

I.C. Чекман

Національний медичний
університет ім. О.О. Богомольця,
м. Київ

КАПІЛЯРИ: ФІЗІОЛОГІЧНІ, БІОХІМІЧНІ, ФАРМАКОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, НАНОМЕХАНІЗМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Резюме

У статті узагальнено результати досліджень із вивчення фізіологічних, біохімічних, фармакологічних властивостей капілярів, а також їх наномеханізмів функціонування. Роль капілярів у живих системах вивчено недостатньо, особливо цікавим є досі нез'ясоване питання щодо механізму кровообігу на основі закономірностей гідродинаміки та ролі ендотелію капілярів та еритроцитів у процесі гемодинаміки. Дослідження ролі капілярних сил у механізмі кровообігу є необхідним, оскільки дозволить глибше зрозуміти суть фізіологічних, біохімічних процесів у судинах, мікроциркуляції у функціонуванні організму, а також вплив на ці процеси природних наночастинок.

Ключові слова

Капіляри, фізіологічні, біохімічні, фармакологічні властивості, наномеханізми функціонування.

Капіляри — унікальні наноструктури, найтонші судини, середній їх діаметр становить 5-10 мкм. Поєднуючи артерії та вени, вони беруть участь в обміні речовин між кров'ю і тканинами. Стінки капілярів складаються з одного шару клітин ендотелію та базальної мембрани. Товщина цього шару настільки мала, що дозволяє проходити через нього молекулам кисню, води, ліпідів і багатьом іншим речовинам [12, 48]. Баланс, а також фізіологічна і біохімічна гармонія асимілятивних і дисимілятивних процесів в організмі значною мірою зумовлені фізіологічними властивостями капілярів. Якщо врахувати такий факт, що довжина усіх капілярів організму людини становить до 90 тисяч кілометрів, то роль їх дійсно значна. Можна стверджувати, що без функціонування капілярів та перебігу біохімічних процесів, що мають місце у цих наноструктурах, життєдіяльність біомембран, клітин, органів, а також усього організму неможлива [14].

Доведено, що замінні та незамінні амінокислоти, медіатори (адреналін, норадреналін, ацетилхолін), вітаміни (ретинол, ергокальциферол та ін.), альбумін, АТФ, ДНК, РНК, фібриноген, іонні канали, наноканали, нанопори, біомембрана, колоїдні розчини організму (кров, міжклітинна рідина) та інші є нанорозмірними, однак питання щодо експериментального підтвердження наявності природних нанотехнологій і наномеханізмів їх функціонування у капілярах в організмі людини потребує більш ґрунтовного вивчення [23].

© I.C. Чекман

Як відзначають науковці, завдяки швидкому розвитку нових нанотехнологій та методів дослідження природних наноструктур фізіологічні та біохімічні процеси у капілярах відбуваються із залученням наномеханізмів, а сама структура таких систем часто має нанорозмірні елементи. Особливу зацікавленість викликає встановлення наномеханізмів перебігу природних систем у біологічних, фізіологічних, біохімічних, імунологічних, генетичних процесах в організмі людини та інших живих структурах, а також у механізмі дії лікарських засобів [13, 43, 44].

Нанобіологічний аспект природних нанотехнологій, який досліджує роль капілярів, має велике загальнонаукове, медичне та соціальне значення як новий перспективний напрям, що вивчає роль судин у природних наноструктурах та наномеханізмах, займається розв'язанням медичних завдань, поєднує знання нанонауки, біології, фізіології, біохімії та медицини з метою розробки нових методів діагностики, попередження і лікування різних захворювань.

Людський організм — природна саморегулююча система, у тому числі й капіляри, що створена у процесі еволюції і яка постійно вдосконалюється, оновлюється та здатна регулювати, виправляти порушення, що в ній виникають. Завдяки фізіологічним властивостям та біохімічному складу кров не тільки поставляє до капілярів кисень та необхідні речовини (білки, жири, вуглеводи, вітаміни, мінеральні солі, гормони тощо), але й має властивість нейтралізувати ток-

сичні речовини, мікроорганізми, що проникли в організм із клітин продуктів обміну речовин. Кожна клітина організму завдяки капілярам отримує поживні речовини [5, 15, 21, 23].

Важливу роль у механізмі транспорту крові може відігравати фрактальна самоорганізація кардіоваскулярної системи. Ця система геометрично відображається як складна система розгалужених капілярів, в яких систематично зменшується їх довжина і діаметр. Загальна площа цих капілярів становить близько 800-3200 см². Ефективне регулювання потоку крові є критичним для нормального функціонування всіх органів живої істоти і насамперед її мозку [30, 31, 33].

