

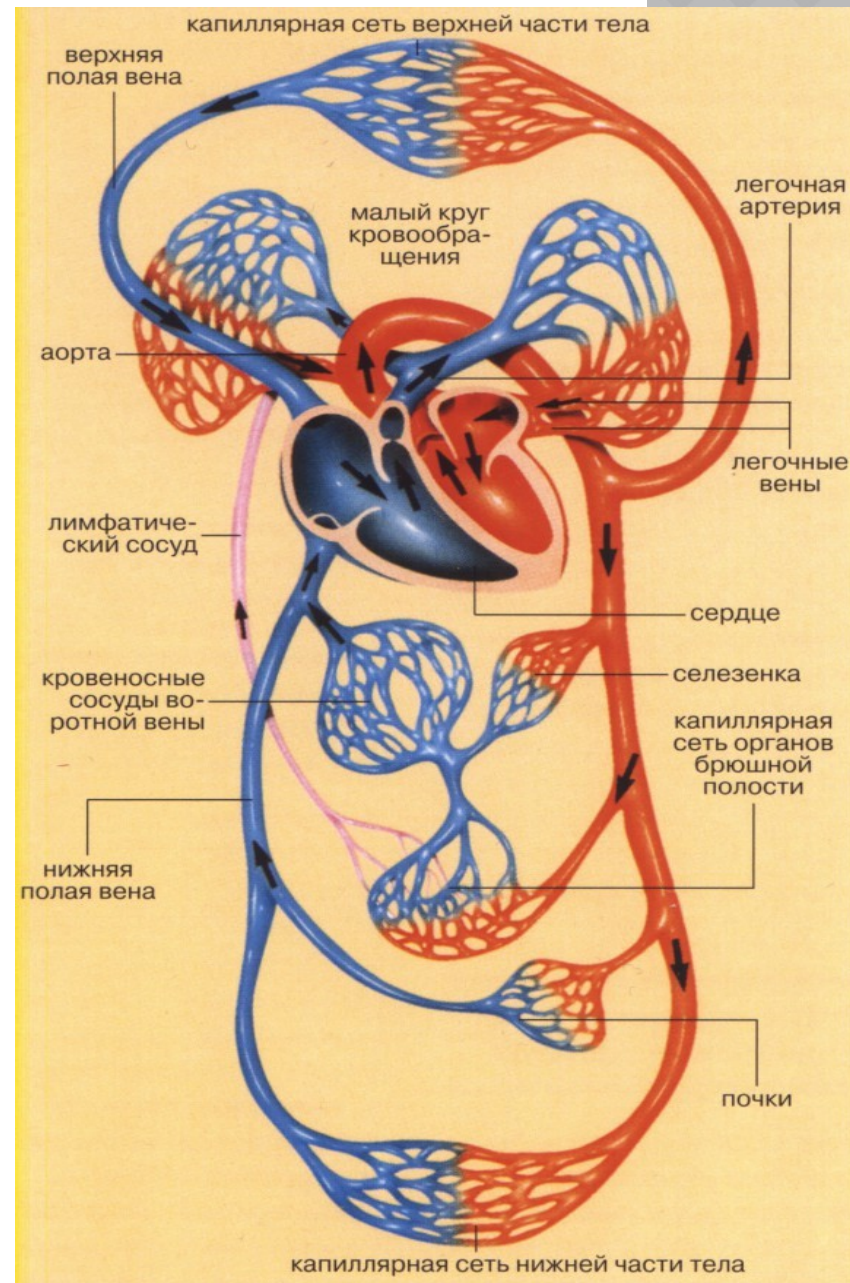
ЛЕКЦИЯ № 6 :

**«БИОМЕХАНИКА
КРОВООБРАЩЕНИЯ»**

1. Общее представление о строении системы кровообращения

- **Сердце и кровеносные сосуды** составляют систему кровообращения.
- Оттекающая от тканей венозная кровь поступает в **правое предсердие**, а оттуда в **правый желудочек** сердца. При сокращении его кровь нагнетается в **легочную артерию**. Протекая через легкие, она отдает CO_2 и насыщается O_2 .
- Система легочных сосудов — легочные артерии, капилляры и вены — образует **малый (легочный) круг кровообращения**.

