

Механический цикл сердца. Биофизическая роль сердца в кровообращении. Работа и мощность сердца. Полостная гемодинамика в разные фазы сердечного цикла.

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 вещества в капиллярах, сердечно-сосудистая система имеет определённую функциональную и структурную организацию.

Анатомия сердца

Сердце человека состоит из двух насосов, соединённых друг с другом последовательно.

Каждый из сердечных насосов имеет камеру низкого давления (*предсердие*), которая наполняется кровью из венозной системы и через клапан одностороннего действия перекачивает ее в камеру высокого давления (*желудочек*). В свою очередь желудочек через второй клапан одностороннего действия направляет кровь в артериальную систему (рис.1). По венам *большого круга* правые камеры сердца получают кровь, оттекающую от тканей тела, и перекачивают ее в артерии *малого круга* (к легким). Левые камеры сердца получают эту кровь из вен малого круга и через аорту и ее ветви направляют в артериальное русло большого круга.

Строение обоих предсердий сходно: их стенки тонки и относительно податливы. Друг от друга их отделяет общая стенка — межпредсердная перегородка. Вены, по которым в предсердия поступает кровь, соединяются с ними без клапанов. Строение клапанов, отделяющих предсердия от желудочков (*атрио-вентрикулярные клапаны*), несколько различно: клапан правых камер (*трехстворчатый*) имеет три створки, а клапан левых (*двухстворчатый*, или *митральный*) — две. Створки представляют собой лепестки, которые одним краем прикреплены к фиброзному кольцу в стенке сердца, а двумя свободными краями обращены в полости желудочков. Створки клапанов исключительно тонки (около 0,1 мм) и состоят главным образом из сети коллагеновых и эластических волокон, покрытой слоем таких же клеток, которые выстилают внутреннюю поверхность камер сердца и кровеносных сосудов (*эндотелий*). Свободные края створок митрального и трехстворчатого клапанов соединены со стенками соответствующих желудочков тонкими фиброзными тяжами (*сухожильными нитями*), которые соединяются с мышечными пучками (*сосочковые*, или *папиллярные мышцы*), идущими от стенок желудочков. Каждая нить соединяется со свободными краями двух створок в тех местах, где они соприкасаются друг с другом при закрывании клапана. Таким образом, натягиваясь при сокращении сосочковых мышц в начале систолы, нити не позволяют клапану вывернуться в предсердие под действием нарастающего

внутрижелудочкового давления и тем самым препятствуют обратному движению крови.

Выходные клапаны желудочков (легочный и аортальный) очень похожи друг на друга. Каждый состоит из трех створок, свободные края которых начинаются непосредственно от стенок клапанного кольца. Такое расположение их позволяет открывать всю площадь поперечного сечения клапанного кольца без изменения формы створок. Эти створки лишены натягивающих сухожильных нитей, но тем не менее могут противостоять значительной разности давлений. Кроме того, выходные клапаны чрезвычайно эффективны, поскольку закрываясь (что происходит свыше 30 миллионов раз в год) они пропускают лишь очень небольшой обратный поток крови.

Механический цикл сердца

Система кровообращения состоит из сердца и замкнутой системой сосудов, образующих большой и малый круги кровообращения. Система кровообращения выполняет в организме транспортную функцию. Основным источником энергии, обеспечивающей движение крови по сосудам, является работа сердца.

Передвижение реальной крови по сосудам обусловлено разностью давлений в начале и в конце сосудов. Основной причиной, создающей эту разность давлений в кровеносных сосудах, является работа сердца. Поэтому сердце по отношению к сосудистой системе можно считать насосом. Кроме работы сердца, движению крови по сосудам способствуют сокращения скелетных мышц и отрицательное давление в плевральной полости.

