

**Тамырлар бойымен қан  
қозғалысынның жалпы  
физика математикалық  
заңдылықтары**

Қабылдаған: 00000

Орындаған: 00000

Тобы: 00000

# ҚАН АЙНАЛЫМ ЖҮЙЕСІНІҢ БИОФИЗИКАСЫ

Қан айналым биофизикасы — қанның қысымы мен қозғалыс жылдамдығының арасындағы байланысты және олардың қанның, қан тамырларының, жүрек функцияларының физикалық параметрлеріне тәуелділігін зерттейді. Қан айналым жүйесін күрделі гидродинамикалық жүйе деп қарастыру керек. Жүректің жұмысы периодты болғандықтан қанның қысымы және қозғалысы да периодты болады. Қан тамырлары аса көп тармақталады және әр тармақтың диаметрі әр түрлі болады. Сондықтан тамырдың серпімділігі тармақтардың диаметрлерінің қосындысына байланысты болады. Қан таралу жүйесінің осындай ерекшеліктері оны физика, математика тұрғысынан талдау жасауға қиындық туғызады.

Қан айналымның биофизикалық көрсеткіштері жүрек-тамырлар жүйесінің биофизикалық параметрлерінің өзгерісіне тәуелді болады. Атап айтқанда жүрек жұмысының ерекшелігі (қанның систолалық көлемі) қан тамырларының құрылысының ерекшеліктеріне (олардың радиусы және эластикалық қасиеттері) және қанның қасиетіне (тұтқырлығы) байланысты болады.

Сонымен қатар қан тамырлары гуморальды әсер тарайтын арнаның қызметін атқарады. Қан айналым жүйесі ағзанын температурасына да зор ықпал етеді. Сондықтан осы тарауда қан айналым жүйесін биофизика тұрғысынан қарастырамыз.

# Қанның реологиялық қасиеттері

Реология (rheos — ағын, logos — ілім — грек сөздері) дегеніміз, заттардың деформациялануын және ағуын зерттейтін ғылым. Гемореология (гемо — қан) — қанды тұтқыр сұйық деп қарастырып, оның қан тамырларының бойымен қозғалысын зерттейтін биофизика ғылымының бір саласы.

Сұйықтың тұтқырлығы деп оның бір қабатының екінші қабатымен салыстырғанда қозғалыс әсерінен пайда болатын кедергіні айтады.

Сұйықтың тұтқырлығының басты заңын Ньютон ашқан.

$$F = \eta \frac{dv}{dz} \cdot S$$

мұндағы  $\eta$  — қанның тұтқырлығы.

Тұтқырлық тұрғысынан карағанда қан — ньютондық емес сұйық. Себебі қан — формалық элементтер суспензиясының плазмадағы ерітіндісі. Ол элементтердің өзіне тән ішкі құрылысы және қасиеттері бар. Плазма — мөлдір, ньютондық сұйық. Бірақ формалық элементтердің 93%-ы эритроциттер болғандықтан, қанды эритроцит суспензиясының физиологиялық ерітіндісі деп, жеңілдетіп қарастыруға болады. Эритроциттердің басты қасиетінің бірі — эритроцит бағанын құруға бейімділігі. Егер қанның жұғындысын микроскоппен караса, онда бір-біріне «жабысқан» агрегатты көруге болады. Ол агрегатты эритроцит бағаны дейді. Бағандар жинақталған тиындарға ұқсас болғандықтан оларды «тиын бағаны» (монетный столбик) дейді. Диаметрі әртүрлі қан тамырларында «тиын бағанының» пайда болуы шартты да әртүрлі. Оған қан тамырларының диаметрі, эритроциттің диаметрі және агрегаттың размері тікелей әсер етеді.

Мысалы: эритроциттің диаметрі  $d_{\text{эр}} \approx 8$  мкм, ал агрегаттың диаметрі одан бірнеше есе үлкен болуы мүмкін, яғни

$$d_{\text{арп}} \approx 10d_{\text{эр}}$$

Жуан қан тамырларының диаметрлері агрегаттың диаметрінен үлкен ( $d_r > d_{\text{арп}}$ ), сонымен қатар қан тамырының диаметрі эритроциттердің диаметрінен аса үлкен ( $d_r \gg d_{\text{эр}}$ ) болғандағы агрегаттардың түзілісі 63, *a*-суретте көрсетілген.

