

Кафедра кардіології НМАПО

ФІЗИЧНІ ТА КЛІНІЧНІ АСПЕКТИ
ГЕМОДИНАМІКИ

Носенко Н.М.

- ▶ **Гемодинамика** — раздел науки, изучающий механизмы движения крови в сердечно-сосудистой системе. Он является частью гидродинамики раздела физики, изучающего движение жидкостей.

$$\blacktriangleright Q = (P1 - P2) / R$$

- ▶ Согласно законам гидродинамики, количество жидкости (Q), протекающее через любую трубу, прямо пропорционально разности давлений в начале (P1) и в конце (P2) трубы и обратно пропорционально сопротивлению (R) току жидкости.

- ▶ Если применить это уравнение к сосудистой системе, то давление в конце данной системы, т. е. в месте впадения полых вен в сердце, близко к нулю. В этом случае уравнение можно записать так:

$$\text{▶ } Q = P / R$$

- ▶ где Q — количество крови, изгнанное сердцем в минуту; P — величина среднего давления в аорте, R — величина сосудистого сопротивления.

Периферическое сопротивление

▶ Периферическое сопротивление сосудистой системы складывается из множества отдельных сопротивлений каждого сосуда. Любой из таких сосудов можно уподобить трубке, сопротивление которой (R) определяется по формуле Пуазейля:

$$\text{▶ } R = 8l\eta / \pi r^4$$

▶ где l — длина трубки; η — вязкость протекающей в ней жидкости; π — отношение окружности к диаметру; r — радиус трубки.

Закономерности течения крови по сосудам

- ▶ закон Хагена – Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot l \cdot \eta}$$

- ▶ где ΔP – разница давлений между артериальным и венозным отделами;
- ▶ r – радиус сосуда;
- ▶ η – вязкость жидкости;
- ▶ l – длина сосуда;
- ▶ коэффициент 8 – результат интеграции скоростей слоев жидкости.

Периферическое сопротивление

- ▶ Сосудистая система состоит из множества отдельных трубок, соединенных параллельно и последовательно. При последовательном соединении трубок их суммарное сопротивление равно сумме сопротивлений каждой трубки:
 - ▶ $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$
- ▶ При параллельном соединении трубок их суммарное сопротивление вычисляют по формуле:
 - ▶ $R = 1 / (1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3 + \dots + 1 / R_n)$

▶ Уравнение Ньютона:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

- ▶ Вязкость крови равна отношению напряжения сдвига τ (силы, приходящейся на единицу площади) к градиенту скорости между соседними слоями γ .

Периферическое сопротивление

- ▶ Таким образом:
- ▶ Сопротивление прямо пропорционально вязкости крови.
- ▶ Сопротивление прямо пропорционально длине сосудистого сегмента.
- ▶ Сопротивление обратно пропорционально радиусу сосуда в 4-й степени (диаметр в квадрате);

Последовательная цепь сосудов большого и малого круга кровообращения

- ▶ 1. Амортизирующие сосуды «компрессионной камеры» – аорта и крупные артерии (большой круг), легочная артерия и ее притоки (малый круг).
- 2. Резистивные сосуды – концевые артерии, артериолы.
- 3. Прекапиллярные сфинктеры – мелкие артериолы.
- 4. Обменные сосуды – капилляры.
- 5. Емкостные сосуды – вены.
- 6. Шунтирующие сосуды – артериовенозные анастомозы.

- ▶ Артериолы представляют собой тонкие сосуды (диаметром 15— 70 мкм). Стенка этих сосудов содержит толстый слой циркулярно расположенных гладких мышечных клеток, при сокращении которого просвет сосуда может значительно уменьшаться.
 - ▶ Артериолы — «краны сердечно-сосудистой системы» (И. М. Сеченов).

Механизмы, регулирующие кровообращение

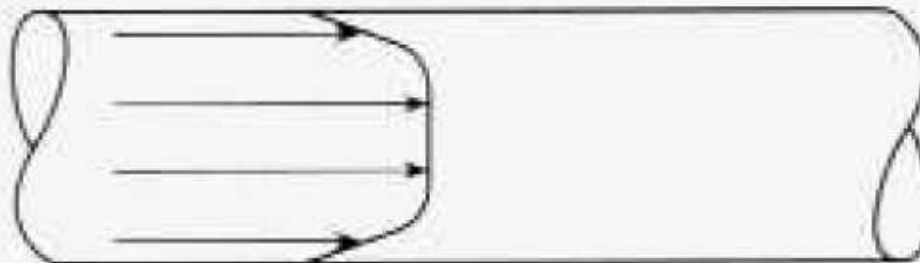
- ▶ 1) центральные – определяющие величину артериального давления и системное кровообращение (неврогенный и гуморальный);
- ▶ 2) локальные, контролирующие величину кровотока через отдельные органы и ткани (метаболический, миогенный, эндотелиальный).