Сердце является насосом, состоящим из двух частей: левое сердце и правое сердце (рис2). Фактически сердце состоит из двух насосов, включённых последовательно. Каждый из сердечных насосов имеет(рис3):

1,2-пара предсердных ушек

3,4-пара предсердий

5,6-желудочки

В состоянии диастолы кровь заполняет все камеры, давление действует во все стороны одинаково, но растягиваются только ушки (т.к. стенки тонкие). Затем растягиваются предсердия, которые наполняются кровью из венозной системы и через клапаны одностороннего действия (трёхстворчатый в правом сердце и двухстворчатый(митральный) в левом сердце) перекачивают кровь в камеру высокого давления (желудочки). В свою очередь желудочки через второй клапан (лёгочный и аортальный) одностороннего действия направляет кровь в артериальную систему.

Рассмотрим схематически явления, происходящие в большом круге кровообращения. При каждом сокращении левого желудочка сердца в аорту, уже заполненную кровью под соответствующим давлением, выталкивается так называемый ударный объём крови, в среднем равный 65-70 мл. Затем клапаны аорты закрываются.

Поступивший в аорту дополнительный объём крови повышает давление в ней и соответственно растягивает её стенки. Волна повышенного давления, которое называется систолическим, вызывает колебания сосудистых стенок,

распространяющиеся вдоль более крупных артерий в виде упругой волны. Эта волна давления называется пульсовой волной, скорость её распространения зависит от упругости сосудистых стенок и имеет порядок 6-8 м/с.

Затем в период расслабления сердечной мышцы (диастола) стенки аорты постепенно сокращаются до исходного положения и проталкивают поступивший объём крови в более дистальные крупные артерии. Стенки последних в свою очередь растягиваются и затем, сокращаясь, проталкивают кровь в последующие звенья сосудистой системы. В результате ток крови принимает непрерывный характер со скоростью в крупных сосудах порядка 0.3-0.5 м/с.

При таком механизме продвижения крови только часть энергии, развиваемой сердечной мышцей при сокращении, передаётся непосредственно массе крови в аорте и переходит в её кинетическую энергию, остальная часть энергии переходит в потенциальную энергию растяжения эластичных стенок крупных сосудов (преимущественно аорты) и затем уже постепенно по мере возвращения их в исходное положение передаётся массе крови в период расслабления сердечной мышцы.

По венам большого круга правые камеры сердца получают кровь, оттекающую от тканей тела, и перекачивают её в артерии малого круга. Левые камеры сердца получают эту кровь из вен малого круга и через аорту и её ветви направляют в артериальное русло большого круга. Однонаправленное перемещение крови производится за счёт работы клапанного аппарата.

Механический цикл сердца. Биофизическая роль сердца в кровообращении. Полостная гемодинамика в разные фазы сердечного цикла. Работа и мощность сердца.

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 вещества в капиллярах, сердечно-сосудистая система имеет определённую функциональную и структурную организацию.

В 1628 году английский врач Гарвей предложил модель сосудистой системы, где сердце служило насосом, прокачивающим кровь по сосудам. Он подсчитал, что масса крови, выбрасываемой сердцем в артерии в течение нескольких часов, значительно превышает массу человеческого тела. Отсюда Гарвей сделал вывод, что в сердце, играющего роль гидравлического насоса, многократно поступает одна и та же кровь. Схематично сердечно-сосудистую систему можно представить следующим образом (рис 1)

