

№3 дәріс.

*Қан қозғалысының
гемодинамикалық
заңдылықтары. Қанның
реологиялық қасиеттері.*

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

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

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

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

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

Бұл ағынның үздіксіздік шарты деп аталады.

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

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

Гаген-Пуазейль формуласы:

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

Түтіктің гидравликалық кедергісі:

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

$$\Delta P = Qw.$$

Тамырлардағы қан қысымының түсуі
қан ағысының көлемдік жылдамдығына
және тамыр радиусының дәрежесіне
тәуелді.

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

Гидравликалық кедергі

- w - гидравликалық кедергі *түтік радиусына тәуелді*. Тамыр түтігінің әр түрлі бөлігі үшін радиустар қатынасы:

$$R_{\text{аорт}} : R_{\text{арт}} : R_{\text{арл}} : R_{\text{кап}} = 3000 : 500 : 7 : 1.$$

- Гидравликалық кедергі *түтік радиусына тәуелді*:

$$w_{\text{кап}} > w_{\text{арл}} > w_{\text{арт}} > w_{\text{аорт}}.$$

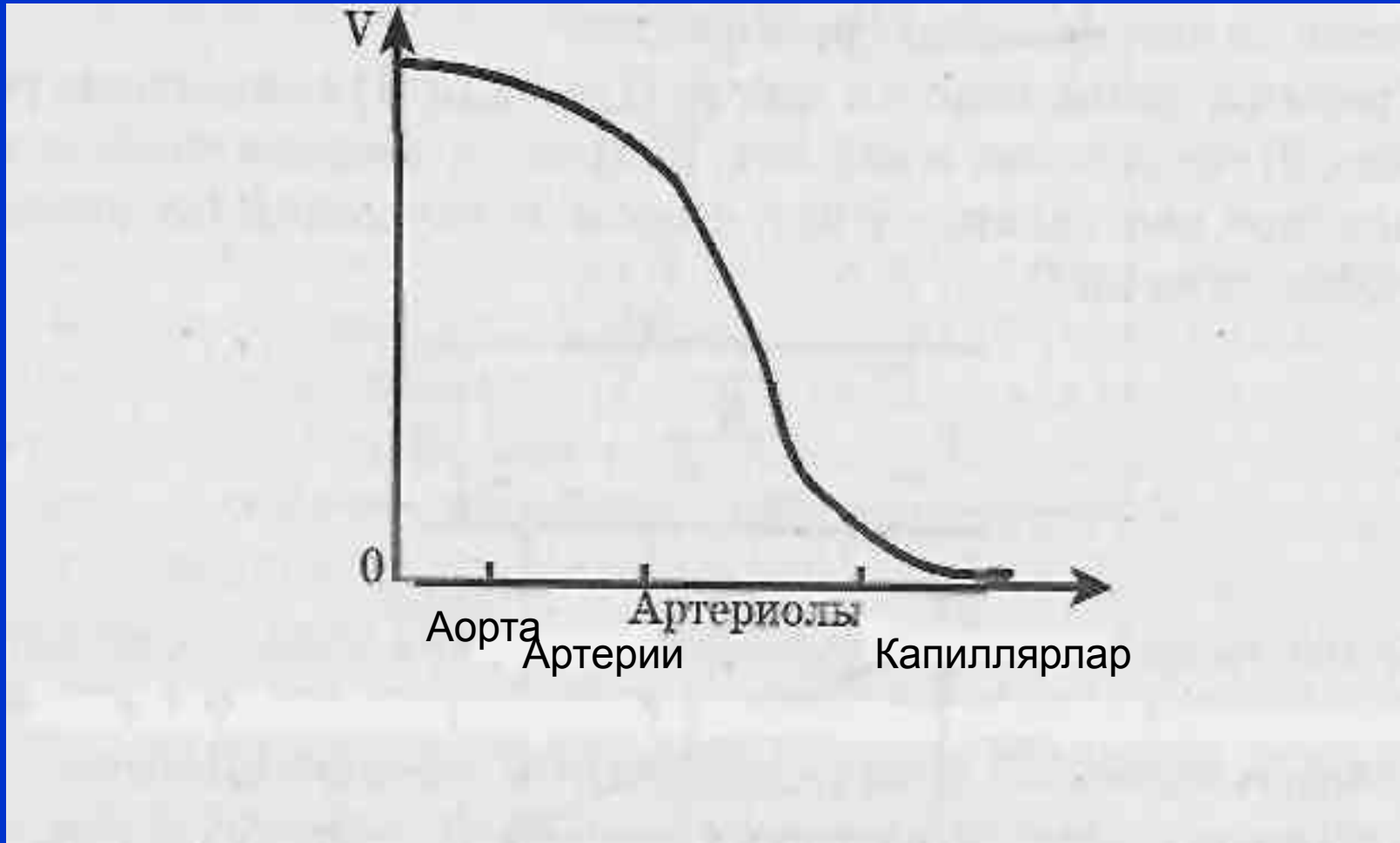
Қан ағысының сызықты жылдамдығы

Барлық капиллярдың жалпы қосынды ауданы қолқаның көлденең қимасынан *500-600* есеге артық. Сондықтан

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

Капилляр қан тамырында қанның төменгі қозғалыс жылдамдықтарында қан және ұлпа арасында зат алмасу жүреді.

Қан тамырлар жүйесімен сызықтық жылдамдықтың таралуы



Орташа қысымның таралуы

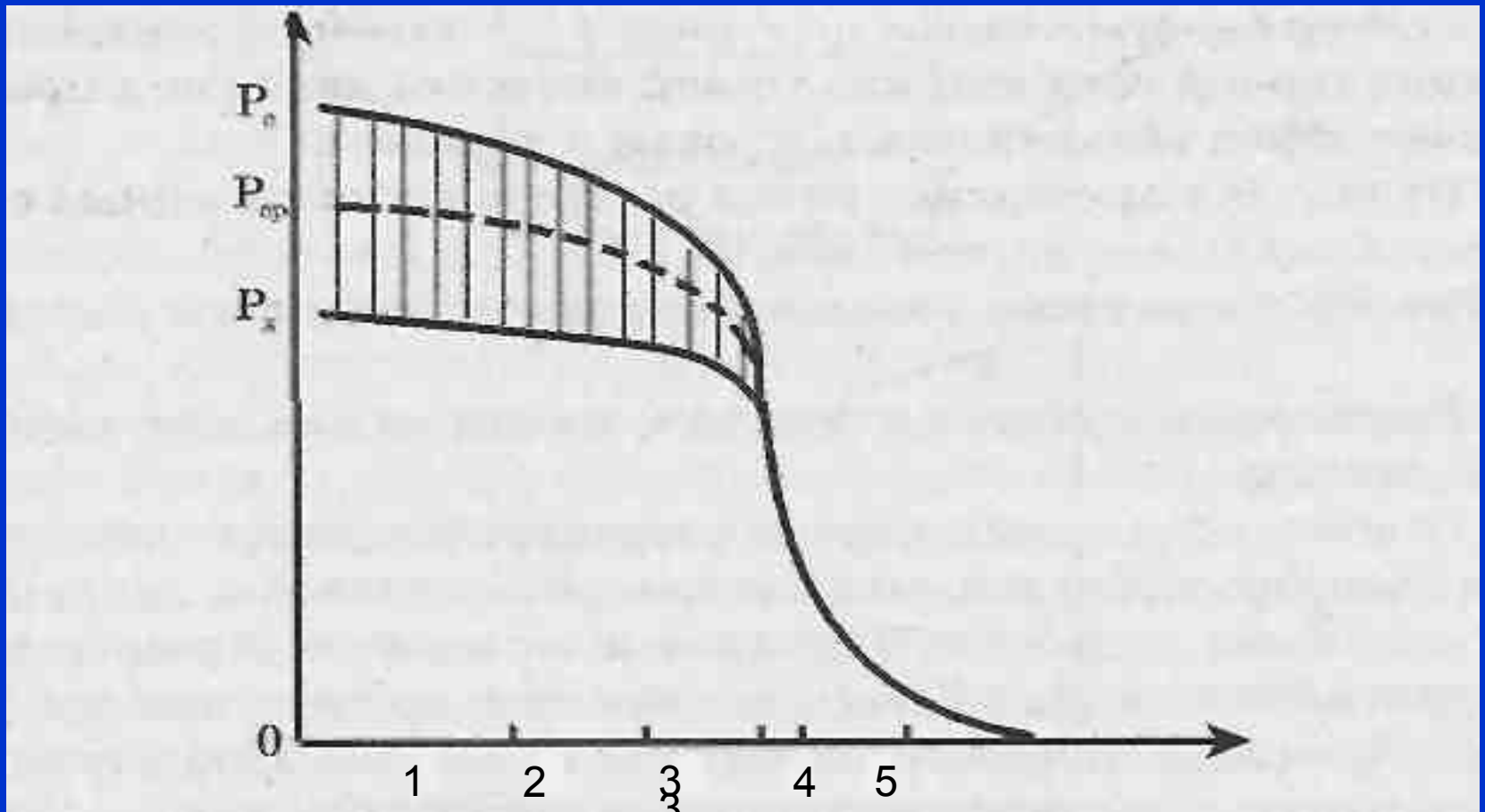
Қан тамырлары бойымен қанның қозғалысында орташа қысым төмендейді. $Q = \text{const}$, ал $w_{\text{кап}} > w_{\text{арт}} > w_{\text{аорт}}$, онда қысымның орташа мәні үшін:



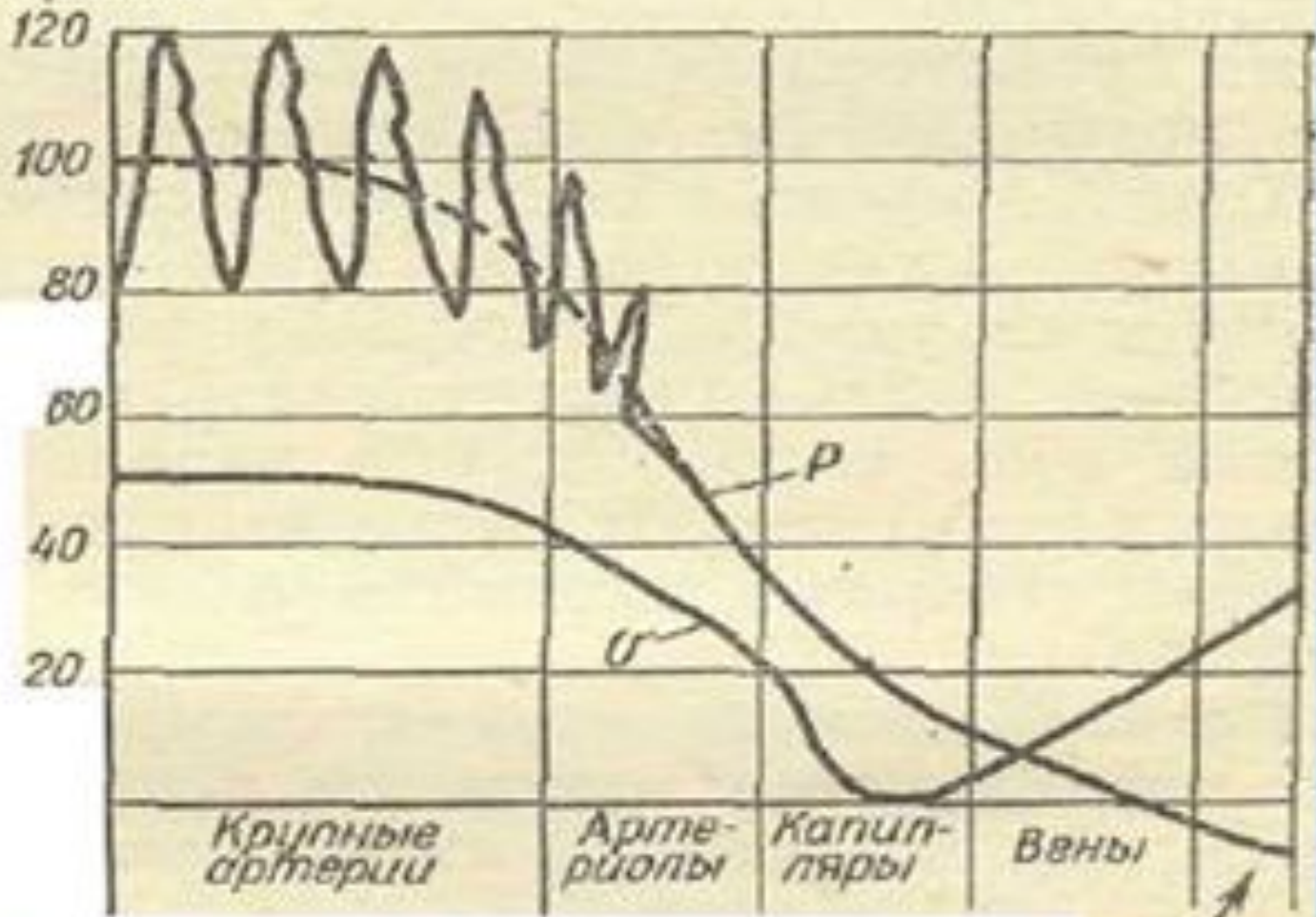
Ірі қан тамырларында орташа қысым 15% -ке, ұсақ тамырларда 85% -ке төмендейді.

Қысымның таралуы

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



$P, \text{ мм рт.ст.}$



Крупные
артерии

Арте-
риолы

Капил-
ляры

Вены

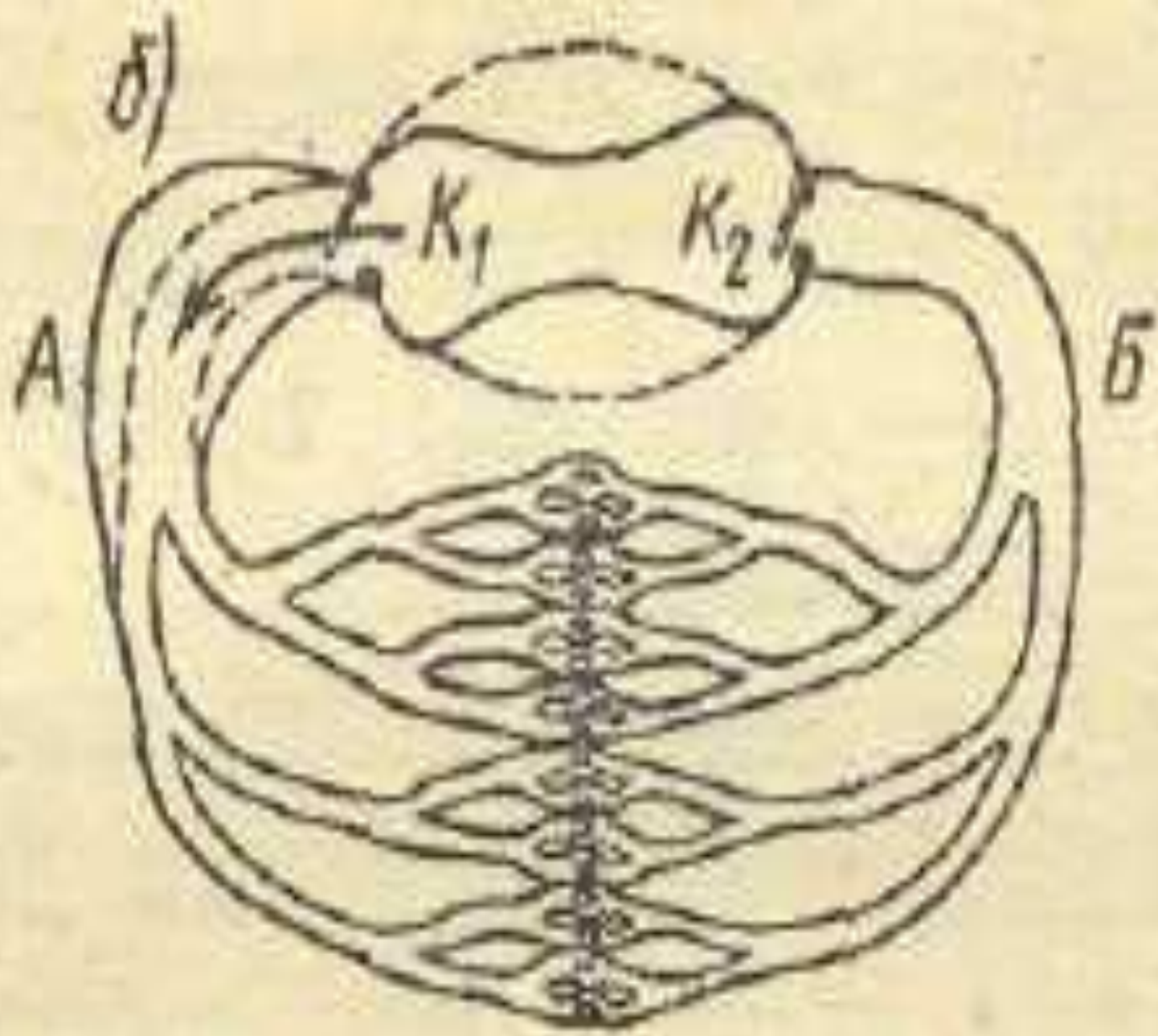
Қан тамырлар жүйесінің моделі

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.
- *Аорта және артерия* дененің әр бөлігіне қанды жеткізе отырып, өткізгіш ролін атқарады.
- *Вена* тамыры бойынша қан жүрекке құйылады.

