

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА НОРМАЛЬНОЙ ФИЗИОЛОГИИ

А. И. КУБАРКО, Д. А. АЛЕКСАНДРОВ, Н. А. БАШАРКЕВИЧ

**ГЕМОДИНАМИКА.
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
КРОВООБРАЩЕНИЯ В ВОПРОСАХ
И ОТВЕТАХ**

Учебно-методическое пособие



Минск БГМУ 2012

УДК 612.13-054.6 (075.8)
ББК 28.707 я73
К88

Рекомендовано Научно-методическим советом университета в качестве учебно-методического пособия 30.05.2012 г., протокол № 8

Рецензенты: д-р мед. наук, проф., чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси Ф. И. Висмонт; канд. мед. наук, доц. М. А. Савченко

Кубарко, А. И.

К88 Гемодинамика. Функциональные показатели кровообращения в вопросах и ответах : учеб.-метод. пособие / А. И. Кубарко, Д. А. Александров, Н. А. Башаркевич. – Минск : БГМУ, 2012. – 26 с.

ISBN 978-985-528-647-0.

Настоящее учебно-методическое пособие, составленное в виде вопросов и ответов, акцентирует внимание на важнейших вопросах гемодинамики и функциональных показателей кровообращения. Перечень вопросов соответствует утвержденной типовой программе по нормальной физиологии.

Предназначено для студентов 2-го курса медицинского факультета иностранных учащихся при подготовке к текущим и итоговым занятиям, экзамену.

УДК 612.13-054.6 (075.8)
ББК 28.707 я73

ISBN 978-985-528-647-0

© Оформление. Белорусский государственный медицинский университет, 2012

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АД — артериальное давление
- АД_{диаст} — диастолическое артериальное давление
- АД_{пульс} — пульсовое давление крови
- АД_{срд} — среднее гемодинамическое давление крови
- АД_{сист} — систолическое артериальное давление
- ЖКТ — желудочно-кишечный тракт
- КДО — конечно-диастолический объем
- мм вод. ст. — миллиметры водного столба
- мм рт. ст. — миллиметры ртутного столба
- МОК — минутный объем кровотока
- МЦР — микроциркуляторное русло
- ОПС, R — общее периферическое сопротивление кровотоку
- ОЦК — объем циркулирующей крови
- СО₂ — углекислый газ
- УО — ударный объем
- ЦВД — центральное венозное давление
- ЧСС — частота сердечных сокращений
- L — длина сосуда
- P — кровяное давление
- Q — объемный кровоток
- r — радиус сосуда
- S — площадь поперечного сечения
- t — время
- V — линейная скорость кровотока
- η — вязкость крови
- v — скорость пульса

МОТИВАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕМЫ

Общее время занятия: 4 часа.

Движение крови по сосудам является обязательным условием для выполнения всех функций крови и поддержания гомеостаза. Важнейшей задачей сердечно-сосудистой системы является эффективное кровоснабжение органов и тканей в соответствии с потребностями их метаболизма и функций. Интенсивность кровоснабжения тканей зависит от давления крови в сосудистом русле и ее распределения, регулируемого изменением тонуса сосудов. Удержание оптимальных значений величины кровяного давления имеет огромное значение для обеспечения адекватного системного кровотока, особенно после периодов, когда давление повышается для реализации приспособительных изменений кровообращения. Таким образом, глубокие и прочные знания по данному разделу физиологии сердечно-сосудистой системы позволят будущим врачам сформировать ясное понимание процессов, обеспечивающих оптимальную доставку кровью питательных веществ и кислорода к тканям у здорового человека, и заложить основу понимания патологических процессов, протекающих в сердечно-сосудистой системе и тканях, принципов их диагностики и коррекции у больного.

Цель занятия: изучить роль системы кровообращения в обеспечении метаболических потребностей органов, тканей и целостного организма, структурно-функциональную организацию сосудистой системы и факторы, обуславливающие движение крови по сосудам.

Задачи занятия:

- изучить функциональную организацию сосудистой системы, гемодинамические свойства различных отделов кровеносного русла, физиологические особенности кровотока в артериальном, венозном отделах сосудистой системы и микроциркуляторном русле;
- рассмотреть факторы, определяющие величину кровяного давления в различных физиологических условиях;
- усвоить нормативы и физиологическое значение основных функциональных показателей кровообращения, их диагностическое значение и методы исследования;
- изучить зависимость величины артериального давления крови от показателей работы сердца, объема циркулирующей крови, тонуса сосудов, реологических свойств крови;
- приобрести навыки оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы;
- освоить методики исследования свойств артериального пульса и измерения артериального давления крови.

Требования к исходному уровню знания. Для успешного усвоения темы студент должен знать материал из следующих разделов:

- медицинской и биологической физики: биореологию, физические основы гемодинамики; импеданс живой ткани переменному току;
- анатомии человека: сердечно-сосудистую систему (сердце, артерии, сосуды микроциркуляторного русла, вены);
- гистологии, цитологии и эмбриологии.

Контрольные вопросы из смежных дисциплин:

1. Уравнение Бернулли, условие неразрывности струи, пределы их применимости для описания кровотока.
2. Вязкость крови и факторы, влияющие на нее в организме. Формула Пуазейля.
3. Механизм возникновения пульсовой волны. Скорость ее распространения. Методы регистрации пульсовых волн.
4. Ламинарное и турбулентное течение жидкости. Число Рейнольдса. Условия проявления турбулентностей крови в сердечно-сосудистой системе.
5. Развитие сердечно-сосудистой системы. Кровообращение плода.
6. Взаимосвязь между строением кровеносного русла, строением и функцией органа.
7. Структура стенки сосудов в различных отделах сосудистого русла.
8. Анастомозы кровеносных сосудов: артериальные, венозные, артериовенозные. Межсистемные и внутрисистемные анастомозы. Пути окольного (коллатерального) тока крови.
9. Сосуды малого и большого кругов кровообращения.

Контрольные вопросы по теме занятия:

1. Роль системы кровообращения в обеспечении метаболизма. Круги кровообращения, их функциональная характеристика.
2. Морфологическая и функциональная классификация сосудов.
3. Факторы, обуславливающие движение крови по сосудам.
4. Основной закон гемодинамики — взаимосвязь между артериальным давлением крови, объемной скоростью кровотока и периферическим сопротивлением кровотоку. Факторы, определяющие сопротивление кровотоку.
5. Кровяное давление, его виды. Давление крови в различных участках сосудистого русла. Факторы, определяющие величину артериального давления. Понятие о нормальных величинах артериального давления, его возрастные изменения.
6. Методики измерения кровяного давления.
7. Объемная и линейная скорости кровотока в различных отделах сосудистого русла. Основные показатели кровотока (давление крови, ско-

рость кровотока, сопротивление) в артериальном, микроциркуляторном и венозном участках сосудистого русла.

8. Артериальный пульс, его происхождение и клинико-физиологические характеристики. Сфигмография, анализ сфигмограммы.

9. Ток крови в венозных сосудах, венозный возврат крови. Давление крови в венах. Центральное венозное давление.

Задания для самостоятельной работы студента. Для полного усвоения темы студенту необходимо повторить учебный материал из смежных дисциплин. Затем необходимо ознакомиться с учебным материалом издания. Для того чтобы изучение темы было более осознанным, студенту рекомендуется вести записи вопросов и замечаний, которые впоследствии можно выяснить в ходе дальнейшей самостоятельной работы с дополнительной литературой или на консультации с преподавателем.

В процессе работы с учебно-методическим пособием рекомендуется также обращаться к практикуму «Нормальная физиология», решая ситуационные задачи и отвечая на вопросы для самоконтроля, а также решать электронные тестовые задания для самоконтроля, что позволит не только адекватно оценить собственные знания, но и покажет преподавателю уровень освоения студентом учебного материала.

ГЕМОДИНАМИКА. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРОВООБРАЩЕНИЯ

1. Опишите роль системы кровообращения в обеспечении метаболизма. Охарактеризуйте круги кровообращения.

