

**ФГБОУ ВО «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра нормальной физиологии**

**Учебно-методическое пособие к практическим занятиям**

**по теме**

**Основные гемодинамические показатели определяющие уровень  
артериального давления.**

**Физические основы клинического метода измерения давления крови.**

## Основные гемодинамические показатели определяющие уровень артериального давления.

### Физические основы клинического метода измерения давления крови.

#### Цель работы.

1. Ознакомиться с моделями системы кровообращения.
2. Изучить основные показатели функционального состояния сердечно-сосудистой системы.
3. Освоить метод Старра для определения ударного и минутного объема крови.
4. Изучить методику измерения артериального давления крови.

#### Краткая теория

Гемодинамика – область биомеханики, изучающая движение крови по сосудистой системе.

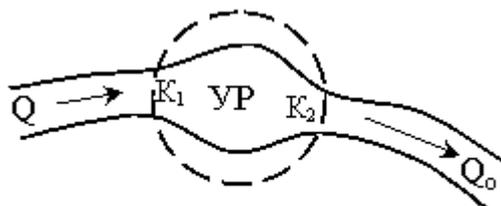


Рис. 1

#### 1. Физическая модель системы кровообращения

Сердечно-сосудистая система в организме человека и животных представлена сердцем, кровеносными сосудами и лимфатическими сосудами.

Физическую модель сердечно-сосудистой системы можно представить в виде замкнутой, многократно разветвленной и заполненной

жидкостью системы трубок с эластичными стенками. Движение жидкости происходит под действием ритмически работающего нагнетательного насоса – сердца. В наиболее простой гидродинамической модели кровеносной системы, предложенной О.Франком, артериальная часть моделируется в виде упругого резервуара (УР). Эта модель представлена на рис.1. Кровь из сердца поступает в УР (артерии) через отверстие  $K_1$ . При сжатии упругого резервуара содержащийся в нем объем крови проталкивается через отверстие  $K_2$  в периферическую систему сосудов, вызывая в них продвижение крови.

Периферическая система (артериолы, капилляры) представляет постоянное и многократное разветвление большого числа трубок, особенно в ее средней части, общий просвет которых имеет настолько большое сечение, что скорость жидкости здесь снижается почти до нуля. Однако внутреннее трение в пристеночных слоях этих трубок настолько велико, что именно эта часть системы представляет наибольшее сопротивление течению жидкости и обуславливает максимальное падение давления.

Физическая модель сердечно-сосудистой системы позволяет установить связь между ударным объемом крови (объем крови, выбрасываемой желудочком сердца за одну систолу), гидравлическим сопротивлением периферийной части системы кровообращения и изменения давления в артериях.

Так как кровь находится в УР, то ее объем  $V$  в любой момент времени зависит от давления ( $p$ ) следующим образом:

$V = V_0 + kp$ , (1) где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависит от эластичности упругого резервуара;  $V_0$  – объем резервуара при отсутствии давления ( $p = 0$ ).

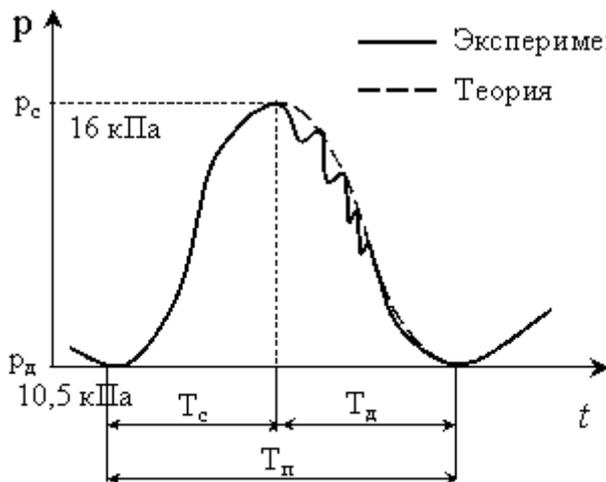


Рис. 2

Продифференцировав по времени уравнение (1), получим

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(V_0 + kp)}{dt} = k \frac{dp}{dt}. \quad (2)$$