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 моделінде үлкен қан айналым шеңберінің ірі қан тамырлары гидравликалық кедергілері аз және қабырғалары созылмалы бір жүйеге біріктірілген.

Қалған барлық ұсақ қан тамырлары – тұрақты гидравликалық кедергілері бар жай түтікке бірігеді деп қарастырылады.

Қарынишадан қанның шығарылуы **аорта** қабырғаларының **созылғыштығымен** және оның қабырғаларындағы **кернеудің** артуымен жүргізіледі.

Одан ары **артерия** мен **артериол** тамырлары бойымен **пульстік ағын** біртіндеп **үздіксіз ағынға** айналғанға дейін үрдіс жалғасады.

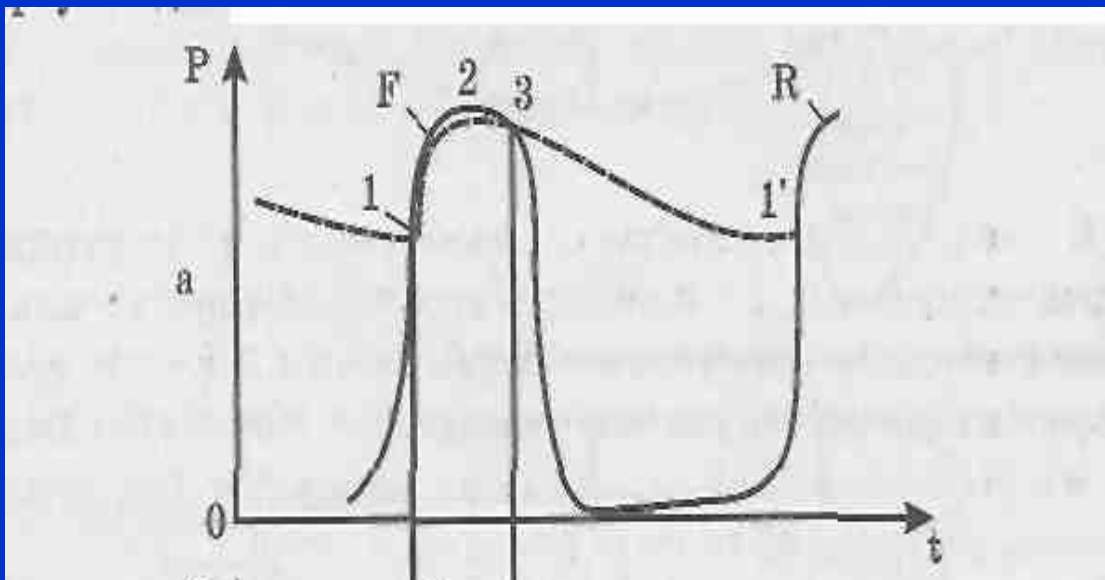
Пульстік толқын – жүректің бір соғу фазасында аорта мен артерия тамырлар бойымен жоғары қысымда таралатын қан толқындары *пульстік толқын* д.а. Пульстік толқынның таралу жылдамдығы қанның және тамырдың қасиетіне тәуелді.

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

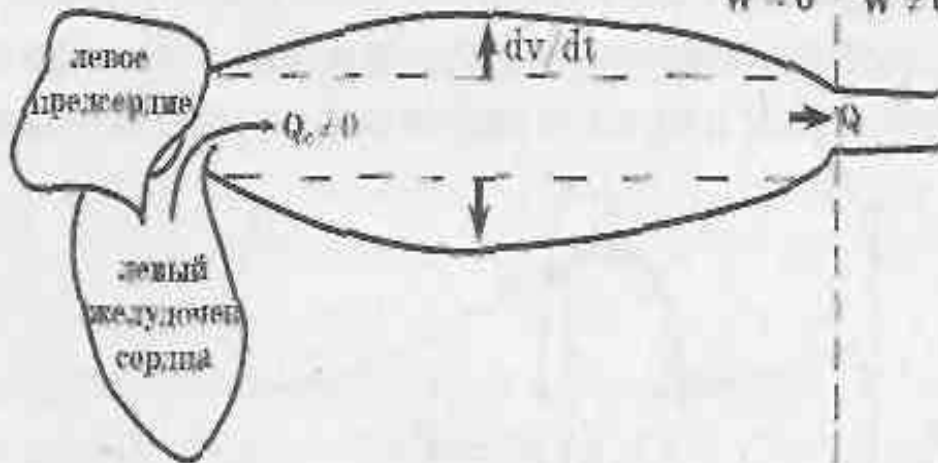
Аортада пульстік толқынның таралу жылдамдығы - 4...6 м/с, *артерияда* - 8...12 м/с, *веналарда* - 1 м/с.

**Қан ағысының жүйедегі екі
фазасы:** *«жүректің сол
қарыншасы - ірі тамырлар –ұсақ
тамырлар»*

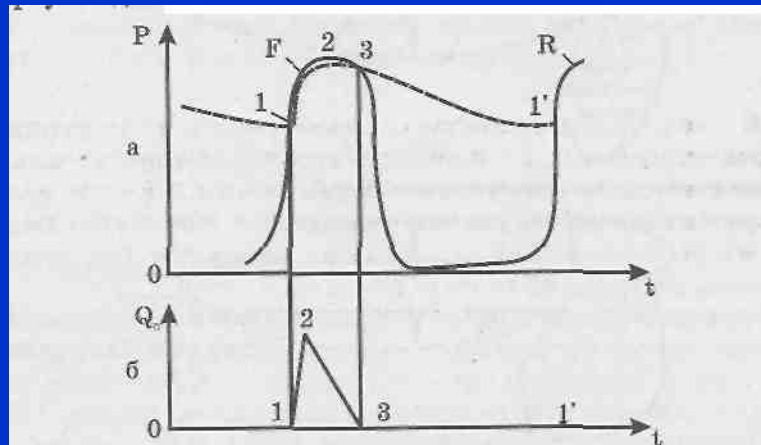
- *1-ші фаза – аорта қақпашаларының ашылып, жабылғанға дейінгі кезеңінде жүректен қанның аортаға ағу фазасы.*
- *Жүректен шыққан қанның ірі қан тамырларына түсуі олардың қабырғасын созылғыштық қасиетіне қарай кеңейтеді және қанның бір бөлігі ірі тамырларда резервтіленеді, қалған бөлігі ұсақ тамырларға өтеді.*



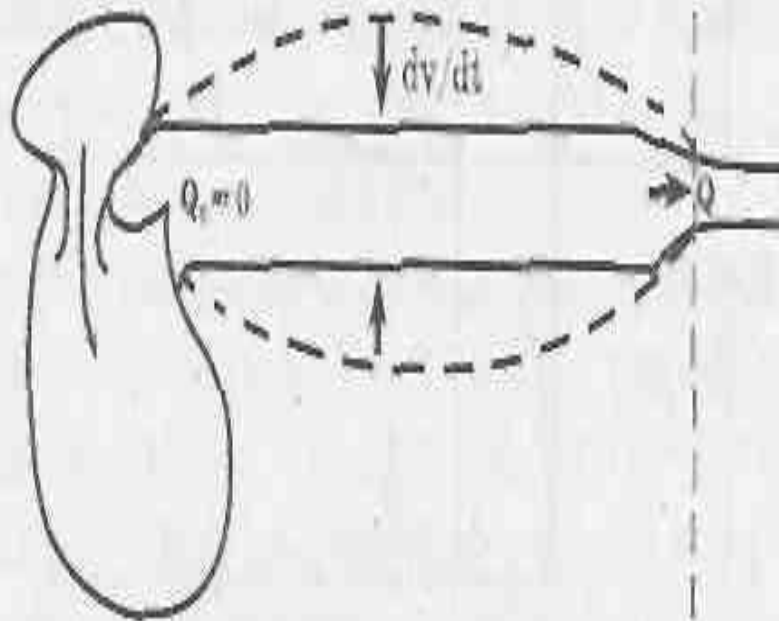
	Эластичный резервуар (крупные сосуды)	Жесткая трубка (микрососуды)
а. 1 фаза. Аортальный клапан открыт, $Q_c \neq 0$	$C \neq 0$ $W = 0$	$C = 0$ $W \neq 0$