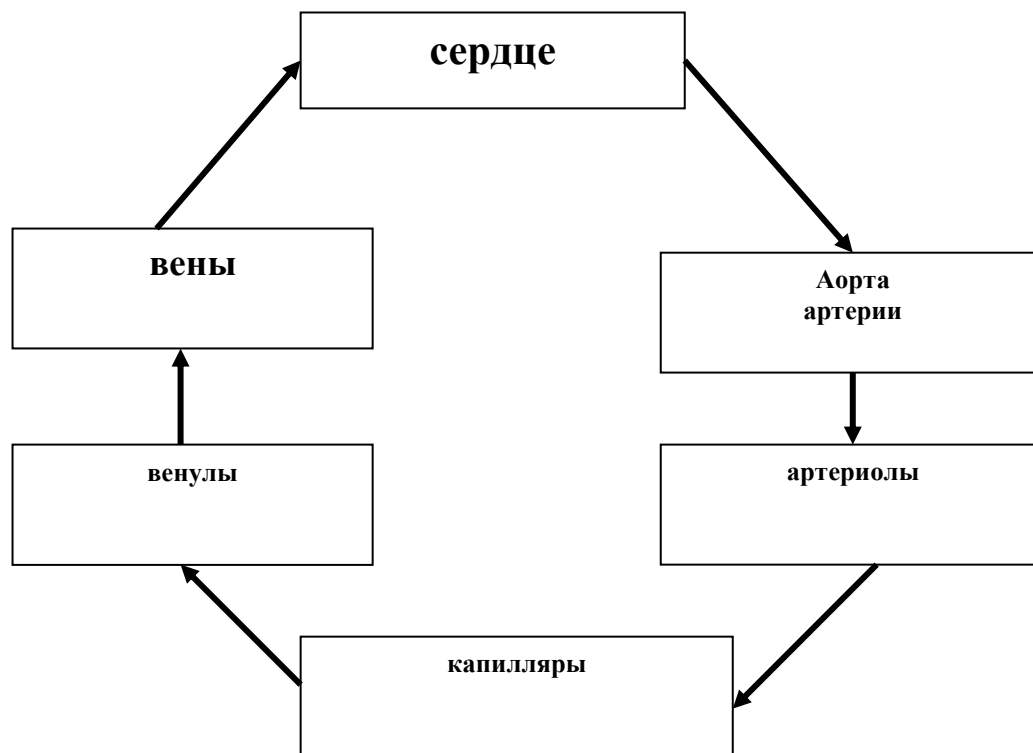


рис 1.

Рассмотрим кратко биофизическую роль каждого элемента системы.

Основная функция сердечно-сосудистой системы- обеспечение непрерывного движения крови по капиллярам, где происходит обмен веществ между кровью и тканями. Артериолы-резистивные сосуды. Легко изменяя свой просвет, они регулируют гемодинамические показатели кровотока в капиллярах. Артериолы- «краны» сердечно- сосудистой системы.

Сердечно-сосудистая система замкнута, поэтому для обеспечения течения крови в ней должен быть периодически действующий насос. Эту роль выполняет сердце. Периодическое поступление крови из сердца превращается в постоянное поступление её в мелкие сосуды с помощью крупных сосудов: часть крови поступающей из сердца во время систолы, резервируется в крупных сосудах благодаря их эластичности, а затем во время диастолы выталкивается в мелкие сосуды. Крупные сосуды являются согласующим элементом между сердцем и мелкими сосудами. При этом аорта и артерии выполняют роль проводников, позволяя проводить кровь к различным частям тела. По венам кровь возвращается в сердце.

Активная деятельность сердца вызывает сложное пространственно-временное распределение гемодинамических параметров в сердечно-сосудистой системе.

Система кровообращения состоит из сердца и замкнутой системой сосудов, образующих большой и малый круги кровообращения. Система кровообращения выполняет в организме транспортную функцию. Основным источником энергии, обеспечивающей движение крови по сосудам, является работа сердца.

Передвижение реальной крови по сосудам обусловлено разностью давлений в начале и в конце сосудов. Основной причиной, создающей эту разность давлений в кровеносных сосудах, является работа сердца. Поэтому сердце по отношению к сосудистой системе можно считать насосом. Кроме работы сердца, движению крови

по сосудам способствуют сокращения скелетных мышц и отрицательное давление в плевральной полости.

Сердце является насосом, состоящим из двух частей: левое сердце и правое сердце (рис2). Фактически сердце состоит из двух насосов, включённых последовательно. Каждый из сердечных насосов имеет(рис3):

1,2-пара предсердных ушек

3,4-пара предсердий

5,6-желудочки

В состоянии диастолы кровь заполняет все камеры, давление действует во все стороны одинаково, но растягиваются только ушки (т.к. стенки тонкие). Затем растягиваются предсердия, которые наполняется кровью из венозной системы и через клапаны одностороннего действия (трёхстворчатый в правом сердце и двухстворчатый(митральный) в левом сердце) перекачивают кровь в камеру высокого давления (желудочки). В свою очередь желудочки через второй клапан (лёгочный и аортальный) одностороннего действия направляет кровь в артериальную систему.

