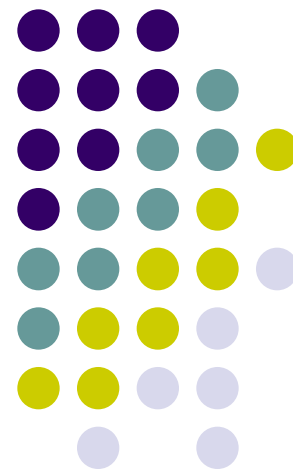


Основы биореологии и гемодинамики

Лектор: ст.преп. Диденко О.Н.
Кафедра медицинской,
биологической физики и
информатики

ГУ ЛНР «Луганский государственный
медицинский университет им. Святителя
Луки»



БИОРЕОЛОГИЯ И ГЕМОДИНАМИКА



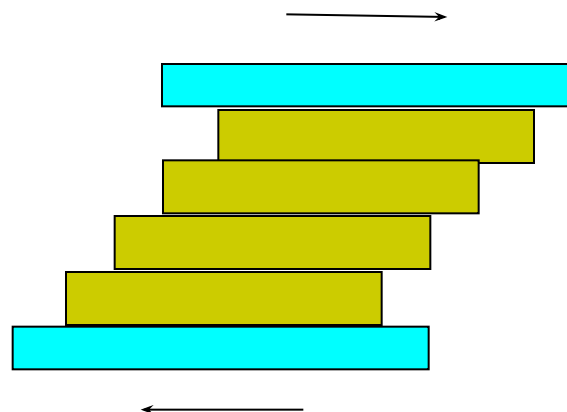
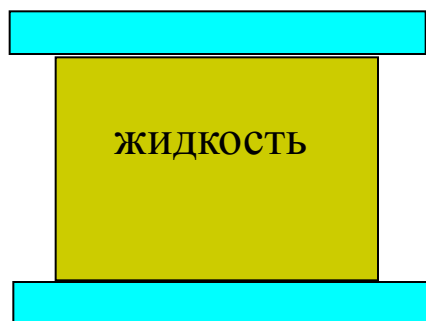
Биореология – это наука, которая изучает упругие свойства твердых тел, жидкостей и газов, т.е. деформацию непрерывных сред.

Гемодинамика описывает движение этих сред под действие внешних и внутренних сил.

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ



- В случае жидкостей в деформации принимают участие множество слоев, которые перемещаются один над другим. Смещение продолжается пока присутствует внешняя сила.



СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ



Вязкость

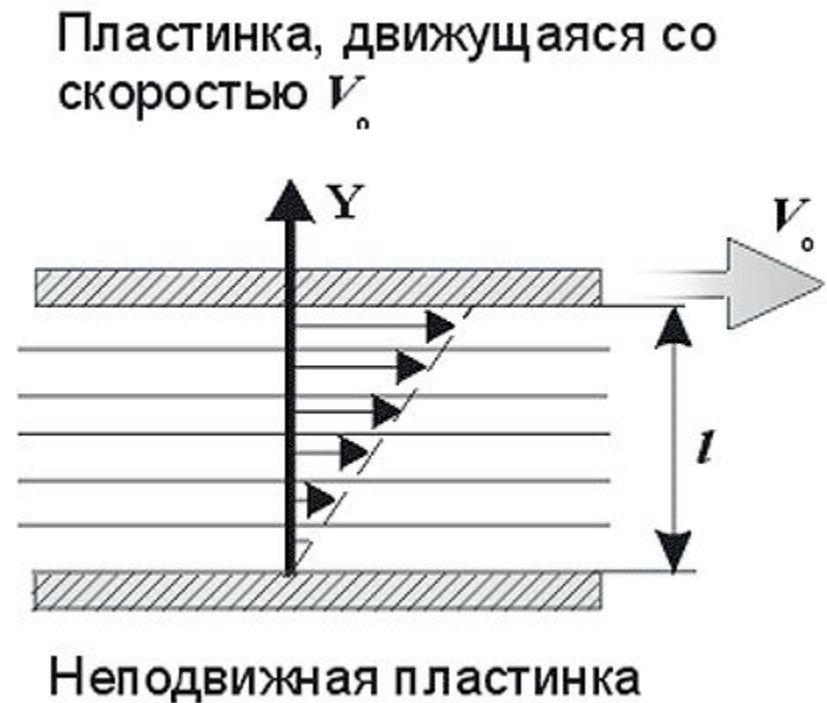
- Жидкости проявляют сопротивление движению из-за своей **вязкости**, или, как ее еще называют, «**внутреннего трения**».
- Чем выше вязкость жидкости, тем больше возникающее между ее слоями сопротивление движению.
- Явление внутреннего трения **возникает из-за взаимодействия молекул**, находящихся в соседних слоях жидкости.

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ



Вязкость

- Слой жидкости, непосредственной прилегающий к неподвижной поверхности, имеет **нулевую скорость**. Это связано с тем, что молекулы жидкости взаимодействуют с молекулами твердого тела намного сильнее, чем друг с другом.



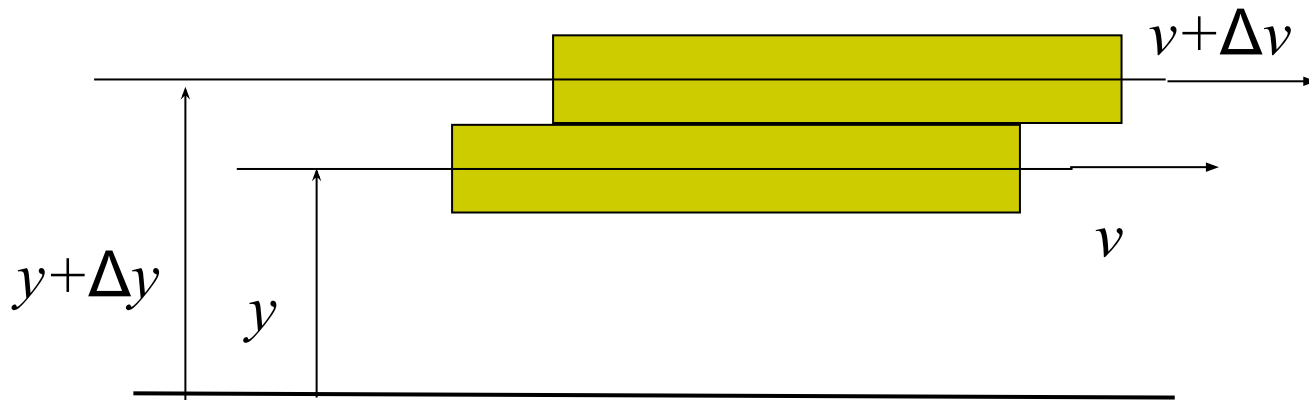
Профиль скоростей

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ

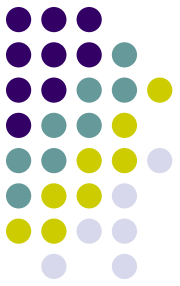


Закон Ньютона для вязкости

- Рассмотрим два прилегающих друг к другу слоя жидкости, находящихся на высоте y и $y+\Delta y$, и имеющих скорости v и $v + \Delta v$.
- В пределе, при приближении слоев, **градиент скорости** определяется как отношение dv/dy .



СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ



Закон Ньютона для вязкости

Ньютон предположил, что сдвигающая сила (между слоями) пропорциональна градиенту скорости, перпендикулярному к слоям, и площади соприкосновения смежных слоев жидкости:

$$F_{\text{сдвиг.}} = -F_{\text{тр}} \sim \frac{dv}{dy} \quad \text{или}$$

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{dv}{dy} S$$

Величина η называется коэффициентом вязкости жидкости. Коэффициент вязкости зависит от физических свойств и строения жидкости (т.е. степени взаимодействия молекул).

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ



Закон Ньютона для вязкости

- Величина η называется еще **динамической** вязкостью (или просто вязкостью) жидкости.
- Коэффициент η является одним из важнейших свойств жидкости.
- Большинство жидкостей подчиняются уравнению Ньютона (так называемые «**НЬЮТОНОВСКИЕ ЖИДКОСТИ**»).
- Для жидкостей η **уменьшается** с **увеличением температуры**.
- Другим свойством жидкости является ее **кинематическая** вязкость $\nu = \eta / \rho$.

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ

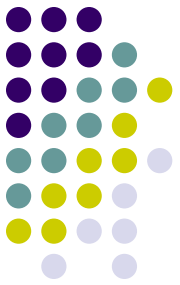


Единицы измерения динамической и статической вязкости

$$[\eta] = \left[\frac{F}{\frac{dv}{dy} S} \right] = \left[\frac{H}{\frac{M}{C} \cdot M^2} \right] = \left[\frac{H}{M^2} \cdot C \right] = \left[\frac{K\Gamma}{M \cdot C} \right] = [Pa \cdot c]$$

$$[\nu] \equiv \left[\frac{\eta}{\rho} \right] \equiv \left[\frac{K\Gamma}{M \cdot C} \frac{M^3}{K\Gamma} \right] \equiv \left[\frac{M^2}{C} \right]$$

НЬЮТОНОВСКИЕ И НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ЖИДКОСТИ



Жидкость называется **ньютоновской**, если ее течение **подчиняется уравнению Ньютона** и скорость зависит только от **природы жидкости** и **температуры** (вода, многие водные растворы, некоторые простые органические жидкости, этиловый спирт, ацетон и др.).

Жидкости, которые не удовлетворяют уравнению Ньютона называются **неньютоновскими**. Их вязкость зависит, в частности, от **градиента скорости** (высокомолекулярные органические смеси, эмульсии, суспензии и т.д.).

СОСТАВ И СВОЙСТВА КРОВИ



Кровь является **неньютоновской** жидкостью. Вязкость человеческой крови находится в пределах от $4 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ Па·с и при различных патологиях варьирует от $1.5 \cdot 10^{-3}$ до $23 \cdot 10^{-3}$ Па·с. По значению вязкости крови можно проводить диагностику состояния здоровья и выявлять некоторые заболевания.

$$\text{Норма: } \eta_{кр} = 4 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

СОСТАВ И СВОЙСТВА КРОВИ

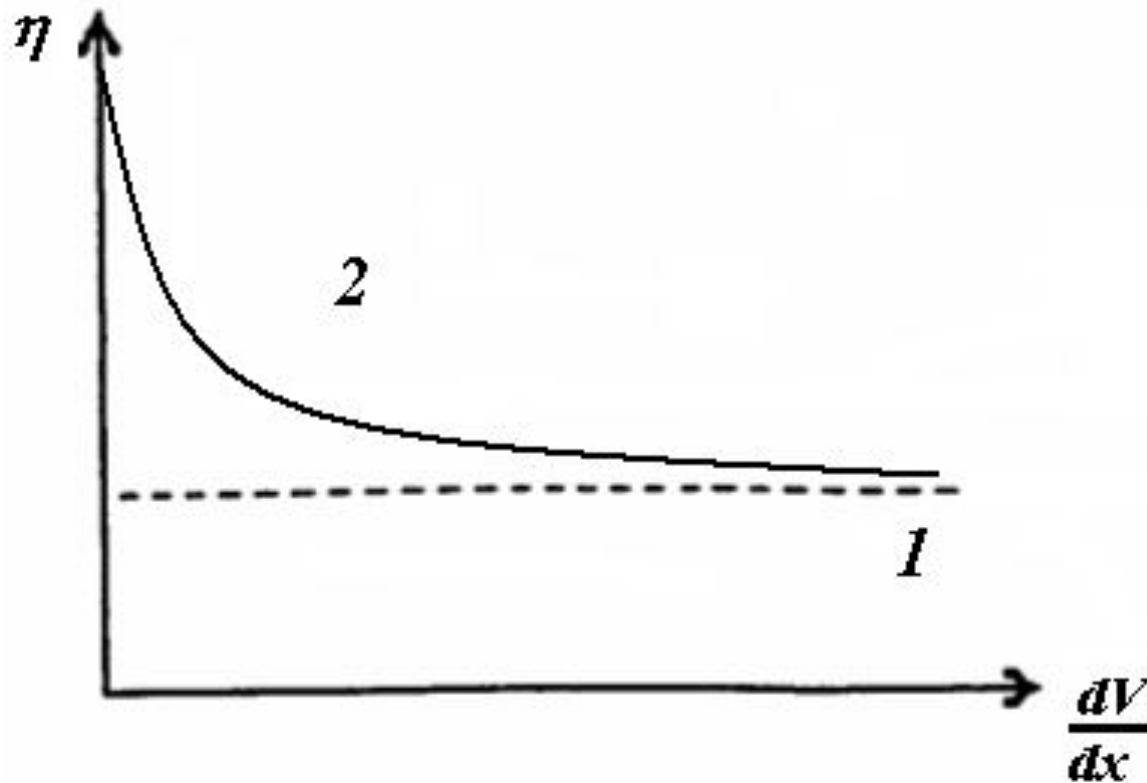
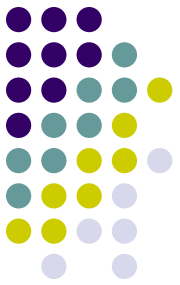


Кровь состоит из большого числа макромолекул (альбумина (белок), липидов, углеводов) и клеток крови (эритроциты, лейкоциты, тромбоциты).



