

УДК 615.46:616-001.17-085
DOI <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2025-1-8>

Олена РОІК

кандидат фармацевтичних наук, доцент кафедри промислової фармації, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, alena_08@ukr.net

ORCID: 0000-0002-5988-6577

Євгеній СУБОТА

аспірант кафедри промислової фармації, факультет хімічних і біофармацевтичних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, subota.yevgeniy@gmail.com

ORCID: 0009-0000-5167-0491

Микола ШУМЕЙКО

кандидат фармацевтичних наук, доцент кафедри аптечної та промислової технології ліків, фармацевтичний факультет, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, 1980xl@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1069-7652

ІННОВАЦІЙНІ ГІДРОГЕЛІВІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ОПІКОВИХ РАН ІЗ ПРОТИЗАПАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Опікові ураження шкіри – це серйозна медична й соціальна проблема, що потребує ефективного лікування, здатного одночасно контролювати запальний процес, пригнічувати мікробне забруднення та стимулювати регенерацію тканин.

Мета цього дослідження – провести аналіз ринку сучасних інноваційних гідрогелевих композицій, що застосовуються для лікування опікових ран, із фокусом на їхніх протизапальних властивостях, механізмах дії, ефективності та потенційних обмеженнях у клінічній практиці. Особливий акцент зроблено на можливості впровадження інноваційних гідрогелевих перев'язувальних матеріалів із вираженими антимікробними, протизапальними та регенеративними властивостями.

Матеріали та методи. Це дослідження ґрунтується на аналізі наукових публікацій, що містяться в базах даних PubMed, Scopus та Web of Science, з 2020 по 2025 рік. Під час відбору літературних джерел використовували такі ключові слова та їхні комбінації: «опікові рани», «гідрогелі», «наночастинки», «антимікробні агенти», «полімерні матеріали». До аналізу було залучено наукові праці, що висвітлюють питання ефективності гідрогелевих композицій у терапії опікових ушкоджень, зокрема результати лабораторних експериментів (in vitro), доклінічних випробувань на лабораторних тваринах (in vivo) та клінічних досліджень (фази I–III). Проаналізовано публікації, які розкривають властивості гідрогелевих матеріалів із вираженою антимікробною, протизапальною та регенеративною дією, а також такі, що вивчають механізми взаємодії наночастинок металів (Ag, Zn, Ti, Cu) із полімерними структурами у складі перев'язувальних матеріалів. Особливу увагу приділено дослідженням порівняння ефективності використання гідрогелевих композицій та традиційних методів лікування опікових ран (антибактеріальні мазі, силіконові пов'язки та колагенові покриття). Оцінювання результатів ґрунтувалося на застосуванні гістологічних, мікробіологічних та молекулярно-біологічних методів аналізу.

Результати. Гідрогелеві композиції демонструють високу ефективність у лікуванні опікових ран завдяки здатності підтримувати вологе середовище, знижувати рівень цитокінів та пригнічувати ріст патогенних бактерій. Інтеграція наночастинок срібла (Ag), цинку (Zn) та титану (Ti) забезпечує виражений антимікробний ефект, тоді як полімерні наночастинки покращують біодоступність активних компонентів та їх пролонговане вивільнення. Додаткове введення факторів росту, поліфенолів та анальгетичних речовин сприяє швидшій регенерації тканин та зменшенню больового синдрому.

Висновки. Розробка гідрогелевих перев'язувальних матеріалів із комбінованими антимікробними, протизапальними та регенеративними властивостями є перспективним напрямом у сучасній медицині. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію складу, біосумісності та стабільності розроблених експериментальних гідрогелевих композицій для їх подальшого широкого впровадження в клінічну практику.

Ключові слова: опікові рани, гідрогель, наночастинки, антимікробні компоненти, регенерація, полімерні матеріали, активні фармацевтичні інгредієнти (АФІ).

Olena Roik, Yevgeniy Subota, Mykola Shumeiko. INNOVATIVE HYDROGEL COMPOSITIONS FOR THE TREATMENT OF BURN WOUNDS WITH ANTI-INFLAMMATORY PROPERTIES: A LITERATURE REVIEW

Burn injuries of the skin are a serious medical and social problem that requires effective treatment that can simultaneously control the inflammatory process, inhibit microbial contamination and stimulate tissue regeneration.

The purpose of this study is to analyse the market for modern innovative hydrogel formulations used to treat burn wounds, with a focus on their anti-inflammatory properties, mechanisms of action, efficacy and potential limitations in clinical practice. Particular emphasis is placed on the possibility of introducing innovative hydrogel wound dressings with pronounced antimicrobial, anti-inflammatory and regenerative properties.

Materials and methods. This study is based on an analysis of scientific publications contained in the PubMed, Scopus, and Web of Science databases from 2020 to 2025. The following keywords and their combinations were used to select the literature: «burn wounds», «hydrogels», «nanoparticles», «antimicrobial agents», «polymeric materials». The analysis involved scientific papers covering the effectiveness of hydrogel compositions in the treatment of burn injuries, including the results of laboratory experiments (in vitro), preclinical tests on laboratory animals (in vivo) and clinical trials (phases I-III). The article analyses publications that reveal the properties of hydrogel materials with a pronounced antimicrobial, anti-inflammatory and regenerative effect, as well as those that study the mechanisms of interaction of metal nanoparticles (Ag, Zn, Ti, Cu) with polymeric structures in the composition of dressings. Particular attention is paid to studies comparing the effectiveness of hydrogel compositions and traditional methods of treating burn wounds (antibacterial ointments, silicone dressings and collagen coatings). The results were evaluated using histological, microbiological and molecular biological methods of analysis.

Results. Hydrogel compositions demonstrate high efficiency in the treatment of burn wounds due to their ability to maintain a moist environment, reduce cytokine levels and inhibit the growth of pathogenic bacteria. The integration of silver (Ag), zinc (Zn) and titanium (Ti) nanoparticles provides a pronounced antimicrobial effect, while polymeric nanoparticles improve the bioavailability of active ingredients and their prolonged release. The additional introduction of growth factors, polyphenols and analgesic substances promotes faster tissue regeneration and pain relief.

Conclusions. The development of hydrogel wound dressings with combined antimicrobial, anti-inflammatory and regenerative properties is a promising area in modern medicine. Further research should be aimed at optimising the composition, biocompatibility and stability of the developed experimental hydrogel compositions for their further widespread implementation in clinical practice.

Key words: burn wounds, hydrogels, nanoparticles, antimicrobial agents, regeneration, polymeric materials, active pharmaceutical ingredients (API).