Сердечно-сосудистая система образована сердцем и сосудами. Их главной функцией является обеспечение движения крови, которое возможно благодаря работе сердца в качестве насоса. При сокращении желудочков сердца (во время их систолы) кровь изгоняется из левого желудочка в аорту, а из правого — в легочной ствол, с которых начинаются, соответственно, большой и малый круги кровообращения. Большой круг заканчивается верхней и нижней полыми венами, по которым венозная кровь возвращается в правое предсердие, а малый круг — четырьмя легочными венами, по которым к левому предсердию притекает артериальная, насыщенная кислородом кровь (рис. 1).

Важнейшей задачей системы кровообращения является обеспечение органов и тканей кислородом и питательными веществами, а также удаление продуктов метаболизма клеток (CO_2 , мочевины, креатинина, билирубина, мочевой кислоты, аммиака и т. д.). Насыщение крови кислородом и удаление углекислого газа происходит в капиллярах малого круга кровообращения, а насыщение питательными веществами — в сосудах большо-

го круга при прохождении крови через капилляры кишечника, печени, жировой ткани и скелетных мышц.

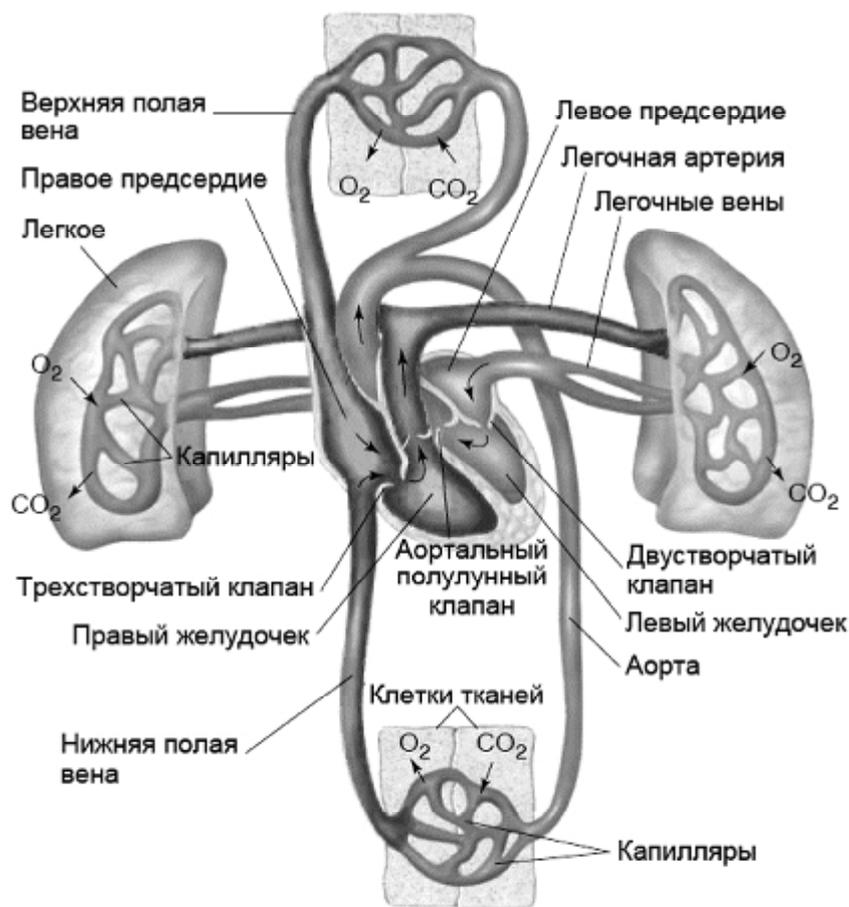


Рис. 1. Круги кровообращения (S. Fox, 2011)

Пройдя через полость левого предсердия и левого желудочка, богатая кислородом и питательными веществами кровь по артериям попадает в капилляры большого круга кровообращения, где происходит обмен кислородом и углекислым газом, доставка питательных веществ и удаление продуктов метаболизма между кровью и клетками тканей. Продукты метаболизма с током крови достигают органов выделения (почек, легких, желез ЖКТ, кожи) и выводятся из организма.

2. Приведите функциональную классификацию сосудов.

В зависимости от выполняемой функции и особенностей строения сосудистой стенки сосуда подразделяют на следующие:

1) **амортизирующие** (сосуды компрессионной камеры) — аорта, легочной ствол и крупные артерии эластического типа. Они сглаживают периодические систолические волны кровотока: смягчают гидродинамический удар крови, выбрасываемой сердцем во время систолы, и обеспечивают продвижение крови на периферию во время диастолы желудочков сердца;

2) **резистивные** (сосуды сопротивления) — мелкие артерии, артериолы, метартериолы. В их стенках содержится большое количество гладкомышечных клеток, благодаря сокращению и расслаблению которых они могут быстро изменять величину своего просвета. Оказывая переменное сопротивление кровотоку, резистивные сосуды поддерживают артериальное давление (АД), регулируют величину органного кровотока и гидростатическое давление в сосудах микроциркуляторного русла (МЦР);

3) **обменные** — сосуды МЦР. Через стенку этих сосудов происходит обмен водой, газами, органическими и неорганическими веществами между кровью и тканями. Кровоток в сосудах МЦР регулируется артериолами, венулами и перicyтами — гладкомышечными клетками, расположенными снаружи прекапилляров;

4) **емкостные** — вены. Эти сосуды обладают высокой растяжимостью, благодаря чему могут депонировать до 60–75 % ОЦК, регулируя возврат венозной крови к сердцу. В наибольшей степени депонирующими свойствами обладают вены печени, кожи, легких и селезенки;

5) **шунтирующие** — артериовенозные анастомозы. При их открытии артериальная кровь по градиенту давления сбрасывается в вены, минуя сосуды МЦР. Например, такое происходит при охлаждении кожи, когда кровоток для уменьшения потерь тепла направляется через артериовенозные анастомозы, минуя капилляры кожи. Кожные покровы при этом бледнеют;

б) **сосуды возврата крови** в сердце — средние и крупные вены.

3. Перечислите факторы, обуславливающие движение крови по сосудам. Какие факторы обеспечивают возврат венозной крови в сердце?

Движущей силой кровотока в любом отделе сосудистого русла служит разность давления крови ($\Delta P = P_1 - P_2$): кровь движется из области высокого давления в область низкого давления. В большом круге кровообращения это разность давления крови в начале аорты (P_1) и в устье полых вен (P_2). Поскольку давление в крупных венах (P_2) близко к нулю, то считают, что в этом случае $\Delta P = P_1$, т. е. равно величине среднего гидродинамического давления крови в аорте.

Возврату крови к сердцу (**венозному возврату**) также способствуют:

1) дыхательный насос. Во время вдоха давление снижается в грудной клетке и увеличивается в брюшной полости, что приводит к увеличению градиента давления ΔP и ускорению венозного возврата. Во время выдоха, задержки дыхания на высоте вдоха, кашля, наоборот, P_2 увеличивается, ΔP уменьшается и венозный возврат замедляется;

2) мышечный насос. При сокращении мышц вены, проходящие между ними, сдавливаются, давление в них повышается, и, благодаря наличию клапанов, кровь проталкивается по направлению к сердцу;

3) присасывающее действие сердца: а) во время периода изгнания систолы желудочков атриовентрикулярная перегородка смещается в сто-

рону желудочков, обеспечивая присасывающий эффект; б) в фазу быстрого наполнения резко снижается давление в предсердиях за счет перемещения крови из предсердия в расслабленный желудочек;

4) изменение тонуса сосудов. При веноконстрикции (стимуляция α_1 -адренорецепторов венозных сосудов) емкость вен уменьшается и венозный возврат возрастает, а при венодилатации — снижается;

5) наличие клапанов в венах. Они препятствуют обратному току крови.

4. Как изменяется венозный возврат к правому и левому желудочку сердца при глубоком вдохе и глубоком выдохе?