Рассмотрим схематически явления, происходящие в большом круге кровообращения. При каждом сокращении левого желудочка сердца в аорту, уже заполненную кровью под соответствующим давлением, выталкивается так называемый ударный объём крови, в среднем равный 65-70 мл. Затем клапаны аорты закрываются.

Поступивший в аорту дополнительный объём крови повышает давление в ней и соответственно растягивает её стенки. Волна повышенного давления, которое называется систолическим, вызывает колебания сосудистых стенок, распространяющиеся вдоль более крупных артерий в виде упругой волны. Эта волна давления называется пульсовой волной, скорость её распространения зависит от упругости сосудистых стенок и имеет порядок 6-8 м/с.

Затем в период расслабления сердечной мышцы (диастола) стенки аорты постепенно сокращаются до исходного положения и проталкивают поступивший объём крови в более дистальные крупные артерии. Стенки последних в свою очередь растягиваются и затем, сокращаясь, проталкивают кровь в последующие звенья сосудистой системы. В результате ток крови принимает непрерывный характер со скоростью в крупных сосудах порядка 0.3-0.5 м/с.

При таком механизме продвижения крови только часть энергии, развиваемой сердечной мышцей при сокращении, передаётся непосредственно массе крови в аорте и переходит в её кинетическую энергию, остальная часть энергии переходит в потенциальную энергию растяжения эластичных стенок крупных сосудов (преимущественно аорты) и затем уже постепенно по мере возвращения их в исходное положение передаётся массе крови в период расслабления сердечной мышцы.

По венам большого круга правые камеры сердца получают кровь, оттекающую от тканей тела, и перекачивают её в артерии малого круга. Левые камеры сердца получают эту кровь из вен малого круга и через аорту и её ветви направляют в артериальное русло большого круга. Однонаправленное перемещение крови производится за счёт работы клапанного аппарата.

Работа и мощность сердца.

Общую работу сердца можно представить как сумму внутренней и внешней работ.

$$A_0 = A_{\text{внут}} + A_{\text{внеш}}$$

1. Внутренняя работа сердца-это работа, затрачиваемая по перемещению крови по полостям сердца (ушки-предсердия-желудочки).
2. Внешняя работа-это работа, затрачиваемая на создание давления для выталкивания крови из желудочка и сообщение крови кинетической энергии.

Внешняя работа сердца составляет 99% от всей работы сердца. На долю внутренней работы приходится 1%.

Внешняя работа сердца в основном совершается левым желудочком.

Работа правого желудочка равна 0.2 работы левого желудочка.

$$A_{\text{внеш}} = A_{\text{лж}} + A_{\text{пж}} = 1.2 A_{\text{лж}}$$

Рассчитаем работу левого желудочка.

1. работа, затрачиваемая левым желудочком на выталкивание крови из желудочка.

$$A_1 = F \cdot L \quad F = P \cdot S \quad A_1 = P \cdot S \cdot L \quad S \cdot l = V_{\text{уд}} - \text{ударный объём}$$

$$A_1 = P \cdot V_{\text{уд}}$$

2. работа, затрачиваемая левым желудочком на сообщение крови кинетической энергии.

$$A_2 = m \cdot V^2 / 2 = \rho \cdot V_{\text{уд}} \cdot V^2 / 2$$

3. Тогда работа левого желудочка равна.

$$A_{\text{лж}} = P \cdot V_{\text{уд}} + \rho \cdot V_{\text{уд}} \cdot V^2 / 2 = V_{\text{уд}} \cdot (P + \rho \cdot V^2 / 2)$$

4. Полная внешняя работа сердца равна

$$A_{\text{внеш}} = 1.2 A_{\text{лж}} = 1.2 V_{\text{уд}} (P + \rho \cdot V^2 / 2)$$

5. Подставим численные значения:

1. $P = 100 \text{ мм.рт.ст.} = 1.3 \cdot 10^4 \text{ Па}$ - среднее давление, под которым кровь выбрасывается в аорту.

