



***Қанның қан
тамырларымен
қозғалысының
гемодинамикалық
заңдылықтары***

1. Қанның қан тамырларымен қозғалысының гемодинамикалық заңдылықтары.
2. Қан айналуы зерттеу әдістері.
3. Әртүрлі ағзалар мен ұлпалардың реографиясы.
4. Интегралдық және аймақтық реография туралы түсінік

Қан тамырлар жүйесіндегі қан
қозғалысын қарастыратын
биомеханика саласын
гемодинамика деп атайды.

Қан айналымның *гемодинамикалық көрсеткіштері* барлық жүрек қан тамырлар жүйесінің биофизикалық параметрлерімен, яғни жүректің негізгі сипаттамаларымен (мысалы, *қанның соққылық көлемі*), тамырлардың құрылымдық ерекшеліктерімен (олардың *радиусы және созылғыштығы*), қанның физикалық қасиеттерімен (*тұтқырлығы*) анықталады.

Сұйық *сығылмайды* (ρ *бірдей*), онда қандай да бір уақыт бірлігінде түтіктің кез келген қимасы арқылы сұйықтың бірдей көлемі ағып өтеді:

$$Q = \vartheta S = \text{const.}$$

$$\vartheta_1 S_1 = \vartheta_2 S_2$$

Бұл ағынның *үздіксіздік шарты* деп аталады.

Қан тамырлар жүйесінің кез келген қимасында қан айналымның көлемдік жылдамдығы тұрақты:

$$Q = \text{const.}$$

Цилиндрлік түтіктің тұрақты қималарындағы нақты сұйықтардың қалыпты ламинар ағыстары үшін

Гаген-Пуазейль формуласы:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{l}$$

Түтіктің гидравликалық кедергісі:

$$W = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$$

Радиустың 20%-ке кішіреюуі
қысымның екі есеге төмендейтінін
көрсетеді.

Қан тамырлар саңылауының аз
ғана өзгерісінің өзінде қысымның
төмендеуі байқалады.

Гидравликалық кедергі

Гидравликалық кедергі *түтік радиусына тәуелді.*

Тамыр түтігінің әр түрлі бөлігі үшін радиустар қатынасы:

$$R_{\text{аорт}} : R_{\text{ар}} : R_{\text{кап}} = 3000:500:1$$

Қан ағысының сызықты жылдамдығы

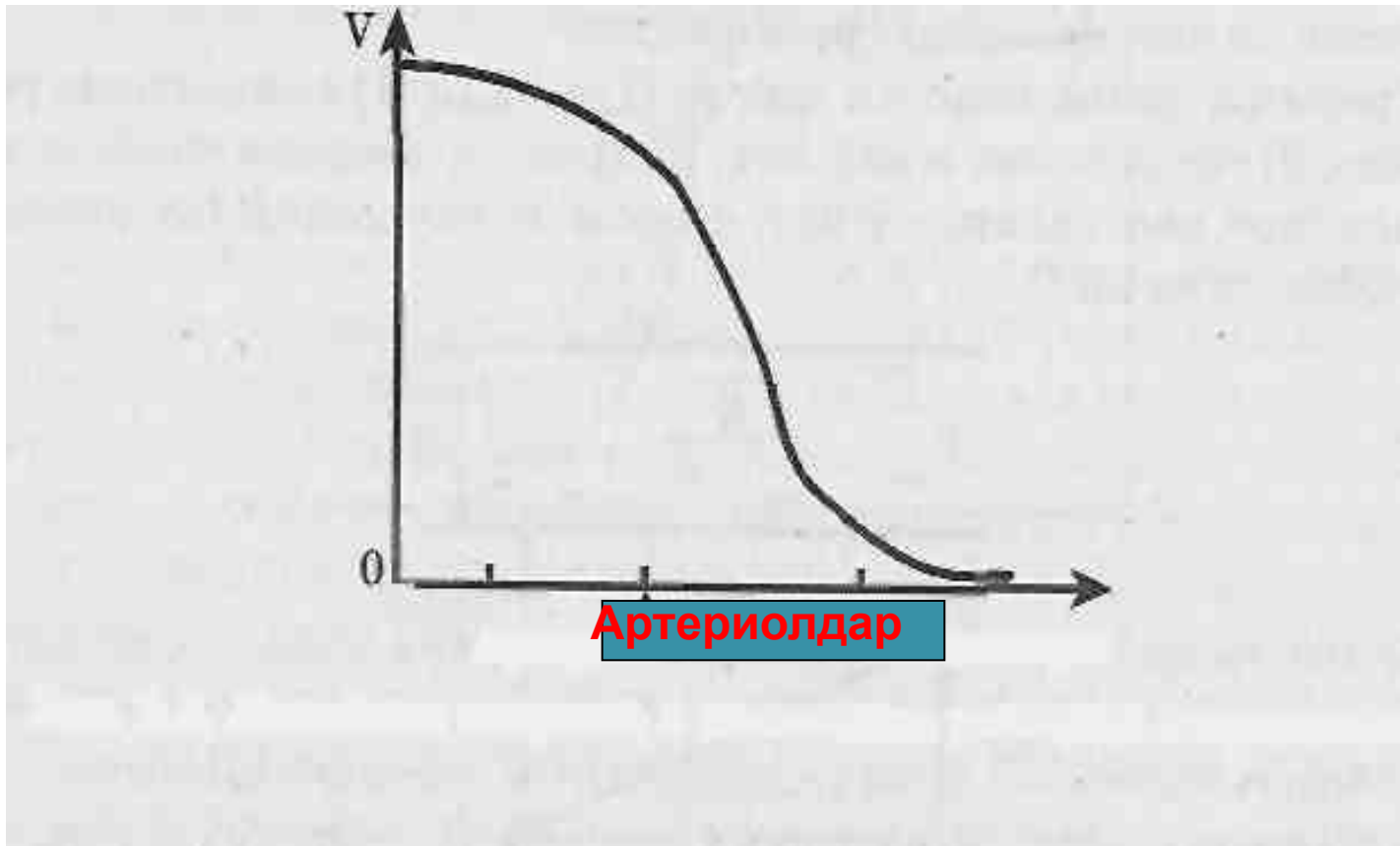
Капиллярлардың әрқайсысы өте жіңішке болғанымен бүкіл денедегі капиллярлардың жалпы жинақ саңылауы қолқа диаметрінен **500-600** есеге артық. Сондықтан капиллярларда қан ағысының сызықтық жылдамдығы қолқадағыдан сонша есе баяу.

$$v_{\text{кап}} = 1/500 v_{\text{қолқа}}$$

Капилляр қан тамырында қанның қозғалыс жылдамдықтары арқылы қан және ұлпа арасында зат алмасу жүреді.

Бұлардың қабырғалары өте жұқа, капилляр бір – ақ қабат эндотелийден тұрады, сондықтан да сұйықтар мен ерітінділер, қоректік заттар қаннан ұлпаға, ұлпадан қанға диффузия, сүзгі арқылы өтеді.

Қан тамырлар жүйесімен сызықтық жылдамдықтың таралуы



Орташа қысымның таралуы

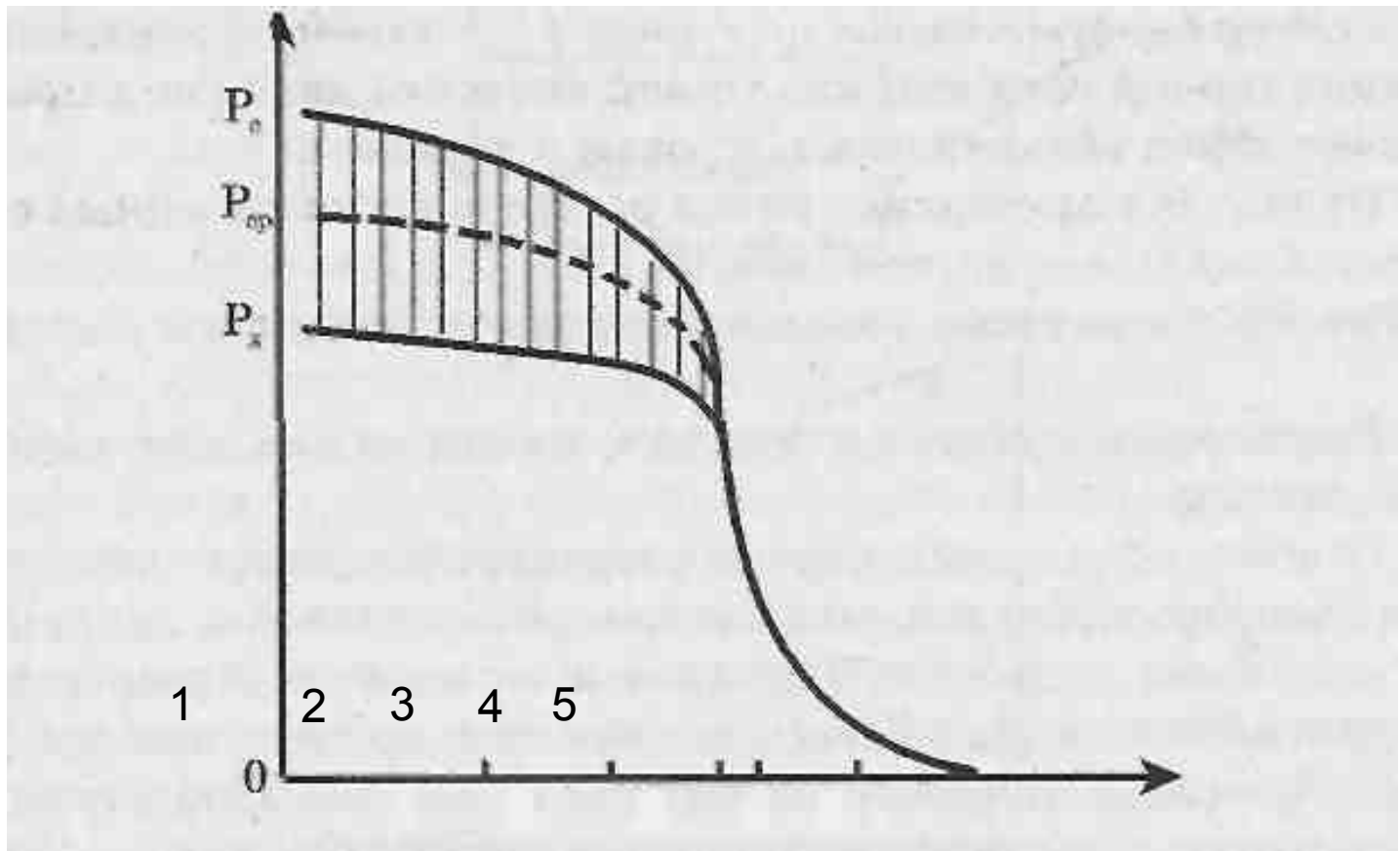
Қан тамырлары бойымен қанның қозғалысында орташа қысым төмендейді.

