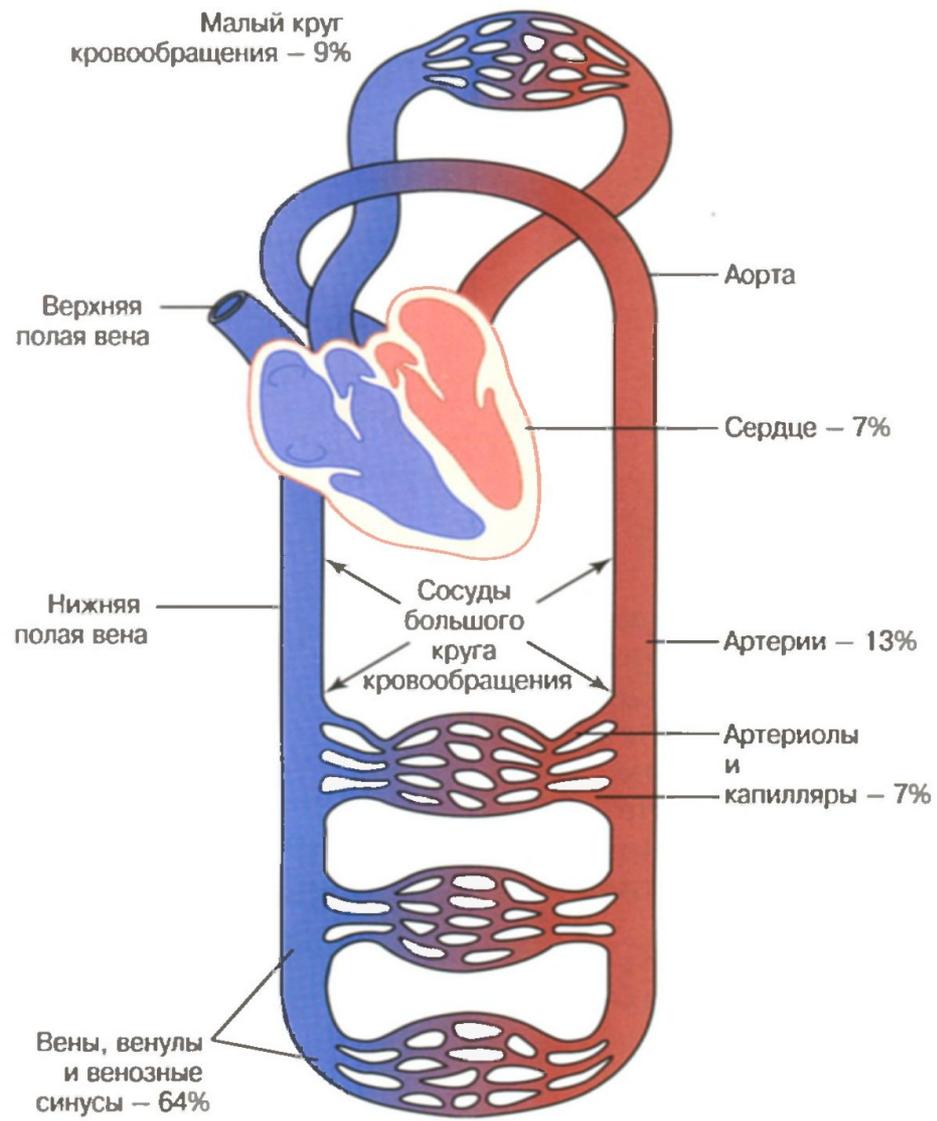


Прикладная физика кровообращения

Кровообращение как система

- Все вокруг нас – системы
- Система :
 - комплекс элементов,
 - которые связаны друг с другом
 - и взаимодействуют между собой определенным образом
 - для выполнения определенной цели



The diagram shows the distribution of blood volume in the human body. The largest portion, 64%, is contained in the venous system, including veins, venules, and venous sinuses. The arterial system accounts for 13%, and the capillary and arteriole network for 7%. The heart itself holds 7% of the blood volume. The pulmonary circulation (small circle) holds 9%. The systemic circulation (large circle) is represented by the network of vessels surrounding the heart.

