



Қанның тамырлар бойымен қан
қозғалысы

ҚАН АЙНАЛЫМ ЖҮЙЕСІНІҢ БИОФИЗИКАСЫ

Қан айналым биофизикасы — қанның қысымы мен қозғалыс жылдамдығының ара-қатынасындағы байланысты және олардың қанның, қан тамырларының, жүрек функцияларының физикалық параметрлеріне тәуелділігін зерттейді.

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.

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 η — қанның тұтқырлығы.

- Тұтқырлық тұрғысынан карағанда қан — ньютонды емес сұйык. Себебі қан — формалық элементтер суспензиясының плазмадағы ерітіндісі. Ол элементгердің өзіне тән ішкі құрылысы және қасиеттері бар.

Жуан қан тамырларының диаметрлері агрегаттың диаметрінен үлкен ($d_r > d_{\text{агр}}$), сонымен қатар қан тамырының диаметрі эритроциттердің диаметрінен аса үлкен ($d_r \gg d_{\text{эр}}$) болғандағы а

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

ың түзілісі



a

4 MM

6

6



3 MM



2 MM

63-cyper

Микротамырларда (капиллярларда) тамырдың диаметрі эритроциттің диаметрінен кіші болады ($d_r < d_{эр}$). Бірақ тірі 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 көлденең қимасының ауданы, R — тамырдың радиусы, сонда мұндағы $v_{орп}$ — қанның қан тамырлар бойымен қозғалысының орташа сызықтық жылдамдығы; P_1 және P_2 тамырдың ұштарындағы қысым; l — тамырдың ұзындығы; η — қанның тұтқырлығы. Бұл теңдеуді алғаш ашқан ғалымның құрметіне Пуазейль теңдеуі 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

Жоғарыда қарастырылған мысалдардан мынандай қорытынды жасауға болады. Жуан тамырлар үшін қанның тұтқырлығы сызықты өзгертеді, яғни $\eta = \eta_0(1 + kC)$, мұндағы η_0 — қанның бастапқы тұтқырлығы; C — эритроциттердің таралымы, k — эритроциттердің пішініне, розміріне және агрегаттың ерекшелігіне тәуелді геометриялық параметр.

Егер қанның құрамындағы ұсақ бөлшектердің 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 кұйылған қанның қозғалысы турбуленттік болғандықтан, аортадағы қанның қозғалысы да турбуленттік болады. Қанның қозғалыс жылдамдығы артқанда (мысалы, бұлшықетке 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 айналымына 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. Көлденең қималары әртүрлі тізбектей қосылған бірнеше түтіктердің бойымен уақыт бірлігінде сұйықтың өзара тең көлемі ағады. Қан қысымы деп қан тамырының көлденең қимасына (S) уақыт бірлігінде әсер ететін күштің (F) шамасын айтады, яғни

$$P = \frac{F}{S}$$

өлшем бірлігі $P = 1 \text{ Н/м}^2$. Сонымен қатар көлемдік және сызықтық жылдамдық деген ұғым бар. Көлемдік жылдамдық деп қан тамырларының көлденең қимасынан 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 $v = 1$ 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:

мұндағы

$$Q = \frac{V}{t},$$

$$t = \frac{l}{v}.$$

Олай болса

$$(3) \quad Q = Sv = \text{const.}$$

Себебі $\frac{V}{l} = S$ ырдың көлденең қимасының ауданы.

Осы тендеуді (3) 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

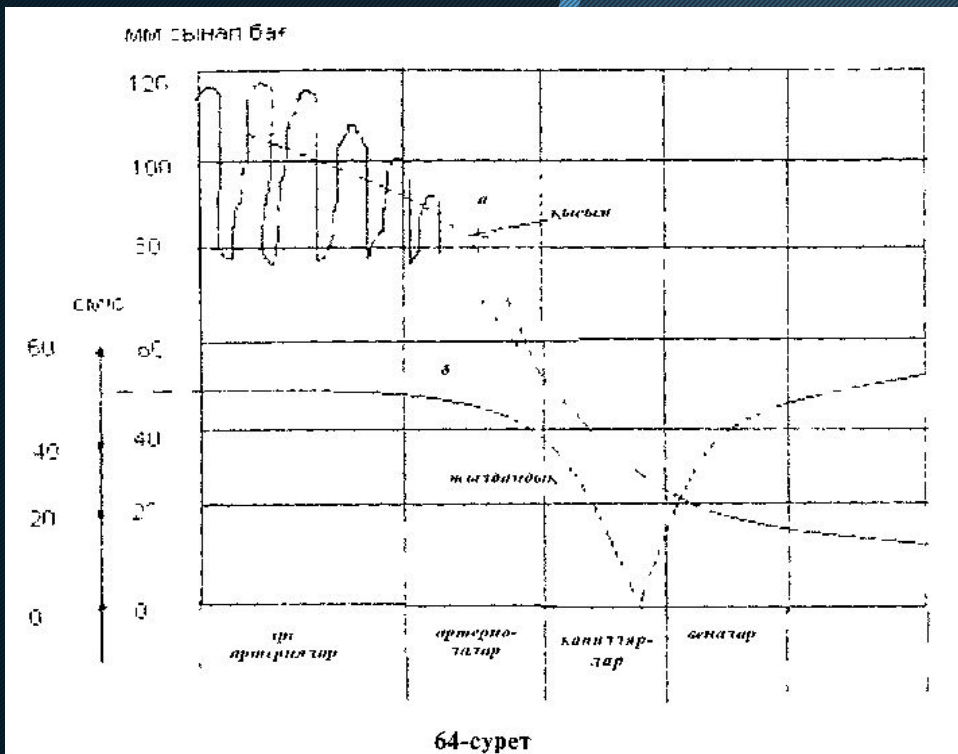
$$S_1 v_1 = S_2 v_2.$$

Осыдан

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

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 арасымен қозғалысының орташа сызықтық жылдамдығы; P_1 және P_2 тамырдың ұштарындағы қысым; l — тамырдың ұзындығы; η — қанның тұтқырлығы. Осыларды ескере отырып сорғының үзіліссіздік тендеуін былай жазамыз:

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

Мұндағы - қан тамырының 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,

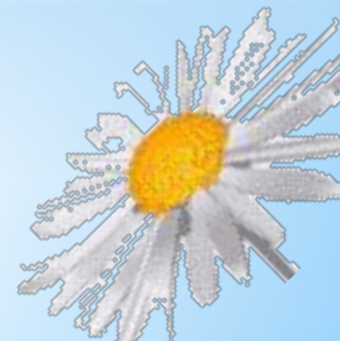
$$(7) \quad \omega = \frac{8l\eta}{\pi r^4}$$

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 ΔP - қысым айырмасы өткізгіштің ұштарындағы потенциалдар айырымын сипаттайды, яғни

$$\Delta P \Leftrightarrow \Delta \varphi; \quad \omega \Leftrightarrow R.$$

в) со-гидравликалық кедергі - омдық кедергіні сипаттайды.

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:

болады.

$$\left(\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

Кибернетикалық тұрғыдан қарастырылғандағы осындай ұқсастық қан айналымы жүйесінің электрлік моделін жасауға мүмкіндік береді.