- Обогащенная кислородом кровь из легких по **легочным венам** поступает в **левое предсердие**, а оттуда в **левый желудочек**.
- При сокращении последнего кровь нагнетается в аорту, артерии, артериолы и капилляры всех органов и тканей, а оттуда по венам притекает в **правое предсердие**.
- Система этих сосудов образует **большой круг кровообращения**.



гемодинамики. Линейная и объёмная скорости движения жидкости; связь между ними. Условие неразрывности струи

Опр. **Линейная скорость** - скорость перемещения самих частиц жидкости (или плывущих вместе с жидкостью мелких тел - например, эритроцитов в крови) обозначают v и называют линейной скоростью.

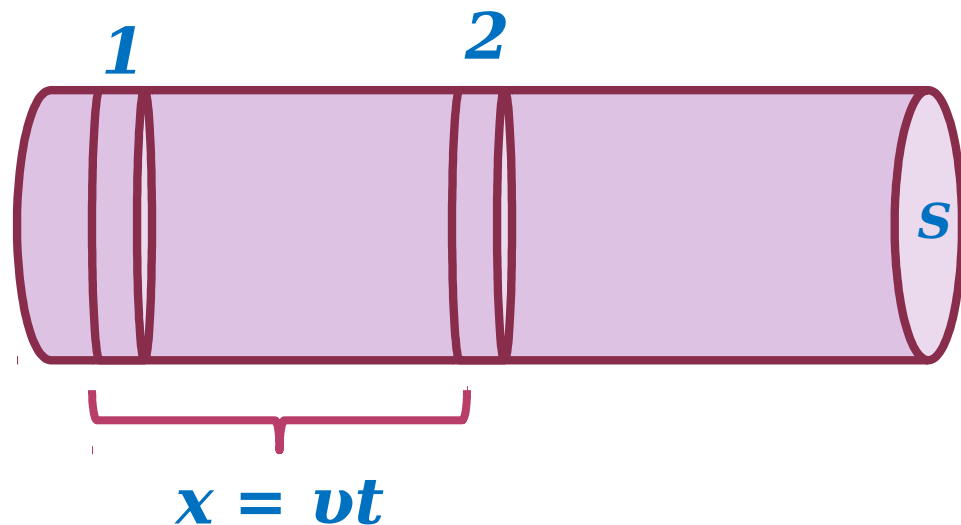
$$v = \frac{dx}{dt} \quad v = [\text{м/с}]$$

Опр. **Объемная скорость** - объём V жидкости, протекающей через поперечное сечение данного потока (трубы, русла реки, кровеносного сосуда и т.п.) за единицу времени.

$$Q = \frac{dV}{dt} \text{ [м}^3/\text{с]} \quad Q =$$

Какова же связь между линейной v и
объемной скоростью Q ?

Рассмотрим трубку с площадью
поперечного сечения S .

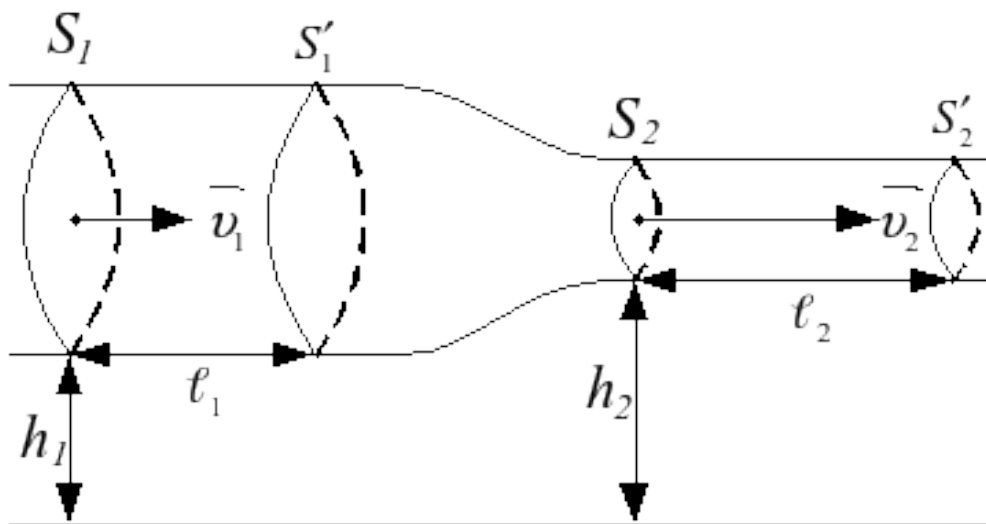


Через трубку пройдет объём жидкости

$$\text{Но } \frac{V}{t} = v \text{ и } Q = \frac{V}{t} = \frac{Sx}{t} \text{ поэтому: } Q = Sv$$