Структура капілярної системи живих істот може визначати природу їх функціонування. Добре відомо, що швидкість росту, або швидкість приросту нової біомаси пропорційна $M^{3/4}$, де M — маса істоти [27]. Даний закон реалізується в дуже широкому інтервалі вивчених розмірів [38]. Для пояснення цього закону була запропонована фрактальна модель структури теплопровідних капілярних потоків [20].

Капілярна сила — сила, обумовлена капілярними явищами. До капілярних явищ відносять поверхневі явища на межі рідини з іншим середовищем, пов'язані з викривленням її поверхні. Викривлення поверхні рідини на межі з газовою фазою відбувається в результаті дії поверхневого натягу рідини, який прагне скоротити поверхню поділу і надати рідині обмежену форму з найменшим потенціалом сил поверхневого натягу. Сили поверхневого натягу створюють під поверхнею поділу додатковий (капілярний) тиск. У випадку досить великих мас рідини дія поверхневого натягу компенсується силою тяжіння, тому капілярні явища проявляються насамперед у випадку знаходження рідини у вузьких каналах (капілярах) і пористих середовищах. У вузькому каналі межа поділу рідини з газом приймає викривлену форму (меніск), випуклу — у випадку незмочування рідиною стінок капіляра та увігнуту — у випадку змочування. Випуклий меніск створює під своєю поверхнею надмірний тиск, увігнутий — від'ємний тиск (розрідження). Останнє явище змушує рідину затікати у капіляри зі змочуваними стінками, у тому числі проти сил тяжіння, що відіграє важливу роль у багатьох біологічних процесах [11].

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 поверхневу деформацію створено частинками, тим більшою буде сила капілярної взаємодії. Латеральна капілярна сила може бути

як притягуючою, так і відштовхуючою, що залежить від змочувальних властивостей та ваги цих тіл. Рідинний меніск між двома твердими ліофільними поверхнями спричиняє появу притягуючої капілярної сили. Меніск може бути сформований завдяки капілярній конденсації або акумуляції адсорбованої рідини. Під впливом зовнішніх умов та між гідрофільними поверхнями капілярні сили, як правило, домінують над іншими поверхневими силами. Вони відповідають за багато процесів, що відбуваються у природі та використовуються у техніці (наприклад, для вивчення й моделювання плинну гранулярних частинок і механізмів тертя між різними поверхнями) [25, 35, 45].

Виготовляючи біоміметичні пристрої, наноканали викликають особливе зацікавлення для потенційного застосування у нанорідинних пристроях, біодатчиках, фільтрації та з метою перетворення енергії. Розроблені «розумні» штучні наноканали, виготовлені з іонних трекових мембран полімеру, молекули мають великий потенціал у галузі біоінженерії і біотехнології. Вони можуть не тільки допомогти людям дізнатися і зрозуміти життєві процеси у природі, але також надихнути вчених вивчати і проводити розробки нових нанопристроїв із більш високою продуктивністю для виробництва [26].

Фізіологи вважають, що не тільки серце є своєрідним мотором, який сприяє переносу крові до органів, адже, як свідчать дослідження останніх років, потужність серця не така вже велика. Її вистачає, щоб доставити кров через артерії до капілярів. Які ж сили сприяють проходженню крові по капілярах, а потім поверненню її по венах до правої половини серця? Цю роль виконують органи дихання, діяльність смугастих м'язів. Можна висловити таке твердження, що існує ще остаточно невстановлений особливий природний фізіологічний насос у капілярах, який відіграє основну роль із пересування еритроцитів, лейкоцитів, тромбоцитів по цих мікросудинах. На думку автора, в основі функціонування цього процесу (насосу) лежать природні наномеханізми. Система кровообігу забезпечує обмін і транспорт газів. Капіляри — найбільш важливий у функціональному плані відділ кровоносної системи, оскільки саме в них здійснюється обмін між кров'ю та інтерстиційною рідиною. Структура мікроциркуляторного русла повинна забезпечувати можливість контакту значної поверхні капілярів із великим об'ємом крові протягом тривалого часу, а також мобільність й ефективність обмінних процесів [10]. Стінка капілярів організму має нанорозміри, що сприяє адекватному перебігу фізіологічних процесів за участю біологічно активних речовин нанорозміру.