При **глубоком вдохе**: снижается давление в грудной клетке и возрастает давление в брюшной полости → увеличивается диаметр вен грудной полости и уменьшается диаметр вен брюшной полости → уменьшается давление в венах грудной полости и увеличивается в венах брюшной полости → увеличивается разность давления крови между венами брюшной и грудной полости → возрастает венозный возврат из большого круга кровообращения к *правому* предсердию, **но** из-за увеличения емкости вен малого круга венозный возврат к *левому* предсердию ненадолго снижается.

Во время **глубокого выдоха**, наоборот, к *правому* предсердию венозный возврат кратковременно уменьшается, а к левому — увеличивается.

5. Что такое ударный объем сердца? Чему он равен?

Ударный объем (УО, систолический объем) — это объем крови, который изгоняется из желудочка сердца в артериальную систему за одну систолу. В норме в покое у взрослого человека он составляет 55–90 мл, а при физической нагрузке может возрастать до 120 мл (у спортсменов — до 200 мл).

6. Как изменение венозного возврата отразится на величине УО сердца?

Увеличение венозного возврата ведет к увеличению конечно-диастолического объема (КДО) и большому растяжению кардиомиоцитов в диастолу, что, как следствие, до определенного предела увеличивает силу сокращения сердечной мышцы и величину УО. Избыточное растяжение кардиомиоцитов слишком большим КДО крови может привести к снижению силы их сокращения и уменьшению УО — развитию сердечной недостаточности.

7. Охарактеризуйте объемную и линейную скорости кровотока в различных отделах сосудистого русла.

Объемная скорость кровотока (объемный кровоток (Q), минутный объем кровотока (МОК)) — объем крови, протекающий через суммарное поперечное сечение сосудистого русла в единицу времени. Определяют также объемную скорость кровотока в органе или отдельном сосуде. Измеряется Q в л/мин или мл/мин. Объемная скорость кровотока в устояв-

шемся режиме кровотока одинакова на любом уровне суммарного поперечного сечения сосудистого русла (S) как большого, так и малого кругов кровообращения. В покое Q равен 4000–5000 мл/мин.

Линейная скорость кровотока (V) — это расстояние, которое проходит частица крови за единицу времени. Измеряется V в м/с, см/с, мм/с. Линейная скорость кровотока прямо пропорциональна объемному кровотоку (Q) и обратно пропорциональна площади поперечного сечения (S):

$$V = \frac{Q}{S}.$$

Поскольку площадь поперечного сечения сосудистого русла увеличивается от аорты (3–4 см²) к капиллярам (≈ 2500 см²) и затем уменьшается, достигая в полых венах 6–8 см², линейная скорость кровотока соответственно снижается с 20–50 см/с в аорте до 0,3–1 мм/с в капиллярах, а затем повышается в полых венах до скорости, примерно в два раза меньшей, чем в аорте.

8. Сформулируйте основной закон гемодинамики.

Количество крови, протекающее через поперечное сечение любого участка сосудистой системы или отдельного сосуда, прямо пропорционально разности средних давлений в начале и в конце данного участка сосудистой системы (сосуда) (ΔP) и обратно пропорционально сопротивлению току крови (R):

$$Q = \frac{\Delta P}{R}.$$

9. Сформулируйте закон Пуазейля.

Сопротивление току жидкости в полой трубке (сосуде) прямо пропорционально длине этой трубки и вязкости протекающей в ней жидкости (крови) и обратно пропорционально радиусу трубки в четвертой степени:

$$R = \frac{8L\eta}{\pi r^4},$$

где R — общее периферическое сопротивление; $\pi = 3,14$; r — радиус сосуда; L — длина сосуда; η — вязкость крови.

10. От каких факторов зависит объемная скорость кровотока?

Подставив в формулу основного закона гемодинамики уравнение Пуазейля, получим: $Q = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P \pi r^4}{8L\eta}$. Следовательно Q:

1) прямо пропорциональна *величине градиента кровяного давления*. Для системного объемного кровотока следует учитывать, что $\Delta P = P_1 =$ среднему гемодинамическому давлению крови в аорте (см. вопрос 3);

2) обратно пропорциональна *величине общего периферического сопротивления сосудов (R, ОПС)*;

3) прямо пропорциональна *радиусу сосудов (r) в 4-й степени*, т. е. при уменьшении радиуса сосуда, например, в 2 раза, объемный кровоток через него уменьшится в 16 раз;

4) обратно пропорциональна *вязкости крови*;

5) обратно пропорциональна *длине сосудов*. Длина сосудов быстро увеличивается у детей с ростом тела. У взрослого человека она изменяется мало и, следовательно, незначительно влияет на величину объемной скорости кровотока и ОПС;

6) прямо зависит от *работы сердца*:

$$Q = УО \cdot ЧСС,$$

где УО — ударный объем; ЧСС — частота сердечных сокращений.

11. От каких факторов зависит линейная скорость кровотока?

Линейная скорость кровотока (V) 1) прямо пропорциональна объемной скорости кровотока и 2) обратно пропорциональна суммарной площади поперечного сечения сосудов (сосуда), т. е. радиусу сосуда в квадрате:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2}.$$

Подставив в данное выражение $Q = \frac{\Delta P \pi r^4}{8L\eta}$, получим $V = \frac{\Delta P r^2}{8L\eta}$.

Таким образом, линейная скорость кровотока также:

3) прямо пропорциональна *величине градиента кровяного давления*;

4) прямо пропорциональна *радиусу сосудов в квадрате*;

5) обратно пропорциональна *вязкости крови*;

6) обратно пропорциональна *длине сосудов*;

7) обратно пропорциональна *сопротивлению кровотоку*.

12. Охарактеризуйте ламинарный и турбулентный тип течения крови.

Ламинарное течение — тип течения, при котором кровь перемещается слоями без перемешивания и пульсаций (т. е. без быстрых изменений скорости и давления). При этом максимальная скорость течения наблюдается у слоев, расположенных в центре сосуда, а минимальная — у пристеночных слоев. В связи с уменьшением силы трения частиц слоев с приближением к центру, в осевом кровотоке располагаются преимущественно форменные элементы крови, а вдоль стенки сосуда перемещается в основном слой плазмы.

При увеличении скорости течения крови, ее температуры, снижении вязкости (в т. ч. при эритропении), появлении препятствия току крови в виде разветвления сосудов или их сужения ламинарное течение крови может меняться на **турбулентное**, при котором в потоке крови самопроизвольно образуются многочисленные нелинейные волны, завихрения. Это резко увеличивает силу трения, повышает сопротивление току крови и

может привести к повреждению эндотелия сосудов, что сопровождается образованием сосудодетерминантных факторов эндотелия и создает условия для формирования холестериновых бляшек и тромбов.

13. Как изменяется вязкость при изменении скорости тока крови?

При ламинарном течении крови между слоями возникает напряжение сдвига, тормозящее движение более быстрого слоя. При снижении скорости движения крови внутреннее трение и, следовательно, вязкость крови увеличиваются. В физиологических условиях это наблюдается в сосудах с малым диаметром.

Исключением являются капилляры, в которых эффективная вязкость крови становится близкой к вязкости плазмы, т. е. снижается примерно в 2 раза благодаря особенностям движения эритроцитов. Они скользят, двигаясь друг за другом (по одному в цепочке) в «смазочном» слое плазмы и деформируясь в соответствии с диаметром капилляра.

14. Что такое кровяное давление?

Давление крови — это сила, с которой кровь и ее частицы воздействуют на стенки полостей сердца и сосудов.

15. Перечислите виды кровяного давления.

В зависимости от места измерения выделяют давление крови в полостях сердца (предсердиях, желудочках), давление крови в артериях (АД), артериолах, капиллярах, венах, центральное венозное давление (ЦВД).

В зависимости от фазы сердечного цикла АД разделяют на систолическое ($АД_{сис\tau}$) и диастолическое ($АД_{диаст}$).

Систолическим АД называют максимальную величину давления, оказываемую кровью на стенку артерий во время систолы желудочков.