• Так как жидкость крайне **мало сжимаема**, то объем, протекающий за единицу времени через любое сечение трубки, одинаков, то есть **объемная скорость Q на протяжении всей трубки постоянна**.

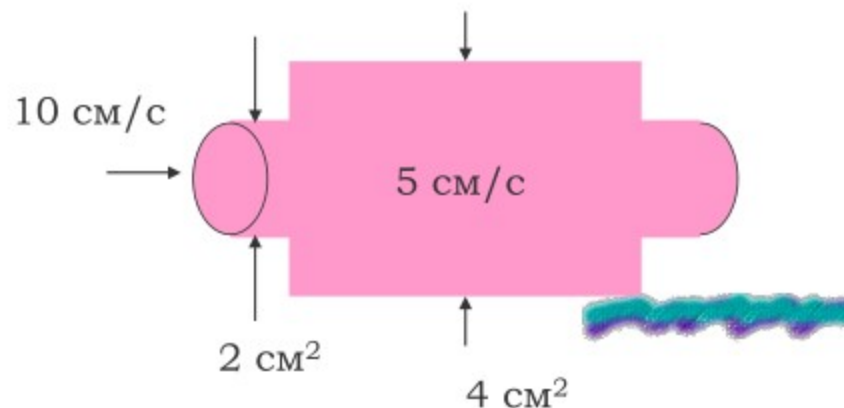
Отсюда следует закон постоянства расхода жидкости (**условие неразрывности в трубе**): $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_n v_n = \text{const}$



Вывод:

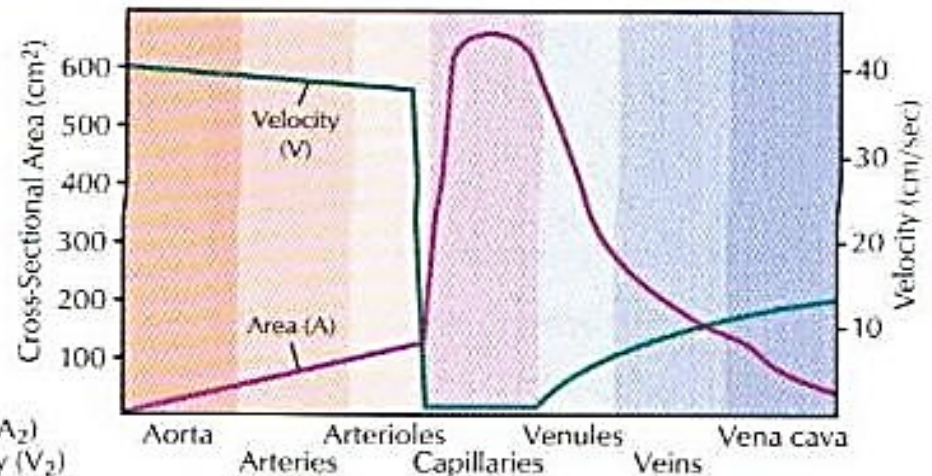
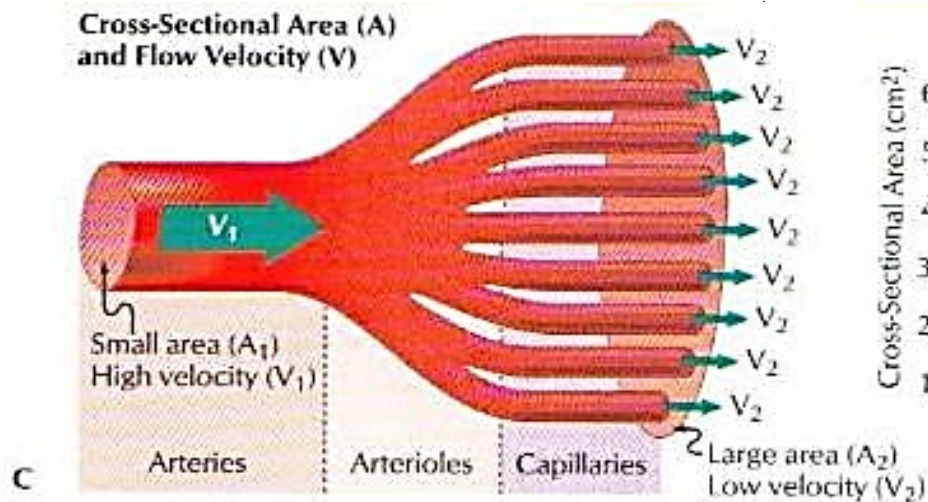
1) если мы имеем дело с жесткой неразрывной трубой переменного сечения, то **линейная скорость** течения жидкости **тем больше, чем меньше сечение** трубы;

