

**Қанның тамырлар бойымен  
қозғалысының  
гемодинамикалық  
заңдылықтары. Қанның  
реологиялық қасиеттері.**

# *Жоспары*

- 1. Қанның қан тамырларымен қозғалысының гемодинамикалық заңдылықтары.*
- 2. Қан айнаруды зерттеу әдістері.*
- 3. Әртүрлі ағзалар мен ұлпалардың реографиясы.*
- 4. Үлкен қан тамырларындағы және капиллярлардағы қанның пішіндік элементтерінің қозғалысы.*
- 6. Реологиялық қасиеттерін анықтайтын факторлар.*

**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.

## Сұйықтар



### Идеаль

- 1- қысымды өзгерткенде сұйықтың көлемі өгеріссіз қалады
- 2- мүлдем тұтқыр (ішкі үйкеліс) емес
- 3-қозғалыс энергия шығынынсыз жүзеге асады

#### Мысалы:

Сұйықтарда өте төменгі температурада өте аққыштық (сверхтекучесть) құбылыс байқалады

### Реаль

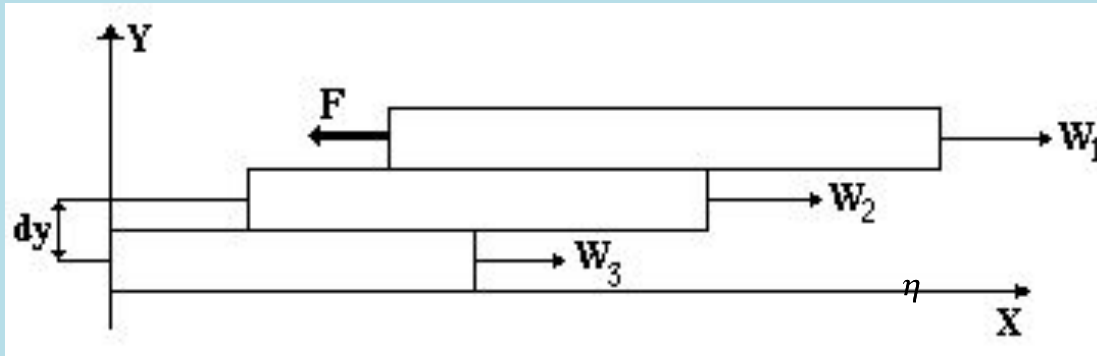
- 1- қысымды өзгерткенде сұйықтың көлемі өгереді
- 2-тұтқырлығы әр түрлі нүктеде өзгеріп отырады (ішкі үйкеліс )
- 3-қозғалыс кезіндегі кедергіні жеңу үшін энергия шығыны болады

#### Мысалы:

Ағзаның өмір сүру барысында биологиялық сұйықтар аз мөлшерде болса да сығылады, ал олардың тұтқырлығы біраз өзгеріске ұшырайды

# Тұтқырлық

- **Тұтқырлық (ішкі үйкеліс)** – қозғалыс кезінде сұйық қабаттарының бір-біріне жанама бойымен әсер ету құбылысы



$$F = \eta \cdot \left( \frac{dv}{dx} \right) \cdot S$$

- **Сұйық қозғалысы үшін Ньютон заңы:**
- Қозғалыстағы сұйықтың қабаттарының арасындағы кедергі күші жылдамдық градиентіне және көлденең қима ауданына тура пропорционал .
- $\eta$  - тұтқырлық [пуаз]; [Па · с].

## **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**

# Эритроциттердің тұнбаға түсу жылдамдығы (ЭТТЖ)

еркектер – 1-10 мм/сағ

әйелдер – 2-15 мм/сағ

Қабыну процестері кезінде ЭТТЖ  
артады.

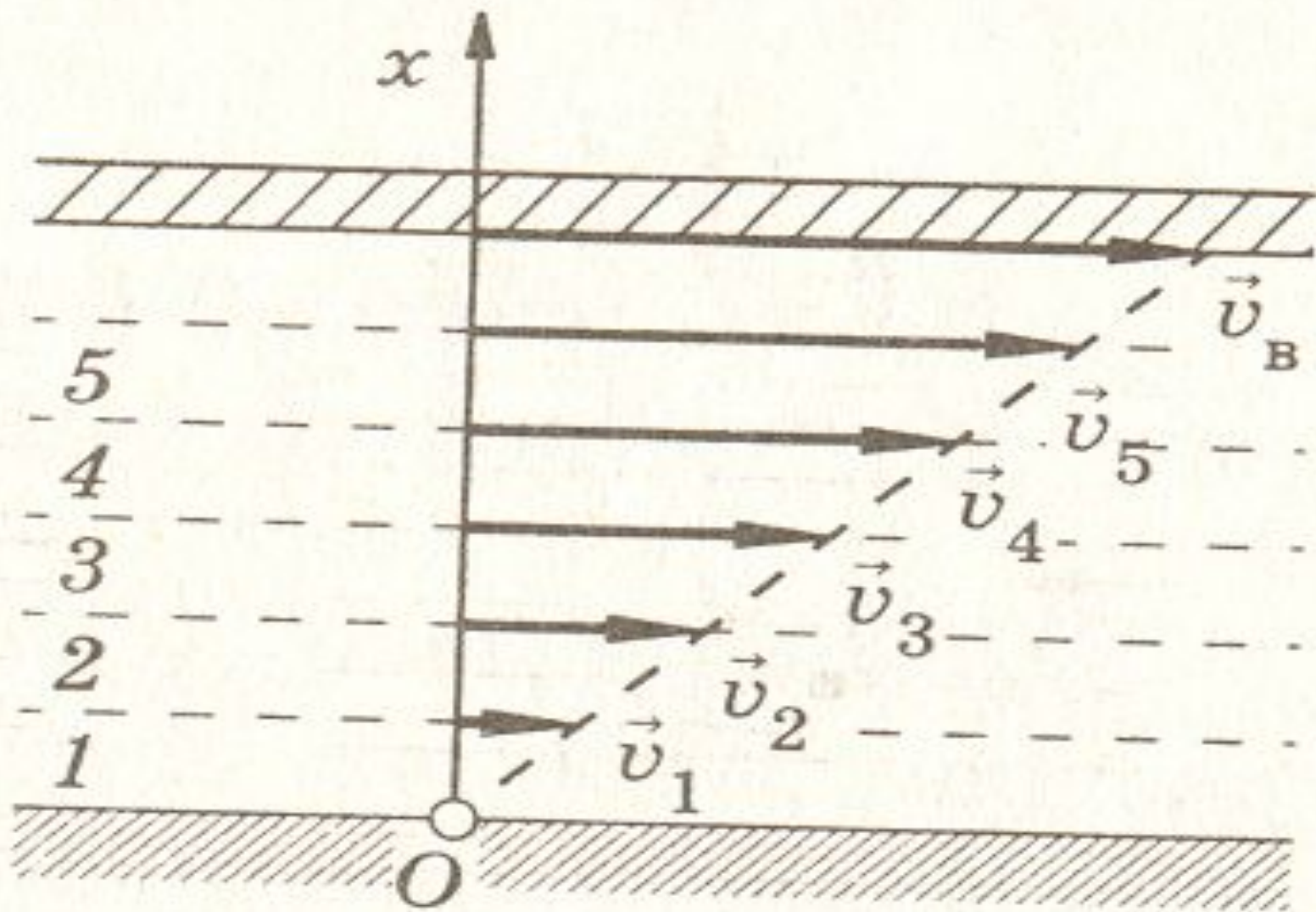


- Сұйықтар тұтқырлық қасиетіне қарай 2-ге бөлінеді: *ньютондық және ньютондық емес*
- Тұтқырлық коэффициенті сұйықтың табиғаты және температурасына тәуелді сұйықтарды *ньютондық сұйықтар* деп атаймыз.
- Тұтқырлық коэффициенті сонымен қатар сұйықтың ағыс жағдайын сипаттайтын шамаларға да тәуелді, мысалы, жылдамдық градиентіне тәуелді сұйықтарды *ньютондық емес* деп атаймыз.