2. $\rho = 1.05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность крови

3. $V_{\text{уд}} = 70 \text{ см}^3 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$

4. $V = 0.5 \text{ м/с}$ - скорость крови в аорте в состоянии покоя.

$$A = (1.3 \cdot 10^4 + 1.05 \cdot 10^3 \cdot 0.5^2 / 2) \cdot 1.2 = 1.14 \text{ Дж}$$

Время сокращения желудочков $t = 0.3 \text{ с}$

Тогда мощность, развиваемая сердцем будет:

$$N_c = A_c / t \quad N_c = 1.14 / 0.3 = 3.4 \text{ (Вт)}$$

Считая, что в среднем происходит около 60 сокращений сердца в 1 мин, получим, что за 1 мин оно совершает работу $A_{\text{мин}} = 68 \text{ Дж}$ и за 1 сутки работа равна $A = 68 \cdot 24 \text{ час} \cdot 3600 \text{ с} = 98000 \text{ (Дж)}$

При мышечной работе средней интенсивности минутный объём крови увеличивается приблизительно в 5 раз, при этом соответственно возрастает скорость течения крови в аорте тоже в 5 раз. Тогда работа, совершаемая сердцем за 1 мин, будет: $A_c = 1.2 \cdot (1.3 \cdot 10^4 + 1.05 \cdot 10^3 \cdot 2.5^2 / 2) \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 360 \text{ Дж}$.

Литература:

Б.И. Губанов «Медицинская биофизика».

2. А.Н. Ремизов «Медицинская и биологическая физика»
3. В.Ф. Антонов «Биофизика»
4. К. Каро «Механика кровообращения».

Гемодинамика

1. Гемодинамика в одиночном сосуде. Уравнение Пуазейля.
2. Гидравлическое сопротивление. Законы общесистемной гемодинамики.
3. Жидкость: вязкость, текучесть. Уравнение Ньютона. Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Вязкость крови. Способы измерения вязкости крови.
4. Ламинарное, турбулентное течение жидкости. Число Рейнольдса.

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).

Реологические свойства крови.

Реология (от греч. *rheos* - течение, поток, *logos* - учение) - наука о деформациях и текучести вещества.

Вязкость (внутреннее трение) жидкости - свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной ее части относительно другой. Вязкость жидкости обусловлена в первую очередь межмолекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. Наличие вязкости приводит к диссипации энергии внешнего источника, вызывающего движение жидкости, и переходу ее в теплоту. Жидкость без вязкости (так называемая идеальная жидкость) является абстракцией. Всем реальным жидкостям присуща вязкость.

Основной закон вязкого течения был установлен И. Ньютоном (1687 г.) - формула Ньютона: где F [Н] - сила внутреннего трения (вязкости), возникающая между слоями жидкости при сдвиге их относительно друг друга; X [Па·с] - коэффициент динамической вязкости жидкости характеризующий сопротивление жидкости смещению ее слоев;

dV/dx [1/с] - градиент скорости, показывающий, на сколько изменяется скорость V при изменении на единицу расстояния в направлении X при переходе от слоя к слою, иначе - скорость сдвига;

$S [м^2]$ - площадь соприкасающихся слоев.

Сила внутреннего трения тормозит более быстрые слои и ускоряет более медленные слои. Жидкости делятся по вязким свойствам на два вида: **НЬЮТОНОВСКИЕ И НЕНЬЮТОНОВСКИЕ**.

Ньютоновской называется жидкость, коэффициент вязкости которой зависит только от ее природы и температуры. Для **ньютоновских** жидкостей сила вязкости прямо пропорциональна градиенту скорости. Для них непосредственно справедлива формула Ньютона, коэффициент вязкости в которой является постоянным параметром, не зависящим от условий течения жидкости.

