

1. Гемодинамика артериальных сосудов. Физический механизм преобразования импульсного выброса крови желудочками сердца в непрерывный артериальный кровоток. Уравнение Пуазейля, смысл. Законы общесистемной гемодинамики.

**Гемодинамика** (от *гемо...* и *динамика*), движение крови по сосудам, возникающее вследствие разности гидростатического давления в различных участках сосудистой системы. Разность давлений обеспечивается нагнетательной функцией сердца, выбрасывающего в сосудистую систему при каждом сокращении у человека 60—70 мл крови, что составляет в состоянии покоя 4,5—5 л/мин. Эта величина — минутный объем сердца, или сердечный выброс, — важнейший показатель функции сердечно-сосудистой системы; во время мышечной работы она может достигать 20—25 л/мин.

Сердечно-сосудистая система обеспечивает циркуляцию крови по замкнутой системе сосудов. Постоянная циркуляция крови в организме позволяет доставлять ко всем клеткам вещества, необходимые для их нормального функционирования, и удалять продукты их жизнедеятельности. Для того чтобы осуществить этот жизненно необходимый и очень сложный процесс обмена веществ в капиллярах, сердечно-сосудистая система имеет определенную функциональную и структурную организацию.

Гемодинамические показатели кровотока определяются биофизическими параметрами всей сердечно-сосудистой системы, а именно собственными характеристиками сердечной деятельности (например, ударным объемом крови), структурными особенностями сосудов (их радиусом и эластичностью) и непосредственно свойствами самой крови (вязкостью).

Стационарное течение жидкости является слоистым или ламинарным. Для него справедливы уравнения Бернулли и Пуазейля. Ламинарное течение устанавливается в трубах с гладкими стенками, без резких изменений площади сечения и изгибов трубы, а так же при отсутствии множественных разветвлений. При нарушении этих условий и особенно при высоких скоростях течение переходит в турбулентное: скорости частиц жидкости при этом беспорядочно меняются, образуются местные завихрения - происходит перемешивание жидкости.

Характерным для турбулентного течения являются местное изменение давления в жидкости, вызывающие колебательное движение частиц, сопровождающееся звуковыми явлениями (шум, журчание и т. п.), благодаря которым турбулентное течение легко обнаруживается.

### **1. Физический механизм преобразования импульсного выброса крови желудочками сердца в непрерывный артериальный кровоток.**

При непрерывном течении жидкости не имеет значения степень эластичности трубок. Если через трубки пропускать пульсирующий поток жидкости, используя для этой цели периодически действующий насос, то характер истечения жидкости из трубок будет зависеть от эластичности трубок (из эластичной трубки – стационарный). Это объясняется следующим образом, при повышении давления эластичная трубка расширяется, кинетическая энергия жидкости частично переходит в потенциальную энергию деформации стенок. Так как насос действует периодически, то в момент прекращения его работы происходят обратные энергетические превращения, эластичная трубка сжимается, что способствует продвижению жидкости в нужном направлении.

При сокращении сердечной мышцы (систола) кровь выбрасывается из сердца в аорту и отходящие от нее артерии. Если бы стенки этих сосудов были жесткими, то давление, возникающее в крови на выходе из сердца, со скоростью звука передалось бы к периферии. Упругость стенок сосудов приводит к тому, что во время систолы кровь, выталкиваемая сердцем, растягивает аорту, артерии и артериолы, т.е. крупные сосуды воспринимают за время систолы больше крови, чем ее оттекает к периферии. Систолическое давление человека в норме равно приблизительно 16 кПа. Во время расслабления сердца (диастола) растянутые кровеносные сосуды спадают и потенциальная энергия, сообщенная им сердцем через кровь, переходит в кинетическую энергию тока крови, при этом поддерживается диастолическое давление, приблизительно равное 11 кПа.

Распространяющуюся по аорте и артериям волну повышенного давления, вызванную выбросом крови из левого желудочка в период систолы, называют *пульсовой волной*.

Пульсовая волна распространяется со скоростью 5-10 м/с и даже более. Следовательно, за время систолы (около 0,3 с) она должна распространиться на расстояние 1,5-3 м, что больше расстояния от сердца к конечностям. Это означает, что фронт пульсовой волны достигнет конечностей раньше, чем начнется спад давления в аорте. Профиль артерии схематически показан на рис.1 (а — после прохождения пульсовой волны, б — через артерию проходит фронт пульсовой волны, в — в артерии пульсовая волна, г — начинается спад повышенного давления.)

Пульсовой волне будет соответствовать пульсирование скорости кровотока в крупных артериях, однако скорость крови (максимальное значение 0,3-0,5 м/с) существенно меньше скорости распространения пульсовой волны.