Мұнда жылдамдық өзгерісі  $\frac{dv}{dz}$  аз, эритроциттер «тиын бағанасына» жинақталып, агрегат құрайды. Осындай калыпты жағдайда қанның тұтқырлығы  $\eta=0.005$  Па·с болады. Егер тамырлар ұсақ болса (ұсақ артериялар, артериолдар), яғни тамырдың диаметрі мен агрегаттың диаметрлері жуық шамамен бірдей болса ( $d_{\text{арп}} \approx d_r$ ) және тамырдың диаметрі эритроциттің диаметрінен 15-20 есе үлкен ( $d_T \approx 15—20 d_{\text{эр}}$ ) болса, мұндай тамырларда жылдамдық өзгерісі

$$\frac{dv}{dz}$$

артып, агрегаттар ыдырайды да, қанның тұтқырлығы кемиді (63-сурет).

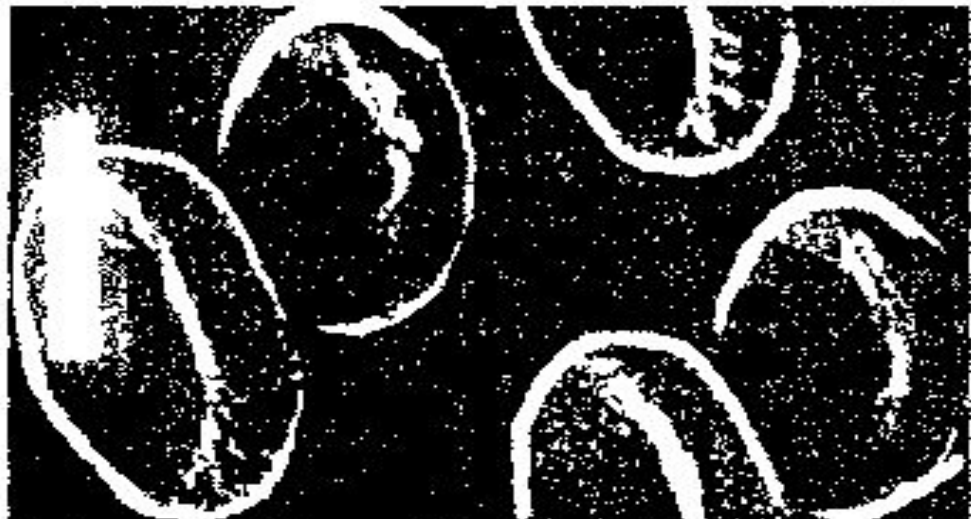


*a*

4 MM

6

6



3 MM



2 MM

63-cyper

Микротамырларда (капиллярларда) тамырдың диаметрі эритроциттің диаметрінен кіші болады ( $d_r < d_{эр}$ ). Бірақтірі тамырда эритроциттер жеңіл деформацияланып, диаметрі 3 мкм капиллярдан диаметрі 8 мкм эритроцит ешқандай өзгеріссіз бұзылмай өтеді.

Уақыт бірлігінде қантамырының көлденең қимасынан өтетін қанның көлемі  $Q$  мынаған тең болсын

$$Q = Sv,$$

мұндағы  $S = \pi R^2$ , қан тамырының келденен қимасының ауданы,  $R$  — тамырдың радиусы, сонда мұндағы  $v_{opt}$  - қанның қан тамырлар бойымен қозғалысының орташа сызықтық жылдамдығы;  $P_1$  және  $P_2$  тамырдың ұштарындағы қысым;  $l$  — тамырдың ұзындығы;  $\eta$  — қанның тұтқырлығы. Бұл тендеуді алғаш ашқан ғалымның құрметіне Пуазейль тендеуі дейді.

