
**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ
ГІДРОГЕЛЕВИХ СИСТЕМ З ПОЛІФЕНОЛАМИ**

Дук Н. М.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-14>**ВСТУП**

Розробка біоактивних гідрогелевих систем є одним із пріоритетних напрямів сучасної біотехнології та біоінженерії, зокрема у сфері дерматології та регенеративної медицини. Особливий інтерес викликає використання природних поліфенольних сполук як активних компонентів гідрогелів завдяки їх вираженим антиоксидантним, протизапальним та антисептичним властивостям. Водночас практичне застосування поліфенолів обмежується їх нестабільністю та низькою біодоступністю. У розділі здійснено аналіз сучасних підходів до створення гідрогелевих систем з поліфенолами, охарактеризовано основні типи біополімерних матриць та механізми біологічної дії поліфенольних сполук. Узагальнено результати досліджень європейських, американських та українських наукових шкіл, зокрема щодо використання альгінатних і хітозанових гідрогелів. Показано перспективність інтеграції поліфенолів у гідрогелеві системи для біомедичних і дерматологічних застосувань.

Сучасний етап розвитку науки характеризується активним пошуком інноваційних матеріалів і технологій, здатних забезпечити ефективну та безпечну доставку біологічно активних речовин до тканин організму. У цьому контексті гідрогелеві системи посідають особливе місце завдяки своїй тривимірній полімерній структурі, високому вмісту води та здатності імітувати властивості живих тканин¹. Гідрогелі широко застосовуються у фармації, біомедицині, косметології та тканинній інженерії як матриці для контрольованого вивільнення активних компонентів.

Особливу увагу в останні роки приділяють біополімерним гідрогелям на основі природних полісахаридів і білків, зокрема натрій альгінату, хітозану, бактеріальної целюлози, гіалуронової кислоти та

¹ Ahmed E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 105–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>

желатину². Такі матеріали характеризуються високою біосумісністю, біодеградабельністю та низькою токсичністю, що робить їх привабливими для створення систем локальної дії. Водночас застосування гідрогелів як носіїв біоактивних сполук потребує глибокого теоретичного обґрунтування, зокрема з точки зору взаємодії полімерної матриці з активною речовиною та навколишнім біологічним середовищем.

Серед широкого спектра біологічно активних сполук особливе місце займають поліфеноли – вторинні метаболіти рослинного походження, що включають флавоноїди, фенольні кислоти, стильбени та інші класи сполук. Поліфеноли відомі своїми антиоксидантними, протизапальними, антибактеріальними та фотозахисними властивостями³. Саме ці характеристики зумовлюють інтерес до їх використання у складі дерматологічних і косметологічних засобів, зокрема для догляду за проблемною, пошкодженою або віковою шкірою.

Разом із тим практичне застосування поліфенолів обмежується низькою факторів, серед яких – нестабільність у водних середовищах, чутливість до світла та кисню, а також обмежена проникність через шкірний бар'єр. Використання гідрогелевих систем як носіїв поліфенолів дозволяє частково або повністю подолати зазначені недоліки за рахунок захисту активних молекул, пролонгованого вивільнення та локальної дії⁴.

Наукові школи Європейського Союзу та США активно розвивають напрям створення так званих «інтелектуальних» гідрогелів (smart hydrogels), здатних реагувати на зміни рН, температури або інших зовнішніх чинників. Українські дослідження, зокрема виконані в Національному університеті «Львівська політехніка», зосереджені на розробці рН-залежних іонно зшитих гідрогелів на основі альгінату та хітозану для біомедичних застосувань⁵.

