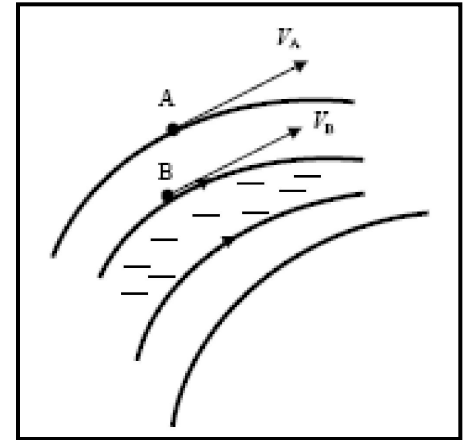
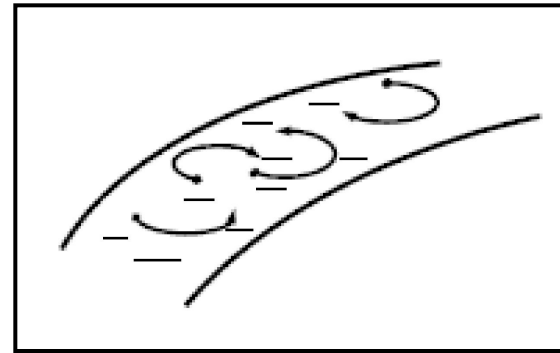


Ламинарное и турбулентное течение

Ламинарное течение- это слоистое течение. Слои жидкости движутся параллельно, не смешиваясь между собой

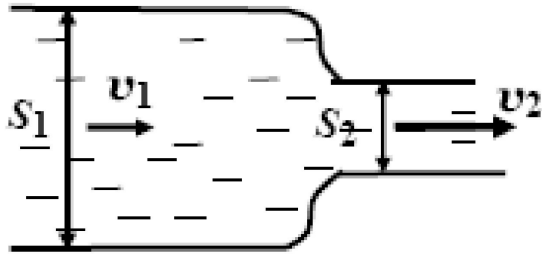


Турбулентное течение – это вихревое течение жидкости сопровождающееся перемешиванием слоев, обусловленным образованием вихрей. Скорость частиц непрерывно меняется.

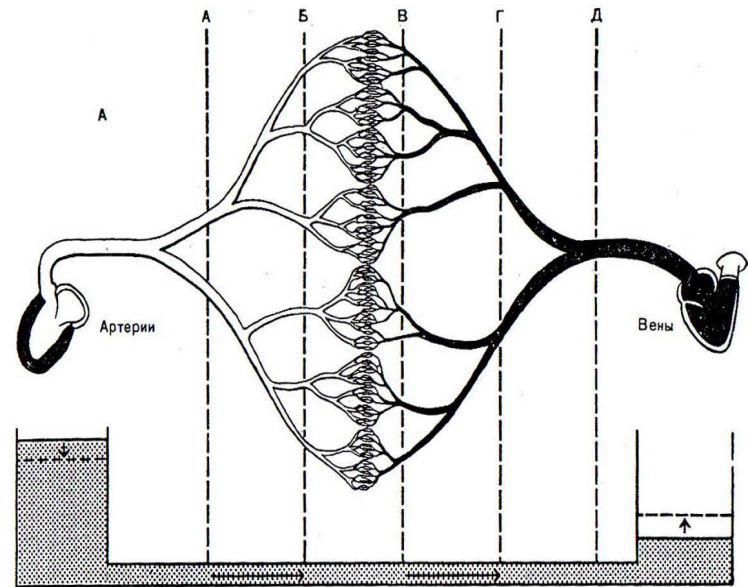


Уравнение неразрывности потока

Скорость течения крови значительно различается в разных отделах кровеносной системы. Она определяется уравнением неразрывности потока.