- *2-ші фаза — қолқаның қақпашаларының жабылып, қанның ірі тамырлардан ұсақ тамырларға өтуі.*
- *Осы фаза уақытында ірі қан тамырлар қабырғасы серпімділігінің нәтижесінде бастапқы күйіне қайта оралып, қанды микротүтіктерге ығыстырып шығарады. Осы уақытта сол жүрекшеден сол қарыншаға қан құйылады.*



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

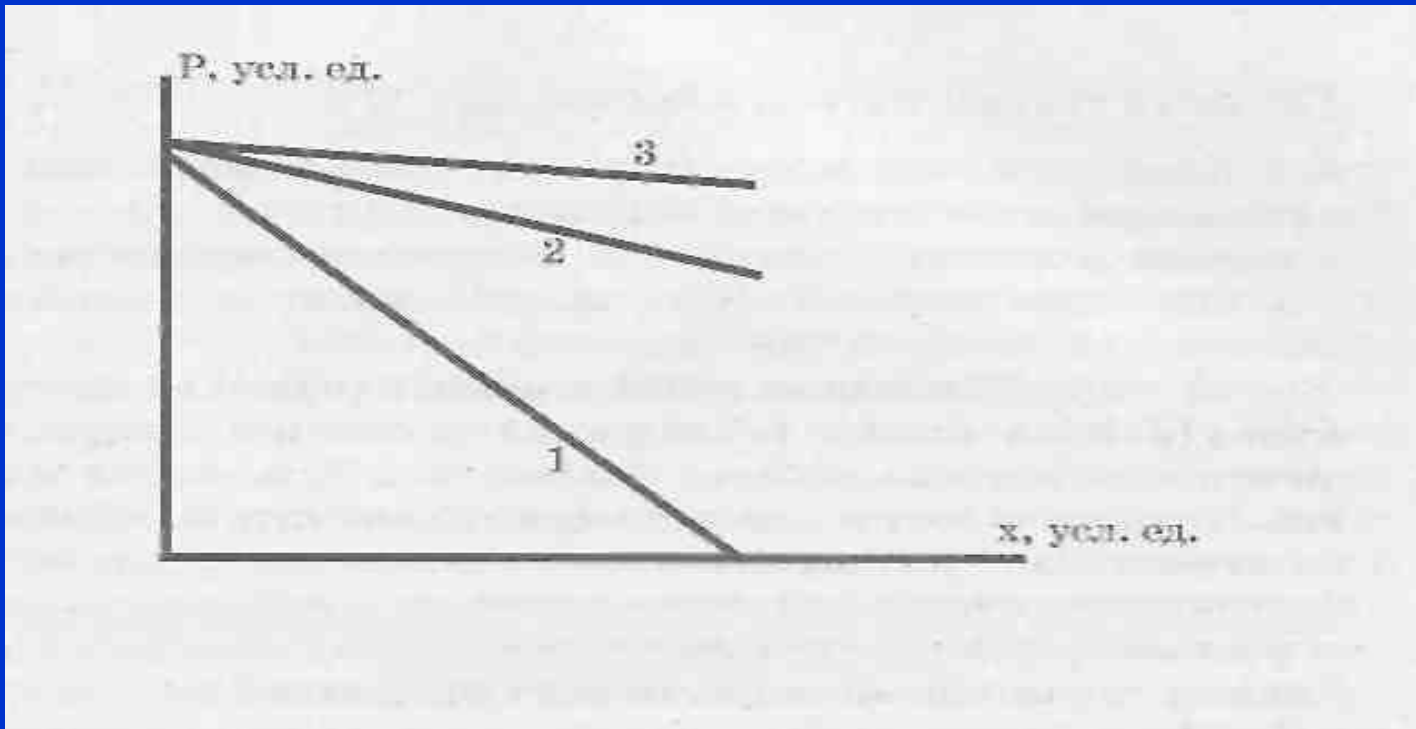


3. Қан тұтқырлығының өзгерісі

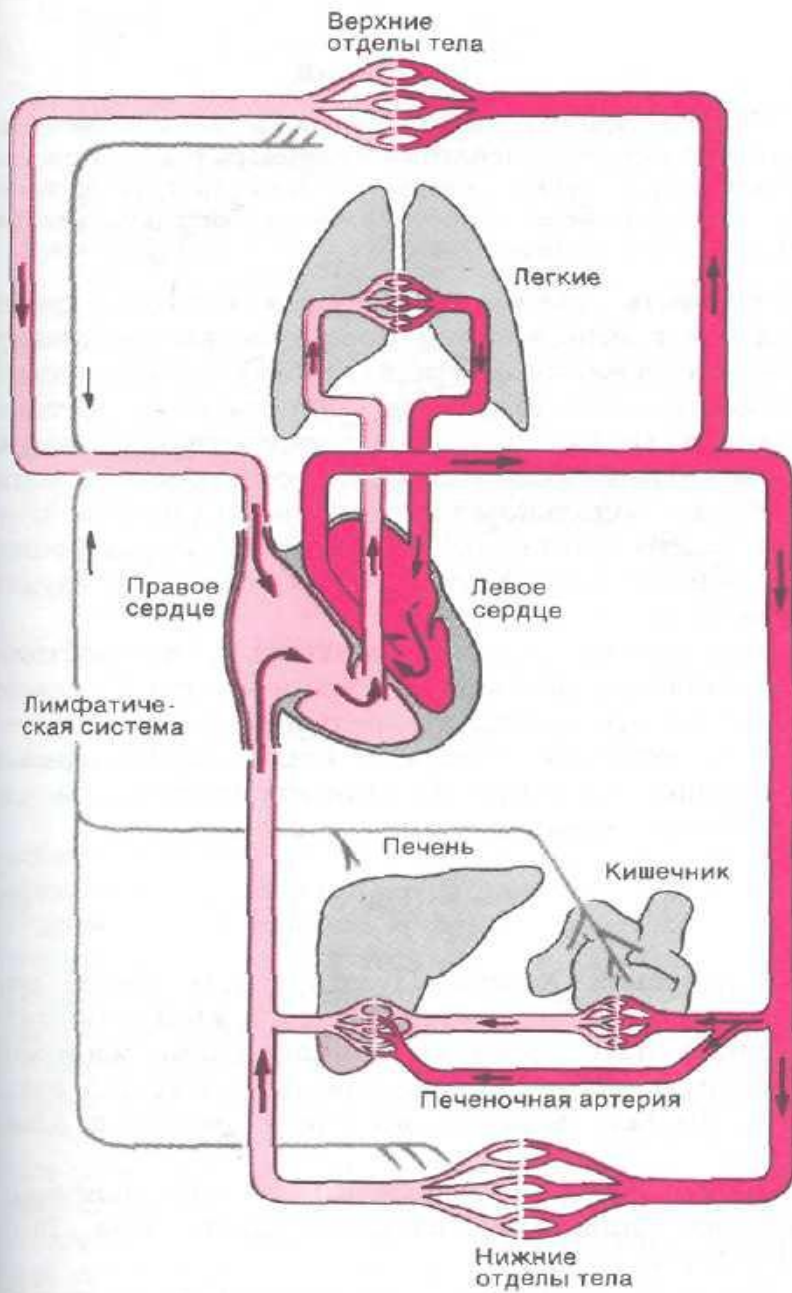
- егер қан тұтқырлығы өзгерсе, онда тамыр түтігінде қысымның төмендеуі өзгереді.
- тұтқырлықтың артуынан ол сызықты өседі.

