

# Методи дослідження

УДК 577.33:612.135

*М.В. Шаплавський, Т.М. Бойчук, О.В. Гуцул, В.В. Буждиган, П.М. Григоришин,  
Л.Ю. Зав'яньський, О.Ю. Микитюк, В.З. Слободян, Л.М. Шинкура*

## ДОСЛІДЖЕННЯ БІОФІЗИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ КРОВІ ТА РОЗРОБКА ЇЇ ФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ В КОНТЕКСТІ ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці

**Резюме.** У статті проводиться огляд основних досліджень мікроциркуляції крові, виконаних за плановими НДР кафедри останнього десятиріччя, що висвітлюють біофізичні механізми цього процесу з позицій електромагнетизму крові.

Автори обґрунтовують розробку ряду принципово нових фізичних аналізів крові реологічного змісту, що характеризуються копіюванням умов *in vivo* за реєстра-

ції динаміки електричних та магнітних властивостей складових крові, флуктуаціях, що знаходяться під гормональним контролем і здійснюють функції мікроциркуляції.

**Ключові слова:** мікроциркуляція крові, фізичні методи аналізу, електромагнетизм.

У першій половині минулого століття був відкритий  $\sigma$  – ефект, тобто відсутність тертя в капілярах. Але згодом його дослідження були практично припинені і в модельних експериментах він не відтворений до цього часу. Слід зауважити, що капіляри займають практично всю довжину серцево-судинного русла  $\sim 100\ 000$  км. Отже, була поставлена задача – розшифрувати біофізичні механізми, що здійснюють  $\sigma$  – ефект.

Ґрунтуючись на фактах біохімічної архітекτονіки від'ємного заряду глікокаліксу всіх клітин, нами сформована гіпотеза біоінертизації, що пояснює механізм руху на всіх рівнях організації біологічної системи. Виходячи з цього, за здійснення НДР проведені теоретичні дослідження кулонівської взаємодії від'ємних зарядів крові та еритроцитів зі стінками капілярів і вен. Виведені теоретичні формули сили взаємодіштовхування та роботи цих сил, що зумовлюють виникнення кінетичної складової руху крові в капілярах та венозній системі [4, 10], була обґрунтована гіпотеза рушійної сили еритроцитів у процесі мікроциркуляції крові [13].

Спираючись на інформацію з ряду природничих та медико-біологічних наук, зокрема на дані морфологічної структури капілярів і розміри молекули гепарину та іонного модуля  $\text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$  (транспортної форми вуглекислого газу за газообміну), була створена теоретична модель контакту капіляр – еритроцит як дисипативної структури [3].

Основними висновками цього наріжного фрагменту теоретичних досліджень стало наступне:

- швидкість генерування потоку  $\text{NaHCO}_3$  у контакті еритроцит – капіляр у десятки разів перевищує швидкість ходу еритроцита через капіляр;
- умови математичного моделювання в галузі теоретичної біофізики механізмів мікроцирку-

ляції мають бути переглянутими із врахуванням формування дисипативних структур на цьому рівні організації біологічної системи;

- динаміка виходу  $\text{CO}_2$  є основним показником ефективності мікроциркуляції крові за будь-яких метаболічних флуктуацій. Обмежений ступінь свободи контактуючих від'ємних зарядів, що несуть карбоксильні та сульфгідрильні групи гепарину, глікокаліксів еритроцитів та ендотелію створює умови формування дисипативної структури (структури взаємообміну енергії без теплових втрат). Це, зрештою, зумовлює відсутність тертя, що і пояснює вищезазначений  $\sigma$  – ефект (рис. 1).

Загалом розробка проблеми біофізичних механізмів мікроциркуляції зіштовхнулася з відсутністю адекватних робочій гіпотезі методів дослідження. У цьому контексті був розроблений оптичний метод реєстрації динаміки реакцій тромбоутворення [7]. Динаміка рівноваги системи згортання крові тут розглядається як фактор регуляції реологічних властивостей крові, що базуються на змінах від'ємних зарядів білків і клітин крові. Перші ж дослідження системи згортання крові показали, що в генезі, наприклад, астми терміни реакцій тромбоутворення подовжені, що свідчить, зрештою, про зменшення в'язкості крові за неускладненого перебігу зазначеного захворювання [6]. Такий висновок потребував розробки методу визначення в'язкості крові, що відповідав би вимогам біоінертизації, тобто, відтворенню моделі *in vivo* за вимірювання фізичних параметрів крові.