2) При заданной объемной скорости жидкости, изменение сечения приводит к пропорциональному изменению линейной скорости



3) В разветвленной трубке объемная скорость потока одинакова во всех суммарных поперечных сечениях.

4) Условие неразрывности струи выполняется в гемодинамике: в любом сечении сердечно-сосудистой системы объемная скорость



$$S_{\text{аорты}} = 4 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{аорт.}} = 0,5-1 \text{ м/с}$$

(до 20 м/с при физических нагрузках)

$$S_{\text{кап.}} = 11.000 \text{ см}^2$$

(обычно 3.000 см²) ;

$$V_{\text{кап.}} = 1 \text{ мм/с}$$

3. Течение идеальной жидкости.

Теорема Бернулли.

Опр. **Идеальная жидкость** –

жидкость абсолютно несжимаемая и **не имеющая внутреннего трения** (вязкости).

Опр. **Установившееся течение**

(стационарное) - такое течение, при котором характер движения жидкости не меняется (любая частица жидкости проходит данную точку пространства с одним и тем же значением скорости).

Уравнение Бернулли справедливо для стационарного движения идеальной несжимаемой жидкости - **закон сохранения механической энергии** для движущейся жидкости:

В потоке идеальной жидкости сумма статического, гидростатического и гидродинамического давлений есть величина постоянная.