Постановка проблеми. Опікові ураження шкіри – це одна з найбільш складних медичних проблем у галузі охорони здоров'я, що характеризуються високими показниками смертності, тривалими періодами госпіталізації та значними економічними витратами.

Ефективне лікування таких уражень передбачає не лише прискорення регенерації тканин, а й контроль запального процесу, оскільки надмірне або тривале запалення може спричиняти хронічні виразки, гіпертрофічні рубці та контрактури, що значно погіршують функціональні та естетичні результати загоєння [4, 9].

Традиційні методи лікування опікових ран, зокрема застосування мазей з антибіотиками, силіконових покриттів та колагенових пов'язок, не завжди забезпечують оптимальні умови для відновлення тканин. Дефіцит ефективних засобів, здатних одночасно контролювати запальний процес, пригнічувати мікробне забруднення та підтримувати оптимальне середовище для регенерації, підкреслює нагальну потребу у створенні нових терапевтичних підходів [15].

У цьому контексті гідрогелеві композиції з протизапальними властивостями розглядаються як перспективний клас біоматеріалів, що поєднують здатність до утримання вологи, створення сприятливого середовища для клітинної проліферації та інтеграцію активних молекул, здатних моделювати запальний процес [26]. Інтеграція АФІ, наночастинок металів, полімерних носіїв та протизапальних агентів у гідрогелеві системи сприяє значному розширенню їх функціональних можливостей, зокрема контрольованому вивільненню діючих речовин, антиоксидантному захисту й покращенню механічних властивостей матеріалу. Таким чином, наукова проблематика полягає у створенні та впровадженні таких інноваційних гідрогелевих

засобів, які забезпечували б комплексний вплив на процеси загоєння – від контролю запальної відповіді та антимікробної активності до стимуляції регенерації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження в галузі біомедичних матеріалів та фармацевтичних композицій демонструють значні досягнення у створенні гідрогелевих перев'язувальних засобів для лікування опікових ран [2, 5]. Інноваційні гідрогелеві композиції на основі ацетату хітозану демонструють протизапальні, сорбційні та антибактеріальні властивості, що сприяють зменшенню ексудації, пригніченню патогенної мікрофлори та прискоренню грануляції й епітелізації опікових ран [6]. Результати досліджень також підтвердили ефективність лікарського засобу (ЛЗ) у формі гелю на основі екстракту шавлії лікарської (*Salvia officinalis*) для лікування опікових ран. Розроблений ЛЗ демонструє виражені протизапальні та антимікробні властивості, що сприяють швидшому загоєнню опікових уражень шкіри [4].

Варто зазначити, що завдяки вмісту альгінату натрію гідрогелеві пов'язки є унікальними серед сучасних перев'язувальних засобів, оскільки поєднують ранозагоювальні та регенеративні властивості, сприяючи ефективному відновленню тканин [3].

Дослідження, проведені науковцями О. Шматенко, Л. Давтян, Т. Приходько та ін. [7] показали, що гідрофільні поліуретанові плівки та гідрогелі нового покоління створюють вологе середовище, абсорбують ексудат, знижують больові відчуття й прискорюють загоєння ран. Завдяки їхнім унікальним властивостям їх можна використовувати на всіх етапах лікування ранового процесу. Актуальними є ЛЗ до складу яких входять в якості АФІ новокаїну гідрохлорид, фурацилін та метилурацил.

Згідно з дослідженням О. Капусти (О. Kapusta) та ін. [17], гідрогелі, збагачені наночастинами срібла,

забезпечують високу антибактеріальну активність проти *Staphylococcus aureus* та *Pseudomonas aeruginosa*, що є основними патогенними мікроорганізмами при інфекційних ускладненнях опікових ран. Використання часточок срібла в наноформі сприяє мінімізації токсичного впливу на здорові клітини, водночас ефективно пригнічуючи ріст патогенної мікрофлори. Крім того, такі гідрогелі композиції володіють пролонгованою дією, забезпечуючи антимікробну активність упродовж тривалого перебування на рані, що в свою чергу, сприяє зменшенню потреби в частих перев'язках.

У дослідженнях С. Мусял (С. Musial) та ін. [23] було продемонстровано застосування поліфенолів та екстрактів рослинного походження, таких як куркумін і катехіни зеленого чаю, які володіють вираженими протизапальними та антиоксидантними властивостями, та є ще одним перспективним напрямком. Результати показали, що гідрогелі, до складу яких входять біологічно активні речовини (БАР), зменшують рівень прозапальних цитокінів (IL-6, TNF- α) та стимулюють проліферацію фібробластів, що сприяє швидкій регенерації тканин.

Науковці Г. Олтяну (G. Olteanu), С. М. Някшу (S. M. Neacșu), Ф. А. Джоїца (F. A. Joita), А. М. Мусук (A. M. Musuc), Е. К. Лупу (E. C. Lupu), К. Б. Іоніце-Миндрикан (C. B. Ioniță-Mîndrican), Д. Лупуляса (D. Lupuliasa), М. Мітітелу (M. Mititelu) [24] стверджують, що гідрогелі, до складу яких входить гіалуронова кислота, є важливим компонентом сучасних розробок, оскільки вони сприяють підтримці вологого середовища ранової поверхні та стимулюють ангіогенез. До того ж їх використання значно скорочує час загоєння ран в порівнянні з традиційними перев'язувальними засобами [20].

Попри значний прогрес у розробці гідрогелевих перев'язувальних засобів, залишається низка питань, що обмежують їхню клінічну ефективність. Зокрема, більшість стандартних виробів на основі гідрогелів не забезпечують достатньої антимікробної активності, що підвищує ризик інфекційних ускладнень, а введення до їх складу антибіотиків, може призвести до розвитку бактеріальної резистентності. Крім того, тривале запалення уповільнює регенерацію та сприяє утворенню рубцевої тканини, а біоактивні сполуки швидко деградують у рановому середовищі, знижуючи їх терапевтичну ефективність. Іншою проблемою є недостатня механічна стабільність гідрогелів для лікування глибоких опікових уражень, що обмежує їх застосування в складних випадках [7].

Ця публікація має на меті провести аналіз сучасних стратегій розробки інноваційних гідрогелевих композицій, з використання в якості носіїв основи різних полімерних композицій з наночастинками оксидів металів, біологічно-активних речовин

(БАР) та АФІ. Розглянуто перспективи розробки засобів із пролонгованою антимікробною дією, здатних ефективно пригнічувати запальні процеси та стимулювати регенерацію тканин, а також шляхи покращення механічної стабільності гідрогелів для їх застосування під час лікування важких опікових уражень.