$$S \cdot v = \text{const}$$

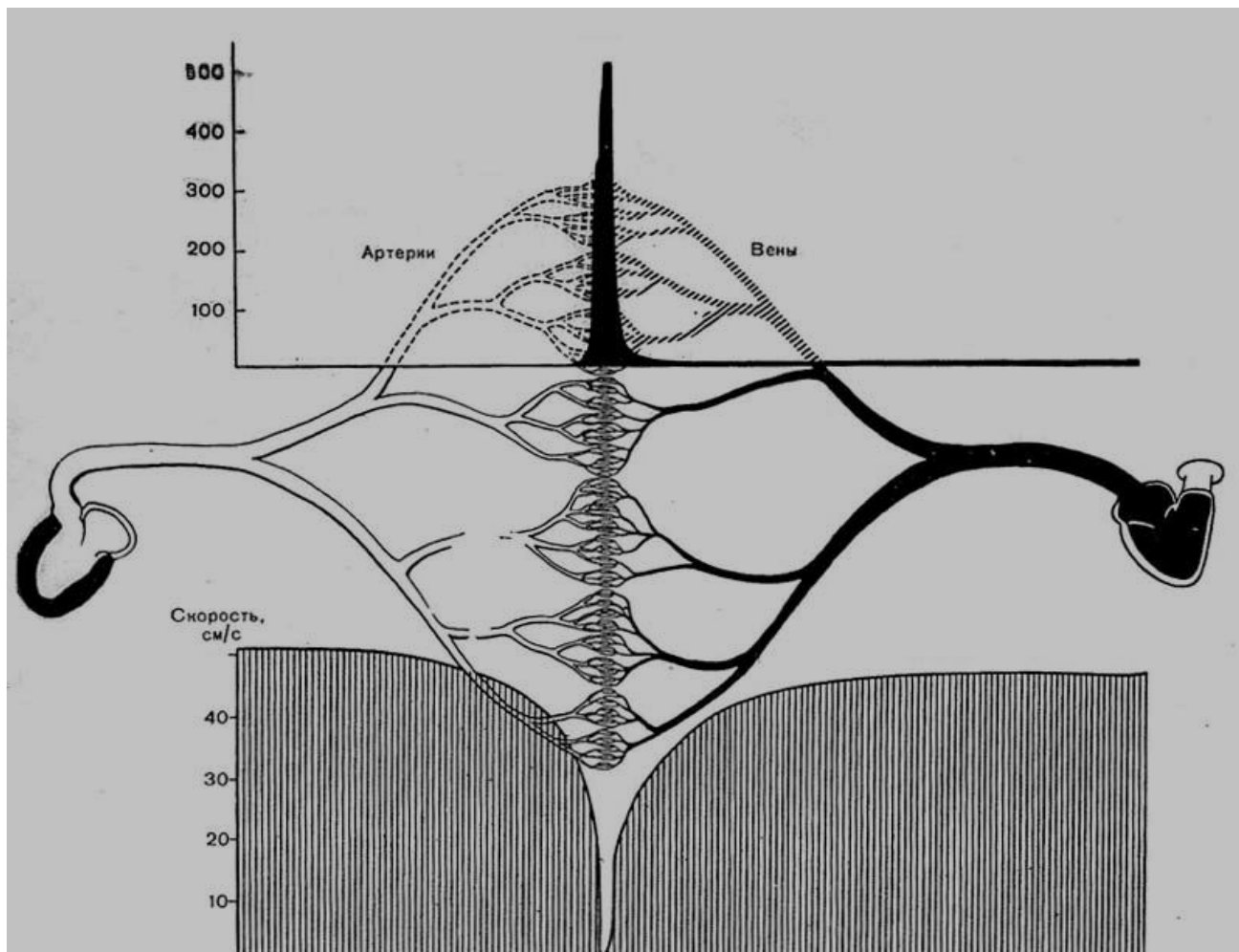


Через каждый уровень поперечного сечения, обозначенный вертикальными линиями, протекает одинаковый объем крови

Площадь поперечного сечения аорты в 600 раз меньше, чем капилляров. Поэтому в капиллярах скорость кровотока низкая.

$$\begin{aligned} V_{\text{аорт.}} &= 0,5 \text{ м/с} \\ V_{\text{капил.}} &= 0,5 \text{ мм/с} \end{aligned}$$

Связь между поперечным сечением и скоростью кровотока



Уравнение Бернулли

Закон Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости:

