

ВОЕННО–МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ
имени С.М. Кирова
Кафедра биологической и медицинской
физики
ЛЕКЦИЯ № 15

по дисциплине «Физика, математика»

на тему: «**Биомеханика**
кровообращения»

для курсантов и студентов I курса ФПВ,
ФПиУГВ, спецфакультета

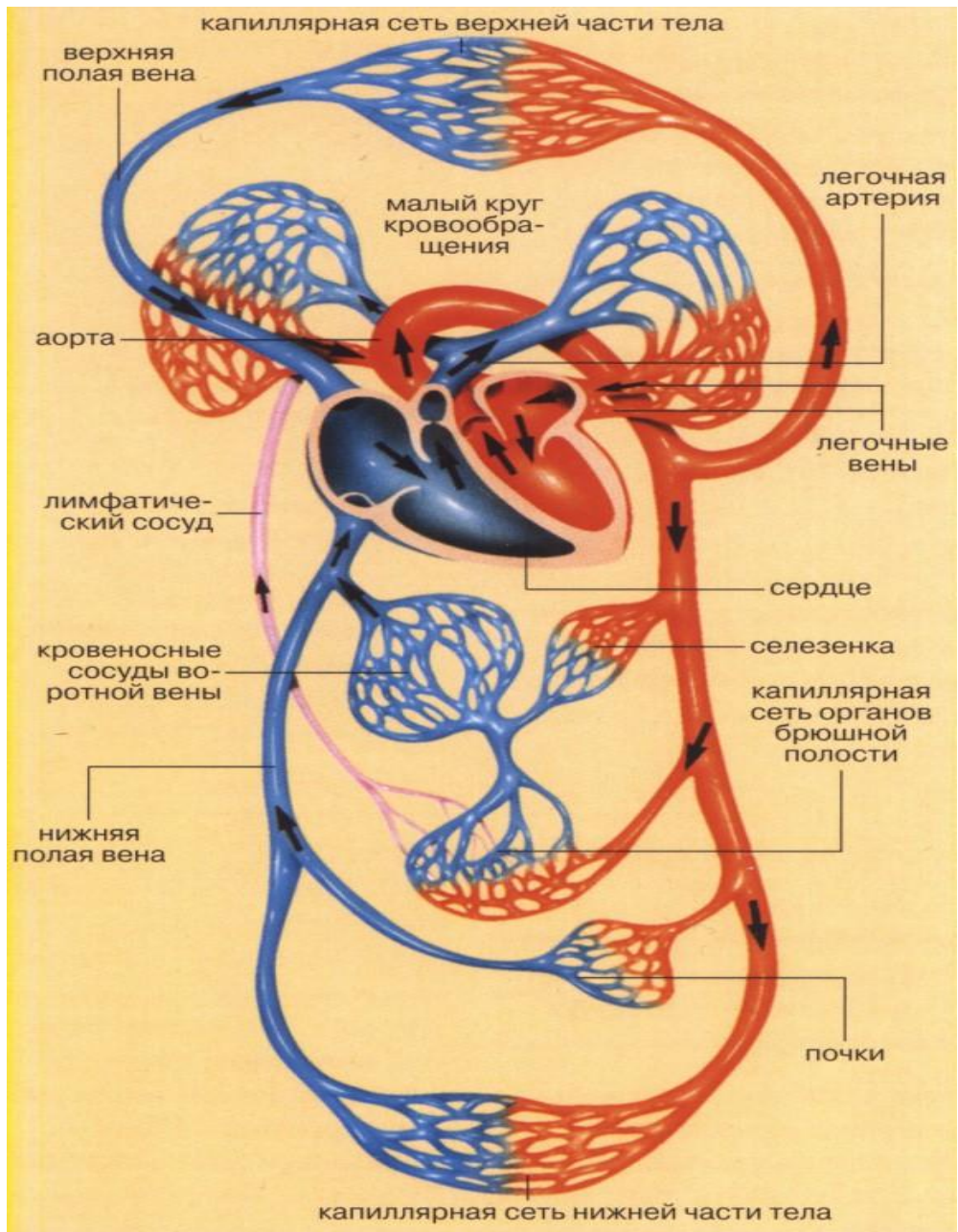
1. Общее представление о строении системы кровообращения

- **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.**



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

- Основной характеристикой любого движения является его **скорость**.
- В случае течения жидкости (или газа) термин „скорость“ применяется в двух смыслах.

- **Скорость перемещения самих частиц жидкости** (или плывущих вместе с жидкостью мелких тел – например, эритроцитов в крови) обозначают **u** и называют **линейной скоростью**.

- $$v = \frac{dx}{dt} \text{ [м/с]}$$

- Однако, на практике чаще важнее знать **объём V** жидкости, протекающей **через поперечное сечение** данного потока (трубы, русла реки, кровеносного сосуда и т.п.) **за единицу времени**.
- Эту величину называют **объёмной скоростью** и обозначают **Q** .

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

- Между линейной скоростью u и объёмной скоростью Q существует **простая связь**.
- Рассмотрим трубку с площадью поперечного сечения S .

- Выделим поперечный слой жидкости, который в момент времени $t = 0$ занимает положение **1**.
- Через некоторое время t он переместится в положение **2**, отстоящее на расстояние

$$x = Ut .$$

- При этом через трубку пройдёт объём жидкости $V = Sx$.

