

## Практична робота № 8

### Модель фільтраційно-реабсорбційних процесів у капілярах

Дана робота присвячена вивченню одного з механізмів переносу речовин через стінку капіляра, а саме фільтраційно-реабсорбційному механізму транспорту речовин разом з рідиною під дією градієнта тиску. Одним з патологічних проявів, пов'язаних з порушенням фільтраційно-реабсорбційної рівноваги є виникнення тканинних набряків. Біофізичний підхід дозволяє якісно й кількісно проаналізувати цей ефект.

#### Ціль роботи:

1. Навчитися складати рівняння кровотоку в капілярі з пористою структурою.
2. Навчитися аналізувати розв'язки даних рівнянь.
3. Проаналізувати можливі механізми тканинних набряків.

#### Література:

1. Антонов В.Ф. і ін. Біофізика. - М.: Владос. 2000.
2. Фізіологія людини. Під ред. Р. Шмидта й Г. - Тевса.: М. Мир.1996.
3. Даний посібник.

#### Підготовка до роботи

Вивчити по рекомендованій літературі наступні питання:

1. Закон Пуазейля.
  2. Осмос. Осмотичний тиск. Онкотичний тиск.
  3. Кінетичні рівняння. Метод їхньої побудови.
  4. Механізм фільтраційно-реабсорбційних процесів у капілярі.
- Кінетичні рівняння для кровотоку в капілярі.
5. Геометричний зміст визначеного інтегралу.

#### Теоретичні відомості

При фільтраційно-реабсорбційних процесах вода й розчинені в ній солі проходять через стінку капіляра завдяки неоднорідності її структури. Напрямок і швидкість руху води через різні пори в капілярній стінці визначаються гідростатичним і онкотичним тисками в плазмі й міжклітинній рідині:

$$q = f \cdot \left( (P_{ГК} - P_{ГТ}) - (P_{ОК} - P_{ОТ}) \right),$$

- де  $q$  – об'ємна швидкість руху води через капілярну,  
 $P_{ГК}$  – гідростатичний тиск у капілярі,  
 $P_{ГТ}$  – гідростатичний тиск у тканинній рідині,  
 $P_{ОК}$  – онкотичний тиск тканинної рідини,  
 $P_{ОТ}$  – онкотичний тиск плазми в капілярі.

Коефіцієнт фільтрації (коефіцієнт проникності)  $f$  визначається в'язкістю рідини, що фільтрується, розмірами пор і їхньою кількістю.

Під дією  $P_{гк}$ ,  $P_{от}$  рідина прагне вийти з капіляра в тканині (фільтрація), а під дією  $P_{гк}$ ,  $P_{от}$  – повернутися назад у капіляр (реабсорбція). Якщо знак  $q$  позитивний, то відбувається фільтрація, якщо негативний, то має місце реабсорбція. При нормальних умовах тиск на початку капіляра (в артеріальному кінці)  $P_a = 30-35$  мм рт.ст., а наприкінці його (у венозному кінці)  $P_v = 13-17$  мм рт. ст. Гідростатичний тиск у міжклітинній рідині звичайно не більше  $P = 3$  мм рт. ст.

У зв'язку з тим, що стінки капілярів вільно пропускають невеликі молекули, концентрація цих молекул і створювані ними осмотичні тиски в плазмі й у міжклітинній рідині приблизно однакові. Що ж стосується білків плазми, та їхні великі молекули важко, проходять через стінки капілярів, у результаті вирівнювання концентрацій білків за рахунок дифузійних процесів не відбувається. Між плазмою й міжклітинною рідиною створюється градієнт концентрації білків, а отже й градієнт онкотичного тиску. Онкотичний тиск плазми  $P_{ок} = 25$  мм рт. ст., а онкотичний тиск у тканині  $P_{от} = 5$  мм рт. ст.

Градієнт гідростатичного тиску уздовж капіляра при нормальних фізіологічних умовах призводить до того, що звичайно фільтрація відбувається в артеріальному кінці, а реабсорбція – у венозному кінці капіляра (рис. 8.1а).

Між об'ємами рідини, що фільтрується, в артеріальному кінці та в якій відбувається реабсорбція, у венозному кінці, у нормі існує динамічна фільтраційно-реабсорбційна рівновага. Приблизно 10% обсягу рідини, що надходить в інтерстиціарний простір, залишається там і потім повертається назад у судини за допомогою лімфатичної системи (рис. 8.1б). З рис. 8.1 видно, що існує певна точка "А" на графіку, у якій відсутня й фільтрація, і реабсорбція - це точка рівноваги. При зміні кожного з факторів, що визначають фільтраційно-реабсорбційну рівновагу, вона порушується.