Мета статті – аналіз сучасних інноваційних гідрогелевих композицій, що застосовуються для лікування опікових ран, із фокусом на їхні протизапальні, антимікробні та регенеративні властивості, механізми дії, ефективність та потенційні обмеження в клінічній практиці.

Матеріали та методи. Дослідження ґрунтується на аналізі наукових публікацій, що містяться в вітчизняних фахових виданнях, в наукометричних базах даних PubMed, Scopus та Web of Science, з 2020 по 2025 рік та інтернет-ресурсів. Під час відбору літературних джерел використовували такі ключові слова та їхні комбінації: «опікові рани», «опіки», «гідрогель», «наночастинки», «антимікробні агенти», «полімерні матеріали»

У процесі аналізу було оцінено ефективність гідрогелевих композицій, призначених для лікування опікових ран, зокрема через дослідження *in vitro*, *in vivo* та клінічні випробування (фази I–III). Розглянуто наукові публікації, що містять аналіз гідрогелевих матеріалів із антимікробними, протизапальними та регенеративними властивостями. Окрім того, вивчено роботи, які оцінюють механізми дії наночастинок металів (Ag, Zn, Ti, Cu) і полімерних носіїв у складі перев'язувальних засобів.

Для аналізу було відібрано порівняльні дослідження, що оцінюють ефективність гідрогелевих композицій порівняно з м'якими лікарськими формами (МЛФ), зокрема мазями, які містять у своєму складі антибіотики, а також силіконові покриття й колагенові пов'язки. У межах досліджень застосовувалися гістологічні, мікробіологічні та молекулярно-біологічні методи оцінювання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у розробці гідрогелевих перев'язувальних матеріалів, низка питань залишається недостатньо вивченою, що обмежує властиву їм клінічну ефективність у лікуванні опікових ран. Зокрема, потребують подальшого дослідження механізми та ефективність антимікробної дії гідрогелів, особливо тривалість і механізми антимікробної дії композицій, до складу яких входять наночастинки срібла, цинку. Важливим залишається питання впливу протизапальних агентів (поліфенолів, куркуміну, катехінів, антимікробних пептидів) на регуляцію запального процесу та баланс про- й протизапальних факторів. Окрім цього, недостатньо вивчено механічні характеристики гідрогелевих матеріалів, що впливає на

їхню стабільність та ефективність у лікуванні глибоких опікових уражень.

У статті досліджено сучасні підходи до створення інноваційних гідрогелевих композицій із вираженими ефективними антимікробними, протизапальними та регенеративними властивостями. Зокрема, проаналізовано методи модифікації гідрогелів за допомогою наночастинок металів, полімерних каркасів, АФІ, БАР, що можуть впливати на рівень мікробного обмінення, процеси запалення та загоєння тканин. Розглянуто можливості пролонгованого вивільнення активних компонентів і оптимізації механічної міцності гідрогелів, що є основними факторами для підвищення їх терапевтичної ефективності.

Виклад основного матеріалу. Гідрогелі – це тривимірні полімерні сітки, здатні утримувати значну кількість води (рис. 1).

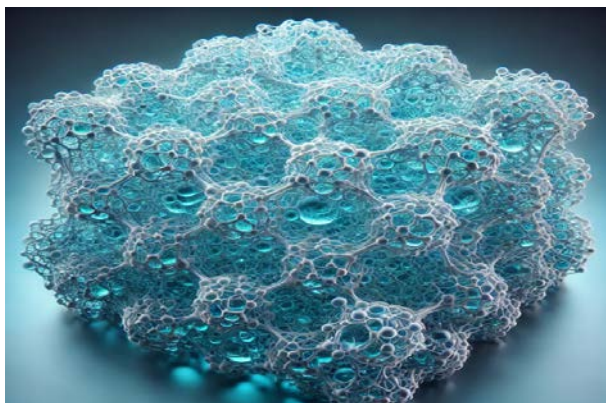


Рис. 1. Тривимірна полімерна модель гідрогелю

Примітка. Зображення згенеровано за допомогою штучного інтелекту ChatGPT (DALL·E)"

Висока гідрофільність і біосумісність цих матеріалів створюють сприятливі умови для проліферації та міграції клітин, що є ключовими процесами для ефективного загоєння ран. Полімерні матеріали слугують основою для виготовлення гідрогелів завдяки своїм різноманітним властивостям, таким як біосумісність, здатність до біологічного розкладу та екологічність. Гідрогелі, що базуються на натуральних полімерних матеріалах, таких як альгінат, крохмаль, целюлоза, хітозан, желатин, колаген, гіалуронова кислота тощо, демонструють високу здатність до розкладу, відзначаються біосумісністю, відсутністю токсичних продуктів розпаду, стабільними механічними властивостями та є доступними в достатній кількості в природному середовищі [8]. Використання полімерних основ забезпечує широке застосування цих матеріалів у медичній та фармацевтичній галузях, зокрема як носії для доставки лікарських засобів, при створенні перев'язувальних матеріалів для лікування ран та опіків, субстратів для культури клітин,

а також каркасів для регенерації тканин та інших медичних застосувань [18, 34].

Гідрогелі на основі природних полімерів зазвичай мають високу біосумісність завдяки властивостям самих природних полімерів. Однак для більшості таких гідрогелів обмежена в'язкість і недостатні механічні властивості є основними перешкодами для їх застосування. Тому для покращення механічних характеристик гідрогелів необхідно застосовувати методи хімічного та фізичного «зшивання», а також комбінація з іншими синтетичними чи напівсинтетичними полімерами або неорганічними частинками [35].

Сучасні гідрогелеві композиції можуть містити в якості активних компонентів АФІ (антибіотики, анальгетики, стероїди), БАР (пептиди, фактори росту), та протизапальні та протимікробні компоненти (наночастинки металів, рослинні екстракти, прополіс, тощо), які забезпечують протизапальний, антимікробний та регенеративний ефекти [22].

Відомо, що гідрогелеві пов'язки ефективно знижують температуру опікових ран через випаровування тепла та стабільне охолодження, що робить їх важливим вибором швидкої невідкладної допомоги, особливо в умовах обмеженого доступу до чистої води [10].

Гідрогелеві засоби здатні забезпечувати знеболювальний ефект та запобігати інфікуванню ран. Вони активно використовуються в екстреній медицині, зокрема у військово-польових умовах та під час надання невідкладної допомоги. Завдяки своїй універсальності такі пов'язки можна застосовувати на різних ділянках тіла, зокрема на обличчі та руках, без ризику розвитку гіпотермії, що робить їх безпечними навіть для використання в педіатрії [10].