$Q = \text{const}$, ал $w_{\text{кап}} > w_{\text{арт}} > w_{\text{аорт.}}$, онда қысымның орташа мәні үшін:

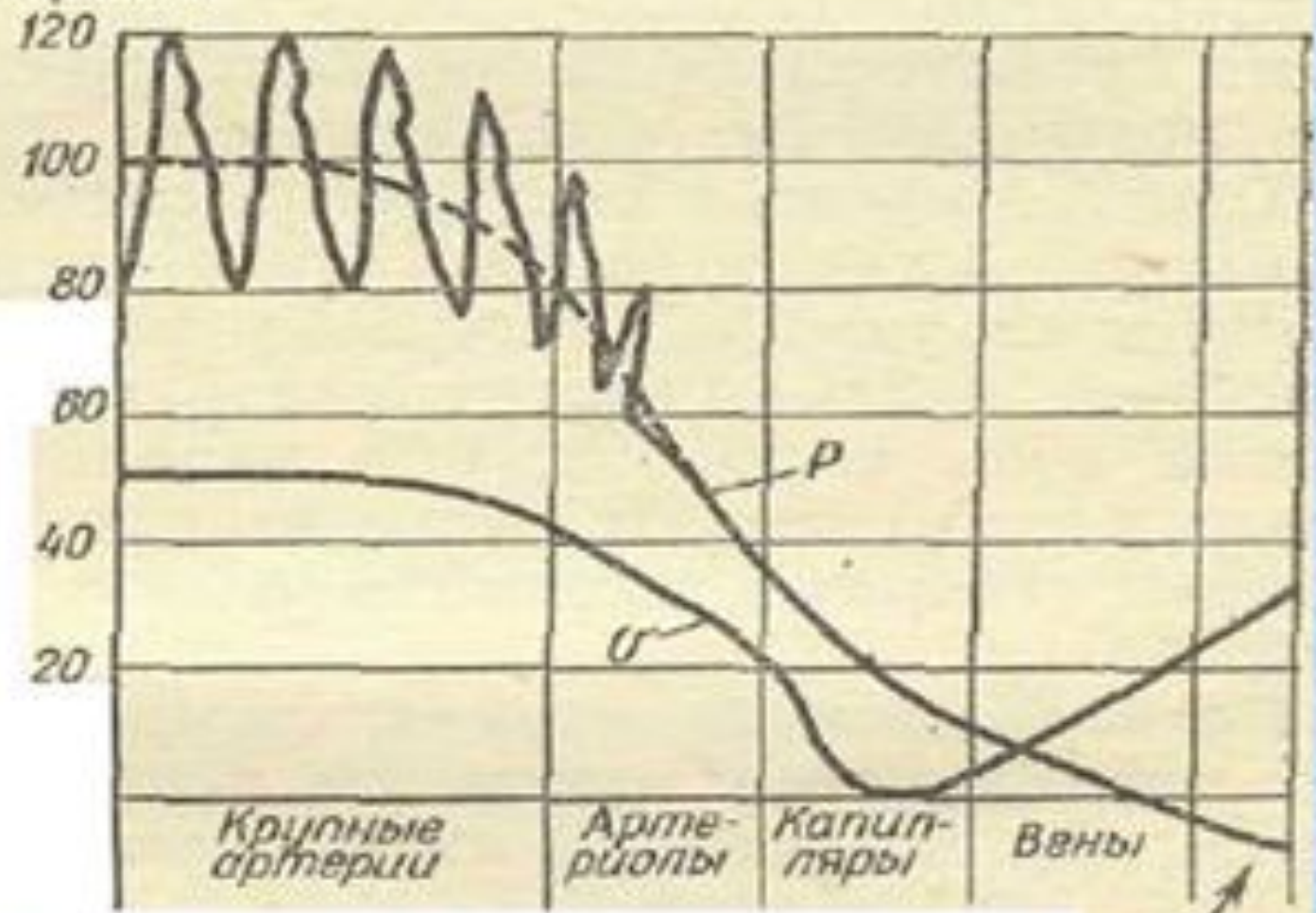
Ірі қан тамырларында орташа қысым *15%*-ке, ұсақ тамырларда *85%-ке* төмендейді. Бұл қан ағысын қамтамасыз ететін жүрек энергиясының басым бөлігі осы ұсақ тамырлардың кедергісін жеңуге жұмсалатынын көрсетеді.

Қысымның таралуы

1 - қолқадағы, 2 – ірі артерияда, 3 - ұсақ артерияда, 4 - артериолада, 5 - капиллярдағы қысымның шамалары



