

## ЛАТЕРАЛЬНІ КАПІЛЯРНІ СИЛИ В ЖИВИХ СИСТЕМАХ



Покотило Оксана Анатоліївна,  
oksana.pokotulo@gmail.com

Покотило О.А., Чекман І.С.

Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

**Ключові слова:** латеральні капілярні сили, нанокапіляри, судини, кровообіг.

**Вступ.** Фізіологічно активні речовини організму (альбумін, амінокислоти, медіатори, вітаміни, АТФ, фруктоза, ДНК, РНК, фібриноген та інші) є нанорозмірні структури. Однак перебіг нанопроцесів у цих структурах ще не вивчений достатньою мірою і вчені активно вивчають роль наноструктур організму у протіканні фізіологічних, біохімічних, генетичних та імунологічних процесах в живих системах. Експериментальне підтвердження ролі природних наноструктур та механізмів їхнього функціонування зумовить більш глибоке розуміння фізіологічних закономірностей діяльності органів та перебігу обмінних процесів, які лежать в основі існування всього живого. Властивість відтворювати біологічні нанопроцеси може бути використана у тканинній інженерії, адресній доставці лікарських засобів, моделюванні та розробці сенсорних та імунологічних систем, засобів візуалізації та діагностики захворювань [2; 11; 25].

Капілярні явища – сукупність процесів, зумовлених дією міжфазного поверхневого натягу на межі розділу середовищ. Ці процеси пов'язані із змочуванням або незмочуванням рідиною поверхні вузьких трубок, мікропор чи нанопор [27; 31]. До даних процесів зазвичай відносять явища в рідинах, які викликані викривленням їх поверхні, що межує з іншою рідиною, газом або власним паром. Багато властивостей різних дисперсних систем (проникність, міцність, поглинання рідини) значною мірою обумовлено капілярними явищами, оскільки в тонких порах цих тіл реалізується високий капілярний тиск [12; 14]. Дослідження останніх років показали перспективність наноструктурних покриттів для використання в різноманітних цілях. Причиною підвищеного інтересу до наноструктурних матеріалів є великий потенціал їхнього практичного застосування, особливо в медичній практиці. Одним із завдань нанотехнологій є отримання нових наномедикаментів з вивченням їх лікувальних, а також токсичних властивостей. В медичну практику впровад-

жені такі препарати, отримані за допомогою нанотехнологій: порошок силіксу, капсули нанозаліза, мазь наносрібла, ліпін, ліолів, ліподокс, ліпофлавіон, ліпоферон. Продовження досліджень по розробці нових медикаментів для лікування різних захворювань буде мати не тільки важливе медичне, але і соціальне значення [18; 19].

Капілярні явища пояснюють різні процеси рівноваги і руху рідини під дією сил міжмолекулярної взаємодії і зовнішніх сил (в першу чергу, сили земного тяжіння). У найпростішому випадку, коли зовнішні сили відсутні або скомпенсовані, поверхня рідини завжди викривлена. Так, в умовах невагомості обмежений об'єм рідини, не дотичні з іншими тілами, приймає під дією поверхневого натягу форму кулі. Ця форма відповідає сталій рівновазі рідини, оскільки куля володіє мінімальною площею поверхні при даному обсязі і, отже, поверхнева енергія рідини в даному випадку мінімальна [15].

Викривлення поверхні рідини в капілярі спричинює виникнення додаткового тиску – так званого капілярного тиску, величину якого можна обчислити за формулою Лапласа. Закон Лапласа – прямо пропорційна залежність капілярного тиску від поверхневого натягу  $\sigma$  на поверхні розділу двох рідин або рідини і газу, а також від середньої кривини поверхні.

Формулою, що обґрунтовує закон Лапласа, є:

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

де:  $\Delta p$  – капілярний тиск;

$\sigma$  – поверхневий натяг;

$R_1$  і  $R_2$  – головні радіуси кривини двох взаємно перпендикулярних нормальних перерізів поверхні. Цей закон є одним з основних законів капілярних явищ.

Капілярний тиск супроводжує безліч фізичних явищ – капілярну конденсацію, тобто утворення рідини в капіля-

рах, порах, мікротріщинах твердого тіла (сорбенту) при тиску пари над ним, меншого від тиску насиченої пари над плоскою поверхнею (наприклад, появи капілярної води в порах гірських порід), піднімання (чи опускання) рівня рідини в капілярах [3; 7].