Гідрогелеві покриття класифікують за складом полімерної основи (природні та штучні), а також за наявністю активних компонентів (нейтральні та біологічно активні). Натуральні гідрогелі створюються на основі біополімерів, таких як хітозан, целюлоза, альгінати, декстран або гіалуронова кислота, тоді як штучні варіанти виробляють із полімерів, зокрема поліакриламід, поліетиленоксиду та полівінілпіролідону [35]. До активних гідрогелів можуть додавати різні сполуки, зокрема солі амонію, наночастинки срібла, іони цинку, регулятори клітинного росту, цитокіни, а також природні компоненти, такі як екстракти лікарських рослин. Завдяки особливій внутрішній структурі гідрогелів, активні речовини рівномірно розподіляються в матеріалі, що сприяє швидкій регенерації пошкоджених тканин. Дослідження на лабораторних тваринах підтвердили їхню високу сумісність із біологічними тканинами, низьку ймовірність побічних реакцій і здатність значно прискорювати процес загоєння опікових уражень [10].

Варто зазначити, що лікування опікових ран часто ускладнюється розвитком інфекцій, що знижує ефективність стандартних гідрогелевих пов'язок, які підтримують вологе середовище. Використання в якості активів антибіотиків, факторів росту, біологічно активних молекул та стовбурових клітин, сприяє швидкій регенерації пошкоджених тканин. Оскільки опіки можуть виникати на різних ділянках тіла, місцеве зовнішнє використання гідрогелевих засобів є ефективним способом місцевої та загальної терапії, який не потребує інвазивних маніпуляцій та забезпечує комфорт для пацієнта. Завдяки біологічній сумісності, високій вологоутримуючій здатності та безпечності, гідрогелі слугують ефективними носіями для доставлення медикаментів через шкіру. Їх структура сприяє регулюванню швидкості вивільнення активних речовин, що залежить від ступеня зшивання полімерних ланцюгів, пористості матеріалу та змін у зовнішньому середовищі, таких як температура, що значно розширює їхнє застосування в лікуванні ран [13].

Інфікування опікових ран є найпоширенішим ускладненням ушкоджень, зумовленим бактеріями роду *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* та його штамом метицилін-резистентний золотистий стафілокок (MRSA). Інфекція значно сповільнює процес загоєння ран і може стати смертельно небезпечною для постраждалих. Хоча звичайні гідрогелі утворюють фізичний бар'єр від патогенів, вони не здатні повністю запобігти їхньому проникненню та розмноженню, що спричинило необхідність розробки інноваційних гідрогелевих засобів з антимікробною активністю. Найпоширенішим підходом стало введення антибіотиків у гідрогелеву матрицю для поступового вивільнення препаратів, спрямованих на знищення або пригнічення росту бактерій. Проте через ризик розвитку стійкості до антибіотиків дослідники почали застосовувати альтернативні антимікробні компоненти, зокрема іони металів (срібло, цинк, мідь) та речовини природного походження, такі як ефірні олії, фенольні сполуки та біоактивні екстракти, що володіють протизапальними, протигрибковими та антиоксидантними властивостями.

Застосування срібловмісних гідрогелів забезпечує широкий антимікробний ефект завдяки контрольованому вивільненню іонів Ag^+ , що пригнічує ріст патогенних бактерій, зокрема *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* та *Candida albicans*. Подібним чином додавання цинку до желатинової основи сприяє боротьбі з *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus*, змінюючи проникність бактеріальної мембрани та підвищуючи рівень внутрішньоклітинних активних форм кисню. Дослідження також підтвердили ефективність гідрогелів,

збагачених галієм, який витісняє одновалентні катіони, порушуючи життєві функції мікроорганізмів і сприяючи розпаду біоплівки. Окрім металів, до складу гідрогелів активно додають групи природних речовин, зокрема фенольну сполуку тимол, яка демонструє потужну антимікробну активність і пришвидшує закриття опікових ран [27].

Новітні дослідження зосереджені на застосуванні антимікробних пептидів (AMPs), які ефективно борються з резистентними до антибіотиків бактеріями та мають менший ризик втрати ефективності. Наприклад, природний пептид Jelleine-1, вбудований у структуру гідрогелю, показав високу біосумісність і антимікробний ефект, що значно покращило загоєння інфікованих ран. Використання гідрогелів із контрольованим вивільненням активних агентів відкриває нові перспективи у створенні ефективних перев'язувальних матеріалів для лікування опікових ушкоджень [13].

Враховуючи те, що процес загоєння опікових ран часто супроводжується надмірним запаленням, що сповільнює регенерацію тканин, розробка гідрогелевих композицій з протизапальними властивостями є важливим завданням. Використання БАР, таких як вітаміни, куркумін, поліфеноли та природні пептиди, сприяють швидшому відновленню ушкоджень.

Окрім того, антиоксидантні компоненти, які додаються до складу гідрогелевої основи за допомогою простих комбінацій, модифікацій і полімеризацій, здатні поглинати надмірну кількість активних форм кисню (АФК) у ранах та ефективно сприяти їх загоєнню [32].

Зокрема, до спеціального адгезивного гідрогелю на основі тіоктової та фітинової кислот додали танінову кислоту, яка має антиоксидантну та протизапальну дію. Цей засіб ефективно зменшує запалення та має виражений антимікробний ефект у лікуванні ран, спричинених метицилін-резистентним золотистим стафілококом (MRSA, Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*) [32].

Дослідження продемонстрували, що пептиди, виділені з перлового порошку, володіють вираженими антиоксидантними та антибактеріальними властивостями [33].

Liю та співавтори розробили гідрогелі з антиоксидантними властивостями, насичені перловим пептидом, з використанням селеновмісних блок-функціоналізованих полімерів поліетиленгліколю (ПЕГ)/поліпропіленгліколю [21].

Використання гідрогелів із полімерною основою, що містить селенові зв'язки, сприяло захисту клітин шкіри від окисного стресу та покращувало їх життєздатність. Нанесення гідрогелевих пов'язок сприяло активному оновленню епітелію, стимулювало утворення нової сполучної тканини

та покращувало процеси кровопостачання у зоні ушкодження [14].

Процес відновлення пошкоджених тканин є складним біологічним механізмом, у якому беруть участь різні типи клітин, фактори росту, хемокини та цитокіни. Фактори росту є важливими молекулами, що контролюють процеси клітинного поділу, міграції та диференціації, сприяючи загоєнню ран. У випадку хронічних та опікових уражень природні фактори росту швидко руйнуються, що сповільнює регенерацію. З метою подолання цієї проблеми розглядається можливість введення додаткових факторів росту, проте їхня дія обмежена через нестабільність та швидке вимивання з ранової поверхні. Полімерні гідрогелі, які сприяють поступовому вивільненню цих активних речовин та їх захисту від деградації, показують позитивні результати в прискоренні відновлення тканин, водночас зменшуючи потребу в частих медичних маніпуляціях [29].