Эритроциты оказывают наибольшее влияние на реологию крови. Они занимают около 46 % всего объема крови. Это значение (0.46) называется **гематокритом** крови.

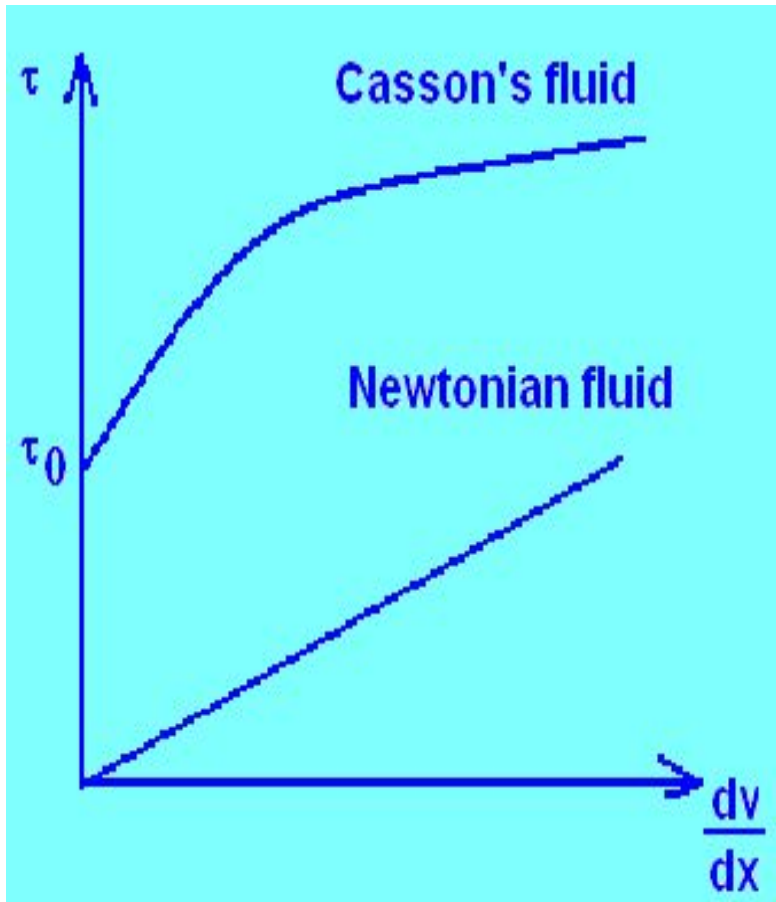
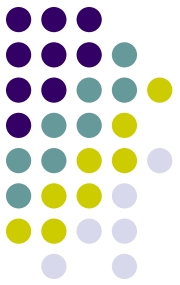
Зависимость между вязкостью и градиентом скорости жидкости



1. Ньютоновские жидкости $\eta = \text{const}$

2. Неньютоновские жидкости $\eta = f\left(\frac{dv}{dx}\right)$

Модель Кессона



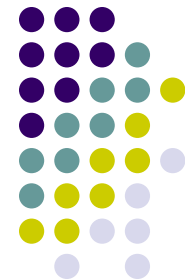
Реологические свойства крови могут быть приближенно описаны с применением ур-я Кессона:

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \eta \left(\frac{dv}{dx} \right)^{1/2}$$

$$\tau = F/S$$

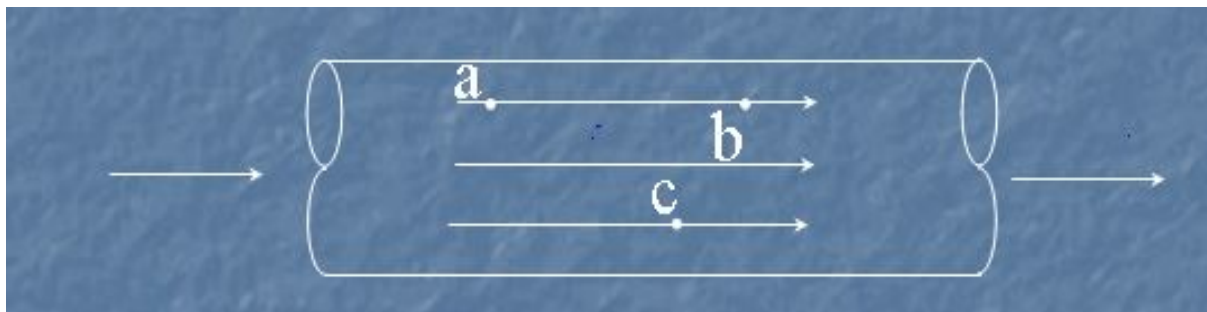
τ_0 – предел текучести

Жидкости в движении



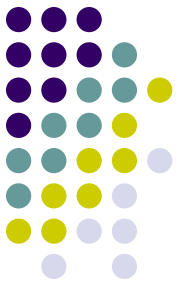
Однородный поток

- Течение называется однородным, если его свойства одинаковы во всем объеме жидкости.



- Если величины $v_a = v_b = v_c$, $\rho_a = \rho_b = \rho_c$ и т.д. имеют одинаковые значения во всех точках, то такой поток – однородный.

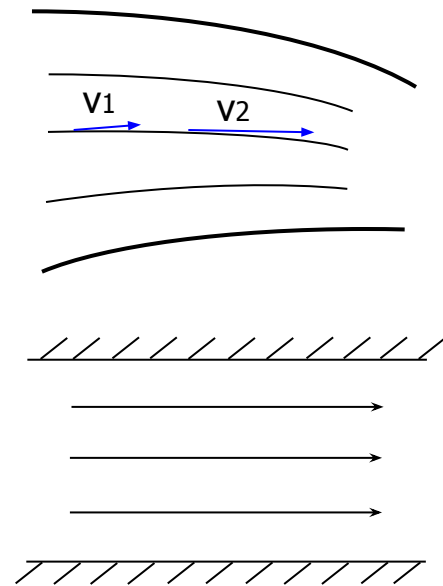
Жидкости в движении



Линии тока

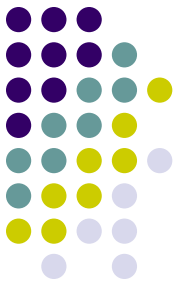
Линиями тока называются линии, к которым векторы скорости являются касательными.

