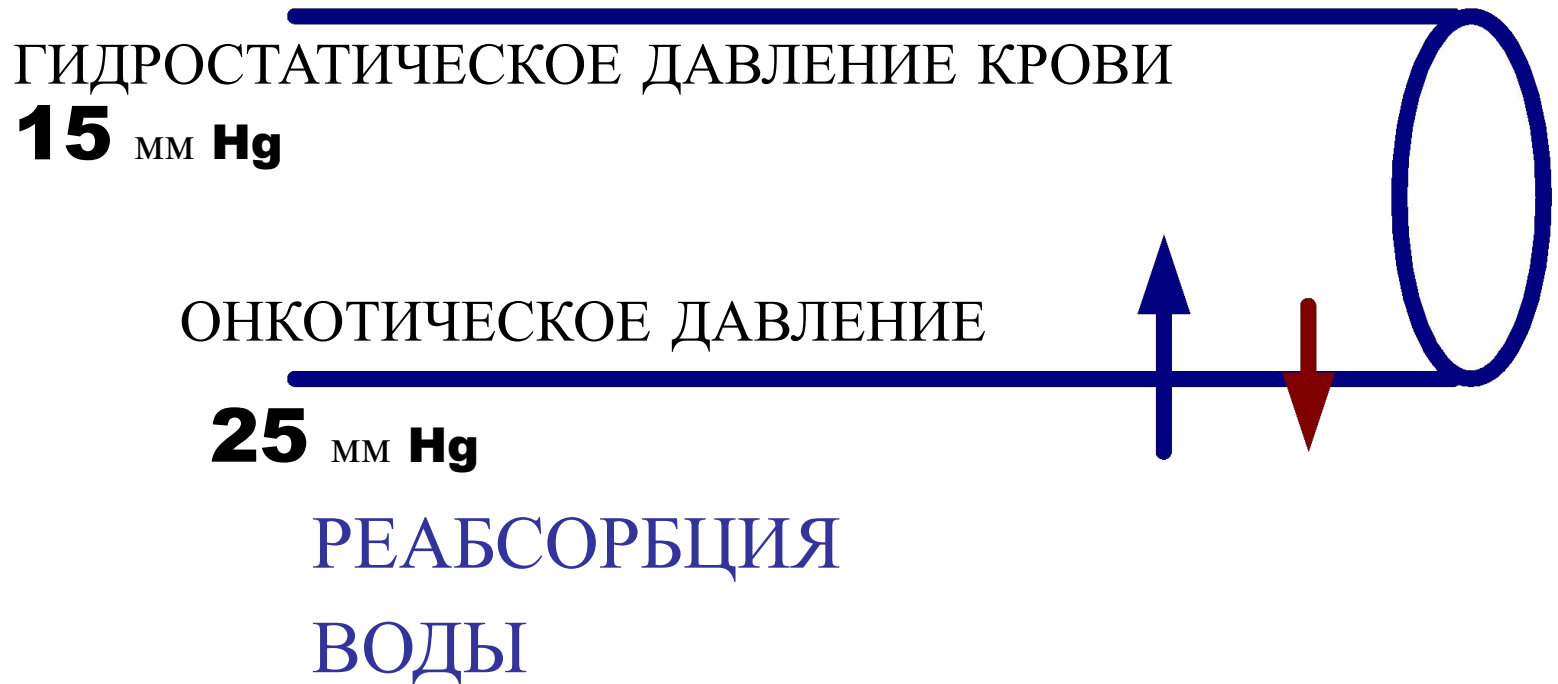


ФИЛЬТРАЦИЯ
ВОДЫ

$$\text{ФД} = 35 - 25 = 10 \text{ мм рт.ст.}$$

Фильтруется **~20** л воды за сутки

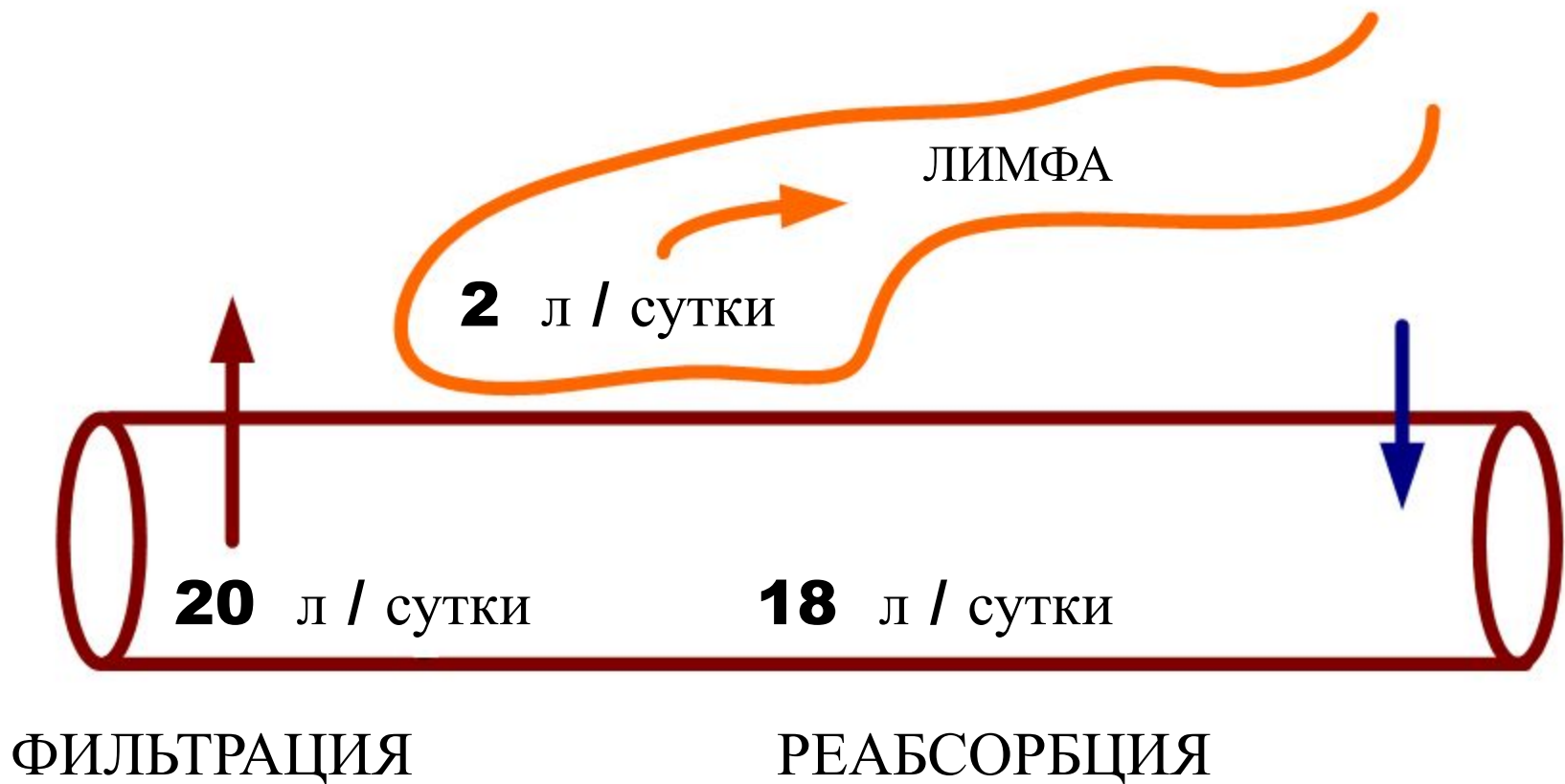
ВЕНОЗНЫЙ КОНЕЦ КАПИЛЛЯРА