Цель системы кровообращения

- Основная цель – обеспечение транспорта питательных веществ к тканям
- Питательные вещества – глюкоза, вода, аминокислоты, жирные кислоты, кислород
- **КИСЛОРОД** – вещество, запасов которого в крови хватает на 5 мин жизнедеятельности

**ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ СИСТЕМЫ
КРОВООБРАЩЕНИЯ – ТРАНСПОРТ
КИСЛОРОДА К ТКАНЯМ**

Транспорт кислорода

$$DO_2 = \text{МОК} \times (1,34 \times H_v \times SaO_2)$$

доставка выброс содержание O₂

$$DO_2 = \text{МОК} \times (1,34 \times 140 \times 0,98) = \text{МОК} \times 184 \text{ мл/л}$$

**МОК в норме – 0,1 л/кг/мин или 3,9
л/м²/мин**

При МОК = 7 л/мин $DO_2 = 1288$ мл/мин или
718 мл/м²/мин

Потребление кислорода

- $VO_2 = \text{МОК} \times 1,34 \times \text{Hb} \times (\text{SaO}_2 - \text{SvO}_2)$

При $\text{SaO}_2=0,98$ и $\text{SvO}_2=0,73$

$$VO_2 = \text{МОК} \times 1,34 \times 140 \times (0,98 - 0,73) = \text{МОК} \times 47 \text{ мл/л}$$

При $\text{МОК} = 7 \text{ л/мин}$

$$VO_2 = 329 \text{ мл/мин или } 183 \text{ мл/м}^2\text{/мин}$$

- Коэффициент экстракции $O_2 = 0,25$ (0,2-0,3) – используется только 25% всего приносимого к тканям кислорода

Потребность тканей может увеличиться в 20 – 30 раз

- 1) Максимальный коэффициент экстракции – 50-60%, т.е. – экстракция может увеличиться лишь в 2-3 раза
- 2) Сердечный выброс может увеличиться лишь в 5-7 раз (в покое – 5 л/мин)
- 3) Третий вариант обеспечения потребности – перераспределение кровотока