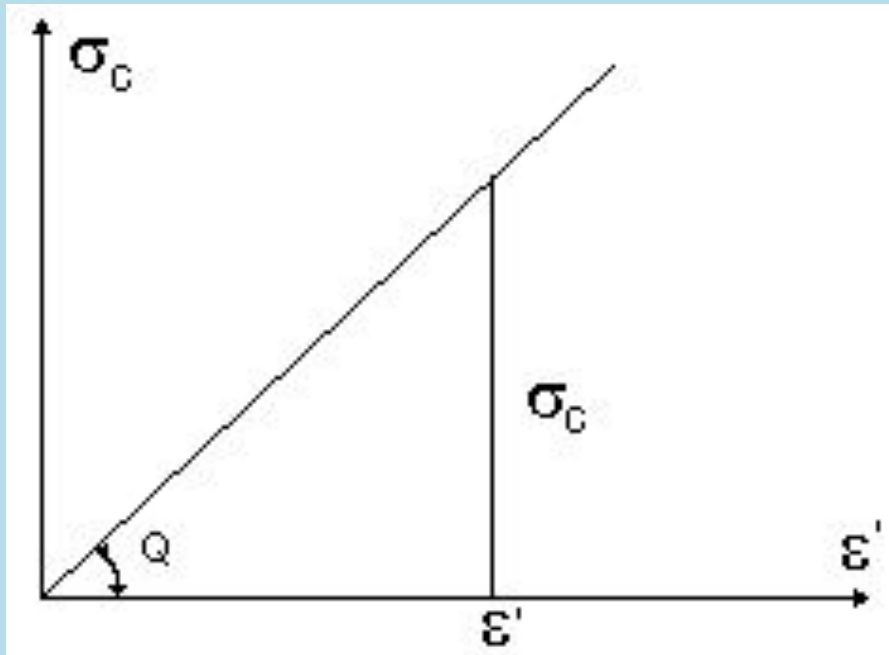
## ***И. Ньютон заңы (1687 ж.)***

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

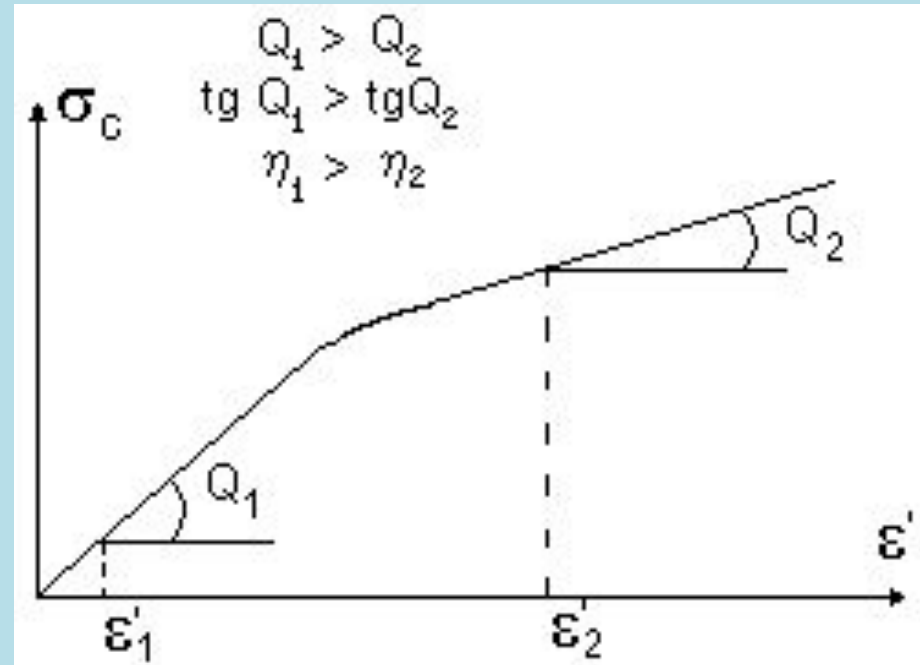
***Ішкі үйкеліс күші тез ағатын қабатты тежейді және жай ағатын қабатты үдетеді.***



