



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ПЛОВДИВ
ФАКУЛТЕТ „Фармация“
ЦЕНТЪР ЗА ДИСТАНЦИОННО ОБУЧЕНИЕ

Лекция №4 *Медицинска физика*

Стационарно движение на флуидите. Условие за непрекъснатост на потока.

Закон на Бернули. Ламинарно и турбулентно движение.

Движение на вискозна течност по тръба (закон на Хаген-Поазьой).

Хидродинамични характеристики на сърдечно-съдовата система.

Характер на движение на кръвта в кръвоносната система, налягане и скорост на кръвта.

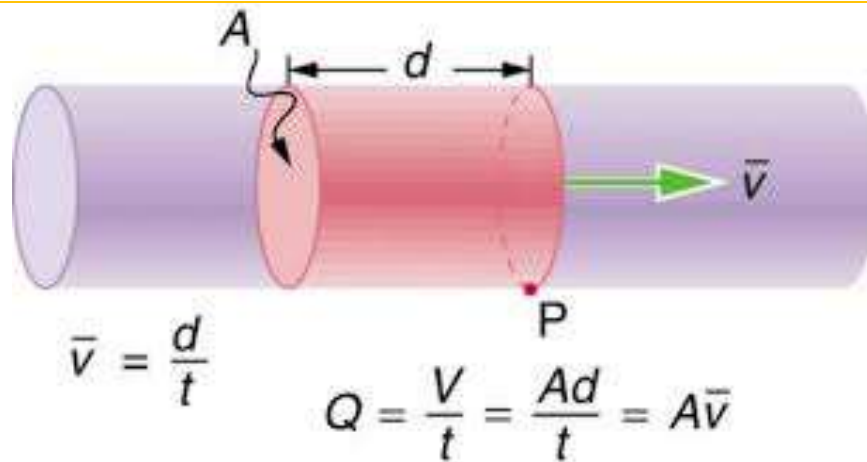
Физични основи на клиничния метод за измерване на кръвното налягане.

проф. Константин Балашев, д.х.н.

Стационарно движение на флуидите

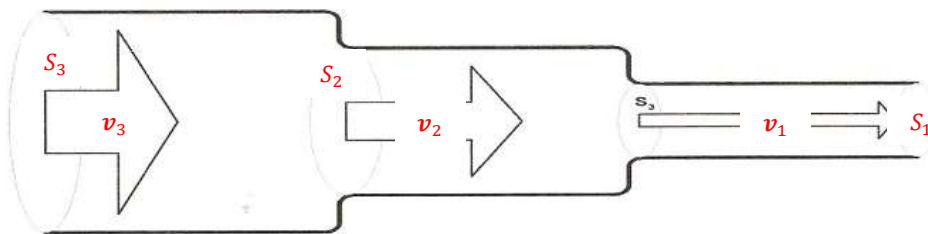
Флуид, чийто вискозитет и свиваемост са толкова малки, че могат да се пренебрегнат, се нарича **идеален флуид**. Вискозитетът е свързан със съпротивлението, което междумолекулните сили във флуидите оказват при движението на флуида. Свиваемостта на флуидите представлява относителното изменение на обема на флуида при промяна на налягането в него с единица. Газовете например имат голяма свиваемост, докато при течностите тя е малка.

Флуид, чийто вискозитет и свиваемост са толкова малки, че могат да се пренебрегнат, се нарича **идеален флуид**. Вискозитетът е свързан със съпротивлението, което междумолекулните сили във флуидите оказват при движението на флуида. Свиваемостта на флуидите представлява относителното изменение на обема на флуида при промяна на налягането в него с единица. Газовете например имат голяма свиваемост, докато при течностите тя е малка.



При стационарния тип движение, през което и да е напречно сечение на потока за равни интервали от време Δt преминава еднакъв обем флуид ΔV (и маса, защото е несвиваем). С други думи, интензитетът I на течащия флуид е: $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{const}$. Отношението $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ се нарича още *дебит* или *интензитет на флуидния поток*.

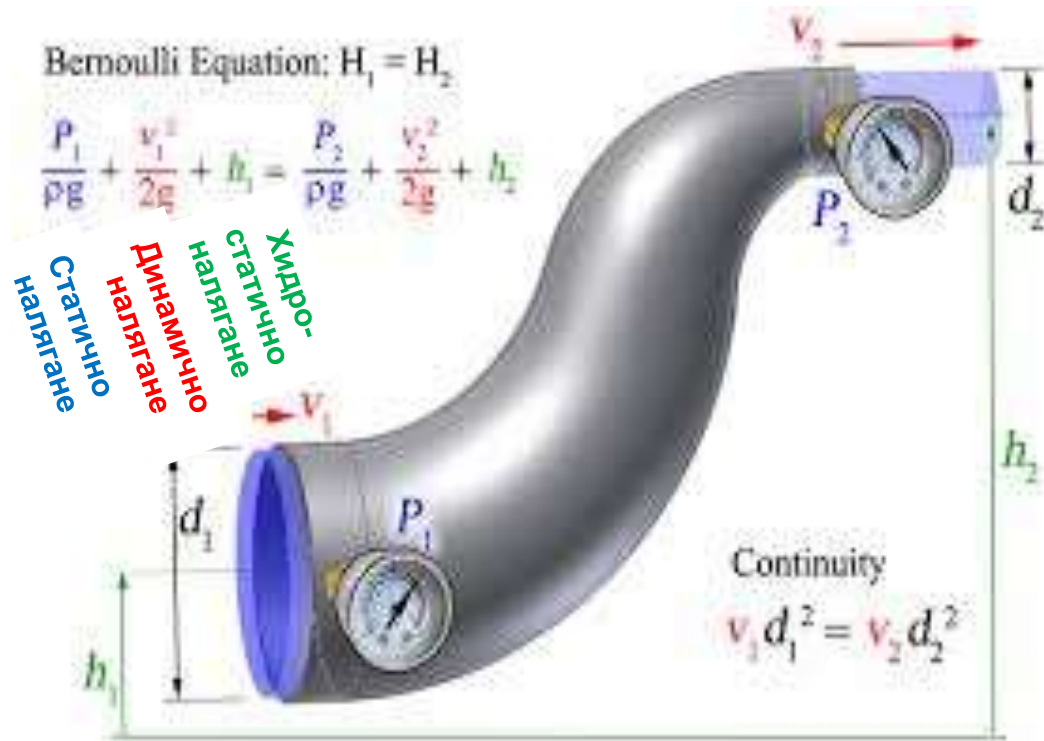
Условие за непрекъснатост на потока



Нека идеален флуид се движи стационарно през тръбопровод с променливо напречно сечение. В такъв случай, поради това, че неговият интензитет I е постоянен и тъй като $I = \frac{\Delta V}{\Delta t} = Sv$, за всяко сечение на потока произведението на скоростта v и площта на сечението S ще бъде едно и също:
 $I = S_1 v_1 = S_2 v_2 = S_3 v_3 \dots$

За стационарно движение на флуид в тръба с променливо сечение е изпълнено условието $Sv = const$. Това уравнение носи наименованието *условие за непрекъснатост на флуидния поток*. От него следва, че при стационарно движение на флуид, намаляването на площта на напречното сечение води до увеличаване скоростта на потока, и обратно.