Количество крови, протекающее через поперечное сечение сосуда за единицу времени, называется *объемной скоростью кровотока*. Пусть  $Q$  – объемная скорость кровотока, поступающего в УР.  $Q_0$  – объемная скорость кровотока, выходящего из УР в периферическую систему. Если предположить, что гидравлическое сопротивление

периферической системы постоянно, тогда можем записать:

$$Q = Q_0 + \frac{dV}{dt} = Q_0 + k \frac{dp}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение (3) указывает, что объемная скорость кровотока из сердца в артерии равна скорости оттока крови из УР и скорости возрастания объема УР.

Используя *уравнение Пуазейля* для периферической системы, можем записать

$$Q = \frac{p - p_e}{\mathcal{Z}_0} = \frac{p}{\mathcal{Z}_0}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{Z}_0 = \frac{8\eta\ell}{\pi R^4}$  – гидравлическое сопротивление периферической системы;

$\eta$  – вязкость крови;  $\ell$  – длина сосудов;  $R$  – радиус сосуда;  $p$  – давление в упругом резервуаре;  $p_e$  – венозное давление, которое может быть принято равным нулю.

Давление  $p$  в упругом резервуаре УР за время сердечного сокращения изменяется от максимального до минимального. Максимальное давление называется *систолическим*  $p_c$ , а минимальное – *диастолическим*  $p_d$ .

Экспериментальная кривая зависимости давления от времени в сонной артерии приведена на рис. 2. На рисунке показана длительность систолы  $T_c$  и диастолы  $T_d$ , период пульса  $T_n$ , диастолическое (минимальное) давление  $p_d$ , систолическое (максимальное) давление  $p_c$ .

## 2. Пульсовая волна

При сокращении сердца (систола) кровь выбрасывается из сердца в аорту и отходящие от нее артерии. Особенностью системы кровообращения является эластичность стенок сосудов. Если бы стенки кровеносных сосудов были жесткими, то давление, возникающее в крови на выходе из сердца, со скоростью звука передалось бы к периферийным сосудам. Эластичность стенок сосудов приводит к тому, что во время систолы кровь выталкивается сердцем, растягивая аорту, то есть крупные сосуды воспринимают за время систолы больше крови, чем ее отток к периферии. Систолическое давление человека в норме равно приблизительно 16 кПа ( $16 \cdot 10^3$  Па). Во время расслабления сердца (диастола) растянутые кровеносные сосуды сокращаются, и потенциальная энергия этих сосудов переходит в кинетическую энергию крови, которая начинает двигаться в сосудах с некоторой скоростью. При этом поддерживается диастолическое давление, примерно равное 11 кПа.

Волна повышенного давления, распространяющаяся по аорте и артериям во время систолы, называется *пульсовой волной*. Скорость пульсовой волны можно оценить по формуле Моенса–Кортевега:

$$V = \sqrt{\frac{E \cdot a}{2\rho R}}$$

где  $E$  – модуль упругости сосудов;  $\rho$  – плотность вещества сосуда;  $a$  – толщина сосуда;  $R$  – радиус сосуда.

Интересно отметить, что у человека с возрастом модуль упругости возрастает, поэтому становится больше и скорость пульсовой волны.

Пульсовая волна распространяется со скоростью 5–10 м/с, поэтому за время систолы ( $T_c \sim 0,3$  с) она должна пройти расстояние от сердца до конечностей. Это означает, что фронт пульсовой волны достигает конечностей раньше, чем начнется диастола. Пульсовой волне соответствует пульсирование скорости кровотока в крупных артериях, однако скорость крови существенно меньше скорости распространения пульсовой волны и, примерно, равна 0,3–0,5 м/с. При этом ток крови принимает непрерывный характер.

