

# ЛЕКЦИЯ 19. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ КРОВИ ПО СОСУДАМ. ОСНОВНЫЕ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

19.1. Гемодинамика: основные законы и их математическое выражение, функциональная классификация кровеносных сосудов, изменение площади поперечного сечения, сопротивления, кровяного давления и скорости кровотока по ходу сосудистого русла

- Кровообращением называется движение крови по сосудистой системе. Оно обеспечивает газообмен между организмом и внешней средой, обмен веществ между всеми органами и тканями, гуморальную регуляцию различных функций организма и перенос образующегося в организме тепла.
- Конечной проблемой физиологии кровообращения является рассмотрение закономерностей, которые обуславливают достаточное кровоснабжение органов.
- Раздел физиологии, посвященный закономерностям течения крови по сосудам, называется гемодинамикой.
- Основные законы гемодинамики основаны на законах гидродинамики, т.е. учения о движении жидкости в трубках.

- Так же, как и гидродинамика, гемодинамика рассматривает соотношения между силами, движущими кровь по сосудам, скоростью движения, давлением крови в сосудах, сопротивлением в сосудистой системе, просветом отдельных сосудов и т.д..
- Нужно отметить, что условия естественного кровообращения весьма сложны и зависят от большого количества переменных величин, да и сама кровь не похожа на идеальную ньютоновскую жидкость.
- Поэтому законы гидродинамики приложимы к системе кровообращения только в известных пределах и только с приблизительной точностью.
- Гемодинамика – это раздел физиологии о физических принципах, лежащих в основе движения крови по сосудам.
- Движущей силой кровотока является разница давления между отдельными участками сосудистого русла: кровь течет от области с большим давлением к области с меньшим давлением.
- Этот градиент давления служит источником силы, преодолевающей гидродинамическое сопротивление.
- Гидродинамическое сопротивление зависит от размеров сосудов и вязкости крови.

# Основные гемодинамические

## показатели.

1. Объемная скорость движения крови.

В гидродинамике объемная скорость тока жидкости, т.е. количество жидкости, протекающей через сосуд в единицу времени, прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональная сопротивлению, главным образом в кранах системы.

Если ввести в эту зависимость показатель вязкости, то мы получим следующее уравнение Пуазейля, где  $\eta$  - вязкость:

$$Q = (P - P_1) / R \times \eta$$

Уравнение показывает, что кровоток, т.е. объем крови, проходящей за единицу времени через кровеносные сосуды в каком-нибудь отделе кровеносного русла, равно отношению разности средних давлений в артериальной и венозной частях этого отдела (или в любых других частях) к гидродинамическому сопротивлению.

**Объемная скорость кровотока** отражает кровоснабжение какого-либо органа или ткани.

- В гемодинамике этому гидродинамическому показателю соответствует объемная скорость крови, т.е. количество крови, протекающее через кровеносную систему в единицу времени, другими словами - минутный объем кровотока. Минутный объем кровотока подчиняется формуле Пуазейля.
- Поскольку кровеносная система замкнутая, то через любое поперечное сечение ее в единицу времени проходит одно и то же количество крови
- $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = \text{const.}$
- ***Это уравнение называется уравнением непрерывности движения крови.*** Кровеносная система состоит из системы ветвящихся сосудов, поэтому суммарный просвет растет, хотя просвет каждого разветвления постепенно уменьшается.
- *Из уравнения непрерывности следует, что, через аорту, также как через все артерии, все капилляры, все вены в минуту проходит один и тот же объем крови.*



- Это не значит однако, что во всех разветвлениях сосудов она одинакова. Тут она может меняться в зависимости от просвета каждого отдельного сосуда, однако сумма просветов остается неизменной. Это играет большую роль в перераспределении крови по органам.
- Пример – река Енисей с островами и притоками и участок узкого русла- в любом месте через сечение реки проходит один объем воды. При этом
  - $Q = S \times V$ ,
  - где  $S$  - площадь поперечного сечения реки,  $V$  - линейная скорость движения воды.