- Густота линий тока пропорциональна скорости.
- Линии тока в случае однородного потока изображаются прямыми и параллельными друг другу линиями.



Однородный поток

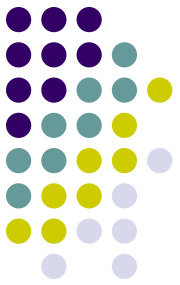
Жидкости в движении



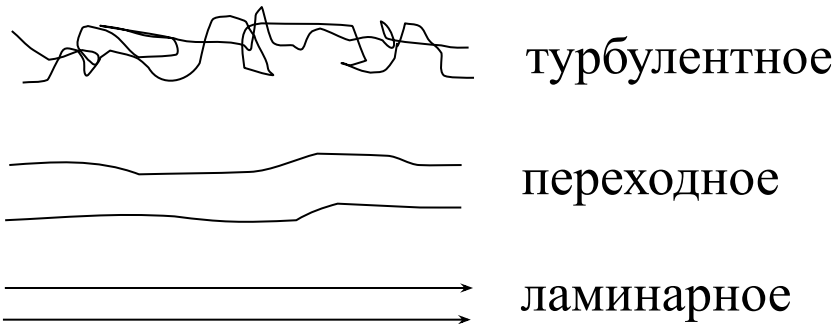
Два типа течения

- Первый тип потока характерен для течения жидкости с низкой скоростью. При этом частицы жидкости движутся **параллельно** друг другу, а отдельные слои не смешиваются. Такое течение называется **ламинарным**.
- Второй тип течения наблюдается при высоких скоростях перемещения жидкости и называется **турбулентным**. В нем частицы движутся не прямолинейно, но более беспорядочно, а **слои** жидкости **смешиваются** друг с другом.
- Между полностью ламинарным и полностью турбулентным типом потока можно выделить **переходную область**.

Жидкости в движении



Число Рейнольдса



Тип потока может быть определен с применением простого параметра - числа Рейнольдса:

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

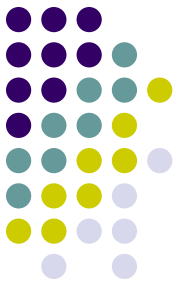
$Re < Re_{кр}$ – ламинарное течение
 $Re > Re_{кр}$ – турбулентное течение
 $Re \approx Re_{кр}$ – переходное течение

где d – диаметр трубы, v – средняя скорость,

ρ – плотность жидкости, η – вязкость,

$Re_{кр}$ – критическое значение коэффициента Рейнольдса

Жидкости в движении



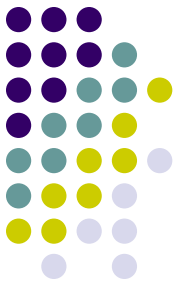
Число Рейнольдса

- Для трубы с круглым сечением при нормальных условиях критическое значение числа Рейнольдса равно

$$Re_{кр} = 2000..4000$$

- Таким образом:
 - $Re < 2000$: ламинарное течение
 - $2000 < Re < 4000$: переходное течение
 - $Re > 4000$: турбулентное течение

Жидкости в движении



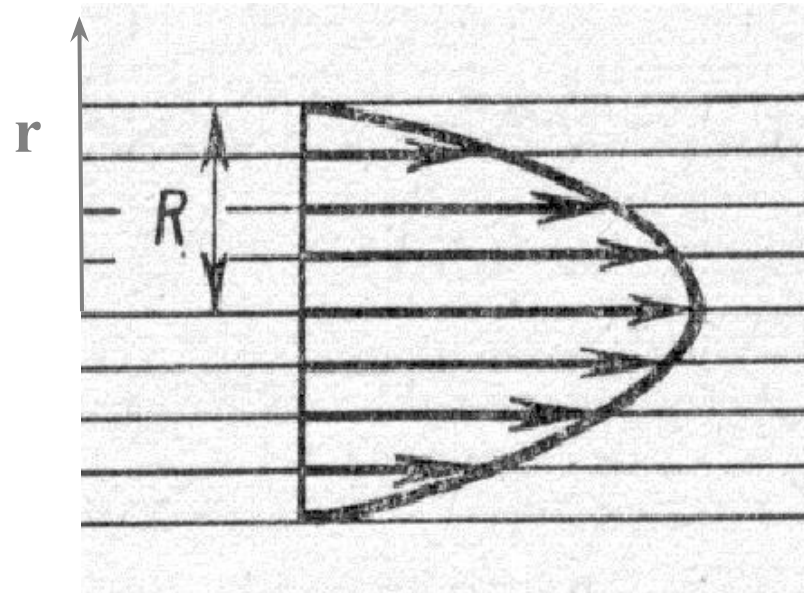
Распределение скоростей в вязкой жидкости, текущей через трубу

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} (R^2 - r^2)$$

$$v_{\min}(r = R) = 0$$

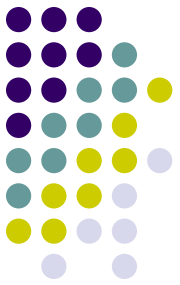
$$v_{\max}(r = 0) = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} R^2$$

$$\bar{v} = \frac{p_1 - p_2}{8l\eta} R^2$$



R – радиус трубы

Жидкости в движении



Закон Пуазейля

Объем Q ньютоновской жидкости, протекающей за секунду через трубу с круглым поперечным сечением, равен:

$$Q = \bar{v} \cdot S = \bar{v} \cdot \pi R^2$$

где:

l – длина трубы

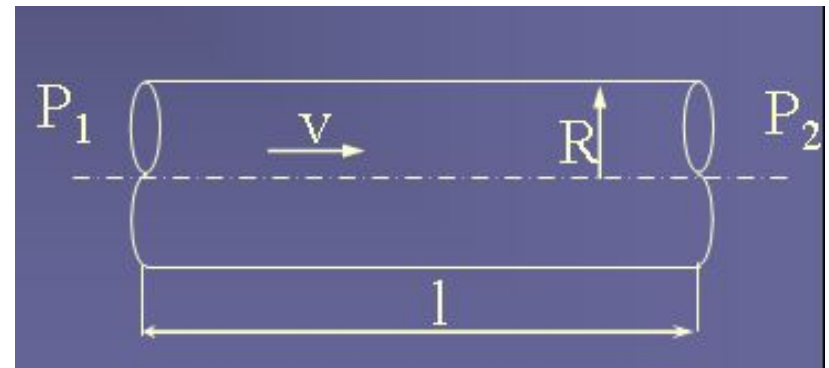
R – радиус трубы

$(P_1 - P_2)$ – разность давлений на концах трубы

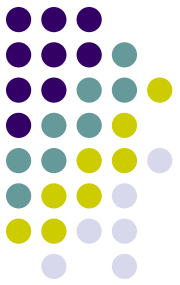
η – коэффициент вязкости

Q – удельный объем

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta l}$$



Жидкости в движении



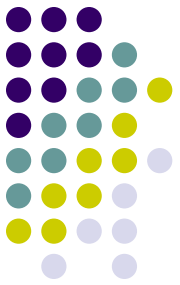
Основы гидродинамики.