Важливо вивчити роль капілярів та їх стінок як наноструктур у перебігу фізіологічних, фізико-хімічних та біологічних процесів. Стінка капілярів відіграє важливу роль в обмінних процесах, у тому числі, ймовірно, і в природних нанотехнологічних, оскільки за своїми параметрами подібна до синтетичних наноматеріалів, таких як нанотрубки [13]. Роль капілярів у функціонуванні клітин, органів та організму тільки останніми роками почали досліджувати вчені світу.

Стінка капілярів є наноструктурою, що модулює проходження поживних речовин із капілярів у клітини. Ендотелій судин як наноструктура знаходиться на базальній мембрані, яка складається з білків, вуглеводів і меншою мірою з ліпідів. Білки базальної мембрани формують основу капіляра, а спеціальні клітини перицити — підтримують їх тонус. У капілярах м'язові волокна відсутні. Зовнішньої сполучної оболонки в артеріальних та венозних (у прекапілярних артеріолах та післякапілярних венулах) капілярах також немає. Тобто морфологічна структура капілярів має свої особливості з метою більш ґрунтовних досліджень.

Такі наукові факти свідчать про роль природних наномеханізмів у функціонуванні капілярів в організмі живих систем:

1. Капіляри постійно скорочуються, розширюються, пульсують, сприяючи проходженню крові до вен, а потім і до правого передсердя.

Стінка капілярів є наноструктурою, що модулює проходження поживних речовин із капілярів у клітини. Ендотелій судин є також наноструктурою. Зміни властивостей рідини у нанорозмірних каналах, у тому числі й капілярах, є об'єктом значного наукового інтересу, адже лежать в основі біологічних, фізіологічних та біохімічних процесів, що відбуваються у капілярах [36]. Вивчення цих властивостей — задача нанофлюїдики — нової науки, що вивчає властивості рідин у нанорозмірних структурах [22, 40].

2. Капілярні сили (capillary force) — сили, обумовлені поверхневими явищами на межі рідини з іншим середовищем, а також які пов'язані з викривленням поверхні рідини, що протікає капілярами. Викривлення поверхні рідини на межі з газовою фазою відбувається у результаті дії поверхневого натягу рідини, що прагне скоротити поверхню розділу і надати рідині в обмеженому об'ємі форму з найменшим потенціалом сил поверхневого натягу. Також сили поверхневого натягу створюють під поверхнею розділу фаз додатковий тиск (капілярний) [18, 37].

Досліджували механізми утворення двовимірних упорядкованих структур білків під впливом пристінних капілярних сил. На основі результатів вивчення модельних систем (латек-

си з діаметром частинок 1,78 мкм) показано, що порядок виникає внаслідок неспецифічних латеральних капілярних сил притягування між білковими частинками внаслідок перекриття менісків навколо них. Виявлено два типи притягуючих капілярних сил: флотаційні (рухаюча сила — гравітація) та імерсійні (рухаюча сила — змочування) [4, 35]. Техніка мономолекулярних шарів дозволяє моделювати окремі етапи самоорганізації білків й одержувати інформацію, важливу для ідентифікації біоструктур, що відповідають як нормі, так і патології. Використання *in situ* інфрачервоної спектроскопії з Фур'є-перетворенням для дослідження мономолекулярних шарів амілоїдних білків (пріони) дозволило виявити перехід між вторинними структурами за типом α -спіраль — β -структура. Вважається, що такий перехід є причиною утворення фібрил *in vivo*, що призводить до появи амілоїдних структур у вигляді позаклітинних відкладень на стінках кровоносних судин у різних тканинах і органах, що є причиною деяких фатальних нейродегенеративних та онкологічних захворювань людини і тварин [4].

Цікаві результати отримали Р.А. Kralchevsky і К. Nagayama щодо дослідження латеральних капілярних сил. Ці сили з'являються, коли контакт твердих частинок ендотелію з рідиною викликає активацію інших механізмів на поверхні поділу стінки капілярів та рідини. Капілярні взаємодії являють собою сумачію цих процесів. Автори встановили, що величина латеральних капілярних сил прямо пропорційно залежить від ваги й розміру твердих частинок у складі ендотелію. Однак парадокс: для частинок розміром менше ніж 10 мкм діють інші закони. Активізація частинок на поверхні поділу залежить від здатності частинок до змочування, внаслідок чого істотні капілярні сили швидко виникають при зануренні у рідину навіть дуже малих частинок, таких як білкові глобули. До того ж, згідно з даними цих дослідників, такі сили найбільш активно проявляються у капілярах саме при контакті наночастинок ендотелію з іншими наночастинами розміром близько 1 нм [34].