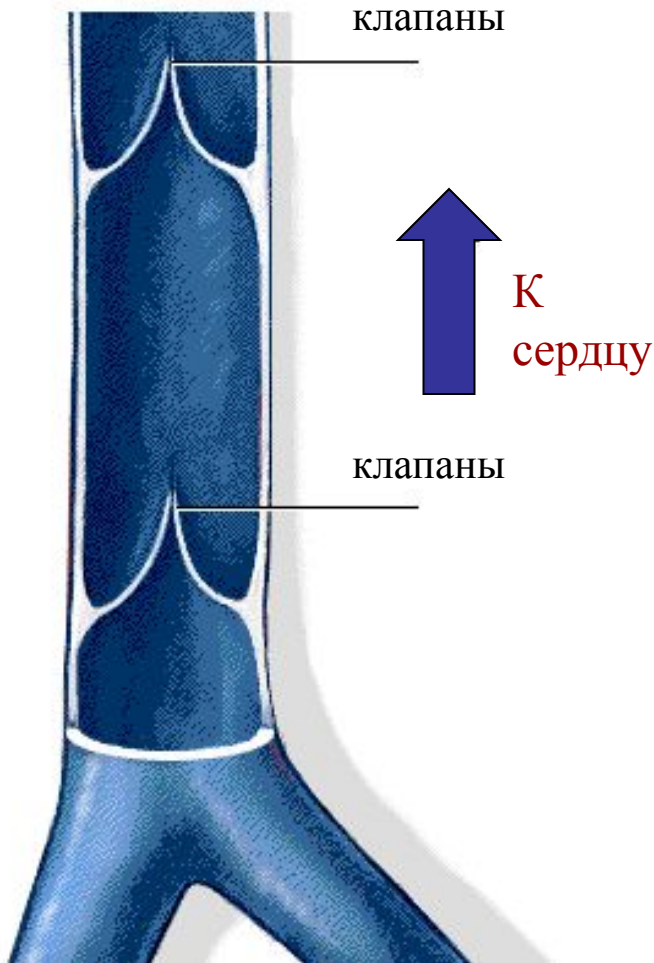
$$\text{РД} = 25 - 15 = 10 \text{ мм рт.ст.}$$

Реабсорбируется **~18** л за сутки

~2 л ВОДЫ за СУТКИ ОТВОДИТСЯ ИЗ
ИНТЕРСТИЦИАЛЬНОГО пр-ва в составе
ЛИМФЫ



ДВИЖЕНИЕ КРОВИ ПО ВЕНАМ