Закономерности течения крови по сосудам

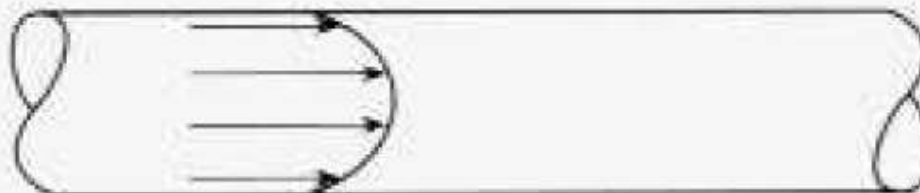
- ✓ Параллельный – скорости всех потоков в сосуде равны.
- ✓ Ламинарный – максимальные скорости в центре сосуда, минимальные – у стенок (так называемый параболический профиль).
- ✓ Турбулентный – нарушается нормальное распределение скоростей, формируются завихрения, часть тока крови имеет обратное направление.

Закономерности течения крови по сосудам

A



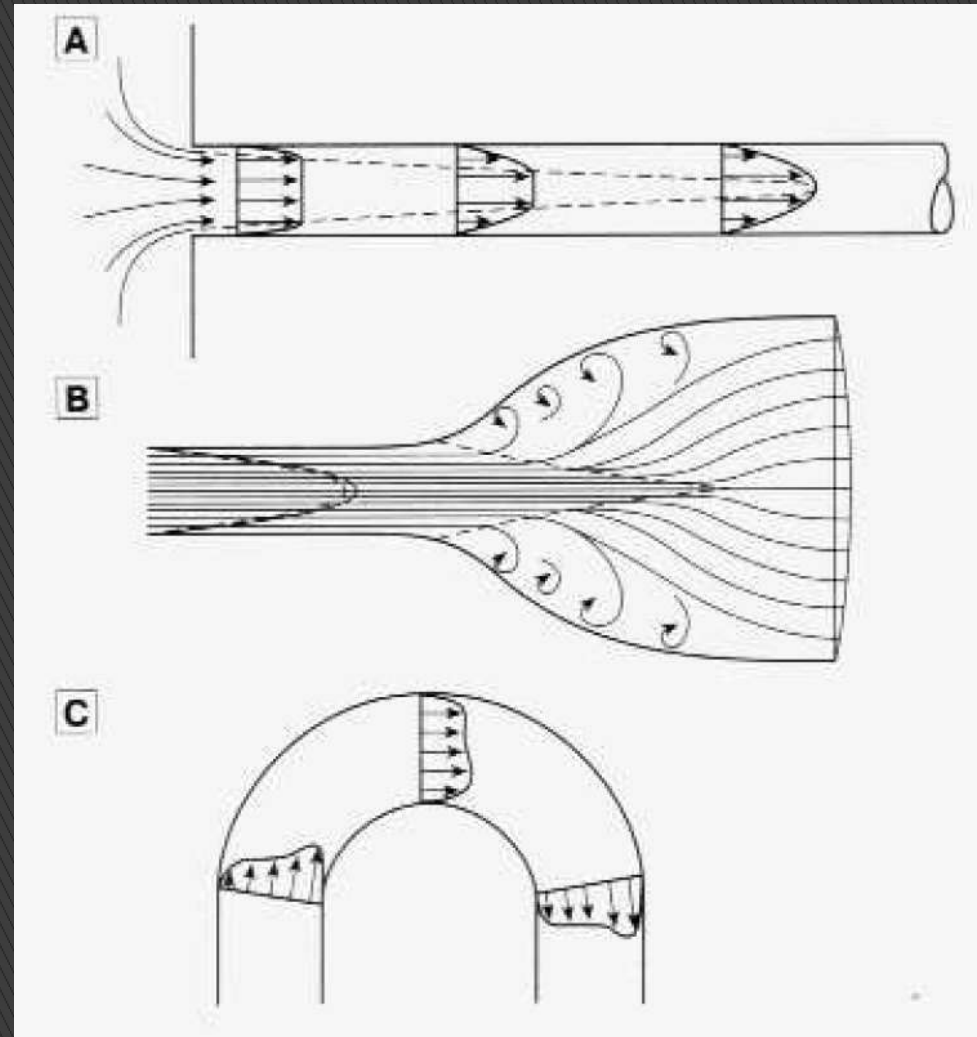
B



Зависимость профиля потока крови от диаметра сосуда. Профиль потока крови более плоский, когда кровь течет через более широкий сосуд (A). Профиль становится параболическим в более узком сосуде (B).