Идеальная жидкость.

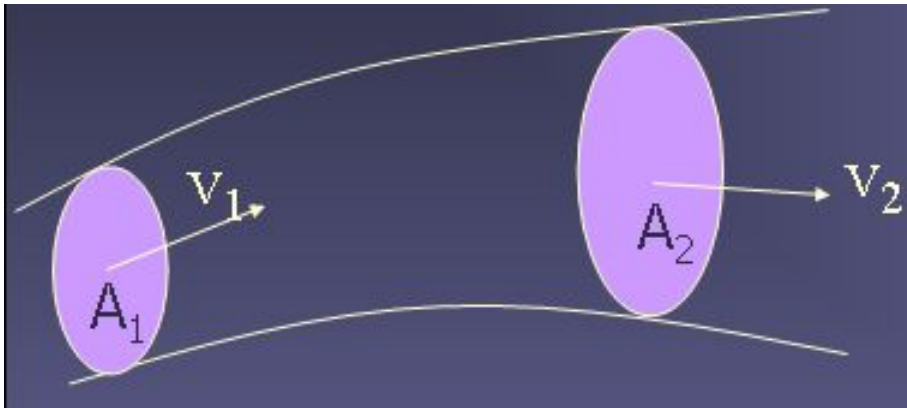
“Идеальная жидкость” является своеобразной идеализацией в гидродинамике.

Под **идеальной** понимают жидкость с **нулевой вязкостью**, и которая является **несжимаемой** (т.е. не изменяет свой объем и плотность при варьировании давления), **не обладает внутренним трением** и не изменяет свою фазу.

Жидкости в движении



Уравнение непрерывности потока

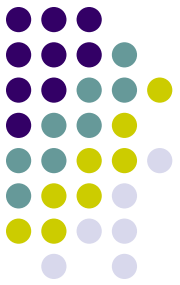


Для идеальных жидкостей

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения,
 v_1 и v_2 – скорости в поперечных сечениях S_1 и S_2

Жидкости в движении



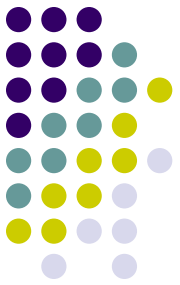
Уравнение Бернулли

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const}$$

p - давление, ρ - плотность, v – скорость,
 g – ускорение свободного падения, h - высота

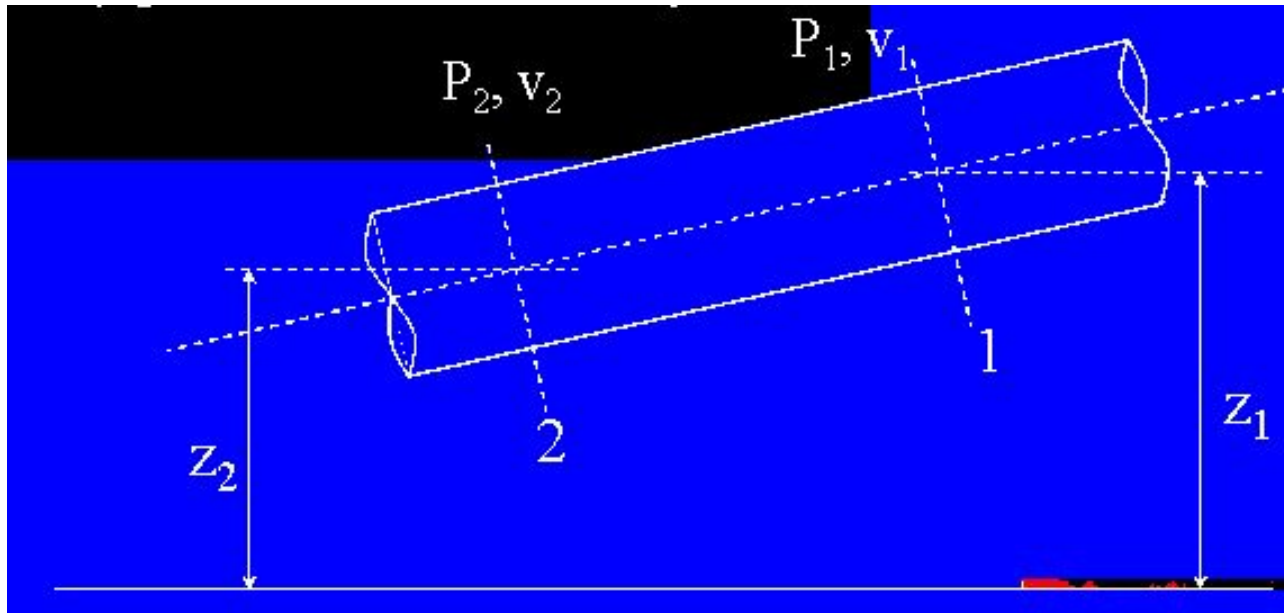
В уравнении Бернулли слагаемое p называется статическим давлением, ρgh – гидростатическим давлением, а $\frac{1}{2} \rho v^2$ – гидродинамическим давлением. Согласно этому уравнению полное давление гидродинамической системы остается постоянным.