Диастолическим АД называют минимальный уровень, до которого снижается давление крови в крупных артериях во время диастолы желудочков.

Зная величины $АД_{сис\tau}$ и $АД_{диаст}$, можно рассчитать пульсовое ($АД_{пульс}$) и среднее гемодинамическое ($АД_{сгд}$) давление крови.

Пульсовое АД — это разность между величинами $АД_{сис\tau}$ и $АД_{диаст}$:

$$АД_{пульс} = АД_{сис\tau} - АД_{диаст}.$$

В норме в большом круге кровообращения $АД_{пульс} = 30-50$ мм рт. ст.

Среднее гемодинамическое давление — это такой уровень относительно постоянного АД, который может обеспечить объемный кровоток, равный кровотоку, создаваемому переменным (от $АД_{сис\tau}$ к $АД_{диаст}$) АД.

$АД_{сгд}$ для **крупных центральных артерий** определяется по формуле:

$$АД_{сгд} = АД_{диаст} + \frac{АД_{сис\tau} - АД_{диаст}}{2} = АД_{диаст} + \frac{АД_{пульс}}{2}.$$

В большом круге оно близко к 100 мм рт. ст.

$AD_{сгд}$ для **периферических артерий** определяется по формуле:

$$AD_{сгд} = AD_{диаст} + \frac{AD_{сист} - AD_{диаст}}{3} = AD_{диаст} + \frac{AD_{пульс}}{3}.$$

16. Приведите уравнение, отражающее взаимосвязь АД, МОК и ОПС.

Преобразовав основной закон гемодинамики $МОК = \frac{AD_{сгд}}{ОПС}$, получим:

$$AD_{сгд} = МОК \cdot ОПС.$$

Из приведенного уравнения видно, что системное АД является интегральной величиной, составляющими и определяющими которой являются объемная скорость кровотока и общее периферическое сопротивление кровотоку. В зависимости от фазы сердечного цикла системное АД может принимать значения $AD_{сист}$ или $AD_{диаст}$.

17. Перечислите факторы, определяющие величину системного АД.

Исходя из уравнения, приведенного в вопросе 16, можно выделить следующие основные факторы, определяющие величину системного АД:

1) величина МОК, которая определяется работой сердца ($МОК = УО \cdot ЧСС$). Влияет она в основном на величину $AD_{сист}$, однако от нее зависит и $AD_{диаст}$;

2) величина ОПС, которая зависит в первую очередь от тонуса резистивных сосудов. Влияет она в основном на величину $AD_{диаст}$;

3) величина ОЦК, преимущественно влияющая на величину $AD_{сист}$;

4) вязкость крови и длина сосудов, влияющие на величину как $AD_{сист}$, так и $AD_{диаст}$.

18. Какие факторы преимущественно определяют величину $AD_{сист}$?

Величина $AD_{сист}$ зависит преимущественно от **работы сердца** (УО и ЧСС). Также на него влияют ОЦК, величина венозного возврата, вязкость крови, тонус сосудов (ОПС). При их увеличении $AD_{сист}$ повышается.

Также $AD_{сист}$ повышается при уменьшении эластичности аорты и крупных артерий.

19. Какие факторы преимущественно определяют величину $AD_{диаст}$?

Величина $AD_{диаст}$ зависит преимущественно от **состояния тонуса сосудов** (ОПС). В меньшей степени на нее влияют ОЦК, МОК и ЧСС. При их увеличении $AD_{диаст}$ повышается.

20. Какие факторы преимущественно определяют величину $AD_{пульс}$?

Величина $AD_{пульс}$ зависит от УО сердца и растяжимости стенки аорты (С). Увеличение $AD_{пульс}$ наблюдается при увеличении УО и уменьшении С:

$$АД_{\text{пульс}} = \frac{УО}{С}.$$

21. В чем заключается основная причина возрастного увеличения АД_{сист}?

С возрастом снижается эластичность и растяжимость сосудов, в т. ч. аорты и крупных артерий, что приводит к увеличению АД_{сист}. Одной из причин этого может быть развитие атеросклероза.

22. Назовите нормальные и оптимальные величины АД.

Нормальным для взрослого человека считается:

- АД_{сист} — от 110 до 140 мм рт. ст.;
- АД_{диаст} — от 60 до 90 мм рт. ст.

Увеличение АД выше 140/90 мм рт. ст. называется артериальной **гипертензией**, а уменьшение ниже 110/60 мм рт. ст. — **гипотензией**.

Оптимальным для людей любого возраста считается АД_{сист} ≤ 120 мм рт. ст. и АД_{диаст} < 80 мм рт. ст.

23. Чем отличаются понятия «гипертензия» и «гипертония»?

Гипертензия — это повышение напряжения, растяжение стенки сосуда при повышении в нем давления крови.

Гипертония — это заболевание, одной из причин которого является повышение тонуса гладких миоцитов в резистивных сосудах, приводящее к увеличению АД.

Поскольку гипертонус гладкомышечных клеток сосудов является очень важной, но не единственной причиной повышения АД, как правило, для обозначения этого состояния используют термин **артериальная гипертензия**.

24. Перечислите методы измерения кровяного давления. В чем заключаются их преимущества и недостатки?

Прямой (инвазивный, кровавый) метод — измерение кровяного давления путем введения катетера с датчиком давления непосредственно в просвет сосуда. Данный метод является наиболее точным и дает возможность наблюдать изменения кровяного давления в режиме реального времени. Существенным недостатком этого метода является его инвазивность и высокий риск различных осложнений (кровотечение, инфицирование, тромбообразование и т. д.).

Непрямые методы следующие:

1) пальпаторный по Рива-Роччи. В манжету, наложенную на плечо на 2 см выше локтевого сгиба, нагнетается воздух до уровня, на 30–40 мм рт. ст. превышающего давление, при котором исчезает пульсация в пальпируемой лучевой артерии. Продолжая пальпировать артерию, выпускают воздух из манжеты до появления пульсации. Давление в манжете в этот мо-

мент соответствует АД_{сисст.} Недостатком метода является то, что он не позволяет определить АД_{диаст.};

2) аускультативный по Короткову (рис. 2). Это наиболее распространенный метод. Он считается золотым стандартом неинвазивного определения АД. Методика аналогична пальпаторному методу, но основана на выслушивании тонов в плечевой артерии над локтевой ямкой с помощью стетоскопа. При снижении давления в манжете наступает момент, когда оно становится ниже АД_{сисст.}, но еще выше, чем АД_{диаст.}. В этот миг по артерии временно восстанавливается турбулентный ток крови и возникает звук (тон Короткова), давление в манжете соответствует АД_{сисст.}. При дальнейшем снижении давления в манжете в артерии постепенно восстанавливается ламинарный ток крови, и в тот момент, когда давление в манжете становится равным АД_{диаст.}, тоны Короткова исчезают;