Неньютоновской называется жидкость, коэффициент вязкости которой зависит не только от природы вещества и температуры, но также и от условий течения жидкости, в частности от градиента скорости. Коэффициент вязкости в этом случае не является константой вещества. При этом вязкость жидкости характеризуют условным коэффициентом вязкости, который относится к определенным условиям течения жидкости (например, давление, скорость). Зависимость силы вязкости от градиента скорости становится нелинейной.

Примером неньютоновских жидкостей являются суспензии. Если имеется жидкость, в которой равномерно распределены твердые невзаимодействующие частицы, то такую среду можно рассматривать как однородную.

Кровь — неньютоновская жидкость. В наибольшей степени; это связано с тем, что она обладает внутренней структурой, представляя собой суспензию форменных элементов в растворе - плазме. Плазма - практически ньютоновская жидкость. Поскольку 93 % форменных элементов составляют эритроциты, то при упрощенном рассмотрении *кровь - это суспензия эритроцитов в физиологическом растворе*.

Число Рейнольдса.

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.

Характер течения жидкости по трубе зависит от: свойств жидкости, скорости ее течения, размеров трубы и определяется - числом Рейнольдса, которое для трубы диаметром D выражается следующей формулой:

$$R_e = \rho_{ж} \cdot V \cdot \frac{D}{\eta}$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости.

1. Если число Рейнольдса больше некоторого критического ($R_e < R_{e\text{кр}}$), то движение жидкости ламинарное.
2. Если число Рейнольдса больше некоторого критического ($R_e > R_{e\text{кр}}$), то движение жидкости турбулентное.

Например, для гладких цилиндрических труб $R_{e\text{кр}} \approx 2300$.

Течение крови в артериях в норме является ламинарным, небольшая турбулентность возникает вблизи клапанов. При патологии, когда вязкость бывает меньше нормы, число Рейнольдса может превысить критическое значение и движение станет турбулентным.

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.

Стенки артерий упруго-эластичные. Поэтому движение крови по этим сосудам соответствует движению жидкости по эластичной трубке. При сокращении сердечной мышцы (систола) кровь выбрасывается из сердца в аорту и отходящие от нее артерии. Вследствие эластичности стенок крупные артерии воспринимают за время систолы больше крови, чем ее оттекает к периферии. Систолическое давление человека в норме приблизительно 120 мм рт. ст. Во время расслабления сердца (диастола) растянутые артерии спадаются и потенциальная энергия, сообщенная им сердцем, переходит в кинетическую энергию тока крови, при этом поддерживается диастолическое давление, приблизительно равное 80 мм рт. ст.

Основные законы 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: $Q = \text{const.}$

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

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).

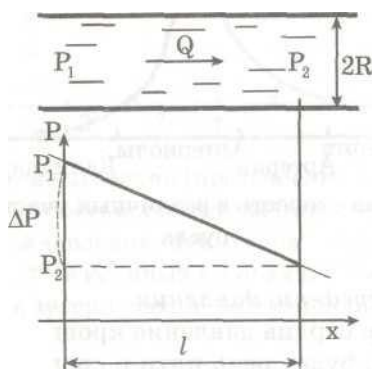


Рис. 1 Падение давления при течении жидкости по трубке.

Рассмотрим гемодинамические показатели в разных частях сосудистой системы.

Гидравлическое сопротивление.

Гидравлическое сопротивление w в значительной степени зависит от радиуса сосуда. Отношения радиусов для $r_{\text{аз}}$ личных 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 линейных скоростей вдоль сосудистой системы.

Рис. 2. Линейная скорость в различных участках сосудистого русла

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 №3

Отрицательное значение давления означает, что оно несколько ниже атмосферного.

Рис 3. Распределение давления в различных отделах сосудистого русла.

Устройство, принцип работы и физические основы работы медицинского вискозиметра.

Вискозиметр состоит (рис.4) из 2-х совершенно одинаковых градуированных пипеток (А), прикрепленных параллельно друг к другу на подставке (М). Пипетки состоят из двух отдельных одинаковых по своим сечениям и длинам капилляров, спаянных в одно целое. Градуировка деления на пипетках начинается от метки “0” и кончается меткой “10” причем каждая единица в свою очередь разделена на десять частей. Прикрепляются пипетки к подставке посредством двух клемм (Д) и двух зажимных винтов(Е), имеющих на своей наружной поверхности накатку для более удобного пользования при зажиме клемм.