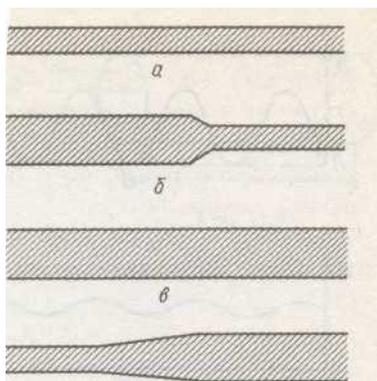


Рис 1

## 2. Законы общесистемной гемодинамики.

Гемодинамика - один из разделов биомеханики, изучающий законы движения крови по кровеносным сосудам. Задача гемодинамики - установить взаимосвязь между основными гемодинамическими показателями, а также их зависимость от физических параметров крови и кровеносных сосудов.

К основным гемодинамическим показателям относятся давление и скорость кровотока.

**Давление** — это сила, действующая со стороны крови на сосуды, приходящаяся на единицу площади :  $P = F / S$ . Различают объемную и линейную скорости кровотока.

**Объемной скоростью**  $Q$  называют величину, численно равную объему жидкости, перетекающему в единицу времени через данное сечение трубы:

единица измерения ( $\text{м}^3 / \text{с}$ ).

**Линейная скорость** представляет путь, проходимый частицами крови в единицу времени:  $V = Z/t$ , единица измерения ( $\text{м} / \text{с}$ ).

Линейная и объемная скорости связаны простым соотношением  $Q = VS$ , где  $S$  - площадь поперечного сечения потока жидкости.

Так как жидкость несжимаема (то есть плотность ее всюду одинакова), то через любое сечение трубы и в единицу времени протекают одинаковые объемы жидкости:

$$Q = VS = \text{const.}$$

Это называется условием неразрывности струи. Оно вытекает из закона сохранения массы для несжимаемой жидкости. Уравнение неразрывности струи относится в равной мере к движению всякой жидкости, в том числе и вязкой. При описании физических законов течения крови по сосудам вводится допущение, что количество циркулирующей крови в организме постоянно. Отсюда следует, что объемная скорость кровотока в любом сечении сосудистой системы также постоянна:  $Q = \text{const}$ .

#### **Уравнение Пуазейля, смысл.**

В реальных жидкостях (вязких) по мере движения их по трубе потенциальная энергия расходуется на работу по преодолению внутреннего трения, поэтому давление жидкости вдоль трубы падает (см. рис.№1). Для стационарного ламинарного течения реальной жидкости в цилиндрической трубе постоянного сечения справедлива формула (закон) Гагена—Пуазейля:  $Q = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot l}$

Где  $\Delta p = P_1 - P_2$  - падение давления, то есть разность давлений входа в трубу  $P_1$  и на выходе из нее  $P_2$  на расстоянии  $l$

$$\text{Величина: } W = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot R^4}$$

называется гидравлическим сопротивлением сосуда. Закон Гагена—Пуазейля можно представить как  $\Delta P = Q/W$ .

Из закона Пуазейля следует, что падение давления крови в сосудах зависит от объемной скорости кровотока и в сильной степени от радиуса сосуда. Так, уменьшение радиуса на 20 % приводит к увеличению падения давления более чем в 2 раза. Даже

небольшие изменения просветов кровеносных сосудов сильно сказываются на падении давления. Не случайно основные фармакологические средства нормализации давления направлены прежде всего на изменение просвета сосудов.

Границы применимости закона Пуазейля:

- 1) ламинарное течение;
- 2) гомогенная жидкость;
- 3) прямые жесткие трубки;
- 4) удаленное расстояние от источников возмущений (от входа, изгибов, сужений).

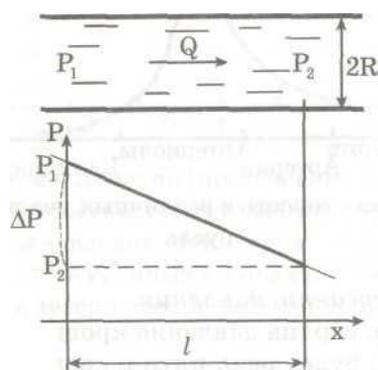


Рис. 1 Падение давления при течении жидкости по трубке.

Рассмотрим гемодинамические показатели в разных частях сосудистой системы.

### ***Гидравлическое сопротивление.***

Гидравлическое сопротивление  $w$  в значительной степени зависит от радиуса сосуда. Отношения радиусов для различных участков сосудистого русла:

$$R_{\text{аорт}} : R_{\text{ар}} : R_{\text{Кап}} \ll 3000 : 500 : 1.$$

Поскольку гидравлическое сопротивление в сильной степени зависит от радиуса сосуда  $w \sim \frac{1}{R^4}$  можно записать соотношение:

$$W_{\text{кап}} > W_{\text{ар}} > W_{\text{аорт}}$$

### ***Линейная скорость кровотока.***

Рассмотрим закон неразрывности. Площадь суммарного просвета всех капилляров в 500 - 600 раз больше поперечного сечения аорты. Это означает, что  $V_{\text{Кап}} \sim 1/500 V_{\text{ао}}$ .

Именно в капиллярной сети при медленной скорости движения происходит обмен веществ между кровью и тканями.

Рассмотрим закон неразрывности.