Жидкости в движении

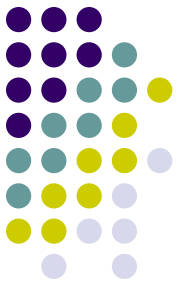


Уравнение Бернулли является следствием
из закона сохранения энергии

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const}$$

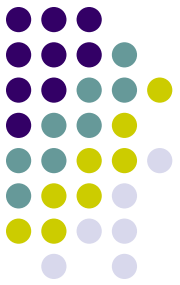


Элементы гемодинамики

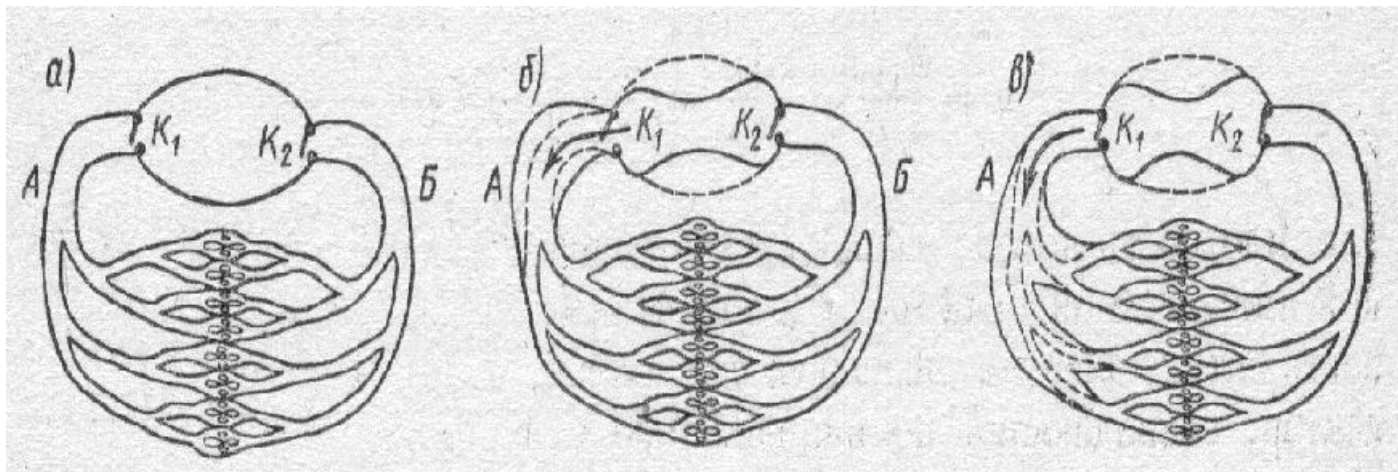


Кровеносная система представляет из себя закрытую систему эластичных сосудов: гидравлическую сеть, состоящую из большого числа ($\sim 10^8$) **кровеносных артерий, вен, капилляров** и насоса — **сердца**.

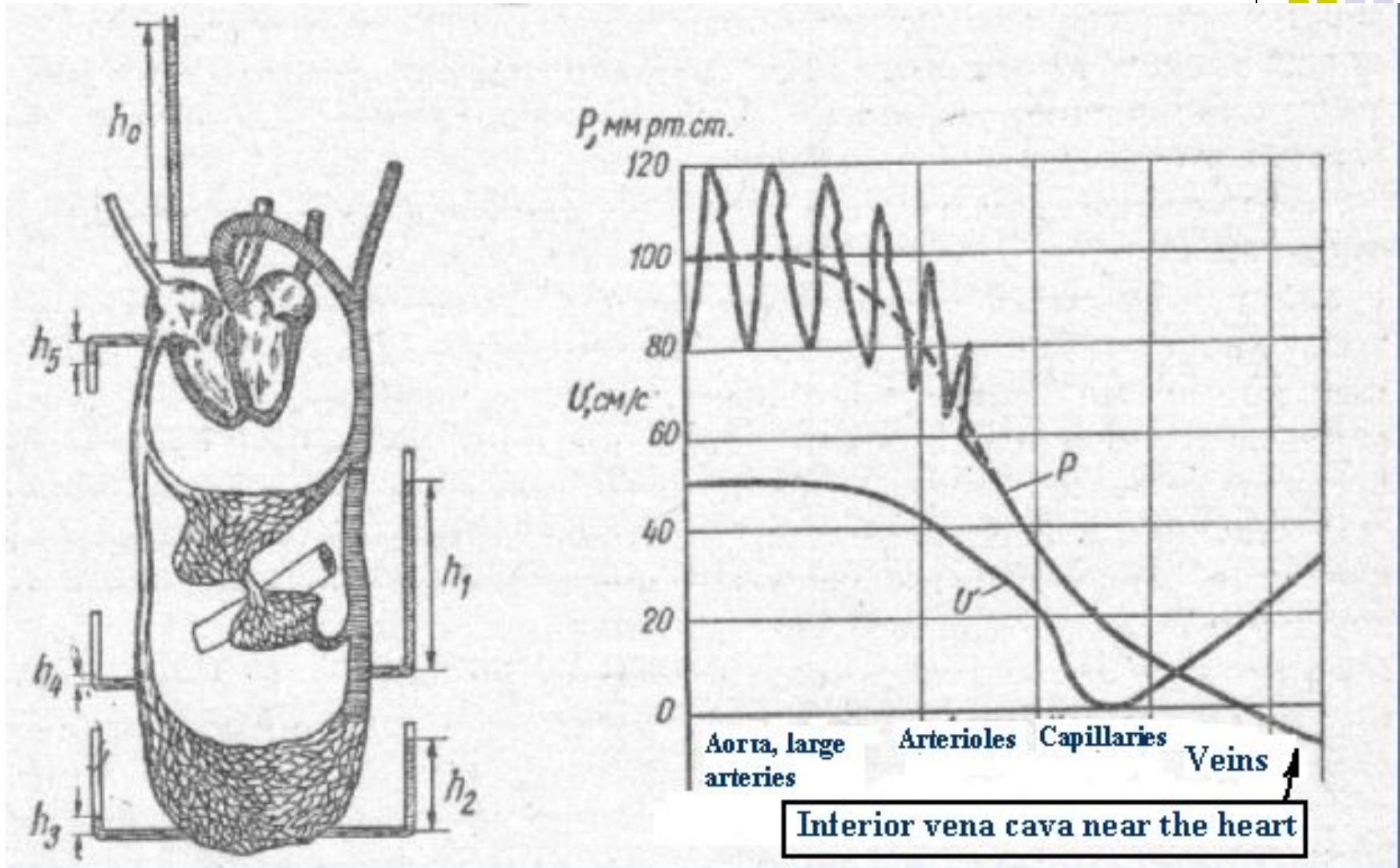
Механизмы циркуляции крови



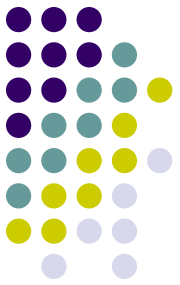
- Сердце – это насос
- Сосуды являются эластичными
- Работа сердечной мышцы
- Отрицательное давление в грудной клетке
- Свойства вен и клапанов



Циркуляция крови в кровеносной системе



Модели кровеносной системы



Уравнение Пуазейля $Q = \frac{\pi \cdot R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta l}$