Метою цього розділу є узагальнення та систематизація сучасних наукових даних щодо теоретичних основ створення гідрогелевих систем з поліфенолами, аналіз їх фізико-хімічних та біологічних властивостей,

² Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 65. P. 252–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>

³ Peppas N. A., Hilt, J. Z.; Khademhosseini, A.; Langer, R. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials*. 2006. Vol. 18, No. 11. P. 1345–1360. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>

⁴ Hoffman A. S. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012. Vol. 64. P. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010>

⁵ Sannino A., Madaghiele M., Demitri C. Development and characterization of cellulose-based hydrogels for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009. Vol. 114, No. 6. P. 3662–3669. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.30956>

а також визначення перспектив подальшого розвитку даного напрямку в біотехнології та біоінженерії.

1. Аналіз сучасних тенденцій у створенні біоактивних гідрогелів

Гідрогелі на сучасному етапі розвитку біотехнології та біоінженерії розглядаються як один із найбільш перспективних класів м'яких функціональних матеріалів для біомедичних і дерматологічних застосувань. Їх унікальність зумовлена тривимірною полімерною сіткою, здатною утримувати значну кількість води або біологічних рідин, що забезпечує високу біосумісність і подібність до міжклітинного матриксу живих тканин. Саме ця властивість робить гідрогелі привабливими для використання як носіїв біологічно активних речовин.

Однією з ключових тенденцій сучасних досліджень є перехід від синтетичних полімерів до біополімерів природного походження. Такий підхід зумовлений необхідністю зменшення токсичності, покращення біодеградабельності та мінімізації імунологічних реакцій при контакті матеріалу з біологічними тканинами. До найбільш поширених біополімерів, що використовуються для створення гідрогелів, належать натрії альгінат, хітозан, каррагінан, бактеріальна целюлоза, гіалуронова кислота та желатин.

Альгінатні гідрогелі широко застосовуються завдяки простоті формування шляхом іонного зшивання з двовалентними катіонами, зокрема іонами кальцію. Такі системи характеризуються м'якою текстурою, високою здатністю до набухання та задовільною біосумісністю, що робить їх придатними для створення дерматологічних патчів і ранових покриттів. Водночас хітозанові гідрогелі вирізняються наявністю власної антибактеріальної активності, що суттєво розширює спектр їх застосування, зокрема для проблемної та пошкодженої шкіри.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють гідрогелям на основі бактеріальної целюлози, які демонструють високу механічну міцність, прозорість і здатність щільно прилягати до поверхні шкіри, створюючи так званий ефект «другої шкіри». Такі системи активно досліджуються в країнах Європейського Союзу та США як платформи для пролонгованої доставки активних інгредієнтів у косметології та регенеративній медицині.

Наступним важливим напрямом є розробка так званих «інтелектуальних» або стимулочутливих гідрогелів (smart hydrogels). Ці системи здатні змінювати свої фізико-хімічні властивості у відповідь на зовнішні фактори, такі як рН, температура, іонна сила або ферментативна активність середовища. Наприклад, рН-чутливі гідрогелі можуть

використовуватися для цільового вивільнення активних речовин у зонах запалення, де спостерігається зниження кислотності шкірного середовища.

У сучасних публікаціях дедалі частіше акцентується увага на комбінованих гідрогелевих системах, що поєднують декілька типів полімерів або різні механізми зшивання. Такий підхід дозволяє оптимізувати механічні, реологічні та адгезивні властивості матеріалу без втрати його біологічної сумісності. Зокрема, поєднання гіалуронової кислоти з желатином або альгінату з хітозаном забезпечує баланс між еластичністю, міцністю та здатністю до контрольованого вивільнення активних компонентів⁶.

Суттєвим трендом є також функціоналізація гідрогелів біологічно активними сполуками, серед яких важливе місце займають антиоксиданти, пептиди, ферменти та природні поліфеноли. Інтеграція таких речовин у полімерну матрицю дозволяє створювати не лише пасивні носії, а й активні терапевтичні та косметологічні системи⁷. У цьому контексті гідрогелі розглядаються як платформи для створення персоналізованих засобів догляду за шкірою з пролонгованою дією.