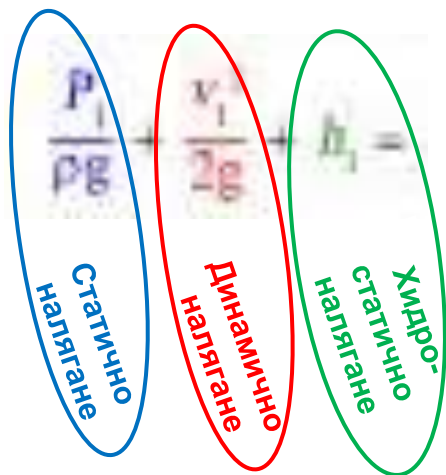
Закон на Бернули



Един от основните закони в динамиката на флуидите е законът, открит от швейцарския математик и физик Даниел Бернули. Този закон гласи, че при стационарно движение на флуиди за всяко сечение на потока сумата от статичното, хидростатично и динамично наляганя е постоянна величина:

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}} + P_{\text{ХС}} = \text{const}$$

Статичното налягане $P_{ст}$ е външно налягане, което, приложено към течността, обуславя нейното движение. Дължи се на работата, която външните сили извършват за преместването на течността. Статично налягане е налягането върху повърхност, успоредна на движещата се течност. То може да бъде измерено с манометър, потопен в течността и движещ се заедно с нея.



Динамичното налягане $P_{дин}$ е налягане, обусловено от движението на флуида и се проявява при неговото спиране. Равно е на кинетичната енергия, притежавана от приведения в движение флуид (за единица обем от флуида $P_{дин} = \frac{\rho v^2}{2}$). Дължи се на инертността на масата на движещия се флуид. Динамичното налягане се определя от натиска на флуида. То може да бъде измерено с манометър, потопен в движещия се поток, но неподвижен спрямо него.

Хидростатичното налягане $P_{хс} = \rho g h$ (за единица обем от флуида) е допълнително външно налягане, обусловено от масата на флуида. Дължи се на потенциалната енергия, която притежава масата флуид, намираща на определена височина над земното равнище. Хидростатичното налягане оказва влияние върху движението на флуида само ако има участъци от потока, разположени на различна височина от земната повърхност.

Законът на Бернули всъщност изразява закона за запазване на енергията. Статичното налягане в един флуид $P_{ст} + P_{ХС}$ представя неговата потенциална енергия, тъй като дава възможност за извършване на работа. Движещият се флуид притежава и кинетична енергия, представена чрез динамичното налягане $P_{дин}$. Ако флуид тече през тръба със стеснение, скоростта му нараства в стеснената секция и увеличението на кинетичната енергия на флуида се получава за сметка на намаляване на потенциалната енергия от налягането в тръбата.



Когато флуид се движи по хоризонтално разположена тръба $P_{ХС} = const$. В такъв случай законът на Бернули придобива по-прост вид: $P_{ст} + P_{дин} = const$. Това означава, че в участъците с по-висока скорост на потока (т.е. с по-голямо динамично налягане) статичното налягане ще е по-ниско, и обратно.

Закон на Хаген-Поазьой

Освен вискозитета и други фактори повлияват протичането на флуидите през тръби: разликата в налягането от единия край до другия, дължината на тръбата и нейния радиус.

Оказва се, че интензитетът (I) на флуидния поток през една тръба (т.е. обемът флуид, протичащ за единица време) зависи от разликата в наляганята между единия и другия край ($\Delta p = p_1 - p_2$), дължината (L) на тръбата, нейния радиус (R) и вискозитета (η) на флуида:

$$I = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \eta L}$$



J. L. M. Poiseuille
(1797 – 1869)



Gotthilf Hagen
(1797 – 1884)

Тази зависимост е открита през XIX век независимо един от друг от френския лекар и физиолог Жан-Луи- Мари Поазьой и независимо от него - от немския хидравличен инженер *Готхилф Хаген* и затова е известна като *закон на Хаген-Поазьой*.

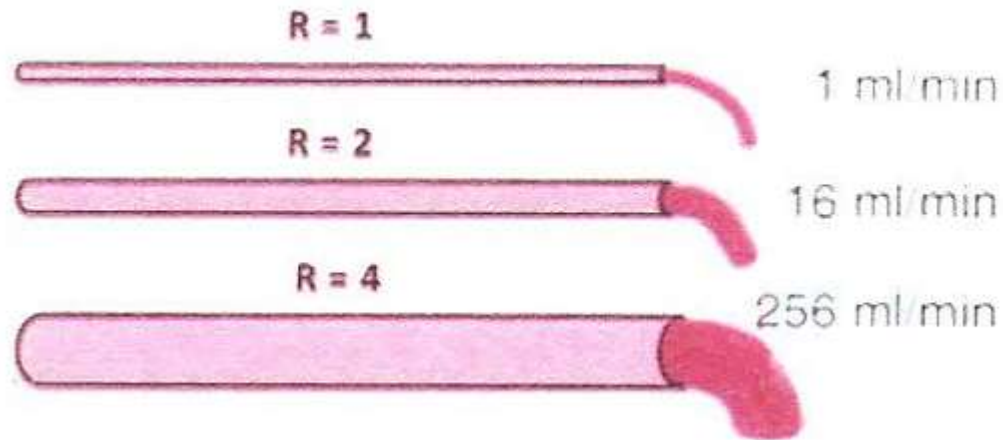
Съгласно закона на Хаген-Поазьой

$$I \propto \frac{\Delta p R^4}{\eta L}$$

- Следователно, ако разликата в наляганията Δp се удвои, дебитът I също се удвоява.
- Интензитетът на потока I се изменя обратно пропорционално на дължината на тръбопровода L и на вискозитета на флуида η . Ако някоя от двете величини се увеличи двойно, дебитът намалява двойно.

Зависимостта на дебита I от радиуса на тръбата R е много по-силна. Увеличението е право пропорционално на четвъртата степен на радиуса.

- Ако радиусът се увеличи 2 пъти, дебитът на потока ще се увеличи 16 пъти (2^4), а ако се увеличи 4 пъти, дебитът се увеличава 256 пъти (4^4) !



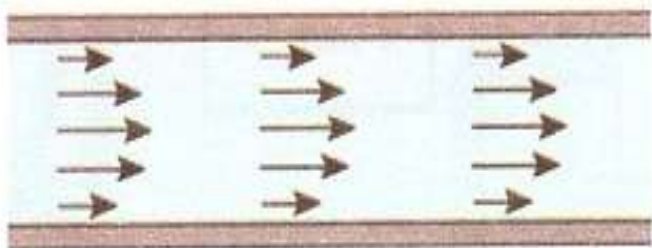
Зависимостта на дебита I от радиуса на тръбата R е много по-силна. Увеличението е *право пропорционално* на четвъртата степен на радиуса.

- Ако *радиусът се увеличи 2 пъти*, дебитът на потока ще се увеличи *16 пъти* (2^4), а ако *се увеличи 4 пъти*, дебитът *се увеличава 256 пъти* (4^4) !

Ламинарно и турбулентно движение

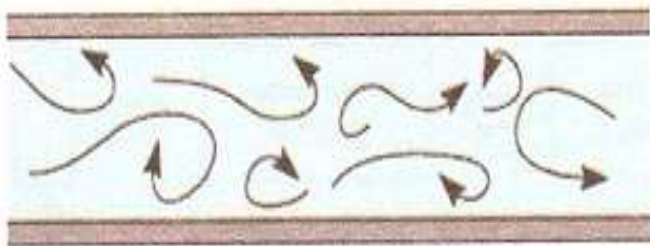
По своя характер движението на реалните флуиди може да бъде *ламинарно* или *турбулентно*.