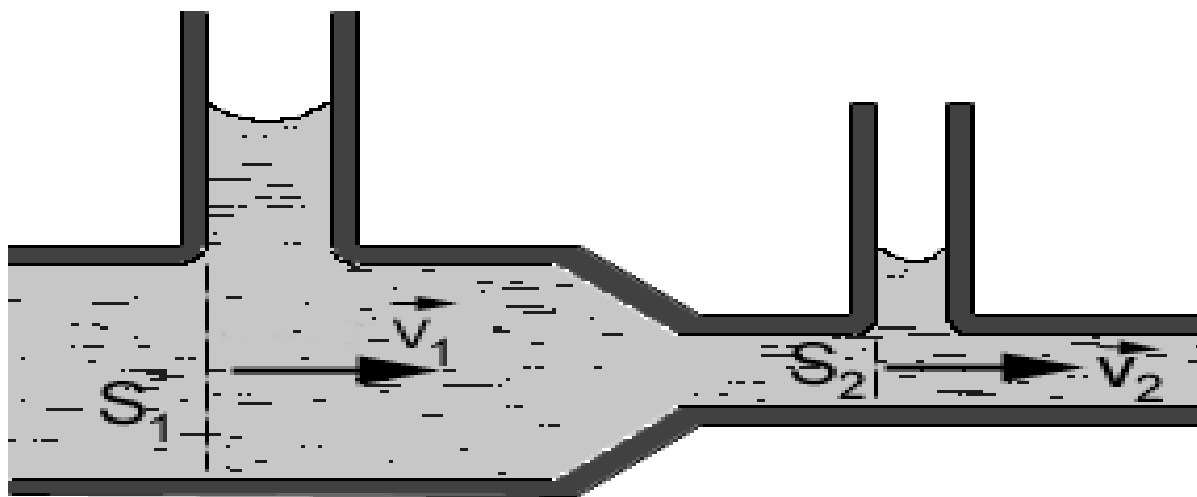
Динамическое давление

Гидростатическое давление

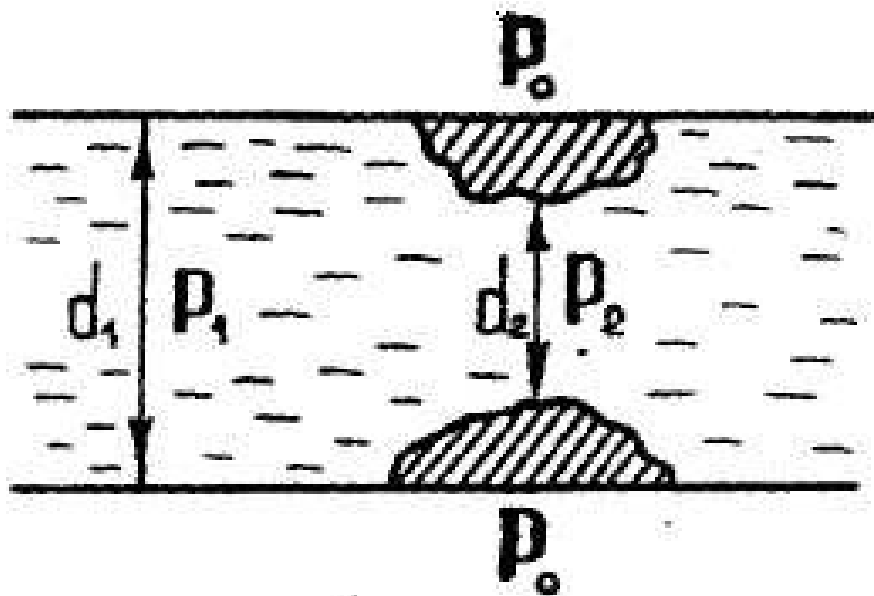
Статическое давление

$$\frac{\rho V^2}{2} + \rho g h + p = const$$

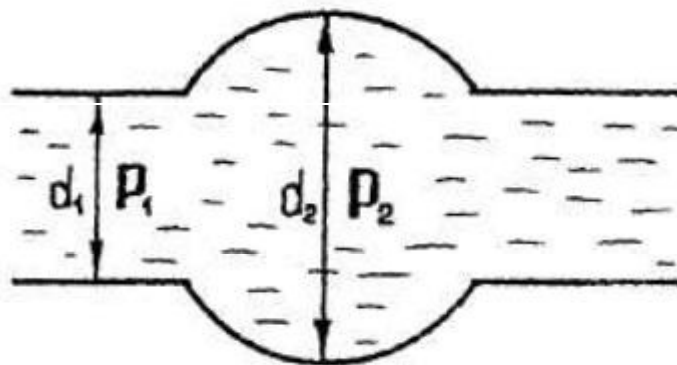
Вывод: из теоремы Бернулли следует, что там, где **скорость** жидкости или газа **больше**, **статическое давление меньше**, и наоборот.



Закупорка артерии. Артериальный шум



Поведение аневризм



4. Ламинарное течение жидкости, формула Пуазейля.

Рассмотрим часто встречающийся случай **ламинарного движения жидкости** по трубке с круглым сечением **под действием разности давлений на её концах**.

Формула Пуазейля позволяет рассчитать **объёмную скорость** течения жидкости по известным значениям радиуса трубки r , её длины L , вязкости жидкости η и разности давлений на концах трубки $p_1 - p_2$.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot (p_1 - p_2)$$

Выводы: объёмная скорость прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости.

Обращает на себя внимание очень сильная зависимость объёмной скорости от радиуса:

$$Q \sim r^4.$$

Движение жидкости можно сравнить с **электрическим током** (движением электрических зарядов).

Запишем формулу Пуазейля в таком виде:

$$p_1 - p_2 = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4} \cdot Q$$

и сравним её с формулой закона Ома, написанной так: **$U_1 - U_2 = R \cdot I$** .

Легко видеть, что между этими формулами существует аналогия.

