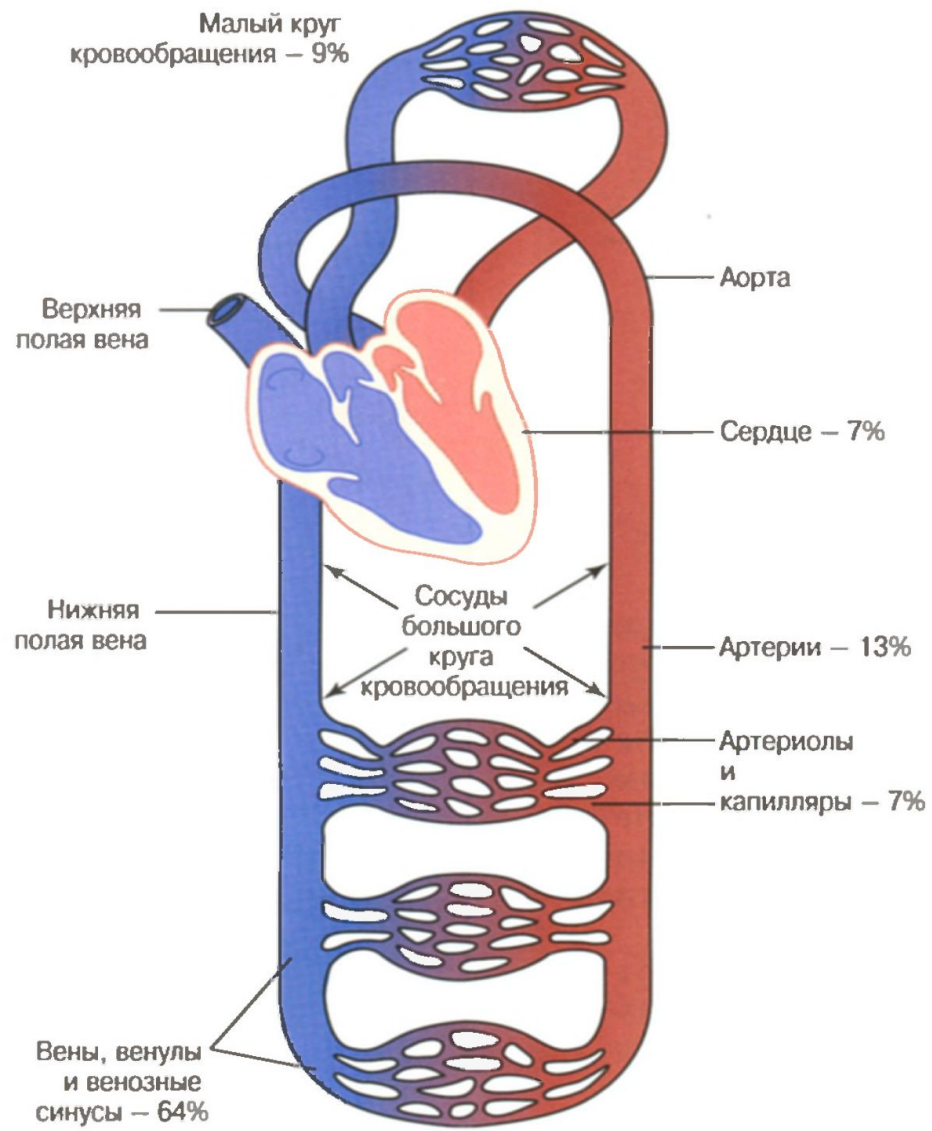


# Прикладная физика кровообращения

# 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



Система кровообращения человека представляет собой сложную сеть сосудов, обеспечивающую доставку кислорода и питательных веществ к тканям и удаление продуктов обмена. Венозная кровь, насыщенная продуктами метаболизма, собирается в нижнюю и верхнюю полые вены, которые впадают в правое предсердие сердца. Из правого предсердия кровь поступает в правый желудочек, который перекачивает ее в легочную артерию. В легких происходит газообмен: углекислый газ выводится, а кислород поглощается. Кислородная кровь возвращается в левое предсердие через легочные вены, затем попадает в левый желудочек. Левый желудочек перекачивает кровь в аорту, откуда она распределяется по всему телу по артериям. В капиллярах происходит обмен веществ: кислород и питательные вещества переходят в ткани, а продукты обмена и углекислый газ собираются в вены. Венозная кровь возвращается к сердцу, замыкая цикл. Объем крови, распределенный по различным частям системы, составляет: вены, венулы и венозные синусы – 64%; артерии – 13%; капилляры и артериолы – 7%; сердце – 7%; малый круг кровообращения – 9%.