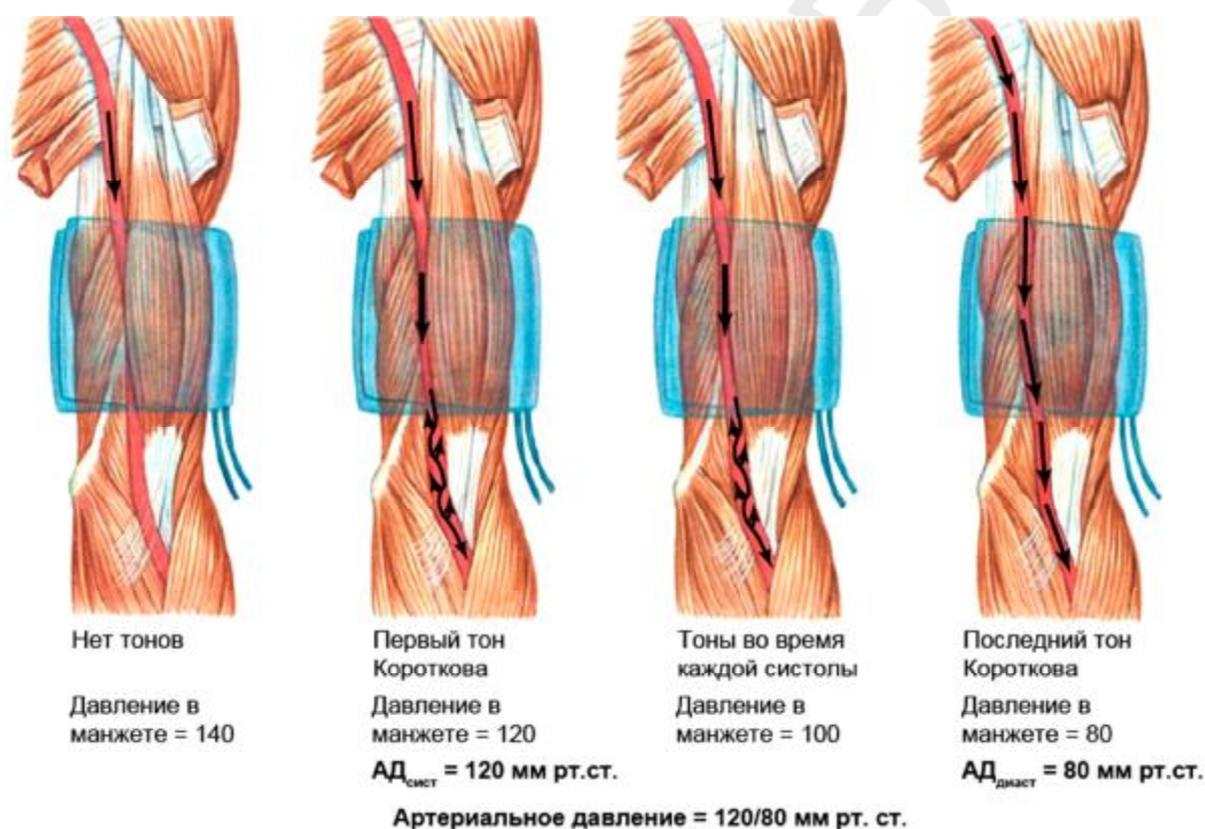


Рис. 2. Кровоток в плечевой артерии и тоны Короткова во время измерения АД (S. Fox, 2011)

3) осциллометрический. По этой методике снижение давления в окклюзионной манжете осуществляется ступенчато, и на каждой ступени анализируется амплитуда микропульсаций давления в манжете, возникающая при передаче на нее пульсации артерий. Когда давление в манжете превышает АД_{сисст.}, артерия сжата до полной ее непроходимости, и осцилляции, записываемые прибором, будут едва заметными (рис. 3). При постепенном снижении давления в манжете в один из моментов амплитуда

пульсации возрастает скачкообразно, что соответствует АД_{сист}, а потом продолжает плавно нарастать до достижения максимальной величины — АД_{срд}. После этого амплитуда пульсаций быстро уменьшается. Резкое ослабление пульсаций соответствует АД_{диаст}.

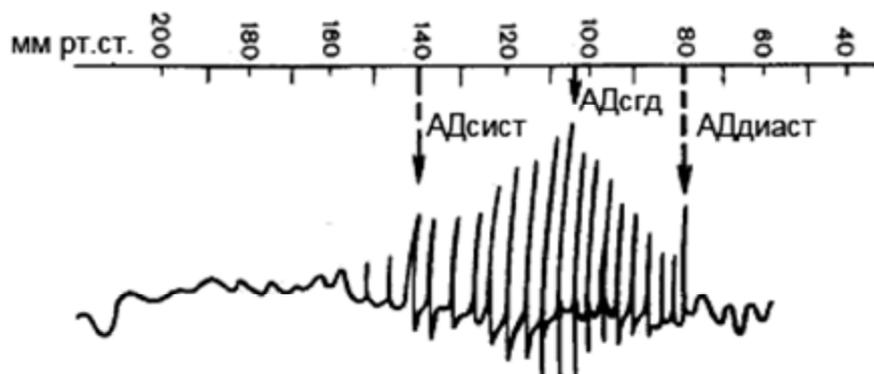


Рис. 3. Артериальная осциллограмма

Непрямые методы измерения АД легко выполнимы, достаточно точны и безопасны. Но следует помнить, что для правильного измерения АД манжета должна располагаться на уровне сердца, на точность измерения влияют посторонние шумы, движения руки, точность расположения головки стетоскопа над артерией, наличие одежды и другие факторы. Для правильного измерения АД необходимо строго соблюдать стандартные требования Всемирной организации здравоохранения к данной процедуре.

25. Как изменяется кровяное давление в различных отделах сосудистого русла?

Поскольку движение крови невозможно при отсутствии градиента давления или против него, кровяное давление постепенно снижается от желудочков к крупным венам. Наиболее быстрое снижение давления и переход от пульсирующего к равномерному току крови наблюдается в сосудах мышечного типа — мелких артериях и артериолах.

В положении лежа в большом круге кровообращения среднее гидродинамическое давление крови составляет:

- в аорте и крупных артериях — ≈ 100 мм рт. ст.;
- в мелких артериях и артериолах — 80–35 мм рт. ст.;
- на артериальном конце капилляра — 30–35 мм рт. ст.;
- на венозном конце капилляра — 15–20 мм рт. ст.;
- в венулах и мелких венах — < 15 мм рт. ст.;
- в крупных венах — < 10 мм рт. ст.

В легочной артерии систолическое давление в норме колеблется в пределах 15–28 мм рт. ст., диастолическое — 4–12 мм рт. ст., среднее гемодинамическое — 9–18 мм рт. ст.

26. Зная, что градиент давления в сосудах большого круга кровообращения равен 100 мм рт. ст., а в сосудах малого круга — 15 мм рт. ст., объясните, почему объемный кровоток в сосудах большого и малого кругов кровообращения одинаков.

Поскольку $Q = \frac{\Delta P}{R}$, для обеспечения равенства объемного кровотока большого и малого кругов необходима разная величина ОПС сосудов. У здорового человека ОПС сосудов малого круга, благодаря их высокой растяжимости, в 7–8 раз меньше, чем сосудов большого круга кровообращения.

27. Как гравитация влияет на кровоток?

При погружении датчика давления в воду на каждые 13,6 см регистрируется увеличение давления на 1 мм рт. ст. Это дополнительное давление возникает за счет веса воды, его называют **гидростатическим давлением**.

Гидростатическое давление существует и в сосудистой системе человека благодаря весу крови. У стоящего человека давление в правом предсердии в среднем можно считать равным 0 мм рт. ст., а давление в венах стопы у взрослого человека, стоящего неподвижно, дополнительно увеличивается примерно на 90 мм рт. ст. благодаря весу крови, находящейся в венах между стопой и сердцем. Аналогично изменяется давление и в артериях, капиллярах. При этом кровяное давление в других участках сосудистой системы устанавливается пропорционально уровню между 0 и 90 мм рт. ст. В сосудах, расположенных выше уровня сердца, давление, наоборот, снижается. Поэтому, когда говорят о кровяном давлении, подразумевают давление на уровне сердца (рис. 4).

Каждый раз, когда мы переходим в вертикальное положение, в сосудах нижних конечностей повышается давление и начинает депонироваться кровь. Это может привести к существенному увеличению давления в капиллярах, что проявится в выходе воды из сосудистого русла в окружающие ткани (рис. 4, а). В результате нижние конечности отекут, а ОЦК значительно уменьшится, что может привести к быстрому снижению АД и потере сознания (например, у солдат, в течение 15–30 мин неподвижно стоящих по стойке «смирно»).

Предотвратить это помогает несколько механизмов. Во-первых, при снижении АД в крупных сосудах повышается тонус симпатической нервной системы, что приводит к сужению резистивных сосудов и уменьшению притока крови к капиллярам (а также увеличению венозного возврата). В результате давление в капиллярах снижается и скорость выхода жидкости в ткани замедляется (рис. 4, б).