- Объёмная скорость жидкости Q при этом будет равна

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{Sx}{t}$$

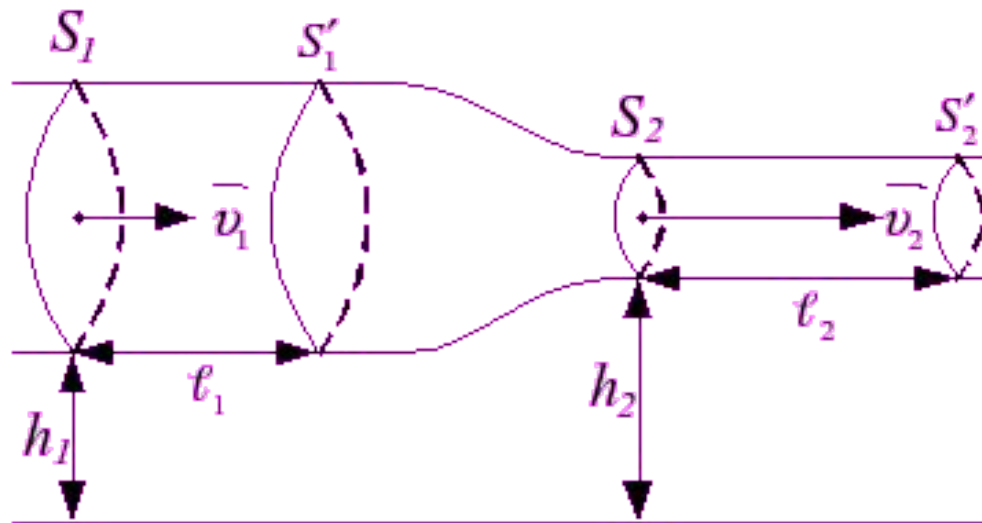
- Но $\frac{x}{t} = v$, поэтому: $Q = Sv$

- 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 струи):

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2 = \dots = \text{const}$$

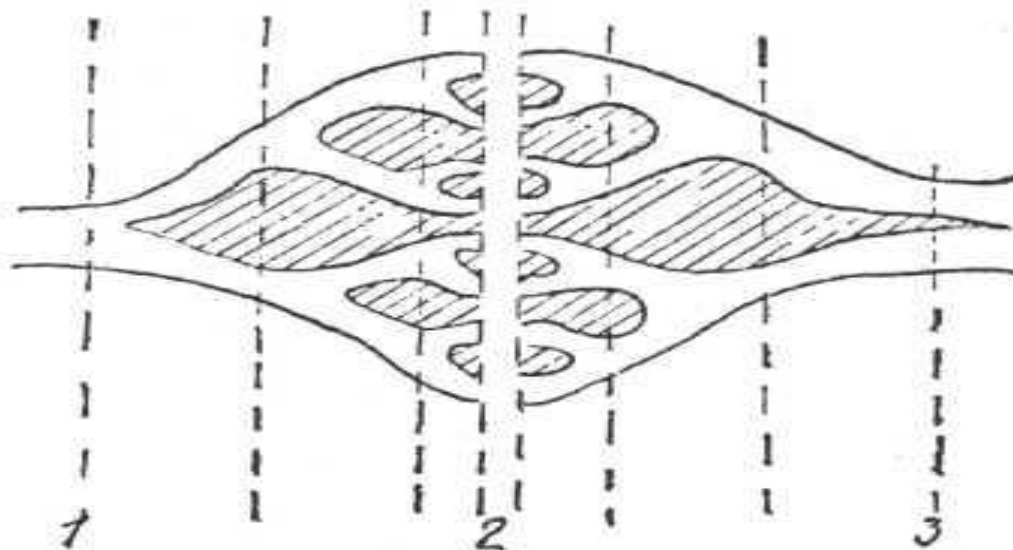


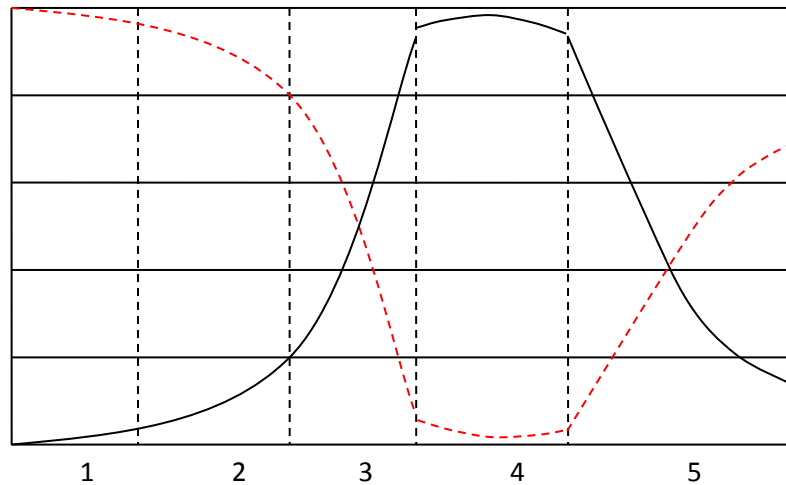
- Таким образом, если мы имеем дело с жесткой неразрывной трубой переменного сечения, то **линейная скорость** течения жидкости **тем больше, чем меньше сечение** трубы.

- На основании уравнения неразрывности струи можно **качественно** объяснить **изменения скорости течения крови** в системе кровообращения.
- $S_{\text{аорты}} = 4 \text{ см}^2$; $V_{\text{аорт.}} = 0,5-1 \text{ м/с}$ (до 20 м/с при физических нагрузках)
- $S_{\text{кап.}} = 11.000 \text{ см}^2$ (обычно 3.000 см²) ;
 $V_{\text{кап.}} = 1 \text{ мм/с}$

Схема разветвления сосудов в большом круге кровообращения (модель разветвленной сосудистой трубки).

- 1 — аорта; 2 — капиллярное русло;
3 — полые вены (верхняя и нижняя).





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

3. Течение идеальной жидкости.

Теорема Бернулли.

- **Идеальная жидкость** – жидкость абсолютно несжимаемая и **не имеющая внутреннего трения** (вязкости).
- Следовательно, при движении жидкости **не происходит диссипация энергии** (переход механической энергии в тепло).

- Считалось, что таких жидкостей не существует, но **в 1938 году** академик **П. Л. Капица** обнаружил, что при температурах, очень близких к абсолютному нулю, подобными свойствами обладает **жидкий гелий** (Капица назвал такое поведение гелия «сверхтекучестью»; за открытие и исследование этого явления ему в дальнейшем была присуждена Нобелевская премия).

- **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 и, по сути, выражает **закон сохранения механической энергии** для движущейся жидкости.