Капіляри — унікальні структури, що характеризуються певною низкою фізичних, фізико-хімічних, фізіологічних, біохімічних, квантово-хімічних феноменів. І на сьогодні в технічних науках це питання вивчається глибше, ніж у медицині. Інженери Мічиганського університету навчилися за допомогою капілярних явищ створювати з вуглецевих нанотрубок скручені шпилі, концентричні кільця й граційно вигнуті пелюстки. Цей спосіб називається капілярним формуванням. В основі технології покладена взаємодія капілярних сил, існуванням яких обумовлений капілярний ефект. Метод починаєть-

ся з утворення зразків на кремнієвій пластині. Роль «чорнил» відіграє металевий каталізатор, що викликає вертикальний ріст нанотрубок у межах досліджуваної форми. Замість традиційних зразків узорів — сітки рівномірних кіл, дослідники використовують кола й напівкола, що пересікаються, у різних комбінаціях. Кремнієву пластину з великою кількістю нанотрубок розташовують над киплячим розчинником, таким як ацетон. Розчин конденсується на нанотрубках, а потім випаровується. При цьому під час конденсації рідини при дії капілярних сил відбувається формування складних тривимірних структур із нанотрубок. Наразі ця методика є науковим проривом, оскільки відомо, як створювати прямі й вертикальні нанотрубки, однак не було з'ясовано, як надати їм складних форм. А збирання тривимірних структур різних форм є однією з основних цілей нанотехнологій. Технологія капілярного формування може привести до створення зондів, що взаємодіють з окремими клітинами й тканинами організму, інноваційних мікрорідинних приладів і нових матеріалів, текстура і властивості яких визначаються розробником [29].

3. Роль води у прояві фізіологічних функцій капілярів. Методами обчислювального експерименту встановлено, що водні пори атомних розмірів характеризуються значною селективністю щодо різних іонів, які містяться у крові, і молекул води. Селективність водних пор залежить від їх структури та діаметра. Встановлено, що проникність водних пор визначається не тільки їх геометричними характеристиками, потенціальними бар'єрами, проходженням частинок крізь пори та властивостями самих транспортних частинок, але значною мірою взаємодією частинок із внутрішніми ступенями свободи молекулярних груп, що утворюють нанопору. Відбувається дисоціація молекул води і водних комплексів при проходженні їх крізь канали. Це пов'язано із взаємодією внутрішніх ступенів свободи каналу і частинок, що транспортуються. Вузькі пори можуть бути каталізаторами процесу дисоціації. Граничні шари води (розміри яких можуть становити десятки і сотні нанометрів) — це квазідвовимірні структури, подібні структурам у рідких кристалах. Шарувата структура води у приповерхневій ділянці і поверхнева протонна провідність відіграють істотну роль у розумінні дії лікарських засобів. Роль води у механізмах дії ліків точно не встановлено [1].

Рух протонів у воді відбувається у результаті руху хвиль стиснення і розтягнення середньої щільності протонів. Такі відокремлені хвилі називаються солітонами. Рухаючись у ланцюжку молекул води, вони не передають свою енергію

тепловим коливанням інших атомів у ланцюжку, що надає їх руху надзвичайно високої стійкості. На відміну від звичайних хвиль, які являють собою періодичне повторення у просторі підвищень і западин на поверхні води або ущільнень і розрядження щільності. солітони мають вигляд одиночних підвищень (ущільнень), що поширюється як єдине ціле з деякою швидкістю. Утворення і рух солітонів описуються нелінійними рівняннями математичної фізики [2].

У класичному вченні про явище капілярності ділянка кривизни визначається геометрією утримання і макроскопічним кутом контакту. Типовий ефект нанорозмірних утворень — це поява капіляр-індукованого негативного тиску. Особливу увагу приділяють пружнокапілярним і електрокапілярним взаємодіям. Наявність електричного поля призводить до додаткового стресорного впливу [47]. Варто відмітити, що роль води у функції наноканалів досліджена недостатньо.