$P, \text{ мм рт.ст.}$

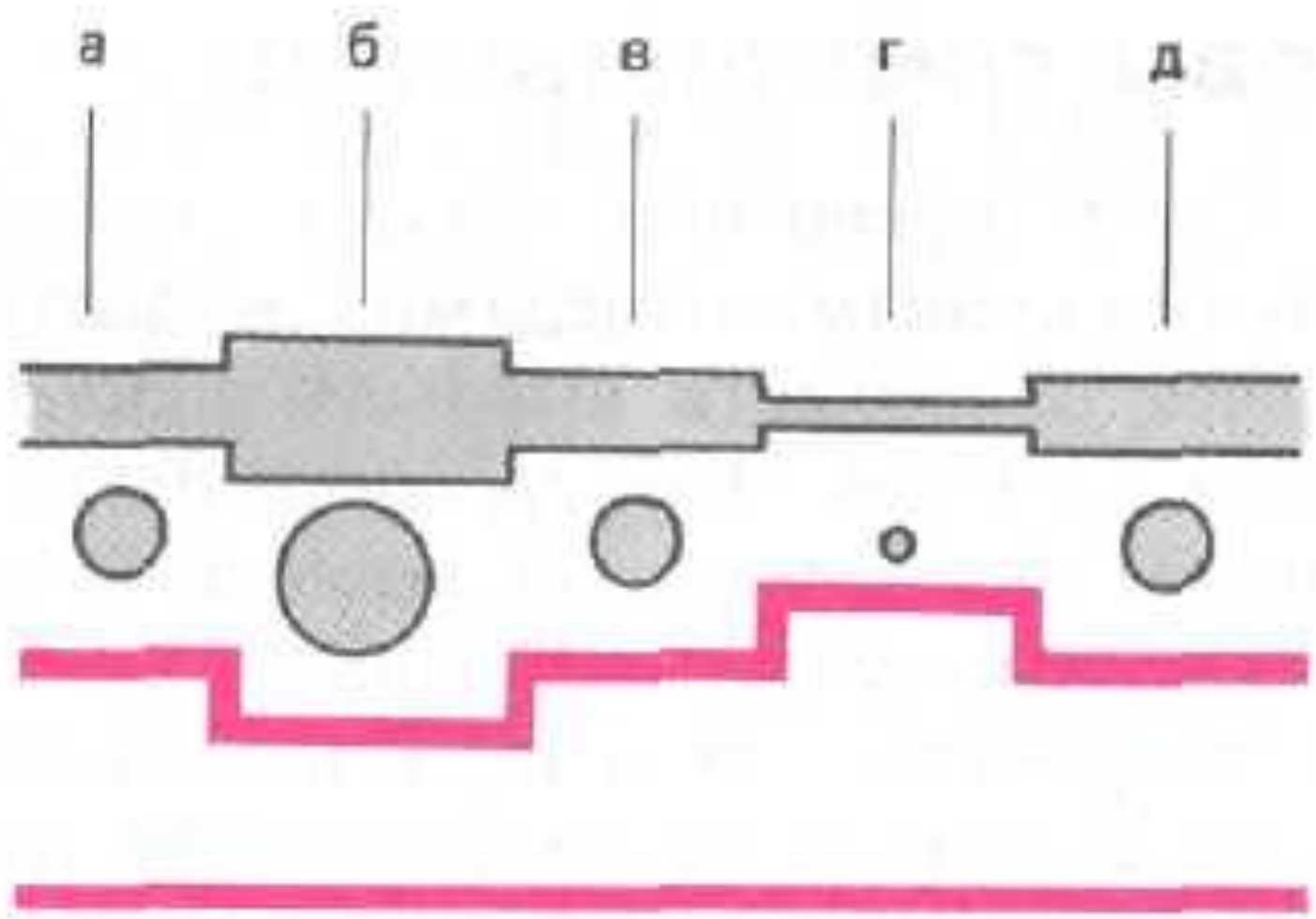


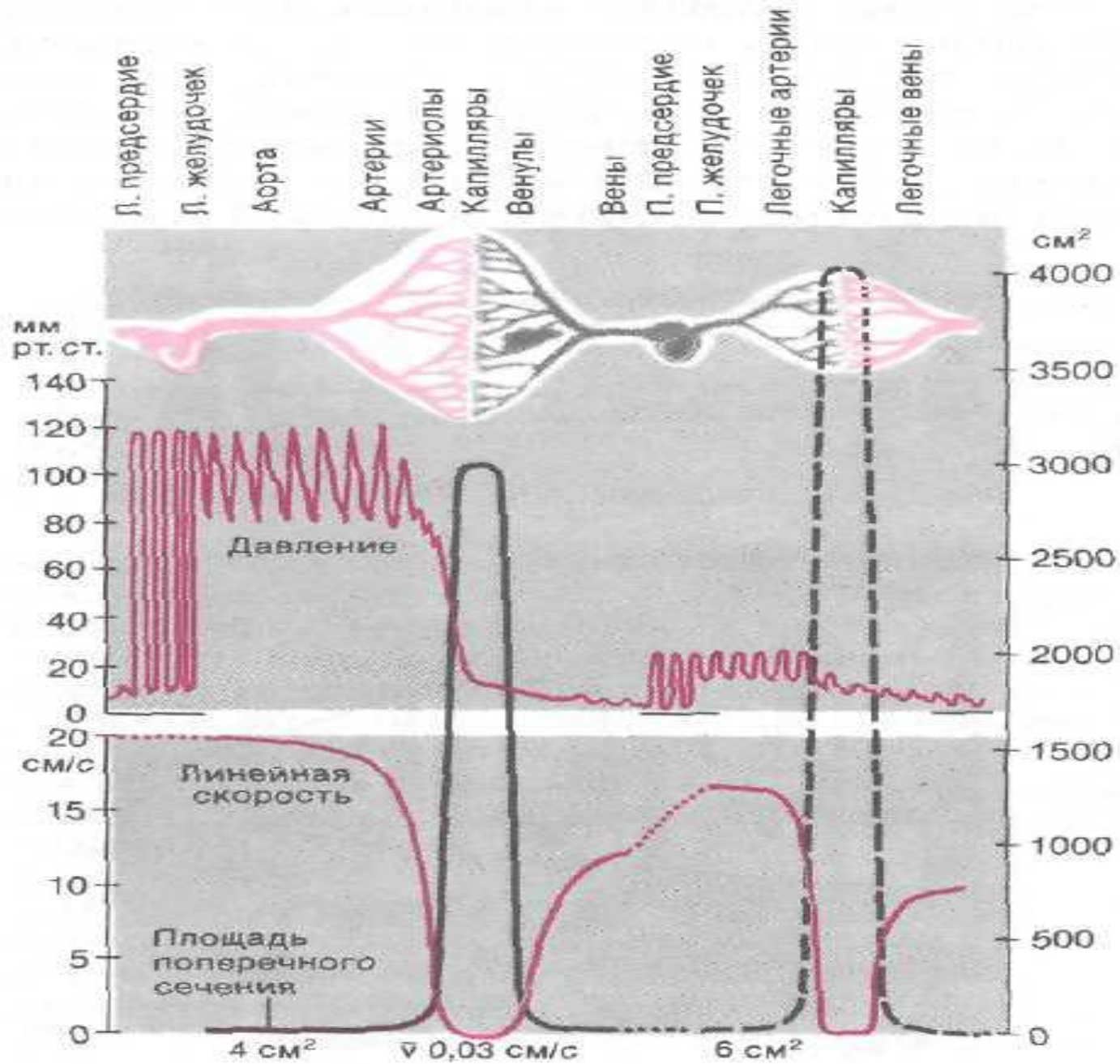
Крупные артерии

Артериолы

Капилляры

Вены





Қан тамырлар жүйесінің моделі

Жүректі импульстік режимде жұмыс атқаратын *насос* ретінде қарастыруға болады.

Қанды айдайтын насос – біздің *жүрегіміз*.

- аорта
- артериола
- капилляр
- венула
- веналар

Қан тамырлар жүйесінің негізгі қызметі – капиллярдағы қанмен ұлпалар арасында *зат алмасу процесін* қамтамасыз ететін қанның үздіксіз қозғалысы.

Артериолалар – капиллярдағы қанның ағысының гемодинамикалық көрсеткіштерін реттеп отырады.

Артериолалар қан тамырлар жүйесінің «жапқышы».

Сондықтан *аорта* және *артерия* дененің әр бөлігіне қанды жеткізе отырып, өткізгіш ролін атқарады.

Вена тамыры бойынша *қан жүрекке* құйылады.

Жүйеде бір бірімен байланысты бір мезгілде әр түрлі үрдістер өтеді:

□ жүректің сол қарыншасынан *аортаға қанның түсуі* және тамыр бойымен *қанның ағысы*;

□ *қан қысымының* және тамыр қабырғасындағы *механикалық кернеудің өзгерісі*;

□ қан тамырлар жүйесінің элементтерінің *формасы мен көлемінің өзгерісі*;

Франк моделі. Пульстік толқын

Систола кезінде (жүректің жиырылуы) қан сол қарыншадан аортаға және одан әрі ірі артерияларға шығарылады.

Қарынша *диастоласы* кезінде (*жүректің босаңсуы*) аортаның қақпашалары жабылып, жүректен ірі қан тамырларына қарай қанның ағысы тоқталады.

Франк моделі бойынша қан айналымның үлкен шеңберінде ірі қан тамырлары *гидравликалық кедергілері аз және қабырғалары созылмалы бір жүйеге біріктірілген.*

Қалған барлық ұсақ қан тамырлары – тұрақты гидравликалық кедергілері бар жай (жесткую) түтікке бірігеді.

Пуазейль теңдеуі бойынша қан ағысының перифериялық тамырлар арқылы ағатын *көлемдік жылдамдығы*

мынаған тең:

$$Q = \frac{P}{X} \quad (1)$$

$$Q = \vartheta_{kp} \cdot S \quad (2)$$

Теңдеудің сол жағындағы
интеграл қан айналымның үлкен
шеңберіндегі жүректің бір
жиырылуындағы сол қарыншадан
аортаға шыққан

қанның соққылық көлемі

$$\int_0^{T_0} Q_c dt = \frac{1}{X} \int_0^{T_0} p dt$$

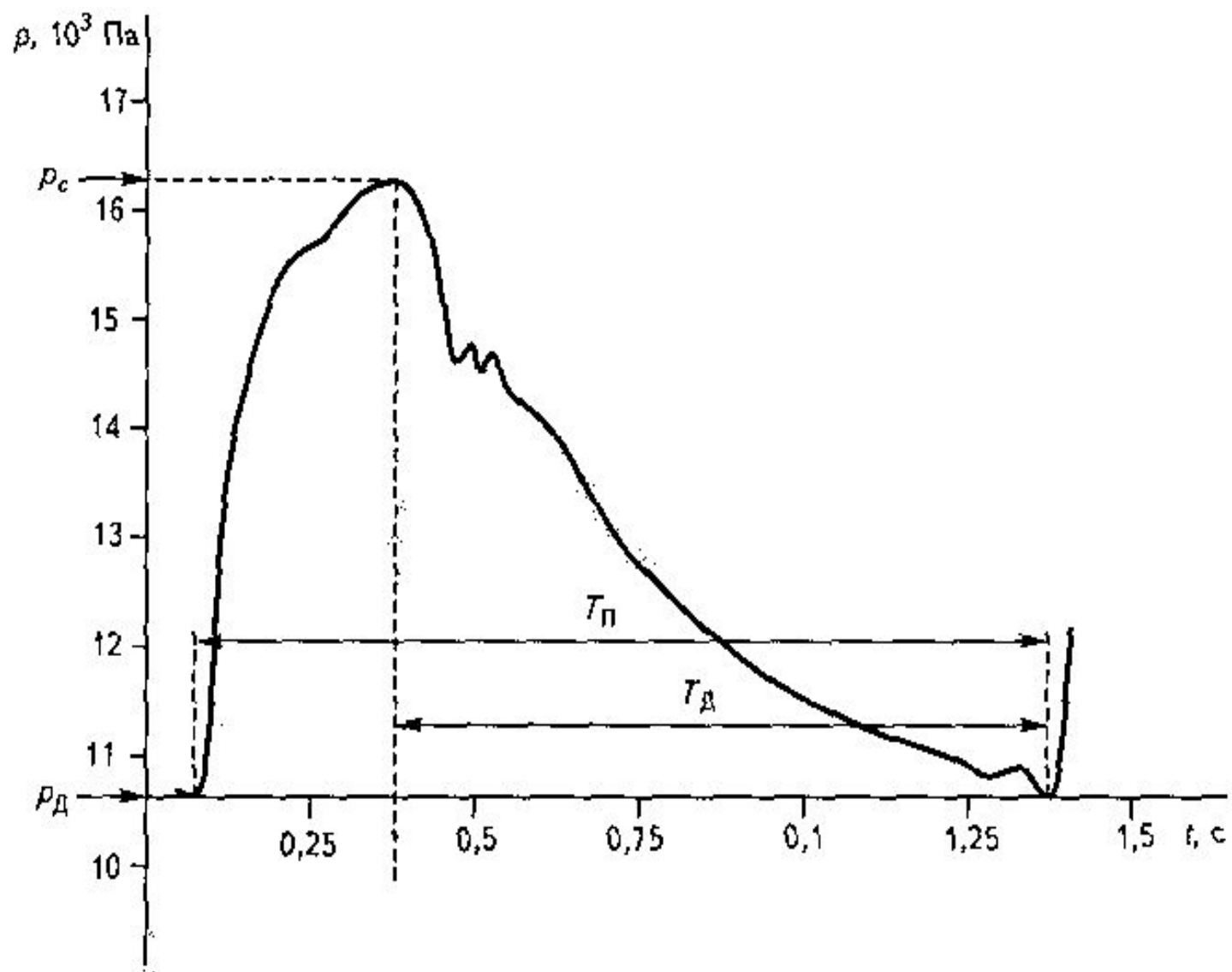


Рис. 8.3.2 Пульс сонной артерии

Жүрек циклының (*диастола кезіндегі*)
перифериялық тамырлардағы қан ағысының
көлемдік жылдамдығының уақыттан тәуелділігі

