# Измерение артериального давления

## Общие сведения

### Основы кровообращения

Кровеносная система человека состоит из сердца и сосудистой системы, которая, в свою очередь, делится на артериальную, венозную и микроциркуляторную (капиллярную). В организме человека циркулирует около 5 литров крови, из них 75 – 80% крови находится в венах, около 20% находится в артериях, остальная кровь находится в микроциркуляторном сосудистом русле.

Сердце состоит из двух предсердий и двух желудочков. Циркуляция крови в системе кровообращения происходит в результате импульсов, создаваемых при сокращении мускулатуры сердца (прежде всего желудочков). Правая половина сердца (предсердие и желудочек) представляет собой насос для перекачки крови через легочные сосуды, составляющие т. н. малый круг кровообращения. Левая половина сердца снабжает кровью все остальные органы человека по большому (системному) кругу кровообращения. Само сердце снабжаются кровью по коронарным сосудам, которые окружают его подобно короне. (Коронарные артерии являются ветвью большого круга кровообращения, однако коронарные вены впадают не только в правый, но и в левый желудочек – подобно венам малого круга.)

Производительность работы желудочка сердца определяется величиной кровотока, то есть объемом крови, прокачиваемым через желудочек в единицу времени. Для обеих половин сердца кровоток, как правило, совпадает.

Цикл работы сердца разделяется на две основные части: систолу и диастолу. Систола определяется как период сокращения сердечных мышц, особенно мышц желудочков, во время которого кровь выталкивается в легочную артерию и в аорту. Диастола — это период расслабления и расширения полостей сердца, во время которого они заполняются кровью. Систолическое (наивысшее) давление крови взрослого человека в среднем равно 95 – 140 мм рт. ст. или *тор*. Эти значения могут существенно изменяться в зависимости от возраста, климата и т.д. Нормальное диастолическое (низшее) давление крови 60 – 90 мм рт. ст., при этом среднее значение в большинстве случаев примерно 80 мм рт. ст.

### Механика кровяного давления

Рассмотрим, что понимается под давлением крови в артериях, с учетом традиций, существующих в медицине. Когда говорят о кровяном давлении, то всегда имеют в виду давление, отсчитываемое относительно атмосферного, принимая давление в тканях тела (у наружной стенки кровеносного сосуда), равным атмосферному. Сосуд можно представить как цилиндрическую трубку, которая, как правило, находится в состоянии упругого растяжения, поэтому давление в нем (*P*) напрямую связано с его диаметром (*D*):

,

где *D*0 – диаметр нерастянутого сосуда, *L* – его длина, *E* – (объемный) модуль жесткости стенок сосуда.

Если мы условно рассмотрим распределение крови при вертикальном положении тела с неработающим сердцем, то увидим, что кровь будет находиться только в сосудах ниже уровня, на котором давление равно атмосферному, а расположенные выше этого уровня сосуды спадут. Ниже этого уровня давление в сосудах (относительно атмосферного давления) определится гидростатическим законом:

*,*

где *ρ* – плотность крови, *h* – расстояние до “уровня равновесия давлений” (для сосудов, лежащих выше, *h* отрицательно). Принято считать, что уровень равновесия давлений (*h*= 0) находится в области сердца. За счет гидростатического давления у живого человека давление в поднятой над головой руке будет в 5 – 6 раз меньше, чем у щиколотки ноги.

Примером влияния гравитационных сил на кровообращение и его саморегуляцию является обморок, когда у человека резко возрастает объем крови в венах ног, что происходит в жару или при резком вставании. При этом давление наполнения сердца падает, что снижает производительность сердца и как следствие этого, уменьшается кровоснабжение мозга. В результате этого человек падает и принимает горизонтальное положение. Этим устраняется сила, удерживающая кровь в сосудах ног, и обморок становится менее глубоким. Аналогичное явление может проявиться у летчиков сверхзвуковых самолетов, когда из-за больших перегрузок стенки сосудов будут растягиваться, стремясь уравновесить давление. Если напряжение в стенке сосудов не уравновесит влияние гидростатического давления, то возникает потеря зрения (так называемая “черная слепота”). При исследовании кровообращения в клинике с помощью зонда, соединенного с манометром, их располагают на уровне груди, для устранения гидростатической составляющей давления, поэтому измеряется давление, создаваемое только деятельностью сердца.