Закон Ома

● **Сила тока = Напряжение / Сопротивление**

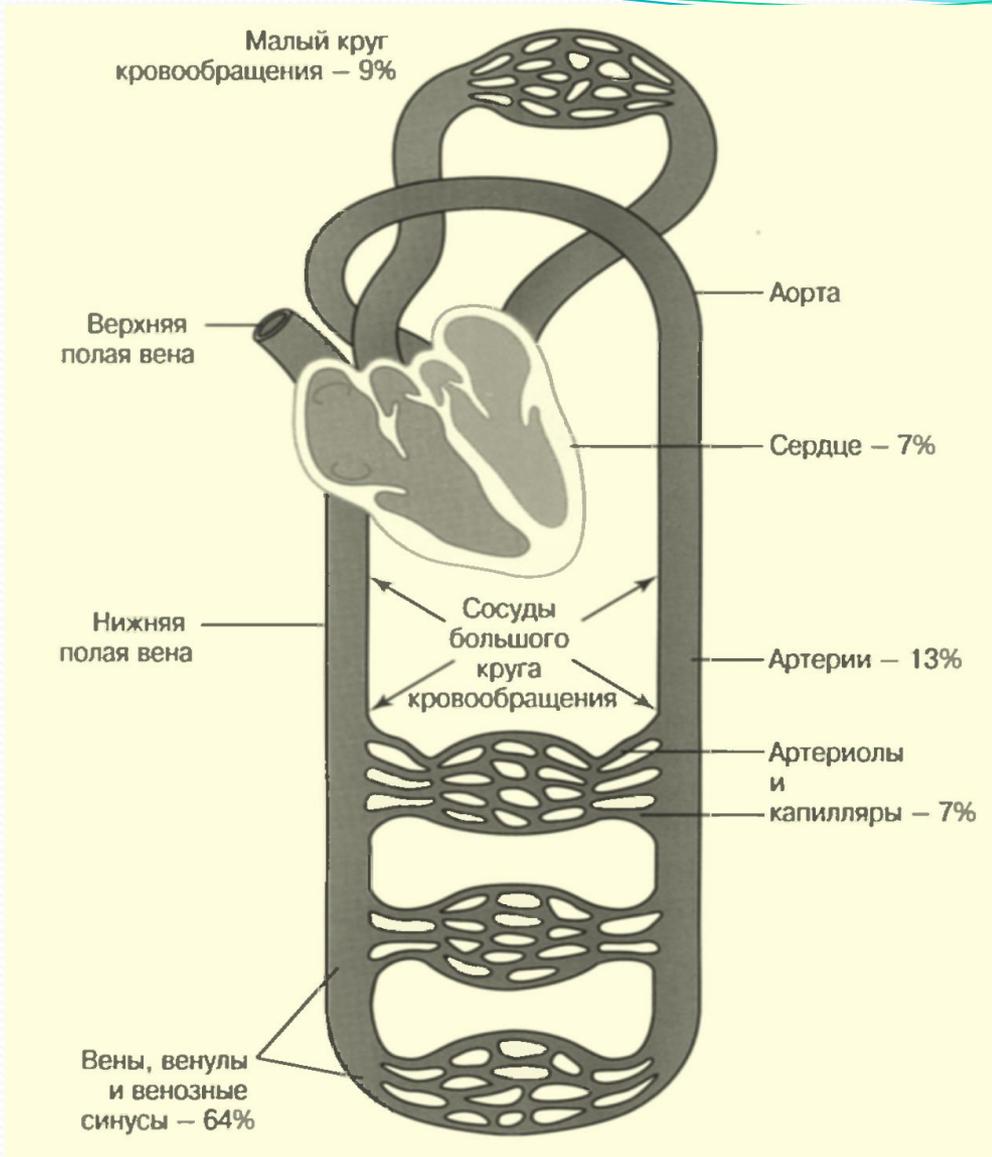
● **МОК = АД / ОПСС**

Георг Симон Ом (1789 - 1854)

Выдающийся немецкий физик. Изучал электрические явления и акустику. Первоначально публиковал свои открытия в газетах, за что и был уволен министром образования с должности школьного учителя.

С 1849 г. – профессор Мюнхенского университета.