Капилляр тамырларда эритроциттер жіпке «тізгендей» бірінің соңынан бірі орналасып, тамырдың пішініне сәйкес келетін, «тиын бағанасын» құрайды. Тамырдың диаметрі қанша кіші болғанмен, эритроцит пен тамыр қабырғасының арасында плазмаға «орын» қалдырылады. Капиллярдағы қанның тұтқырлығы өте аз болады (63, в-сурет).

Жоғарыда қарастырылған мысалдардан мынандай қорытынды жасауға болады. Жуан тамырлар үшін қанның тұтқырлығы сызықты өзгертеді, яғни  $\eta = \eta_0(1 + kC)$ , мұндағы  $\eta_0$  — қанның бастапқы тұтқырлығы;  $C$  — эритроциттердің таралымы,  $k$  — эритроциттердің пішініне, розміріне және агрегаттың ерекшелігіне тәуелді геометриялық параметр.

Егер қанның құрамындағы ұсақбөлшектердің құрылымы өзгерсе, онда  $k$ -коэффициенті де, қанның тұтқырлығы да өзгереді. Олай болса капилляр тамырлар үшін жоғарыдағы формуланы қолдануға болмайды. Себебі қан ньютондық сұйық емес, оның қан тамырларының бойымен қозғалысы Ньютонның заңына бағынбайды. Сонымен қатар қанның тұтқырлығы қан тамырларының диаметріне, жылдамдық өзгерісіне және температураға да байланысты.

Қанның қан тамырының бойымен қозғалысы негізінде ламинарлық ағын болады. Бірақ кейде турбуленттік ағын да болуы мүмкін.

Аортаға келіп құйылған қанның қозғалысы турбуленттік болғандықтан, аортадағы қанның қозғалысы да турбуленттік болады. Қанның қозғалыс жылдамдығы артқанда (мысалы, бұлшық етке күш түскенде) қан тамырларының тармақталу нүктелерінде де турбуленттік ағын болуы мүмкін. Турбуленттік ағын қан тамырларының диаметрінің кенет кішірейген жерлерінде де (тромба) болуы мүмкін. Сұйық турбуленттік ағынмен қозғалу үшін оған қосымша энергия қажет. Сондықтан қан тамырының бойымен қозғалған қан жүрекке күш түсіреді. Турбуленттік ағын кезінде пайда болатын шу жүрек және қан айналым жүйесіне диагноз қою үшін қолданылады.

# Қанның қан тамырлар бойымен қозғалысы

Қанның қан тамырларының бойымен қозғалыс заңдарын зерттейтін биомеханиканың бөлімін гемодинамика дейді. Гемодинамиканың басты ұғымдары — қанның қысымы және қозғалыс жылдамдығы.

Қан тамырларының бойымен қанның қозғалғандағы қан қысымының, қанның энергиясының және жылдамдығының өзгерісін Вернули және Гаген-Пуазейль тендеулерімен түсіндіруге болады.

Қан тамырдың бойымен үздіксіз сорғымен қозғалады. Қолденең кималары әртүрлі тізбектей қосылған бірнеше түтіктердің бойымен уақыт бірлігінде сұйықтың өзара тең көлемі ағады. Қан қысымы деп қан тамырының қолденең кимасына (S) уақыт бірлігінде әсер ететін күштің (F) шамасын айтады, яғни

өлшем бірлігі  $P = \frac{F}{S}$  Н/м<sup>2</sup>. Сонымен қатар көлемдік және сызықтық жылдамдық деген ұғым бар. Көлемдік жылдамдық деп қан тамырларының қолденең кимасынан уақыт бірлігінде ағып өтетін сұйықтың көлемін (V) айтады:

(1)  
өлшем бірлігі  $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ .  $Q = \frac{V}{t}$ ,

Сызықтық жылдамдығы деп қанның жүрген жолының уақытқа қатынасын айтады.

(2)  
 $v = \frac{l}{t}$ .



Өлшем бірлігі  $v = 1 \text{ м/с}$ . Қан тамырларының бойымен өтетін қанның сызықтық жылдамдығы тамырдың әр бөлігінде әртүрлі болғандықтан, бұдан былай, орташа сызықтық жылдамдық деген ұғымды қоямыз.