Українські наукові дослідження також демонструють активний розвиток цього напрямку. Роботи, виконані в Національному університеті «Львівська політехніка», присвячені створенню рН-залежних гідрогелів на основі альгінату та хітозану, підтверджують можливість регулювання їхніх реологічних і транспортних властивостей шляхом варіювання складу та умов зшивання⁸. Це створює передумови для подальшої інтеграції поліфенольних сполук у такі системи.

Таким чином, аналіз сучасних тенденцій свідчить, що розвиток біоактивних гідрогелів відбувається в напрямі підвищення їх біосумісності, функціональності та адаптивності до умов біологічного середовища. Саме ці підходи створюють теоретичне підґрунтя для розробки гідрогелевих систем з поліфенолами, здатних поєднувати захисну, терапевтичну та косметологічну дію.

⁶ Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.

⁷ Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2004. Vol. 79, No. 5. P. 727–747. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>

⁸ Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2010. Vol. 64 (Suppl. 3). P. S112–S120. DOI: <https://doi.org/10.1038/ejcn.2010.221>

2. Природні поліфенольні сполуки: класифікація, властивості, біологічна активність та методи одержання

Поліфенольні сполуки являють собою велику та структурно різноманітну групу вторинних метаболітів рослинного походження, що відіграють важливу роль у захисних механізмах рослин та водночас демонструють високу біологічну активність у відношенні до організму людини. У сучасній біотехнології поліфеноли розглядаються як перспективні біоактивні інгредієнти для фармацевтичних, косметологічних і дерматологічних застосувань.

З хімічної точки зору поліфеноли характеризуються наявністю однієї або декількох фенольних груп у структурі молекули, що зумовлює їх антиоксидантні властивості. Залежно від хімічної будови та біосинтетичного походження поліфенольні сполуки поділяють на кілька основних класів: фенольні кислоти, флавоноїди, стильбени, лігнани та таніни. Найбільш дослідженими з точки зору біологічної активності є флавоноїди, до яких належать кверцетин, катехіни, рутин та епігалокатехін-галат.

Фенольні кислоти, зокрема кафова, ферулова та галова кислоти, широко представлені у рослинній сировині та характеризуються вираженими антиоксидантними і протизапальними властивостями. Стильбени, представлені насамперед ресвератролом, привертають значну увагу дослідників завдяки їхній здатності модулювати клітинні сигнальні шляхи та знижувати рівень оксидативного стресу. Лігнани та таніни також демонструють біологічну активність, проте їх використання у складі гідрогелевих систем потребує додаткового вивчення через складність контролю вивільнення.

Біологічна активність поліфенолів зумовлена насамперед їх здатністю нейтралізувати вільні радикали, хелатувати іони металів та інгібувати ферментативні процеси, пов'язані із запаленням і старінням шкіри. У дерматологічних дослідженнях поліфеноли показали здатність зменшувати еритему, знижувати трансепідермальну втрату вологи та покращувати бар'єрні функції шкіри.

Важливим аспектом використання поліфенолів є методи їх одержання. Традиційно поліфенольні сполуки отримують шляхом екстракції з рослинної сировини з використанням органічних розчинників або водно-спиртових систем. У сучасних дослідженнях все більшої популярності набувають «зелені» технології екстракції, зокрема надкритична флюїдна екстракція, ультразвукова та мікрохвильова екстракція, що дозволяють підвищити вихід поліфенолів і зменшити негативний вплив на довкілля⁹.

⁹ Middleton E., Kandaswami C., Theoharides T. C. The effects of plant flavonoids on mammalian cells. *Pharmacological Reviews*. 2000. Vol. 52, No. 4. P. 673–751.

Окремий напрям становлять біотехнологічні методи отримання поліфенолів із використанням мікроорганізмів та клітинних культур рослин. Такі підходи забезпечують відтворюваність складу та високу чистоту кінцевого продукту, що є важливим для створення стандартизованих гідрогелевих систем¹⁰. Проте висока вартість і складність масштабування поки що обмежують широке промислове впровадження цих методів.