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

ρ — плотность

жидкости,

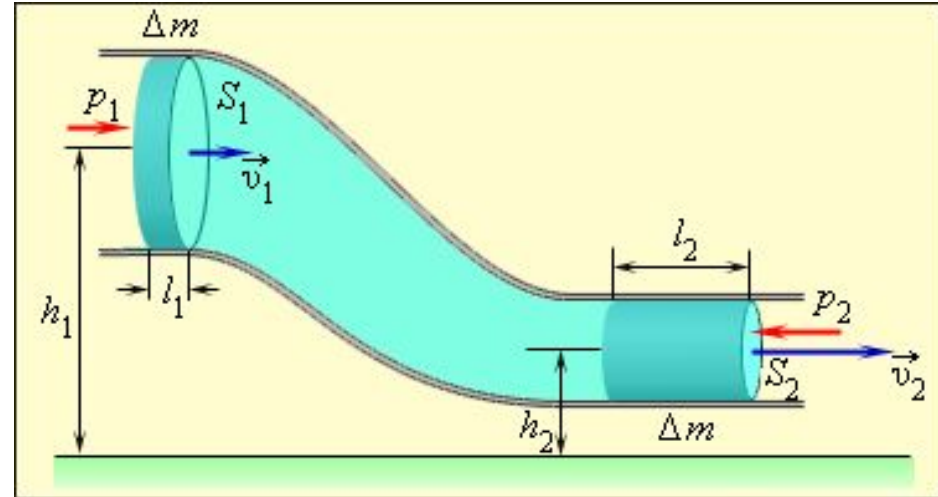
v - скорость потока,

h - высота,

p — давление,

g - ускорение

свободного падения



Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости (динамического давления) статическое давление падает.

Для горизонтальной трубы уравнение Бернулли принимает вид:

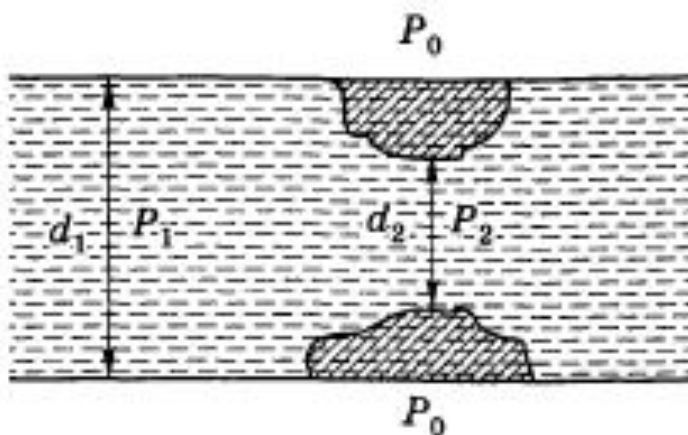
$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$



Даниил БЕРНУЛЛИ
(1700–1782)

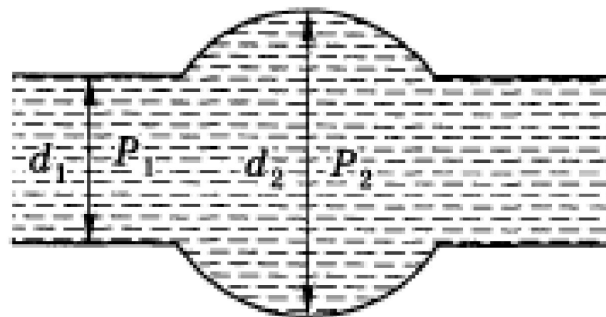
Следствия из уравнения Бернулли

Закупорка



$$S \cdot v = \text{const}$$

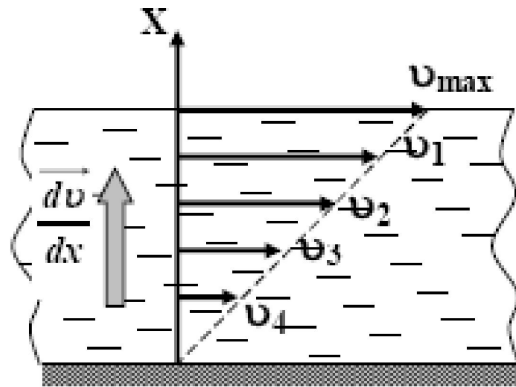
Расширение



$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$

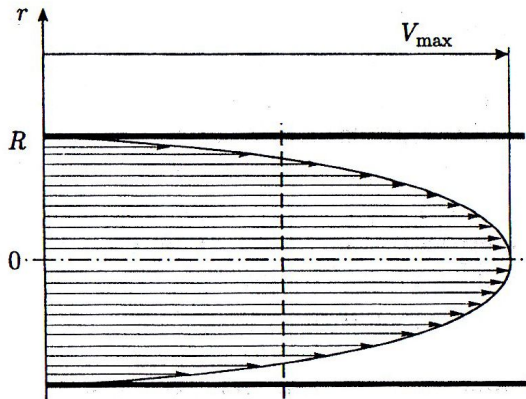
Внутреннее трение (вязкость жидкости).