$$Q = Q_{cис} \exp\left(-\frac{t}{CX}\right)$$

мұндағы $Q_{cис} = \frac{P_c}{X}$ — *систола*ның

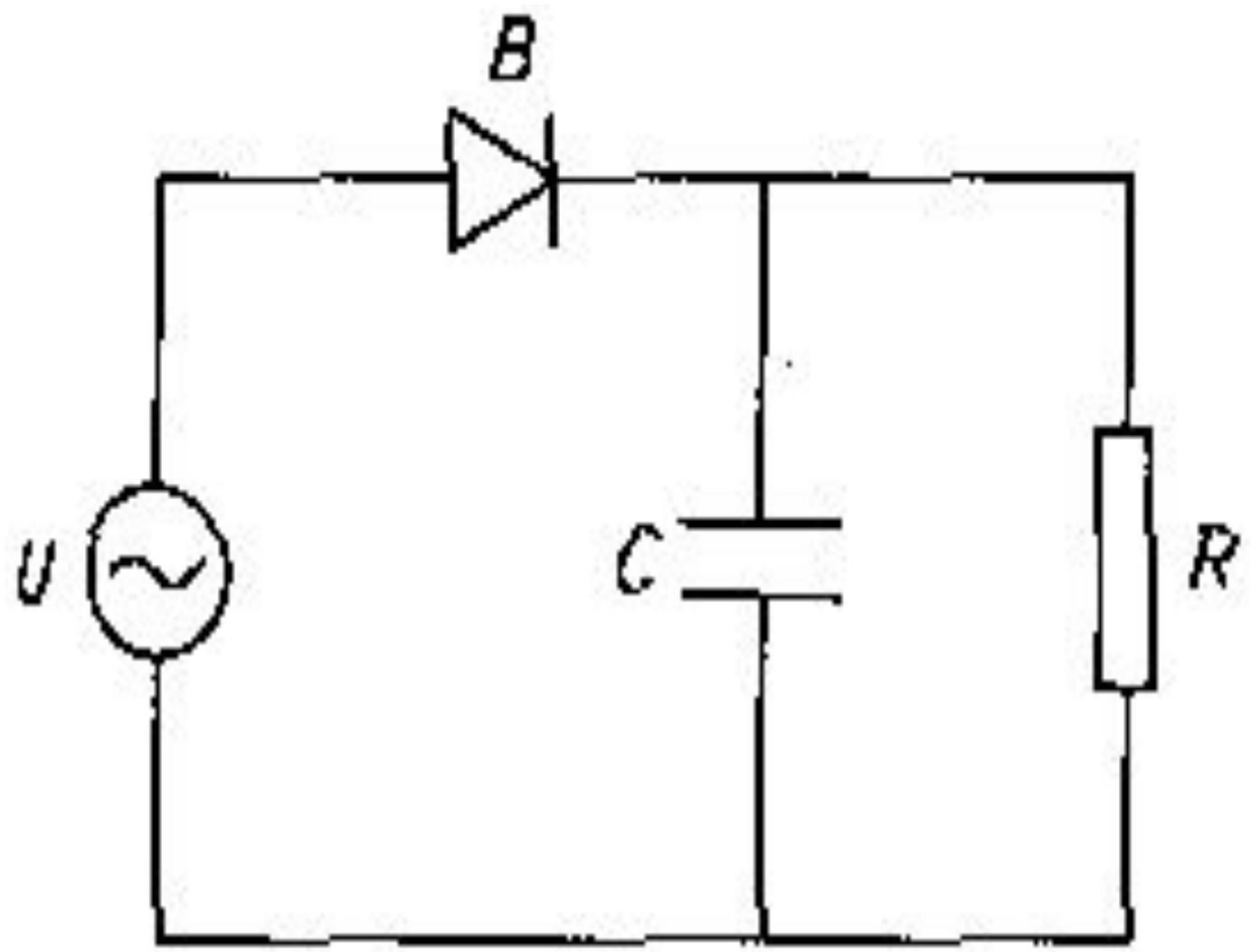
соңындағы (*диастоланың басы*) қан ағысының
көлемдік жылдамдығы

Қан айналууды моделдеу үшін *аналогтық электр схемасы* қолданылады.

Айнымалы кернеу көзі тізбекте тоқ тербелісін құрады, ал түзеткіш тек бір ғана бағыттағы токты өткізеді.

Осыған ұқсас *жүрек қақпашалары* қарыншадан шығатын қанды аортаға өткізеді, ал қанды кері бағытта өткізбейді.

Конденсатор резистор арқылы өтетін электр тогының тербелісін бір қалыпқа келтіреді, осыған ұқсас *созылмалы артериялар* қысым тербелісін ұсақ тамырларда қалпына келтіреді.



Қарыншадан қанның шығарылуы
аорта қабырғаларының *СОЗЫЛУЫМЕН*
және оның қабырғаларындағы
кернеудің артуымен жүргізіледі.

Артерия мен артериол
тармақтарының соңғы аумақтарына,
яғни пульстік ағын біртіндеп *үздіксіз*
ағынға айналғанға дейін үрдіс
төмендей отырып жалғасады.

Осылайша тамырлар бойымен *пульстік толқын* деп аталатын тербеліс қысымы таралады. Қабырғаларының созылғыштық дәрежесі үлкен және қанның тұтқырлығы көп болған сайын пульстік толқын таралуы бәсеңдейді.

.

Пульстік толқын – жүректің бір соғу фазасында аорта мен артерия тамырлар бойымен жоғары қысымда таралған қан толқындары. Пульстік толқынның таралу жылдамдығы қанның және тамырдың қасиетіне тәуелді.

$$g_{II} = \sqrt{\frac{Eh}{2r\rho}}$$

мұндағы тамыр қабырғасы материалының E – Юнг модулі, h – қалыңдығы, r – радиусы,
– қанның тығыздығы

Сондықтан түтіктің *серпімділік модулі* көп болған сайын, пульстік толқынның таралу жылдамдығы *жоғары* болады.

Олай болса, *аортада* пульстік толқынның таралу жылдамдығы-
4 - 6 м/с, *серпімділігі аз артерияда* –
8-12 м/с.

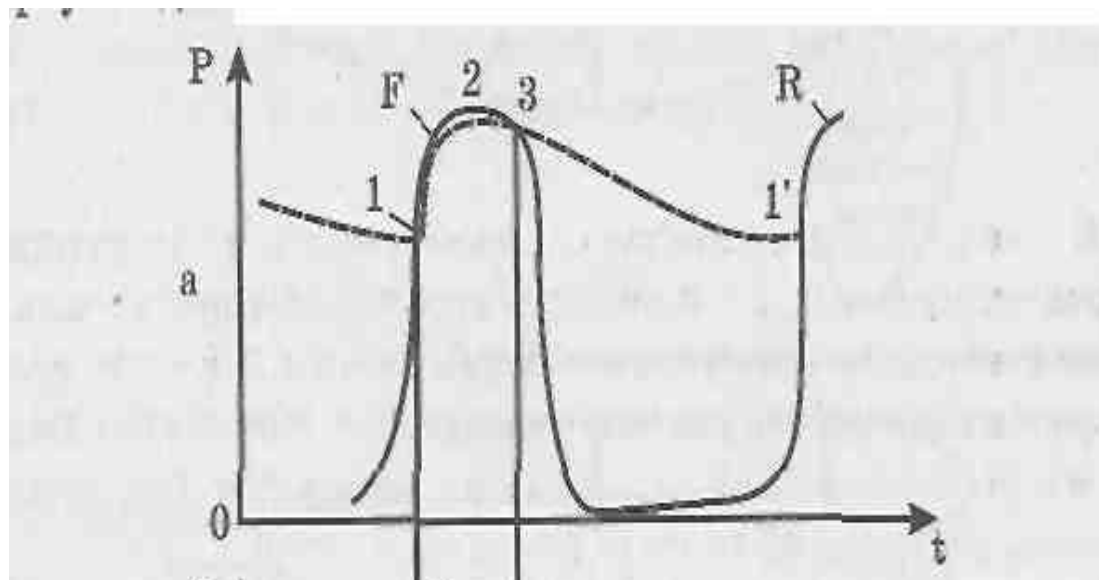
Серпімділігі жоғары веналарда пульстік толқынның ұзындығы аз, таралу жылдамдығы шамамен 1 м/с.

Пульстік толқынның таралу жылдамдығы *(6... 12 м/с)* қан ағысы жылдамдығынан (0,3...0,5 м/с) *20—40 есеге үлкен.*

Пульстік толқынға ұқсас (қысым тербелісі), қан тамырлармен *дыбыс толқындары 1500 м/с* жылдамдықпен таралады .