Во-вторых, значимым защитным механизмом является работа мышечного насоса и наличие клапанов в венах, которые расположены таким образом, что движение крови направлено к сердцу и от поверхностных вен к глубоким. При сокращении мышц нижних конечностей происходит сдавление вен, и кровь перемещается по направлению к сердцу. В результате давление в венах и капиллярах значительно снижается (рис. 4, в, г). Однако при длительном повышении венозного давления (у людей, вынужденных длительно стоять без движения или много сидеть, при повышении внутрибрюшного давления, например, у беременных или при асците) наблюдается перерастяжение вен, что может привести к несостоятельности венозных клапанов. В этом

случае мышечный насос становится неэффективным, давление в венах еще больше увеличивается и развивается варикозное расширение вен, при котором под кожей ног становятся видны большие выбухающие венозные узлы.

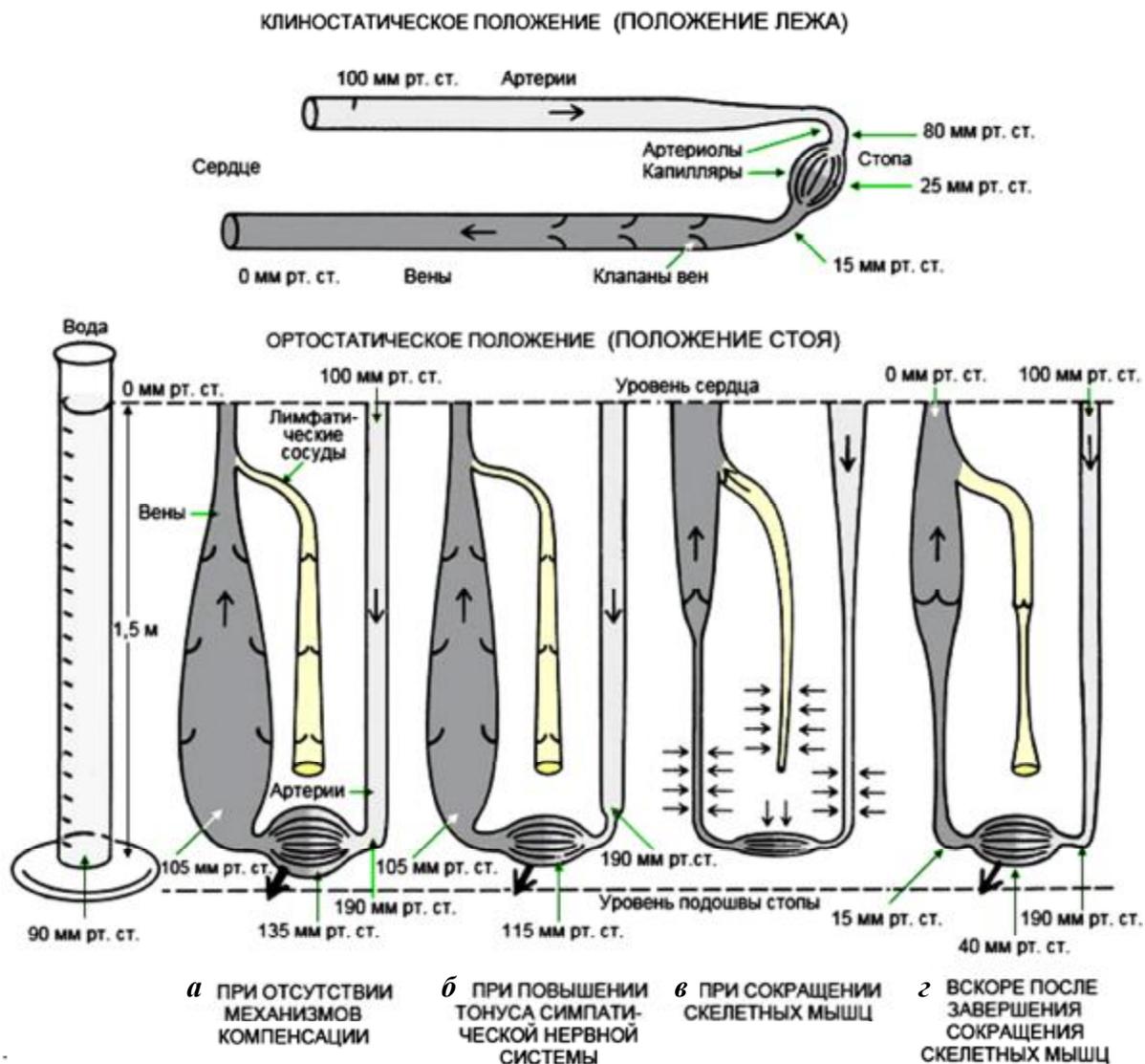


Рис. 4. Показатели гемодинамики при изменении положения тела в пространстве (D. E. Mohrman, L. J. Heller, 2010)

В сосудах, расположенных выше уровня сердца, давление крови постепенно уменьшается, в венах головы и шеи оно может становиться ниже атмосферного — отрицательным (этого не происходит в сосудах головного мозга вследствие наличия в них механизмов регуляции собственного тонуса).

28. Чем опасно повреждение вен шеи, венозных синусов твердой мозговой оболочки, кроме кровопотери?

Вследствие того, что вены шеи располагаются выше уровня сердца, давление в них близко к нулю, во время вдоха оно может стать даже отри-

цательным (ниже атмосферного). Поэтому при их повреждении возможно попадание в кровоток пузырьков воздуха и закупоривание ими полостей сердца или мелких сосудов большого круга кровообращения, в т. ч. коронарных и церебральных (так называемая **воздушная эмболия**).

Препятствует попаданию воздуха в вены шеи то, что они могут спадаться под действием внешнего атмосферного давления. Очень опасно повреждение венозных синусов твердой мозговой оболочки при травмах или во время хирургической операции, поскольку они плотно сращены с твердой мозговой оболочкой и не спадаются, несмотря на то, что давление в их просвете ниже атмосферного (отрицательное).

29. Графически изобразите изменения линейной и объемной скорости кровотока, давления крови в различных отделах сосудистого русла.

Основные показатели гемодинамики в различных отделах сосудистого русла отражены на рис. 5.

