

ДИНАМІКА КРОВООБІГУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено дослідженню загальної динаміки руху крові у судині, серцево-судинному транспорту та його особливостям. Вивчено закономірності зміни швидкості ламінарного потоку крові у судині, проаналізовано шляхи транскапілярного транспорту речовин між кров'ю та навколишніми тканинами.

Ключові слова: кровообіг, динаміка руху крові, судина, серцево-судинний транспорт, ламінарний потік крові.

Abstract

The work is dedicated to the investigation of the general blood movement dynamics in a vessel, cardiovascular transport and its features. The factors of laminar blood flow speed changes in a vessel are studied, and the pathways of transcapillary transport of substances between blood and surrounding tissues are analyzed.

Keywords: blood circulation, blood flow dynamics, vessel, cardiovascular transport, laminar blood flow.

Вступ

Кров – рідка сполучна тканина організму, яка складається з рідкої частини (плазми) та окремих кров'яних клітин-формених елементів (еритроцитів, лейкоцитів, тромбоцитів). Вона виконує дихальну, поживну, видільну, терморегуляторну, захисну та гуморальну функції. Безперервно рухаючись у замкнутій системі судин, кров проникає до усіх органів та тканин, встановлюючи між ними тісний зв'язок.

Рух крові є безперервним у серцево-судинній системі, але швидкість її руху у судинах різниться. Найбільшу швидкість кров набирає в аорті, у капілярах – найнижчу.

Швидкість руху крові знову зростає у венах, які знаходяться під шкірою та мають здатність ритмічно скорочуватися, що сприяє просуванню крові вздовж судини. У венах, які лежать глибше, рух крові обумовлено скороченням скелетних м'язів, які оточують більшість вен.

Кровообіг – безперервний рух крові вздовж замкнутої серцево-судинної системи, до складу якої входять серце та кровоносні судини з кров'ю.

Судини – система трубчастих органів, яка забезпечує переміщення крові та лімфи. За функціональним призначенням, судини поділяються на артерії, вени та капіляри.

Метою дослідження є вивчення загальної динаміки руху крові в організмі людини та особливостей серцево-судинного транспорту.

Результати дослідження

До головних задач серцево-судинної системи відносять контроль над рівнем циркулюючої крові, її транспорт до робочої тканини та виведення продуктів метаболізму. Підтримка нормального гомеостазу в організмі людини вимагає нормальну кількість крові, яка постійно циркулює вздовж мільйонів капілярів.

У людини, яка знаходиться у стані спокою, цей параметр знаходиться на рівні 5 л/хв [3]. Різномірність (інтелектуальна, фізична, емоційна) активності людини призводить до кількісної зміни кількості циркулюючої крові, що обумовлено якісними змінами метаболізму.

Потік крові (Q) вздовж судини рухається лише за тієї умови, що тиск на вході (inlet) та виході (outlet) сегменту судини не є рівним [1]. Тобто, між кінцями цього перерізу є різниця тисків (ΔP), який нагнітає кров у судині, таким чином забезпечуючи її перетікання:

$$\Delta P = P_i - P_o \quad (1)$$

де: P_i – вхідний тиск потоку крові, P_o – вихідний тиск потоку крові.

Нормальний артеріальний тиск дорослої людини – 120/80 мм. рт. ст., нормальний венозний – 5 – 10 мм. рт. ст.

На рис. 1 зображено сегмент кровоносної судини в організмі людини, який має певну довжину (L) та радіус перерізу (r).

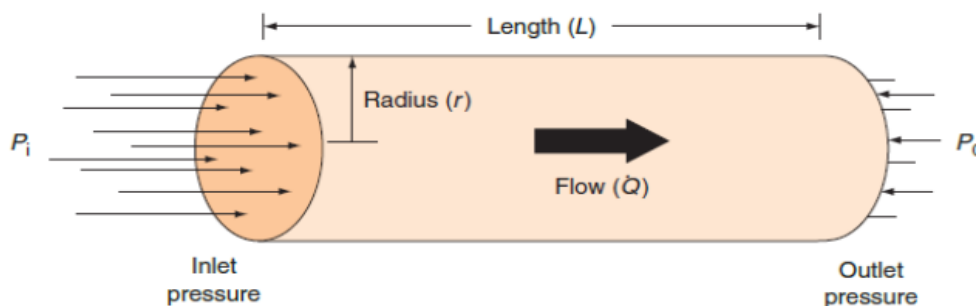


Рис. 1 – Сегмент кровоносної судини в організмі людини [3]

Тертя, яке виникає у точці зустрічі потоку крові та статичних стінок судини, обумовлює виникнення судинного опору. Цей параметр кількісно відображає, скільки ΔP необхідно для перетікання крові у судині, залежить від довжини та радіуса перерізу, в'язкості текучої крові.