ЛАМИНАРНО ТЕЧЕНИЕ



Ламинарно (слоесто) е движението, когато отделните слоеве на флуида се движат успоредно един на друг, без да се смесват. Обикновено такава е движението при ниски скорости. Ламинарното движение не изисква голяма загуба на енергия за придвижване на флуида. Стационарното движение е ламинарно, но ламинарното не винаги е стационарно.

ТУРБОЛЕНТНО ТЕЧЕНИЕ



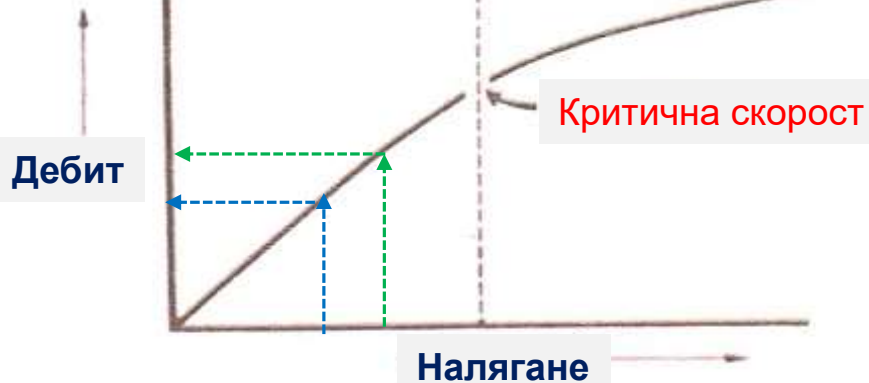
При *турбулентното (вихрово)* движение различните слоеве на флуида се завихрят и смесват. Този тип движение се дължи на вискозитета.



От ламинарно към турбулентно движение се преминава когато скоростта на флуида надмине някаква гранична стойност. Турбулентното движение изисква по-голяма работа за задвижването на флуида в сравнение с ламинарното.

Ламинарен поток

Турбулентен поток



Ако скоростта на един флуид се увеличава плавно, тя ще достигне една критична стойност v_c , над която ламинарният поток преминава в турбулентен.



Osborne Reynolds
(1842 – 1912)

Английският физик *Осборн Рейнолдс* е изследвал това свойство през 1883 г. Той е установил, че критичната скорост v_c е *право пропорционална* на вискозитета на флуида (η) и обратно пропорционална на неговата плътност (ρ) и диаметъра (d) на тръбата:

$$v_c = Re \frac{\eta}{\rho d}$$

Константата на пропорционалност Re се нарича *число на Рейнолдс*.

Числото на Рейнолдс се пресмята по някоя от следната формула:

$$Re = v_c \frac{\rho d}{\eta}$$

Където:

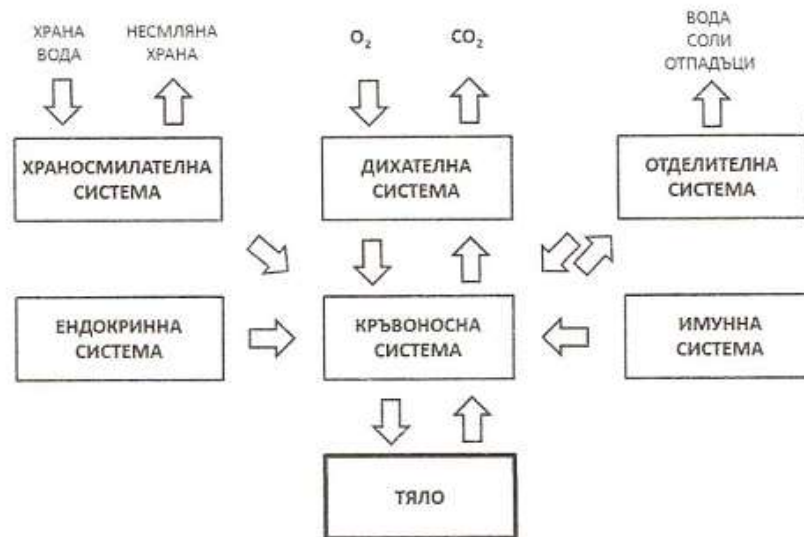
- v_c - скорост на флуида,
- d - размер (диаметър на тръба),
- η – (абсолютен) динамичен вискозитет на флуида,
- ρ – плътност на флуида.

Потокът в тръби с кръгло сечение е:

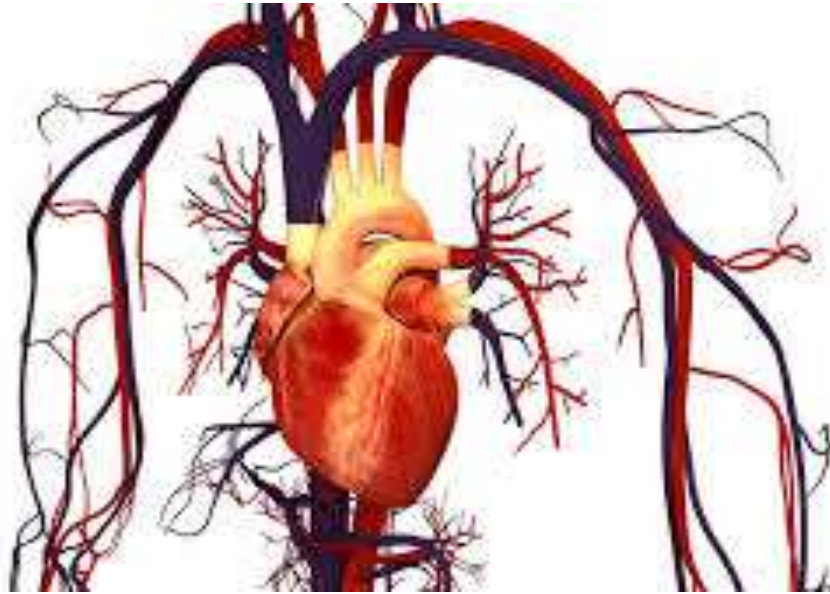
ламинарен ако $Re < 2300$
преходен ако $2300 < Re < 2600$
турбулентен ако $Re > 2600$

Ако има стеснения или грапавини по стените то числото на Рейнолдс има по-ниска стойност. *За потока на кръвта* стойността на $Re = 2000$

Хидродинамични характеристики на сърдечно-съдовата система.

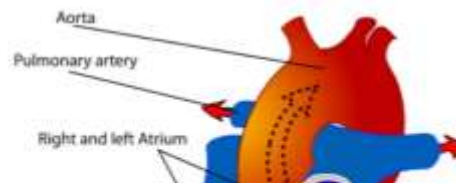
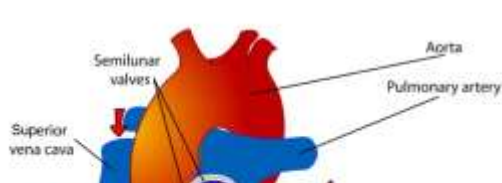


Кръвоносната (сърдечно-съдова) система има централна роля в човешкия организъм. Тя е транспортна система, която свързва и обединява всички останали физиологични системи. Кръвта транспортира кислород от белия дроб и хранителни вещества от храносмилателните органи до всички тъкани на тялото. От тъканите кръвта изнася крайните продукти от обмяната на веществата до белия дроб и отделителните органи. Освен това, кръвоносната система служи и за канал, по който се предават хуморалните въздействия. Кръвообращението играе важна роля в терморегулацията на организма. Кръвната циркулация се регулира по *различни начини за да се поддържа адекватно кръвоснабдяване на всички органи, но главно - на мозъка и сърцето.*



От механична гледна точка сърдечно-съдовата система представлява затворена система, съдържаща кръв, която се движи от помпа (сърцето) и тръбопроводи, по които циркулира (кръвоносните съдове).