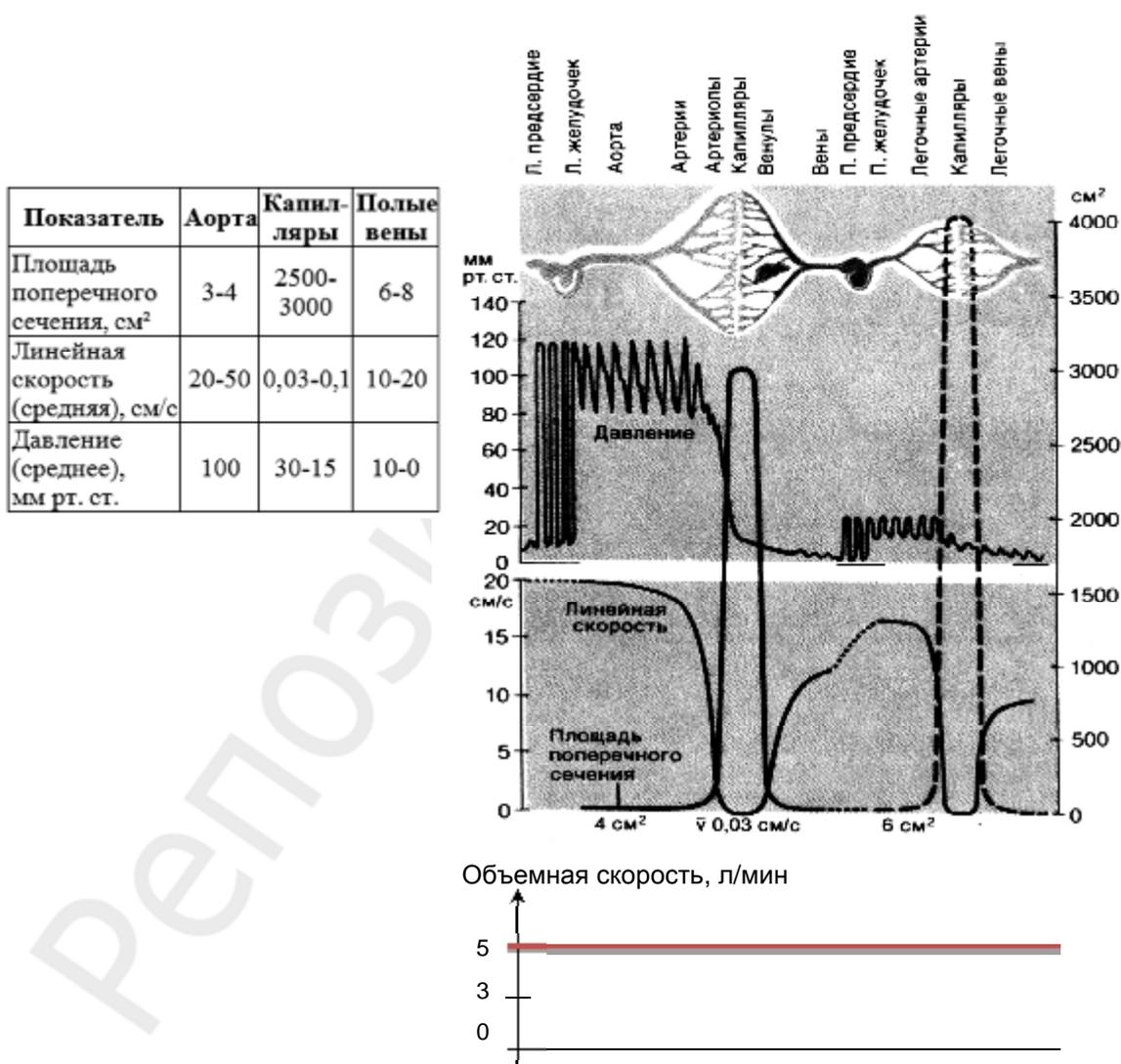


Рис. 5. Основные показатели гемодинамики в различных отделах сосудистого русла

30. Что такое центральное венозное давление? Назовите его нормальную величину.

Центральное венозное давление — это давление крови в наполненном правом предсердии и в полых венах в этот момент. В норме оно составляет 30–120 мм вод. ст.

31. Когда наблюдается повышение, снижение ЦВД?

ЦВД изменяется в течение дня. Оно несколько меньше с утра, а к вечеру может увеличиться на 10–30 мм вод. ст.

Величина ЦВД в целом зависит от соотношения величин венозного возврата и оттока крови от сердца.

Повышение ЦВД наблюдается:

1) при увеличении венозного возврата (веноконстрикция, гиперволемия при переливании больших объемов кровезамещающих растворов или нарушении работы почек, горизонтальное положение тела). В пределах нормальных значений ЦВД это приводит к улучшению наполнения желудочков кровью, увеличению их УО и возрастанию МОК;

2) при нарушении оттока крови от сердца (возрастание ОПС, регургитация крови при неполном смыкании клапанов, снижение сократимости миокарда при сердечной недостаточности или аритмии). Затруднение венозного возврата приводит к полнокровию и увеличению внутренних органов (в первую очередь печени), высокому риску тромбообразования в венах и формированию отеков. Особенно опасен отек легких, который может привести к гибели человека.

Снижение ЦВД может наблюдаться при гиповолемии, венодилатации, уменьшении ОПС, увеличении сократительной способности сердца.

32. Что такое флебограмма, венный пульс?

Флебограмма — это графическая запись пульсации стенок крупных вен грудной полости и шеи (обычно яремных), которая вызывается сокращениями предсердий и желудочков.

Венный пульс — это ритмические колебания объема и давления крови в венах, обусловленные влиянием сокращений предсердий и желудочков на кровоток в полых венах.

Венный пульс возникает потому, что между предсердиями и полыми венами отсутствуют клапаны и выраженные сфинктеры. В результате изменение давления в предсердиях ретроградно передается на крупные вены, прилежащие к сердцу.

33. Что такое артериальный пульс?

Артериальный пульс — ритмические колебания стенки артерии, обусловленные выбросом крови из сердца в артериальную систему и изменением в ней давления в течение систолы и диастолы левого желудочка.

34. Назовите клинико-физиологические характеристики артериального пульса.

Ритм отражает периодичность следования пульсовых колебаний друг за другом и периодичность сокращений сердца. Пульс ритмичен, если между пульсовыми волнами имеются равные интервалы. В норме может выявляться дыхательная аритмия (чаще у молодых): частота повышается на вдохе и понижается на выдохе, когда повышается тонус блуждающего нерва.

Частота пульса — количество пульсовых ударов за 1 мин. Нормальная частота пульса (нормокардия) — 60–80 в 1 мин, брадикардия — < 60 в 1 мин, тахикардия — > 80–90 в 1 мин.

Наполнение (амплитуда) пульса — субъективный показатель, который оценивается пальпаторно по высоте подъема артериальной стенки во время систолы сердца. Зависит от АД_{пульс}, УО, МОК, эластичности стенок артерий.

Напряжение пульса — субъективный показатель, который оценивается по величине силы надавливания на артерию, необходимой для исчезновения пульсации дистальнее места прижатия. Зависит от АД_{срд} и АД_{сисст}.

Скорость пульса (v) определяется по скорости достижения артериальной стенкой максимальной амплитуды колебаний, т. е. от крутизны анакроты. Скорость пульса зависит от скорости прироста давления в артериях в течение систолы.

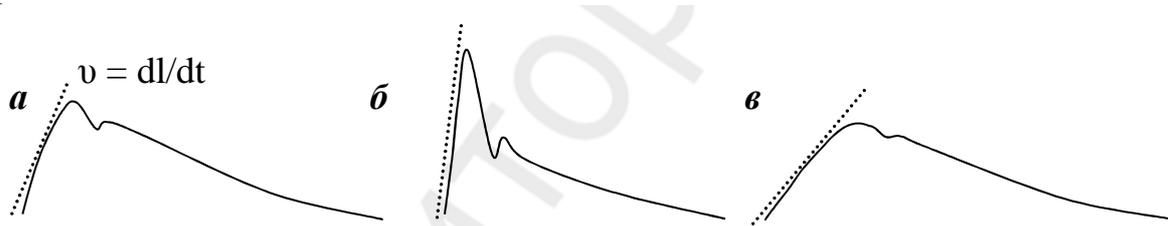


Рис. 6. Определение скорости пульса по сфигмограмме (dl/dt — изменение диаметра артерии за единицу времени):

а — скорость пульса в норме; *б* — при недостаточности аортального клапана; *в* — при коарктации аорты

Скорость пульса может изменяться при различных заболеваниях. Например, она увеличивается при недостаточности аортального клапана и снижается при затруднении оттока крови из желудочков (коарктация аорты, стеноз аортального клапана и т. д.)

35. Всегда ли частота пульса совпадает с частотой сердечных сокращений (ЧСС)?

Частота пульса может быть меньше ЧСС при нарушениях ритма сердца (аритмиях), когда не каждая волна деполяризации кардиомиоцитов сопровождается сердечным выбросом (экстрасистолия, мерцательная аритмия и др.).

36. Что такое сфигмография?

Сфигмография — это метод графической записи пульсации крупных артерий (обычно сонных, подключичных, бедренных, плечевых, лучевых). Получаемую при этом кривую называют **сфигмограммой**.

37. Нарисуйте сфигмограмму, обозначьте ее компоненты и объясните их происхождение с учетом структуры сердечного цикла.

Сфигмограмма изображена на рис. 7.