Меніск рідини між двома ліофільними рідкими поверхнями викликає силу тяжіння, тобто капілярну силу. Меніск може утворюватися завдяки капілярній конденсації чи шляхом накопичення адсорбованої рідини у капілярах. В умовах навколишнього середовища та між гідрофільними поверхнями капілярні сили зазвичай переважають над іншими поверхневими силами (когезії, адгезії, поверхневого натягу). Капілярні явища властиві для багатьох процесів, що стосуються природою та різними технологіями, наприклад, плинність гранульованих матеріалів та тертя між поверхнями [1; 8; 17].

Капілярні явища, такі як капілярна конденсація, поверхневий натяг та інші, є важливими для життя тварин, рослин і людини. Більшість рослинних і тваринних тканин пронизано величезним числом капілярів. Саме в капілярах відбуваються основні фізіологічні, біохімічні, фізико-хімічні, генетичні, імунологічні процеси, пов'язані з функціонуванням організму. Стінка капілярів відіграє також важливу роль в обмінних процесах, в тому числі, ймовірно, і в природних нанотехнологічних процесах, оскільки за своїми параметрами подібна до синтетичних наноматеріалів, таких як нанотрубки [10; 20; 21].

Стовбури дерев, гілки рослин пронизані величезною кількістю капілярних нанотрубочок, по яких поживні речовини піднімаються до самих верхніх листочків. Коренева система рослин закінчується найтоншими нитками – капілярами. Грунт, що є джерелом живлення для кореня, може бути представлений як сукупність капілярних нанотрубочок, по яких, в залежності від її структури і обробки, швидше або повільніше піднімається до поверхні вода з розчиненими в ній речовинами. Якщо зменшити діаметр капілярів у ґрунті шляхом його ущільнення, то цим можна прискорити висушування ґрунту. Навпаки, розпушуючи поверхню ґрунту і руйнуючи тим самим систему ґрунтових капілярів, можна затримати приплив води до зони випаровування і уповільнити висушування ґрунту. Саме на цьому засновані відомі агротехнічні прийоми регулювання водного режиму ґрунту: накопчення і боронування. По капілярним каналам в стінках будівель піднімається ґрунтова вода (у відсутності гідроізоляції); по капілярах гнота піднімаються мастильні речовини (гнотове мастило); на явищі капілярності засноване використання промокального паперу [5; 9].

Судинна система – це еластичні резервуари, крізь які послідовно протікає загальний потік рідини. При цьому в кожний з резервуарів рідина (з попереднього резервуару) поступає зі швидкістю  $Q_0$ , а відток її у наступний резервуар відбувається лише при наявності в останньому певного тиску. Артеріальна частина системи кругообертання крові моделюється пружним еластичним резервуаром, а капілярно-венозна – жорсткою трубкою. В цій моделі руху крові в серцево-судинній системі вважається, що під час систоли кров під тиском  $p$  викидається в еластичний резервуар, коефіцієнт еластичності якого  $C$

від'ємний від нуля ( $C = 1/E$ , де  $E$  – модуль пружності, який приймається, що не залежить від ступеня розтяжності стінок) та опір стінок якого  $R$  дорівнює нулю, зі швидкістю  $Q_0$  (мл/с або  $\text{см}^3/\text{с}$ ). Потім, під час діастоли, потік крові розповсюджується у жорсткій трубці, опір якої  $R$  від'ємний від нуля, а коефіцієнт еластичності дорівнює нулю, зі швидкістю  $Q$ . У цій моделі відображено лише основні явища, які відбуваються у серцево-судинній системі [4].

Українські вчені провели теоретичне дослідження щодо біофізичних та медикобіологічних аспектів електро-рушійної сили крові, що базується на фундаментальних законах фізики, макрофізичних властивостей кровообігу, які здійснюються за вимогами логіки біологічних функцій. [23]. Проаналізована взаємодія електростатичних полів еритроцитів і ендотелію капілярів, яка опосередкована  $\zeta$ -потенціалом. Електрокінетичний потенціал (дзета-потенціал) виникає на площині ковзання подвійного електричного шару внаслідок відриву його дифузної частини від адсорбційно зв'язаної нерухомої частини. Дзета-потенціал визначає заряд дифузного шару і є мірою інтенсивності електрокінетичних явищ у міжфазній області. Введення цього потенціалу до розрахунків внесло б корективи в аналіз електростатичних сил розглядуваної системи, які є проявом просторово фіксованих від'ємних зарядів, але ускладнивши хід доведення, воно вочевидь не змінило б принципово висновки математичного аналізу [22].