Градиент давления в венозной системе
низкий: **15 мм Hg** **0** →

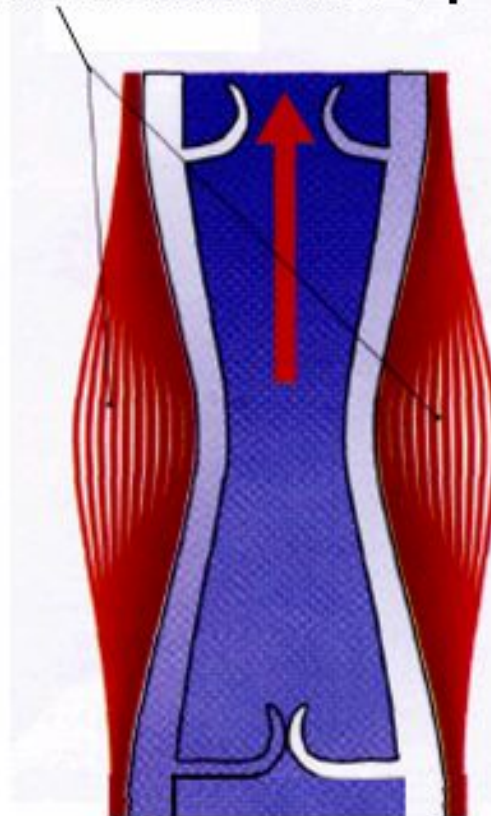
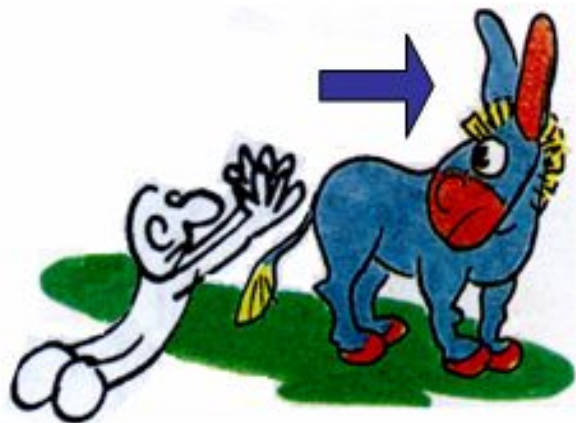
Движению крови по направлению к сердцу способствуют дополнительные факторы:

- Клапаны вен
- Сокращение скелетных мышц («мышечный насос»)
- Дыхательные движения («дыхательный насос») – так называемое присасывающее действие грудной клетки
- Присасывающее действие сердца («сердечный насос»)

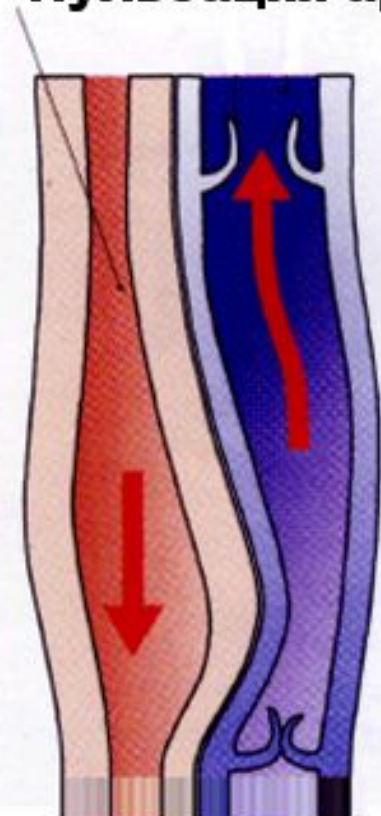
«МЫШЕЧНЫЙ НАСОС»