# Ньютондық және ньютондық емес сұйықтар

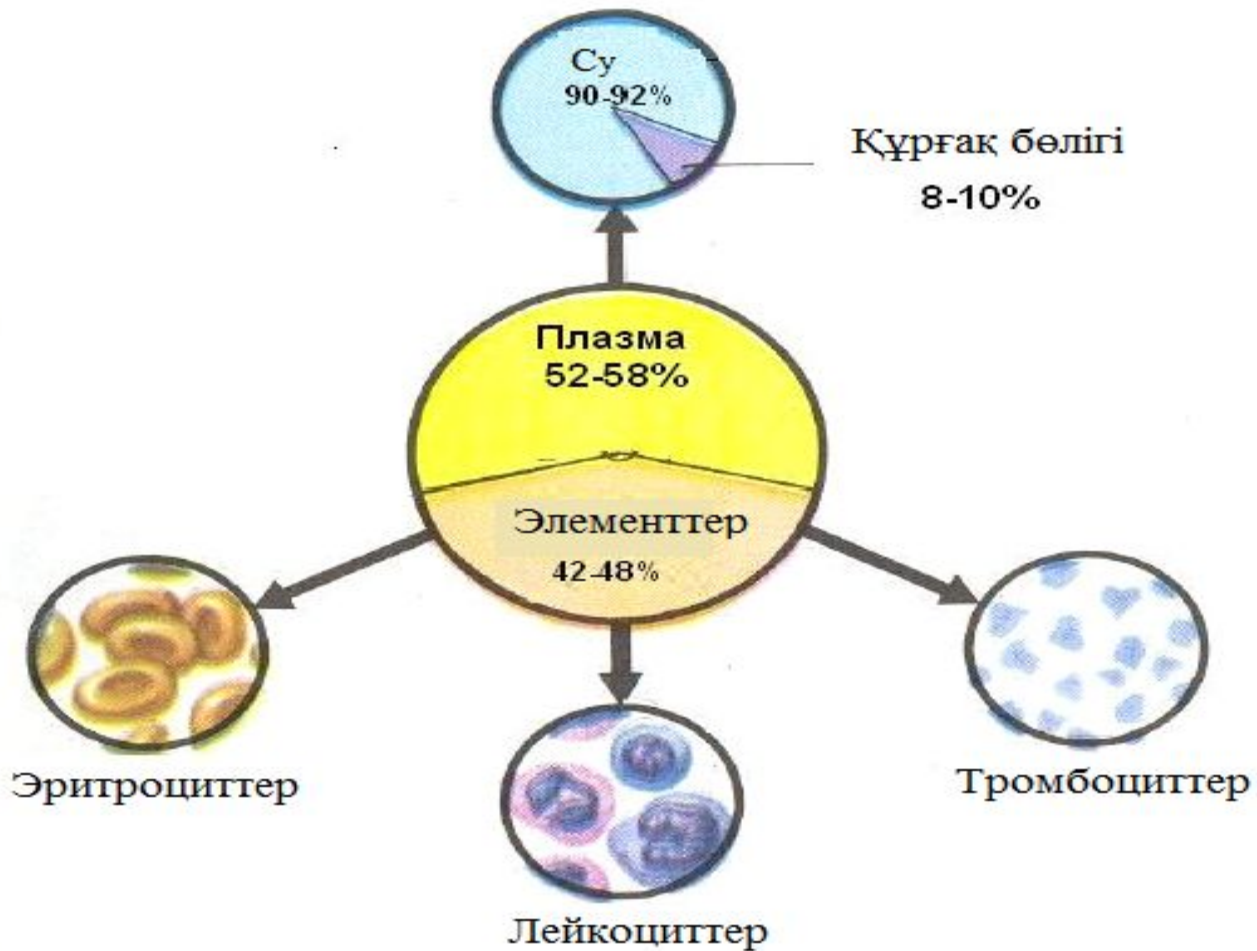


- Ньютондық сұйықтар
- Тұтқырлығы ағыс жағдайына тәуелсіз



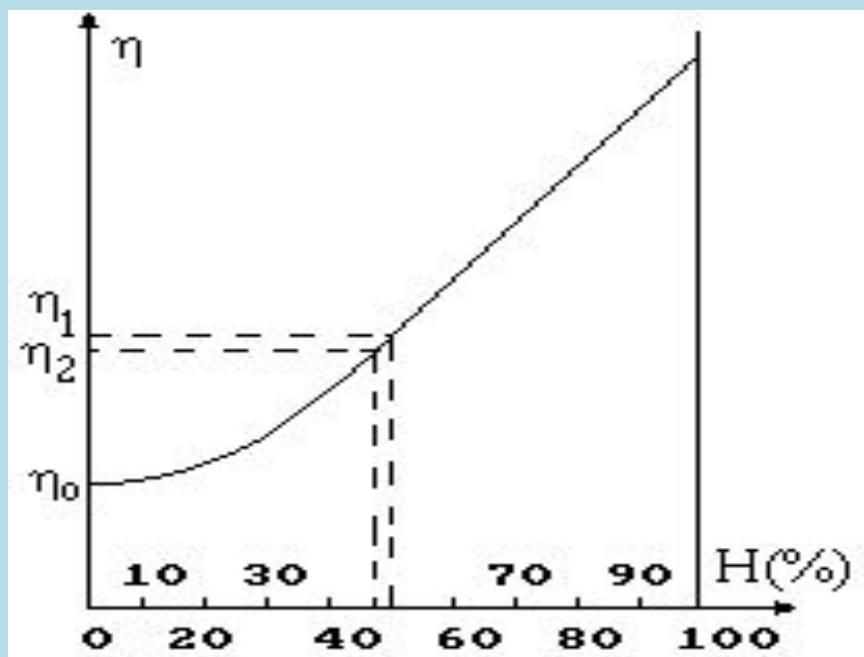
- Ньютондық емес
- Тұтқырлығы ағыс жағдайына байланысты өзгереді

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



$$H = \frac{V_{жас}}{V_{кан}} = \frac{N_{э}V_{э} + N_{л}V_{л} + N_{т}V_{т}}{V_{кан}} = H_{э} + H_{л} + H_{т}$$

# Қанның тұтқырлығы



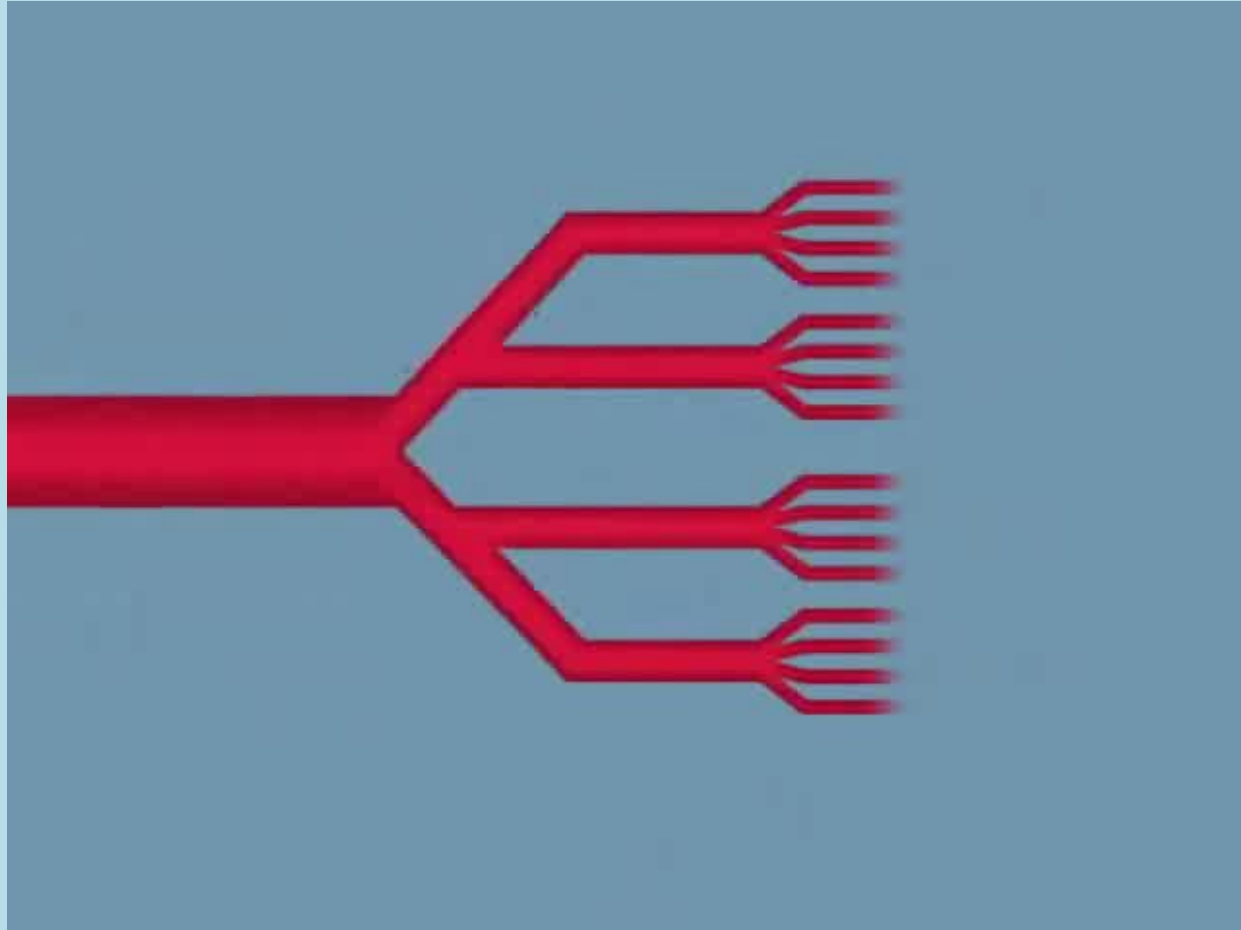
- Гематокрит деп эритроциттердің жиынтық көлемінің қан көлеміне қатынасын айтады :