Поряд з іншими каналами у плазматичній (клітинній) мембрані існують своєрідні наноканали — аквапорини (АП), які з великою швидкістю транспортують воду, не пропускаючи інші сполуки та частинки, навіть протони. Завдяки малому радіусу пор цих структур проходження великих молекул стає неможливим, а для запобігання транспорту протонів біля входу у канал розміщений хімічний бар'єр — ароматично-аргініновий селективний фільтр. Молекули води проходять крізь вузький просвіт каналу у вигляді безперервного потоку завтовшки в одну молекулу. АП належать до родини протеїнів мембранних каналів, широко поширені майже у всіх живих організмах, є ключовим елементом багатьох біологічних процесів, у тому числі наокапілярів. АП мають просту структуру порівняно з іонними каналами та транспортерами розчинів. Доцільно дослідити роль аквапоринів у перебігу фізіологічних та патофізіологічних процесів у організмі людини, а також створення наноструктур — біоміметичних аквапоринів — для застосування у медицині та техніці [32, 39].

4. Іонні канали та функція капілярів. Іонні канали — це нанорозмірні білки, функція яких — забезпечення проникнення іонів та інших молекул крізь біологічну мембрану. Розміри таких каналів становлять близько 5 нм завдовжки та 1 нм завширшки. Ці структури мають бути високочастотними щодо типу іонів та підтримувати високу швидкість транспорту, регулюючи потік шляхом вмикання/вимикання. Іонні канали необхідні для здійснення важливих фізіологічних процесів, таких як передача сигналів у нейронах, генерування потенціалу дії, скорочення або розслаблення м'язів, підтримка клітинного гомеостазу тощо [14, 44].

Природні іонні канали є високоселективними системами транспорту маси, що представлені великим розмаїттям спеціалізованих нанорозмірних протеїнів. Останніми роками проводяться дослідження зі створення штучних наноканалів, які можуть застосовуватися у біосенсорах та штучних клітинах. Розроблені методи створення штучних структур, які мають властивості природних іонних каналів чи нанопор, що зустрічаються у мембранах живих організмів [28, 42, 46]. Дослідження останніх років показують, що штучні наноканали можуть бути аналогами природних біологічних каналів [19, 41].

Перенос іонів через мембрану забезпечують іонні канали — спеціалізовані трансмембранні протеїни. Деякі з іонів переміщуються у клітину чи з неї за градієнтом концентрації (натрій, калій, кальцій), інші — проти градієнта концентрацій, діючи як своєрідний механізм, що контролює іонні потоки завдяки активності ферментів (натрій/кальцієвої АТФ-ази, кальцієвої АТФ-ази). Зміни в іонному розподілі можуть, у свою чергу, спричинювати зміни у мембранному потенціалі та, у випадку іонів кальцію, безпосередньо активувати різні внутрішньоклітинні сигнальні каскади. Кальцій при проникненні всередину кардіоміоциту завдяки енергії АТФ сприяє приєднанню актину до міозину і тим самим скороченню серцевого м'яза — систолі. Генеровані іонними каналами сигнали є одними з найшвидших серед зареєстрованих у біосистемах. Іонний потік крізь пору мембрани може досягати значень 10^9 іон/с [24].

Українські вчені провели теоретичне дослідження щодо біофізичних та медико-біологічних аспектів електрорушійної сили крові, що базується на фундаментальних законах фізики, макрфізичних властивостей кровообігу, які здійснюються за вимогами логіки біологічних функцій, що за змістом є синергічним цілим мікро- та макрфізичних процесів [3].

Проаналізована взаємодія електростатичних полів еритроцитів і ендотелію капілярів, яка опосередкована ζ -потенціалом (електрокінетичний потенціал (дзета-потенціал)) — потенціал, що 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 ділянці), введення якого до розрахунків внесло б корективи в аналіз електростатичних сил даної системи, які є проявом просторово фіксованих від'ємних зарядів, але, ускладнивши хід доведення, воно, вочевидь, не змінило б принципово висновки математичного аналізу [17].

Таким чином, на прикладі еритроцита показано, що примусового руху в капілярі зазнає не

тільки точковий заряд, а й формений елемент крові. Що ж до ζ -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 ζ -потенціал відштовхування (електрокінетичний) за відстанню зменшується по експоненті, за його рахунок відбувається кулонівське ущільнення дії від'ємних зарядів. Очевидно, що зрушення рівноваги ζ -потенціалу (градації рівня катіонів чи рН) призводять до зміни мікроциркуляції, бо у цьому випадку виникнуть відхилення симетрії гельмгольцівського подвійного шару і сил прилягання (електростатичного зчеплення), падіння рушійної сили крові з наступним ньютонівським опором [8].