Судинний опір визначають за формулою:

$$R = \frac{8 \cdot L \cdot \eta}{\pi \cdot r^4} \quad (2)$$

де: L – довжина судини, η – в'язкість текучої крові, r – радіус перерізу судини.

Рівняння Пуазейля об'єднує у собі поняття потоку, тиску, опору крові та має наступний вигляд [2]:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot \eta} \quad (3)$$

де: $\dot{Q}$ – потік крові ($\frac{V}{t}$), ΔP – тиск (мм. ртутного стовпчика), R – судинний опір (мм. ртутного стовпчика $\cdot \frac{t}{V}$).

Рівняння Пуазейля застосовується не лише до одиначної судини, а й до їхніх комплексів. З нього випливає, що зміна рівня потоку крові можлива, якщо:

- буде змінено різницю між вхідним та вихідним тисками судини (ΔP);
- буде змінено судинний опір (R).

Кров перетікає через судини у визначеному лінійному порядку, який зветься ламінарним потоком. Найбільшої швидкості кров досягає у центральній осі судини та поступово зменшується у напрямку до стінки (за радіусом), де вона досягає нульової позначки. Всередині загального потоку крові існують шари концентрації речовин, які можуть перемішуватися між собою у процесі перетікання крові. Перевагою ламінарного потоку як способу транспортування крові є мінімальні витрати надлишкової енергії – фактично уся вона використовується на забезпечення переміщення крові.

Транскапілярна дифузія забезпечує великі за обсягами операції транспортування розчинених у крові речовин, запорукою чого є максимізація капілярами дифундуючої площі та мінімізація ними відстані між дифундуючими ділянками. Цей процес відбувається за принципом пасивної дифузії, коли вони перетікають від ділянок із більшою концентрацією до ділянок із меншою концентрацією. Таким чином, транскапілярна дифузія визначається чотирма основними чинниками:

- різницею концентрацій речовин $\Delta[X]$;
- розміром дифундуючої площі A ;
- відстанню між дифундуючими ділянками ΔL ;
- коефіцієнтом дифузії D .

Перший закон дифузії Фіка об'єднує ці параметри у співвідношенні, за допомогою якого можна визначити рівень транскапілярної дифузії ($\dot{X}_d$) певної розчиненої у крові речовини X [3]:

$$\dot{X}_d = D \cdot A \cdot \frac{\Delta[X]}{\Delta L} \quad (4)$$

Транскапілярний потік рідини забезпечується впливом гідростатичного та осмотичного тисків.

Перший із них, який величиною 25 мм. ртутного стовпчика виникає у капілярі, є рушійною силою для потоку крові від капілярів робочих тканин до правої половини серця. Із зовнішнього боку капіляра гідростатичний тиск дорівнює ≈ 1 мм. ртутного стовпчика, що створює необхідну для перетікання різницю тисків.

Осмотичний тиск крові унеможливорює витікання усієї плазми за межі капіляра, впливаючи на викликаний гідростатичним тиском потік крові, запорукою чого є нижча концентрація білків у плазмі порівняно з потоком рідини ззовні капіляра.

Онкотичний тиск – частина осмотичного тиску, викликана наявністю білків у потоці капілярної крові.

Принцип Старлінга об'єднує у собі перераховані вище поняття таким співвідношенням [3]:

$$NFR = k \cdot [(P_c - P_i) - (\pi_c - \pi_i)] \quad (5)$$

де: NFR – рівень витікання крові за межі капіляра, k – константа проникності капілярної стінки для певної рідини, P_c – гідростатичний тиск у капілярі, P_i – гідростатичний тиск ззовні капіляра, π_c – онкотичний тиск у капілярі, π_i – онкотичний тиск ззовні капіляра.

На рисунку нижче зображено шляхи транскапілярної дифузії розчинених у крові речовин.