Вывод: величина равная $\frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4}$

имеет смысл **сопротивления**

движению жидкости. Ее так и называют - **гидродинамическое сопротивление.**

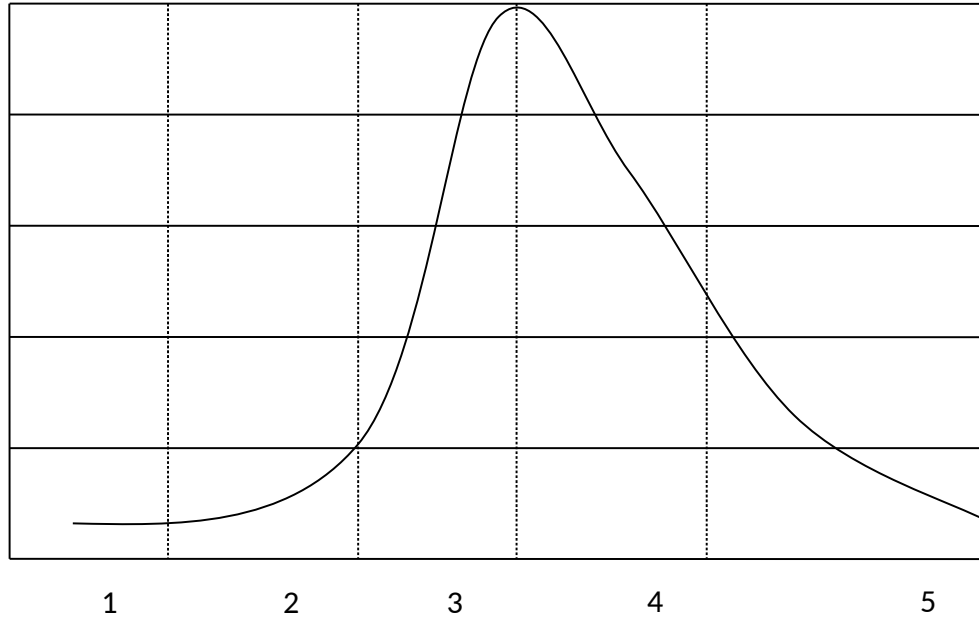
$$R_{ГД} = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4}$$

Тогда формула Пуазейля: $p_1 - p_2 = R_{ГД} \cdot Q$

сопротивление (R_r) разных отделов кровеносного русла:

- **Гемодинамическое сопротивление сосудистой системы** - третий гемодинамический показатель. Протекая по трубке, жидкость преодолевает сопротивление, которое возникает вследствие внутреннего трения частиц жидкости между собой и о стенку трубки. Это **трение** будет **тем больше**, чем **больше вязкость** жидкости, чем **уже ее диаметр** и чем **больше скорость** течения.
- Кровеносные сосуды оказывают значительное сопротивление току крови, и сердцу приходится большую часть своей работы тратить на преодоление этого сопротивления.
- Основное сопротивление сосудистой системы сосредоточено в той ее части, где происходит разветвление артериальных стволов на мельчайшие сосуды. Однако максимальное сопротивление представляют самые мельчайшие артериолы, т.к. они имеют малый диаметр, значительную протяженность и скорость течения крови в них выше. Кроме того, артериолы способны к спазмированию.

R
r



1 — аорта; 2 — магистральные
артерии; 3 — артериолы; 4 —
капилляры; 5 — вены.

- Так как разность давлений (падение давления) на участке, то есть величина

$p_1 - p_2$, прямо пропорциональна гемодинамическому сопротивлению, **наибольшее падение давления** происходит именно **в артериолах**.

Это имеет ключевое значение для **регуляции кровяного давления**.

- В стенках мелких артерий (и особенно – артериол) находится много мышечных волокон. Если артериальное кровяное давление (АКД) уменьшается, специальные рецепторы сигнализируют об этом нервным узлам, расположенным в стенках сосудов.
- Оттуда поступают нервные импульсы к мышечным волокнам артериол, волокна сокращаются, и диаметры артериол уменьшаются.

Работа, совершаемая сердцем, ее статический и динамический компоненты

- Механическая работа, совершаемая сердцем, развивается за счет сократительной деятельности миокарда. Вслед за распространением возбуждения происходит сокращение миокардиальных волокон.
- Работа, совершаемая сердцем, затрачивается, во-первых, на **выталкивание крови в магистральные артериальные сосуды** против сил давления и, во-вторых, на **придание крови кинетической энергии**. Первый компонент работы называется **статическим** (потенциальным), а второй — **кинетическим**.