Параллельно и последовательно

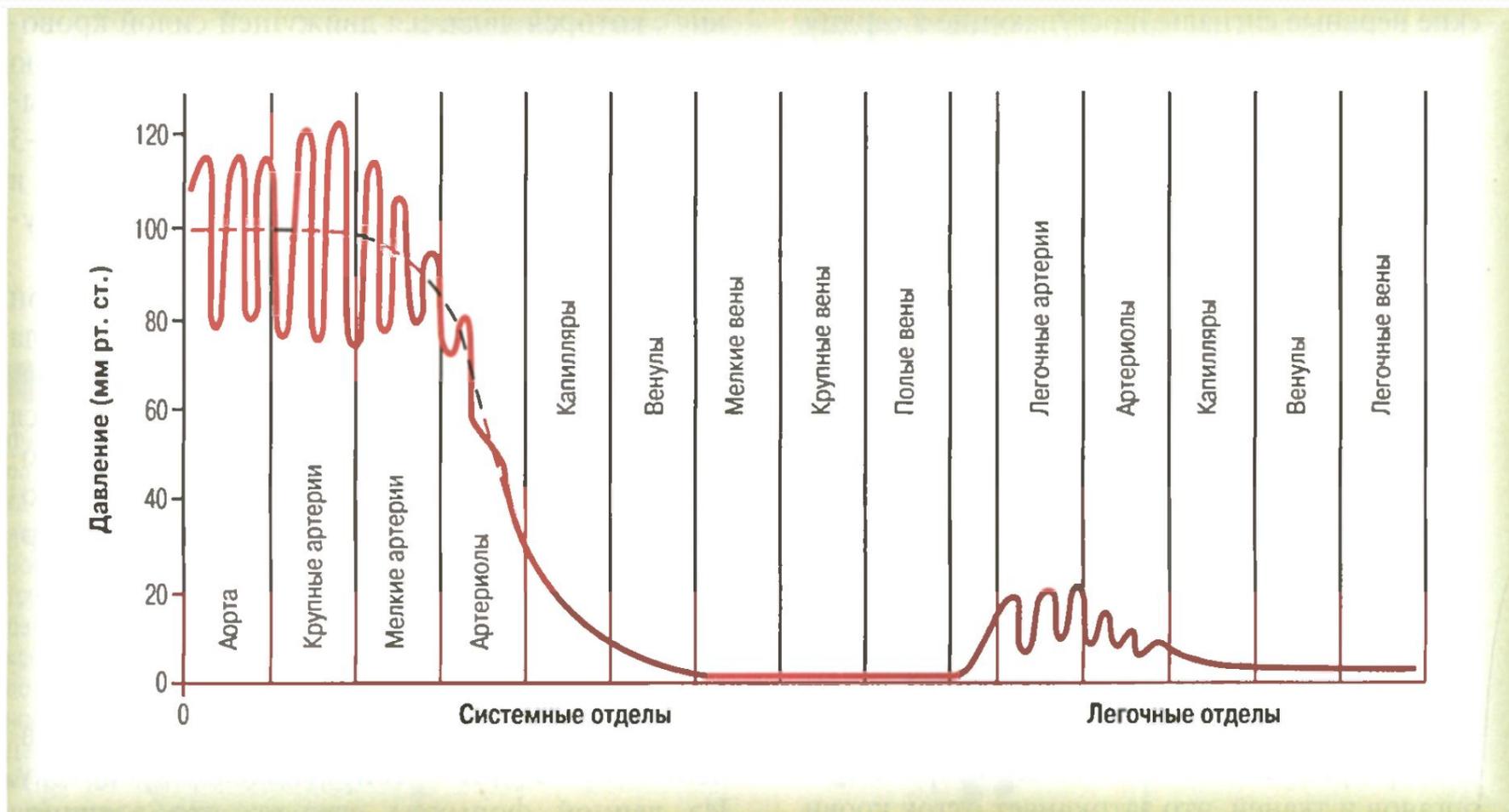
● Последовательная цепь:

- МОК во всех участках цепи одинаков ($I = \text{const}$)
- Давление падает ($U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$)
- Сопротивление складывается ($R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$)

● Параллельная цепь:

- МОК складывается ($I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$)
- Давление постоянно ($U = \text{const}$)
- Складывается проводимость ($1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots$)

Изменение давления в сосудистом русле



- Среднее давление в аорте = 100 торр
- Среднее давление в капилляре БКК = 17 торр (35 торр на артериальном конце и 10 торр на венозном)
- Среднее давление в месте впадения ВПВ в предсердие = 0 торр
- Среднее давление в легочной артерии = 16 торр
- Среднее давление в легочных капиллярах = 7 торр

Физика потока

Объемная скорость потока = $\frac{\text{Разность давлений}}{\text{Сопротивление}}$

Уравнение Хагена – Пуазейля:

$$Q = \Delta P \times \pi R^4 / 8L\mu$$

Вязкость (μ):

- прямо пропорциональна ηt
- обратно пропорциональна линейной скорости кровотока (принцип кетчупа)

Немецкий физик и
гидростроитель,
почетный гражданин г.
Балтийск



Жан Мари Луи Пуазейль –
физик и врач. Первый
использовал ртутный
тонометр для измерения АД



Физика потока

- **Объемная скорость = Объем / время (мл/с).**
- Теоретически – должен соблюдаться принцип постоянной объемной скорости потока!!!
- **Объемная скорость = Линейная скорость x Площадь,**

т.е. – при сужении сосуда линейная скорость растет и наоборот (принцип водохранилища) – венозное депо

- Скорость кровотока в аорте = 330 мм/с
- Скорость кровотока в капилляре = 0,3 мм/с
- Длина капилляра около 0,3 мм, время прохождения кровью капилляра около 1 с

Изменение диаметра сосудистого русла

Сосуды

Суммарная площадь поперечного сечения (см²)