При таком механизме продвижения крови только часть энергии, развиваемой мышцей при сокращении, передается непосредственно крови в аорте и переходит в ее кинетическую энергию. Остальная часть энергии переходит в потенциальную энергию растяжения эластичных стенок крупных сосудов и затем уже по мере возвращения их в исходное состояние эта энергия передается крови в период диастолы. Этим и объясняется непрерывный характер тока крови.

На рис. 3 приведены графики изменения давления и скорости движения крови в основных

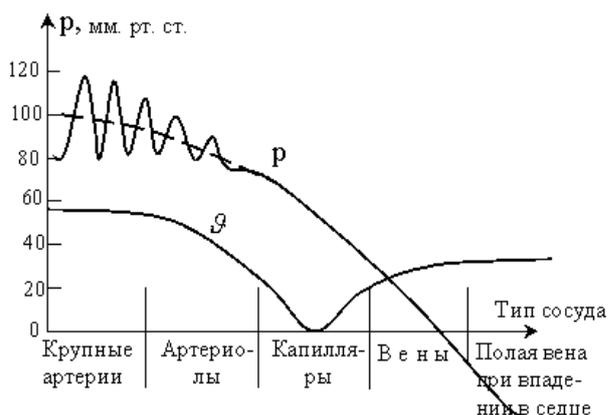


Рис. 3

частях сосудистой системы. Давление ( $p$ ) – это избыточное давление над атмосферным.

Движение крови по сосудам, особенно распределение ее между различными частями кровеносной системы, зависит не только от работы сердца, но и от общего просвета сосудов. В эластичных стенках сосуда имеются гладкие мышечные волокна, от

степени сокращения которых зависит просвет сосуда.

Имеет значение также общее количество циркулирующей крови и ее вязкость. Все эти факторы находятся под регулирующим влиянием центральной нервной системы. Таким образом, физиологические факторы, накладываясь на физические закономерности, регулируют кровообращение в различных участках.

### 3. Основные гемодинамические показатели определяющие уровень артериального давления.

*Систолическое артериальное давление (САД)* представляет собой максимальное давление в левом желудочке и в аорте во время систолы.

Величина САД обусловлена минутным объемом (МОК) крови, эластичностью миокарда и аорты. МОК – расчетная величина – произведение ударного объема (УО) и частоты сердечных сокращений (ЧСС). Следовательно, увеличение УО, объема циркулирующей крови (ОЦК), тахикардия, снижение эластичности аорты приведет к росту САД.

Увеличение УО и ОЦК наблюдается при задержке жидкости вследствие задержки натрия в организме при снижении экскреторной функции почек, хронической сердечной недостаточности, при атеросклерозе аорты, воспалительных заболеваниях аорты (аортиты).

*Диастолическое артериальное давление (ДАД)* – это самое низкое АД в аорте в конце диастолы. ДАД зависит, в основном, от периферического сопротивления артериол.

*Пульсовое АД (АДп)* — это разность между систолическим и диастолическим АД.

*Среднее АД (АДср)* — это результирующая всех переменных значений АД на протяжении сердечного цикла, вычисленная путем интегрирования кривой пульсового колебания давления во времени.

В клинике среднее АД для *периферических артерий* принято вычислять по формуле:

$$АД_{ср} = ДАД + \frac{(САД - ДАД)}{3}$$

Среднее АД является важнейшей интегральной гемодинамической характеристикой системы кровообращения. Это та средняя величина давления, которая была бы способна *при отсутствии пульсовых колебаний давления* дать такой же гемодинамический эффект, какой наблюдается при естественном, колеблющемся движении крови в крупных артериях.

*Общее периферическое сосудистое сопротивление (ОПСС)* - сопротивление в большом круге кровообращения, создаваемое артериолами потоку крови. ОПСС создает силу, которую должна преодолеть сокращающаяся мышца сердца.

Изменение ОПСС в ту или другую сторону сопровождается соответствующим (но противоположным) изменением сердечного выброса и ОЦК. Например, при повышении АД за счет возрастания ОПСС увеличивается натрийурез и диурез и уменьшается ОЦК, что в физиологических условиях влечет за собой восстановление оптимального уровня АД.