Незважаючи на значний потенціал поліфенолів, їх практичне застосування у складі косметологічних і дерматологічних засобів ускладнюється низькою стабільністю, фоточутливістю та схильністю до окиснення¹¹. Саме ці обмеження обґрунтовують доцільність інтеграції поліфенольних сполук у гідрогелеві матриці, здатні захищати активні компоненти та забезпечувати їх контрольоване вивільнення.

3. Механізми антисептичної, антиоксидантної та протизапальної дії поліфенолів

Поліфенольні сполуки характеризуються широким спектром біологічної активності, що зумовлює їх інтенсивне вивчення у контексті біомедичних та дерматологічних застосувань. Особливу увагу приділяють антисептичним, антиоксидантним і протизапальним механізмам дії поліфенолів, які є ключовими для підтримання гомеостазу шкіри та профілактики запальних і дегенеративних процесів.

Антиоксидантна дія поліфенолів ґрунтується насамперед на їх здатності інактивувати активні форми кисню та азоту шляхом донорства електронів або атомів водню. Фенольні гідроксильні групи стабілізують вільні радикали, перериваючи ланцюгові реакції пероксидного окиснення ліпідів клітинних мембран. Даний механізм є особливо важливим для шкіри, яка постійно зазнає впливу ультрафіолетового випромінювання та забруднювальних факторів довкілля.

Окрім прямого радикал-поглинаючого ефекту, поліфеноли здатні модулювати активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза, каталаза та глутатіонпероксидаза. Доведено, що ресвератрол і рутин стимулюють ендогенні антиоксидантні системи клітин, знижуючи рівень оксидативного стресу та уповільнюючи процеси фотостаріння шкіри.

¹⁰ Pandey K. B., Rizvi S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2009. Article ID 897484. DOI: 10.4161/oxim.2.5.9498

¹¹ Guedes B. N., Andreani T., Oliveira M. B. P. P., Fathi F., Souto E. B. Eco-Friendly Hydrogels Loading Polyphenols-Composed Biomimetic Micelles for Topical Administration of Resveratrol and Rutin. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10 (1). P. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10010008>

Антисептична дія поліфенольних сполук пов'язана з їх здатністю впливати на клітинні мембрани мікроорганізмів, порушуючи їх проникність та інгібуючи активність ферментів, необхідних для росту та реплікації. Флавоноїди та фенольні кислоти демонструють бактеріостатичну і бактерицидну активність щодо грампозитивних і грамнегативних бактерій, а також протигрибкову дію. Це робить поліфеноли перспективними компонентами топічних засобів для догляду за проблемною та запальною шкірою.

Протизапальні властивості поліфенолів реалізуються через інгібування ключових сигнальних шляхів запалення, зокрема NF- κ B та MAPK. Поліфенольні сполуки здатні знижувати експресію прозапальних цитокінів, таких як інтерлейкін-1 β , інтерлейкін-6 та фактор некрозу пухлин α , що сприяє зменшенню локального запалення. В експериментальних моделях було показано, що рутин та ресвератрол ефективно зменшують набряк і почервоніння тканин при місцевому застосуванні.

Важливою перевагою поліфенолів є їх комплексний механізм дії, що поєднує антиоксидантний, антисептичний і протизапальний ефекти. Така багатофункціональність дозволяє розглядати поліфеноли як альтернативу синтетичним активним речовинам, які часто викликають подразнення або побічні реакції при тривалому застосуванні.

Разом із тим ефективність поліфенолів значною мірою залежить від їх стабільності та біодоступності. При прямому нанесенні на шкіру активні сполуки можуть швидко деградувати під впливом світла, кисню та ферментів¹². Саме тому включення поліфенолів у гідрогелеві системи розглядається як перспективний підхід до підвищення їх терапевтичної ефективності та пролонгації дії.