Уравнение Ньютона



Вязкость (внутреннее трение) – это свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой

Основной закон вязкого течения был установлен **Ньютоном** (1713)



$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S$$

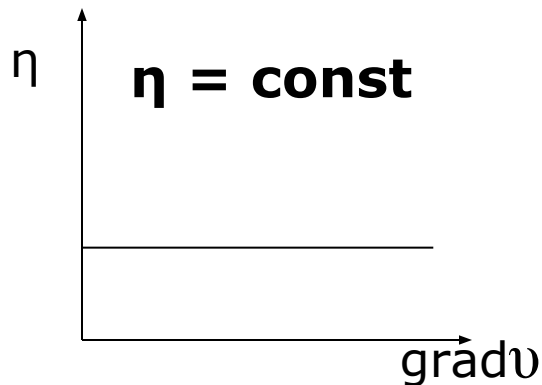


Формулировка: сила внутреннего трения F между слоями движущейся жидкости прямо пропорциональна скорости сдвига и площади поверхности соприкасающихся слоев S . Коэффициентом пропорциональности является коэффициент вязкости η .

Ньютоновские и неньютоновские жидкости

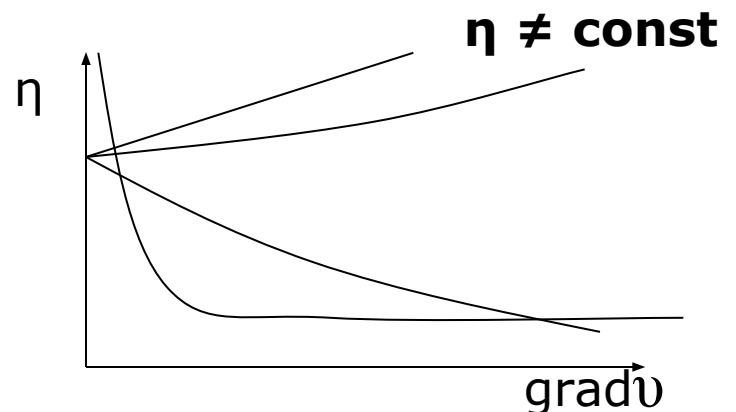
$$\sigma = \eta \cdot \text{grad } v$$

η **не зависит** от $\text{grad } v$
Ньютоновская жидкость



Пример: однородная жидкость,
вода, ртуть, глицерин, лимфа,
плазма крови, сыворотка

η **зависит** от $\text{grad } v$
Неньютоновская
жидкость



Пример: неоднородные жидкости,
суспензии, кровь, эмульсии

Формула Пуазейля



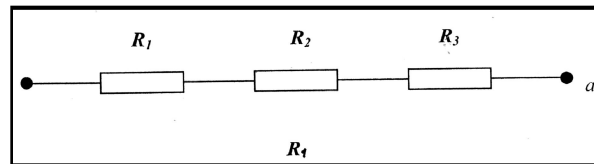
Жан Мари Пуазейль
(1799-1869)

Французский врач, физик,
физиолог, преподавал
медицинскую физику

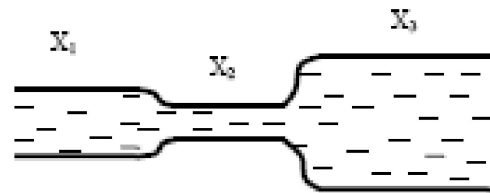
$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta l}$$

$$X = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

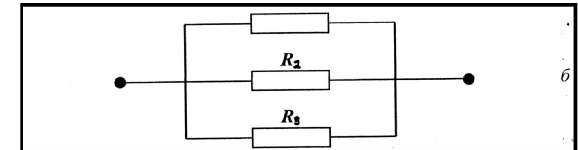
$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{X}$$