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

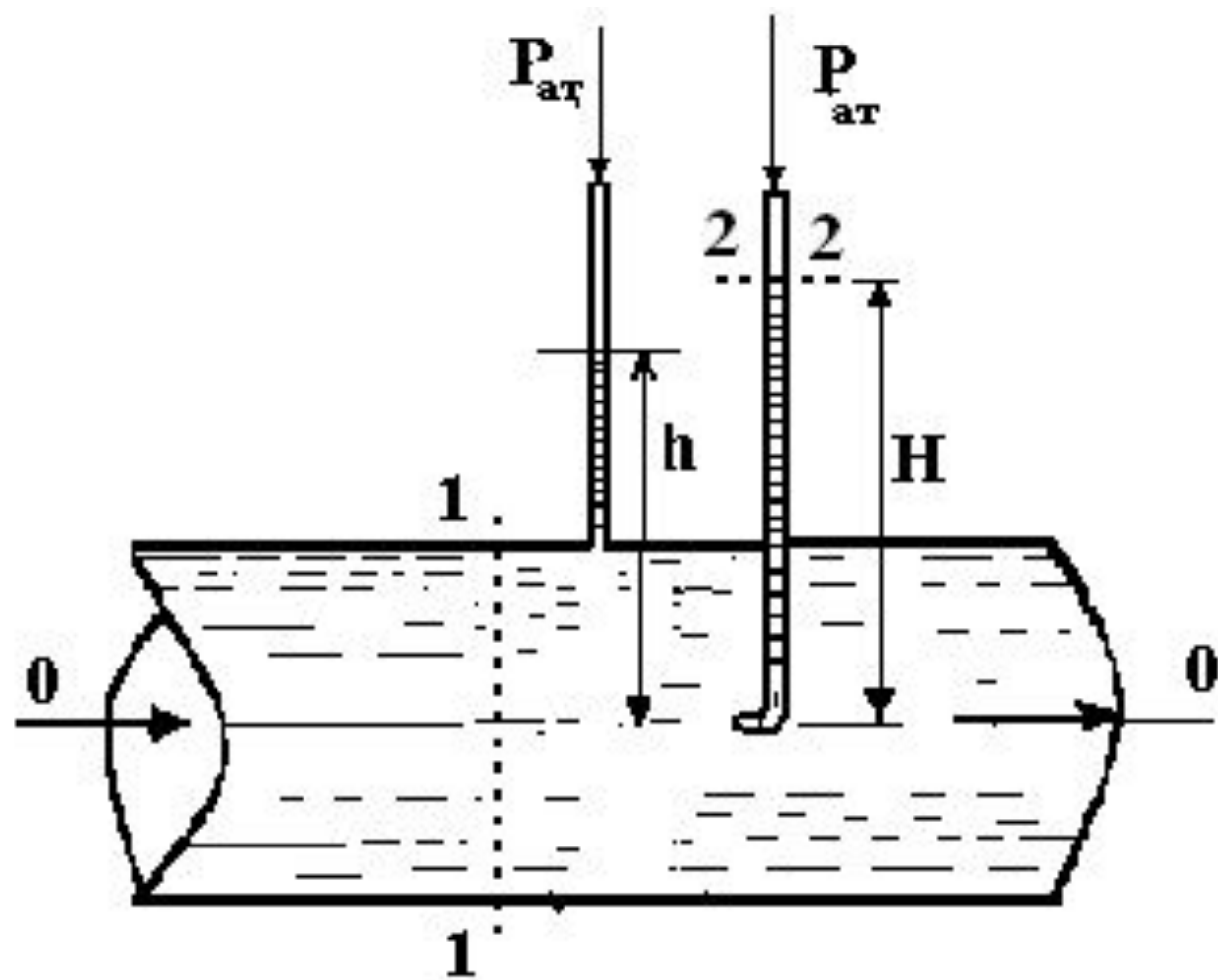
- В потоке идеальной жидкости **сумма статического, гидростатического и гидродинамического давлений** есть величина постоянная.

- p – внешнее **статическое давление**, которое, согласно закону Паскаля, передается жидкостью во все стороны без изменения.
- ρgh - давление силы тяжести жидкости, или **гидростатическое давление**.
- $\frac{\rho V^2}{2}$ - **динамическое давление**, направленное по вектору скорости жидкости.

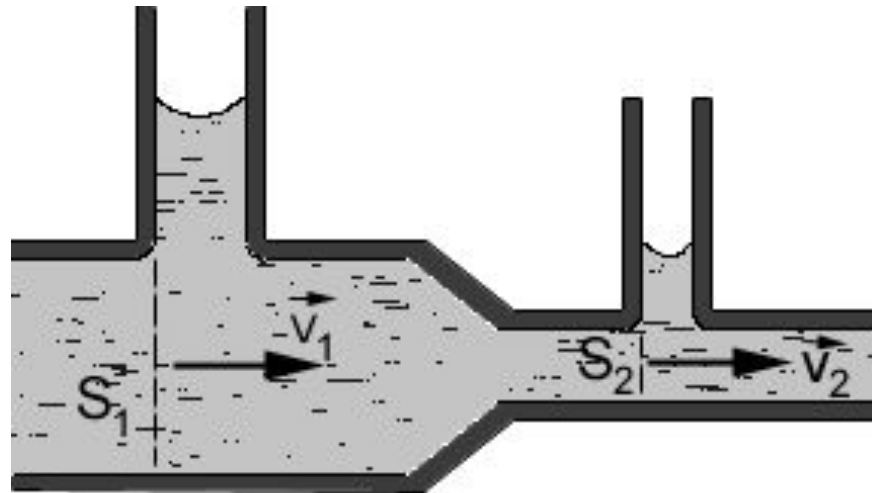
- Для горизонтального течения жидкости, когда $\rho gh = \text{const}$, можно уравнение Бернулли упростить:

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

- **Статическое давление** - это то **давление**, которое движущаяся жидкость оказывает **на стенки трубки**.
- **Динамическое давление** – это давление, которая движущаяся жидкость оказывает **на преграду ее течению** (**не действует на стенки**).