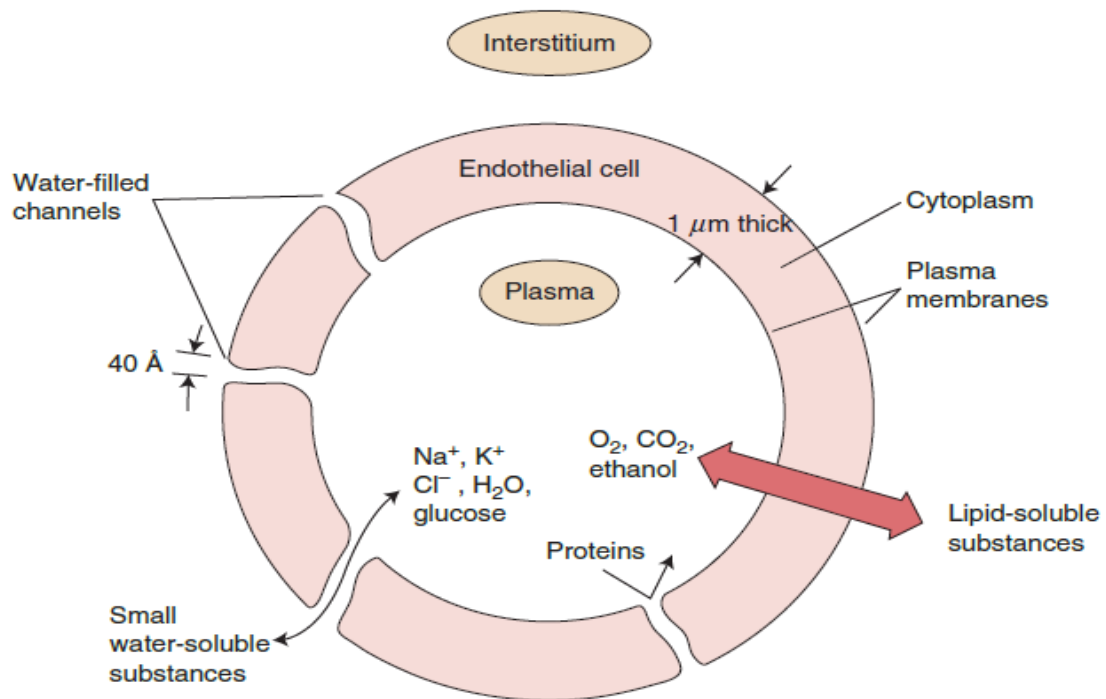


Рис. 2 – Шляхи транскапілярної дифузії розчинених у крові речовин [3]

З рис. 2 видно, що транскапілярний транспорт речовин здійснюється через проміжки в ендотеліальних клітинах. Через ці заповнені водою канали потрапляють дрібні водорозчинні молекули, глюкоза та вода. Ширина одного каналу становить близько 40 Å, що забезпечує вибірккову проникність для гідрофільних компонентів плазми.

Гази та етанол дифундують через плазматичні мембрани. Великі молекули (наприклад, білки плазми) не можуть проникати крізь міжклітинні щілини та практично не дифундують через мембрану, тому їхній транскапілярний транспорт є мінімальним.

Висновок

Отже, у роботі було досліджено фундаментальні фізіологічні та біомеханічні принципи, що визначають динаміку руху крові в організмі людини. Проаналізовано залежність потоку крові у судині від різниці тисків та судинного опору, узагальнено закономірності ламінарного руху крові у рівнянні Пуазейля. Встановлено, що використання законів Фіка та принципу Старлінга уможливило кількісний опис процесів руху крові та розчинених у ній речовин. Також детально розглянуто механізми транскapілярного транспорту (фільтрацію та дифузію).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Guyton A. C., Hall J. E. Textbook of Medical Physiology. 14th ed. Philadelphia: Elsevier, 2021. 1152 p
2. Nichols W. W., O'Rourke M. F. McDonald's Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles. London: CRC Press, 2011. 800 p.
3. Raff H., Levitzky M. Medical Physiology: A Systems Approach. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2011. 895 p.

Гончар Богдан Віталійович – студент групи БМІ-226, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Науковий керівник – Тимчик Сергій Васильович, канд. тех. наук, декан факультету інформаційних електронних систем, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tymchyk@vntu.edu.ua

Bohdan Honchar – student of Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Supervisor – Serhiy Tymchyk, PhD (Biomedical Engineering), Dean of the Faculty of Information Electronic Systems, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tymchyk@vntu.edu.ua