Кръвта представлява около 7 % от цялата маса на човешкото тяло. Типичен 70 килограмов възрастен човек има около 5 литра кръв. Кръвта е сложна двуфазна течност, съдържаща множество различни субстанции в разтворена или суспендирана форма. Тя не е просто течност или разтвор, а дисперсна система - суспензия. Състои се от кръвна плазма и суспендирани в нея кръвни клетки - еритроцити, левкоцити и тромбоцити. Движението на кръвта в по-голямата част от кръвоносната система се описва добре от закона на Хаген- Поазьой.

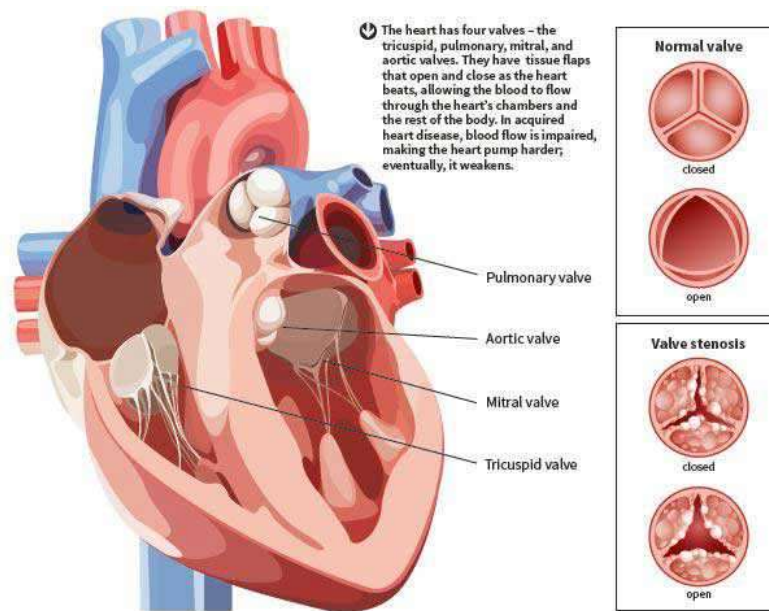


Сърцето представлява двойна сгъстително-разредителна помпа, състояща се от 2 предсърдия и 2 камери, действащи последователно. Всеки неин работен цикъл има 3 фази:

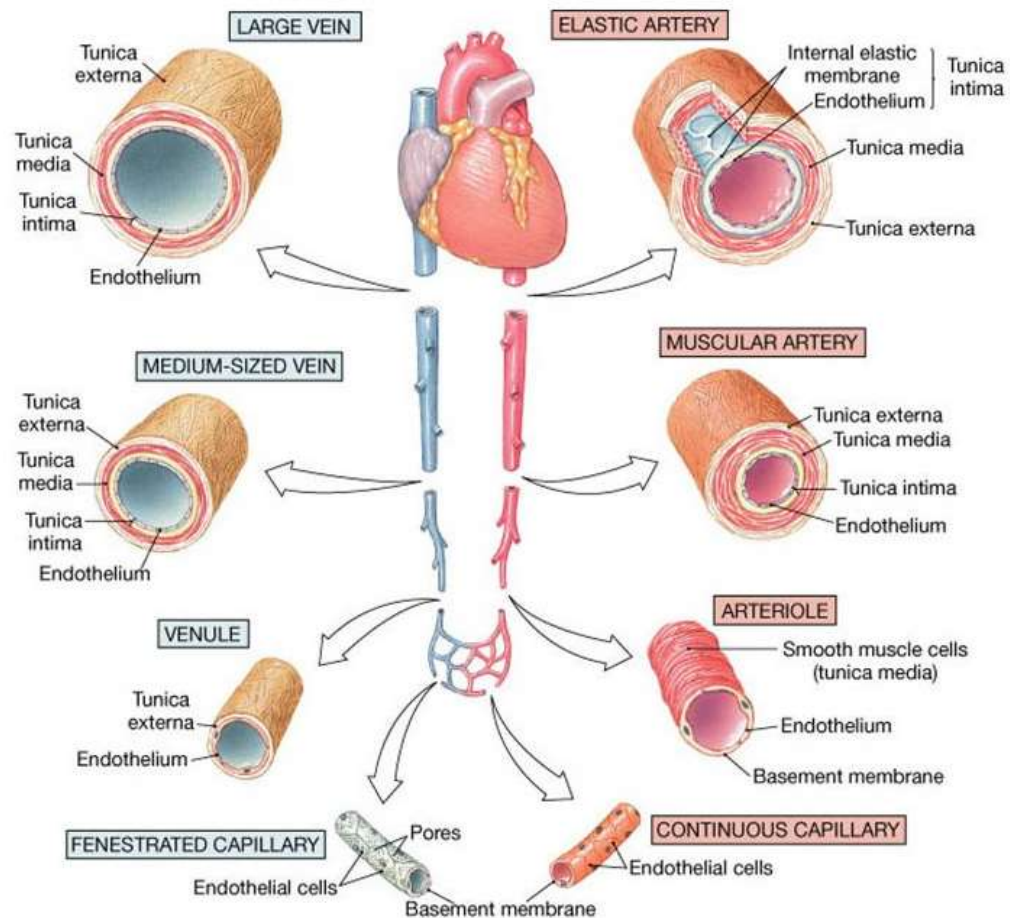
- *систола* (свиване на камерите и отпускане на предсърдията),
- *диастола* (свиване на предсърдията и отпускане на камерите) и
- *пауза* (отпускане на камерите и на предсърдията).

Продължителността на един цикъл е около 0,8 s. Това означава, че честотата на сърдечната дейност е около 70 цикъла в минута или около 1,1 Hz. Сърцето на нормален възрастен човек изпомпва около 80 милилитра при всяка контракция. При тези условия за един циркулационен цикъл е необходима около 1 минута.