Әр түрлі мәндегі қан тұтқырлығы үшін тамыр бойымен қысымның таралуы

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



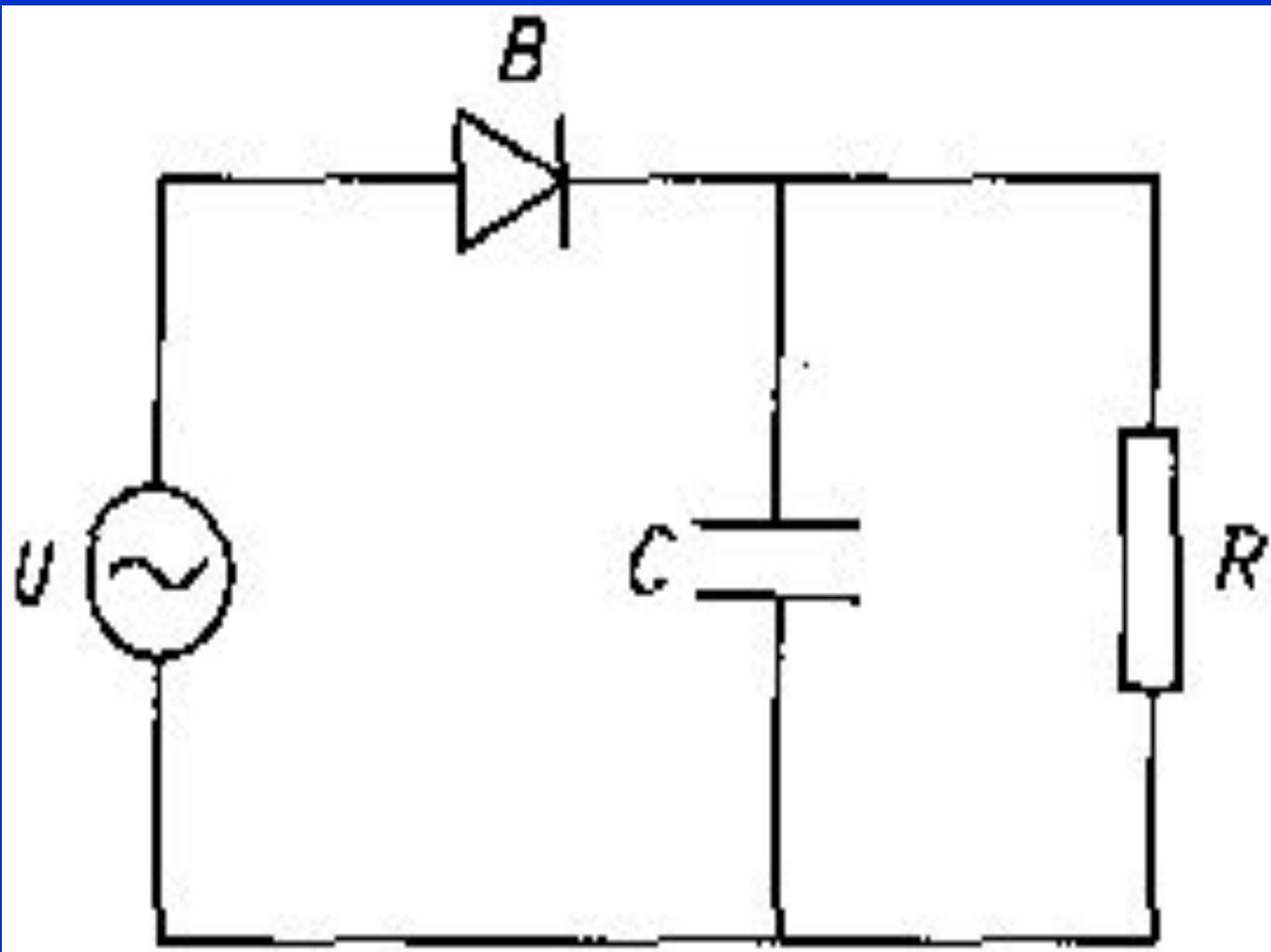
$$P_1 < P_2, \quad P_3 > P_2,$$



Қан айналууды моделдеуде *аналогтық электр схемасы* қолданылады.

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

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



Реография

Тамыр түтіктерінің қанға толуы ұлғайғанда, әр түрлі мүшелер мен ұлпалардың 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 процесі 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 сиымдылық қасиеті болуы себепті ағза ұлпасының импедансы тек *активті және сиымдылық 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.

Электродтың орналасуына қарай:

1. орталық реография (аорта, өкпе артериясының реографиясы), яғни қан айналымның кіші шеңберіндегі сол және оң жүрекшенің қанға толуы.

2. Мүшелік реография (реоэнцефалография, реогепатография, реовазография, реоренография) .

*Реовазограмманың систолдық
толқынның амплитудасы мықта*
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

Бұл әдіс базалық импеданстың өзгерісіне негізделінген. Барлық дененің немесе қандай да бір региондағы (аймақтық) базалық импедансын өлшеу.

Реология — заттың аққыштығы және деформациясы туралы ғылым. (гемореологиясы).

Қанның биофизикалық ерекшеліктерін оқып үйренуде, қан реологиясында қан тұтқыр сұйықтық болып табылады.

Сұйықтың (*ішкі үйкеліс*) тұтқырлығы

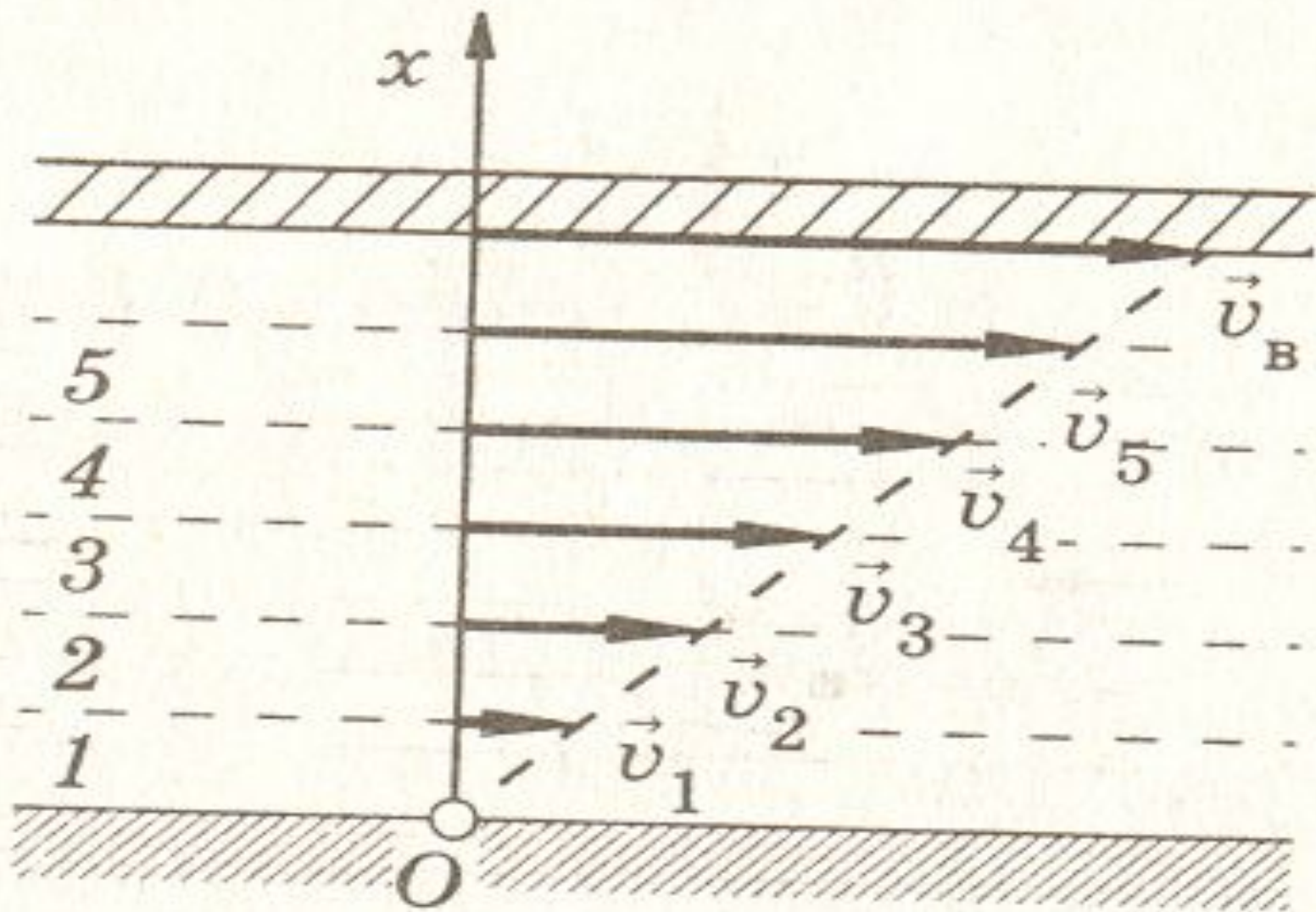
Сұйықтың бір қабаты екінші қабатына қатысты орын ауыстырса, оларда ішкі үйкеліс күші пайда болады. Сұйықтар ағысында оның жеке қабаттары бір-бірімен әсерлеседі.

Бұл құбылысты сұйықтың *ішкі үйкелісі* немесе *тұтқырлығы* деп атайды

И. Ньютон заңы (1687 ж.)

$$F = \eta \frac{dV}{dZ} S$$

Ішкі үйкеліс күші тез ағатын қабатты тежейді және жай ағатын қабатты үдетеді.