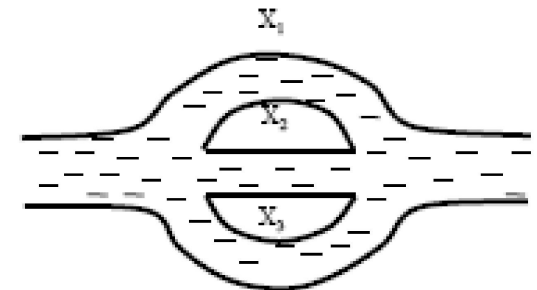
$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



$$X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$$



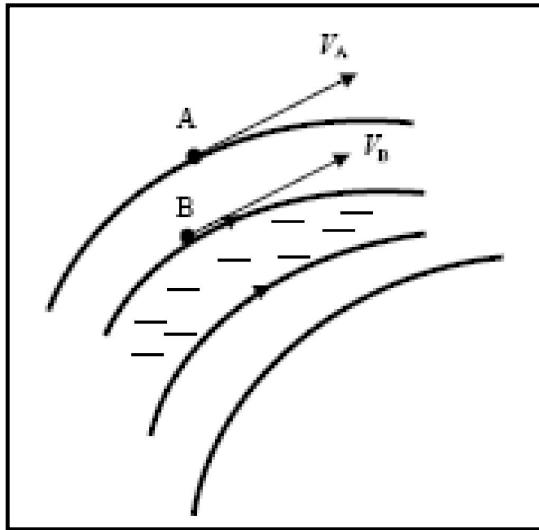
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \dots + \frac{1}{X_n}$$

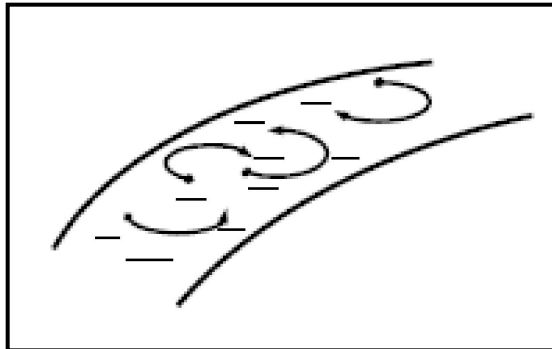
Формулировка: Объем жидкости Q , протекающей по горизонтальной трубе небольшого сечения за единицу времени, прямо пропорционален радиусу трубы R в четвёртой степени, разности давлений ΔP на концах трубы, обратно пропорционален коэффициенту вязкости η и длине трубы. Коэффициентом пропорциональности является $\pi/8$ (получен эмпирически).

Характер течения жидкости определяется числом Рейнольдса

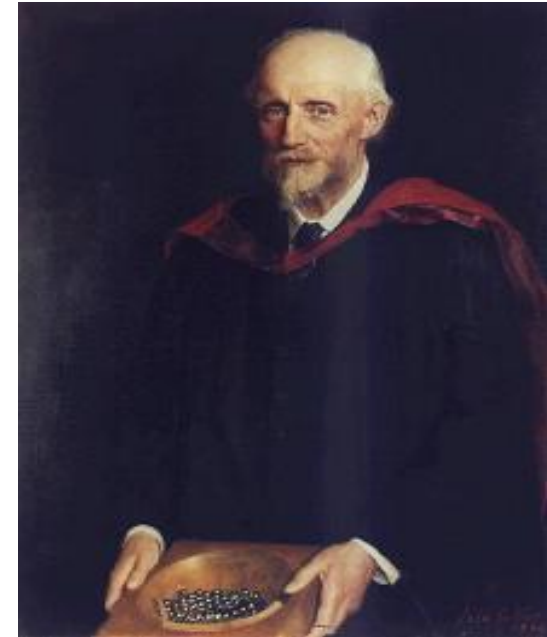


$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Величина безразмерная



В 1883 Рейнольдс установил, что ламинарное течение **переходит в турбулентное**, когда введенное им число Рейнольдса **превышает критическое значение**.



РЕЙНОЛЬДС, ОСБОРН
(1842–1912),
английский инженер и
физик

Если $Re < Re_{кр} \Rightarrow$ Ламинарное течение

Если $Re > Re_{кр} \Rightarrow$ Турбулентное течение

Кровь относится к неньютоновским жидкостям. Ее вязкость зависит от режима течения.