Одним з патологічних проявів, пов'язаних з порушенням фільтраційно-реабсорбційної рівноваги, є виникнення набряків. Тканинний набряк - скупчення надлишкової кількості рідини в тканинах організму в результаті порушення співвідношення між припливом і відтоком тканинної рідини. Це може бути, якщо занадто багато рідини фільтрується з капілярів у тканину в порівнянні з її реабсорбцією або якщо є порушення в лімфатичній системі, що перешкоджають нормальному поверненню рідини в судини.

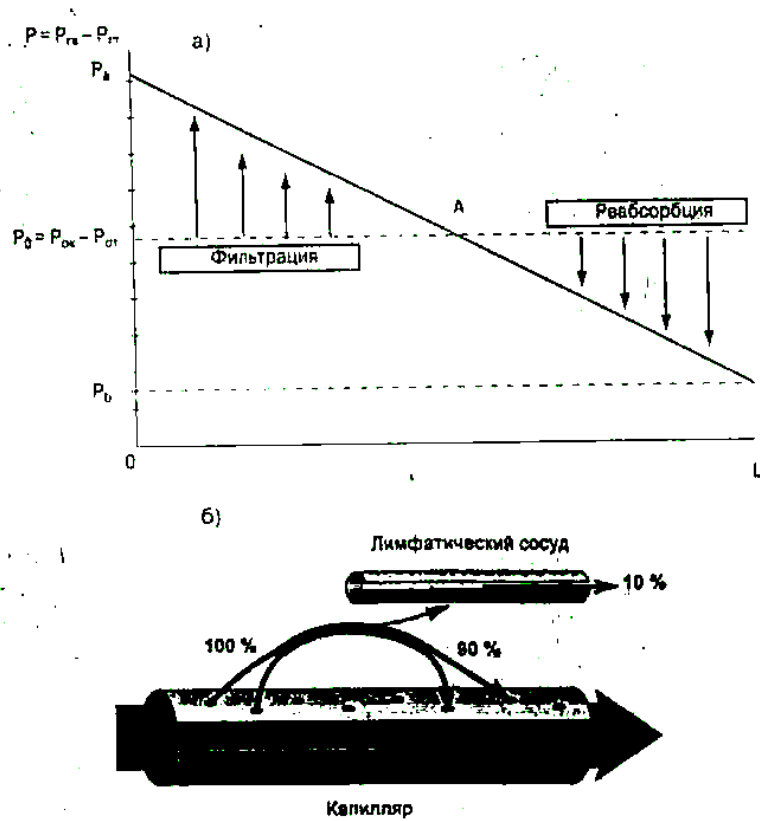


Рисунок 8.1. – Схема фільтрації та реабсорбції у капілярі

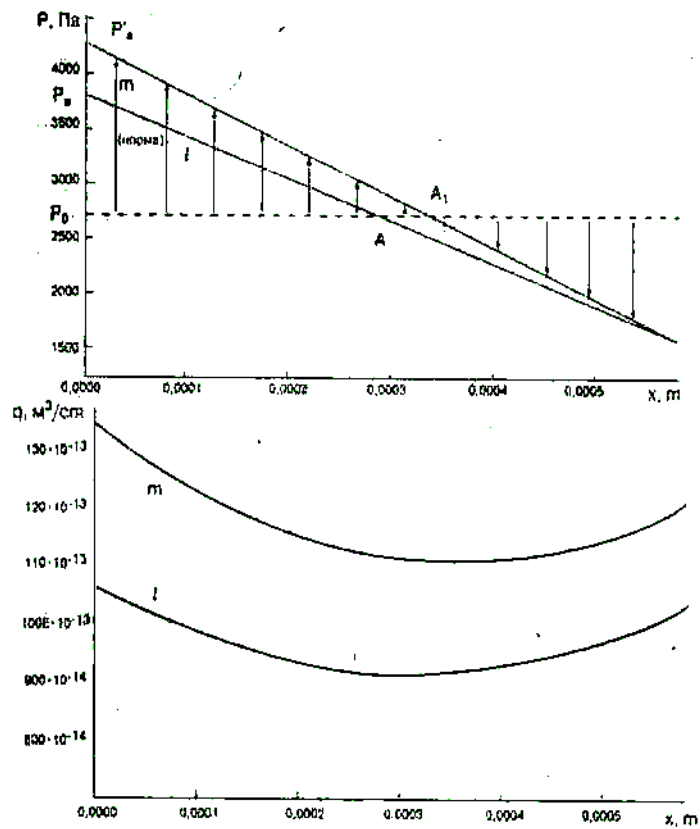


Рисунок 8.2. – Вплив артеріального тиску на співвідношення фільтрації та реабсорбції

Можна виділити наступні головні фактори, що призводять до надлишкового виходу рідини в міжклітинний простір, тобто до збільшення коефіцієнта  $K$  (див. нижче):

а) *Збільшений капілярний тиск,  $P_a$*  (рис. 8.2). Він виникає через зменшення опору артеріол за рахунок їхнього розширення, наприклад, при сильному нагріванні тіла, при прийманні судинорозширювальних ліків. На рис. 8.2 криві  $l$  - норма, криві  $m$  відповідають випадку підвищеного тиску  $P_a'$ .