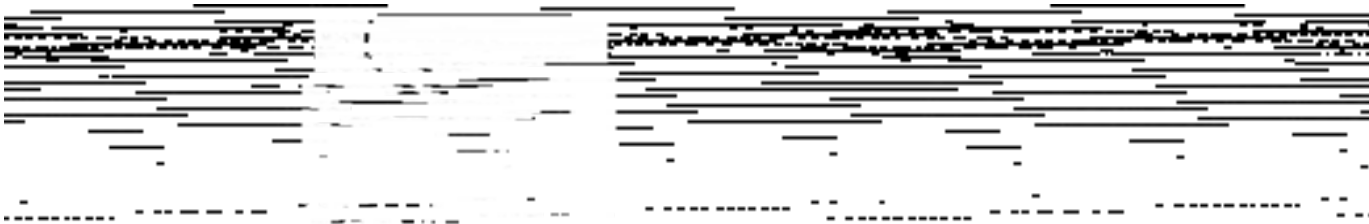
- Из теоремы Бернулли следует, что там, где **скорость** жидкости или газа **больше**, **статическое давление меньше**, и наоборот.



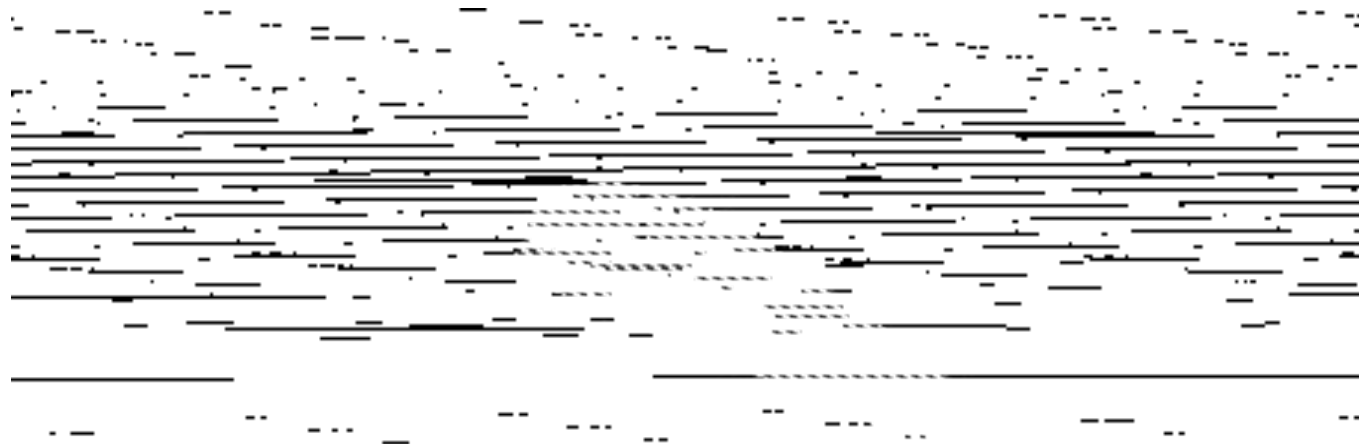
Практическое значение уравнения Бернулли

- 1) **При сильном ветре** динамическое давление сильно возрастает (пропорционально квадрату скорости ветра), поэтому статическое давление над крышей значительно падает.
- Под крышей, где нет движения воздуха, статическое давление остаётся высоким; **разность давлений срывает листы кровли вверх.**

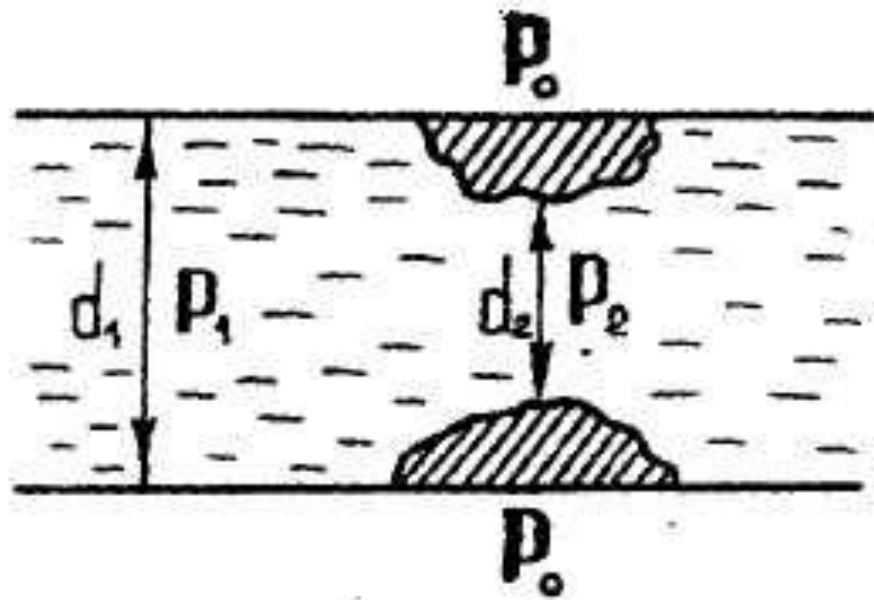
- 2) **Водоструйный насос**



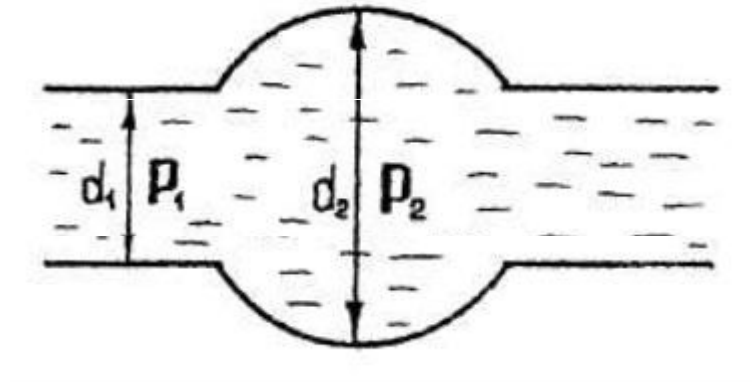
- 3) **Подъемная сила крыла**



- 4) Закупорка артерии. Артериальный шум.