Факторы, влияющие на вязкость крови

1. Температура
2. Гематокрит
3. Скорость сдвига ($\text{grad } v$)
4. Организация эритроцитов в потоке крови

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S$$

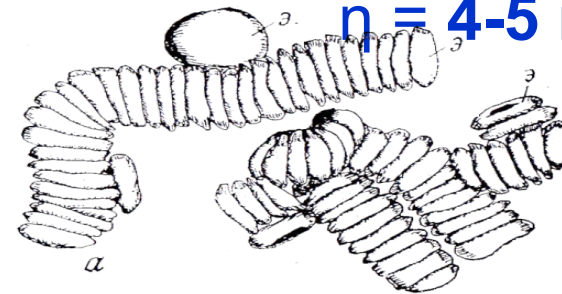
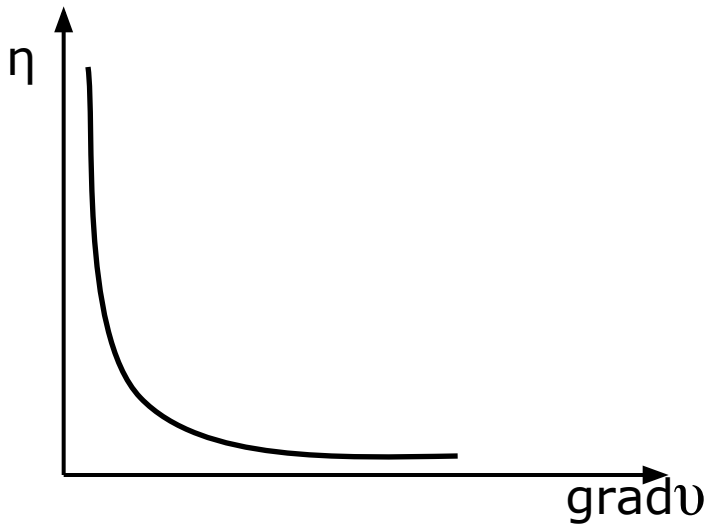
В капиллярах $v \downarrow$

$\eta \uparrow$

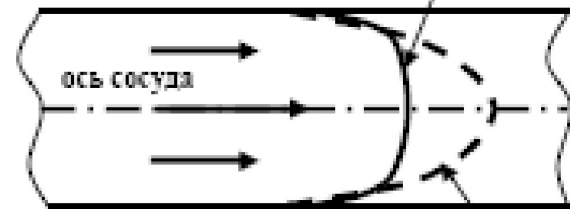
В артериях

Эритроциты образуют «монетные столбики» - клеточные агрегаты.

$\eta = 800 \text{ мПа}\cdot\text{с}$

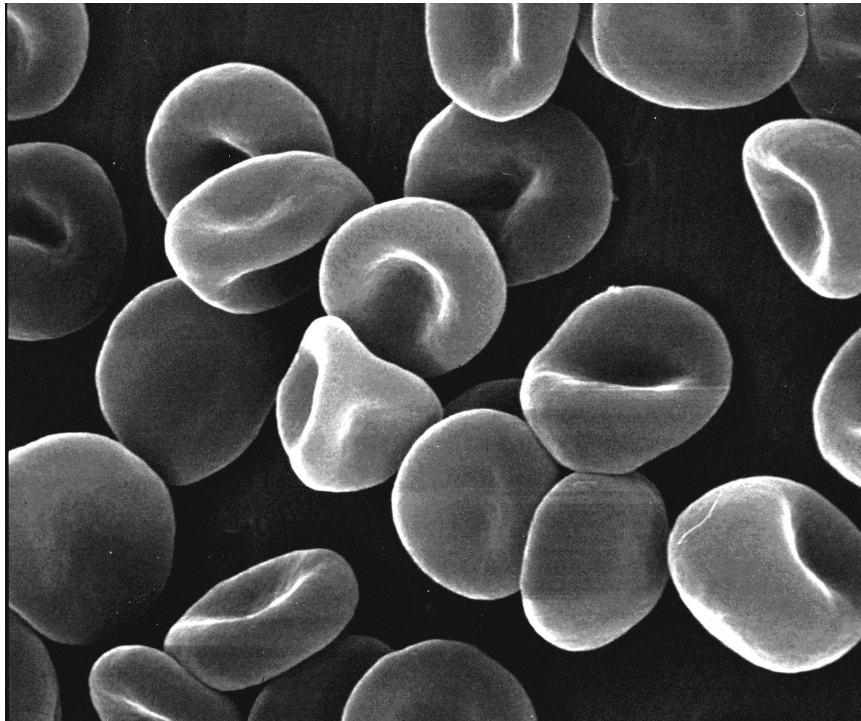
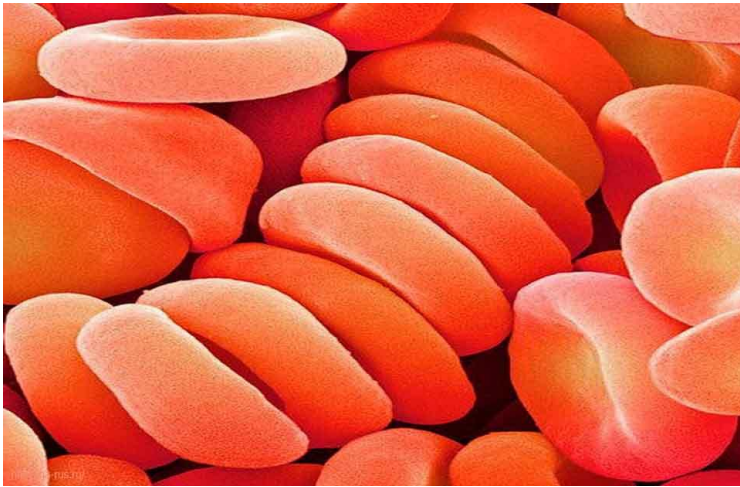