Сызықтық және көлемдік жылдамдықтардың арасында мынандай байланыс бар:

Олай болса

мұндағы

$$Q = \frac{V}{t},$$
$$t = \frac{l}{v}.$$

Себебі  $Q = Sv = \text{const.}$  тамырдың қимасының ауданы.

Осы тендеу  $\frac{v}{l} = S$  сорғының үзіліссіздігінің тендеуі екен. Бұдан түтіктің көлденең қимасынан ағып өтетін сұйықтың көлемі оның сызықтық жылдамдығы мен көлденең қимасының ауданының көбейтіндісіне тең екенін көреміз.

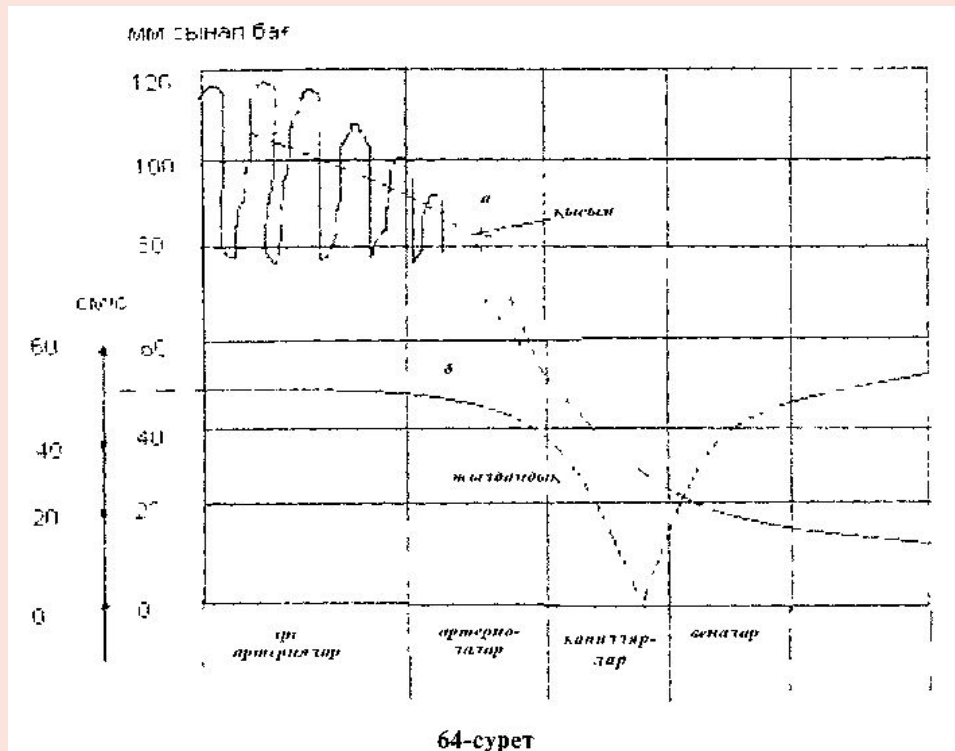
Егер тамырдың көлденең қимасының ауданын және сызықтық жылдамдығын тамырдың бір ұшы үшін  $S_1$  және  $v_1$  деп, екінші ұшы үшін  $S_2$  және  $v_2$  деп белгілесек, онда (3) тендеуден мынаны аламыз

Осыдан

$$S_1 v_1 = S_2 v_2.$$
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Осыдан мынандай қорытынды шығады: қанның қан тамырларының, бойымен қозғалғандағы сызықтық жылдамдығы тамырдың көлденең қимасының ауданына кері пропорционал болады екен.

Қолқаға (аортаға) жақын қан тамырлар жүйесінің көлденең қимасының ауданы өте аз болады. Артерияға, артериолаға және капиллярларға өткенде көлденең қималарының аудандарының қосындысы аса үлкен шамаға жетеді. Мысалы капилляр тамырлардың көлденең қимасының аудандарының қосындысы қолқаның ауданынан 600—800 есе үлкен болады. Соған сәйкес қанның қозғалысының сызықтық жылдамдығы аортада 0,5 м/с болса, капиллярда 0,0003—0,0005 м/с болады.