Сокращение скелетных мышц

Пульсация артерии

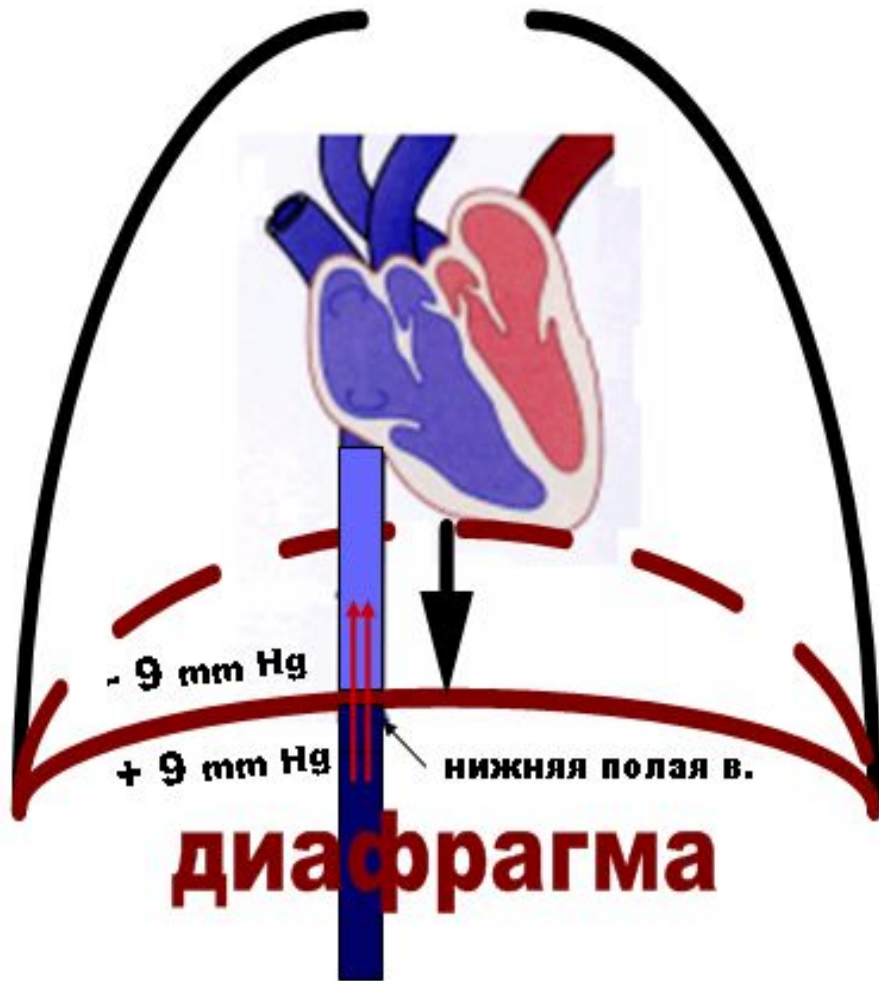


Клапаны



Клапаны

«ДЫХАТЕЛЬНЫЙ НАСОС»

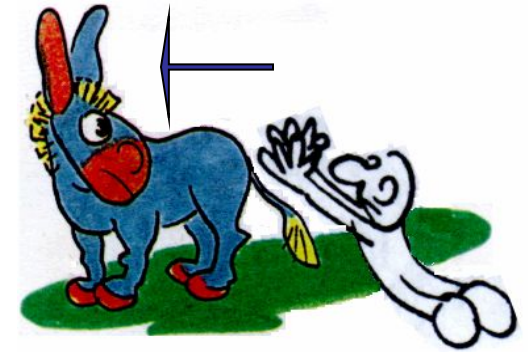


Во время вдоха купол диафрагмы уплощается.

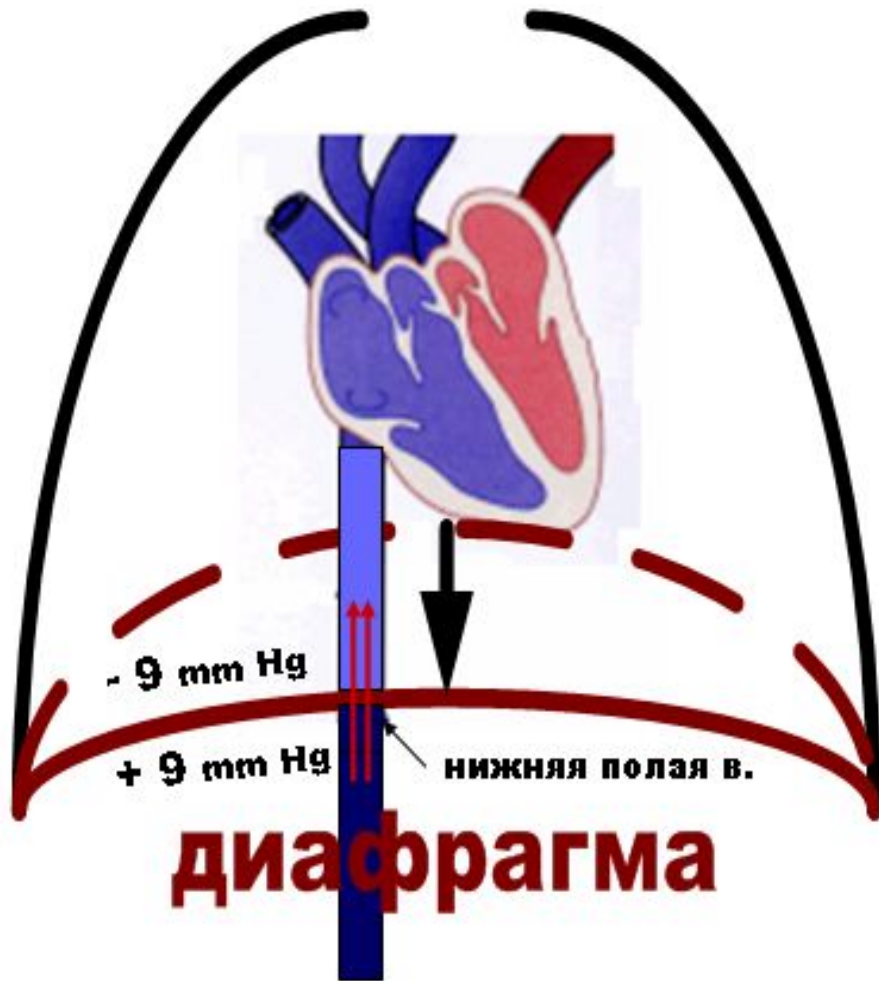
Внутрибрюшное давление увеличивается (а также давление в брюшной части полой вены).