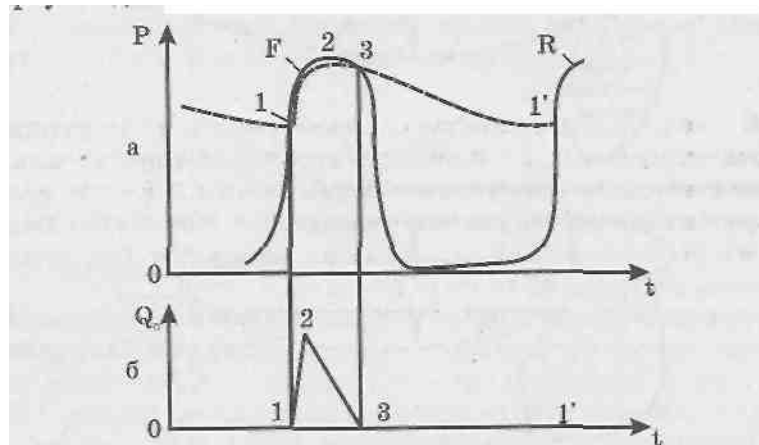
1-ші фаза – аорта қақпашаларының ашылып, жабылғанға дейінгі кезеңінде *жүректен* қанның *аортаға* ағу фазасы.

Жүректен шыққан қанның *ірі қан тамырларына түсуі* олардың қабырғасын созылғыштық қасиетіне қарай *кеңейтеді* және қанның бір бөлігі ірі тамырларда жинақталады, қалған бөлігі *ұсақ тамырларға* өтеді.

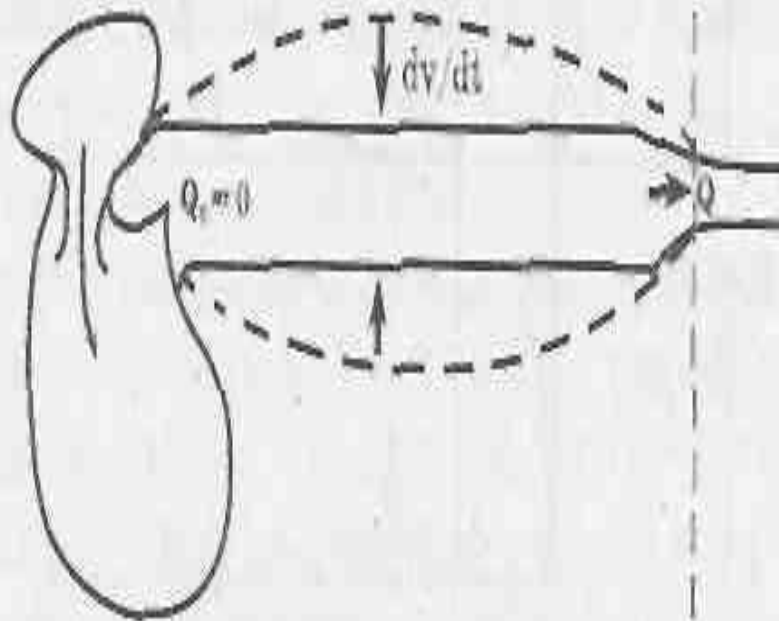


2-ші фаза – қолқаның қақпашаларының жабылып, қанның ірі тамырлардан ұсақ тамырларға өтуі.

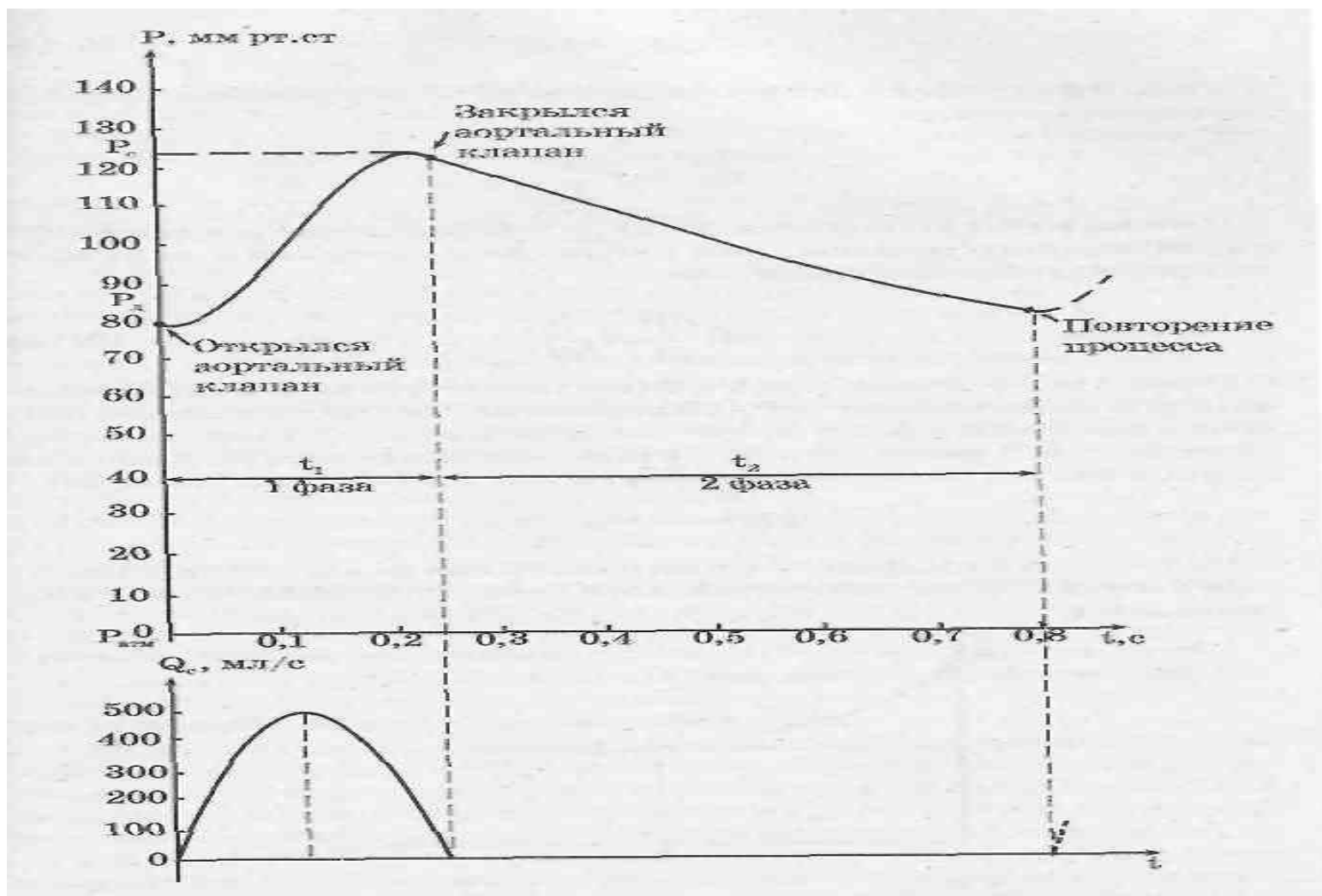
Осы фаза уақытында ірі қан тамырлар қабырғасы *серпінділігінің* нәтижесінде *бастапқы күйіне* қайта оралып, қанды *микротүтіктерге ығыстырып* шығарады. Осы уақытта *сол жүрекшеден сол қарыншаға* қан құйылады.



б. 2 фаза. Аортальный клапан закрыт, $Q_c = 0$



Қолқадағы 1-ші фазадағы $Q_c(t)$ параболалық өзгерісі



Қолқа қақпашаларының жабылу
кезеңіндегі ірі қан
тамырларындағы *қысымның*
өзгеру заңы:

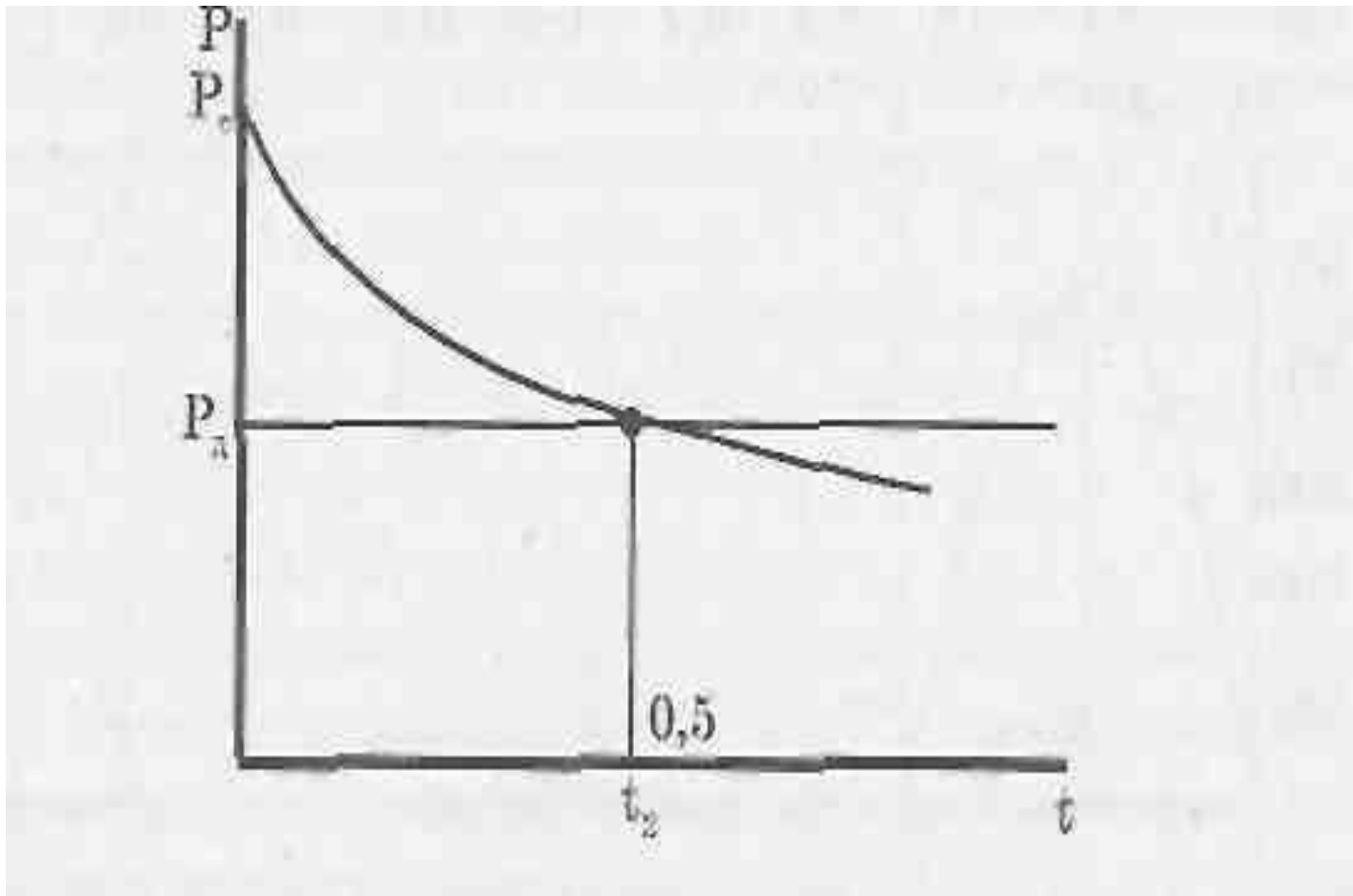
$$P(t) = P_c \cdot e^{-t/wc}$$

(t_2) уақыттан кейін қысым
диастолалық қысымға дейін
төмендейді.

$$P_D = P_c \cdot e^{-t_2 / \tau_c},$$

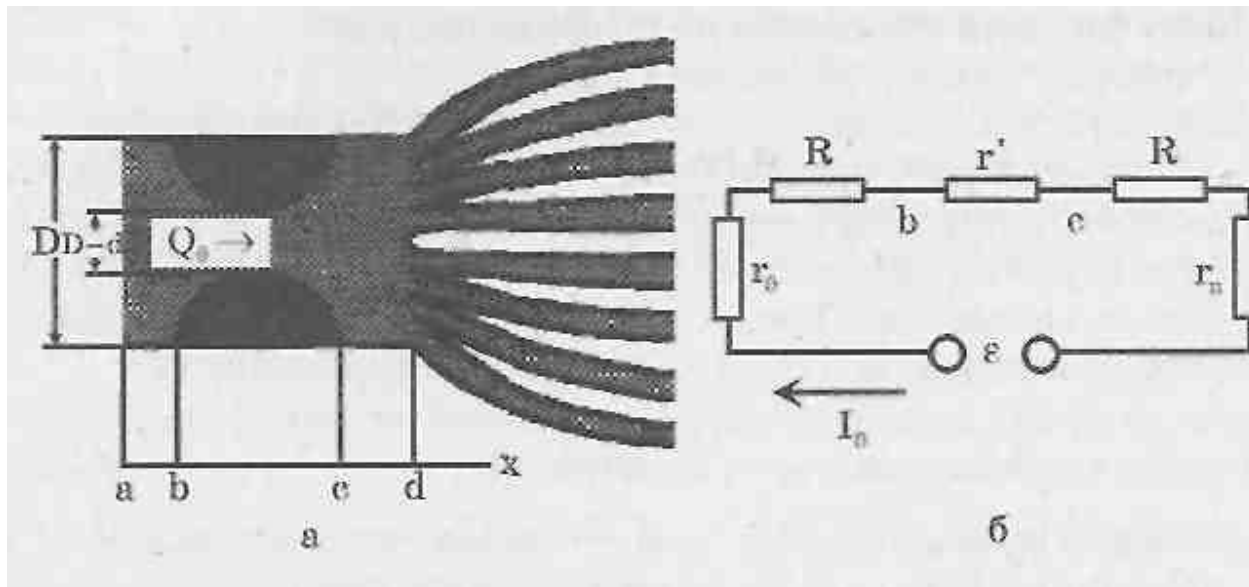
2 –ші фаза аяқталып, *1 –ші фаза*
қайта басталар кезінде қақпашалар
қайта ашылады.

Аортаның қақпашалары жабылғаннан кейінгі ірі қан тамырларындағы қысымның уақыттан тәуелділігі



Эквивалентті электр схемасы

1. Ірі тамырлардың тарылуы

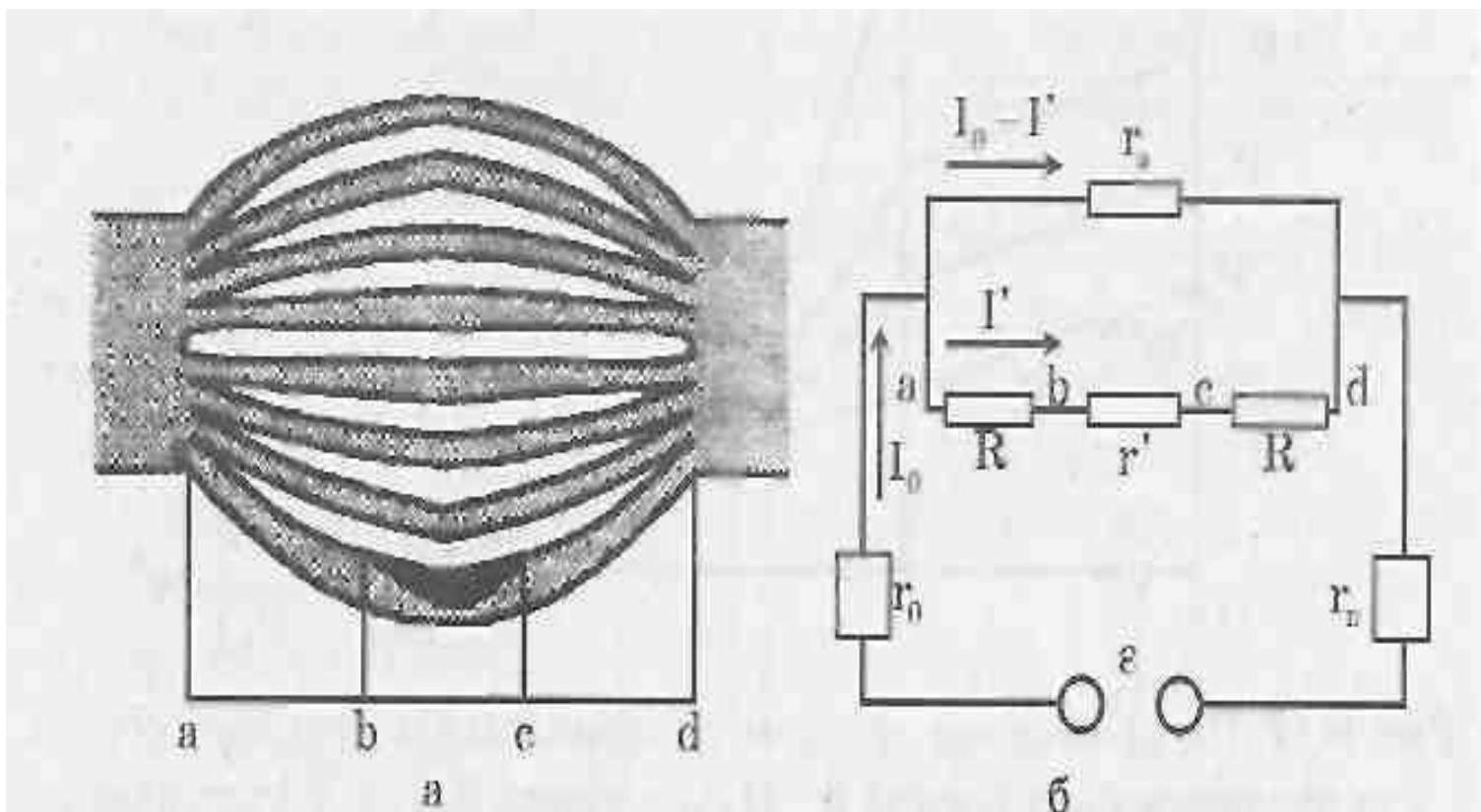


bc бөлігінде тамырдың тарылуы өтеді

Ірі қан тамырларының тарылуынан жүректің сол қарыншасында қысымының *көтерілуін* байқауға болады. Егер ірі тамырларда тромба түзілгенде жүректің сол қарыншасынан үлкен қысыммен қан лақтырылмаса, онда осы түтіктің соңында қысым (d нүктесінде) нормадан төмен болады. Нәтижесінде, жасушааралық сұйық пен плазма көлемдерінің арасындағы фильтрационды реабсорбциялық тепе-теңдіктің бұзылуына ықпал ететін *гидростатикалық капиллярлы қысым* P_a төмендейді.