б) *Зменшена концентрація білків у плазмі, що* призводить до зменшення онкотичного тиску,  $P_o$  (рис. 8.3). Зменшення концентрації білків у плазмі відбувається, наприклад, при нефрози – захворюванні нирок, що характеризується переважним ураженням ниркових каналів.

При цьому втрата білків у плазмі крові пов'язана з виділенням великої їхньої кількості із сечею. Іншою причиною зменшення концентрації може бути недостатнє виробництво білків при захворюваннях печінки або при поганому харчуванні.

Оскільки альбумін становить саму більшу фракцію білків плазми, то зміни в концентрації альбуміну особливо сильно впливають на онкотичний тиск. Зниження концентрації альбуміну в плазмі часто призводить до затримки води в міжклітинному просторі (інтерстиціальний набряк). У зв'язку із цим штучні кровозамінники, як правило, повинні, володіти тим же онкотичним тиском, що й плазма. Як колоїди в таких розчинах часто використовують полісахариди й поліпептиди (желатин), тому що одержання в чистому виді білків плазми крові людини – дуже дорога процедура.

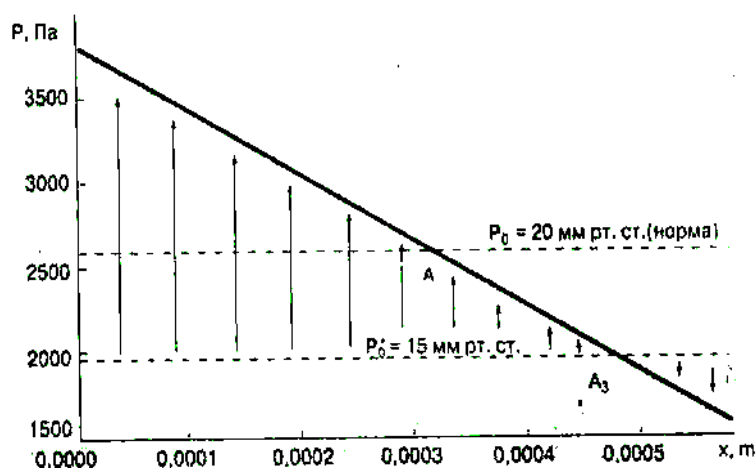


Рисунок 8.3. – Вплив онкотичного тиску в капілярі на співвідношення фільтрації та реабсорбції

в) *Підвищена проникність капілярів* може бути обумовлена, зокрема, дією гістамінів, а також інших речовин, що виділяються при алергійних реакціях, запаленнях, інфекції, опіках, дії радіації й ін.

Розрахунки показують, що при діаметрі пор у капілярі більше 20-30 нм залежність  $P(x)$  стає явно нелінійною (рис. 8.4).

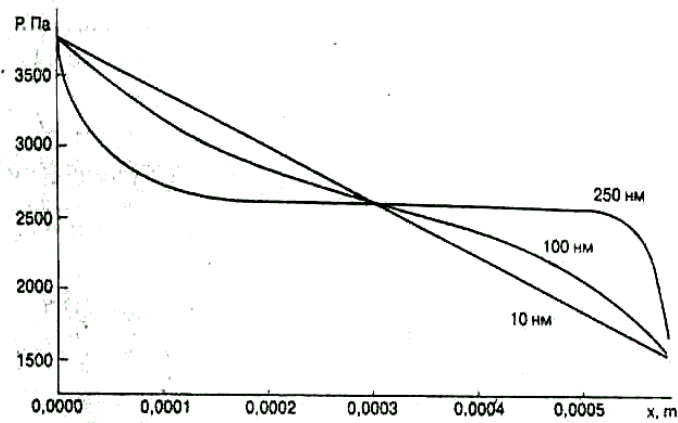


Рисунок 8.4. – Нелінійний розподіл  $P(x)$  при збільшенні радіуса гідравлічних пор

*Математична модель кровотоку при фільтраційно- реабсорбційних процесах.*

Залежність  $P_{гк}(x)$  можна вважати лінійною, як на рис. 8.1, тільки при припущенні, що об'ємна швидкість плинину рідини по капіляру ("подовжній" плин) у багато разів перевищує швидкість транскapілярного плинину ("поперечний" плин). Ця умова виконується при нормальних фізіологічних умовах, коли дійсно, тільки 0,5%-2% загального обсягу плазми крові піддається фільтрації. У загальному ж випадку функції  $P(x)$ ,  $Q(x)$  і  $q(x)$ , залежать один від одного, та є нелінійними.