$$Ht = \frac{\sum V_{кл}}{V_{кр}} \approx \frac{\sum V_{эритроцитов}}{V_{кр}}$$

$$\eta_{кан} = \eta_{плазма} \cdot e^{\alpha \cdot H}$$

- $\alpha$ - коэффициент
- H- гематокрит

# *Үздіксіздік шарты*



$$v_a \cdot S_a = v_k S_k$$



- **АҒЫСТЫ СИПАТТАЙТЫН БАРЛЫҚ ШАМАЛАР, ЯҒНИ АҒЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫ, СҰЙЫҚ ТЫҒЫЗДЫҒЫ ЖӘНЕ АҒЫННЫҢ БЕРІЛГЕН НҮКТЕЛЕРІНДЕГІ ТЕМПЕРАТУРАЛАРЫ ӨЗГЕРМЕЙТІН БОЛСА, ОНДАЙ АҒЫСТЫ СТАЦИОНАРЛЫҚ АҒЫС ДЕП АТАЙДЫ.**

**Стационарлық ағыс кезінде қандай да бір уақыт бірлігінде түтіктің кез келген қимасы арқылы сұйықтың бірдей көлемі ағып өтеді:**

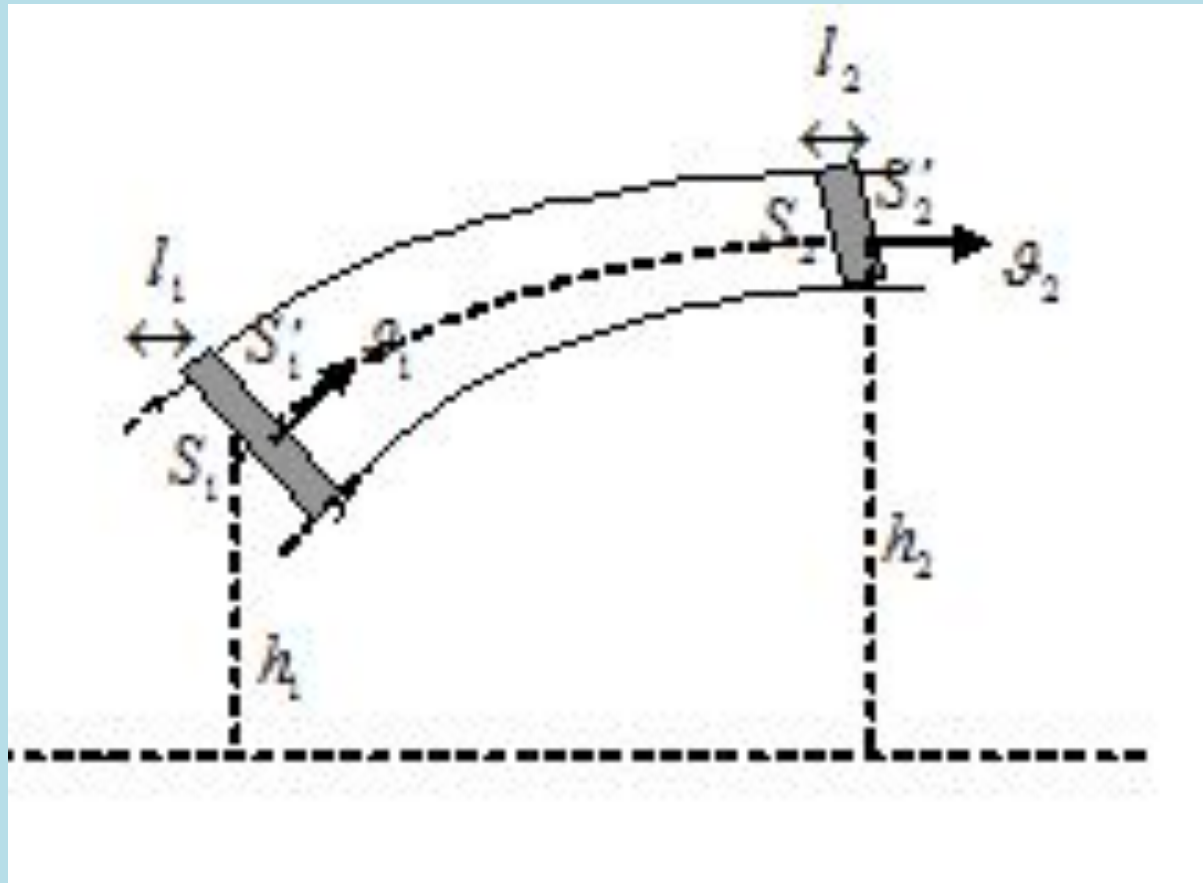
$$Q=US = \text{const.}$$