- 5) **Поведение аневризмы**



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 $p_1 - p_2$.

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

- Как и можно было ожидать, объёмная скорость прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости.
- Обращает на себя внимание очень сильная зависимость объёмной скорости от радиуса: $Q \sim r^4$.

- Интересно сравнить движение жидкости 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.

- В первой формуле слева стоит **причина течения жидкости** -разность давлений, во второй - **причина возникновения тока**, то есть разность потенциалов.
- Справа в первой формуле стоит объёмная скорость, то есть **количество жидкости, протекающее в единицу времени**; во второй формуле - сила тока, то есть **количество зарядов, протекающее в единицу времени**.

- Очевидно, что величина $\frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4}$
- имеет смысл **сопротивления движению жидкости.**
- Ее так и называют - **гидродинамическое сопротивление.**

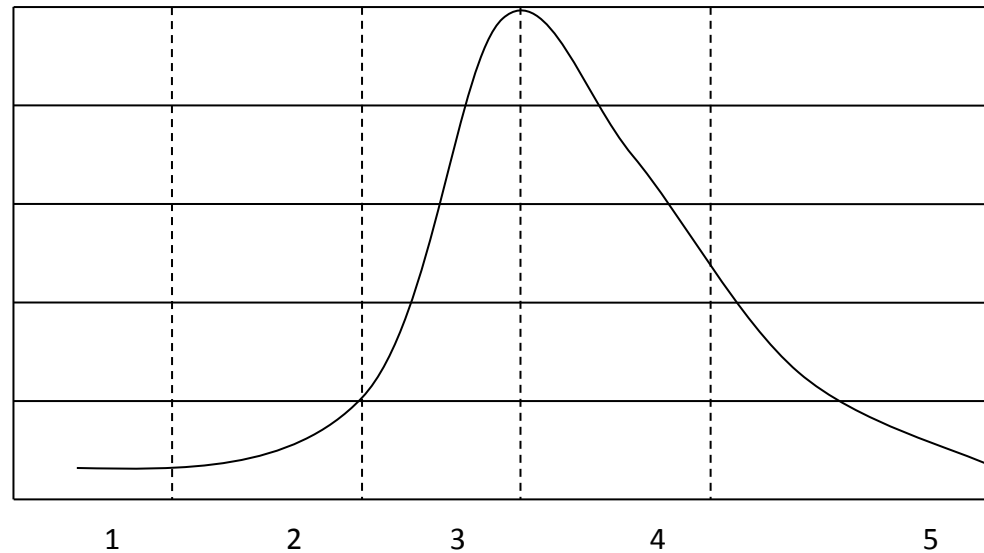
- $R_{\text{ГД}} = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4}$

- Используя это обозначение, можно формулу Пуазейля записать в таком виде:

- $p_1 - p_2 = R_{ГД} \cdot Q$ или $Q = \frac{p_1 - p_2}{R_{ГД}}$

Гемодинамическое сопротивление (R_r) разных отделов кровеносного русла:

R_r



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

5. Элементы биомеханики сердца.

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***.

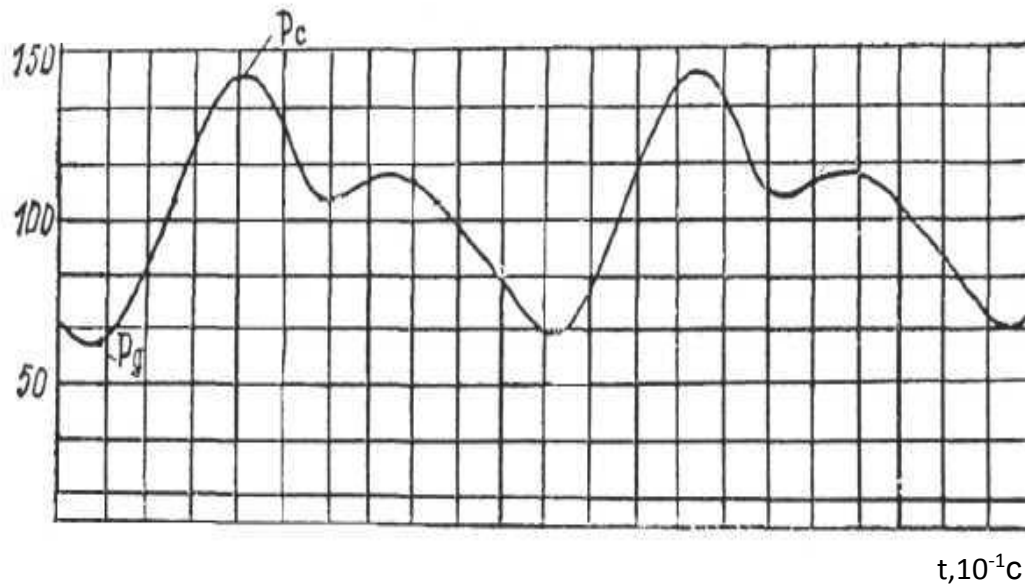
- **Статический компонент** работы сердца вычисляется по формуле:

$$A_{ст} = p_{ср} V_c$$

- 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.



- Поэтому среднее давление равно не полусумме максимального (систолического) и минимального (диастолического) давлений, а **среднему из бесконечно малых изменений давления** от максимального до минимального **в течение одного сердечного цикла.**

- Следовательно, оно определяется так:

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

- Среднее давление – **одна из гомеостатических констант** организма.

- 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.

- Поскольку 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:**

$$A_{ст} \text{ ЛЖ} = 13,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 70 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = \mathbf{0,9 \text{ Дж}};$$

$$A_{ст} \text{ ПЖ} \sim \mathbf{0,15 \text{ Дж}}.$$

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

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

- где ρ - плотность крови (примерно 10^3 кг·м⁻³);
 v - скорость кровотока в магистральном артериальном стволе (в среднем $0,7$ м·с⁻¹).