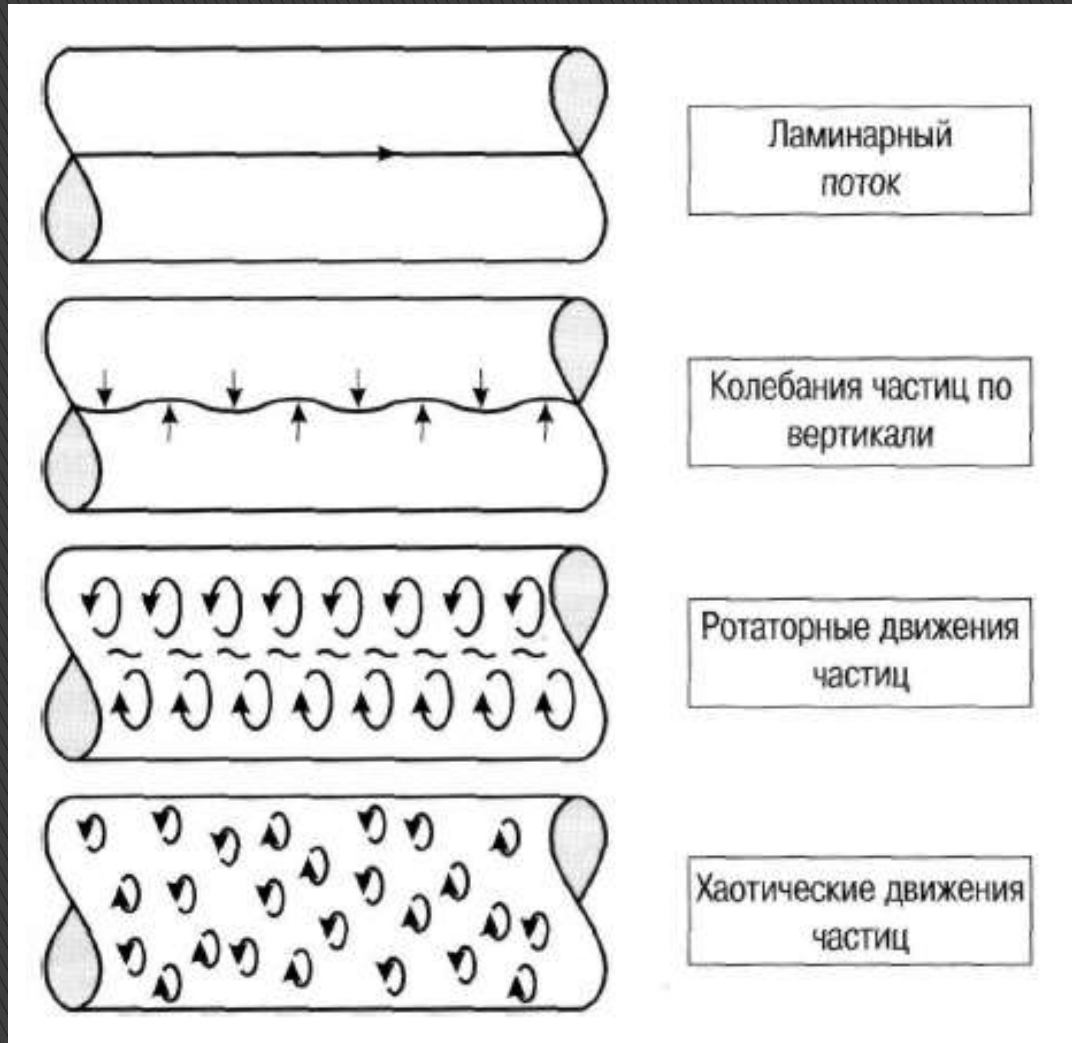
Закономерности течения крови по сосудам

- ▶ Соотношение длины (А), калибра (Б) и формы (С) сосуда и профиля потока крови.



Закономерности течения крови по сосудам

- ▶ Стадии формирования турбулентного потока.



СТЕНОЗ и КРОВОТОК

При стенозе проявляется эффект Бернулли - в месте сужения сосуда скорость потока (кровотока) повышается в зависимости от степени сужения и ток может приобрести турбулентный характер. Часть потока крови может иметь обратное направление.

Эффект Бернулли

$$\Delta P = 0.5 \rho (V_2^2 - V_1^2)$$



ΔP = Градиент давления

ρ = Плотность крови

V_2 = Скорость в области стеноза

V_1 = Скорость начальная

Закономерности течения крови по сосудам

Число Рейнольдса – количественная мера турбулентности потока.

$$Re = \frac{2 \cdot r \cdot v \cdot \rho}{\eta}$$

- ▶ где r – радиус сосуда (в м);
 - ▶ v – средняя линейная скорость кровотока (в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$);
 - ▶ ρ – плотность (в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$);
 - ▶ η – вязкость (в $\text{Па} \cdot \text{с}$);
 - ▶ r – радиус (м).
- Re – число Рейнольдса.