Таким чином, на прикладі еритроциту показано, що примусового руху в капілярі зазнає не тільки точковий заряд електрону, а й формений елемент крові. Що ж до  $\zeta$ -потенціалу, то позитивно заряджені іони, створюючи оболонки взаємного відштовхування у випадку відсутності прямого контакту від'ємних груп, не змінюють векторів їх дії, оскільки це, як правило, рухливі катіони. І хоча  $\zeta$ -потенціал відштовхування (електрокінетичний) за відстанню зменшується по експоненті, за його рахунок відбувається кулонівське ущільнення дії від'ємних зарядів. Очевидно, що зрушення рівноваги  $\zeta$ -потенціалу (градації рівня катіонів чи рН) призводять до зміни мікроциркуляції, бо у цьому випадку виникають відхилення симетрії гельмгольцівського подвійного шару і сил прилягання (електростатичного зчеплення), падіння рушійної сили крові з наступним ньютонівським опором [6].

Електростатичне відштовхування еритроцита та ендотелію капіляра зумовлює прискорення червоного кров'яного тільця за вектором кровообігу. На підставі проведеного аналізу фізичних факторів мікроциркуляції як самостійних на основі лінійних функцій, автори вважають, що кожен із них при взаємодії підлягає законам синергетики у напрямку здійснення біологічної функції [6; 30].

Автори вивчали закономірності впливу нанорозмірності наноструктурних покриттів на їх макроскопічні фізико-хімічні та капілярні характеристики, а також з'ясування фізичної природи їх відмінності відносно відповідних характеристик матеріалів в моно- та нанокристалічному стані. Наноструктуруванні матеріали можуть набувати нових властивостей і незвичних характеристик. Добре вивчений вплив наноструктурування на магнітні, електронні, механічні, оптичні властивості наномате-

ріалів [16; 24]. Крім вище перерахованих, капілярні властивості наноструктурних поверхонь практично не вивчені. В наноб'єктах поверхня наноструктурованого матеріалу має принципово нові й специфічні властивості, що пов'язане з так званим розмірним ефектом. Наприклад, з'являються надвисокі адсорбційні властивості, що пов'язане з ненасиченими валентними зв'язками поверхневих атомів, пропорційне відношення яких відносно об'ємних атомів значно зростає [13].

Островська Л.Ю. та співавтори встановили, що змочуваність наноструктурних плівок можна змінювати, використовуючи різні фізичні та хімічні методи обробки поверхні, такі як іонна бомбардировка, термовідпал, УФ опромінення, гідрогенізація, окислення, легування. Досліджено також ефективний вплив морфологічних параметрів поверхні, таких як шорсткість та структура (мікротопографія) на характеристики змочування нанокластерних плівок вуглецю та діоксиду титану. З цих результатів випливає можливість регулювання змочуваності виключно контролем морфології поверхні на мікронній та нанометричній шкалі. Цей напрямок останнім часом активно розвивається стосовно плівкових матеріалів [14].

Два твердих тіла, розташованих на поверхні рідини, під дією гравітації деформують рідинну поверхню. Внаслідок цього між ними виникає латеральна капілярна сила. При цьому чим більшу деформацію викликають частинки, тим більшою буде сила капілярної взаємодії. Латеральна капілярна сила може бути як притягуючою, так і відштовхуючою, що залежить від змочувальних властивостей та маси цих тіл. Рідинний меніск між двома твердими ліофільними поверхнями спричиняє появу притягуючої капілярної сили. Меніск може бути сформований за рахунок капілярної конденсації або акумуляції адсорбованої рідини. Під впливом зовнішніх умов та між гідрофільними поверхнями капілярні сили, як правило, домінують над іншими поверхневими силами, такими як адгезія, змочування, адсорбція та інші [26; 28].

Згідно досліджень Kralchevsky P та Nagayama K. латеральні капілярні сили виникають при контакті частинок чи інших тіл з межею рідкої фази, зумовлюючи цим самим збурення в міжфазному шарі. Капілярні взаємодії виникають як результат суммації цих процесів. Також авторами встановлено, що величина латеральних капілярних сил прямопропорційно залежить від ваги й розміру твердих частинок. Однак для частинок розміром менше 10 мкм це твердження не є дійсним. На поверхні поділу частинки активуються залежно від здатності до змочування. Істотні капілярні сили виникають при зануренні в рідину навіть таких дуже малих часток як білкові глобули. Такі сили активно проявляються у капілярах при контакті наночастинок ендотелію з іншими наночастинами розміром близько 1 нм [29].