Помимо гидростатики, давление в сосудах живого человека обуславливается гидродинамической составляющей. Перемещение крови по сосуду обеспечивается разностью давлений Δ*P* на его концах. Для кровотока *Q* через сосуд справедлива формула Пуазейля:

*.*

Представленное здесь гидродинамическое сопротивление *R* пропорционально вязкости крови и длине сосуда, но обратно пропорционально четвертой степени диаметра сосуда. Поскольку артерии руки имеют большой диаметр и находятся недалеко от сердца, то при измерении артериального давления изменение давления за счет гидродинамической составляющей невелико (2 – 3 мм рт. ст.). Аналогичную формулу можно записать не только для отдельного сосуда, но и для разветвленного участка сосудистого русла. Например, для большого круга кровообращения давление на венозном конце русла *Pв* близко к нулю, и формула принимает вид

*,*

(*Pa* – среднее артериальное давление). Сопротивления последовательно и параллельно соединенных сосудов вычисляются по тем же формулам, что и сопротивления систем из резисторов в электротехнике.

Кровь по сосудам не только перемещается, но и пульсирует (за счет работы сердца), поэтому в механике кровообращения следует учитывать не только сопротивление сосудов, но и их жесткость *E* (упругость – аналог емкости в электротехнике). Основное сопротивление сосудов (в большом круге — около 50%) приходится на долю мелких артерий, а наиболее жесткими сосудами являются крупные артерии. Если представить один круг кровообращения как последовательно соединенные емкость *E* (жесткость крупных артерий) и сопротивление *R* (сопротивление остальных сосудов круга), то получится следующая формула, связывающая систолическое и диастолическое артериальные давления:

,

где *td* – длительность диастолы, которая в норме составляет около 0.64 секунды, но существенно уменьшается с ростом частоты пульса (в отличие от длительности систолы, которая является почти постоянной величиной – около 0.28 секунды). Соответственно разница между верхним и нижним артериальными давлениями увеличивается при расширении сосудов (уменьшении *R*) и при понижении частоты пульса.

### Параметры кровообращения и физическая нагрузка

Артериальное давление относится к числу немногих физических параметров организма, для которых даже двукратное изменение само по себе не слишком влияет на жизненно важные функции организма и наблюдается у здоровых людей при интенсивных физических или эмоциональных нагрузках. На изменение артериального давления в этих случаях влияют следующие факторы:

1. *Уменьшение сопротивления* мышечных сосудов при физической нагрузке (за счет расслабления их стенок) происходит потому, что мышцы усиленно потребляют кислород и выделяют продукты метаболизма, а значит, «заинтересованы» в наибольшем кровотоке через свои сосуды (*Q =* Δ*P/R*). Этот фактор уменьшает оба артериальных давления, особенно диастолическое.
2. *Увеличение сопротивления сосудов* (обратное действие) обусловлено влиянием нервной системы, стремящейся за счет сокращения сосудов (и соответствующего повышения среднего артериального давления) не допустить уменьшения венозного давления, что привело бы к нарушению насосной функции сердца (см. фактор 4).
3. *Увеличение частоты пульса* также регулируется нервной системой. Этот фактор уменьшает разницу между систолическим (*Ps*) и диастолическим (*Pd*) давлением и увеличивает среднее артериальное давление

*.*

1. *Изменение силы сердечных сокращений* определяется не только *усиливающими* нервными влияниями, но и *давлением наполнения сердца* (венозным давлением), понижение которого приводит к *уменьшению* силы. Силу сокращений часто отождествляют с систолическим давлением.
2. *Проталкивание крови по венам сокращениями скелетных мышц*, которое проявляется при двигательной физической нагрузке, приводит к улучшению наполнения сердца кровью, а следовательно (см. фактор 4), к росту систолического давления.
3. *Увеличение объема сосудистого русла* за счет расширения вен также часто наблюдается при нагрузке параллельно с фактором 1 (расслабление сосудов приводит не только к уменьшению сопротивления, но и к росту объема сосудов). При этом сердце меньше наполняется кровью, и систолическое давление понижается (см. фактор 4). Этот эффект более заметен у людей с нетренированными и больными венами.

Суммарное влияние приведенных факторов при физической нагрузке у здорового человека обеспечивает рост артериального давления, прежде всего систолического. Например, после физической нагрузки фактор 5, отсутствует, а факторы нервной регуляции (2–4, которые также повышали давление при нагрузке) быстро ослабевают. Напротив, факторы уменьшения давления 1 и 6 ослабевают медленно, особенно у нетренированных людей (в частности, мышцы медленно восстанавливают свой баланс и требуют интенсивного кровоснабжения). В результате после нагрузки артериальное давление (особенно диастолическое) может понизиться.