Електростатичне відштовхування еритроцита та ендотелію капіляра зумовлює прискорення червоного кров'яного тільця за вектором кровообігу. На підставі проведеного аналізу фізичних чинників мікроциркуляції як самостійних на основі лінійних функцій автори вважають, що кожен із них при взаємодії підлягає законам синергетики у напрямку здійснення біологічної функції [8].

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 у моно- та нанокристалічному стані. При наноструктуруванні матеріали можуть набувати нових властивостей і незвичних характеристик. Добре вивчений вплив наноструктурування на магнітні, електронні, механічні, оптичні властивості наноматеріалів [9]. На відміну від перерахованих, капілярні властивості наноструктурних поверхонь практично не вивчені. У нанооб'єктах поверхня наноструктурованого матеріалу має принципово нові специфічні властивості, що пов'язано з так званим розмірним ефектом. Наприклад, з'являються надвисокі адсорбційні здібності, що пов'язано з ненасиченими валентними зв'язками поверхневих атомів, пропорційне відношення яких відносно об'ємних атомів значно зростає. Це значно впливає на капілярні властивості наноматеріалу [6].

Островська Л.Ю. та співавт. встановили, що змочуваність наноструктурних плівок можна змінювати, використовуючи різні фізичні та хімічні методи обробки поверхні, такі як іонне бомбардування, термовідпал, УФ-опромінення, гідрогенізація, окислення, легування. Досліджено також ефективний вплив морфологічних параметрів поверхні, таких як жорсткість та структура (мікротопографія), на характеристики змочування нанокластерних плівок вуглецю та діоксиду

титану. З цих результатів впливає можливість контролювання змочуваності виключно контролюванням морфології поверхні на мікронній та нанометричній шкалі. Цей напрямок останнім часом активно розвивається стосовно плівкових матеріалів [7].

Проведено дослідження капілярних властивостей полікристалічних алмазних плівок під час переходу від мікро- до нанокристалічного стану. Дослідження змочуваності різних вуглецевих структур оловом у вакуумі показали, що наноструктурування погіршує змочуваність: для плівок нанокристалічного алмазу спостерігається підвищення кута змочування до $(160 \pm 2^\circ)$ порівняно з плівкою монокристалічного алмазу $(130 \pm 2^\circ)$. Наноструктурні матеріали забезпечують такий рівень капілярних характеристик, який складно реалізувати для мікро- та монокристалічних структур. Це розглядається як вплив розмірного чинника, фізичною причиною існування якого є підвищений вплив надлишкової енергії атомів на поверхні наноструктурних плівок, що підтверджують розрахунки їх ефективної поверхневої енергії [7].

На кафедрі фармакології Національного медичного інституту ім. О.О. Богомольця академік О.І. Черкес та його учні (Ф.П. Тринус, С.Б. Фран-

цузова, Н.О. Горчакова, Л.І. Казак, В.А. Туманов) проводили фундаментальні дослідження з впливу різних лікарських засобів (серцеві глікозиди, резерпін, отадин, папаверин, нітрогліцерин, анаприлін тощо) на судини тварин [16]. У плані продовження цих розробок І.С. Чекман, Н.М. Широкова, В.В. Ткачук, І.В. Ніженковська, Т.В. Кава, І.О. Борзенко, В.В. Бабак, Н.В. Савченко, В.Ю. Дяченко, О.В. Шумейко, Р.С. Довгань вивчали вплив серцево-судинних препаратів за умов інтактних тварин і при експериментальній гіпертензії.

Висновки

Роль капілярів у живих системах організму вивчено недостатньо, особливо цікавим є досі нез'ясоване питання щодо механізму кровообігу на основі закономірностей гідродинаміки та значення ендотелію капілярів у процесі гемодинаміки. Більш ґрунтовне дослідження ролі капілярних сил у механізмі кровообігу є необхідним, оскільки дозволить зрозуміти суть фізіологічних, біохімічних процесів у судинах, мікроциркуляції у функціонуванні організму, а також вплив на ці процеси природних наночастинок.