Уровень *артериального давления (АД)*, определяется **тремя основными гемодинамическими показателями:**

1. Величиной сердечного выброса, который в свою очередь зависит от сократимости миокарда левого желудочка, частоты сердечных сокращений (ЧСС), минутного объема (МОК) и других факторов.
2. Величиной общего периферического сопротивления (ОПСС), зависящей от тонуса сосудов мышечного типа (артериол), выраженности структурных изменений их сосудистой стенки, жесткости артерий эластического типа (крупных и средних артерий, аорты), вязкости крови и других параметров.

### 3. Объемом циркулирующей крови (ОЦК).

В норме при повышении сердечного выброса снижается ОПСС, в частности, за счет уменьшения тонуса артерий мышечного типа. Наоборот, падение сердечного выброса сопровождается некоторым возрастанием ОПСС, что препятствует критическому снижению АД. Тот же эффект может быть достигнут за счет уменьшения натрийуреза и диуреза (задержка  $\text{Na}^+$  и воды в организме) и увеличения ОЦК.

При нарушении соотношения трех описанных гемодинамических показателей (МОК, ОПСС и ОЦК) возможно формирование артериальной гипертонии (АГ).

С точки зрения различий центральной гемодинамики выделяются следующие варианты формирования АГ:

1. АГ, обусловленная стойким повышением сердечного выброса, не сопровождающимся адекватным уменьшением ОПСС и ОЦК (например, за счет уменьшения сосудистого тонуса).
2. АГ, вызванная преимущественным увеличением ОПСС без соответствующего снижения МОК и ОЦК.
3. АГ, формирующаяся на фоне одновременного увеличения МО и ОПСС без адекватного снижения ОЦК (отсутствие адекватного увеличения натрийуреза).
4. АГ, обусловленная преимущественным увеличением ОЦК, связанным с резким уменьшением натрийуреза и диуреза (задержка натрия и воды в организме).

Современная терапия гипертонических кризов проводится с учетом типов гемодинамики.

С помощью интегральной реографии определяют **типы гемодинамики**:

Гиперкинетический тип гемодинамики характеризуется увеличением ЧСС, МОК, УО, АД при нормальном или сниженном ОПСС.

Гипокинетический тип гемодинамики характеризуется значительным повышением ОПСС и срАД при нормальной ЧСС и сниженных показателях УО, МОК.

Эукинетический тип гемодинамики характеризуется малоизмененными МО, УО, ЧСС, при увеличенном ОПСС.

Ведение больных в клиниках неотложной кардиологии предполагает постоянный контроль объемных параметров центральной гемодинамики, что имеет несомненное значение для правильной диагностики и контроля над адекватностью проводимой терапии.

### 4. Физические основы клинического метода измерения давления крови

Знание давления крови играет важную роль при диагностике многих заболеваний и контроле за эффективностью проводимого лечения. В медицине широко используется

бескоротковый метод, предложенный Н.С.Коротковым. Он заключается в том, что измеряют давление, которое необходимо приложить снаружи, чтобы сжать артерию до прекращения в ней тока крови. Это давление весьма близко к давлению крови в артерии. Измерение обычно производится на плечевой артерии выше локтевого сгиба (рис. 4).