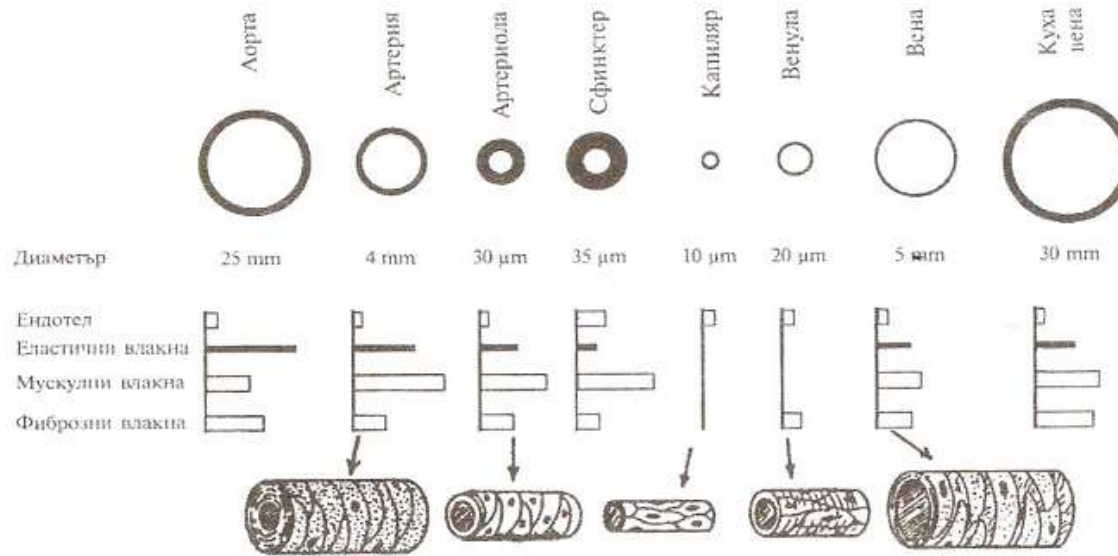
Сърцето има система от клапи, които (когато функционират нормално) придвижват кръвта само в една посока. Ако тези клапи се повредят (не се отварят или не се затварят напълно) изпомпването на кръвта не е ефективно. Дефектите на сърдечните клапи са два типа: клапите или не се отварят достатъчно (*стеноза*) или не се затварят добре (*недостатъчност*). При *стеноза* работата на сърцето е увеличена, защото за преодоляване на стесняването е необходимо допълнително количество енергия и работа на сърдечните мускули. При *недостатъчност* част от изпомпаната кръв се връща обратно в сърцето, така че обемът на изпомпената кръв се намалява. И при двата типа сърдечни дефекти изпомпването на кръв в системната циркулация е намалено. Неефективно действащите естествени сърдечни клапи могат да бъдат заменени оперативно.



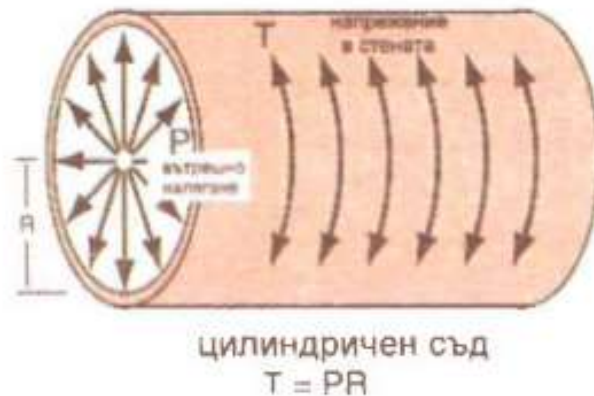
Сърцето има система от клапи, които (когато функционират нормално) придвижват кръвта само в една посока. Ако тези клапи се повредят (не се отварят или не се затварят напълно) изпомпването на кръвта не е ефективно. Дефектите на сърдечните клапи са два типа: клапите или не се отварят достатъчно (*стеноза*) или не се затварят добре (*недостатъчност*). При *стеноза* работата на сърцето е увеличена, защото за преодоляване на стесняването е необходимо допълнително количество енергия и работа на сърдечните мускули. При *недостатъчност* част от изпомпаната кръв се връща обратно в сърцето, така че обемът на изпомпената кръв се намалява. И при двата типа сърдечни дефекти изпомпването на кръв в системната циркулация е намалено. Неефективните действащи естествени сърдечни клапи могат да бъдат заменени оперативно.



Съдовата система се състои от артерии, артериоли, капиляри, венули и вени, съединени последователно. От своя страна артериите, вените и особено артериолите, капилярите и венулите представляват система от успоредно свързани съдове. Общата дължина на кръвоносните съдове е оценена на около 100 000 километра.



Различните видове **кръвоносни съдове** имат различни компоненти, структура и функции. Артериите са изградени от ендотелен слой, еластични и мускулни влакна, а отвън са покрити с рехавяваща съединително-тъканна обвивка. Те буферират (изглаждат) пулсациите на кръвното налягане. Артериолите имат подобен строеж, но с по-малко еластични влакна и повече мускулни. Благодарение на гладката мускулатура в стените си те могат да променят диаметъра си и чрез това участват активно в регулацията на кръвния поток. Капилярите са изградени само от ендотелни клетки. В тях се осъществява двупосочната обмяна на вещества между кръвта и околните тъкани. Във венулите освен ендотелни клетки има и оскъдни съединително-тъканни елементи. Вените имат три слоя както при артериите, но при тях средният слой е по-дебел на еластични влакна. Те могат да променят относително лесно своя диаметър и да предизвикват промени в обемното разпределение на кръвта в съдовата система.

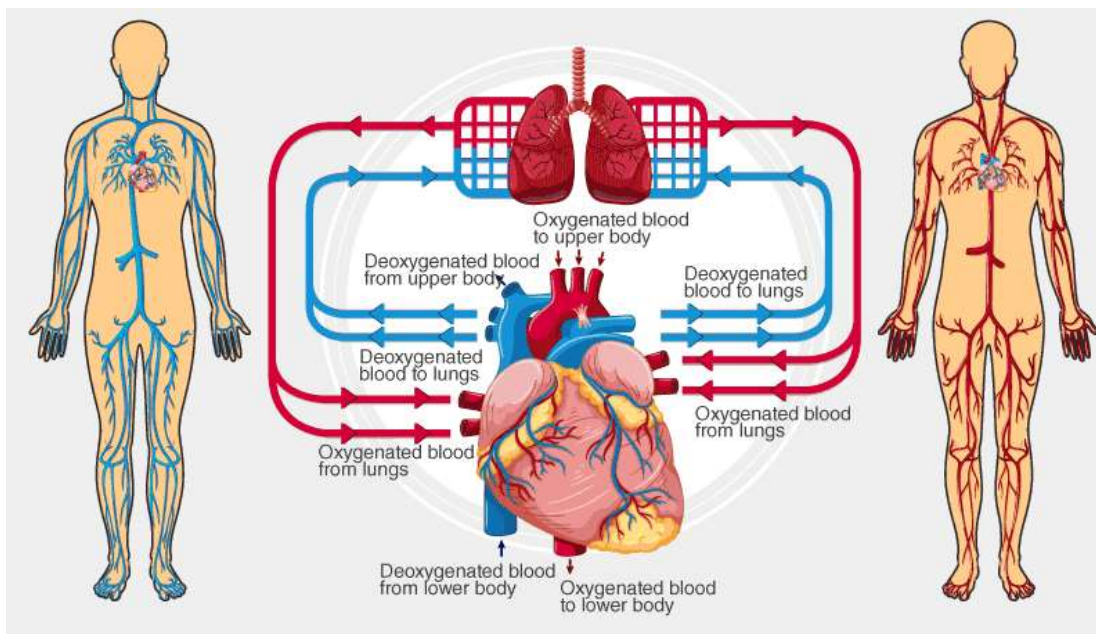


В съответствие с принципа на Паскал налягането вътре в затворения кръвоносен съд навсякъде и във всички посоки е едно и също. Оказва се обаче, че напрежението в различни участъци от стените на този съд, предизвикано от това еднакво налягане, може силно да се различава. Тези разлики се обясняват със закона на Лаплас. Налягането на флуида вътре в цилиндричен съд предизвиква напрежение, което разтяга стената на съда. Съгласно закона на Лаплас големината на това разтягащо напрежение (T) е пропорционална на налягането (p) и радиуса на съда (R): $T = pR$ Това води до едно важно за стените на кръвоносните съдове заключение - **стените на по-големите кръвоносни съдове са подложени на по-голямо разтягащо ги напрежение, отколкото стените на по-малките.**