2. Тармақталған жүйенің ұсақ тамырларының біреуінің тарылуы

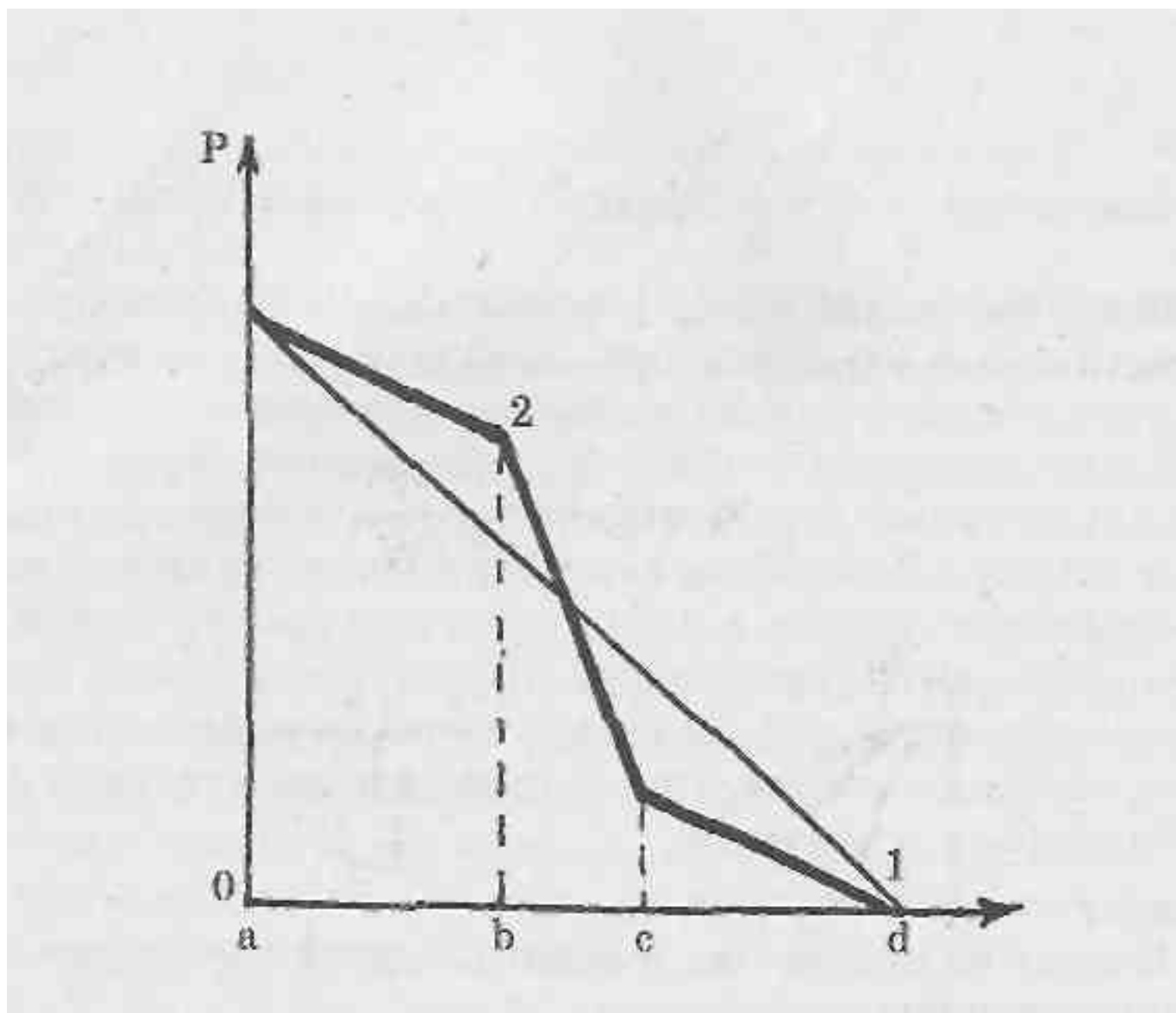
Тармақталған жүйенің ұсақ тамырларының біреуінің тарылуы (тромбаның түзілуі)



Зақымдалған тамырлар бойымен *қысымның төмен түсу* сипатамасының өзгеруі: гидравликалық кедергінің артуынан тамырдың тарылған бөлігі бойынша ΔP қысым артады және зақымдалған тамырдағы қан ағысының азаюуынан ΔP қысым азаяды.

Қысымның төмендеуін және қан ағысының *көлемдік жылдамдығын* есептеу.

Тромбаның түзілуі капилляр бойымен қысымның түсуінің сызықтық тәуелділігінің бұзылуына ықпал етеді. Стандарттық мәнімен салыстырғанда капилляр бойымен гидростатикалық қысымның градиенті өзгереді: ab және cd бөлігінде азаяды және bc бөлігінде бірден көтеріледі.

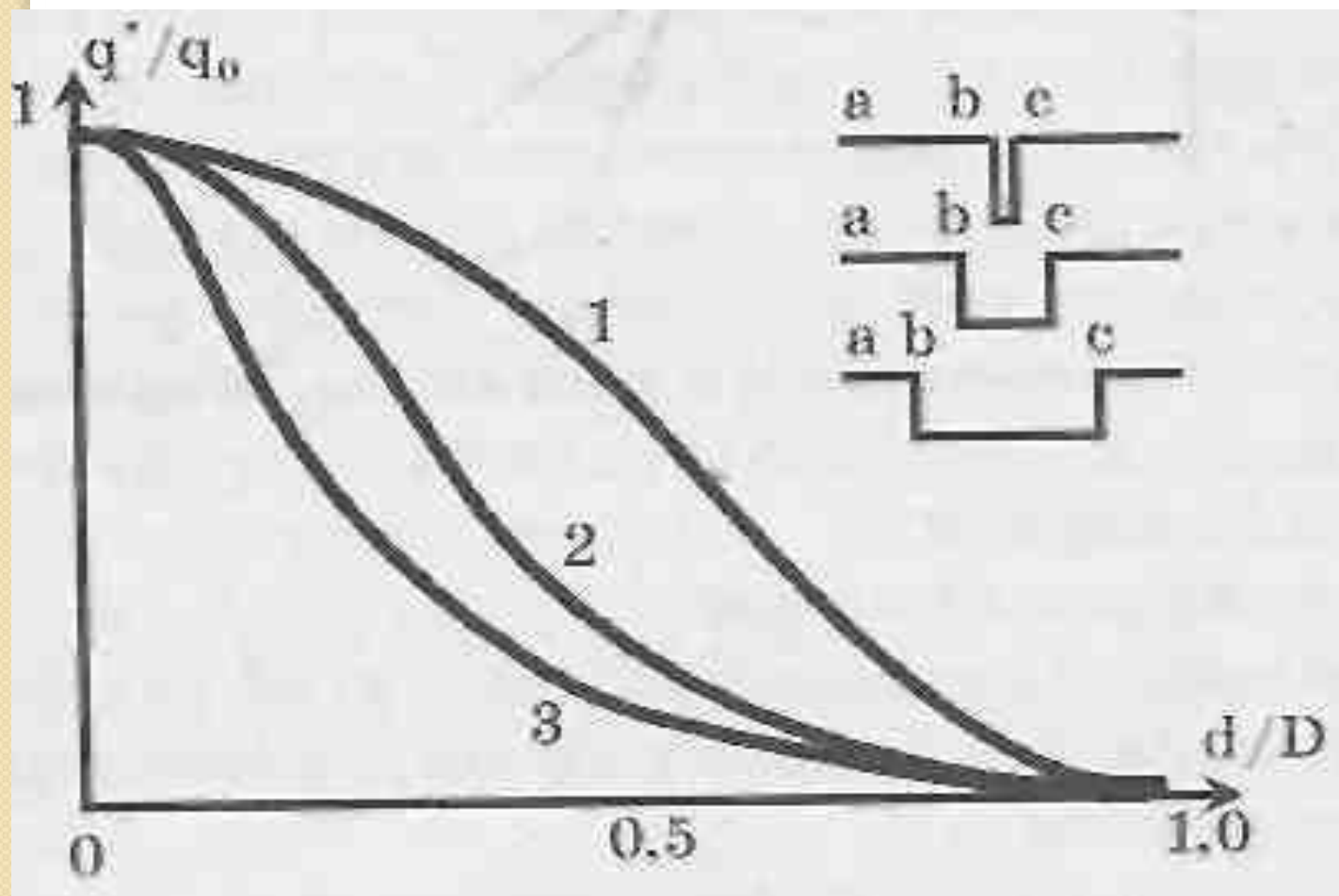


Қан ағысының көлемдік жылдамдығы

Тамырдың жарық саңылауының азаяуы қан тамырларындағы қан ағысының бірден түсуіне ықпал етеді. q' –дің сызықты емес d –дан тәуелділігі. ($d=0$) тарылу болмаған кезде, онда түтікте қан ағысы өзгермейді:

$q' / q_0 = 1$. Егер жарық саңылауы нолге азаятын болса, (тромб түтікті толығымен жабады, $d = D$), онда бұл түтікте қан жүрмейді

$$q' = 0.$$



Капиллярдағы тромбаның түзілуі ағзаға
иондалған сәуленің әсер ету нәтижесінде
өтеді.

Зақымдалған тамырлардағы қан ағысы
жылдамдығының кемуі қан мен ұлпа
арасындағы
зат алмасудың қарқындылығының
төмендеуіне
ықпал етеді.