- Сұйықтар тұтқырлық қасиетіне қарай 2-ге бөлінеді: *ньютондық және ньютондық емес*
- Тұтқырлық коэффициенті сұйықтың табиғаты және температурасына тәуелді **сұйықтарды ньютондық сұйықтар деп атаймыз.**
- Тұтқырлық коэффициенті жылдамдық градиентіне және сұйықтың ағысына тәуелді сұйықтарды *ньютондық емес* **деп атаймыз.**

- Қан - *ньютондық емес сұйықтық*. Ол плазма ерітіндісінен және онда жүзіп жүретін пішіндік элементтерден тұрады.
- Плазма – *ньютондық сұйықтық*. Алайда пішіндік элементтердің *93% -ін эритроциттер құрайды. Эритроциттердің негізгі сипаттамалық қасиеті- агрегаттардың түзілуі.*

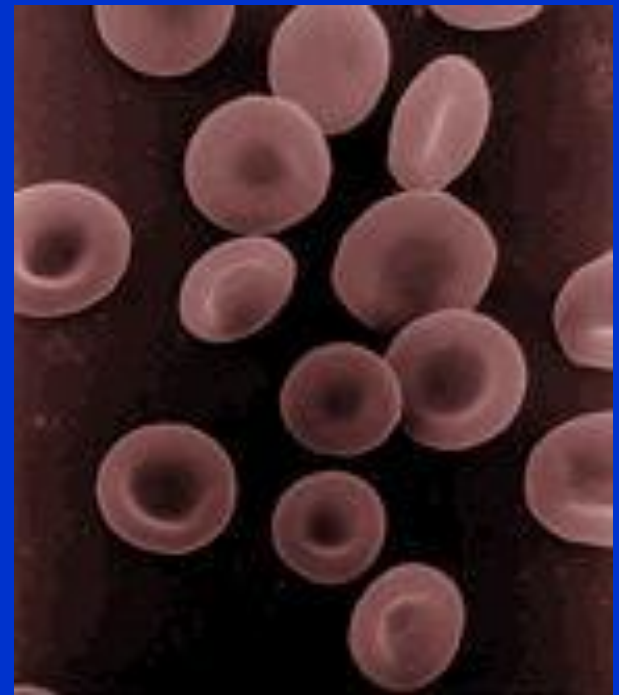
- Қанның мазогын микроскоппен қарағанда, ондағы эритроциттердің бір бірімен «жабысып» монетті столбиктер деп аталатын агрегаттар түзейді.
- Ірі және ұсақ тамырлардағы агрегаттардың түзілуі әртүрлі.
- Бұл тамырдың, агрегаттың және эритроциттердің өлшемдеріне байланысты (өлшемдері: $d_{\text{эр}} = 8 \text{ мкм}$, $d_{\text{агр}} = 10 d_{\text{эр}}$).

1. Ірі қан тамырларда (аорта, артерияда):

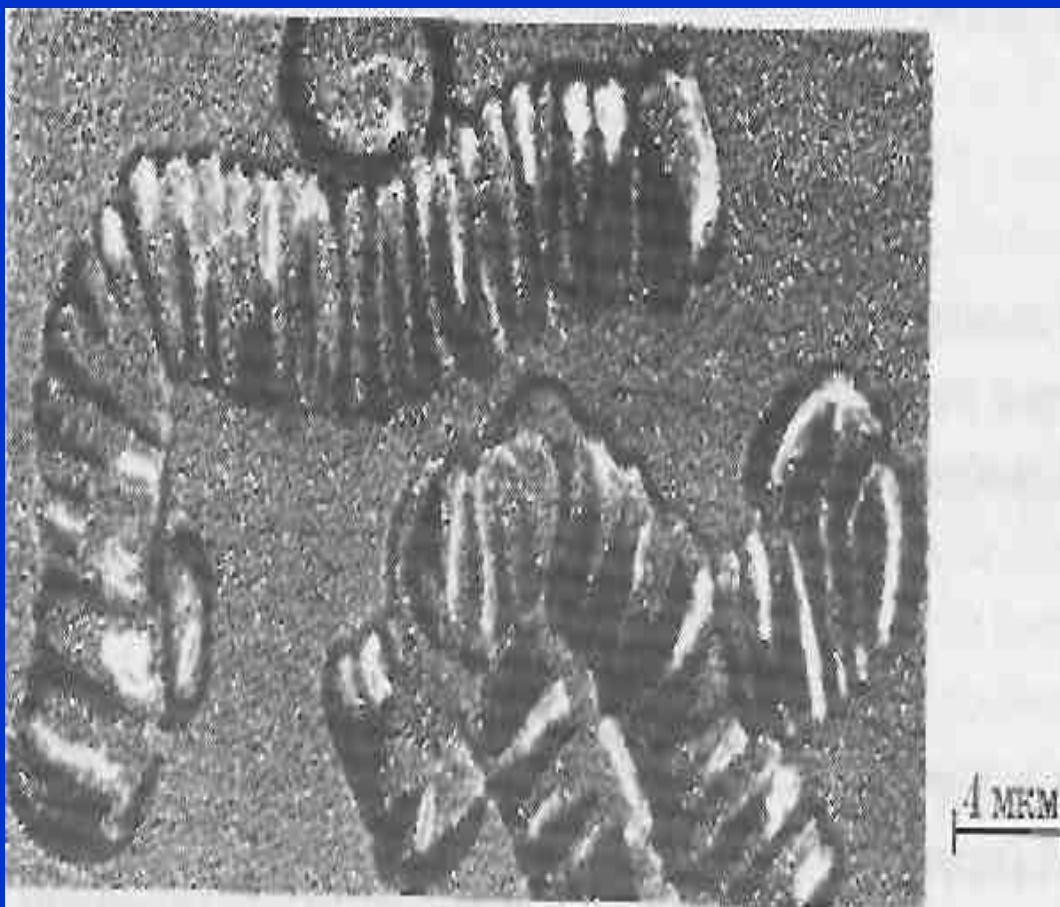
$$d_{\text{тамыр}} > d_{\text{агр}}, \quad d_{\text{тамыр}} \gg d_{\text{эритро}}.$$

dv/dZ градиенті үлкен емес,
эритроциттер агрегаттық
күйге тиынды бағандар
түрінде жинақталады.
Мұндай жағдайда қанның
тұтқырлығы

$$\eta = 0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$$



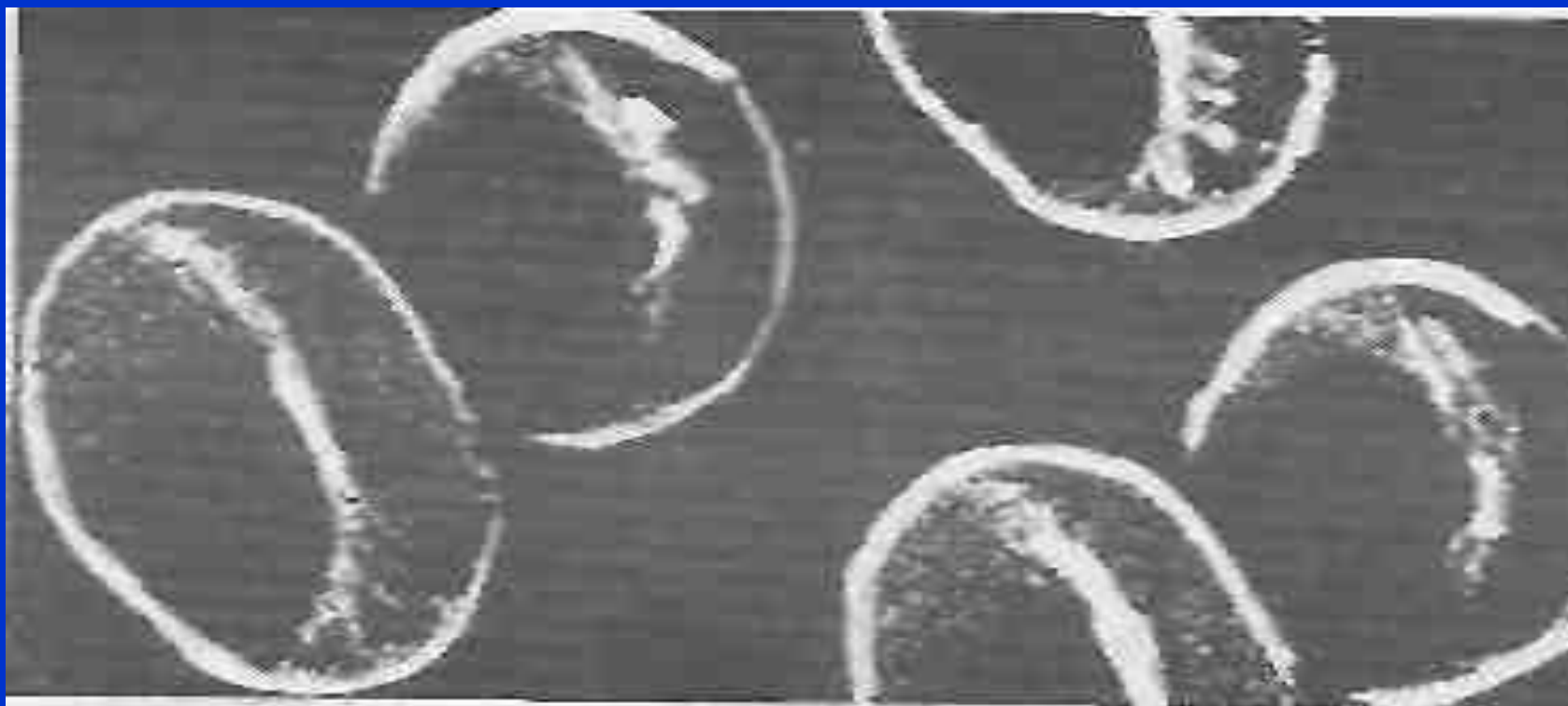
**а) ірі қан тамырларындағы
эритроциттер агрегаты (“тиынды
бағандар”)**