Қан венаға қарай өткенде, тамырлардың көлденең қимасының ауданы азаяды да, соған сәйкес сызықтық жылдамдығы артады. 64, а-суретте қан тамырлар жүйесінде қанның қысымы, 64, б-суретте сызықтық жылдамдығының қан тамырларының көлденең қимасының ауданына сәйкес өзгерісін сипаттайтын график берілген.

Енді сорғының үзіліссіздігінң тендеуіне (3) қайта оралайық, яғни

$$Q = Sv.$$

Мұндағы  $S = \pi R^2$  қан тамырларының көлденең қимасының ауданы,  $r$  - тамырдың радиусы, және Пуазейль формуласына сәйкес

$$(5) \quad v_{\text{орт}} = \frac{P_1 - P_2}{l} \cdot \frac{r^2}{8\eta}.$$

Мұндағы  $v_{\text{орт}}$  - қанның қан тамырлар бойымен қозғалысының орташа сызықтық жылдамдығы;  $P_1$  және  $P_2$  тамырдың ұштарындағы қысым;

$l$  — тамырдың ұзындығы;  $\eta$  — қанның тұтқырлығы. Осыларды ескере отырып сорғының үзіліссіздік тендеуін былай жазамыз:

$$(6) \quad Q = \frac{P_1 - P_2}{l} \cdot \frac{\pi r^4}{8\eta}.$$

Мұндағы  $\frac{P_1 - P_2}{l}$  - тамырдың ұштарындағы қысым өзгерісі

немесе оны қысым градиенті дейді. Жоғарыдағы формуланы көлденең қимасы тұрақты цилиндр түтіктермен реал сұйықтардың стационарлық ағыны үшін Гаген-Пуазейль тендеуі дейді. Осы формуларға мынандай белгілеу жасайық, яғни,

$$(7) \quad \omega = \frac{8l\eta}{\pi r^4}$$

оны гидравликалық кедергі дейді. Сонда Гаген-Пуазейль тендеуін былай жазуға болады:

$$(8) \quad Q = \frac{\Delta P}{\omega}.$$

Енді осы формуланы тізбектің бөлігі үшін Ом заңымен салыстырайық:

$$(9) \quad I = \frac{\Delta \varphi}{R}.$$

Салыстырудың нәтижесінде мынандай қорытындыға келеміз: бұл екі заңның физикалық мағынасы бөлек болғанымен, кибернетикалық заңдылықтары бірдей, яғни:

а)  $Q$  — түтіктің көлденең қимасынан уақыт бірлігінде ағын өткен сұйықтың көлемі (немесе сұйықтың ұсақ молекулалар саны десе де болады) болса,  $I$  — ток деп өткізгіштің көлденең қимасынан уақыт бірлігінде өткен зарядтар санын айтады. Олай болса, кибернетикалық тұрғыдан қарағанда бұл екі ұғым бір-біріне ұқсас.  $Q \Leftrightarrow I$ ;

б) Түтіктің ұштарындағы  $DP$  - қысым айырмасы өткізгіштің ұштарындағы потенциалдар айырымын сипаттайды, яғни  $\Delta P \Leftrightarrow \Delta \varphi$ ;

в) со-гидравликалық кедергі - омдық кедергіні сипаттайды.  $\omega \Leftrightarrow R$ .

Сонымен қатар тізбектей жалғанған қан тамырының гидравликалық толық кедергісі мынаған тең  $\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n$  болса тізбектей қосылған өткізгіштердің толық кедергісі мынаған тең.  $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ .

Параллель қосылған қан тамырлары үшін гидравликалық толық кедергі мынаған тең болғанда

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} + \frac{1}{\omega_3} + \dots + \frac{1}{\omega_n}$$

(10) параллель қосылған электр өткізгіштерінің кедергісі:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$

(11)

болады.

Кибернетикалық тұрғыдан қарастырылғандағы осындай ұқсас-тық қан айналымы жүйесінің электрлік моделін жасауға мүмкіндік береді.