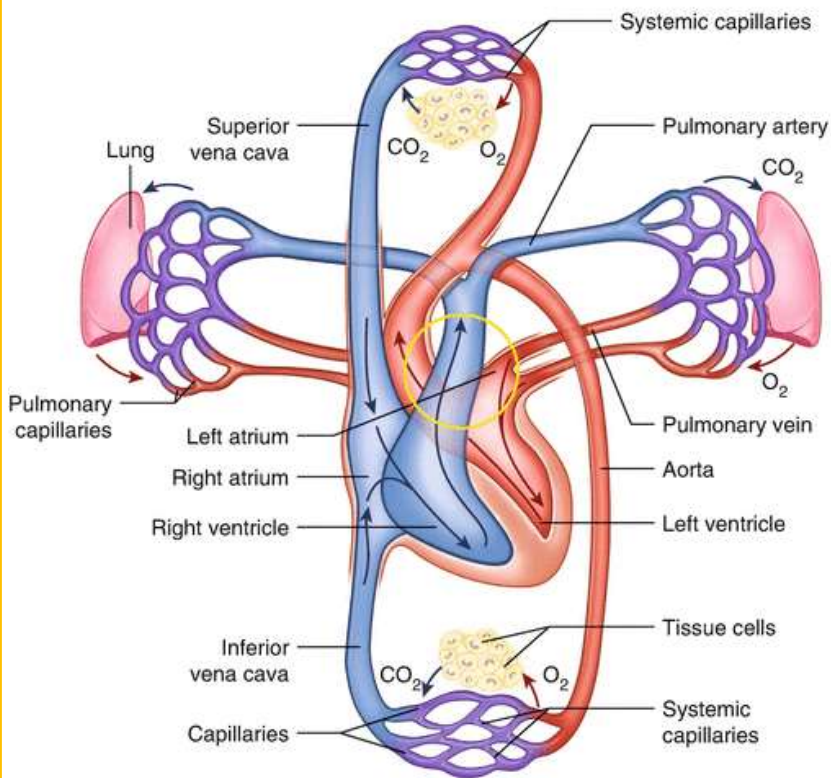
кръвоносен съд	радиус R [cm]	средно налягане p [Тorr]	напрежение T [N/m]
Аорта	1,2	100	156,0
Артерия	0,5	90	60,0
Капиляр	0,0006	30	0,024
Вена	0,02	15	10,0
Куха вена	1,5	10	20,0

В таблицата са показани типични налягания и напрежения в различни кръвоносни съдове. Например, напрежението в стената на аортата е около 156 N/m, докато в капилярната стена е само 0,024 N/m. За сравнение - тоалетната хартия издържа разтягащо напрежение около 50 N/m преди да се откъсне.

Характер на движение на кръвта в кръвоносната система, налягане и скорост на кръвта.

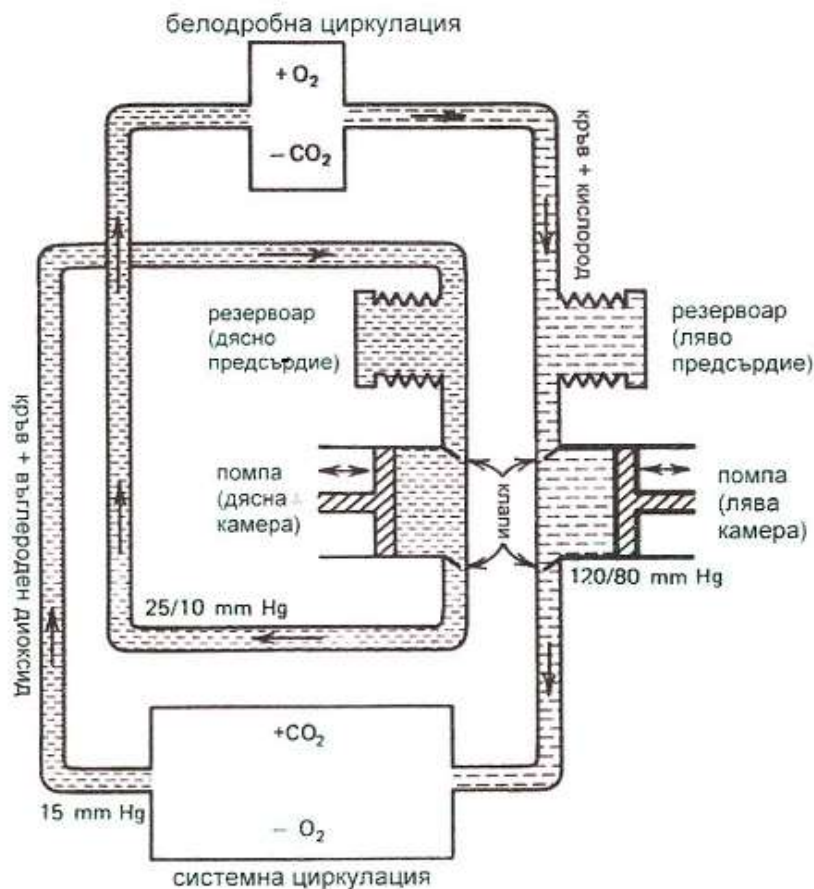


Кръвоносната система се състои от два последователно свързани кръга - малък и голям, които се "обслужват" от двете половини на сърцето. Кръвта циркулира от сърцето последователно през т.нар. *малък кръг на кръвообращението* (през белите дробове) и след това - през останалата част от тялото, наричана *голям кръг на кръвообращението* или *системна циркулация*. Начално звено на съдовата система е аортата в големия кръг на кръвообращение и белодробната артерия в малкия кръг; крайно звено са широките вени