Список використаної літератури

1. Антонченко В.Я. Основа фізики води / В.Я. Антонченко, А.С. Давыдов, В.В. Ильин. — К.: Наук. думка, 1991. — 667 с.
2. Давыдов А.С. Солидоны в молекулярных системах / А.С. Давыдов. — К.: Наук. думка, 1990. — 304 с.
3. 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.
4. Мономолекулярные слои белков и перспективы конструирования наноматериалов на их основе / Г.П. Ямпольская, С.М. Левачев, А.Е. Харлов [и др.] // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. — 2001. — Т. 42, № 5. — С. 355.
5. Нанотехнологии и перспективы их использования в медицине и биотехнологии / В.М. Лахтин, С.С. Афанасьев, М.В. Лахтин [и др.] // Вестн. РАМН. — 2008. — № 4. — С. 50-55.
6. Островська Л.Ю. Дослідження змочуваності плівок $A^{III}N$ 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.
7. 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.
8. 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. 3, № 1. — С. 28-32.
9. Русанов А.И. Удивительный мир наноструктур / А.И. Русанов // Журн. общей химии. — 2002. — Т. 72, вып. 4. — С. 532-549.
10. Физиология человека: в 3-х томах / Под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса. — М.: Мир, 1996. — Т. 2. — 313 с.
11. Химическая энциклопедия / Гл. ред.: И.Л. Кнунянц. — М.: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — 671 с.
12. Чекман І.С. Капіляри живих систем: природні наномеханізми функціонування / І.С. Чекман // Лікарська справа. — 2013. — № 3. — С. 3-15.
13. Чекман І.С. Природні наноструктури та наномеханізми / І.С. Чекман, П.В. Сімонов. — К.: Задруга, 2012. — 104 с.
14. Чекман І.С. Структура та функція біомембран: вплив наночастинок / І.С. Чекман, П.В. Сімонов // Фізіол. журн. — 2011. — Т. 57, № 6. — С. 99-117.
15. Чекман І.С. Фізіологічні процеси в організмі: наномеханізми / І.С. Чекман // Лікарська справа. — 2010. — № 7-8. — С. 3-10.
16. Черкес А.И. Сердечные гликозиды / А.И. Черкес, В.Ф. Мельникова, Е.С. Розовская // В кн.: Руководство по фармакологии. — Ленинград: Медицина, 1961. — С. 267-298.
17. Шаплавський М.В. Біоінертизація як біологічна функція: основи теорії і практика / М.В. Шаплавський. — Чернівці: Прут, 1996. — 184 с.
18. Assembly of nanorods into designer superstructures: the role of templating, capillary forces, adhesion, and polymer hydration / J.W. Ciszek, L. Huang, S. Tsonchev [et al.] // ACS Nano. — 2010. — Vol. 4. — P. 259-266.
19. Baker L.A. Nanopores, a makeover for membranes / L.A. Baker, S.P. Bird // Nat. Nanotechnol. — 2008. — Vol. 3. — P. 73-74.
20. Bejan A. The tree of convective heat streams: its thermal insulation function and the predicted 3/4-power relation between body heat loss and body size / A. Bejan // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2001. — Vol. 44 — P. 699-704.
21. Berger M. Nano-society. Pushing the boundaries of technology / M. Berger. — Cambridge: RSC Nanoscience & Nanotechnology, 2009. — 317 p.
22. Bocquet L. Nanofluidics, from bulk to interfaces / L. Bocquet, E. Charlaix // Chem. Soc. Rev. — 2010. — Vol. 39. — P. 1073-1095.
23. Boisseau P. Nanoscience. Nanobiotechnology and nanobiology / P. Boisseau, P. Houdy, M. Lahmany. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. — 1200 p.
24. Bradshaw R.A. Handbook of cell signaling / R.A. Bradshaw, E.A. Dennis. — Oxford: Academic Press, 2009. — 2nd edition. — P. 201-207.
25. Butt H. Normal capillary forces / H. Butt, M. Kappl // Advances in Colloid and Interface Science. — 2009. — Vol. 146. — P. 48-60.