## 2. Линейная скорость движения крови.

Скорость, с которой жидкость вытекает из бака через отверстие в нем в гидродинамике определяется по формуле Торричелли:

$$V = \sqrt{2gP},$$

где  $V$  - линейная скорость (число сантиметров, которое проходит жидкость в единицу времени),  $g$  - ускорение свободного падения.

Если учесть сопротивление току жидкости, то она примет вид:

$$V = \sqrt{2g(P - P_r)},$$

где  $P_r$  - та часть давления, которая идет на преодоление сопротивления.

Из этой формулы видно, что скорость истечения жидкости прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна сопротивлению

# Зная линейную скорость, легко установить и объемную.

- $Q = SV$ ;  $Q = V\pi r^2$ ;  $V = Q/\pi r^2$
- ***Из этих формул следует, что в трубках различного диаметра скорость течения крови тем больше, чем меньше сечение трубки.***
- *В кровеносной системе самым узким местом является аорта, наиболее широким капилляры (напомним, что мы имеем дело с суммарным просветом сосудов). Соответственно этому кровь в аорте движется гораздо быстрее - 500 мм/сек, чем в капиллярах - 0,5 мм/сек.*
- *Линейная скорость, вычисленная по этой формуле, есть средняя скорость. В действительности линейная скорость различна для частиц крови, продвигающихся в центре потока (вдоль продольной оси сосуда) и у сосудистой стенки. В центре сосуда линейная скорость максимальна, около стенки сосуда она минимальна в связи с тем, что здесь особенно велико трение частиц крови о стенку.*



- Линейная скорость зависит от общей ширины данного отдела сосудистого русла. Это следует из уравнения, выражающего соотношение линейной и объемной скорости: чем больше общая площадь сечения сосудов, тем меньше линейная скорость кровотока.
- В кровеносной системе самым узким местом является аорта. При разветвлении артерий, несмотря на то, что каждая ветвь сосуда уже той, от которой она произошла, наблюдается увеличение суммарного русла, так как сумма просветов артериальных ветвей больше просвета разветвившейся артерии.
- Наибольшее расширение русла отмечается в капиллярной сети: сумма просветов всех капилляров примерно в 500—600 раз больше просвета аорты. Соответственно этому кровь в капиллярах движется в 500—600 раз медленнее, чем в аорте. В венах линейная скорость кровотока снова возрастает, так как при слиянии вен друг с другом суммарный просвет кровяного русла суживается.
- *В полых венах линейная скорость кровотока достигает половины скорости в аорте.*
- Результирующая всех линейных скоростей в различных частях сосудистой системы **выражается временем кругооборота крови**. Она у здорового человека в покое равна 20 секундам. Это значит, что одна и та же частица крови проходит через сердце каждую минуту 3 раза. При напряженной мышечной работе время кругооборота крови может уменьшаться до 9

# Сопротивление сосудистой системы.

- Протекая по трубке, жидкость преодолевает сопротивление, которое возникает вследствие внутреннего трения частиц жидкости между собой и о стенку трубки. Это трение будет тем больше, чем больше вязкость жидкости, чем уже ее диаметр и чем больше скорость течения.
- Под вязкостью обычно понимают внутреннее трение, т. е. силы, влияющие на течение жидкости. Вязкость часто выражают в относительных единицах, принимая, что вязкость  $\eta = 1$  при  $20^{\circ}\text{C}$ .
- Вязкость гомогенных жидкостей, например, плазмы крови, постоянна. Вязкость негомогенных жидкостей, таких как цельная кровь, изменяется в зависимости от скорости течения и других факторов.
- Вязкость крови определяется, прежде всего, форменными элементами, в меньшей степени белками плазмы. У человека вязкость крови равна 3–5, а вязкость плазмы – 1,9–2,3 относительным единицам.
- В разных отделах сосудистого русла вязкость неодинакова, так как она увеличивается при уменьшении скорости кровотока. По этой причине вязкость крови в капиллярах, где скорость кровотока маленькая, может в физиологических условиях возрасти в 10 раз. Следовательно, гидродинамическое сопротивление току крови наибольшее в капиллярах.