До основних факторів росту, що відіграють роль у загоєнні гострих та довготривалих ран, належать епідермальний (EGF), фактор росту фібробластів (FGF), трансформаційний (TGF- β), судинний ендотеліальний та тромбоцитарний. Дослідження довели, що введення EGF та bFGF до складу гідрогелевих перев'язувальних матеріалів значно покращує процес регенерації при опіках. Зокрема, bFGF активує ангіогенез, сприяє формуванню сполучної тканини та стимулює епітелізацію шляхом збільшення проліферації клітин фібробластів та ендотелію. У дослідях на тваринах використання гідрогелю, що містив комбінацію колагену та срібної сульфадіазинової солі разом із bFGF, сприяло зменшенню запальної реакції та прискорювало процеси регенерації. В іншому експерименті було доведено, що гідрогель на основі полімеру, що містив ванкомицинові наночастинки, забезпечував поступове вивільнення EGF, і це покращувало проліферацію клітин, сприяло утворенню нових капілярів і стимулювало вироблення TGF- β в моделі інфікованих опікових ран, значно перевищуючи ефективність звичайних методів лікування [19].

Наночастинки є об'єктом інтенсивних досліджень завдяки їх потенціалу покращувати транспортування лікарських засобів та біологічно активних сполук через шкірний бар'єр під час терапії ран. Через свій мікроскопічний розмір (1–100 нм) вони сприяють глибокому проникненню засобу у пошкоджені тканини, забезпечуючи їх ефективну дію. Одним з основних факторів успішного лікування опікових ран є підтримання сталої концентрації та активності терапевтичних агентів у місці ураження. Хоча гідрогелеві пов'язки здатні регулювати вивільнення лікарських засобів, вони характеризуються швидким початковим викидом активних компонентів. Інтеграція наночастинок

у гідрогелеві системи сприяє досягненню контрольованого й пролонгованого вивільнення препаратів, водночас захищаючи їх від деградації в середовищі рани, що збільшує тривалість їхньої дії. Такий підхід не лише запобігає інфекціям, а й прискорює процеси епітелізації, роблячи нанотехнології перспективним інструментом у сучасному лікуванні опікових пошкоджень.

Металеві та металоксидні наночастинки широко вивчаються через їхню здатність пришвидшувати загоєння опікових ран завдяки вираженій антимікробній дії. Додавання срібних наночастинок (AgNPs) у гідрогелеві пов'язки дає можливість усунути обмеження, пов'язані з використанням іонів срібла, зокрема їхню швидку втрату ефективності та можливу токсичність. AgNPs забезпечують пролонговане контрольоване вивільнення срібла в ранову тканину, а їхній незначний розмір сприяє глибокому проникненню в зону ураження. Окрім цього, вони мають велику площу поверхні, що сприяє поступовому вивільненню іонів срібла всередині клітин, посилюючи їхній антимікробний ефект [25].

Дослідження показали, що гідрогелі з AgNPs ефективно прискорюють загоєння опікових ран. Наприклад, у складі гідрогелю на основі оксидованого декстрану (ODex), гіалуронової кислоти (HA-ADH) та четвертинного хітозану, наночастинки срібла значно покращили загоєння ран, інфікованих *Pseudomonas aeruginosa*, у порівнянні з комерційними пов'язками Aquacel Ag. Завдяки антимікробним властивостям AgNPs та взаємодії з хітозаном цей гідрогель сприяв швидшому загоєнню, зменшенню запалення та організованішому формуванню колагену. Окрім срібла, металоксидні наночастинки також можуть бути ефективно використані для лікування інфікованих ран. Наприклад, наночастинки діоксиду титану (TiO₂ NPs), введені до желатинового гідрогелю (TNG), продемонстрували високу антимікробну активність, перевищуючи ефективність традиційних засобів. У дослідженнях на тваринах TNG не лише пригнічував ріст патогенів, а й сприяв активації ангіогенезу, проліферації фібробластів та формуванню грануляційної тканини, що сприяло швидшому загоєнню глибоких опікових ран [11].

Ліпідні наночастинки, зокрема ліпосоми, наноемульсії та ліпідні краплі, часто використовуються в гідрогелях для лікування опіків. Ліпосоми складаються з одно- або багатопшарових ліпідних мембран, що відокремлюють водну фазу, і це сприяє їхньому ефективному інкапсулюванню як гідрофільних, так і ліпофільних лікарських засобів. Завдяки високій здатності до проникнення та ретенції в зоні ураження вони забезпечують контрольоване вивільнення препаратів, підвищуючи їхню біостабільність і терапевтичну ефективність.

Дослідження підтвердили, що наноліпосоми розміром ~ 150 нм можуть проникати в глибші шари шкіри, що робить їх перспективними для лікування тяжких опіків, які зачіпають не лише епідерміс, а й дерму та гіподерму. Крім того, ліпосомні гідрогелі створюють вологе середовище в зоні ушкодження, що сприяє прискореному відновленню тканин.

Наприклад, тритерпеноїдну сполуку азіатикозид, відому своїми протизапальними й антиоксидантними властивостями, було інкапсульовано в ліпосоми для покращення проникності крізь шкіру. Оскільки азіатикозид має обмежену здатність долати епідермальний бар'єр, його введення до ліпосомного комплексу сприяло значному покращенню біодоступності. Стабільність ліпосоми підвищилася після введення в гідрогелеву матрицю, створену на основі метакрилатного колагену та четвертинного хітозану. Дослідження показали, що такий гідрогель покращував міграцію клітин та стимулював формування нових судин. Для посилення антибактеріального ефекту в гідрогель додавали наночастинки срібла, що ще більше підвищувало його ефективність [31].

Наноемульсії (NEs) є стабільними колоїдними системами, що містять водну та масляну фази, які утримуються разом завдяки сурфактантам. Через свій малий розмір крапель, високу гідрофільність та гетерогенність NEs є ефективними носіями для транспортування біологічно активних сполук, таких як нестероїдні протизапальні засоби, антиоксиданти та навіть протипухлинні препарати. Однак через низьку в'язкість NEs важко застосовувати у формі мазей чи гелів [27]. З огляду на це їхнє додавання до гідрогелевих матриць забезпечує оптимальну стабільність, контрольоване вивільнення активних компонентів та легкість нанесення. Такий підхід створює вологе середовище, сприяє поступовій абсорбції лікарських речовин та полегшує процес їх застосування та виведення. Розроблення наноемульгелю, що містив куркумін та ресвератрол – поліфенольні сполуки, відомі своїми антибактеріальними та протизапальними властивостями, стало одним із перспективних рішень інноваційної медицини. Проте, фармакокінетичні обмеження, пов'язані з низькою розчинністю у воді та обмеженим проникненням через шкіру перлиних пептидів, перешкоджали їхньому широкому практичному застосуванню. Для подолання цієї проблеми куркумін та ресвератрол було введено до наноемульсії, інтегрованої в гідрогель на основі карбополу. Дослідження підтвердили, що такий підхід забезпечує значну затримку активних речовин у шкірі навіть через 48 годин після нанесення, що свідчить про його високу ефективність у лікуванні опікових ран [30].