$$u_1 S_1 = u_2 S_2$$

- **Бұл ағынның *үздіксіздік шарты* деп аталады.**

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

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

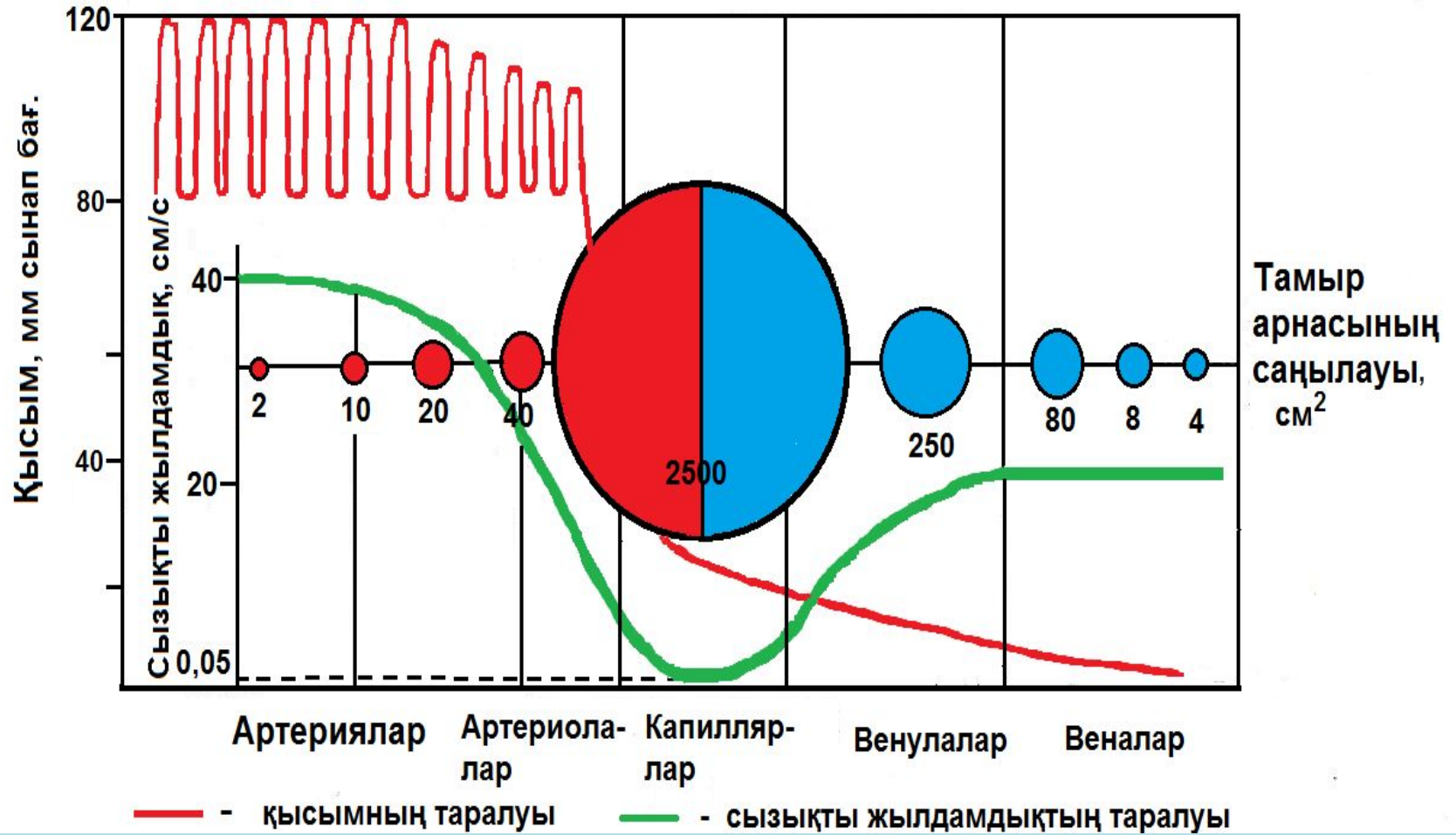


# *Қан ағысының сызықты жылдамдығы*

**Бүкіл денедегі капиллярлардың жалпы жинақ саңылауы қолқа диаметрінен 500-600 есеге артық. Сондықтан капиллярларда қан ағысының сызықтық жылдамдығы қолқадағыдан сонша есе баяу**

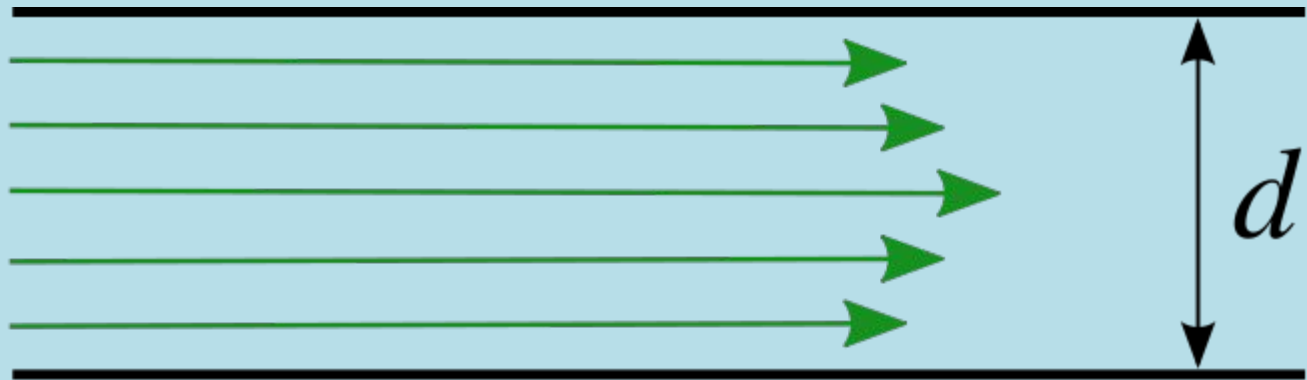
$$v_{\text{кап}} = v_{\text{қолқа}} / 500$$

## ҮЛКЕН ҚАНАЙНАЛЫМ ШЕҢБЕРІ МОДЕЛІ

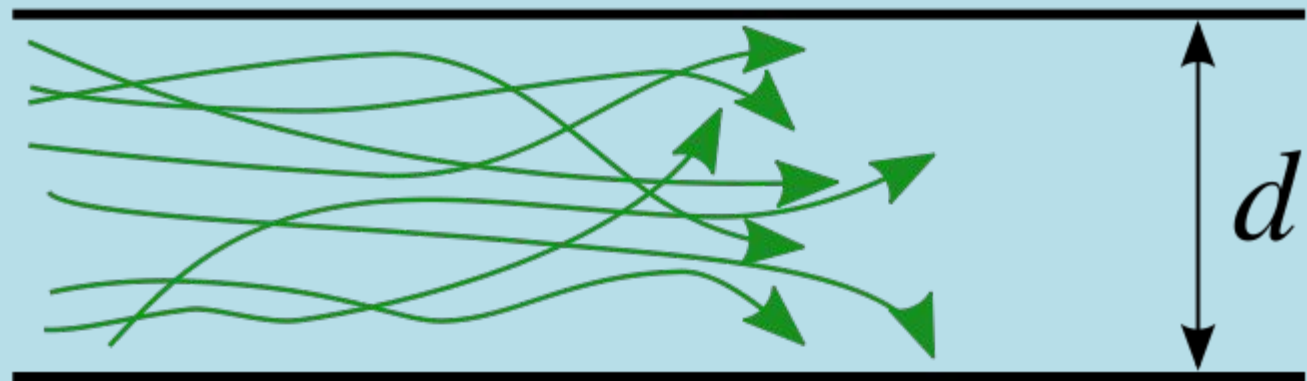


# Ламинарлы және турбулентті ағыстар

(a)



(b)