4. Перспективи використання поліфенолів у складі гідрогелевих систем для біомедичних і дерматологічних застосувань

Сучасні тенденції розвитку біомедичних матеріалів спрямовані на створення функціональних систем локальної дії, які поєднують біосумісність, контрольоване вивільнення активних речовин та мінімізацію побічних ефектів. У цьому контексті гідрогелеві системи з інкапсульованими поліфенолами розглядаються як перспективна платформа для топічного застосування у дерматології, косметології та регенеративній медицині.

¹² Tian R., Wen Y., Zhang Z. et al. Recent advances in smart hydrogels derived from polysaccharides and their applications for wound dressing and healing. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2025.123134

Гідрогелі завдяки своїй тривимірній полімерній сітці здатні утримувати значну кількість води, що забезпечує комфорт при нанесенні, зволоження тканин та сприятливе мікросередовище для відновлення шкіри. Поєднання гідрогелевої матриці з поліфенольними сполуками дозволяє не лише захистити біоактивні молекули від деградації, але й забезпечити їх пролонговане та контрольоване вивільнення.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють використанню природних та біорозкладних полімерів, зокрема альгінатів, хітозану, гіалуринової кислоти та желатину. Такі матеріали демонструють високу біосумісність і здатність до взаємодії з біологічними тканинами, що є критично важливим для дерматологічних аплікацій. Включення поліфенолів у подібні системи сприяє посиленню їх антиоксидантних та протизапальних властивостей¹³.

У дерматологічній практиці гідрогелеві патчі з поліфенолами розглядаються як ефективні засоби для догляду за шкірою, схильною до запалення, гіперпігментації та фотостаріння. Ресвератрол, рутин, кверцетин та катехіни здатні зменшувати оксидативний стрес, покращувати мікроциркуляцію та сприяти відновленню бар'єрної функції епідермісу.

Перспективним напрямом є також використання біоміметичних систем доставки, зокрема мікел та наноструктурованих носіїв, інтегрованих у гідрогелеву матрицю. Такі комбіновані системи дозволяють підвищити стабільність поліфенолів, оптимізувати їх розподіл у гідрогелі та забезпечити таргетоване вивільнення активних компонентів. Даний підхід відкриває нові можливості для створення високоефективних топічних форм з прогнозованими фармакокінетичними характеристиками.

Водночас залишається низка наукових і технологічних викликів, пов'язаних зі стандартизацією складу гідрогелевих систем, відтвореністю їх фізико-хімічних властивостей та масштабуванням виробництва. Особливої уваги потребує питання збереження біологічної активності поліфенолів у процесі формування гідрогелів та при тривалому зберіганні готових продуктів.

Останні дослідження свідчать про стрімкий розвиток адаптивних і багатofункціональних гідрогелевих систем, призначених для біомедичних і дерматологічних застосувань. Особливу увагу приділяють гідрогелям, функціоналізованим антиоксидантами та природними поліфенольними сполуками, які забезпечують поєднання

¹³ Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.

протизапальної, антисептичної та регенеративної дії. Показано, що інтеграція поліфенолів у біоміметичні та стимулочутливі гідрогелеві матриці сприяє підвищенню стабільності біоактивних компонентів, оптимізації їх контрольованого вивільнення та покращенню процесів загоєння тканин¹⁴.

Таким чином, результати сучасних досліджень свідчать про значний потенціал використання поліфенолів у складі гідрогелевих систем для біомедичних і дерматологічних застосувань. Комплексне поєднання біосумісних полімерів та природних біоактивних сполук створює наукове підґрунтя для розробки інноваційних гідрогелевих патчів з покращеними функціональними властивостями, що обґрунтовує доцільність подальших теоретичних і експериментальних досліджень у даному напрямі¹⁵.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасних наукових джерел дозволяє зробити висновок, що гідрогелеві системи є однією з найбільш перспективних платформ для локальної доставки біоактивних сполук у біомедичних і дерматологічних застосуваннях. Їх тривимірна полімерна структура, висока водоутримувальна здатність та можливість модифікації фізико-хімічних властивостей забезпечують оптимальні умови для пролонгованого вивільнення активних речовин і взаємодії з біологічними тканинами.