- Однако следует учитывать, что существует механизм, препятствующий значительному повышению сопротивления в капиллярах. Он обусловлен тем, что в наиболее мелких сосудах (диаметром меньше 1 мм), эритроциты выстраиваются в так называемые **монетные столбики** и подобно змее двигаются по капилляру в оболочке из плазмы, почти не контактируя со стенками капилляра. В результате этого условия кровотока улучшаются, и этот механизм частично препятствует значительному повышению сопротивления.
- На сопротивление кровотоку большое влияние оказывает тип течения крови. При *ламинарном течении* кровь по сосудам движется параллельными слоями, как бы скользя относительно друг друга. В этом случае сопротивление наименьшее. При определенных условиях ламинарное течение превращается в турбулентное.
- Для *турбулентного типа* течения жидкости и крови в том числе, характерны завихрения слоев. В этих завихрениях частицы жидкости перемещаются не только параллельно оси стенки сосуда, но и перпендикулярно ей. Эти завихрения существенно увеличивают вязкость и, следовательно, сопротивление. Турбулентный тип течения крови может возникнуть в реальных условиях – при мышечной работе или снижении вязкости крови при анемии

- Гидродинамическое сопротивление зависит и от размеров сосудов от их длины и поперечного сечения. В суммарном виде уравнение, описывающее сосудистое сопротивление представляет следующее (формула Пуазейля):
- $R = 8\eta L / \pi r^4$  ,
- где  $\eta$  - вязкость,  $L$  - длина,  $\pi = 3,14$  (число пи),  $r$  - радиус сосуда.
- Кровеносные сосуды оказывают значительное сопротивление току крови, и сердцу приходится большую часть своей работы тратить на преодоление этого сопротивления.
- Основное сопротивление сосудистой системы сосредоточено в той ее части, где происходит разветвление артериальных стволов на мельчайшие сосуды. Однако максимальное сопротивление представляют самые мельчайшие артериолы.
- Причина заключается в том, что артериолы, имея почти такой же диаметр, как и капилляры, в общем длиннее и скорость течения крови в них выше.
- При этом величина внутреннего трения возрастает. Кроме того, артериолы способны к спазмированию. *Общее сопротивление сосудистой системы* все время увеличивается по мере удаления от основания аорты.

- Сосудистая система состоит из множества отдельных трубок, соединенных параллельно и последовательно. Точно определить сопротивление сосудов по формулам, известным из гидродинамики, невозможно, так как геометрия сосудов изменяется вследствие сокращения сосудистых мышц.
- Вязкость крови также не является величиной постоянной.
- Например, если кровь протекает через сосуды диаметром меньше 1 мм, вязкость крови значительно уменьшается.
- Чем меньше диаметр сосуда, тем меньше вязкость протекающей в нем крови.
- Это связано с тем, что в крови наряду с плазмой имеются форменные элементы, которые располагаются в центре потока. Пристеночный слой представляет собой плазму, вязкость которой намного меньше вязкости цельной крови.
- Чем тоньше сосуд, тем большую часть площади его поперечного сечения занимает слой с минимальной вязкостью, что уменьшает общую величину вязкости крови.
- Теоретический расчет сопротивления капилляров невозможен, так как в норме открыта только часть капиллярного русла, остальные капилляры являются резервными и открываются по мере усиления обмена веществ в тканях.