## Методика измерения

### Пульсации давления и тоны Короткова

Систолическое и диастолическое артериальные давления измеряются в брахиальной артерии руки. Многие люди измеряют давление крови в обеих руках. Если давление в одной руке будет выше, чем в другой, то его нужно измерять в той руке, в которой оно будет ниже. У большинства людей артериальное давление ниже в левой руке. При проведении измерений следует иметь в виду, что всякое (даже косвенное) вмешательство в организм вызывает ответную реакцию последнего.

Обычно врачи измеряют давление с помощью манжеты, надуваемой воздухом посредством резиновой груши до давления, заведомо превышающего систолическое. При этом происходит пережатие манжетой брахиальной артерии, и кровоток в ней прекращается. По мере стравливания воздуха из манжеты, давление в ней понижается и на определенном его уровне (систолическом) в артерии за манжетой начинается пульсация крови, прослушивающаяся с помощью датчика (фонендоскопа). Появляются характерные звуки, так называемые тоны Короткова, предложенные им в 1904 г.

При дальнейшем понижении давления в манжете тоны уменьшаются по амплитуде (в фонендоскопе становятся глухими), а затем и вовсе исчезают. До сих пор не известно, что именно: снижение амплитуды или прекращение колебаний соответствует диастолическому давлению[[1]](#footnote-1)\*). Анализ колебаний в тонах Короткова проводят рассмотрением их частотных составляющих, т.к. наблюдается значительное уменьшение амплитуды (в фазе диастолы) в диапазоне частот 60 –180 Гц.

Основную сложность представляет измерение диастолического или нижнего артериального давления (НАД). Следует сказать, что слово “измерение” здесь не совсем подходит и правильнее сказать “определение”. Из литературных источников [2] известно, что при определении НАД методом Короткова погрешность может колебаться от 10 и более процентов. Показано, что если разность между давлениями в манжете ((*Py* – *P*0) = 8 мм рт. ст. (где *Py* – давление, при котором амплитуда звуков начинает уменьшаться, а *P*0 – давление, при котором звуки полностью пропадают), то ошибка определения не превосходит этой величины. Если эта разность достигает 20 – 30 мм. рт. ст., то значение НАД оказывается заниженным. На величину ошибки определения НАД влияет и скорость стравливания воздуха из манжеты, причем чем скорость меньше, тем точнее результат.

В данной работе предлагается проанализировать запись давления в манжете и на этой основе сделать выводы о величине артериального давления и частоте сердечных сокращений (пульс). Существо измерений заключается в том, что в случае, когда давление в манжете выше систолического давления, пульсации в артерии не будут сказываться на давлении в манжете, и никаких пульсаций там наблюдаться не будет. В том случае, когда давление в манжете будет ниже НАД, пульсаций давления в манжете также не будет. Таким образом, по мере уменьшения давления в манжете, в ней сначала появятся пульсации давления, а затем их амплитуда начнет уменьшаться вплоть до исчезновения. Появление пульсаций давления считается систолическим давлением, а начало их уменьшения свидетельствует о том, что мы находимся в диапазоне диастолического давления.

### Измерительная аппаратура и обработка результатов измерений

На рис. 1.1 изображено устройство для измерения и регистрации артериального давления, где 1 – конечность, 2 – манжета, 3 – нагнетательная груша, 4 – датчик давления, 5 – манометр, 6 – АЦП, 7 – ПК.

Измерительным элементом в данной работе является датчик давления – 4. Причем установка выполнена в двух вариантах, в одном случае датчиком давления является керамический сенсор, а в другом – механотрон.

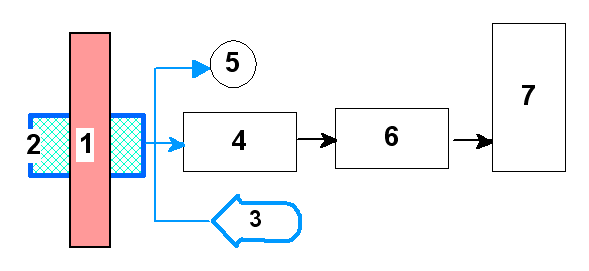


Рис. 1.1. Устройство для измерения и регистрации артериального  
давления

На рис. 1.3 приведена фотография экспериментальной установки.