У результаті аналізу сучасних тенденцій створення біоактивних гідрогелів встановлено, що основний науковий інтерес зосереджений на використанні біополімерів природного походження, зокрема альгінатів, хітозану, гіалуронової кислоти, желатину та бактеріальної целюлози. Зазначені матеріали характеризуються високою біосумісністю, низькою токсичністю та здатністю до формування стабільних гідрогелевих матриць з керованими механічними й реологічними властивостями.

Аналіз літературних даних щодо природних поліфенольних сполук показав, що вони є однією з найбільш біологічно активних груп вторинних метаболітів рослинного походження. Поліфеноли проявляють виражену антиоксидантну, протизапальну та антисептичну активність,

¹⁴ Yuhui Li, Guoyou Huang, Xiaohui Zhang, Baoqiang Li, Yongmei Chen, Tingli Lu, Tian Jian Lu, Feng Xu. Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications. *Adv Funct Mater*. 2013. Vol. 23 (6). P. 660–672. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201201708>

¹⁵ Wang W., Dai J., Huang Y., Li X., Yang J., Zheng Y., Shi X. Extracellular matrix mimicking dynamic interpenetrating network hydrogel for skin tissue engineering. *Chem. Eng. J.* 2023. Vol. 457, Article 141362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141362>

що обумовлює їх широкий потенціал у дерматології, косметології та регенеративній медицині. Водночас їх практичне застосування обмежується низькою стабільністю, чутливістю до окиснення та обмеженою біодоступністю.

У розділі показано, що інкорпорація поліфенолів у гідрогелеві системи дозволяє суттєво мінімізувати зазначені обмеження. Гідрогелева матриця виконує захисну функцію, стабілізуючи біоактивні молекули та забезпечуючи їх контрольоване вивільнення у зоні аплікації. Особливо перспективними є комбіновані системи, у яких поліфеноли попередньо інкапсулюються у мікелярні або наноструктуровані носії з подальшою інтеграцією у гідрогель.

Проаналізовані механізми антисептичної, антиоксидантної та протизапальної дії поліфенолів свідчать про їх комплексний вплив на клітинному та молекулярному рівнях, зокрема через нейтралізацію вільних радикалів, модуляцію запальних сигнальних шляхів і пригнічення росту патогенних мікроорганізмів. Це підтверджує доцільність використання поліфенольних сполук у складі гідрогелевих систем для догляду за шкірою та лікування поверхневих уражень.

Таким чином, літературний огляд підтверджує наукову та практичну обґрунтованість поєднання гідрогелевих матриць і поліфенолів у складі біоактивних систем локальної дії. Отримані узагальнення створюють теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень, спрямованих на розробку та оптимізацію гідрогелевих систем з поліфенолами, що і визначає актуальність та логіку подальших етапів дисертаційної роботи.

АНОТАЦІЯ

У розділі узагальнено сучасні теоретичні підходи до створення гідрогелевих систем з поліфенолами як перспективних біоактивних матеріалів для біомедичних і дерматологічних застосувань. Проаналізовано основні тенденції розвитку гідрогелів на основі природних та синтетичних полімерів, що забезпечують біосумісність, контрольоване вивільнення активних речовин і адаптивні фізико-хімічні властивості. Розглянуто класифікацію поліфенольних сполук, їх фізико-хімічні характеристики, біологічну активність та сучасні методи одержання з рослинної сировини. Особливу увагу приділено механізмам антиоксидантної, антисептичної та протизапальної дії поліфенолів, що зумовлюють їх високу ефективність у складі гідрогелевих носіїв. Проаналізовано наукові дані європейських, американських та українських досліджень щодо інкапсуляції поліфенолів у гідрогелеві матриці.