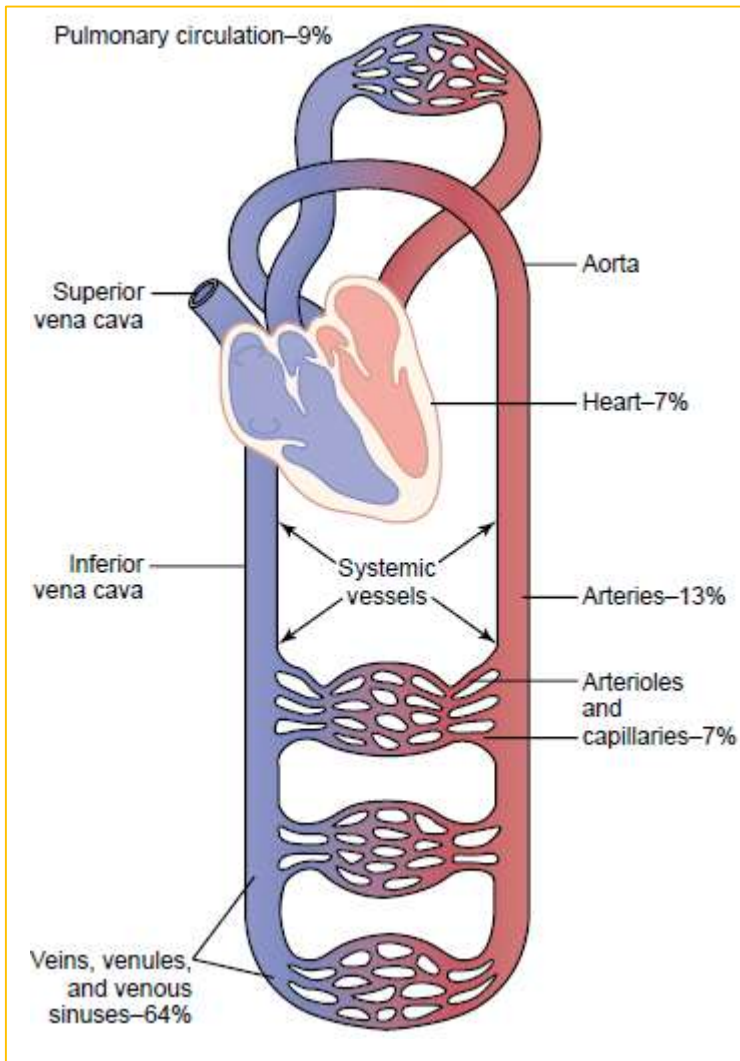


От лявата сърдечна камера кръвта се изпомпва през *аортата* в големия кръг на кръвообращението с налягане около 100 - 120 Тогг. Там тя преминава през система от *артерии*, които постепенно се разклоняват на по-малки *артериоли*, достигайки накрая до силно разклонена мрежа от финни малки кръвоносни съдове - *капилярите*. Общата площ на капилярните стени в тялото на възрастен човек е над 6 000 м². През капилярната мрежа кръвта преминава за 1-2 секунди. През това време тя успява да снабди клетките с кислород и хранителни вещества и да приеме от тях въглероден диоксид и други катаболитни продукти.

След капилярната мрежа кръвта се събира в малки вени (*венули*), които постепенно се обединяват в по-големи и още по-големи вени преди да влезне в дясната половина на сърцето през две главни *вени* - *superior vena cava* и *inferior vena cava*.



Върналата се в сърцето кръв за кратко време престоява в дясното предсърдие и чрез слаба контракция на сърдечните мускули (осигуряваща налягане 5-6 Тогг) кръвта влиза в дясната камера. При съкращаване на мускулите на дясната камера кръвта се изпомпва при налягане около 25 Тогг през белодробните артерии към капилярната система в белите дробове. Там тя се обогатява на O₂, а известна част от съдържащия се в нея CO₂ дифундира във въздуха, който се издишва от белите дробове. Прясно оксигенираната кръв след това преминава през главните вени от белите дробове в лявото предсърдие на сърцето. Чрез слаба предсърдна контракция (с налягане 7-8 Тогг) кръвта преминава в лявата камера. С последваща контракция на лявата камера кръвта започва следващия циркуляционен цикъл.



Кръвният обем не е еднакво разпределен между малкия и големия кръг на кръвообращението. Във всеки момент около 80 % от кръвта се намира в големия кръг на кръвообращението, а около 20 %- в малкия. В големия кръг около 15 % от кръвта е в артериите, 10 % - в капилярите и 75 % - във вените. В малкия кръг около 46% от кръвта се намира в белодробните артерии, около 7 %- в белодробните капиляри, а останалите около 47%- в белодробните вени.

Физични основи на клиничния метод за измерване на кръвното налягане



Кръвта се движи по кръвоносните съдове под действие на налягането, създавано от сърцето. То е пулсиращо и в *различните фази на сърдечния цикъл* има различна стойност. Максимална стойност се достига *при систола* на сърцето (*систолично налягане*), а минимална при *диастола* (*диастолично налягане*). Пулсациите на налягането се поемат от еластичните стени на кръвоносните съдове и постепенно, с отдалечаването от сърцето, почти напълно изчезват.

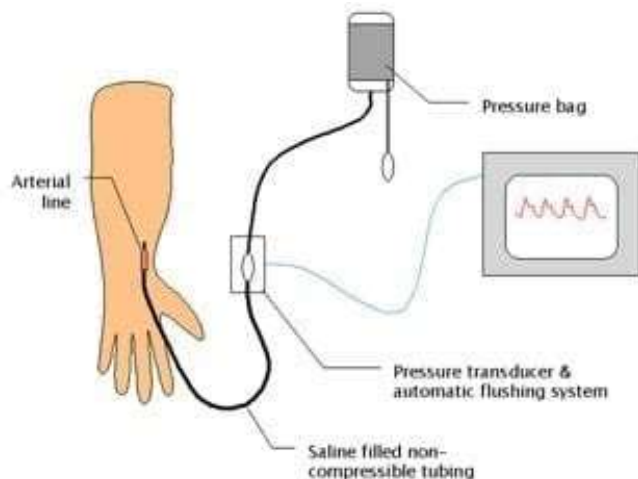


В различните участъци на кръвоносната система *налягането е различно.*

При систола налягането *в лявата сърдечна камера* нараства с около *112 mmHg* над атмосферното, докато във вената, влизаща в дясното предсърдие, налягането е равно на атмосферното. В *артериолите и капилярите* се наблюдава значително спадане на кръвното налягане. В двата кръга на кръвообращението наляганята също са различни. *В белодробния кръг* сърцето изпраща кръвта с твърде ниско систолично налягане - около *25 mmHg* (поради по-ниското съпротивление на кръвоносните съдове в белите дробове). За да циркулира през много по-голямата мрежа от кръвоносни съдове в големия кръг, кръвта се изтласква от лявата половина на сърцето с доста по-високо налягане (типично около *120 mmHg* при систола, респективно - *80 mmHg* при диастола).

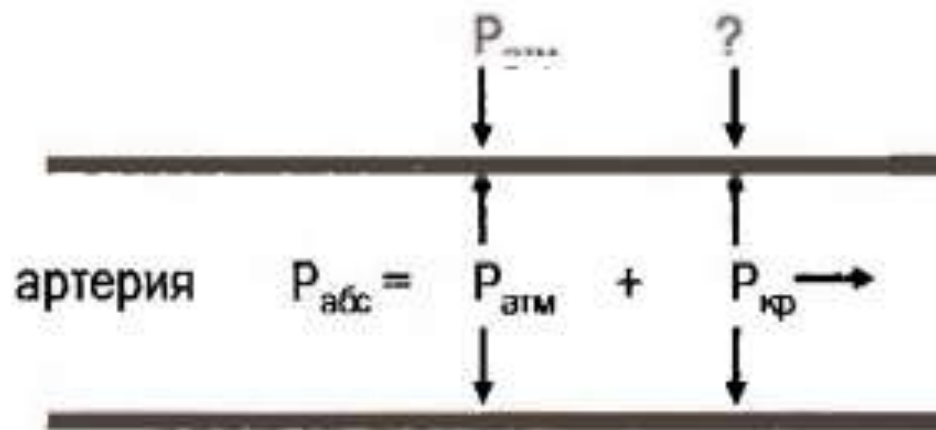
ИЗМЕРВАНЕ НА КРЪВНОТО НАЛЯГАНЕ

Едно от най-честите клинични измервания е *измерването на артериалното кръвно налягане*. Налягането на кръвта в сърдечно-съдовата система е важен диагностичен показател.



Абсолютната стойност на артериалното кръвно налягане може да бъде измерена посредством манометър, свързан непосредствено с артерията, например посредством игла или катетър. Този начин обаче е увреждащ и сравнително сложен. Поради това се прилага само в специални случаи.