# 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

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

доставка выброс содержание O<sub>2</sub>

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

**МОК в норме – 0,1 л/кг/мин или 3,9  
л/м<sup>2</sup>/мин**

При МОК = 7 л/мин  $DO_2 = 1288$  мл/мин или  
718мл/м<sup>2</sup>/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**

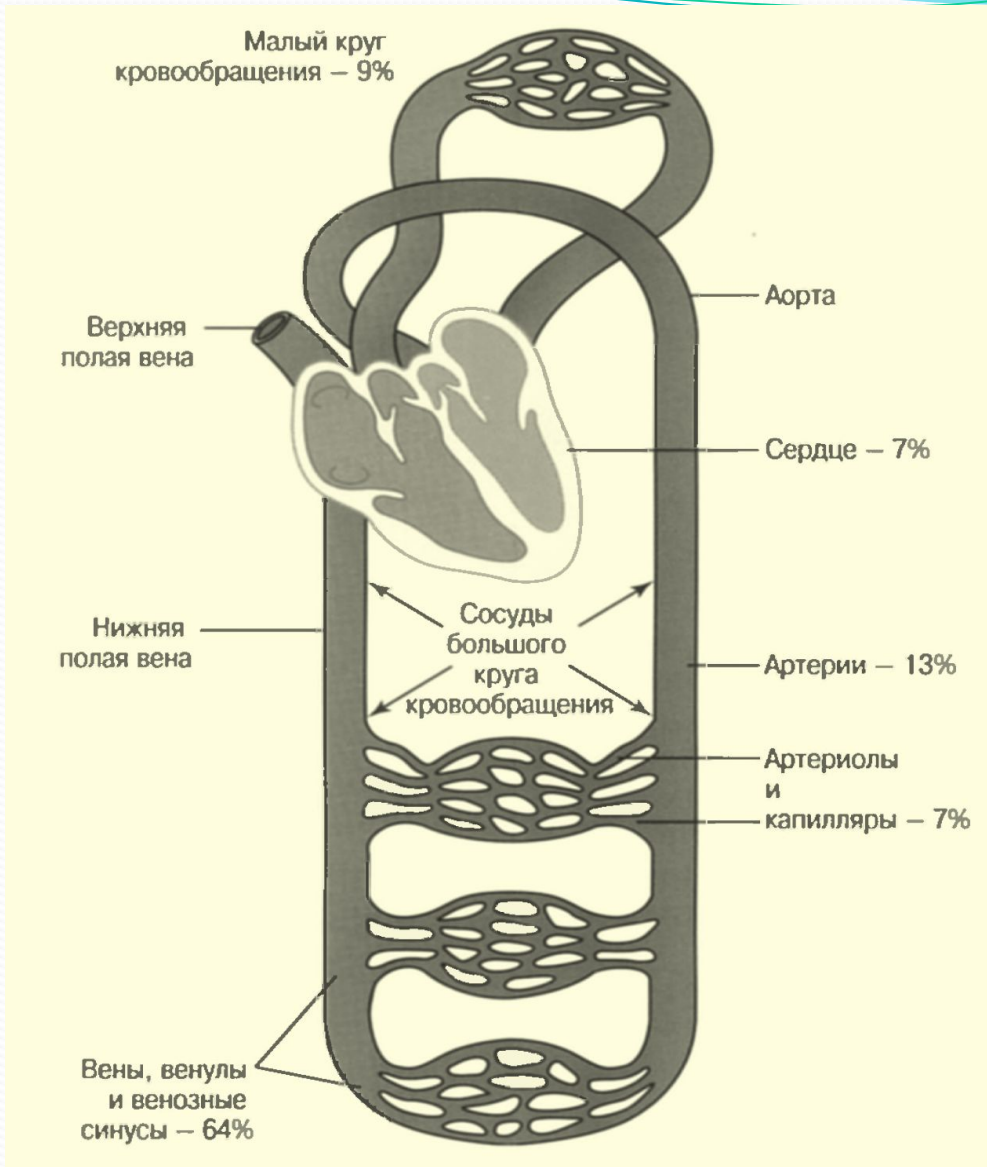


# Георг Симон Ом (1789 - 1854)

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

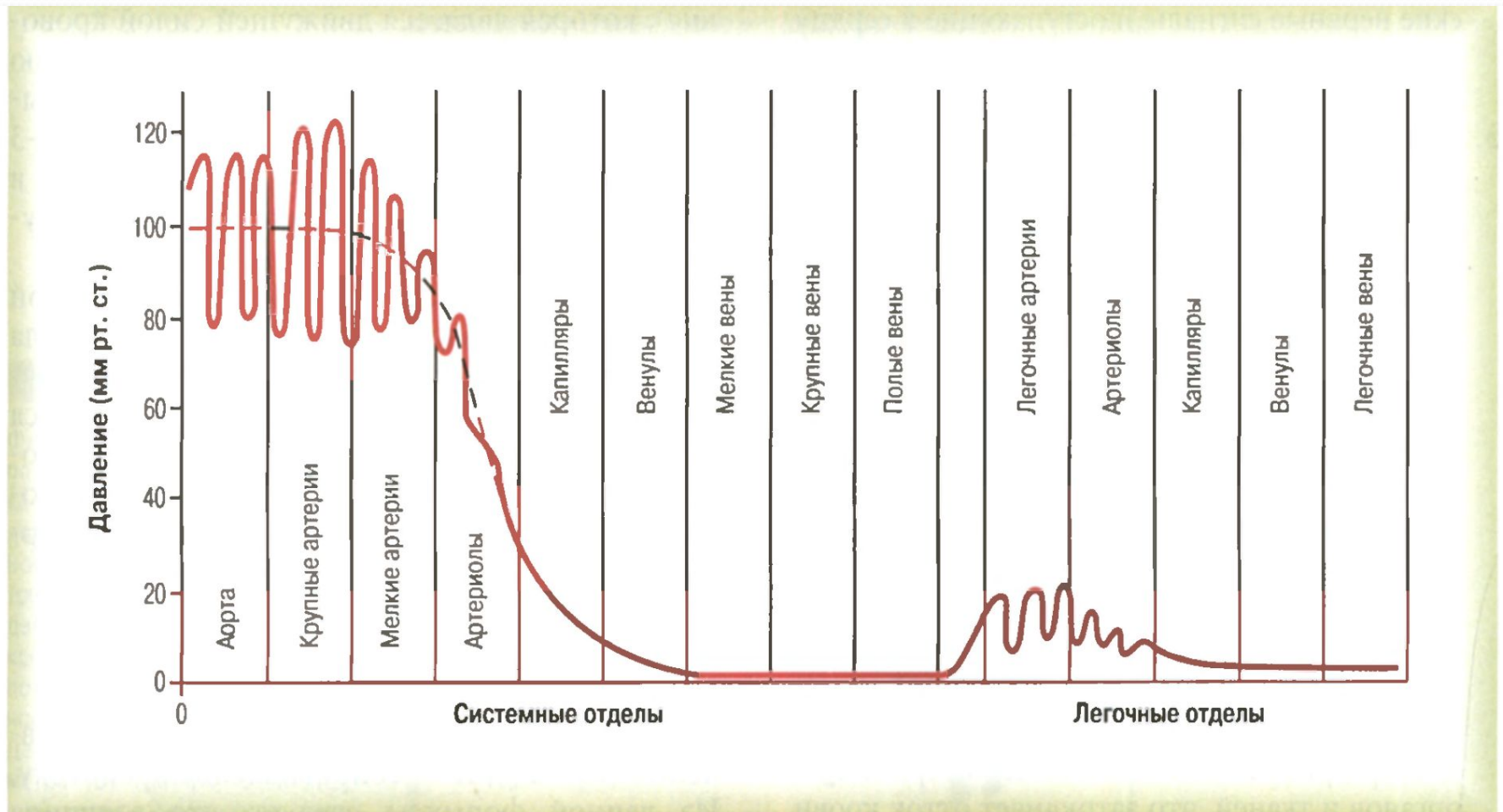
## ● Последовательная цепь:

- 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 ( $\mu$ ):

- прямо пропорциональна  $\eta t$
- 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 (см<sup>2</sup>)

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

$\rho$  – 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)

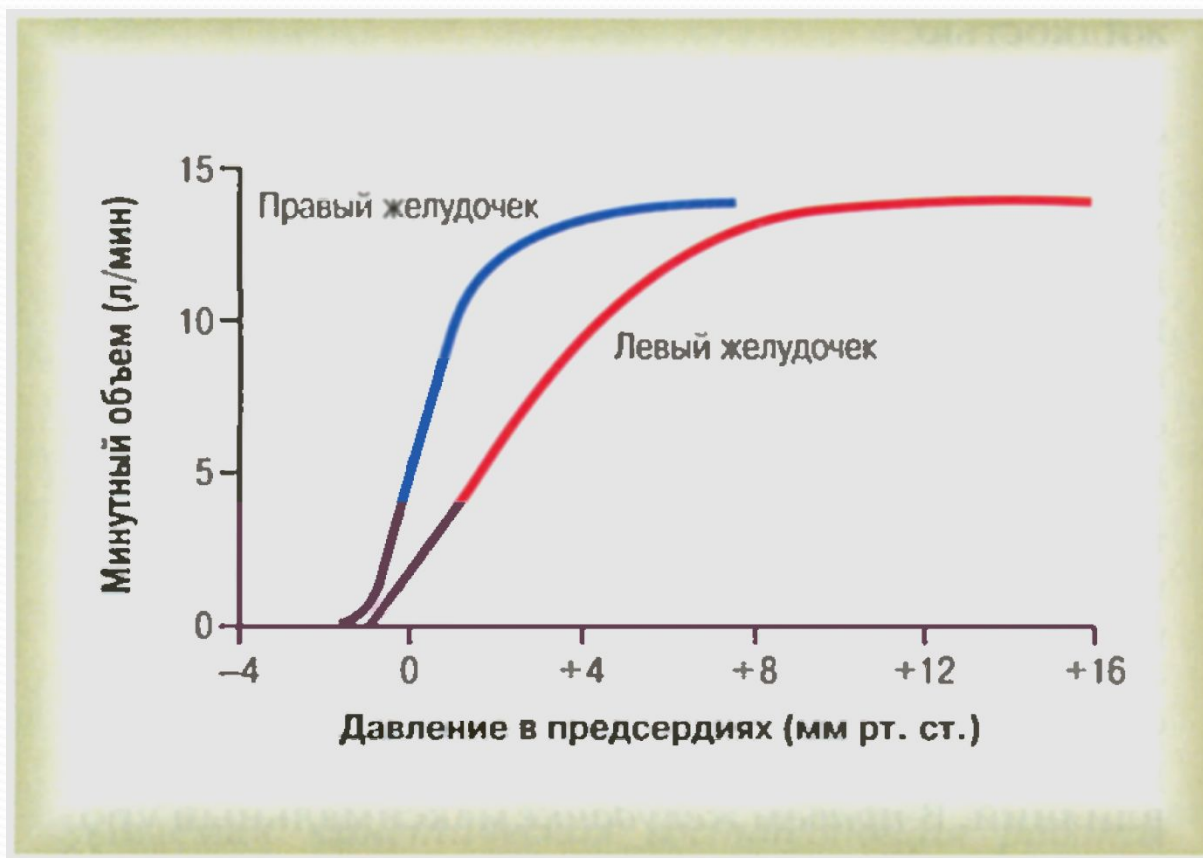
**Отто Франк (1865 - 1944) – немецкий врач и физиолог, работал в Мюнхенском университете до 1934 г.**



**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 😊!**