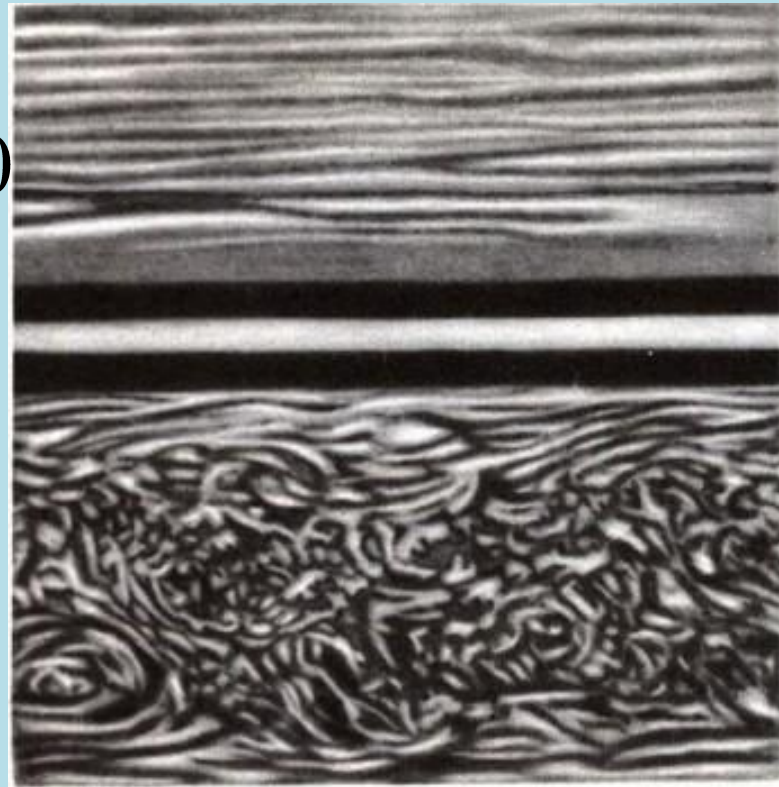


## Рейнольдс саны

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

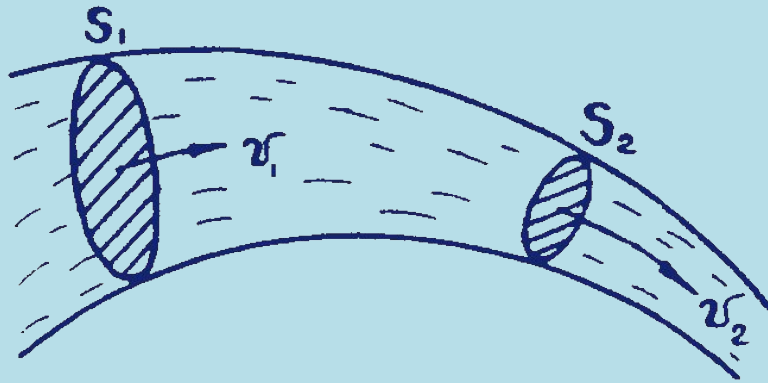
$$Re_{кр} < 2300$$

- Ламинарлы ағыс турбулентті ағысқа айналады.



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

# Гаген-Пуазейль формуласы:



$$Q = \frac{\Delta P}{W}$$

Көлденең қима арқылы ағып өтетін сұйықтың көлемі ( $Q$ ) қысымдар айырымына тура пропорционал да, гидравликалық кедергіге кері пропорционал.

$$I = \frac{U}{R}$$



**Түтіктің гидравликалық кедергісі:**

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

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

**Тамырлардағы қан қысымы қан ағысының көлемдік жылдамдығына және тамыр радиусының дәрежесіне тәуелді.**

# *Гидравликалық кедергі*

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

$$R_{\text{қолқа}} : R_{\text{арт}} : R_{\text{арт-л}} : R_{\text{кап}} = 3000 : 500 : 7 : 1.$$

- Гидравликалық кедергі *түтік радиусына* тәуелді:

$$W_{\text{кап}} > W_{\text{арт-л}} > W_{\text{арт}} > W_{\text{қолқа}}$$

# *Қан тамырлар жүйесінің моделі*

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

**Қанды айдайтын насос – біздің жүрегіміз.**

- **аорта**
- **артериола**
- **капилляр**
- **венула**
- **веналар**

# 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.

***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.

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{Eh}{2r\rho}}$$

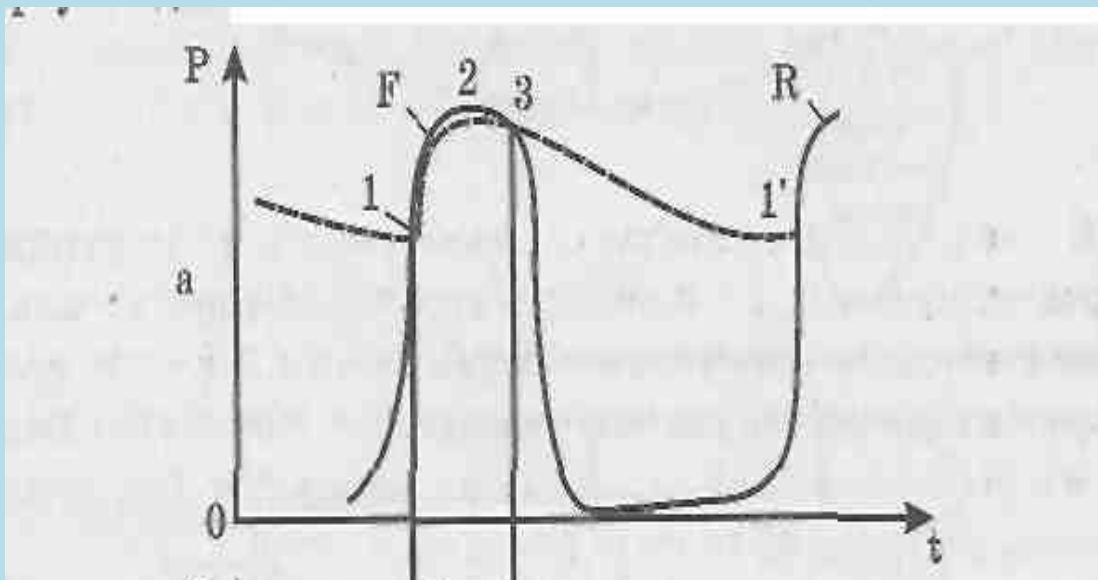
*Аортада* пульстік толқынның таралу жылдамдығы - 4...6 м/с, *артерияда* - 8...12 м/с, *веналарда* - 1 м/с.

# Франк моделі

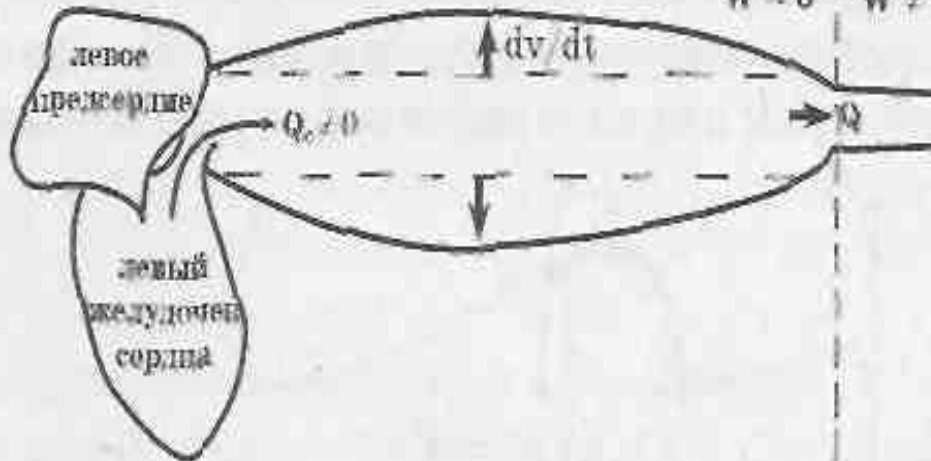
Қан ағысының жүйедегі екі  
фазасы: *«жүректің сол  
қарыншасы - ірі тамырлар – ұсақ  
тамырлар»*



- *1-ші фаза* – қолқа қақпашаларының ашылып, жабылғанға дейінгі кезеңінде *жүректен* қанның *қолқа қан тамырына* 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, $Q_c \neq 0$	$C \neq 0$	$C = 0$
	$W = 0$	$W \neq 0$



- **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.