Статический компонент работы сердца вычисляется по формуле:

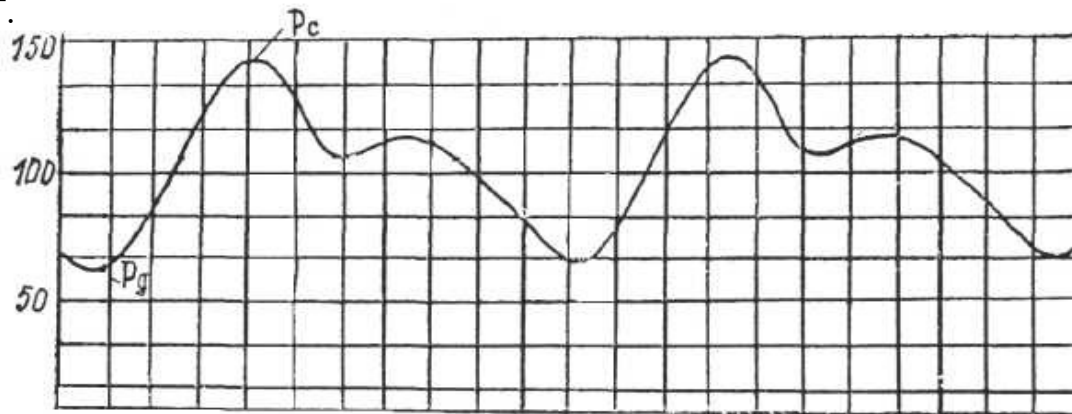
$$A_{ст} = p_{ср} V_c$$

где $p_{ср}$ — **среднее давление крови** в соответствующем магистральном сосуде (аорте — для левого желудочка, легочном артериальном стволе — для правого желудочка),

V_c — **систолический объем**.

- Изменение КД в артериях является сложной периодической функцией:

КД, мм рт.ст.



t, 10⁻¹с

Вывод: среднее давление равно **среднему из бесконечно малых изменений давления** от максимального до минимального **в течение одного сердечного цикла.**

$$P_{cp} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

- Величина p_{cp} в большом круге кровообращения составляет приблизительно **100 мм рт. ст. (13,3 кПа)**.
- В малом круге $p_{cp} = 15$ мм рт. ст. (**2 кПа**),
т. е. примерно в **6 раз меньше**, чем в большом.
- Так как V_c обоих желудочков одинаков, а давление, против которого они совершают работу, имеет шестикратное различие, то и статический компонент работы левого желудочка приблизительно в 6 раз больше:
 $A_{cm} \text{ ЛЖ} = 13,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 70 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = \mathbf{0,9 \text{ Дж}}$;
 $A_{cm} \text{ ПЖ} \sim \mathbf{0,15 \text{ Дж}}$.

- **Кинетический компонент** работы сердца определяется по формуле:

$$A = \frac{mv^2}{2} = \rho \frac{V_c \cdot v^2}{2}$$

где ρ - плотность крови (примерно $10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$);

v - скорость кровотока в магистральном артериальном стволе (в среднем $0,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$).

$$A = \rho \frac{V_c \cdot v^2}{2} =$$

$$= 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3) \cdot \frac{70 \cdot 10^{-6} (\text{м}^3) \cdot 0,49 (\text{м}^2 / \text{с}^2)}{2} = 0,02 \text{ Дж}$$

- В целом работа левого желудочка за одно сокращение **в условиях покоя** составляет **около 1 Дж**, а правого — **менее 0,02 Дж**, причем статический компонент доминирует, достигая **98%** всей работы, тогда как на долю кинетического компонента приходится всего **2%**.
- **Средняя мощность** миокарда поддерживается на уровне **1 Вт**.

Поэтому при физических и психических нагрузках **вклад кинетического компонента** в работу сердца становится весомее (**до 30% всей работы**), чем в покое.

Например, при выполнении тяжелой физической работы тренированным человеком его $p_{\text{ср}}$ достигает 16 кПа, $V_c = 200$ мл, и $V = 3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Тогда работа левого желудочка достигает **$A = 4,1$ Дж.**

Средняя мощность возрастает до **8,2 Вт.**

6. Пульсовая волна

Разобрать самостоятельно!