- Следовательно, $A_k = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot 0,49 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} / 2 = \mathbf{0,02 \text{ Дж}}$.
- В целом работа левого желудочка за одно сокращение **в условиях покоя** составляет **около 1 Дж**, а правого — **менее 0,2 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**.

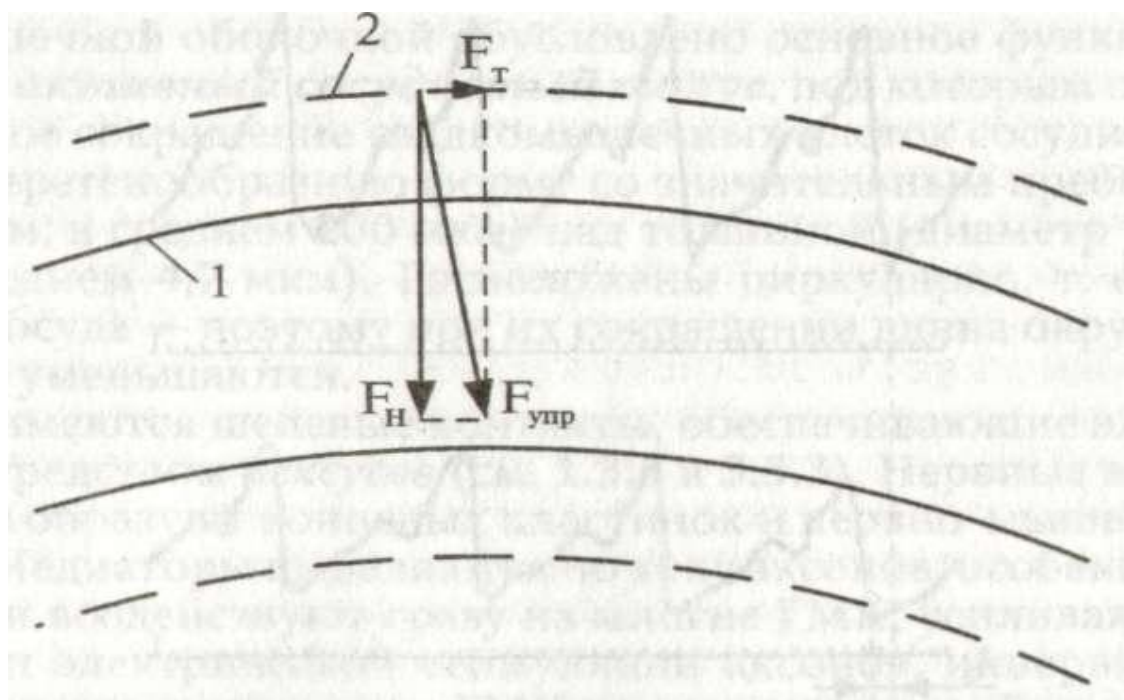
- Поэтому при физических и психических нагрузках **вклад кинетического компонента** в работу сердца становится весомее (**до 30% всей работы**), чем в покое.
- Например, при выполнении тяжелой физической работы тренированным человеком его $p_{\text{ср}}$ достигает 16 кПа, $V_c = 200$ мл, и $V = 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.
- Тогда работа левого желудочка достигает **$A = 4,1$ Дж.**
- **Средняя мощность** возрастает до **8,2 Вт.**

6. Биофизические особенности аорты. Пульсовая волна

- Среди **артерий эластического типа** важнейшую роль играет ***грудной отдел аорты***.
- С ним главным образом связана основная функция сосудов этого типа — ***обеспечение непрерывности кровотока***.

- A_{cm} миокарда затрачивается на растяжение стенок артерий (прежде всего, грудного отдела аорты).
- Накопив энергию во время систолы, аортальная стенка отдает ее крови в диастолу, когда сердце пребывает в расслабленном состоянии и не поставляет кровь в сосудистое русло.
- Благодаря упругости артерий эластического типа кровь не останавливается и в диастолу сердца, когда **потенциальная энергия растянутой стенки** артерии эластического типа **преобразуется в кинетическую энергию крови**

- Упругость аортальной стенки обуславливает еще одно важное явление - **возникновение и распространение пульсовой волны по стенке артерий.**
- Дело в том, что $F_{упр}$, развивающаяся при растяжении аорты, направлена не строго перпендикулярно к оси сосуда и может быть разложена на **нормальную** и **тангенциальную** составляющие.



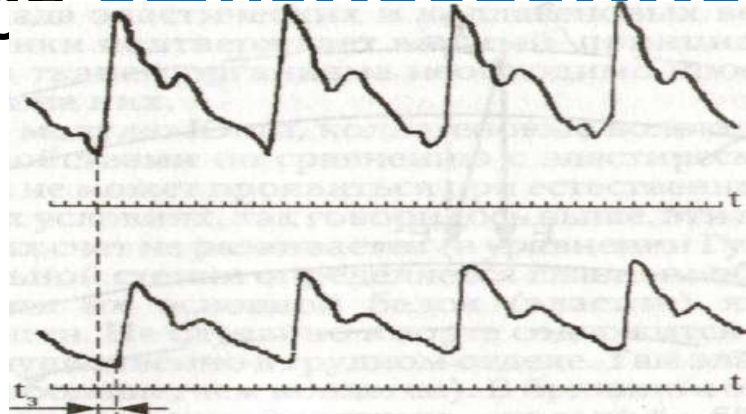
- Непрерывность кровотока обеспечивается первой из них, тогда как вторая является источником ***артериального импульса***, под которым понимают ***упругие колебания артериальной стенки***.

- Пульсовая волна распространяется от места своего возникновения до капилляров, где затухает. Скорость ее распространения (v_{Π}) можно рассчитать по формуле:

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{E \cdot b}{2\rho \cdot r}}$$

- где E - модуль Юнга сосудистой стенки; b - ее толщина; r - радиус сосуда; ρ - плотность крови.