## **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**

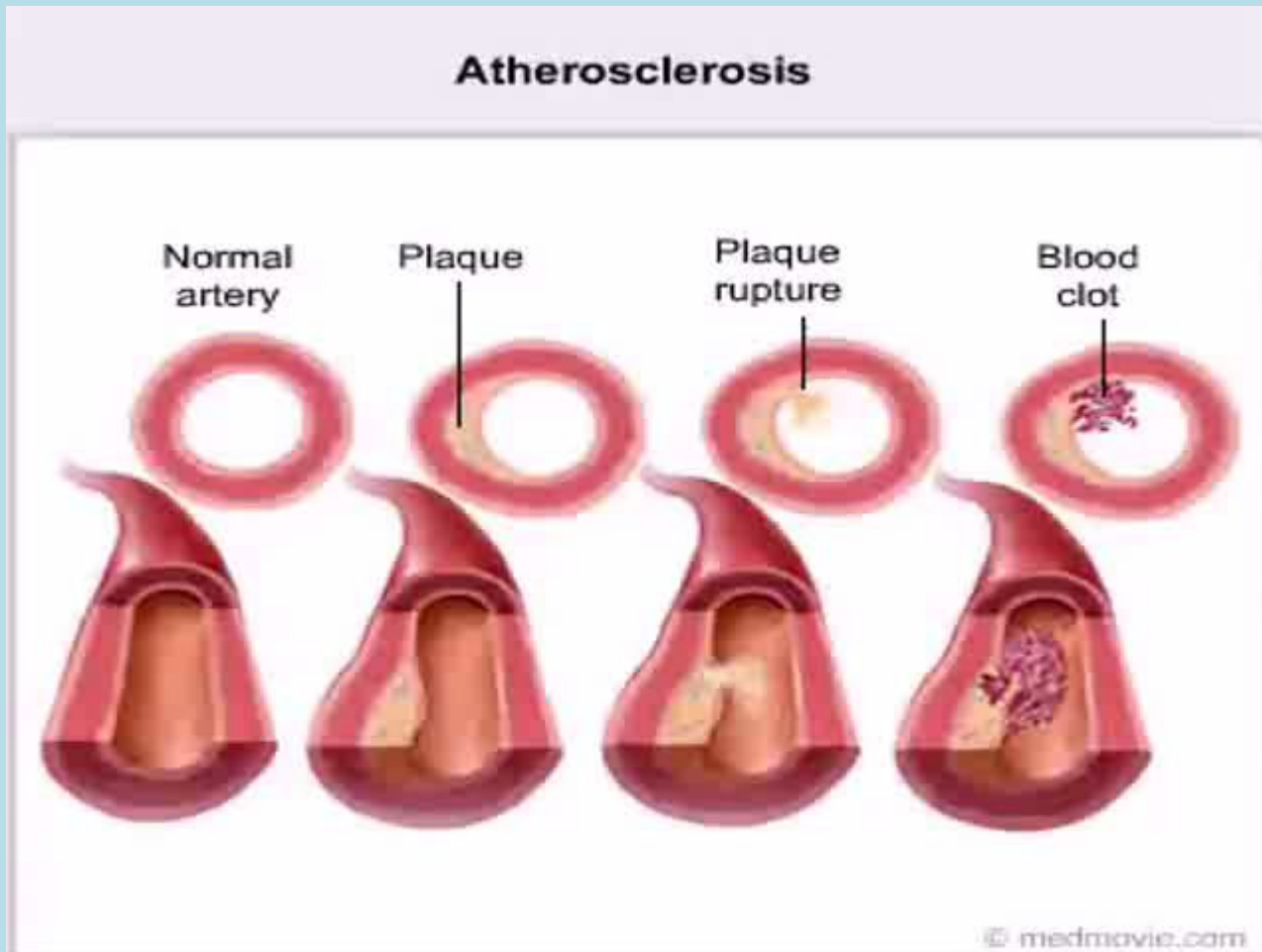
# *Реография*

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).

# Атеросклероз





Бұл әдістің көмегімен мидың  
(*реоэнцефалограмма*), жүректің  
(*реокардиограмма*), негізгі қан  
тамырларының, өкпенің, бауырдың  
*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 тоқтың 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.*

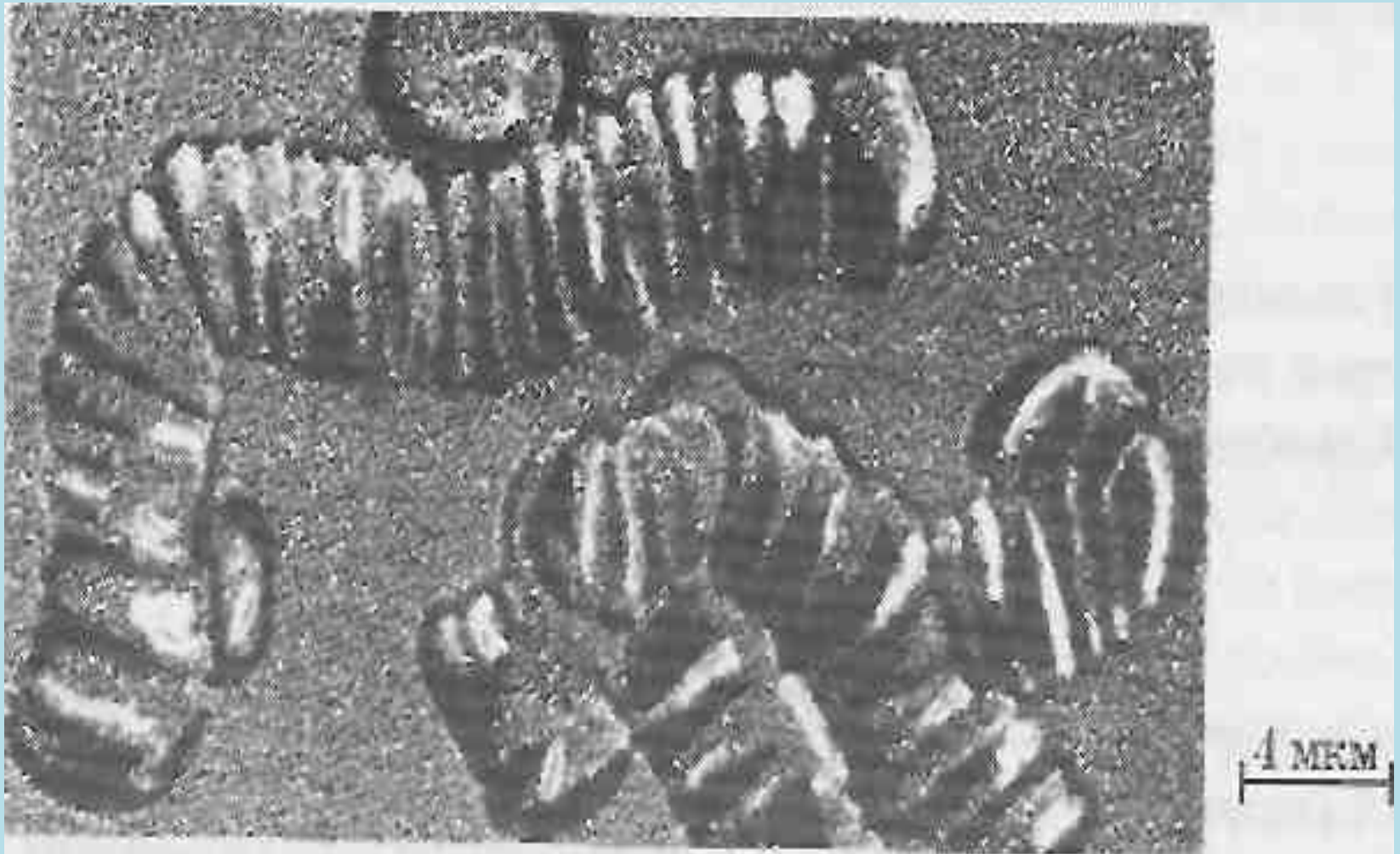
*Систолалық (сонымен қатар жүректің минуттік көлемін) анықтау үшін интегралдық реография деп аталатын әдіс қолданылады.*