Таким чином, використання металевих, металоксидних та ліпідних наночастинок у складі гідрогелевих пов'язок є перспективним напрямом у сучасній регенеративній медицині, що поєднує антимікробні, протизапальні та ранозагоювальні властивості в одному терапевтичному засобі.

Полімерні наночастинки, які активно використовуються для транспортування медикаментів та біологічно активних речовин, забезпечують їхню стабільність і поступове вивільнення. Вони можуть створюватися з натуральних або синтетичних полімерів, що мають високу біосумісність і здатність до біорозкладу. Завдяки своїй структурі ці наночастинки можуть одночасно утримувати водорозчинні та жиророзчинні препарати, сприяючи їхньому ефективному доставленню в зону ураження.

Також було продемонстровано, що желатинові наночастинки можуть бути ефективним носієм для мупіроцину – потужного антибактеріального засобу. Наночастинки розміром близько 11 нм було введено до термочутливого гідрогелю на основі полуксамеру (P407) й полівінілового спирту, отримавши назву MLH. Завдяки поступовому вивільненню активної речовини цей гідрогель продемонстрував кращу антибактеріальну ефективність порівняно з традиційною маззю мупіроцину [16].

Окрім природних полімерів, ефективним матеріалом для створення наночастинок є полікапролактон (PCL) – синтетичний полімер, який розщеплюється під дією ферментів, що виділяються бактеріями у вогнищі інфекції. На основі PCL було розроблено наночастинки, чутливі до ліпази, що містять фузидову кислоту (FA-NPs) – природний антибактеріальний засіб, отриманий із *Fusidium coccineum*. Ці наночастинки, розміром близько 225 нм, здатні вивільняти активну речовину у відповідь на наявність ліпази, яку секретують MRSA та інші патогенні бактерії [22].

Гідрогель на основі FA-NPs показав значну ефективність. Попри низьку проникність через шкірний бар'єр в порівнянні з FA-гідрогелем, FA-NPs забезпечували значно довше утримання препарату на поверхні шкіри. Дослідження на моделях опікових ран, ускладнених MRSA-інфекцією, підтвердило, що гідрогель із FA-NPs забезпечує швидше загоєння, ефективніше скорочення площі ран та зменшення кількості бактерій у вогнищі ураження [12].

Таким чином, наночастинки на основі біорозкладних полімерів відкривають нові можливості в лікуванні інфікованих опікових ран, забезпечуючи контрольоване вивільнення активних речовин, пригнічення бактеріального росту та стимуляцію процесів регенерації тканин.

Подібно до вивчення складної анатомії плечового сплетення, що потребує системного підходу до запам'ятовування, сучасна терапія опікових уражень передбачає використання багатокомпонентних

гідрогелевих композицій із наночастинками та біологічно активними речовинами [1].

На вітчизняному ринку представлений широкий спектр гідрогелевих композицій для лікування ран, опіків, пролежнів та інших ушкоджень шкіри вітчизняного та зарубіжного виробництва, що відрізняються складом, фізико-хімічними властивостями та призначенням.

Серед іноземних виробників варто відзначити компанії Paul Hartmann AG, Johnson & Johnson, Smith & Nephew plc та інші, продукція яких є стандартом якості в медичній практиці. Ці бренди мають багаторічний досвід на ринку медичних виробів і здобули високу довіру серед медичних закладів завдяки надійності та ефективності своєї продукції.

Українські виробники, такі як ТОВ «Зентекс», ТОВ «Ві-Кьюб», ТОВ «УКРТЕХМЕД ІННОВЕЙШН» також пропонують композиції на гідрогелевій основі, що відповідають міжнародним стандартам якості, і є конкурентоспроможними на внутрішньому та зовнішньому ринках. Вони активно використовуються в медичних установах України, а також набирають популярності на зовнішніх ринках завдяки своїй ефективності та високим стандартам виробництва.

Доцільно розглянути таблицю, що узагальнює характеристики різних гідрогелевих композицій, які використовуються для лікування ран і опіків, включаючи їх склад, механізм дії, показання та додаткові властивості.

Таблиця 1

Характеристика гідрогелів для лікування ран і опіків

Торгова назва	Компоненти	Дія	Показання	Додаткові властивості
Burnshield	Вода, екстракт чайного дерева	Охолоджує, знеболює, антисептичний ефект	Опіки I-II ступеня	Гелева структура, зручне нанесення
HydroTac (Hartmann)	Вода, полімери, антисептик	Зволожує, стимулює загоєння	Опіки, хронічні рани	Має губчасту структуру, що утримує вологу
AquaGel	Поліакриламід, вода	Утримує вологу, перешкоджає утворенню струпів	Опіки, хронічні рани	Прозорий, дозволяє контролювати стан рани
GranuGel (ConvaTec)	Карбокси-метилцелюлоза	Стимулює регенерацію, абсорбує ексудат	Опіки II ступеня, хронічні рани	Гелева структура, легко змивається
Suprasorb G (Lohmann & Rauscher)	Гідроколоїд, альгінат	Покращує грануляцію, підтримує вологе середовище	Поверхневі та глибокі опіки	Гнучкий, добре адаптується до форми рани
Intrasite Gel (Smith & Nephew)	Вода, модифіковані полімери	Видаляє некротичні тканини, підтримує вологе середовище	Опіки, виразки, хронічні рани	Має м'яку консистенцію, легко наноситься
Nu-Gel (Systagenix)	Альгинати, карбокси-метилцелюлоза	Очищує рану, сприяє загоєнню	Опіки II ступеня, виразки	Антибактеріальний ефект, абсорбує ексудат
Silvercel Hydro-Alginate (Johnson & Johnson)	Альгинати, наночастинки срібла	Протимікробний ефект, зменшує запалення	Інфіковані опіки	Висока біосумісність, гелеутворення при контакті з ранною
HydroTac Comfort (Hartmann)	Поліуретанова піна, гідрогель	Поглинає ексудат, підтримує вологе середовище	Опіки, пролежні, хронічні рани	Прозора, не прилипає до рани
ОпiкУн® (ТОВ «Зентекс», Україна)	Гідрогель, ПГМГ (полігексаметилен гуанідин)	Знеболює, знижує температуру, має антимікробний ефект	Опіки, пролежні, рани	Антимікробний ефект, швидке загоєння, безболісне застосування
ГІДРОБИНТ №1 (ТОВ «Ві-Кьюб (Україна)	Полімерна сітка, вода, наночастинки срібла	Охолоджує, знеболює, дезінфікує	Опіки, відкриті рани	Прозора, не прилипає до рани, забезпечує захист від інфекцій
Aquior (Львівська політехніка, Україна)	Гідрогелеві альгінатні матеріали	Зволожує, сприяє загоєнню	Рани, опіки	Стерильна, використовується в медичних закладах
АРМА-ГЕЛЬ (ТОВ «УКРТЕХМЕД ІННОВЕЙШН, Україна)	Полімерна хірургічна сітка, новокаїн, фурацилін, наночастинки срібла	Знеболює, дезінфікує, стимулює регенерацію	Опіки різного ступеня, важко загоювані рани	Гнучка структура, не деформується