Згідно з робочою гіпотезою, в основу якої закладені вимоги копіювання умов функціонування крові *in vivo*, було розроблено, зокрема, безелектродні електрофізичні методи аналізу реологічних параметрів крові (електропровідність, в'язкість, заряд та магнітне поле

$R_1$  і  $R_2$  - радіуси капіляра та еритроцита в середині капіляра, відповідно  $3 \cdot 10^{-6}$  та  $2,5 \cdot 10^{-6}$  М

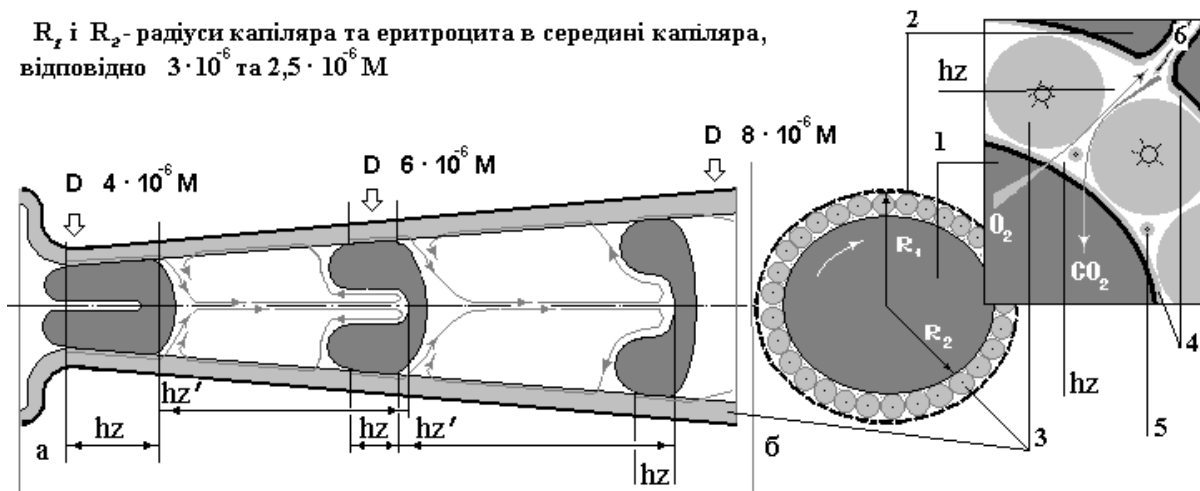


Рис. Архітектура зон від'ємного гіперзаряду (hz) у поздовжньому (а) та поперечному (б) перерізах капіляра за умов мікроциркуляції крові

1 - еритроцит; 2 - ендотелій капіляра; 3 - фібрилярний білок плазми; 4 - глікокалікси; 5 - цуг гідратованого  $\text{NaHCO}_3$ ; 6 - зона контакту між ендотеліальними клітинами.

hz - зона контакту еритроцит - плазма - ендотелій капіляра; hz' - конвективна міжеритроцитарна зона з виходом цугу  $\text{NaHCO}_3^-$  (напрями руху позначені стрілками).

еритроцитів), що базуються на її магнітоелектричних властивостях у біоінертному капілярі [5]. Тобто, термін «в'язкість» тут розглядався як інтегральний показник сил притягання в дисипативній структурі крові, за відсутності її електростатичного зчеплення з моделлю капілярів.

На основі закономірностей радіоелектроніки та гідродинаміки виведена формула, за якою розроблена комп'ютерна програма, що автоматично обчислює в'язкість:

$$\eta = K \frac{\Delta p}{v_k}$$

де  $\eta$  – в'язкість;  $K$  – калібровочна постійна вимірювального комплексу,  $\Delta p$  – рушійна різниця тиску рідини в капілярі;  $v_k$  – ефективна швидкість руху рідин у біоінертному капілярі.