Аорта	2,5
Мелкие артерии	20
Артериолы	40
Капилляры	2500
Венулы	250
Мелкие вены	80
Полые вены	8

Реальность потока

- **Скорость кровотока неодинакова в поперечном сечении сосуда (силы натяжения у стенки)**
- **Постоянна скорость осевого потока**
- **Выброс правого и левого желудочка неодинаков:**
 - **Левый желудочек имеет дополнительный легочной «кружок» кровообращения – из бронхиальных артерий в бронхиальные вены**

Физика потока

- Упрощенное уравнение Бернулли:

$$P + \rho v^2/2 = \text{const},$$

где P – давление в потоке

ρ – плотность жидкости

v – линейная скорость потока

- При ускорении потока давление снижается и наоборот (принцип инжектора) – обкрадывание коронарных артерий при аортальном стенозе

Даниил Бернулли

Голландский физик,
математик, врач. Один из
основателей
гидродинамики.

Вместе с братом Николаем и
другом Леонардом Эйлером
работал в Санкт-Петербурге с
1725 по 1733 гг. Почетный член
Петербургской Академии.

Ректор Базельского
университета.



Поток в артериях и венах

Поток в артериях

- пульсирующий
- под высоким давлением
- при повышении тонуса артерий кровоток снижается (рост сопротивления)

Поток в венах

- постоянный
- под низким давлением
- при повышении тонуса вен (вены не пережимаются!) кровоток растет (выход из депо)

Поток в капиллярах

- Поток в капиллярах – всегда пассивен, т.к. капилляры не имеют мышечной стенки.
- *Приток в капилляры* – снижение тонуса артериол
- *Отток из капилляров* – повышение тонуса вен (эффект инжектора = эффект Вентури)
- Диаметр эритроцита ~ диаметр капилляра (может пройти только за счет активной деформации!)

Джованни Баттиста Вентури

Современник
Леонарда Эйлера и
Даниила Бернулли.
Итальянский физик.
Профессор физики
Моденского
университета



Физика сердца



Физика сердца

- Основной показатель работы сердца – сердечный выброс (ударный объем \times частота сердечных сокращений)
- УО определяется тремя составляющими:
 - 1) Преднагрузка
 - 2) Сократимость
 - 3) Постнагрузка

Физика сердца

- Основной закон сердца – закон Франка-Старлинга: чем больше растянута мышца, тем сильнее она сокращается (преднагрузка)
- Чем больше приток крови в желудочек, тем больше ударный объем (до определенного момента)