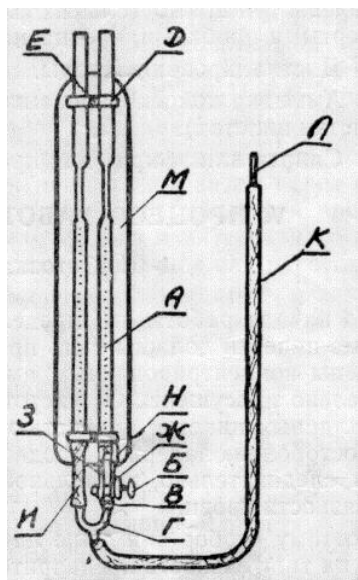


Рис. 4

.Краник (Б), прикрепленный к подставке посредством пружинящегося зажима (Ж), служит для перекрытия правой пипетки с набранной в ней порцией воды для получения возможности набрать кровь в левую пипетку, не влияя на положение воды в правой пипетке. Обе пипетки (А) соединяются с длинной резинкой (К) посредством тройника (Г) и резиновых трубок (З) и (И). На другом конце резинки (К) имеется стеклянный наконечник (Л), служащий для отсасывания ртом воздуха из прибора и создания таким образом необходимого вакуума в пипетках.

Для производства анализа открывают краник правой пипетки и свободный конец этой пипетки опускают в флакон с дистиллированной водой, и взяв стеклянный наконечник длинной резиновой трубки в рот, осторожно втягивают ртом дистиллированную воду в правую пипетку до метки “0”. При этом наблюдают, чтобы в столбике воды в капилляре не было пузырьков воздуха. Убедившись, что вода полностью заполнила капилляр до метки “0”, осторожно закрывают краник.

Аналогичным образом, набирают в левую пипетку кровь тоже до метки “0”. Затем поворачивают пробку крана на соединение правого капилляра с тройником и энергично, но осторожно, втягивают ртом воздух из обеих пипеток, создавая

таким образом вакуум во всей системе , от чего оба столбика жидкости будут одновременно продвигаться вперед с разными скоростями вдоль обоих капилляров . При подходе крови точно к метке “ 1 ” , прекратить дальнейшее втягивание жидкости .

Объем крови , втянутой до метки “ 1 ” согласно уравнению Пуазейля , будет равен

$$V_1 = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P_1 \cdot t}{8 \cdot \eta_1 \cdot l_1} \quad (1)$$

Так как вода обладает меньшей вязкостью , чем кровь , то за время продвижения крови по левому капилляру до метки “ 1 ” вода пройдет по правому капилляру гораздо больший путь . Объем воды выразится формулой :

$$V_2 = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P_2 \cdot t}{8 \cdot \eta_2 \cdot l_2} \quad (2)$$

Так как радиусы капилляров одинаковы и время продвижения крови и воды по капиллярам тоже одинаково , то разделив уравнение (1) на (2) , получаем следующее выражение :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1/\eta_1 \cdot \Delta P_1 / l_1}{1/\eta_2 \cdot \Delta P_2 / l_2}$$

Если учесть , что градиенты давлений $\frac{\Delta P_1}{l_1}$ и $\frac{\Delta P_2}{l_2}$ равны друг другу и , заменив объемы жидкостей через площадь поперечного сечения капилляра и длину столбика жидкости , то получим следующее выражение :

$$\frac{S \cdot l_1}{S \cdot l_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad \text{или} \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно , что пути , пройденные жидкостями в капиллярах за одно и тоже время при строго одинаковых условия, обратно пропорциональны вязкостям этих жидкостей.

Так как кровь втянута до метки “ 1 ” , $l_1 = 1$. Отношение вязкости крови η_1 к вязкости воды η_2 , называется **относительной вязкостью крови** :

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\eta_{кр}}{\eta_{\text{в}}} = \eta_{\text{отн}}$$

Учитывая это , формула (3) преобразуется в следующее выражение

$$\eta_{\text{отн}} = l_2 \quad (4)$$

где , l_2 – длина столбика воды в капилляре.