**Заключення.** Латеральні капілярні сили активно проявляються у капілярах при контакті наночастинок ендотелію судин з іншими наночастинами розміром близько 1 нм. Роль латеральних капілярних сил в живих системах вивчена недостатньо, особливо цікавим є досі не з'ясоване питання щодо механізму кровообігу на основі закономірностей гідродинаміки та роль ендотелію капілярів та

еритроцитів в процесі гемодинаміки. Також важливо визначити як відбувається взаємодія наночастинок ендотеліальної стінки капілярів з речовинами різних розмірів та механізм перебігу природних нанотехнологій у капілярах. Експериментальне підтвердження ролі латеральних капілярних сил у кровообігу є необхідним, оскільки зумовить глибше зрозуміти суть фізіологічних і біохімічних процесів у судинах, мікроциркуляції у функціонуванні організму, а також вплив на ці процеси наночастинок.

Рецензент: д.мед.н., професор Ніженковська І.В.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Воно С., Кондо С. Молекулярна теорія поверхневого натягу в рідинах. – М.: МУЛ, 1963. – 292 с.
2. Глінко В. М. Роль капілярів у протіканні природних нанопроцесів / В. М. Глінко, І. С. Чекман, А. М. Пузиренко, Н.О. Горчакова // Український науково-медичний молодіжний журнал. – 2012. – № 4. – С. 5–8.
3. Гомонай В. І. Фізична та колоїдна хімія / В. І. Гомонай. – Вінниця: Нова Книга, 2007. – 496 с.
4. Егорова Т. А. Основи біотехнології / Т. А. Егорова, Е. А. Живухина, С. М. Клунова. – М.: Изд-во Гревцова, 2010. – 256 с.
5. Єценко В. О. Загальне землеробство / [В.О. Єценко, П.Г. Копитко, В. П. Опришко та ін.]. – К.: Вища освіта, 2004. – 348 с.
6. Зав'яньський Л. Ю. 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.
7. Измайлова В. Н. Поверхностные явления в белковых системах / В. Н. Измайлова, Г. П. Ямпольская, Б. Д. Сумм. – М.: МУЛ, 1988. – 239 с.
8. Михасев Г. И. Биомеханика / Г. И. Михасев, А. В. Чигарев, А. В. Борисов. – М.: Изд-во Гревцова, 2010. – 284 с.
9. Мороз А. С. Фізична та колоїдна хімія / А. С. Мороз, А.Г. Ковальова. – Львів: Світ, 1994. – 270 с.
10. Мороз А. С. Біофізична та колоїдна хімія / [А. С. Мороз, Л. П. Яворська, Д. Д. Луцевич та ін.]. – Вінниця: Нова Книга, 2007. – 600 с.
11. Москаленко В. Ф. Наукові основи наномедицини, нанофармакології та нанофармації / В. Ф. Москаленко, В. М. Лісовий, І. С. Чекман [та ін.] // Вісн. Нац. мед. ун-ту ім. О.О. Богомольця. – 2009. – № 2. – С. 17–31.
12. Островська Л. Ю. Капілярні властивості мікро- та наноструктурних плівок вуглецю / Л. Ю. Островська // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 357–365.
13. Островська Л. Ю. Дослідження змочуваності плівок АІПН в залежності від ступеня йонності та полярності поверхні / Л. Ю. Островська, В. Г. Дейбук, А. В. Возний // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 4. – С. 649–655.
14. Островська Л. Ю. Зміни змочування кластерних плівок TiO2 при відпаді та ультрафіолетовому опроміненні / Л.Ю. Островська, А. П. Дементьєв // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 1. – С. 39–45.
15. Оура К. Введение в физику поверхности / [К. Оура, В.Г. Лифшиц, А. А. Саранин и др.]. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
16. Русанов А. И. Удивительный мир наноструктур / А.И. Русанов // Журн. общей химии. – 2002. – Т. 72, № 4. – С. 532–549.
17. Фадеев А.С., Левачев С.М., Ямпольская Г.П., та ін. Свойства монослоев коллагена, сформированных на границе фаз вода/воздух. Влияние pH и ионной силы субфазы / А.С. Фадеев, С.М. Левачев, Г. П. Ямпольская [и др.] // Коллоидн. журн. – 1999. – Т. 61, № 4. – С. 558–566.
18. Харрис П. Д. Мир материалов и технологий. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Д. Харрис. – М.: Техносфера, 2003. – 345 с.
19. Чекман І. С. Нанофармакологія / І. С. Чекман. – К.: Задруга, 2011. – 424 с.
20. Чекман І. С. Природні наноструктури та наномеханізми / І. С. Чекман, П. В. Сімонов. – К.: Задруга, 2012. – 104 с.
21. Чекман І. С. Нанонаука, нанобіологія, нанофармація. Монографія / [І. С. Чекман, З. Р. Ульберг, В. О. Маланчук та ін.]. – К.: Поліграф плюс, 2012. – 328 с.