Плевральное давление становится более отрицательным (уменьшается давление в грудной части полой вены).

Дополнительный градиент давления увеличивает венозный возврат (ВВ).



«ДЫХАТЕЛЬНЫЙ НАСОС»

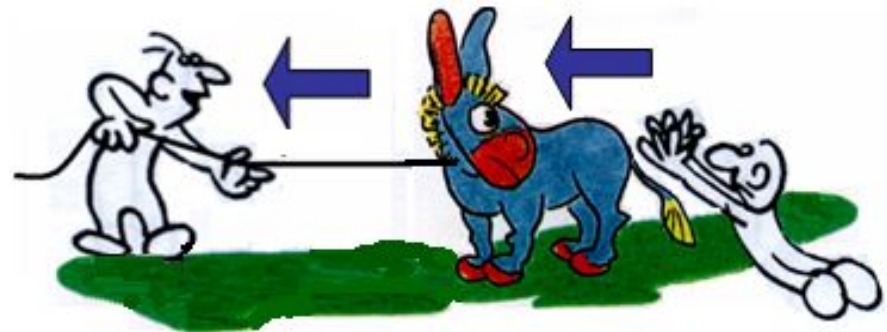


Во время вдоха купол диафрагмы уплощается.

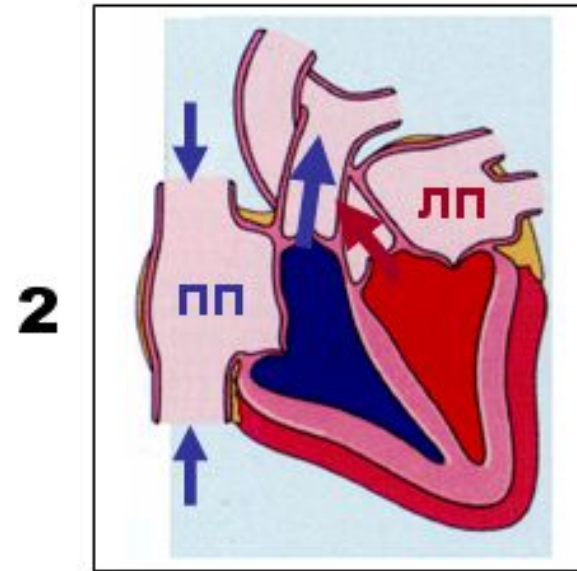
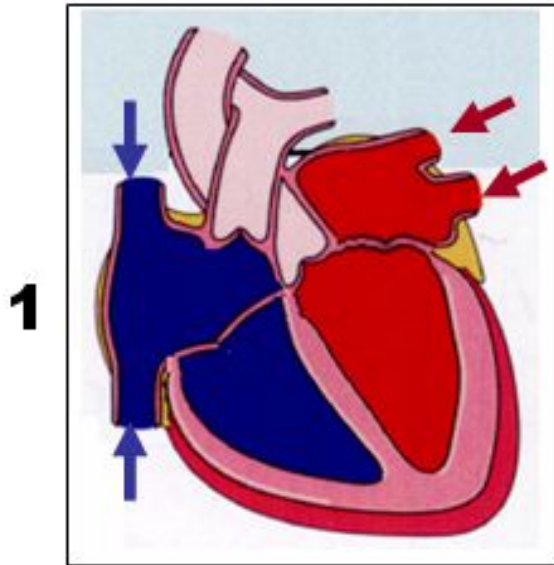
Внутрибрюшное давление увеличивается (а также давление в брюшной части полой вены).