- Наибольшей величиной сопротивления должен обладать капилляр, диаметр которого 5— 7 мкм. Однако вследствие того, что огромное количество капилляров включено в сосудистую сеть, по которой осуществляется ток крови параллельно, их суммарное сопротивление меньше, чем суммарное сопротивление артериол.
- *Основное сопротивление току крови возникает в артериолах. Систему артерий и артериол называют сосудами сопротивления, или резистивными сосудами. Изменение их просвета является главным регулятором уровня общего артериального давления.*
- **Артериолы — «краны сердечно-сосудистой системы» (И. М. Сеченов).** Открытие этих «кранов» увеличивает отток крови в капилляры соответствующей области, улучшая местное кровообращение, а закрытие резко ухудшает кровообращение данной сосудистой зоны.
- От сужения или расширения сосудов-сфинктеров последних отделов прекапиллярных артериол зависит число функционирующих капилляров, т.е. площадь обменной поверхности.
- Итак, артериолы играют двоякую роль: участвуют в поддержании необходимого организму уровня общего артериального давления и в регуляции величины местного кровотока через тот или иной орган или ткань. Величина органного кровотока соответствует потребности органа в кислороде и питательных веществах, определяемой уровнем рабочей активности органа.

# 4. Давление крови в сосудах.

- Это - четвертый, и самый важный гемодинамический показатель, так как его легко измерить.
- Если ввести в крупную артерию животного датчик манометра, то прибор обнаружит давление, колеблющееся в ритме сердечных сокращений около средней величины, равной примерно 100 мм рт ст.
- Существующее внутри сосудов давление создается работой сердца, нагнетающего кровь в артериальную систему в период систолы. Однако, и во время диастолы, когда сердце расслаблено и работы не производит, давление в артериях не падает до нуля, а лишь немного западает, сменяясь новым подъемом во время следующей систолы.
- Таким образом, давление обеспечивает непрерывный ток крови, несмотря на прерывистую работу сердца. Причина - в эластичности артерий. Аорта и крупные сосуды, богатые эластической тканью, обладают значительной упругостью.
- Конечная часть артериальных стволов, распадаясь на артериолы, представляют для крови существенное сопротивление. Соотношения между эластичностью артерий и величиной сопротивления таковы, что почти вся работа сердца затрачивается на поддержание запаса энергии в стенках артериальных сосудов, и лишь относительно малая часть работы расходуется на сообщение крови непосредственного ускорения.