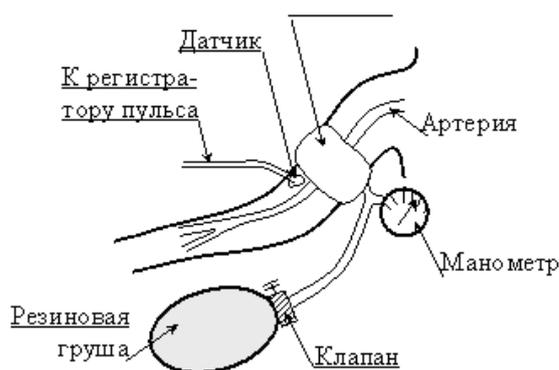


Рис. 4

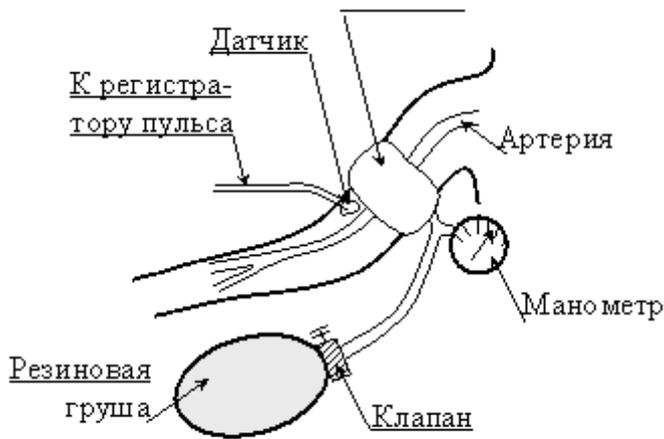


Рис. 4

Сжатие артерии осуществляется с помощью манжеты, которая представляет собой резиновую камеру в чехле из тонкого материала. Манжету обертывают вокруг руки между плечом и локтем. При накачивании воздуха через шланг с помощью резиновой груши давление в манжете растет. Величина давления определяется по манометру, соединенному с манжетой. В процессе накачивания воздуха в манжету следят за пульсом на лучевой артерии с помощью датчика (фонендоскоп или пьезоэлектрический преобразователь). Воздух накачивают в манжету до давления на 10–20 мм рт.ст. выше того, при котором перестает прослушиваться пульс на лучевой артерии. Затем, медленно открывая выпускной клапан резиновой груши, постепенно снижают давление в манжете, прислушиваясь к звукам в фонендоскопе (или динамике). Соотношение между изменением давления ( $p$ ) в манжете и "тонами Короткова" показано схематически на рис. 5. Пока артерия сжата полностью, никакие звуки не прослушиваются. При снижении в манжете давления начинают прослушиваться отчетливые тоны (участок *a* на рис. 5). Эти тоны обусловлены вибрацией стенок артерии непосредственно за манжетой под действием мощных толчков крови, которые проходят сквозь сжатый манжетой участок сосуда только в моменты систолы сердца. Показание манометра, соответствующее моменту появления тонов, определяет систолическое давление.

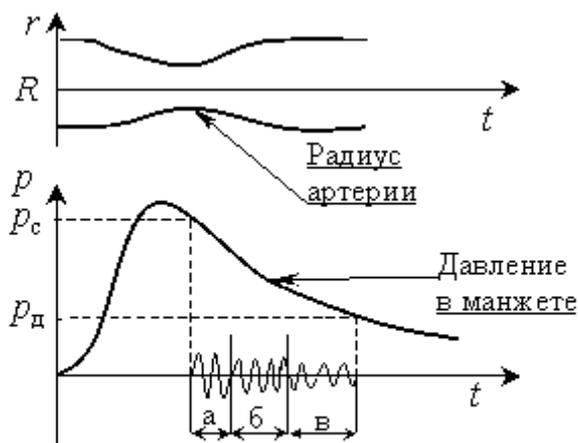


Рис. 5

При дальнейшем снижении давления в манжете тоны дополняются шумами (участок *б* на рис. 5). Эти шумы обусловлены турбулентным течением крови через частично сжатый манжетой участок артерии. Затем шумы уменьшаются и в фонендоскопе вновь прослушиваются чистые тоны (участок *в* на рис. 5). Эти тоны быстро затухают, в артерии устанавливается ламинарное течение крови. Показание манометра в момент резкого ослабления тонов соответствует диастолическому давлению.

Для здорового нормального человека  $p_c = 10\text{--}120$  мм рт.ст.,  $p_d = 70\text{--}80$  мм рт.ст.