- Общую характеристику пульсовой волны врач получает при пальпации артерии, но более полные сведения дает регистрация кривой *артериального пульса*, которая называется *пульсометрией*.

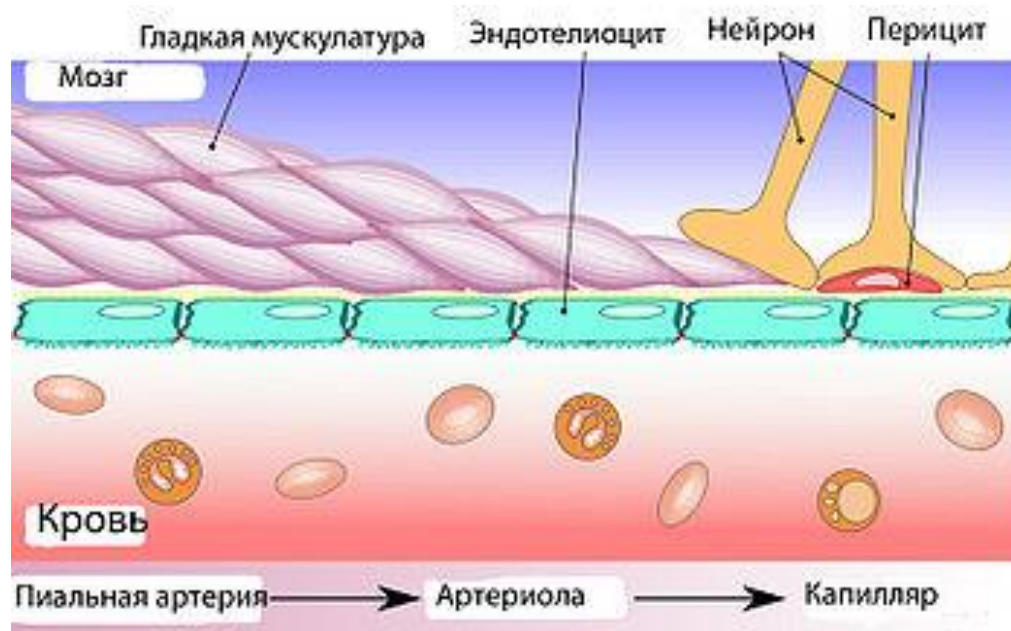


- Записав сфигмограммы в двух точках артериальной магистрали и измерив сдвиг фазы между ними, можно определить скорость пульсовой волны в стенках исследуемых артерий и по ней судить об их **модуле Юнга**.
- Скорость пульсовой волны в аорте составляет **4-6 м/с**, а в лучевой артерии **8-12 м/с**.

- С возрастом скорость пульсовой волны увеличивается.
- Чем выше упругость артериальной стенки, тем больше амплитуда колебаний кровяного давления в аорте и крупных артериях.
- Высокоамплитудные колебания КД создают дополнительную нагрузку на сердце и усиливают деформацию сосудистых стенок.

7. Биофизические особенности артериол большого круга кровообращения

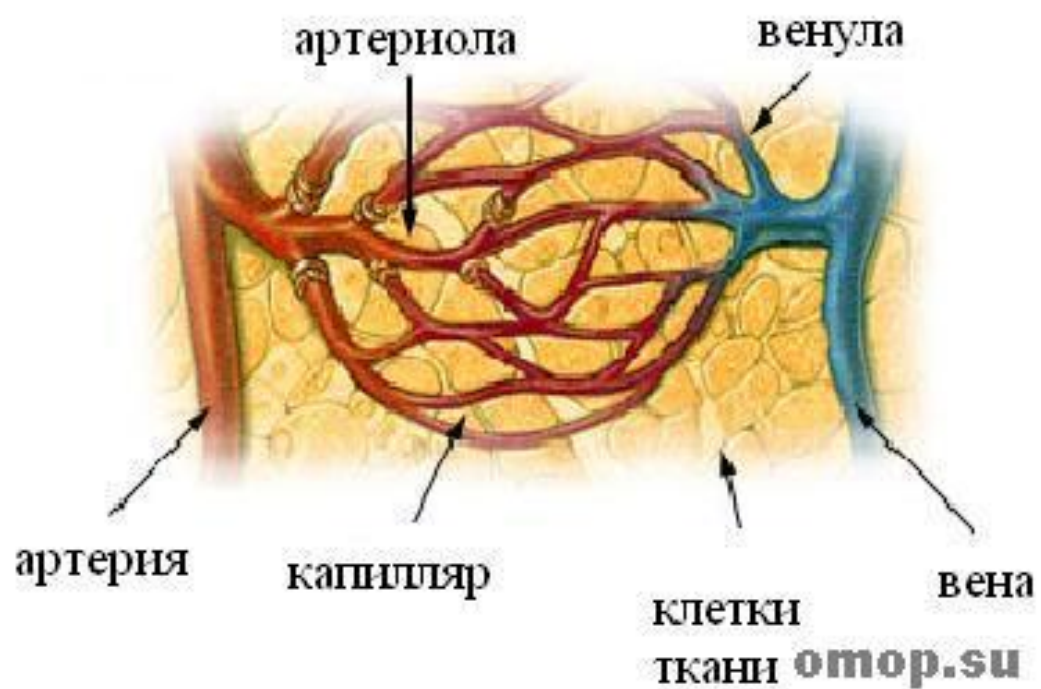
- Артериолы – предкапиллярные артерии.
- Это мелкие сосуды диаметром от 100 до 50 мкм.
- Обладают гладкомышечной стенкой, т.е. относятся к артериям **мышечного типа**.



- Из-за малого радиуса артериолы обладают **наибольшим гемодинамическим сопротивлением.**
- Радиус капилляров ещё меньше (примерно, в 2,5 раза), длина капилляра меньше, а вязкость крови в капиллярах больше. Если учесть всё это, то оказывается, что $R_{гд}$ одного капилляра в 40-60 раз больше, чем у артериолы.