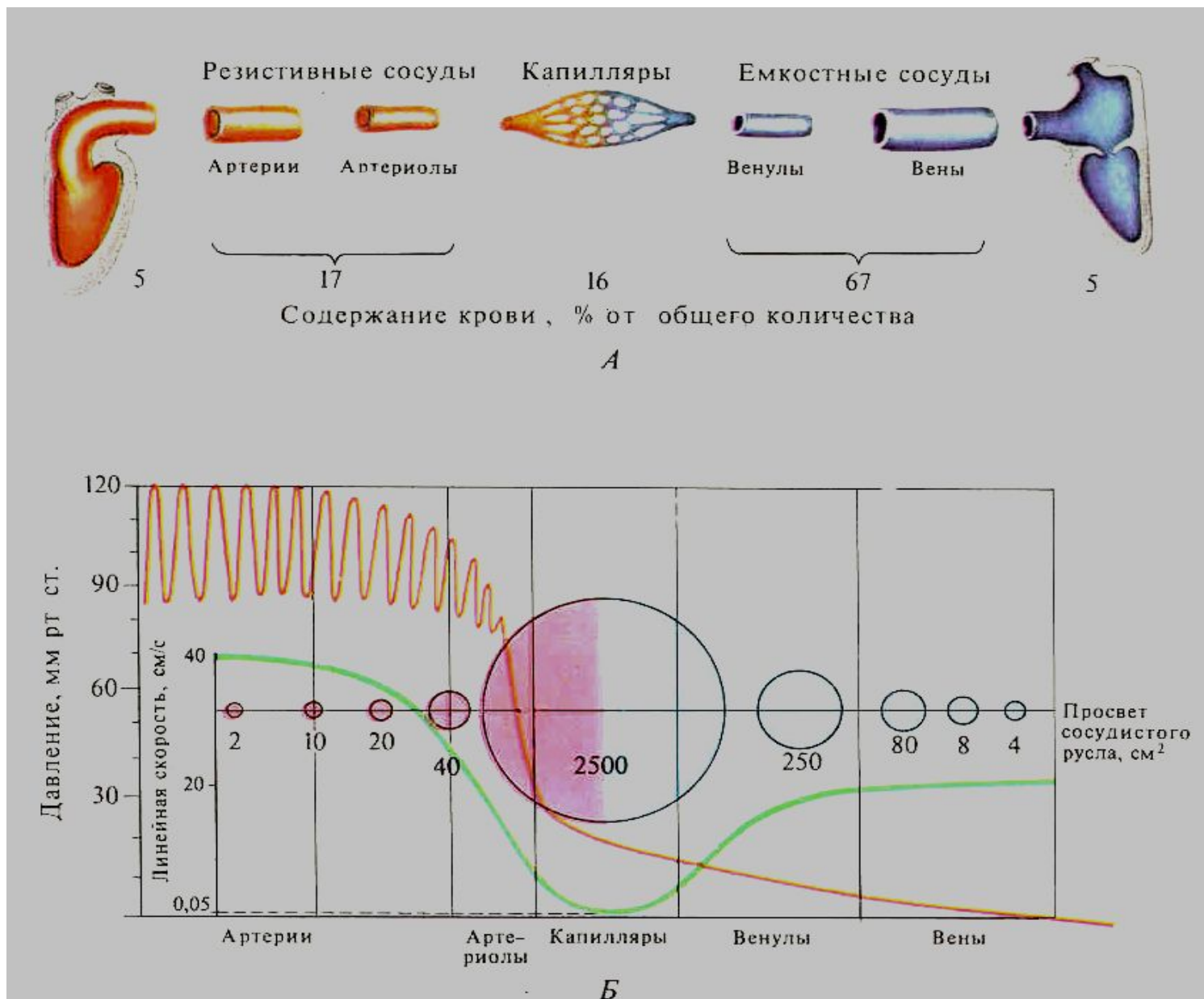


Рис. 31. Показатели гемодинамики в разных отделах сосудистого русла



# Величина артериального давления определяется двумя факторами:

- 1- количеством крови, нагнетаемой сердцем,
- 2 - и сопротивлением, существующим в системе:

$$P = QR .$$

- При соединении с манометром различных сосудов можно убедиться, что давление в них будет тем меньше, чем дальше отстоит исследуемый сосуд от аорты. Это соответствует гидродинамической закономерности, согласно которой при течении жидкости происходит непрерывное падение давления от начальной части трубки до ее открытого конца.
- Степень падения давления определяется величиной сопротивления протеканию жидкости на данном отрезке сосуда. Из сказанного ясно, что кривая распределения давления в сосудистой системе должна явиться зеркальным отражением кривой сопротивления.
- Так, в подключичной артерии собаки  $P = 123$  мм рт. ст., в плечевой - 118 мм, в капиллярах мышц 10 мм, лицевой вене 5 мм, яремной - 0,4 мм, в верхней поллой вене -2,8 мм рт ст.

Среди этих данных обращает на себя внимание отрицательная величина давления в верхней полой вене.

Она означает, что в непосредственно прилегающих к предсердию крупных венозных стволах давление меньше атмосферного.

Создается оно присасывающим действием грудной клетки и самого сердца во время диастолы и способствует движению крови к сердцу.

## **Методы определения кровяного давления.**

В остром опыте - при помощи канюли, введенной в сосуд и соединенной с манометром. У человека - непосредственно в сосуде - при зондировании.

Как показывают прямые измерения давления крови в разных сосудах, давление на протяжении крупных и средних артерий падает всего на 10%, а в артериолах и капиллярах — на 85%.

Это означает, что 10% энергии, затрачиваемой желудочками на изгнание крови, расходуется на продвижение крови в крупных и средних артериях,

а 85% — на продвижение крови в артериолах и капиллярах.