может быть записано в форме

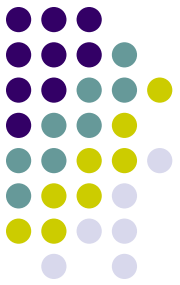
$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{X}$$

где $X = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$ – гидравлическое сопротивление

Эта формула аналогично закону Ома $I = \frac{(U_1 - U_2)}{R}$

Разность давлений $P_1 - P_2$ является аналогией разность электрических потенциалов (напряжению). Т.о. по аналогии мы можем записать формулы для параллельно и последовательно соединенных проводников:

$$X_{\text{посл.}} = X_1 + X_2 + X_3 \quad , \quad \frac{1}{X_{\text{пар.}}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \dots$$

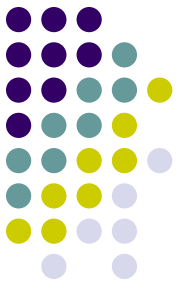


Пульсовая волна

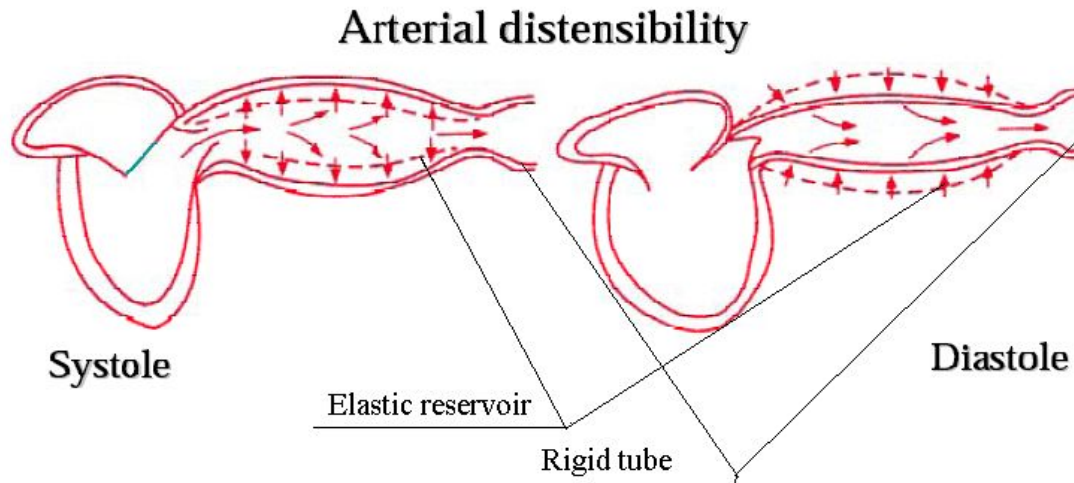
- Кровь циркулирует по венам и артериям, благодаря **эластичности** которых **прерывный поток** крови, исходящий от сердца преобразовывается в **непрерывный поток**, образуя так называемую **пульсовую волну**.
- Артерии представляют собой систему соединенных трубок с некоторой допустимой емкостью. Емкость эластичных кровеносных сосудов определяется **степенью** их **растяжимости** D_i

$$D_i = \frac{dV}{dp}$$

Модель Франка



- Все **крупные кровеносные сосуды** представляются в виде отрезков с **эластичными стенками** и гидравлическим сопротивлением $X \approx 0$, все **маленькие сосуды** представляются **жесткими трубками** с постоянным гидравлическим сопротивлением $X \neq 0$.
- Крупные артерии вмещают кровь путем хранения ее части во время **систолы** (сокращения сердечной мышцы) и ее отдачи во время **диастолы** (расслабления сердечной мышцы).



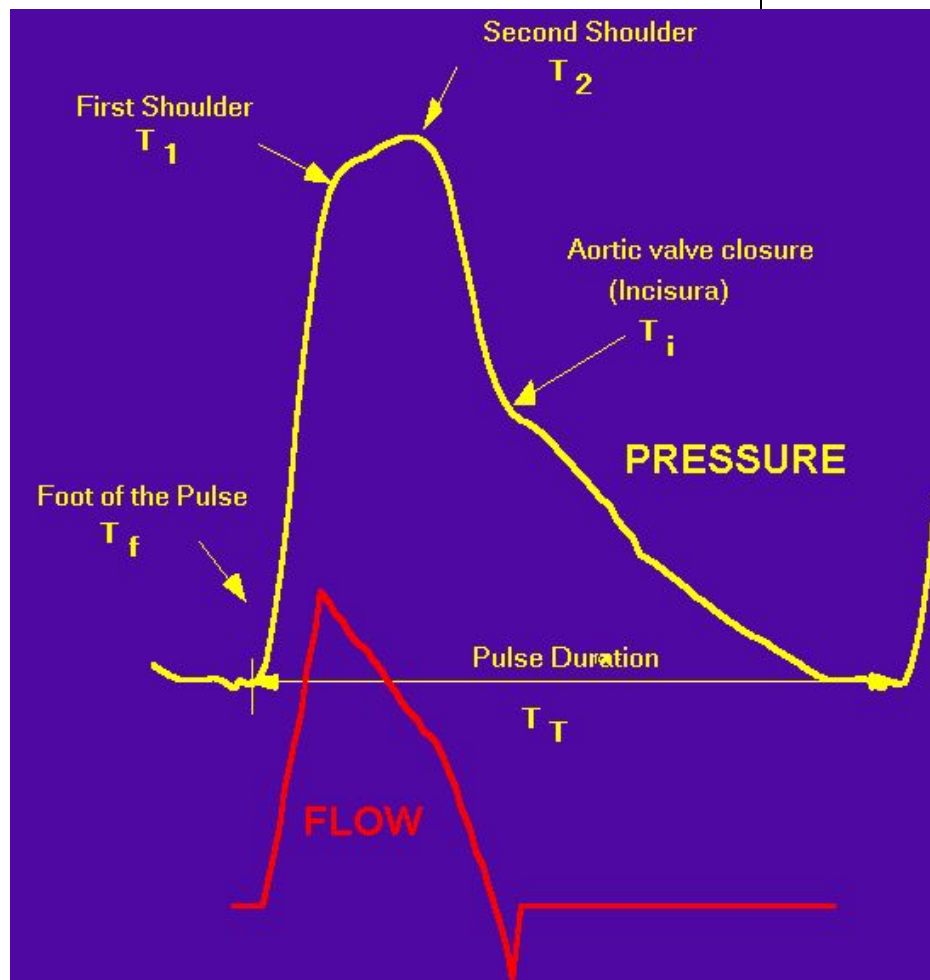
Пульсовая волна

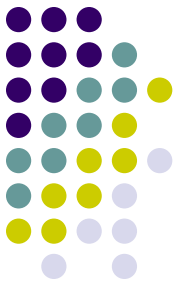


Скорость распространения
пульсовой волны в
кровеносной системе
определяется эластичными
свойствами сосудов