Для того щоб знайти функції  $P(x)$ ,  $Q(x)$  і  $q(x)$  складемо наступну систему рівнянь. Розглянемо два процеси, що одночасно протікають в розподіленій системі: рух рідини уздовж капіляра й поперек через гідравлічні пори в його стінці (рис 8.5).

При цьому капіляр розглядаємо як тверду трубку із циліндричними порами в її стінці (рис. 8.5). Допустимо по такій трубці тече вода з розчиненими в ній солями, крім цього в ній є молекули білка, розміри яких настільки більші, що вони не можуть проходити через пори в трубці.

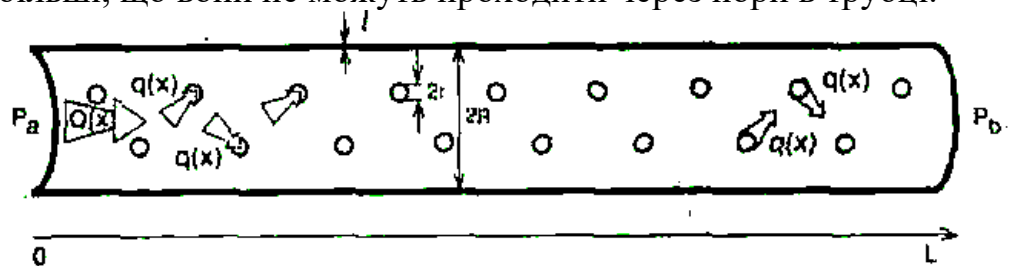


Рисунок 8.5. – Модель капіляра

Швидкість руху води через пори  $q dx$  дорівнює зменшенню швидкості її плинину по капілярі на довжині  $dx$ :

$$dQ = -q dx, \tag{2}$$

де  $q$  [ $\text{м}^3/\text{с м}$ ] – об'ємна швидкість плинину рідини через всі пори на поверхні капіляра одиничної довжини,

$Q$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ] – об'ємна швидкість плинину рідини уздовж капіляра.

Допустимо, що основним рівнянням, що пов'язує гемодинамічні величини, є закон Пуазейля.

Для "поздовжнього" плинину по капіляру:

$$Q = - \frac{1}{W} \cdot \frac{dP}{dx} .$$

Величина  $P(x) = P_{гк}(x) - P_{гг}$  – результуючий гідростатичний тиск. Питомий гідралічний опір капіляра (одиничної довжини)

$$W = \frac{8\eta}{\pi R^4} , \quad (3)$$

де  $R$  – радіус просвіту капіляра,

$\eta$  – коефіцієнт в'язкості рідини, яку ми будемо вважати ньютонівською.

Для "для поперечного" плинину через стінку капіляру:

$$q = \frac{P - P_0}{w} , \quad (4)$$

де результуючий онкотичний тиск  $P_0 = P_{ок} - P_{от}$ .

Величина

$$w = \frac{8\eta l}{\pi r^4 \cdot N \cdot 2\pi R} = \frac{4\eta l}{\pi^2 r^4 \cdot R \cdot N}$$

являє собою гідралічний опір всіх пор на поверхні капіляра одиничної довжини,

тут  $N$  – кількість пор на  $1 \text{ м}^2$  поверхні капіляра,  $r$  – радіус пори,  $l$  – її довжина (товщина стінки капіляра). Вважаємо, що розміри й щільність розподілу пор однакові уздовж капіляра.

$$\lambda = \sqrt{\frac{w}{W}} = \sqrt{\frac{R^3 \cdot l}{2\pi r^4 \cdot N}}$$

Позначаючи й беручи до уваги рівняння (2)-(4), одержимо диференціальне рівняння другого порядку

$$\frac{d^2P}{dx^2} - \frac{P}{\lambda^2} = - \frac{P_0}{\lambda^2} . \quad (5)$$

Граничними умовами для даного рівняння приймемо величини гідростатичного тиску на артеріальному ( $x = 0$ ) і венозному ( $x = L$ ) кінцях капіляра:

$$\begin{aligned} P(x = 0) &= P_a, \\ P(x = L) &= P_b. \end{aligned}$$

Розв'язок рівняння (5):

$$P = A \cdot e^{\frac{x}{\lambda}} + B \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} + P_0.$$

Коефіцієнти  $A$  и  $B$  знаходять із граничних умов.



	рт.ст.	рт.ст.						Па с	
І Зміна Pa	28,4 31 33	20	12	600	0,6	3	1,3 $10^{-12}$	0,0012	10
II Зміна Po	28,4	20 17 14	12	600	0,6	3	1,3 $10^{-12}$	0,0012	10
III Зміна r	28,4	20	12	600	0,6	3	1,3 $10^{-12}$	0,0012	10 50 100 200