Так, зокрема, вперше була виявлена генетична диференціація в'язкості крові в людей [9]. Цей фрагмент експериментальних досліджень прямо вказує на різке адаптивне зменшення в'язкості крові у хворих на астму за адекватного лікування, тобто неускладненого перебігу захворювання [5]. Таким чином безелектродний метод реєстрації в'язкості крові дозволяє виявити адаптивні зрушення зазначеного параметра при лікуванні астми та диференціювати його генетичні відмінності.

На цьому етапі досліджень вдалося пояснити ряд парадоксів гемодинаміки, що до того часу не мали обґрунтованого трактування. Зокрема зазнав критики загальноприйнятий термін про «периферійний опір крові» [8] і остаточно сформована концепція серцево-судинно-міжклітинного транспорту крові та її складових, що в кінцевому рахунку здійснює енерго- та масообмін на рівні парних міжклітинних каналів.

Робоча гіпотеза, що виникла в ході досліджень в'язкості, як інтегрального показника, вимагала дослідження заряду еритроцитів та їх магнітного поля. Загалом технічне рішення таких завдань було поставлено при конструюванні вимірювального комплексу реологічних параметрів крові [5].

Елементарна залежність добротності та електропровідності дозволяє одержати дані електропровідності крові і плазми поза механічним контактом з електродами.

Різниця цього показника в крові та її плазмі, при уведенні в програму даних клінічних досліджень крові, дозволила автоматично обчислити природний заряд еритроцита [2], що визначений вперше відповідно до виведеної на основі закономірностей фізичної та біологічної хімії формули:

$$|e|Z_{ep} = - [s_{kp} - (1 - k)s_{n\lambda}] / n_{ep} m^+,$$

де  $|e|Z_{ep}$  – абсолютний заряд еритроцита в Кулонах;  $s_{kp}$  – електропровідність крові;  $k$  – показник гематокриту;  $n_{ep}$  – вміст еритроцитів;  $m^+$  – рухливість основних катіонів плазми ( $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ ).

Виявилось, що середній заряд еритроцита в нативній крові сягає порядку  $|e|Z_{ep} = - 3,19 \times 10^{-10}$  Кл, або в ефективних некомпенсованих електронах  $Z_{ep} = - 2,0 \times 10^9$ .

У цьому ж дослідженні одним із наріжних завдань технічного рішення комплексу було створення умов термінової реєстрації зміни вищезазначених реологічних показників в умовах моделі функціонуючої системи крові за дії внутрішніх та зовнішніх вірогідних регуляторів. Так, при додаванні в капсулу соленоїда близької до фармакологічної дози адреналіну, що відповідає його розведенню на об'єм циркулюючої крові ( $166 \cdot 10^{-7}$  г), спостерігався феномен втрат добротності цільної крові – зростання електропровідності.

Таким чином, прямим вимірюванням заряду еритроцита підтверджено виявлене нами раніше його зростання за дії катехоламінів у біоінертних умовах при використанні опосередкованого методу [12]. Так було спростовано пануюче до цих пір у біофізиці уявлення про постійність заряду еритроцитів.

Останнім етапом планових НДР кафедри стало дослідження магнітного поля еритроцитів. Тут взаємодія оптимального за енергією магнітного поля соленоїда з магнітним полем еритроцитів і лягла в основу компенсаційної схеми програмного розрахунку конкретних параметрів електромагнетизму червоних кров'яних тілець. Розрахунок проведено за формулою, де ( $\Phi_{рез}$ ) - магнітний потік еритроцитів,  $L$  - індуктивність першого соленоїда, а  $I_{рез}$  - струм за умов резонансу капілярного соленоїда:

$$\Phi_{рез} = L \cdot I_{рез}$$

Так спростовано переконання про неможливість вимірювання магнітного поля еритроцитів. Його параметри наступні: магнітний потік  $\Phi_{ep} = 124,4 \cdot 10^{-9} \text{ Вб}$ ; магнітна індукція  $B_{ep} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ .

Висновки цього фрагменту досліджень наступні:

- електронний вимірювальний комплекс реологічного стану крові забезпечує реєстрацію магнітного поля еритроцитів із визначенням його конкретних параметрів;

- магнітне поле еритроцитів фізично спряжене з їх зарядом і зазнає гормональної регуляції;

- вимірювальний комплекс дозволяє реєструвати в одній пробі крові (1 мл) всі параметри електромагнетизму цієї тканини (в емпіричному змісті - реологічні показники).

Деталізація біофізичного змісту електромагнетизму еритроцитів, висвітлена нами раніше [1], експериментально підтвердила блискучі здогадки А.Л. Чижевського про роль електричного і магнітного полів еритроцитів у формуванні архітектоники потоку крові в судинах *in vivo* [11].

Тепер неважко зробити висновок, що диригентом електромагнетизму крові за фізіологічних флуктуацій швидкості мікроциркуляції є регульований заряд еритроцитів. Фізичний взаємозв'язок параметрів електромагнетизму крові, його біологічний, клінічний зміст будуть незабаром висвітлені нами в друці. Тут слід лише зауважити, що в'язкість не регулює швидкості гемодинаміки, її регулює те, що регулює в'язкість - біологічні агенти. Її кінематична складова блокує турбулентний рух у гемодинаміці, рух, що може чинити опір. Рідкокристалічна структура крові тут розкладається за нормальних змін її вмісту.

Сучасні досягнення молекулярної біофізики, біохімічної фізики, квантової медицини, прямо вказують на те, що давно визрів стратегічний напрям розвитку біології і медицини, який має розкрити електромагнетизм як основу квантової дисипативної термодинамічної конструкції, що запрограмована генетично і є носієм життя.

Охороноздатність вищезначеного напрямку наукових досліджень, складають три авторські свідоцтва, 11 патентів, з яких три є патенти України. Результати досліджень в основному висвітлюють дві монографії, 38 статей та 44 повідомлення наукових форумів. Опубліковано чотири інформаційні листи, до Реєстру галузевих нововведень подані матеріали на чотири нововведення.

**Перспективи подальших досліджень.** Планується розробка нових досліджень біологічних об'єктів з позицій електромагнетизму як функціональної основи динаміки біологічних систем. Клінічна апробація методів.

### Література

1. Біофізична природа магнітного поля еритроцитів / Т.М. Бойчук, М.В. Шаплавський, В.З. Слободян [та ін.]. - Бук. мед. вісник. - 2012. - Т. 16, № 3 (63), ч. 1. - С. 16-20.
2. Вимірювання добротності в біометрії крові / Т.М. Бойчук, М.В. Шаплавський, В.М. Коновчук [та ін.]. - Бук. мед. вісник. - 2011. - Т. 15, № 4 (60). - С. 129-132.
3. Генерація гідрат-аніонів  $\text{HCO}_3^-$  як базовий фізико-хімічний процес дисипативної структури контакту еритроцит - капіляр / М.В. Шаплавський, І.К. Владковський, В.П. Пішак, О.Ю. Микитюк. - Бук. мед. вісник. - 2004. - Т. 8, № 3. - С. 181-185.
4. Електрорушійна сила судин / М.В. Шаплавський, Л.Ю. Зав'яньський, М.Ю. Коломоєць [та ін.]. - Бук. мед. вісник. - 2003. - Т. 7, № 3. - С. 3-7.
5. Електрофізичний метод визначення в'язкості крові в аналізі змін мікроциркуляції / В.В. Буждиган, О.В. Слободян, М.В. Шаплавський, О.Ю. Микитюк: матеріали за IV Міжнародна научно-практическа конференція ["Образование и наука на 21 от век - 2008"]. - София: БялГРАД-БГ. - 2008. - Т. 9. - С. 24-29.
6. Оптичний аналіз тромбоутворення в контексті адаптивних реакцій мікроциркуляції крові / М.В. Шаплавський, В.П. Пішак, В.В. Буждиган, О.В. Слободян. - Бук. мед. вісник. - 2008. - Т. 12, № 1. - С. 170-172.
7. Оптичні методи дослідження згортання крові / М.В. Шаплавський, М.С. Гавриляк, П.М. Григоришин [та ін.]. - Бук. мед. вісник. - 2004. - Т. 8, № 4. - С. 168-174.
8. Парадокси гемодинаміки у світлі теорії біоінертизації / М.В. Шаплавський, В.П. Пішак, М.Ю. Коломоєць [та ін.]. - Бук. мед. вісник. - 2007. - Т. 11, № 1. - С. 148-150.
9. Пат. UA 35766 Україна, МПК(2006)A61B 5/00. Безелектродний спосіб автоматизованого вимірювання в'язкості біологічних рідин / М.В. Шаплавський, В.П. Пішак, О.В. Слободян, П.М. Григоришин : заявник та патентовласник БДМУ. - № u200802926; заявл. 06.03.2008; опубл. 10.10.2008, бюл. № 19.
10. Робота електростатичних сил ендотелію капілярів та еритроцитів / Л.Ю. Зав'яньський, К.Б. Тимочко, М.В. Шаплавський [та ін.]. - Клін. та експерим. патол. - 2004. - Т. III, № 1. - С. 28-32.
11. Чижевский А.Л. Электрические и магнитные свойства эритроцитов / А.Л. Чижевский. - К.: Наукова думка, 1973. - 94 с.
12. Шаплавський М.В. Біоінертизація як біологічна функція / Микола Володимирович Шаплавський. - Чернівці: Прут, 1996. - 184 с.
13. Шаплавський М.В. Гіпотеза рушійної сили еритроцитів у процесі мікроциркуляції / Микола Володимирович Шаплавський. - Бук. мед. вісник. - 1998. - № 2. - С. 196-200.

**ИССЛЕДОВАНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ  
И РАЗРАБОТКА ЕЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА В КОНТЕКСТЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА**

*Н.В. Шаплавский, Т.Н. Бойчук, О.В. Гуцул, В.В. Буждыган, П.М. Григоришин,  
Л.Ю. Завянский, О.Ю. Микитюк, В.З. Слободян, Л.М. Шинкура*

**Резюме.** В статье приведен обзор основных исследований микроциркуляции крови, выполненных по плану-вым НИР кафедры, где представлены биофизические механизмы этого процесса, основанные на свойствах электромагнетизма крови.

Авторы аргументировали разработку ряда принципиально новых физических анализов крови реологического смысла, основанные на копировании условий *in vivo* при регистрации динамики электрических и магнитных свойств составляющих крови, флуктуациях, находящихся под гормональным контролем и осуществляющих функции микроциркуляции.

**Ключевые слова:** микроциркуляция крови, физические методы анализа, электромагнетизм.

**STUDY OF BIOPHYSICAL MECHANISMS OF BLOOD MICROCIRCULATION AND  
DEVELOPMENT OF PHYSICAL METHODS OF ITS INVESTIGATION FROM THE  
STANDPOINT OF ELECTROMAGNETISM**

*M.V. Shaplavs'kyi, T.M. Boichuk, O.V. Gutsul, V.V. Buzhdygan, P.M. Hrygoryshyn,  
L.Yu. Zavyansky, O.Yu. Mykytiuk, V.Z. Slobodian, L.M. Shynkura*

**Abstract.** The paper provides a review of main results of the investigation of blood microcirculation conducted in accordance with the last decade's scheduled research studies concerning biophysical mechanisms of blood microcirculation from point of view of its electromagnetic properties.

The authors provide argumentation for development of principally new physical analyses of blood with the stress on its flow properties. Their approach is based on reproduction of *in vivo* conditions with recording of the change of electrical and magnetic properties of blood formed elements, their fluctuations under conditions of hormone control and free blood microcirculation.

**Key words:** Blood microcirculation, physical methods of analysis, electromagnetism.

Bukovinian State Medical University (Chernivtsi)

Рецензент – проф. В.Ф. Мислицький

Buk. Med. Herald. – 2014. – Vol. 18, № 4 (72). – P. 237-240

Надійшла до редакції 20.05.2014 року