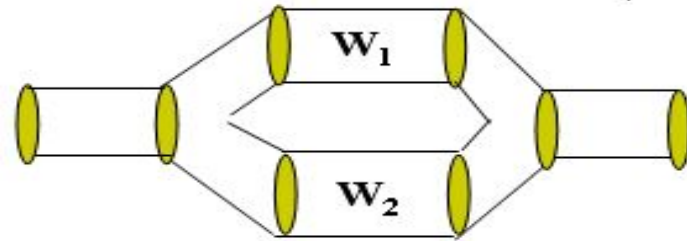
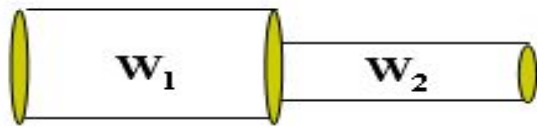
$$C = \sqrt{\frac{Ed}{2\rho r}}$$

E – модуль эластичности стенок
сосудов;
 d – толщина их стенок;
 r – внутренний радиус сосудов;
 ρ – плотность крови.





Эквивалентная электрическая модель течения крови по сосудам



$$X_s = X_1 + X_2$$

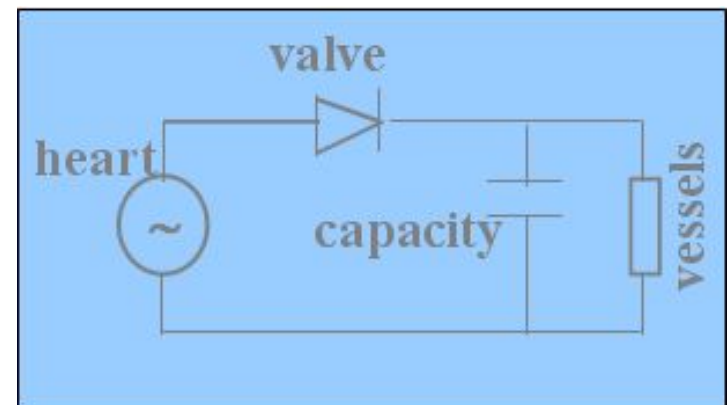
$$\frac{1}{X_s} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

Мощность сердца равна

$P = 3.3 \text{ Вт}$

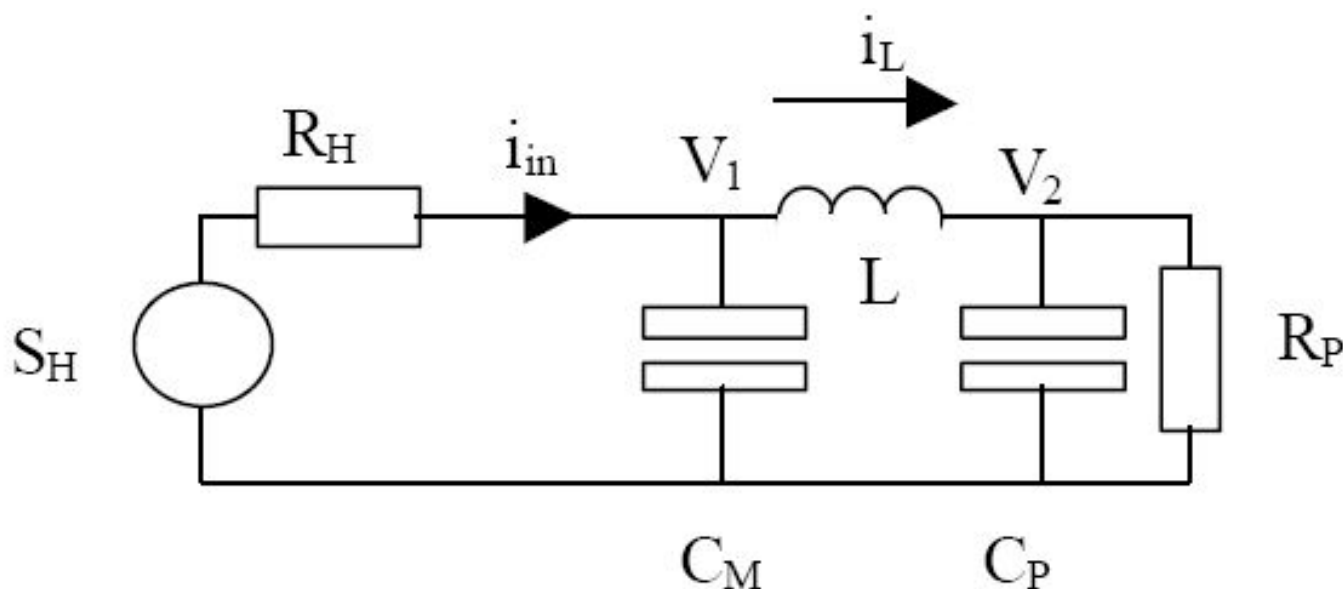
Работа, совершаемая
сердцем

$$A = 1,2 V_y (P + \rho v^2 / 2)$$



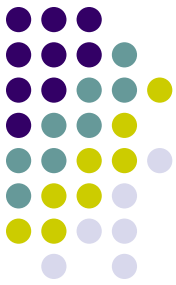
Упрощенная электрическая модель работы кровеносной системы

Современная электрическая модель циркуляции крови – четырехэлементная обобщенная параметрическая артериальная модель



Выводы:

1. Рассмотрены основные упругие свойства жидкостей (статическая, динамическая **вязкость** и др.).
2. Дано **уравнение Ньютона** для величины внутреннего трения в ньютоновских жидкостях и **уравнение Кессона** для оценки внутреннего трения крови (неньютоновской жидкости).
3. Рассмотрены основные **типы течения** жидкости и формула для вычисления характеризующего их **числа Рейнольдса**.
4. Приведены основные законы и уравнения движения идеальной несжимаемой жидкости:
 - **уравнение непрерывности** потока;
 - **уравнение Пуазейля** для удельного объема жидкости, протекающей по трубке;
 - **уравнение Бернулли**, учитывающее высоту, скорость и давление жидкости в различных участках потока.
5. Рассмотрено устройство и модели работы кровеносной системы человека (**модель Франка** и **пульсовой волны**).





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!