Площадь суммарного просвета всех капилляров в 500 - 600 раз больше поперечного сечения аорты. Это означает, что  $V_{\text{Кап}} \sim 1/500 V_{\text{ао}}$ . Именно в капиллярной сети при медленной скорости движения происходит обмен веществ между кровью и тканями.

На рис.2 приведена кривая распределения давления, линейных скоростей вдоль сосудистой системы.

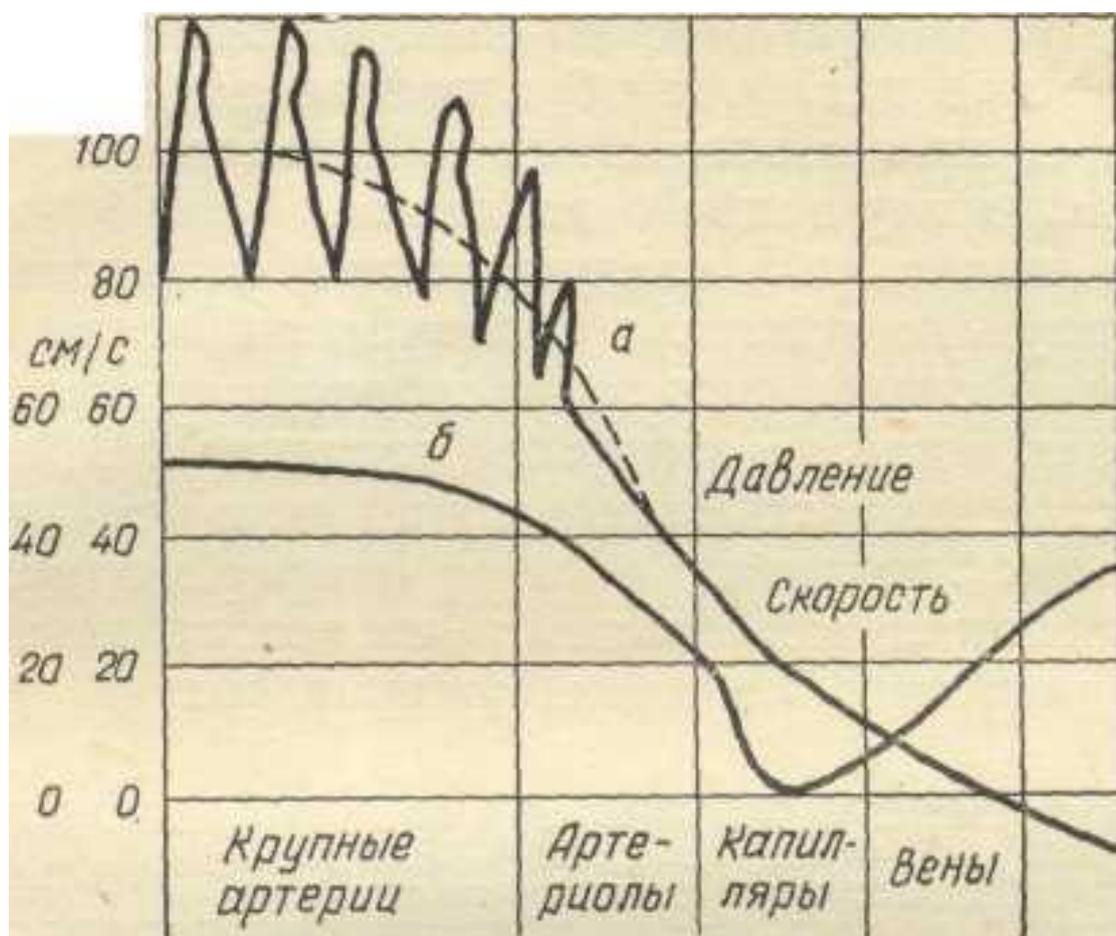


Рис 2

### ***Распределение среднего давления.***

При сокращении сердца давление крови в аорте испытывает колебания.

Падение среднего давления крови вдоль сосудов может быть описано законом Пуазейля. Сердце выбрасывая кровь под средним давлением  $P_{\text{оср}}$ . По мере продвижения по сосудам среднее давление падает. Поскольку  $Q = \text{const}$ ,

а  $w_{\text{кап}} > w_{\text{арт}} > w_{\text{аорт}}$ , то для средних значений давлений:

В крупных сосудах среднее давление падает всего на 15 % , а в мелких на 85 %. Это означает, что большая часть энергии, затрачиваемой левым желудочком сердца на изгнание крови, расходуется на ее течение по мелким сосудам.

Распределение давления (превышение над атмосферным) в различных отделах сосудистого русла представлено на рис №2

Отрицательное значение давления означает, что оно несколько ниже атмосферного.

### **Литература.**

1. Ливенцев. Н.М. «Курс физики» 1978г, стр.33-39
2. Ремизов. А.Н. «Курс физики» ч.1 1976г, стр.92-94;96-97
3. Савицкий. Н.Н «Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики» 1974г. стр.103-104;107-109;123-125