Висновки. Розробка ефективних методів лікування опікових ран залишається однією з основних проблем сучасної медицини, оскільки традиційні терапевтичні стратегії не завжди забезпечують належні умови для швидкої регенерації тканин та контролю запального процесу. Аналіз наукових досліджень свідчить про високу ефективність гідрогелевих композицій, які можуть слугувати перспективною платформою для доставлення біологічно активних сполук, забезпечуючи антибактеріальний, протизапальний та регенеративний ефекти.

Додавання наночастинок металів, зокрема срібла, цинку та титану, дає можливість суттєво покращити антибактеріальні властивості гідрогелів, знижуючи ризик інфікування ран та забезпечуючи пролонговане вивільнення активних агентів. Використання полімерних наночастинок відкриває можливості для інкапсуляції терапевтичних речовин, що сприяє їхньому контрольованому

вивільненню, підвищує біодоступність та мінімізує небажані побічні реакції. Дослідження свідчать, що полімерні гідрогелі, збагачені факторами росту, сприяють активізації проліферації клітин, ангіогенезу та швидкому загоєнню опікових уражень.

Застосування гідрогелів із додаванням анальгетичних та протизапальних речовин, таких як ібупрофен, лідокаїн та природні поліфеноли, сприяє не лише полегшенню болю, а й зменшенню запальної реакції, що є важливим фактором у комплексній терапії опікових ран. Крім того, перспективним напрямом є створення багатофункціональних гідрогелевих перев'язок, які поєднують протимікробну, знеболювальну та стимулювальну дію.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні біосумісності, регулюванні швидкості деградації та оптимізації складу таких матеріалів для їхнього ефективного застосування в клінічній практиці.

Література:

1. Башкірова Л. М. Використання нових мнемосхем і мнеморечень при викладанні питань ураження пучків плечового сплетення і поєданого ураження периферичних нервів верхніх кінцівок при проведенні занять з лікарями-слухачами передатестаційних циклів з неврології. *Збірник наукових праць співробітників НМАПО імені П. Л. Шупика*. 2016. Вип. 26. С. 541–545.
2. Попадюк О. Я., Кіршак К. Б., Волошин М. М. Покращення профілактики вторинного інфікування опікових ран пацієнтів з термічними ушкодженнями шкірних покривів. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2020. № 1. С. 156–160. DOI: 10.11603/1811-2471.2020.vi.11081
3. Проти опіків «Аквіор»: науковці університету виготовляють гідрогелеві пов'язки, які допомагають. Національний університет «Львівська політехніка». 2025. URL: <https://lpnu.ua/news/proty-opikiv-akvior-naukovtsi-universytetu-vyhotovliaiut-hidrohelevi-poviazky-iaki-dopomahaiut>
4. Роїк О. М., Нікітіна О. О. Обґрунтування складу та технології виробництва гелю для лікування ран та опіків з екстрактном шавлії лікарської. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 6 (11). С. 89–103. DOI: 10.30857/2786-5371.2022.6.9
5. Українські вчені створили нові комбіновані еквіваленти дерми для лікування тяжких опікових ран. Український медичний часопис. 2025. URL: <https://umj.com.ua/uk/novyna-211613-ukrayinski-vcheni-stvorili-novi-kombinovani-ekvivalenti-dermi-dlya-likuvannya-tyazhkih-opikovih-ran>
6. Шигимага В. О. Природні та синтетичні біосумісні покриття опікових ран шкіри: методичні вказівки для самостійного вивчення дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання, спец. 163 «Біомедична інженерія». Харків: Державний біотехнологічний університет, 2023. 18 с.
7. Шматенко О. П., Давтян Л. Л., Приходько Т. В., Кучмістова О. Ф., Тарасенко В. О., Козіко Н. О., Вороненко Д. В., Осьодло В. В. Сучасні аспекти лікування ранового процесу із застосуванням покриттів (пов'язок). *Запорізький медичний журнал*. 2022. Т. 24. № 5. С. 599–606. DOI: 10.14739/2310-1210.2022.5.252474
8. Bao Z., Xian C., Yuan Q., Liu G., Wu J. Natural Polymer-Based Hydrogels with Enhanced Mechanical Performances: Preparation, Structure, and Property. *Adv Healthc Mater*. 2019. Vol. 8, no.17. P. 1-17. DOI: 10.1002/adhm.201900670
9. Berlanga-Acosta J., Garcia-Ojalvo A., Fernández-Montequin J., Falcon-Cama V., Acosta-Rivero N., Guillen-Nieto G., Pujol-Ferrer M., Limonta-Fernandez M., Ayala-Avila M., Eriksson E. Epidermal growth factor intralesional delivery in chronic wounds: the pioneer and standalone technique for reversing wound chronicity and promoting sustainable healing. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, no. 20. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252010883>
10. Cook K. A., Martinez-Lozano E., Sheridan R., Rodriguez E. K., Nazarian A., Grinstaff M. W. Hydrogels for the management of second-degree burns: currently available options and future promise. *Burns & Trauma*. 2022. Vol. 10. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1093/burnst/tkac047>
11. Eldebany N., Abd Elkodous M., Tohamy H., Abdelwahed R., El-Kammar M., Abou-Ahmed H., Elkhenany H. Gelatin Loaded Titanium Dioxide and Silver Oxide Nanoparticles: Implication for Skin Tissue Regeneration. *Biological Trace Element Research*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02489-x>
12. Geszke-Moritz M., Moritz M. Biodegradable polymeric nanoparticle-based drug delivery systems: comprehensive overview, perspectives and challenges. *Polymers (Basel)*. 2024. Vol. 16, no. 17. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16172536>
13. Goh M., Du M., Peng W. R., Saw P. E., Chen Z. Advancing burn wound treatment: exploring hydrogel as a transdermal drug delivery system. *Drug Delivery*. 2024. Vol. 31, no. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/10717544.2023.2300945>
14. Huang C., Dong L., Zhao B., Lu Y., Huang S., Yuan Z., Luo G., Xu Y., Qian W. Anti-inflammatory hydrogel dressings and skin wound healing. *Clin Transl Med*. 2022. Vol. 12, no. 11. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1002/ctm2.1094>