# Функциональные группы сосудов

Все сосуды в зависимости от выполняемой ими функции можно подразделить на 6 групп:

- 1) амортизирующие сосуды (сосуды эластического типа);
- 2) резистивные сосуды;
- 3) сосуды-сфинктеры;
- 4) обменные сосуды;
- 5) емкостные сосуды;
- 6) шунтирующие сосуды.

**К амортизирующим сосудам** относятся артерии с большим содержанием эластических волокон – аорта, легочная артерия и прилегающие к ним участки больших артерий. Эффект амортизации состоит в сглаживании периодических систолических волн кровотока. Такой эффект амортизации обусловлен расширением сосуда вследствие его эластичности.

**Резистивные сосуды** – это сосуды, оказывающие наибольшее сопротивление кровотоку. К ним относятся концевые артерии, артериолы и в меньшей степени капилляры и вены. Поскольку гидродинамическое сопротивление в значительной степени зависит от поперечного сечения сосуда, то сокращения гладких мышц прекапиллярных (резистивных) сосудов служат основным механизмом регуляции объемной скорости кровотока в различных сосудистых областях, а также перераспределения сердечного выброса.

- **Артериолы** представляют собой тонкие сосуды (диаметром 15—70 мкм). Стенка этих сосудов содержит толстый слой циркулярно расположенных гладких мышечных клеток, при сокращении которого просвет сосуда может значительно уменьшаться. При этом резко повышается сопротивление артериол. Изменение сопротивления артериол меняет уровень давления крови в артериях. В случае увеличения сопротивления артериол отток крови из артерий уменьшается и давление в них повышается. Падение тонуса артериол увеличивает отток крови из артерий, что приводит к уменьшению артериального давления.
- В работающем органе тонус артериол уменьшается, что обеспечивает повышение притока крови. Чтобы общее артериальное давление при этом не снизилось в других (неработающих) органах, тонус артериол повышается. Суммарная величина общего периферического сопротивления и общий уровень артериального давления остаются примерно постоянными, несмотря на непрерывное перераспределение крови между работающими и неработающими органами.

- В **сосудах обменного типа** происходит обмен между кровью и межтканевой жидкостью. К ним относят капилляры. Они не способны к сокращению просвета.
- **Емкостные сосуды** – это вены. Благодаря высокой растяжимости они способны вмещать, а затем и выбрасывать большие объемы крови без существенных изменений каких-либо параметров кровотока. В связи с этим они могут играть роль депо крови. Как депо крови особенно важны вены печени, крупные чревные вены, вены подсосочкового сплетения. Общий объем этих вен может увеличиться на 1 л.
- В связи с тем, что кровь выбрасывается сердцем отдельными порциями, кровотоки в артериях имеют пульсирующий характер, поэтому линейная и объемная скорости непрерывно меняются: они максимальны в аорте и легочной артерии в момент систолы желудочков и уменьшаются во время диастолы. В капиллярах и венах кровотоки постоянны, т. е. линейная скорость его постоянна.
- В превращении пульсирующего кровотока в постоянный имеют значение свойства артериальной стенки. Непрерывный ток крови по всей сосудистой системе обуславливают выраженные упругие свойства аорты и крупных артерий.
- В сердечно-сосудистой системе часть кинетической энергии, развиваемой сердцем во время систолы, затрачивается на растяжение аорты и отходящих от нее крупных артерий. Последние образуют эластическую, или компрессионную, камеру, в которую поступает значительный объем крови, растягивающий ее; при этом кинетическая энергия, развитая сердцем, переходит в энергию эластического напряжения артериальных стенок. Когда систола заканчивается, растянутые стенки артерий стремятся спастись и проталкивают кровь в капилляры, поддерживая кровотоки во время диастолы.
- Процессы, протекающие в последовательно соединенных сосудах, обеспечивающие циркуляцию (кругооборот) крови, называют системной гемодинамикой. Процессы, протекающие в параллельно подключенных к аорте и полым венам сосудистых руслах, обеспечивая кровоснабжение органов, называют регионарной, или органной, гемодинамикой.