22. Шаплавський М. В. Біоінертизація як біологічна функція: Основи теорії і практика / М. В. Шаплавський. – Чернівці: Прут, 1996. – 184 с.

23. Шаплавський М. В. Електрорушійна сила судин крові / [М. В. Шаплавський, Л. Ю. Зав'янський, М. Ю. Коломоєць та ін.]. // Бук. мед. вісник. – 2003. – Т. 7, № 3. – С. 3–7.

24. Aranovich G. L. The role of adsorption compression in nanocapillarity / G. L. Aranovich, M. D. Donohue // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2005. – Vol. 292, N 1. – P. 202–209.

25. Boisseau P. Nanoscience. Nanobiotechnology and nanobiology / P. Boisseau, P. Houduy, M. Lahmany. – Berlin, Heidelberg: Spinger, 2010. – 1200 p.

26. Danov K. D. Forces acting on dielectric colloidal spheres at a water/nonpolar-fluid interface in an external electric field / K. D. Danov, P. A. Kralchevsky // *Journal Colloid Interface Science*. – 2013. – Vol. 405, N 1. – P. 278–290.

27. Extrand C. W. Experimental measurement of forces and energies associated with capillary rise in a vertical tube / C. W. Extrand, S. I. Moon // *Journal Colloid Interface Science*. – 2013. – Vol. 407, N 1. – P. 488–492.

28. Kralchevsky P. A. Lateral forces acting between particles in liquid films or lipid membranes / P. A. Kralchevsky // *Advances in Biophysics*. – 1997. – Vol. 34. – P. 25–39.

29. Kralchevsky P. A., Nagayama K. Capillary interactions between particles bound to interfaces, liquid films and biomembranes / P. A. Kralchevsky, K. Nagayama // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2004. – Vol. 85. – P. 145–192.

30. Oberleithner H. Nanophysiology: fact or fiction / H. Oberleithner // *Pflügers Archiv*. – 2008. – Vol. 1, N 456. – P. 1–2.

31. Zarate N. V. Effect of relative humidity on onset of capillary forces for rough surfaces / N. V. Zarate, A. J. Harrison, J. D. Litster, S. P. Beaudoin // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2013. – Vol. 411, N 1 – P. 265–272.

## ЛАТЕРАЛЬНЫЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ СИЛЫ В ЖИВЫХ СИСТЕМАХ

Покотило О.А., Чекман И.С.

Национальный медицинский университет  
имени А.А. Богомольца, г. Киев, Украина

**Резюме.** В обзорной статье обобщены данные литературы и исследования авторов касаясь роли капилляров в живых системах. Экспериментальное подтверждение роли природных наноструктур и механизмов их функционирования обусловит более глубокое понимание физиологических закономерностей деятельности органов и течение обменных процессов, которые лежат в основе существования всего живого. Экспериментальное подтверждение роли латеральных капиллярных сил в кровообращении необходимо, поскольку это приведет к большему пониманию сути физиологических и биохимических процессов в сосудах, микроциркуляции в функционировании организма, а также влияние на эти процессы наночастиц.

**Ключевые слова:** латеральные капиллярные силы, нанокапилляры, сосуды, кровообращение.

## THE LATERAL CAPILLARY FORCES IN LIVING SYSTEMS

O.A. Pokotylo, I.S. Chekman

Bogomolets National Medical University, Kiev, Ukraine

**Summary.** The review summarizes the research literature and the authors with regards to the role of capillaries in living systems. Experimental confirmation of the role of natural nanostructures of their functioning results in a more profound understanding of the physiological principles of the organs and the flow of metabolic processes that underlie the existence of all living things. Experimental confirmation of the role of the lateral capillary forces in the circulation is necessary because it will lead to a deeper understanding of the essence of physiological and biochemical processes in the vessels of the microcirculation in the functioning of the organism, and the impact of nanoparticles on this processes.

**Key words:** lateral capillary force, nanocapillaries, vessels, blood flow.