- Но каждая артериола снабжает кровью **около 100 капилляров**, соединённых параллельно.
- При этом общее сопротивление всех капилляров, отходящих от одной артериолы, будет равно R_k/n , где R_k - сопротивление *одного* капилляра, а n - число капилляров.
- Поэтому гемодинамическое сопротивление всех капилляров составляет 0,4 - 0,6 от $R_{гд}$ артериол.

Сосуды микроциркуляции



- 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.

- В результате растёт гемодинамическое сопротивление и, соответственно, повышается давление крови в крупных артериях.
- При увеличении АКД всё происходит в обратном порядке.
- Таким образом, у здорового человека АКД достаточно точно поддерживается постоянным.

- Важно отметить, что во всех названных случаях диаметр артериол меняется относительно мало.
- Например, чтобы давление уменьшилось **со 130 мм до 120 мм**, достаточно увеличения диаметра артериолы всего на **8%**.
- Если наблюдать в микроскоп, то такое увеличение размера сосуда почти незаметно.

- Таким образом, артерии мышечного типа, особенно артериолы большого круга кровообращения, являются **резистивными сосудами**.
- Они обеспечивают **сопротивление работе сердца**, что создает «**подпор**» в системе кровообращения, проявляющийся в наличии кровяного давления.

- Кроме того, еще И.М. Сеченов называл артериолы «**сосудистыми кранами**»: они распределяют кровь между потребителями – различными **капиллярами**.

8. Транспорт веществ через стенку капилляра

- Капилляры представляют собой тончайшие сосуды диаметром **5—7 мкм**, длиной **0,5—1,1 мм**.
- Эти сосуды пролегают в межклеточных пространствах, тесно соприкасаясь с клетками органов и тканей организма.
- Суммарная длина всех капилляров тела человека составляет около **100 000 км**, т. е. нить, которой можно было бы 3 раза опоясать земной шар по экватору.

- Физиологическое значение капилляров состоит в том, что через их стенки осуществляется **обмен веществ между кровью и тканями**.
- Стенки капилляров образованы только **одним слоем клеток эндотелия**, снаружи которого находится тонкая соединительнотканная базальная мембрана.

- Большое значение в обмене веществ между кровью и тканями имеет **фильтрация**, основанная на градиенте давления жидкости.
- Можно рассчитать силы фильтрации в артериальном конце капилляра, как и силы обратного транспорта в его венозном конце.

- Так, **гидростатическое давление** в артериальном конце капилляра в среднем составляет **34 мм. рт. ст.**
- Способствует фильтрации также **онкотическое давление** межтканевого пространства, равное **3 мм. рт. ст.** Следовательно, **давление, способствующее фильтрации,** составит:

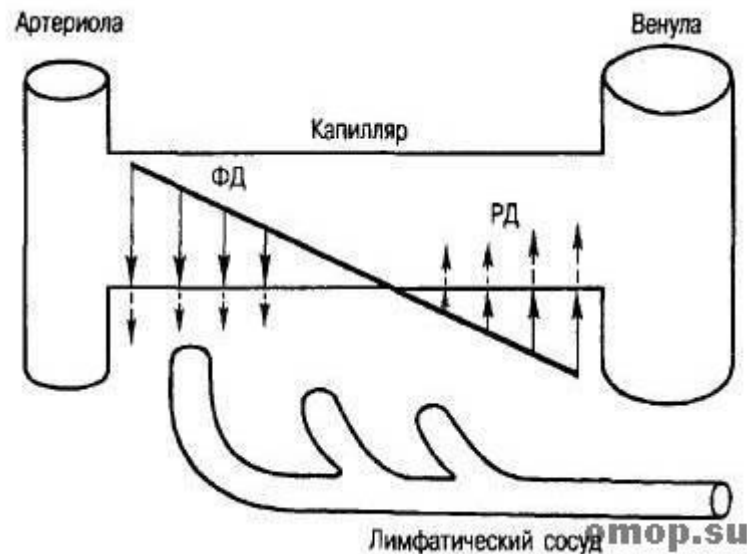
$$34 + 3 = 37 \text{ мм. рт. ст.}$$

- Вследствие фильтрации содержимое плазмы крови поступает в межтканевое пространство, где происходит обмен с клетками (необходимые для жизнедеятельности вещества поступают в клетки, а из последних выделяются продукты метаболизма).
- В венозном конце капилляра в результате обратного транспорта жидкость возвращается обратно в кровь, ее поступление зависит от тех же самых факторов, обеспечивающих фильтрацию.

- Факторы, обуславливающие обратный транспорт, составляют:
 - Онкотическое давление белков плазмы крови - **23 мм. рт. ст.**,
 - Гидростатическое давление межтканевого пространства - **4 мм. рт. ст.**
- Итого - **27 мм рт. ст.**

- Факторы, противодействующие обратному транспорту:
- Гидростатическое давление крови - **18 мм. рт. ст.** ;
- Онкотическое давление белков межтканевого пространства - **3 мм. рт. ст.**, Итого - **21 мм. рт. ст.**

- Отсюда, **давление, обеспечивающее обратный транспорт**, составляет:
27 - 21 = 6 мм. рт. ст.



- Подсчитано, что за один час фильтруется около **14 мл** жидкости, в то время, как обратному транспорту подвергается **12 мл**.
- Оставшаяся жидкость ($14 - 12 = 2$ мл) возвращается в сосудистую систему посредством **лимфатической системы**.

9. Движение крови в венах

- Движение крови в венах обеспечивает наполнение полостей сердца во время диастолы.
- Ввиду небольшой толщины мышечного слоя стенки вен гораздо более растяжимы, чем стенки артерий, поэтому в венах может скапливаться большое количество крови.

- Даже если давление в венозной системе повысится всего на несколько миллиметров, объем крови в венах увеличится в 2—3 раза, а при повышении давления в венах на **10 мм рт.ст.** вместимость венозной системы возрастет в **6 раз.**
- Вместимость вен может также изменяться при сокращении или расслаблении гладкой мускулатуры венозной стенки.

- Таким образом, вены (а также сосуды малого круга кровообращения) являются **резервуаром крови переменной емкости.**