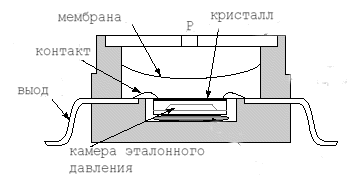


Рис. 1.2. Датчики давления на основе МЭМС технологии

На рис. 1.2 приведена конструкция датчика давления фирмы Motorola, который представляет собой электронную схему, содержащую операционный усилитель, выполненный по биполярной технологии и тонкопленочный резистор, изготовленные на одном кристалле. Датчики обеспечивают температурную компенсацию в диапазоне от -40° до +125 °C. Схема выдает пропорциональный давлению «Р» аналоговый сигнал. Корпус из износостойкого термопластика защищает внутреннюю часть прибора от влияния высокой влажности и агрессивных сред. В конструкции прибора использованы МЭМС технологии (Microelectromechanical Systems – микроэлектромеханические системы).

В другом варианте данной работы измерительным элементом является механотронный датчик давления. Механотрон служит для преобразования механических величин в электрические и применяется как датчик для измерения малых перемещений (от 10−2 до 102 мкм), малых усилий (от 10−3 до 102 g), давлений (от 10−2 до 2·102 *тор*), ускорений (от 10−1 до 105 см/с2), вибраций (до 10 кГц) и т.п.

Обычно у механотрона часть корпуса содержит мембрану или сильфон, которые жестко соединены с подвижным электродом. Механотроны бывают вакуумные и газоразрядные. В вакуумных механотронах используют зависимость плотности тока эмиссии катода от расстояния между катодом и анодом.

Полученный электрический сигнал от механотрона подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), с которого сигнал в виде кода поступает на компьютер, где записывается как файл (\*.dat).



Рис. 1.3. Фотография экспериментальной установки.

## Ход работы

Провели установку и калибровку механотрона. Для этого измерили показания механотрона при различных давлениях, чтобы найти, какое давление соответствует 1 мВ.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ismat\AppData\Local\Temp\Rar$DRa43080.14789\data\calibration_1.jpegРис. 1. 4. Фотография экспериментальной установки. | C:\Users\ismat\AppData\Local\Temp\Rar$DRa43080.34343\data\calibration_table_1.jpegРис. 1.5. Фотография экспериментальной установки. |

Рис. 1. 4. Фотография экспериментальной установки.

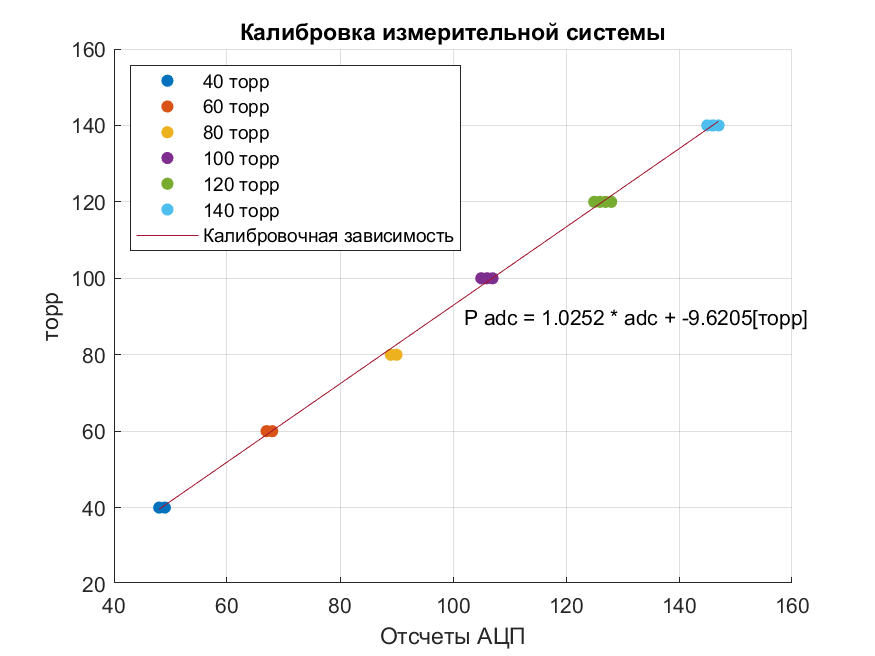


Рис. 1. 6. Фотография экспериментальной установки

С помощью тонометра измерили давление на руке подопытного и передали данные на компьютер с помощью механотрона.

Перенесли полученные данные в редактор MATLAB и построили график зависимости давления до нагрузки и после нагрузки от времени.