### Метод суточного мониторинга артериального давления

Использование компьютера в сочетании с измерительной техникой в медицине позволило создать новые эффективные средства для обеспечения автоматизированного сбора и анализа информации о состоянии больного. Типичным представителем мониторинговой системы, применяемой для суточного мониторинга артериального давления, например, является система «Кардиотехника - 4000» (Санкт-Петербург).

Рассмотрим принцип действия данной мониторинговой системы. В режиме запуска электрокардиосигнал с электродов фильтруется и усиливается ЭКС-усилителем и преобразуется в цифровой код, который поступает на обработку в микроконтроллер. Микроконтроллер производит предварительную обработку электрокардиосигнала и архивирование сигнала для записи в память, которая осуществляется постоянно. После окончания времени наблюдения записанный сигнал через адаптер поступает для анализа в компьютер. Далее на мониторе или в печатном виде можно изучить результаты компьютерного анализа: таблицы, графики, заключение.

Стандартной является методика, при которой автоматическое нагнетание воздуха в манжету и декомпрессия производятся с интервалом 15 минут днем и 30 минут ночью. Однако программное обеспечение современных мониторинговых систем позволяет задать несколько периодов времени с различными интервалами регистрации (от 1 до 120 минут) в зависимости от цели исследования. В аппаратах предусмотрена возможность изменения уровня артериального давления, выше которого показатели будут считаться «нагрузочными». Если значение давления выходит за разумные пределы, прибор автоматически повторяет измерение. Нагнетание воздуха в манжету может производиться в фиксированном режиме (устанавливается жесткая максимальная граница давления в манжете) или в динамическом режиме (до уровня давления на 30 мм рт.ст. превышающее значение предыдущего измерения). Периоды дня и ночи устанавливаются индивидуально в зависимости от распорядка дня пациента.

Суточное мониторирование артериального давления (СМАД) – единственный метод обследования, который позволяет получить наиболее полную информацию об уровне и колебаниях артериального давления в течении суток, во время бодрствования и сна, выявить больных с ночной гипертонией, оценить адекватность контроля качества коррекции артериального давления в конце междозового интервала применения лекарственного препарата.

## 5. Порядок измерения давления крови

1. Предпочтительнее давление измерять на левой руке. Прежде чем надеть манжету, определите место наибольшей пульсации плечевой артерии. Чаще всего это место расположено на 3 – 5 см выше локтевого сгиба, на поверхности предплечья, обращенной к туловищу. Место, где пульс прослушивается наиболее сильно, является оптимальным для расположения датчика.
2. Положите руку пациента на стол, заверните вентиль на клапане, создайте давление в манжете на 10 – 20 мм рт.ст выше предполагаемого систолического давления.
3. Плавно откройте вентиль клапана, установите скорость снижения давления в пределах 3 – 8 мм рт.ст. в секунду и следите за показаниями манометра.
4. Запишите показания манометра при первом ( $p_c$ ) и последнем ( $p_d$ ) звуковом сигналах.

### Порядок выполнения работы.

**Упражнение 1.** Измерьте артериальное давление на левой руке пациента по методике, описанной в п. 5. Запишите результаты измерения систолического и диастолического давлений и сравните их с нормальными значениями.

**Упражнение 3.** Вычислите УО, МОК, АДср, ОПСС.

### Вопросы для самоконтроля

1. Объясните, почему в методе Короткова давление воздуха в манжете можно считать равным давлению крови в артерии.
2. Объясните, почему метод Короткова неприменим для измерения давления воды в водопроводе?
3. Объясните с физической точки зрения непрерывность кровотока в кровеносной системе.
4. Объясните (по рис. 3) зависимость давления в кровеносных сосудах от их диаметров и удалённости от сердца.
5. Объясните (по рис.4) ход выполнения измерения давления крови в артерии методом Короткова.
6. Объясните, почему давление крови в артерии левой руки больше, чем в правой.
7. Существуют ли другие методы (кроме метода Короткова) измерения давления крови?
8. В каких единицах измеряется давление в системе СИ? В каких единицах принято измерять давление крови? Какова взаимосвязь между этими единицами давления?