# *Интегралдық реография*

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



а) ірі қан тамырларындағы  
*эритроциттер агрегаты*  
(«монетті столбиктер»)



Ірі қан тамырларда қанның ағысы үшін тұтқырлық:

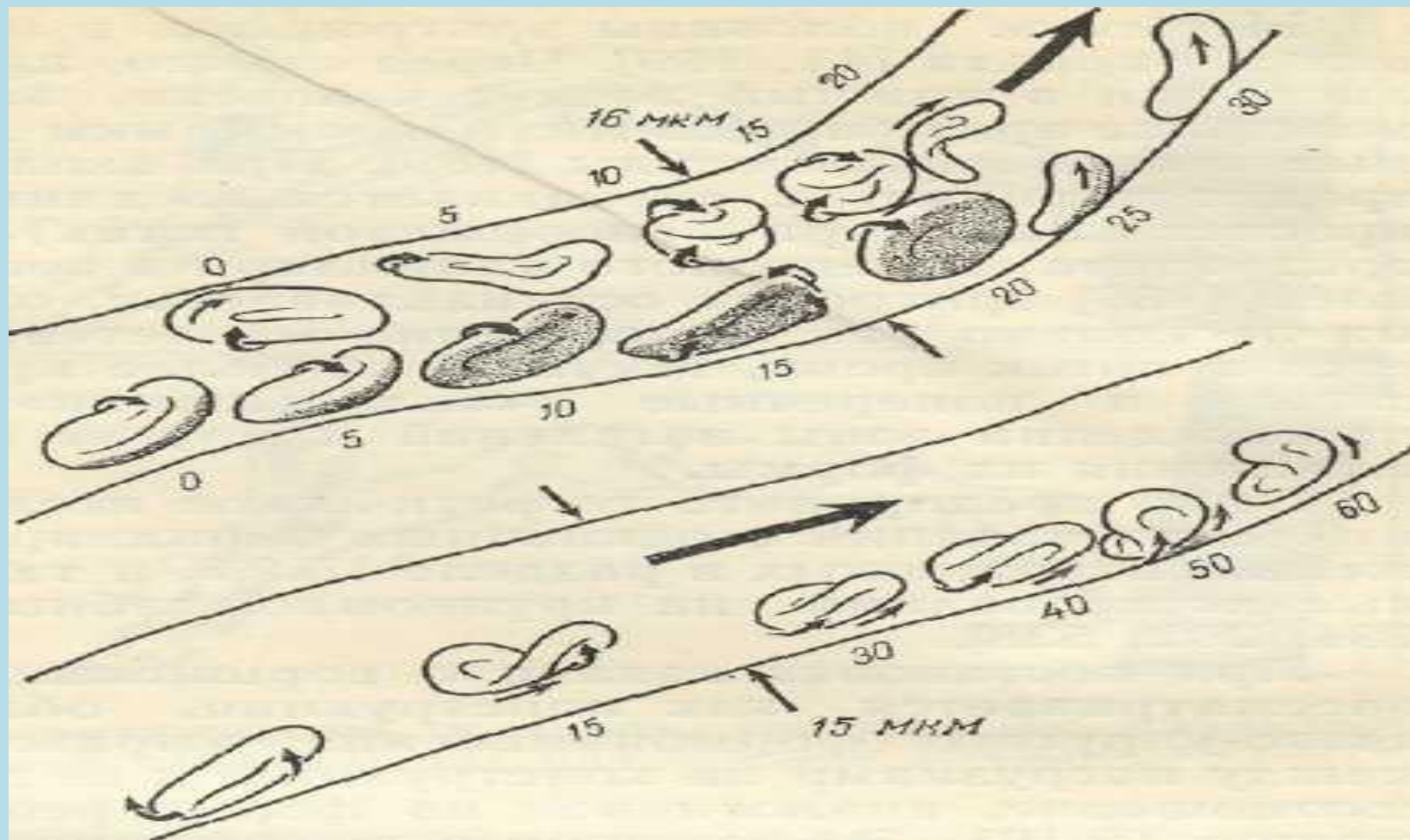
- Қалыпты жағдайда -  $\eta_{ірік} = (4,2 - 6) \cdot \eta_c$
- анемия кезінде =  $\eta_{ан} = (2 - 3) \cdot \eta_c$
- полицитемияда =  $\eta_{пол} = (15 - 20) \cdot \eta_c$
- Плазманың тұтқырлығы  $\eta_{пл} \approx 1,2 \cdot \eta_c$
- Судың тұтқырлығы = 0,01 Пуаз (1 Пуаз = 0,1 Па • с).

Кез келген сұйықтар тәрізді қан тұтқырлығы температура төмендегенде *артады*. Мысалы, температура  $37^{\circ}\text{C}$ -тен  $17^{\circ}\text{C}$  -қа дейін төмендегенде қан тұтқырлығы *10%-ке артады*.

## *Ұсақ тамырдағы ағыс*

*Рейнольдс саны  $Re < 0,5$ , диаметрі 15—20 мкм түтіктің қабырғаға жақын шетінде эритроциттер траекториямен қозғала отырып, айналады. Эритроциттер 2—10 мс ішінде, яғни 15—40 мкм жолда остен айнала толық айналыс жасайды. Түтік диаметрі артқан сайын эритроциттер траекториясы күрделірек болады.*

*Диаметрі 15 мкм артериол бойымен эритроциттердің формасын өзгертуі және айналуы.*



## *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?