Плевральное давление становится более отрицательным (уменьшается давление в грудной части полой вены).

Дополнительный градиент давления увеличивает венозный возврат (ВВ).



«СЕРДЕЧНЫЙ НАСОС»



Присасывающий эффект во время сердечного цикла возникает

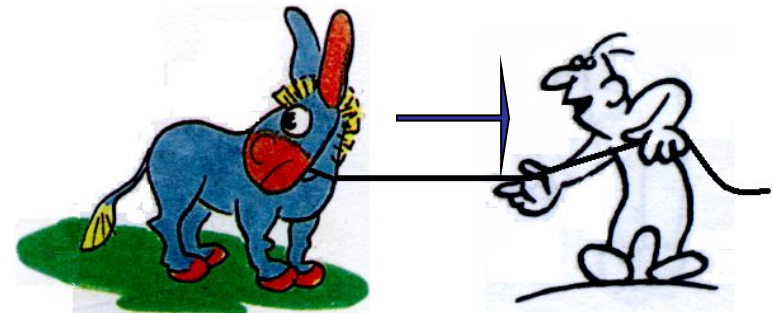
(1) в самом начале диастолы предсердий и

(2) во время фазы быстрого изгнания крови из желудочков, когда атриовентрикулярная перегородка смещается к верхушке сердца.

Давление в предсердиях становится

отрицательным: - 2 мм рт.ст.

- 4 мм рт.ст.



ВЕНОЗНЫЙ ВОЗВРАТ (ВВ) – ПРИТОК ВЕНОЗНОЙ КРОВИ К СЕРДЦУ

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$

- **Q** - Венозный возврат (равен сердечному выбросу) **ВВ = СВ = 5**
л/мин (в покое)
- **P₁ = 7** мм рт.ст. = СДН (среднее давление наполнения)
- **P₂ = 0** = ЦВД (центральное венозное давление)
- **R** = сопротивление притоку крови к сердцу по полым венам (в норме очень низкое)

$$\text{ВВ} = \frac{\text{СДН} - \text{ЦВД}}{\mathbf{R}}$$

СРЕДНЕЕ ДАВЛЕНИЕ НАПОЛНЕНИЯ

- СДН — давление, которое устанавливается во всех отделах сердечно-сосудистой системы сразу после остановки сердца.
- СДН зависит от объема циркулирующей крови (ОЦК) и ёмкости сосудистого русла (С):

$$\text{СДН} = \frac{\text{ОЦК}}{С}$$


5 л крови в сосудистом русле создают СДН = **7** мм рт.ст.

Если в результате кровопотери ОЦК падает до **4** литров, СДН = **0** (т.е. венозный возврат крови к сердцу прекращается, несмотря на усиленную работу сердца) – **ГИПОВОЛЕМИЧЕСКИЙ ШОК**

В этой ситуации уменьшение ёмкости за счёт спазма сосудов (под влиянием симпатической нервной системы) способствует поддержанию некоторого СДН (но недолго).

КОНЕЦ



ДАВЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ЗАВИСИТ ОТ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$

↓ ↓



$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R}$$

↑ ↑