Реальный профиль скорости



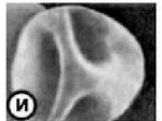
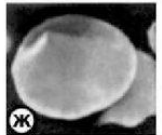
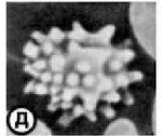
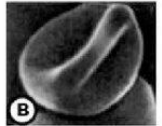
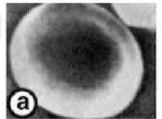
Профиль скорости для ньютоновской жидкости

Зависимость вязкости крови от режима течения



Различные формы эритроцитов, выявляемые при сканирующей микроскопии:

- а, б — дискоцит;
- в — дискоцит с гребнем;
- г — дискоцит с множественными выростами;
- д — эритроцит в виде тутовой ягоды;
- е — куполообразный эритроцит;
- ж — сферический эритроцит (гладкий);
- з — сферический эритроцит с выростами;
- и — эритроцит в виде спущенного мяча;
- к — дистрофически измененные эритроциты; x 3600.

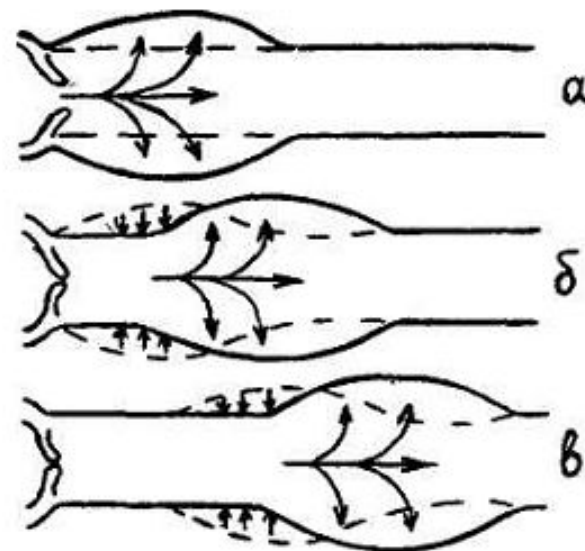


эхиноциты (эллипсоидные клетки с "шипами"; 6% от всех эритроцитов) и затем в **сфероциты** (сфероидные клетки без шипов; 1%).

Роль эластичности сосудов в системе кровообращения

Пульсовые волны

Образование пульсовой волны

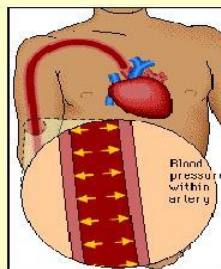


ПУЛЬСОВАЯ ВОЛНА

Под влиянием пульсирующего тока крови в аорте и крупных сосудах возникают колебания стенки сосуда - **пульсовая волна**.

В крупных сосудах скорость пульсовой волны определяется по **формуле Моенса-Кортевега**:

$$v = \sqrt{\frac{E \cdot h}{\rho \cdot d}}$$



где **E**-модуль упругости сосуда, **h**-толщина его стенки, **ρ**-плотность крови, **d**-диаметр сосуда.

В аорте скорость пульсовой волны равна 4-6 м/с, в артериях - 8-12 м/с, в венах, которые обладают большей эластичностью, - около 1 м/с.

С возрастом эластичность сосудов снижается (модуль упругости растёт), а скорость пульсовой волны возрастает. Растёт она и с увеличением давления, т.к. при повышенном давлении сосуд несколько растягивается, становится более "напряжённым".