Показано переваги використання гідрогелевих систем для підвищення стабільності та біодоступності поліфенольних сполук. Обґрунтовано перспективність застосування таких систем у косметології, дерматології та регенеративній медицині. Отримані узагальнення створюють теоретичну основу для подальших експериментальних досліджень.

Література

1. Ahmed E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 105–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
2. Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 65. P. 252–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>
3. Peppas N. A., Hilt J. Z., Khademhosseini A., Langer R. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials*. 2006. Vol. 18, No. 11. P. 1345–1360. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
4. Hoffman A. S. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012. Vol. 64. P. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010>
5. Sannino A., Madaghiele M., Demitri C. Development and characterization of cellulose-based hydrogels for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009. Vol. 114, No. 6. P. 3662–3669. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.30956>
6. Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.
7. Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2004. Vol. 79, No. 5. P. 727–747. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
8. Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2010. Vol. 64 (Suppl. 3). P. S112–S120. DOI: <https://doi.org/10.1038/ejcn.2010.221>
9. Middleton E., Kandaswami C., Theoharides T. C. The effects of plant flavonoids on mammalian cells. *Pharmacological Reviews*. 2000. Vol. 52, No. 4. P. 673–751.
10. Pandey K. B., Rizvi S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2009. Article ID 897484. DOI: [10.4161/oxim.2.5.9498](https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498)

11. Guedes B. N., Andreani T., Oliveira M. B. P. P., Fathi F., Souto E. B. Eco-Friendly Hydrogels Loading Polyphenols-Composed Biomimetic Micelles for Topical Administration of Resveratrol and Rutin. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10 (1). P. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10010008>
12. Tian R., Wen Y., Zhang Z. et al. Recent advances in smart hydrogels derived from polysaccharides and their applications for wound dressing and healing. DOI: [10.1016/j.biomaterials.2025.123134](https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2025.123134)
13. Yuhui Li, Guoyou Huang, Xiaohui Zhang, Baoqiang Li, Yongmei Chen, Tingli Lu, Tian Jian Lu, Feng Xu. Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications. *Adv Funct Mater*. 2013. № 23 (6). P. 660–672. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201201708>
14. Wang W., Dai J., Huang Y., Li X., Yang J., Zheng Y., Shi X.. Extracellular matrix mimicking dynamic interpenetrating network hydrogel for skin tissue engineering. *Chem. Eng. J*. 2023. № 457. Article 141362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141362>
15. Sen C. K. Human wounds and its burden: an updated compendium of estimates. *Adv. Wound Care*. 2019. № 8 (2). P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1089/wound.2019.0946>
16. Norahan M. H., Pedroza-González S. C., Sánchez-Salazar M. G., Álvarez M. M., de Santiago G. T. Structural and biological engineering of 3D hydrogels for wound healing. *Bioact. Mater*. 2023. 24. P. 197–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.11.019>
17. Shao Z., Yin T., Jiang J., He Y., Xiang T., Zhou S. Wound micro-environment self-adaptive hydrogel with efficient angiogenesis for promoting diabetic wound healing. *Bioact. Mater*. 2023. Vol. 20. P. 561–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.06.018>
18. Fang Y., Nie T., Li G., Wang L., Du J., Wu J. Multifunctional antibiotic hydrogel doped with antioxidative lycopene-based liposome for accelerative diabetic wound healing. *Chem. Eng. J*. 2024. № 480. Article 147930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147930>

Information about the author:

Duk Nazarii Mykhailovych,

Postgraduate Student in Biotechnology and Bioengineering (G21),
Department of Biotechnology and Bioengineering,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepan Bandera street, Lviv, 79000, Ukraine