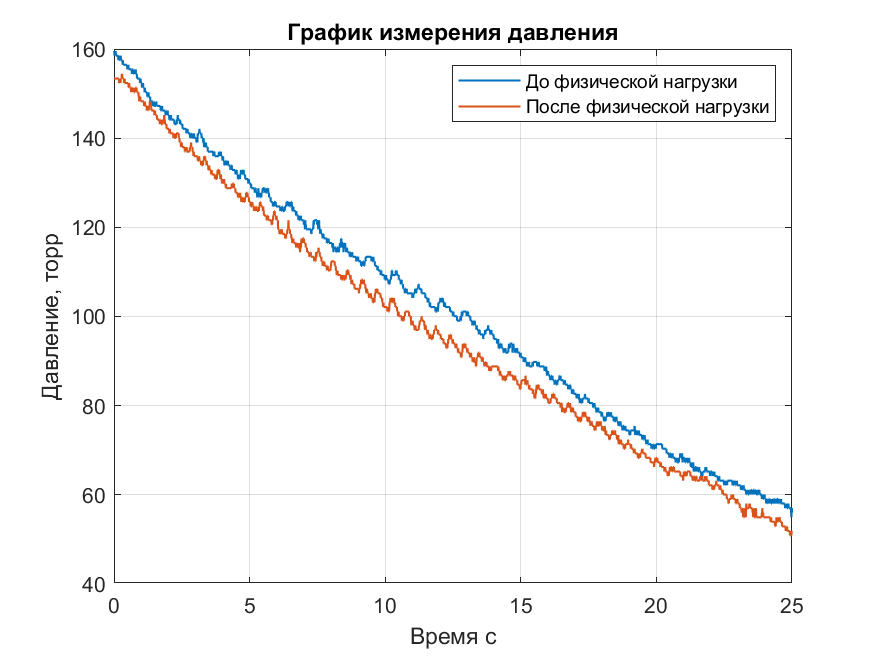


Рис. 1. 7. График измерения давления.

Подобрали участок кривой давления на промежутке 10 секунд и определили частоту пульса.

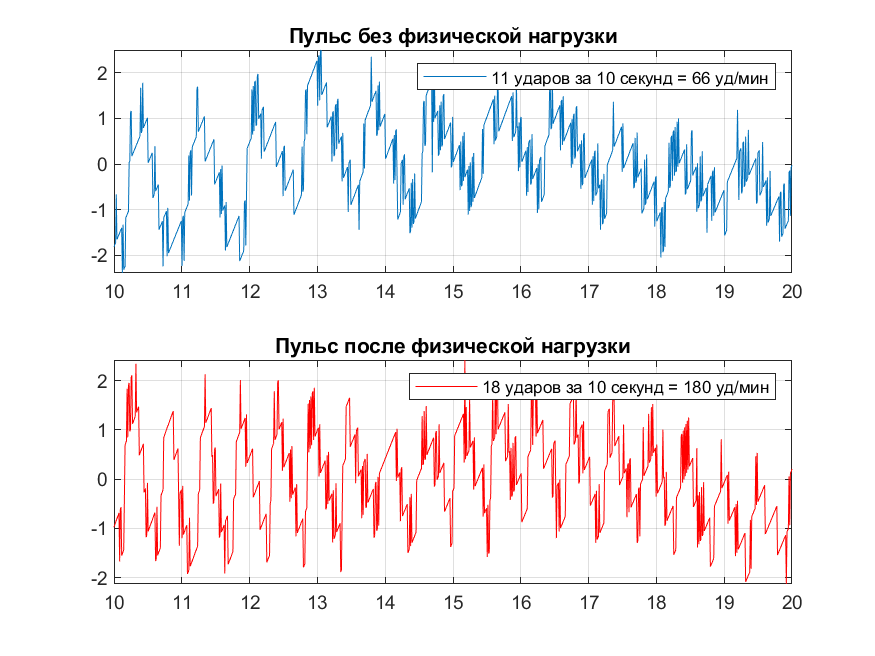


Рис. 1. 8. График измерения давления.

.

1. \*) Ультразвуковыми методами показано, что появление тонов Короткова совпадает с возобновлением течения крови через сдавленный участок аорты конечности. Природа появления тонов Короткова до конца не изучена. Предполагается, что возникновение тонов связано с самовозбуждающимися колебаниями за манжетой при суженном просвете сосуда, из-за неустойчивости механической системы *поток – стенка сосуда*. Однако рассматривается и другой нелинейный механизм, связанный с периодичностью прохождения волн давления с крутым фронтом и высокочастотными колебаниями за ним. Существует международная договоренность, что диастолическому давлению соответствует появление “глухих” тонов Короткова. [↑](#footnote-ref-1)