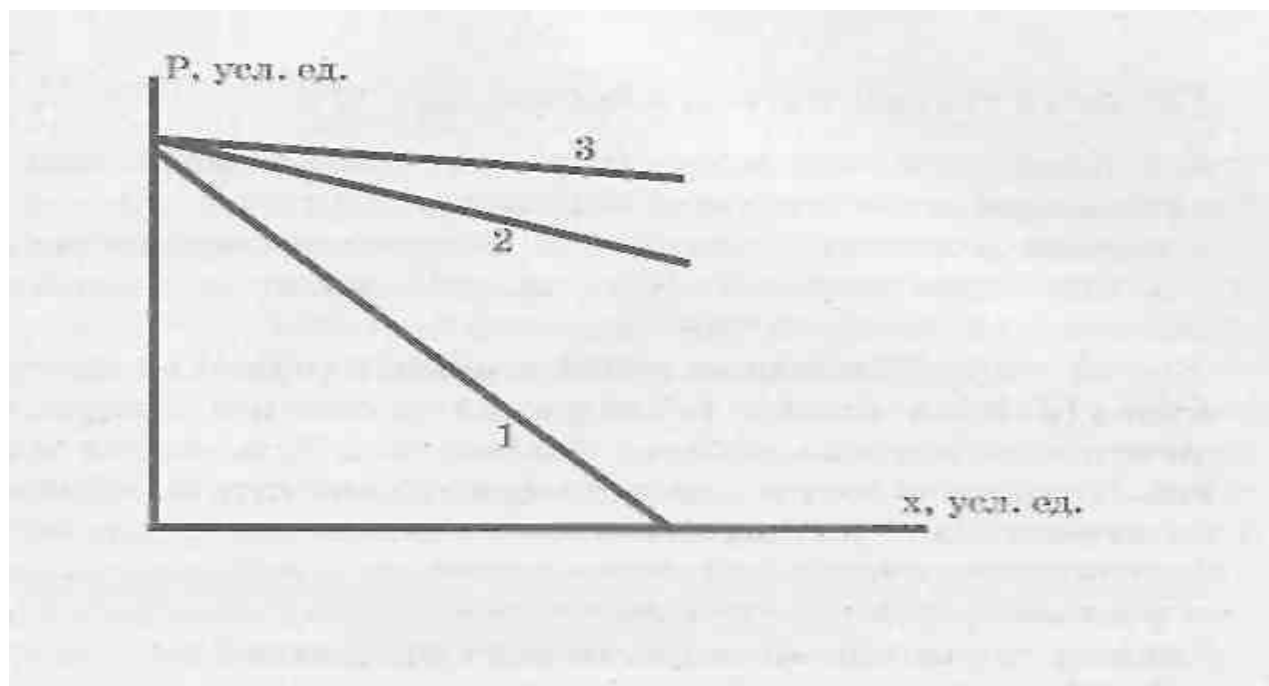
Тамырлардың бір қалыпты емес тарылу салдарынан (немесе локальды кеңейтілуден) қан ағысының *турбулентті қозғалысы* пайда болуы мүмкін. Турбулентті қозғалыс *тромбоциттердің тұнбаға түсуіне және агрегаттық (тромбаның түзілуі)* түзілу үшін жағдай жасайды.

3. Қан тұтқырлығының өзгерісі

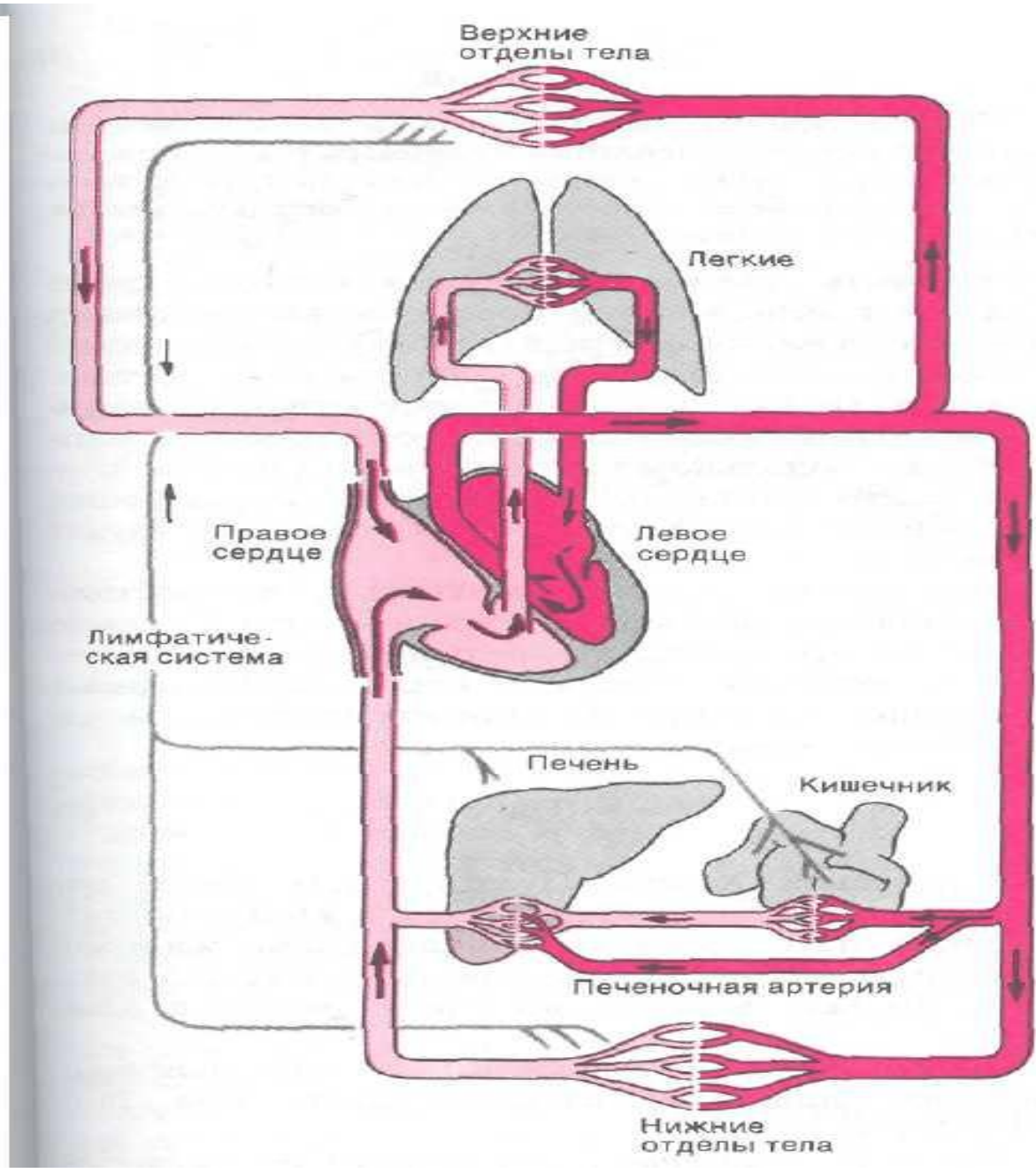
- егер қан тұтқырлығы өзгерсе, онда тамыр түтігінде қысымның төмен түсуі өзгереді.
- тұтқырлықтың артуынан ол сызықты өседі.
- қалыпты және кейбір аурулар кезіндегі тамыр түтігі бойымен қысымның таралуы келтірілген

*Әр түрлі қан тұтқырлығы үшін
тамыр бойымен қысымның таралуы*

$$\eta_1 > \eta_2 > \eta_3.$$



$$P_1 < P_2, P_3 > P_2,$$



Реография

Ағзалардың қанға толуын ұлпаның *электр кедергісін тіркеу* арқылы анықталады. Тамыр түтіктерінің қанға толуы ұлғайғанда, олардың электр тогына кедергісі *төмендейді*.

Толық электр кедергісін – *импедансты* тіркеу (*сыйымдылық және омдық кедергінің қосындысы*) систола кезінде жеке мүшелердің қанға толуын анықтауға мүмкіндік береді.

Жүрек қызметінің үрдісі
кезіндегі импеданс өзгерісін
тіркеуге негізделген
диагностикалық әдісті
реография деп атайды
(импеданс-плетизмография).

Бұл әдістің көмегімен мидың
(*реоэнцефалограмма*), жүректің
(*реокардиограмма*), негізгі қан
тамырларының, өкпенің,
бауырдың және буындардың
реограммасын алады.

Биологиялық жасушаның, яғни тірі ағзаның сымдылық қасиеті болуы себепті ағза ұлпасының импедансы тек *активті және сыйымдылық кедергілері* арқылы анықталады.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad X_L = \omega L$$

Бір мезгілде денеге тоқты тіркейтін
потенциалды электродтар

жапсырылады. Дененің электрод
жапсырылған бөлігінде кедергі көп
болған сайын, толқын аз болады.

Ұлпаның *берілген бөлігі қанмен
толтырылғанда* кедергісі азаяды,
өткізгіштігі артады, яғни бұл
тіркелетін токтың артуын көрсетеді.

*Реовазограмманың систолдық
толқынның амплитудасы:*

шықта 0,07-0,10;

қол саусақтарында – 0,11-0,15;

бөкседе – 0,05-0,06;

тізеде – 0,08-0,12;

аяқ табанында 0,10-0,13 Ом.

Реоплетизмография – жоғары жиілікті (*40- 500кГц*) және аз мәндегі (*10мА –ден аз*) айнымалы токқа

ағза ұлпасының кедергісін тіркеу арқылы

мүшелердің қан айналымын зерттеу.

Систолалық (сонымен қатар жүректің минуттік көлемін) анықтау үшін **интегралдық реография** деп аталатын әдіс қолданылады.

Интегралдық реография әдісі *базалық импеданстың өзгерісіне* негізделінген.

Барлық дененің немесе қандай да бір региондағы (аймақтық) базалық импедансын өлшеу.

Реография *хирургияда* (тамырдың өткізгіштігін диагностикалау үшін), *терапияда* (СК, МҚК және басқа көрсеткіштерді анықтау үшін) және *акушерствада* қолданылады.

Әдебиеттер:

1. Арызханов Б., "Биологиялық физика", 1990 ж.
2. Самойлов В.О. "Медицинская биофизика", С-П, 2007г.
3. Тиманюк В.А., Животова Е.Н. "Биофизика", Киев, 2004г. с.231-255
4. Ремизов А.Н. «Медицинская и биологическая физика», М., 2004г.

Бақылау сұрақтары:

- ✓ Қанның қан тамырларымен қозғалысының негізгі гидродинамикалық заңдылықтары қандай?
- ✓ Қан тасымалдаушы жұлгелер бойымен қан қозғалысының физика-математикалық заңдылықтары қандай?
- ✓ Пульстік толқынның таралуы қалай жүреді?