Следовательно, для определения вязкости крови необходимо определить величину столбика воды в капилляре , при условии , что в другом капилляре кровь дошла до метки “1”.

Уравнение Бернулли, смысл. Следствие из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки. Градиенты линейных скоростей, гидростатического давления, вязкости крови в сосудах с ламинарным кровотоком. "Пристеночный эффект". Смысл.

Уравнение Бернулли справедливо для идеальной жидкости при стационарном течении жидкости.

Идеальной называется жидкость несжимаемая и не имеющая внутреннего трения, или вязкости.

Стационарным называется течение, при котором скорости частиц жидкости в каждой точке потока со временем не изменяется.

Установившееся течение характеризуют линиями тока- воображаемыми линиями, совпадающими с траекторией частиц. Часть потока жидкости, ограниченная со всех сторон линиями тока, образует трубку тока или струю. Выделим трубку тока, расположенную наклонно (см рис1). Уравнение Бернулли для этой трубки будет

иметь вид:
$$p + \rho \cdot g \cdot h + \rho \cdot \frac{v^2}{2} = const$$
 где:

P -статическое давление,

$\rho \cdot g \cdot h$ - гидростатическое давление,

$\rho \cdot \frac{v^2}{2}$ - гидродинамическое давление.

Уравнение Бернулли-при стационарном течении идеальной жидкости полное давление, равное сумме статического, гидростатического и динамического давлений, остаётся величиной постоянной в любом поперечном сечении потока.

Для горизонтальной трубки тока($h_1=h_2$), тогда:
$$p + \rho \cdot \frac{v^2}{2} = const$$

Из этого уравнения следует вывод: **статическое давление невязкой жидкости при течении по горизонтальной трубе возрастает там, где скорость её уменьшается и наоборот.**

Это вывод используется для объяснения движения эритроцитов в артериальном русле.

Характерным свойством эритроцитов является тенденция к образованию агрегатов, которые движутся вдоль оси сосуда.

Если нанести мазок крови на предметный столик скопа, то можно видеть, как эритроциты "склеиваются" друг с другом, образуя агрегаты, которые получили название монетных столбиков. Условия образования агрегатов различны в крупных и мелких сосудах. Это связано в первую очередь с соотношением размеров сосуда, агрегата и эритроцита (характерные размеры: $d_a = 8$ мкм, $d_{ар} \sim 10 d_{эп}$).

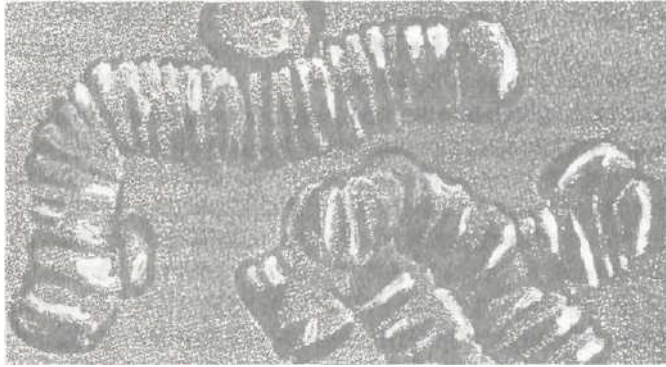


Рис.6 Агрегаты эритроцитов ("монетные столбики") в крупных сосудах.

Скорость движения эритроцитов равна нулю у стенок сосуда(за счёт сил трения) и максимальна вдоль оси (см. рисб). Тогда в соответствии с уравнением Бернулли давление максимально в центре сосуда и минимально у стенок сосуда. Вследствие этого возникает градиент давления, направленный от стенок к центру сосуда, под действием которого эритроциты отталкиваются от стенок и движутся вдоль оси сосуда. У стенок сосуда находится слой плазмы крови("Пристеночный эффект"), который способствует продвижению эритроцитов(см. рис7).

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