Макар да е по-точен директният метод на измерване не се прилага за рутинни цели, тъй като достатъчно точни измервания могат да бъдат направени и по индиректен начин. В медицинската практика широко се използва един *косвен* метод - **метода на Рива-Рочи**. Въпреки, че не е достатъчно прецизен, той има предимствата, че е неинвазивен и много прост за изпълнение, поради което е намерил широко приложение.



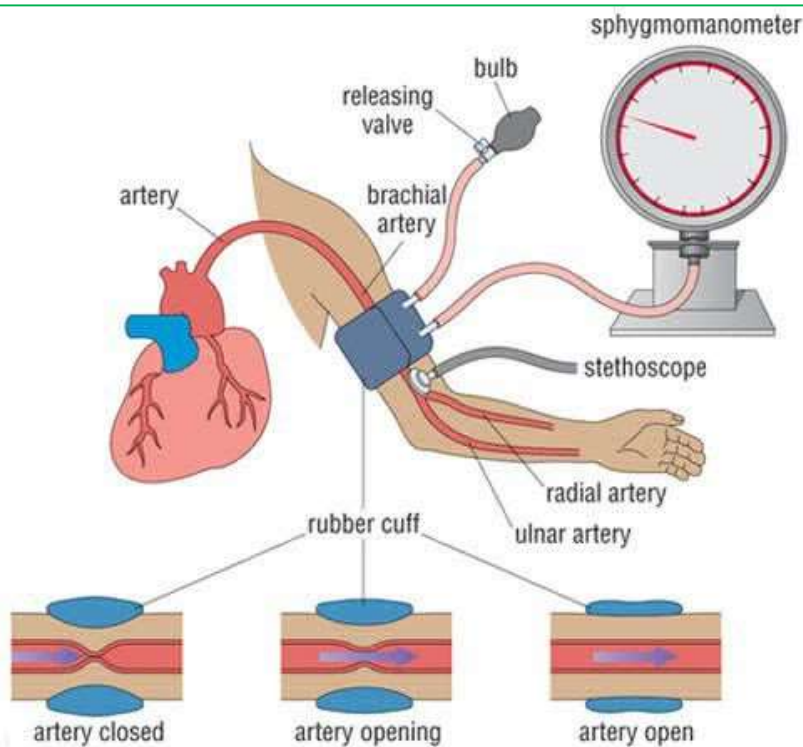
Измерваното с този метод артериално кръвно налягане ($P_{\text{кр}}$) не е абсолютното налягане на кръвта ($P_{\text{абс}}$), а разликата между него и атмосферното налягане ($P_{\text{атм}}$):

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}}$$

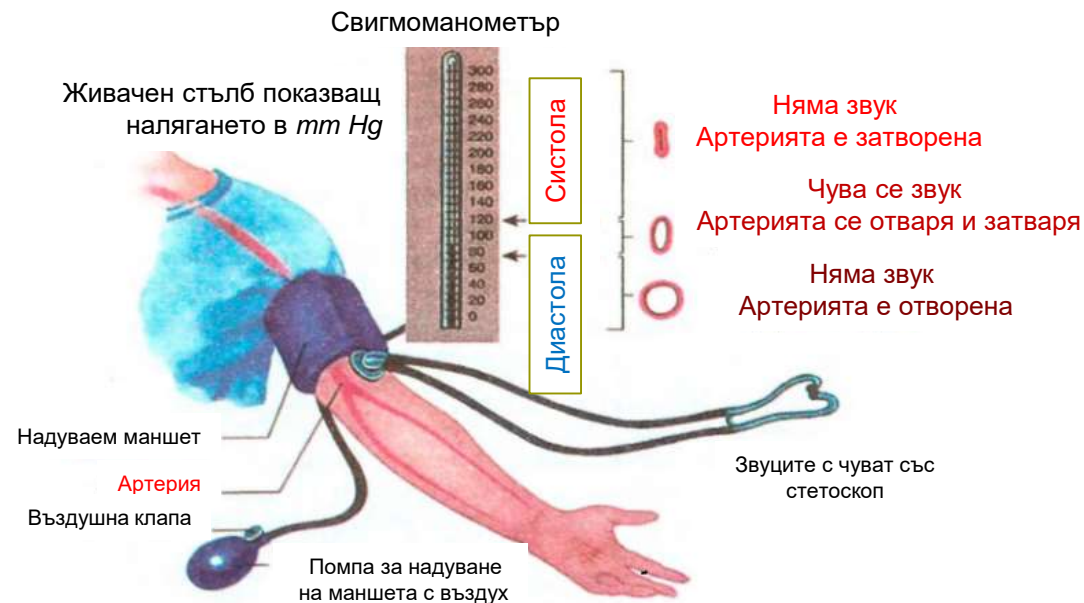
Това кръвно налягане всъщност е онази част от цялото абсолютно налягане, която движи кръвта в кръвоносната система. Останалата част, която е равна на атмосферното налягане, само противодейства на атмосферното налягане отвън, защото в противен случай последното би притискало съдовете, така че движението на кръвта през тях би било невъзможно.



Апаратът за измерване на кръвното налягане се нарича *сфигмоманометър*. Той се състои от маншет с манометър, който се надува от помпа с вентил.



Измерването се осъществява по следния начин. Посредством напompване на въздух в гумената маншета, обхващаща отвън ръката между рамото и лакътя, върху вътрешните кръвоносни съдове (*arteria brachialis*) към постоянно действащото отвън атмосферно налягане $P_{\text{атм}}$ се прилага и допълнително налягане P . Сумата от тези две налягания действа отвън навътре като външно налягане срещу вътрешното налягане на кръвта в кръвоносната система, което е насочено отвътре навън. Когато чрез промяна на допълнителното налягане P общото външно налягане ($P_{\text{атм}} + P$) се изравни с общото вътрешно ($P_{\text{кр}} + P_{\text{атм}}$), тогава допълнителното налягане P ще е равно на кръвното налягане $P_{\text{кр}}$, тъй като наляганята и отвътре и отвън имат една и съща компонента - атмосферното налягане $P_{\text{атм}}$.



Тъй като кръвното налягане $P_{кр}$ е пулсиращо и в различните фази на сърдечния цикъл има различни стойности, затова винаги се измерват две стойности. **Максималната** се достигана при систола и систолично налягане - $P_{кр}^{сист}$, а **минималната** при диастола и диасистолично налягане - $P_{кр}^{диаст}$.

Маншетът се надува до налягане P , достатъчно да спре потока кръв през брахиалната артерия и след това въздухът постепенно се изпуска. Първоначално допълнителното налягане е високо и притиска артерията така, че през нея не протича кръв. След това с изпускането на въздуха то постепенно започва да намалява. Стойността му непрекъснато се следи с помощта на манометъра. Когато общото приложено външно налягане ($P_{атм} + P$) стане равно на систоличното ($P_{атм} + P_{кр}^{сист}$), кръвта започва да си пробива път през притиснатата артерия и поради високата си скорост се движи турбулентно. Характерните звуци, съпровождащи този процес са синхронни със сърдечните систоли и могат да се чуят със стетоскопа. Стойността на допълнителното налягане в маншета, съответстваща на тяхната поява, се регистрира като систолично налягане $P_{кр}^{сист}$. Продължавайки да намаляваме на допълнителното налягане в маншета води до ламинарност на кръвния поток в артерията, при което тези звуци престават да се чуват. Стойността на допълнителното налягане в маншета, съответстваща на тяхното изчезване, се регистрира като диасистолично налягане $P_{кр}^{диаст}$.