26. Construction of biomimetic smart nanochannels with polymer membranes and application in energy conversion systems / L. Wen, Y. Tian, J. Ma [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* — 2012. — Vol. 14. — P. 4027-4042.
27. Damuth J. Scaling of growth: plants and animals are not so different / J. Damuth // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2001. — Vol. 98. — P. 2113-2114.
28. Detecting single porphyrin molecules in a conically shaped synthetic nanopore / E.A. Heins, Z.S. Siwy, L.A. Baker, C.R. Martin // *Nano. Lett.* — 2005. — Vol. 5. — P. 1824-1829.
29. Diverse 3D microarchitectures made by capillary forming of carbon nanotubes / M. Volder, S.H. Tawfik, S.J. Park [et al.] // *Advanced Materials.* — 2010. — Vol. 22. — P. 4384-4389.
30. Dynamics of pulsatile flow in fractal models of vascular branching networks / A. Bui, I.D. Sutalo, R. Manasseh, K. Liffman // *Medical & Biological Engineering & Computing.* — 2009. — Vol. 47. — P. 763-772.
31. Gabrys E. Blood flow simulation through fractal models of circulatory system / E. Gabrys, M. Rybaczuk, A. Kedzia // *Chaos, Solitons and Fractals.* — 2006. — Vol. 27. — P. 1-7.
32. Groot B.L. Water permeation across biological membranes: mechanism and dynamics of aquaporin-1 and GlpF / B.L. Groot, H. Grubmuller // *Science.* — 2001. — Vol. 294, № 5550. — P. 2353-2357.
33. Jayalalitha G. Fractal model for blood flow in cardiovascular system / G. Jayalalitha, V. Shanthoshini Deviha, R. Uthayakumar // *Computers in Biology and Medicine.* — 2008. — Vol. 38. — P. 684-693.
34. Kralchevsky P.A. 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.
35. 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.
36. Krishnamurthy V. Ion channel biosensors — part I: construction, operation, and clinical studies / V. Krishnamurthy, S. Monfared, B. Cornell // *IEEE Transactions on Nanotechnology.* — 2010. — Vol. 9. — P. 313-322.
37. Nanogeometry matters: unexpected decrease of capillary adhesion forces with increasing relative humidity / M. Köber, E. Sahagún, P. García-Mochales [et al.] // *Small.* — 2010. — Vol. 6. — P. 25-27.
38. Niklas K.J. Invariant scaling relationships for interspecific plant biomass production rates and body size / K.J. Niklas, B.J. Enquist // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2001. — Vol. 98. — P. 2922-2927.
39. Öberg F. Aquaporins. Production optimization and characterization / F. Öberg. — Göteborg: Chalmers Reproservice, 2011. — 81 p.
40. pH-tunable ion selectivity in carbon nanotube pores / F. Fornasiero, J.B. In, S. Kim [et al.] // *Langmuir.* — 2010. — Vol. 26. — P. 14848-14853.
41. Pradeep H. Nanochannels: biological channel analogues / H. Pradeep, G.K. Rajanikant // *IET Nanobiotechnol.* — 2012. — Vol. 6. — P. 63-70.
42. Sachs F. Mechanosensitive ion channels in nonspecialized cells / F. Sachs, C.E. Morris // *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* — 1998. — Vol. 132. — P. 1-77.
43. Self-assembled nanostructures (Nanostructure science and technology) / J.Z. Zhang, Z. Wang, J. Liu [et al.]. — New York: Kluwer Academic Publishers, 2004. — 316 p.
44. Shaefer H.E. Nanoscience. The science of the small in physics, engineering, chemistry, biology and medicine / H.E. Shaefer, J. Zhang. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. — 772 p.
45. Shinto H. Lateral capillary forces between solid bodies on liquid surface: a lattice Boltzmann study / H. Shinto, D. Komiyama, K. Higashitani // *Langmuir.* — 2006. — Vol. 22. — P. 2058-2064.
46. Teli M.K. Nanotechnology and nanomedicine: going small means aiming big / M.K. Teli, S. Mutalik, G.K. Rajanikant // *Curr. Pharm. Des.* — 2010. — Vol. 16. — P. 1882-1892.
47. van Honschoten J.W. Capillarity at the nanoscale / J.W. van Honschoten, N. Brunets, N.R. Tas // *Chem. Soc. Rev.* — 2010. — Vol. 39. — P. 1096-1114.
48. Wicking and spreading of water droplets on nanotubes / H.S. Ahn, G. Park, J. Kim, M.H. Kim // *Langmuir.* — 2012. — Vol. 28. — P. 2614-2619.

Надійшла до редакції 15.07.2016

CAPILLARY VESSELS: PHYSIOLOGICAL, BIOCHEMICAL, PHARMACOLOGICAL PROPERTIES, NANOMECHANISMS OF FUNCTIONING

I.S. Chekman

Abstract

The paper summarizes the results of studies of the physiological, biochemical and pharmacological properties of capillaries and their functioning nanomechanisms. The role of capillaries in living systems is not enough studied, the mechanism of circulation based on hydrodynamics patterns and the role of the capillaries endothelium and red blood cells in the hemodynamics are especially interesting issues. Investigation of the role of capillary forces in the bloodstream mechanisms is necessary, because it will help us to understand more deeply the physiological, biochemical processes in the vessels and the role of microcirculation in the functioning of the organism, and the impact of nanoparticles on these natural processes.

Keywords: capillary vessels, physiological, biochemical, pharmacological properties, nanomechanisms of functioning.