15. Jeschke M. G., van Baar M. E., Choudhry M. A., Chung K. K., Gibran N. S., Logsetty S. Burn injury. *Nat Rev Dis Primers*. 2020. Vol. 6, no. 1. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41572-020-0145-5>
16. Kamlungmak S., Wonglapisuwan M., Surachat K., Deachamag P., Srichana T. Bioactivity of Mupirocin Nanoparticle-Loaded Hydrogel against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *Applied Microbiology*. 2022. Vol. 2, no. 1. P. 260–271. URL: <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010019>
17. Kapusta O., Jarosz A., Stadnik K., Giannakoudakis D. A., Barczyński B., Barczak M. Antimicrobial natural hydrogels in biomedicine: properties, applications, and challenges – a concise review. *Int J Mol Sci*. 2023. Vol. 24, no. 3. P. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24032191>
18. Kumar A., Sood A., Agrawal G., Thakur S., Thakur V.K., Tanaka M., Mishra Y.K., Christie G., Mostafavi E., Boukherroub R., Huttmacher D.W., Han S.S. Polysaccharides, proteins, and synthetic polymers based multimodal hydrogels for various biomedical applications: A review. *Int J Biol Macromol*. 2023. Vol. 247. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125606
19. Li L., Ma Q., Mou J., Wang M., Ye J., Sun G. Basic fibroblast growth factor gel preparation induces angiogenesis during wound healing. *Int J Artif Organs*. 2023. Vol. 46, no. 3. P. 171–181. DOI: <https://doi.org/10.1177/03913988221145525>
20. Lin X., Zhang X., Wang Y., Chen W., Zhu Z., Wang S. Hydrogels and hydrogel-based drug delivery systems for promoting refractory wound healing: applications and prospects. *Int J Biol Macromol*. 2025. Vol. 285. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138098>
21. Liu M., Chen Y., Zhu Q., et al. Antioxidant thermogelling formulation for burn wound healing. *Chem Asian J*. 2022. Vol. 17, no. 16. P. 1–14. DOI: 10.1002/asia.202200396
22. Łukasiewicz S., et al. Polycaprolactone Nanoparticles as Promising Candidates for Nanocarriers in Novel Nanomedicines. *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13, no. 2. P. 191. URL: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13020191>
23. Musiał C., Kuban-Jankowska A., Gorska-Ponikowska M. Beneficial properties of green tea catechins. *Int J Mol Sci*. 2020. Vol. 21, no. 5. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21051744>
24. Olteanu G., Neacșu S. M., Joița F. A., Musuc A. M., Lupu E. C., Ioniță-Mîndrican C. B., Lupuliasa D., Mititelu M. Advancements in regenerative hydrogels in skin wound treatment: a comprehensive review. *Int J Mol Sci*. 2024. Vol. 25, no. 7. P. 1–47. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25073849>
25. Pangli H., Vatanpour S., Hortamani S., Jalili R., Ghahary A. Incorporation of silver nanoparticles in hydrogel matrices for controlling wound infection. *J Burn Care Res*. 2021. Vol. 42, no. 4. P. 785–793. DOI: <https://doi.org/10.1093/jbcr/iraa205>
26. Pantus A., Rozhko M., Paliychuk V., Kovalchuk N., Melnyk N. Microstructure of biopolymer micro-fibrous scaffold and its influence on the ability to retain medicines and tissue regeneration. *Georgian Med News*. 2023. Vol. 336. P. 37–44. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37166877/>
27. Preeti, Sambhakar S., Malik R., Bhatia S., Al Harrasi A., Rani C., Saharan R., Kumar S., Geeta, Sehrawat R. Nanoemulsion: An Emerging Novel Technology for Improving the Bioavailability of Drugs. *Scientifica (Cairo)*. 2023. Vol. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6640103>
28. Radzikowska-Büchner E., Łopuszyńska I., Flieger W., Tobiasz M., Maciejewski R., Flieger J. An overview of recent developments in the management of burn injuries. *Int J Mol Sci*. 2023. Vol. 24, no. 22. P. 1–59. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242216357>
29. Stoica A. E., Chircov C., Grumezescu A. M. Hydrogel dressings for the treatment of burn wounds: an up-to-date overview. *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, no. 12. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13122853>
30. Tomić S.Lj., Vuković J.S. Antimicrobial Activity of Silver, Copper, and Zinc Ions/Poly(Acrylate/Itaconic Acid) Hydrogel Matrices. *Inorganics*. 2022. Vol. 10, no. 38. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/inorganics10030038>
31. Witkowska K., Paczkowska-Walendowska M., Plech T., Szymanowska D., Michniak-Kohn B., Cielecka-Piontek J. Chitosan-Based Hydrogels for Controlled Delivery of Asiaticoside-Rich *Centella asiatica* Extracts with Wound Healing Potential. *Int J Mol Sci*. 2023. Vol. 24, no. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242417229>
32. Xu Z., Han S., Gu Z., Wu J. Advances and Impact of Antioxidant Hydrogel in Chronic Wound Healing. *Adv Healthc Mater*. 2020. Vol. 9, no 5. P. 1–13. DOI: 10.1002/adhm.201901502
33. Yang Y.L., Chang C.H., Huang C.C., et al. Anti-inflammation and anti-apoptosis effects of pearl extract gel on UVB irradiation HaCaT cells. *Biomed Mater Eng*. 2015. Vol. 26. P. 139–145. DOI: 10.3233/BME-151299
34. Zhang Y., Huang Y. Rational Design of Smart Hydrogels for Biomedical Applications. *Front Chem*. 2021. Vol. 8. P. 1–13. DOI: 10.3389/fchem.2020.615665.
35. Zhao L., Zhou Y., Zhang J., Liang H., Chen X., Tan H. Natural Polymer-Based Hydrogels: From Polymer to Biomedical Applications. *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, no. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102514>