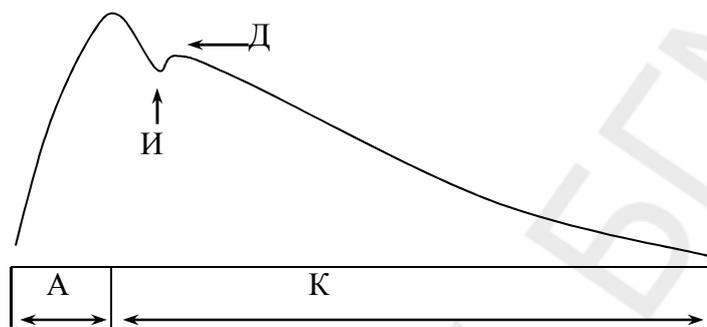


Рис. 7. Сфигмограмма

А — анакрота, отражающая растяжение стенки артерии кровью, выбрасываемой сердцем в фазу быстрого изгнания крови из желудочков.

К — катакрота — нисходящая часть сфигмограммы, отражающая восстановление исходного размера артерий. Она соответствует фазе медленного изгнания (от вершины до инцизуры), периоду расслабления и наполнения желудочков.

Время от начала анакроты до инцизуры соответствует периоду изгнания.

И — инцизура — быстрое падение давления, обусловленное антеро- и ретроградным оттоком крови из аорты.

Д — дикротический зубец, отражающий растяжение стенки артерий объемом крови, отраженным от полулунных клапанов в диастолу.

38. Какой станет скорость пульса при увеличении сократимости миокарда?

Один из показателей сократимости миокарда — скорость прироста давления в левом желудочке в фазу изометрического сокращения: $v = dP/dt$. Следовательно, при увеличении сократимости скорость пульса возрастет.

39. Объясните, в чем разница между понятиями «скорость пульса», «скорость распространения пульсовой волны» и «линейная скорость кровотока».

Скорость пульса — это скорость увеличения диаметра артерии во время изгнания крови из желудочков сердца.

Скорость распространения пульсовой волны — это скорость распространения колебаний стенки сосуда по его длине (чем меньше эластичность сосуда, тем она выше). В норме в аорте она равна 4–6 м/с, в лучевой артерии — 8–12 м/с.

Линейная скорость кровотока — средняя скорость движения частиц крови в сосуде (аорта — ~20–50 см/с, лучевая артерия — 10–15 см/с, капилляр — 0,3–1,0 мм/с).

40. Что такое плетизмография?

Плетизмография — метод регистрации изменения объема органа или части тела, вызванного изменениями его кровенаполнения, зависящими от тонуса артериол. Таким образом, плетизмография применяется в основном для оценки сосудистого тонуса. Наиболее часто используется механическая плетизмография, фотоплетизмография и электроплетизмография (см. ниже «реография»). Их кривые по форме напоминают кривую сфигмограммы (см. рис. 7).

При механической плетизмографии исследуемую конечность или ее часть герметизируют в специальном сосуде (рецепторе), заполненном водой или воздухом. Колебания объема при этом с помощью датчика превращаются в электрические колебания и записываются регистратором (например, электрокардиографом).

При фотоплетизмографии пульсовые колебания кровотока регистрируются по изменению оптической плотности тканей (обычно пальца или мочки уха) в проходящем или отраженном свете.

41. Что такое реография, реограмма? Какие показатели работы сердечно-сосудистой системы она позволяет оценить?

Реография — неинвазивный метод исследования кровоснабжения органов, в основе которого лежит регистрация изменений электрического сопротивления тканей в зависимости от изменения их кровенаполнения.

Реограмма — это кривая, отражающая пульсовые колебания электрического сопротивления тканей. При увеличении кровенаполнения их сопротивление уменьшается и наблюдается увеличение амплитуды реографической кривой и наоборот.

Принципиальной основой метода реографии является зависимость изменений сопротивления от изменений кровенаполнения в изучаемом участке тела человека. Для получения реограммы через тело пациента пропускают переменный ток частотой 50–100 кГц малой силы (не более 10 мкА), создаваемый специальным генератором. В качестве калибровочного сигнала принимают 1 Ом, вызывающий отклонение пера самописца на 10 мм.

Различают реографию сосудов мозга (реоэнцефалография), конечностей (реовазография), глаза (реоокулограмма), легких и др.

По форме реограмма практически совпадает со сфигмограммой (см. рис. 7). На реограмме различают систолическую (от начала анакроты до инцизуры) и диастолическую (дикротический зубец и дистальный участок катакроты) части. Считают, что первая обусловлена притоком крови, вторая связана с венозным оттоком.

По данным реограммы можно определить величину и скорость притока (оттока) крови (по отношению амплитуды систолической или диастолической волны к калибровочному сигналу), объемного кровотока в исследуемой области, оценить величину УО, МОК, оценить эластичность и тонус сосудов разного диаметра.

Изменения реограммы различных сосудистых областей характеризуются однотипностью. Так, при *при уменьшении кровенаполнения какой-либо области* (гиповолемии) наблюдается снижение амплитуды и уплощение вершины систолической части, уменьшение скорости подъема анакроты реограммы.

Для *повышения тонуса сосудов* характерно уменьшение амплитуды и увеличение продолжительности систолической части, закругленность ее вершины, высокое расположение инцизуры и увеличение амплитуды дикротического зубца, который становится практически равным по высоте анакроте.

При *снижении тонуса сосудов* амплитуда систолической части увеличивается, скорость подъема анакроты повышается, ее вершина заостряется, после чего следуют быстрый спад и низко расположенная инцизура.

Увеличение кровенаполнения какой-либо сосудистой области (гиперволемиа) характеризуется увеличением амплитуды и заострением вершины систолической части реограммы, плохо выраженной инцизурой и низким расположением дикротического зубца.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. *Физиология человека* : учеб. пособие : в 2 ч. / под ред. А. И. Кубарко. Минск : Выш. шк., 2011. Ч. 2. 623 с.
2. *Физиология человека* : учеб. / под ред. В. М. Смирнова. М. : Медицина, 2002. 608 с.
3. *Физиология человека* : учеб. / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Медицина, 2003. 656 с.
4. *Физиология человека* : учеб. : в 2 т. / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. М. : Медицина, 1998. Т. 1. 448 с.

Дополнительная

1. *Нормальная физиология* : учеб. / под ред. А. В. Завьялова, В. М. Смирнова. М. : МЕДпресс-информ, 2009. 816 с.
2. *Основы физиологии человека* : учеб. : в 2 т. / под ред. Б. И. Ткаченко. СПб., 1994. Т. 1. 567 с.
3. *Физиология человека* : в 3 т. : пер. с англ. / под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса. М. : Мир, 1996. Т. 2. 313 с.
4. *Физиология человека* : учеб. / под ред. Г. И. Косицкого. М. : Медицина, 1985. 544 с.
5. *Нормальная физиология. Краткий курс* : учеб. пособие / В. В. Зинчук, О. А. Балбатун, Ю. М. Емельянчик ; под ред. В. В. Зинчука. Минск : Выш. шк., 2010. 431 с.
6. *Морман, Д. Физиология сердечно-сосудистой системы* / Д. Морман, Л. Хеллер. СПб. : Питер, 2000. 256 с.
7. *Болезни сердца и сосудов* : рук. для врачей : в 4 т. / под ред. Е. И. Чазова. М. : Медицина, 1992. Т. 1. 496 с.
8. *Ройтберг, Г. Е. Внутренние болезни. Лабораторная и инструментальная диагностика* / Г. Е. Ройтберг, А. В. Струтынский. М. : МЕДпресс-Информ, 2011. 816 с.

Учебное издание

Кубарко Алексей Иванович
Александров Денис Александрович
Башаркевич Наталья Александровна

ГЕМОДИНАМИКА. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРОВООБРАЩЕНИЯ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск А. И. Кубарко
Редактор О. В. Лавникович
Компьютерная верстка Н. М. Федорцовой

Подписано в печать 31.05.12. Формат 60×84/16. Бумага писчая «Снегурочка».
Печать офсетная. Гарнитура «Times».
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 120 экз. Заказ 590.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет».
ЛИ № 02330/0494330 от 16.03.2009
ЛП № 02330/0150484 от 25.02.2009.
Ул. Ленинградская, 6, 220006, г. Минск.