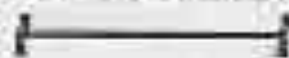
2. Ұсақ тамырлар (кіші артерия, артериолалар):

$$d_{\text{сос}} \approx d_{\text{агр}} \quad d_{\text{сос}} = (5 - 20)d_{\text{эритроц}}$$

dV/dZ градиенті артқанда жүйенің тұтқырлығы азая отырып, агрегаттар жеке эритроциттерге ыдырайды. Тамыр түтігі саңылауының диаметрі кішірейген сайын, қан тұтқырлығы кемиді.



3 мм



б) отдельные эритроциты в
мелких артериях, артериолах.

Ұсақ артерия, артериолалардағы жеке эритроциттер

3. Микротүтіктерде (капиллярлар):

$$d_{\text{түтік}} \gg d_{\text{эритр}}.$$

- Микротүтікті тамырларда диаметрі 3 мкм эритроциттер жеңіл деформациялана отырып, капилляр арқылы өтеді алады.

Ірі қан тамырларда қанның ағысы үшін тұтқырлық:

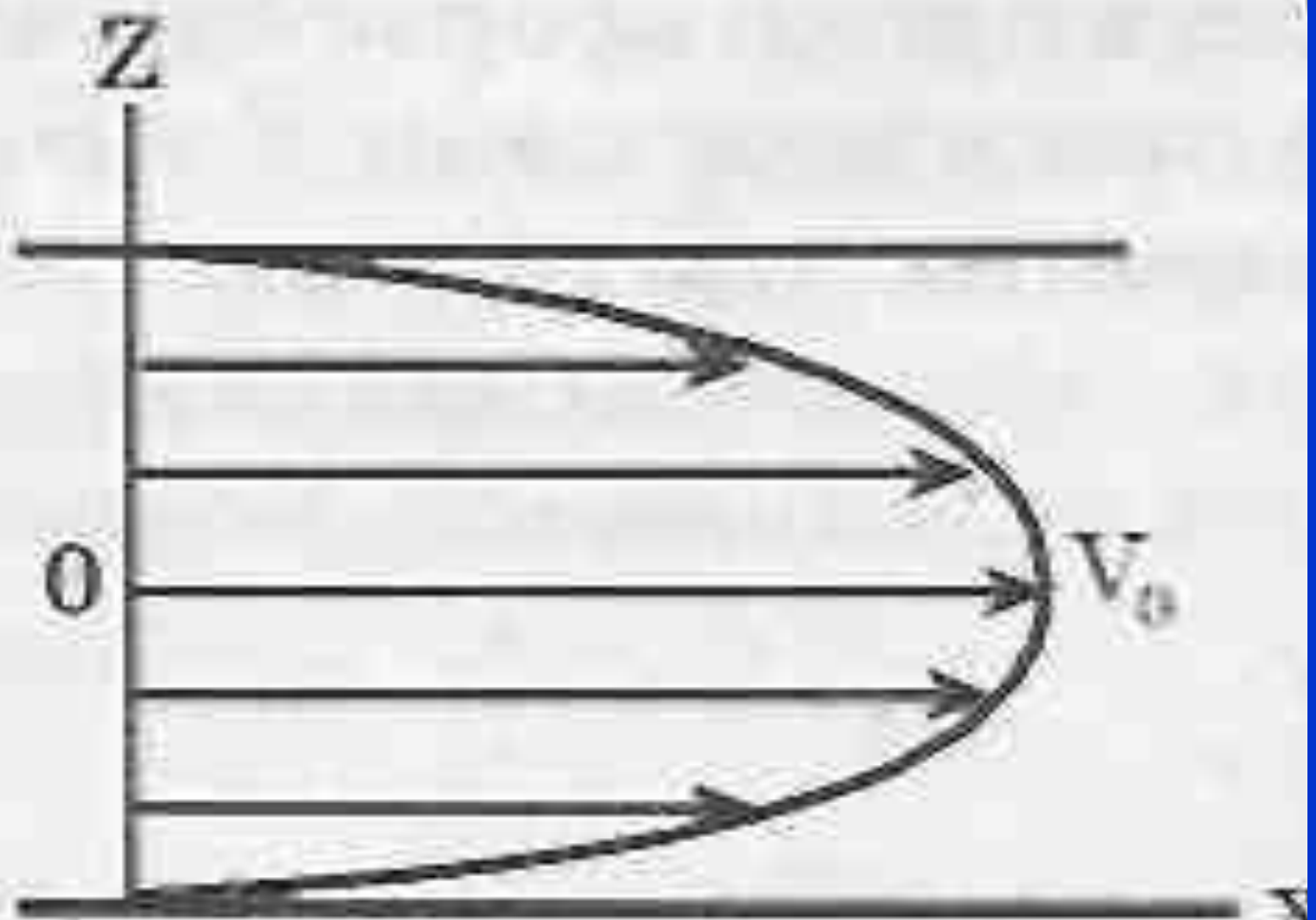
- Қалыпты жағдайда - $\eta_{ірік} = (4,2 - 6) \cdot \eta_c$
- анемия кезінде = $\eta_{ан} = (2 - 3) \cdot \eta_c$
- полицитемияда = $\eta_{пол} = (15 - 20) \cdot \eta_c$
- Плазманың тұтқырлығы $\eta_{пл} \approx 1,2 \cdot \eta_c$
- Судың тұтқырлығы = 0,01 Пуаз (1 Пуаз = 0,1 Па • с).

Кез келген сұйықтар тәрізді қан тұтқырлығы температура төмендегенде артады. Мысалы, температура 37°C -тен 17°C -қа дейін төмендегенде қан тұтқырлығы 10% - ке артады.

Қан ағысының режимдері

- *Сұйықтың ағысы ламинарлы және турбулентті болып бөлінеді.*
- *Сұйық қабаттарының бір-бірімен араласпай бірқалыпты ағуын ламинарлы ағыс деп атаймыз.*