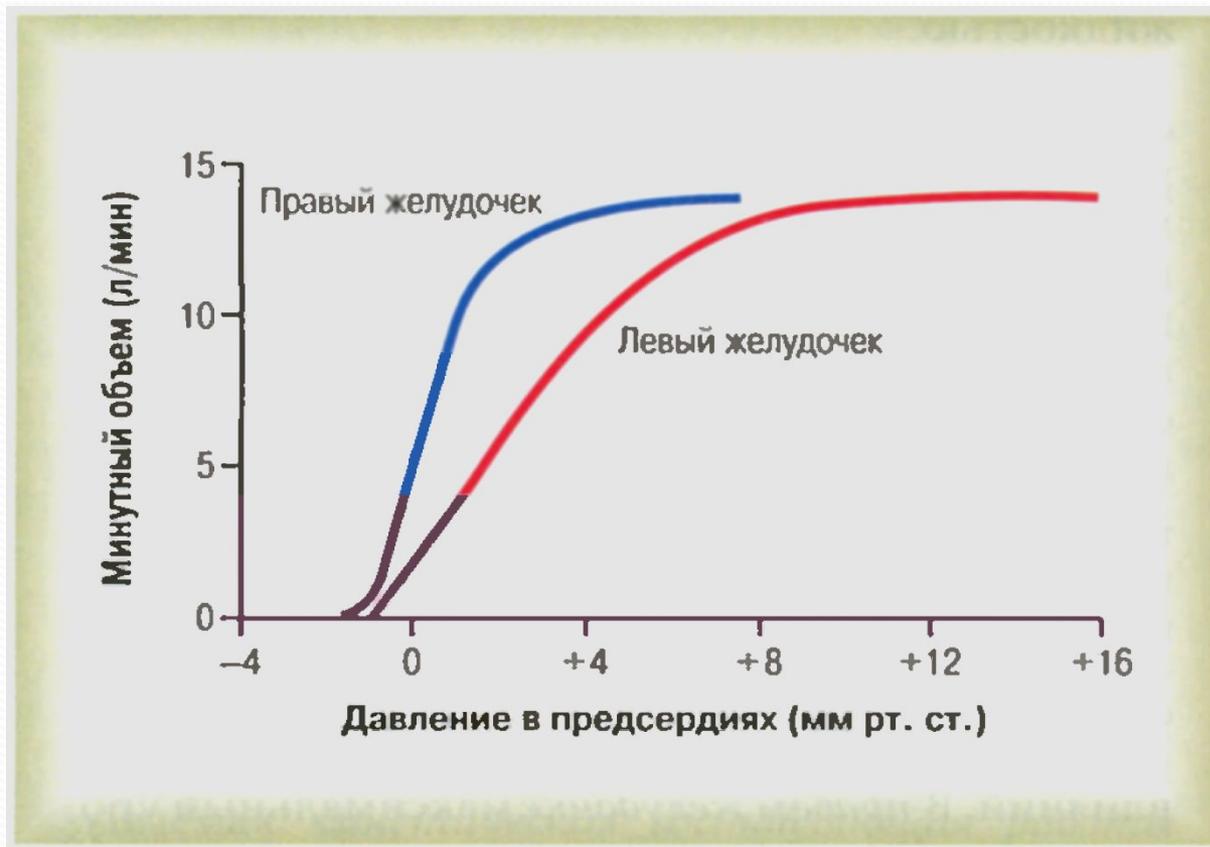
Отто Франк (1865 - 1944) – немецкий врач и физиолог, работал в Мюнхенском университете до 1934 г.



Эрнест генри Старлинг (1866 - 1927) – английский врач и физиолог, профессор Лондонского университета . Автор теории капиллярной фильтрации и термина «гормон»



Физика сердца



Физика сердца

- Постнагрузка – работа, которую нужно проделать желудочку для выброса крови
- Определяется законом Лапласа:

$$T = P \times R / 2 \times H,$$

где T – напряжение стенки желудочка (постнагрузка), P – трансмуральное давление на стенке, R – радиус полости, H – толщина стенки

Пьер-Симон Лаплас

Выдающийся математик, физик, астроном. Один из создателей системы дифференциального исчисления и теории вероятностей.

Выходец из крестьян.

Никогда не вступал в конфликт с властями. Член Парижской Академии Наук с 1785 г. Занимал высокие научные посты во времена Французской революции, империи Наполеона Бонапарта, реставрированной династии Бурбонов. Почетный член Петербургской Академии.



Физика сердца

- Трансмуральное давление – суммарное давление на стенку желудочка.
- Компоненты:
 - Давление в полости желудочка
 - Наружное (внутригрудное) давление

Физика сердца

● Правый желудочек:

- Тонкая стенка (5мм)
- Работа против малого давления ($P_{ла} = 16$ торр)
- Высокая зависимость УО от преднагрузки

● Левый желудочек:

- Толстая стенка (10 мм)
- Работа против высокого давления ($P_{ао} = 100$ торр)
- Высокая зависимость УО от сократимости

Коронарный кровоток

- Закон Хагена-Пуазейля:
- $Q = \Delta P \times \pi R^4 / 8L\mu$
- Давление!
- Радиус сосудов!
- Толщина стенки желудочки! (длина)
- Вязкость (гематокрит)!
- Потребность!!! (постнагрузка, преднагрузка, сократимость и ЧСС)

Коронарный кровоток

- **Левый желудочек**
- Толстая стенка – сильное сжатие коронаров в систолу – кровоток в диастолу

- **Правый желудочек**
- Тонкая стенка – слабое сжатие коронаров в систолу – кровоток и в систолу, и в диастолу

Система – это сила 😊!