a

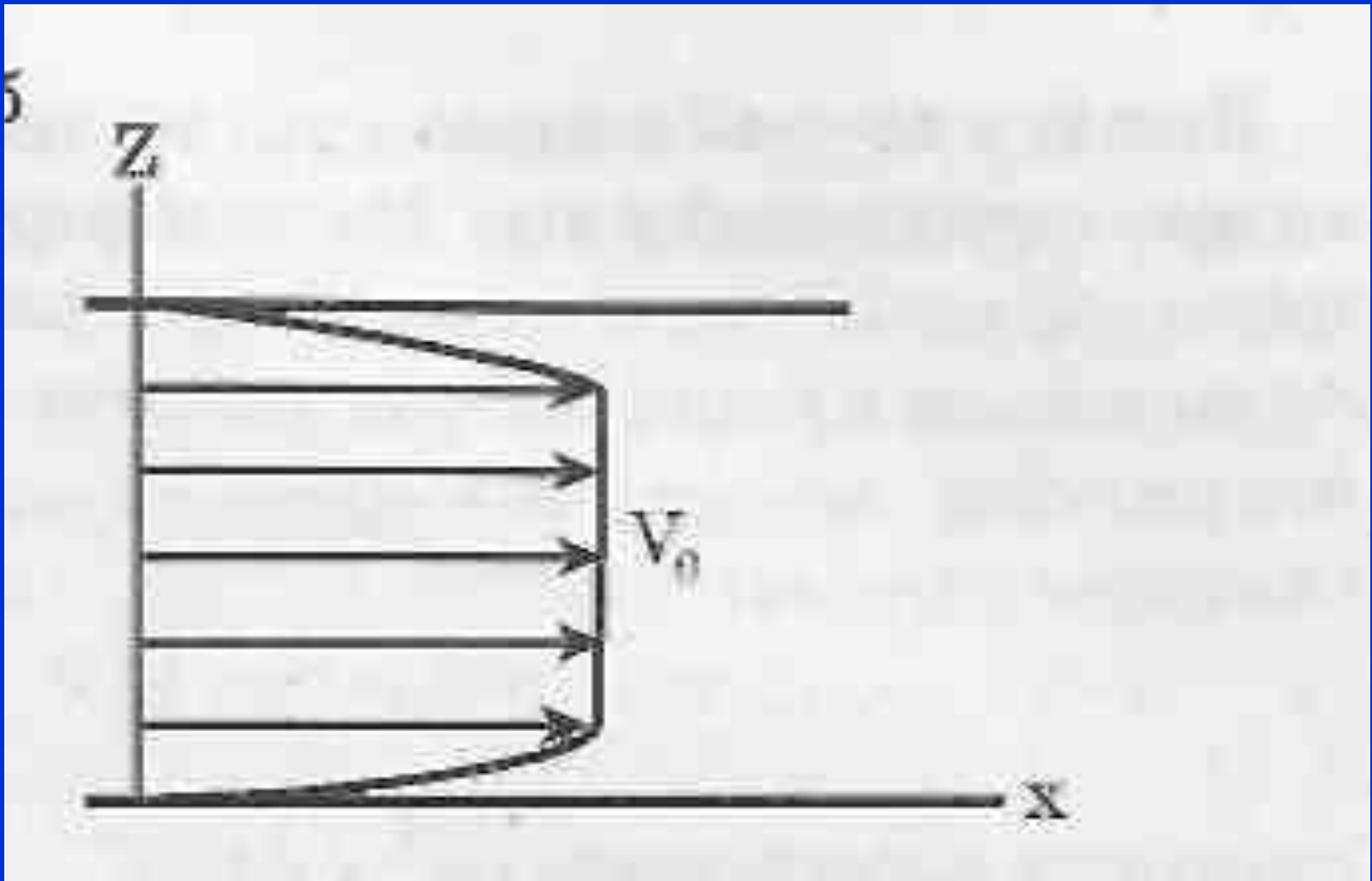


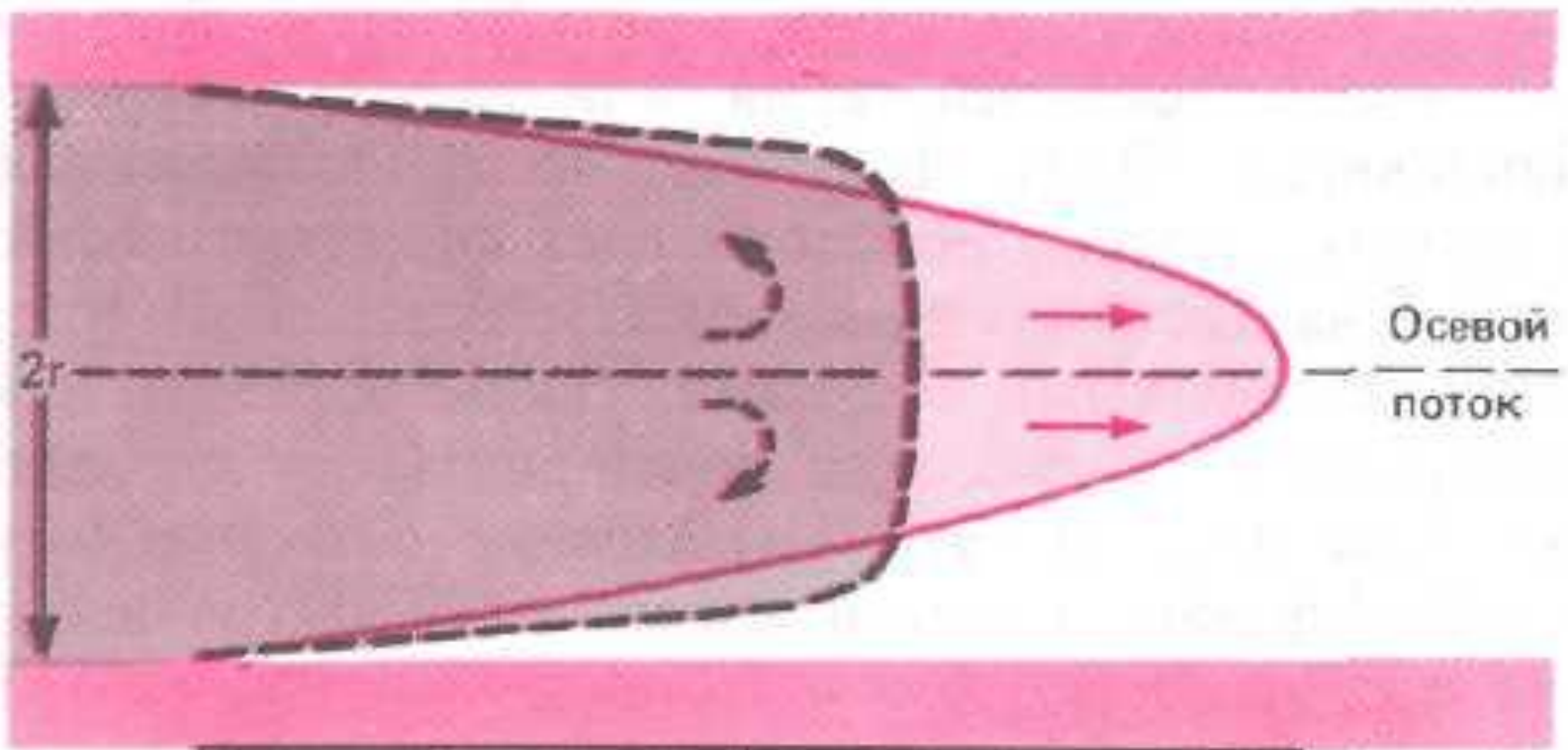
Ағыс жылдамдықтарының артуымен ламинарлы ағыс *турбуленттікке* айналады.

Сұйық қабаттары бір-бірімен араласады, яғни ағынды *турбулентті* қозғалыс д.а.

Қысым әсерінен құйынды түрдегі қозғалыс *турбулентті* немесе *құйынды ағыс* д.а.

Түтіктегі *турбулентті ағыстың* жылдамдық профилі
ламинарлы ағыстың парабодалық профилінен
ерекшелінеді.





v_0

\bar{v}

v_{max}

Тип потока

Скорость

Турбулентный

Ламинарный

- Сұйықтар ағысы *Re* Рейнольдс санымен сипатталады.

- Дөңгелек түтіктегі сұйықтар ағысы үшін:

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

Мұндағы v – көлденең қимадағы ағыс жылдамдығы, d – түтіктің диаметрі.

- $Re < 2300$, онда сұйықтың ағысы *ламинарлы*.

Егер $Re > Re_{кр}$ болса, онда ағыс *турбулентті*. Қанның тамырлар бойымен қозғалысы *ламинарлы* болып табылады.

Қанның турбулентті қозғалысы:

- *оның қарыншадан аортаға шығарылуында (доплер-кардиография);*
- *тамырлар тармақтарында, артерияда, қан ағысының жылдамдығы артқанда (бұлшық етпен жұмыс істеуде) байқалады.*

Сонымен қатар тамырлардың жергілікті (локальды) тарылу аумағында, мысалы тромба түзілгенде пайда болады.

Қанның турбулентті ағысы кезінде пайда болатын дыбыстарды - ауруды *диагностикалау үшін қолданады.*

Жүрек қақпашалары жарақаттанғанда қанның турбулентті қозғалысы болатын *жүрек шумдары п.б.*

Қанның тамыр бойымен және әсіресе тамырлар жүйесінің әр түрлі бөліктерімен таралуы жүректің жұмысына ғана тәуелді емес, тамырлар саңылауына, тамырлар қабырғасының тонусына және оның тұтқырлығына тәуелді.

Әдебиеттер:

1. Арызханов Б., Биологиялық физика, 1990 ж.
2. Кошенов Б.К. Медициналық биофизика, ,2011г.
3. Тиманюк В.А., Животова Е.Н. Биофизика, Киев, 2004г с..
4. Ремизов А.М. Медицинская и биологическая физика, М.,2010г.
5. Антонов В.Ф. Биофизика, М., 2006 г.

Бақылау сұрақтары:

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