

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-29>

УДК 615.468:544.773.432:615.281.9:547.995

БІЛЕЦЬКА ГАЛИНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6299-1853>

e-mail: biletskaha@khmnu.edu.ua

СФРЕМОВА ОЛЬГА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8153-1150>

e-mail: 2seffrem@gmail.com

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА АНТИБАКТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОГЕЛЕВИХ ПЛІВОК НА ОСНОВІ ХІТОЗАНУ І ПОЛІЕТИЛЕНГЛІКОЛЮ

У статті висвітлено переваги гідрогелевих перев'язувальних матеріалів, порівняно з традиційними текстильними. Обґрунтовано, що для виробництва перев'язувальних матеріалів гідрогелі мають містити значний вміст води, мати достатню механічну міцність та антибактеріальні властивості. Представлено результати дослідження фізико-механічних (ступінь набрякання, міцність під час розтягу) та антибактеріальних властивостей гідрогелевих плівок на основі хітозану і поліетиленгліколю.

Обґрунтовано, що оптимальне поєднання ступеня набрякання і механічної міцності мають гідрогелеві плівки із співвідношенням хітозан / поліетиленгліколь 50 / 50. Мінеральний наповнювач – бентонітова глина, модифікована іонами аргентуму, підвищує ступінь набрякання і механічну міцність гідрогелів.

З'ясовано, що гідрогелеві плівки на основі хітозану і поліетиленгліколю мають антибактеріальні властивості до грампозитивних і грамнегативних бактерій. Визначено, що плівки з бентонітовою глиною, модифікованою іонами аргентуму, мають кращі антибактеріальні активності порівняно з плівками без мінерального компонента й активніше пригнічують ріст бактерій.

Ключові слова: гідрогелі, хітозан, поліетиленгліколь, фізико-механічні та антибактеріальні властивості гідрогелів.

BILETSKA HALYNA

YEFREMOVA OLHA

Хмельницький національний університет

PHYSICO-MECHANICAL AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF CHITOSAN AND POLYETHYLENE GLYCOL-BASED HYDROGEL FILMS

The article highlights the advantages of hydrogel wound-dressing materials compared to traditional textile ones. It is substantiated that, for the production of wound dressings, hydrogels must possess a high water content, sufficient mechanical strength, and antibacterial properties.

The results of the study of the physico-mechanical (swelling degree, tensile strength) and antibacterial properties of hydrogel films based on chitosan and polyethylene glycol are presented. It was found that films with a chitosan/polyethylene glycol ratio of 60/40 exhibit better absorption capacity for water and Ringer's solution. The mineral filler – bentonite clay modified with silver ions, increases the swelling degree of the hydrogels. It was determined that the tensile strength of hydrogel films increases with a higher content of polyethylene glycol. The strongest tensile properties were observed in films with a chitosan / polyethylene glycol ratio of 40 / 60. Films containing bentonite clay modified with silver ions were nearly twice as strong as similar films without the mineral component.

It was established that chitosan and polyethylene glycol-based hydrogel films possess antibacterial properties against both Gram-positive and Gram-negative bacteria. Films containing bentonite clay modified with silver ions demonstrated superior antibacterial activity compared to chitosan / polyethylene glycol films and more effectively inhibited bacterial growth.

It is substantiated that hydrogel films with a chitosan / polyethylene glycol ratio of 50 / 50 have the optimal combination of swelling degree and mechanical strength. Incorporating bentonite clay modified with silver ions into the composition of hydrogel films increases their swelling degree, improves mechanical strength, and enhances antibacterial properties. Additionally, films containing bentonite clay absorb solutions with a chemical composition similar to biological fluids more effectively.

Keywords: hydrogels, chitosan, polyethylene glycol, physico-mechanical and antibacterial properties of hydrogels.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 09.11.2025

Постановка проблеми

Одним із завдань фармацевтичної галузі, що актуалізувалася в умовах повномасштабної війни в Україні, є виробництво сучасних перев'язувальних матеріалів. Однією із головних функцій цих засобів є захист рани від ~~проникнення~~ патогенної мікрофлори. Традиційні текстильні перев'язувальні матеріали (марля, вата) забезпечують лише механічний захист і дренаж. Внаслідок поглинання ранового ексудату в текстильних перев'язувальних матеріалах виникають сприятливі умови для розвитку патогенної мікрофлори. Крім того, вони швидко стають сухими, прилипають до рани і потребують частой зміни. Це зумовлює необхідність створення перев'язувальних матеріалів, що позбавлені цих недоліків, а також є ефективними під час загоєння ран і зручними для надання першої медичної допомоги екстремальних умовах. Перспективним матеріалом для виробництва сучасних перев'язувальних матеріалів є полімерні гідрогелі. Використання гідрогелів у медичній практиці потребує визначення співвідношення компонентів, за якого вони матимуть оптимальні фізико-механічні та антибактеріальні властивості.

Аналіз останніх джерел

Різні аспекти використання полімерних гідрогелів для виробництва перев'язувальних матеріалів досліджували В. Демченко [1], С. Загородня [1], О. Іщенко [2], Н. Носова [3], Е. Ahmed [4], А. Alberts [5], М. Altunbek [6], Н. Nguyen [7], S. Thomas [8] та ін. Науковці зазначають, що гідрогелеві перев'язувальні матеріали мають низку переваг, порівняно з текстильними. Вони не подразнюють рану, не реагують з біологічними тканинами, проникли до метаболітів, сприяють грануляції тканин у вологому середовищі і швидкому загоєнню рани, мають заспокійливу та охолоджуючу дію, не пошкоджують поверхню рани [8]. Гідрогелеві пов'язки легко і швидко накладати на нерівні або глибокі рани, значний вміст води у гідрогелях допомагає підтримувати гомеостаз тканин у мікросередовищі рани [5]. Гідрогелі забезпечують тривимірну (3D) пористу матричну структуру пов'язки, що полегшує газообмін, міграцію і проліферацію фібробластів, неоваскуляризацію і реепітелізацію. Їх можна модифікувати для захисту від мікробної інвазії, стимуляції ангиогенезу, зменшення запалення, активації місцевої імунної відповіді та підтримання рівня кисню у середовищі рани [6]. Гідрогелеві плівки можна наповнювати лікарськими речовинами (знеболювальними, кровоспинними, антимікробними), що пришвидшує загоєння пошкодженої шкіри. До складу гідрогелевих пов'язок також можна вводити клітини для прискорення регенеративних процесів, наприклад кератиноцити або фібробласти [4].

Для фармацевтичної і медичної галузі ~~значний~~ інтерес складають гідрогелі з максимальною кількістю води. Суттєвою перешкодою застосування таких гідрогелів для виробництва перев'язувальних матеріалів є незадовільні фізико-механічні властивості, зокрема низька міцність. Підвищення міцності гідрогелів за рахунок зміни їхнього складу та структури, як правило, супроводжується небажаними змінами цільових характеристик. Для покращення фізико-механічних властивостей гідрогелів науковці пропонують створювати органо-мінеральні полімерні плівки (Ю. Клим [9], N. Aktas [10], D. Alpaslan [10] та ін.) або композитні матеріали у вигляді армованих гідрогелів (Г. Носова [2], Е. Ahmed [4] та ін.), що дозволяють збільшити міцність гідрогелів без суттєвих змін їхнього складу, зокрема без зменшення вмісту води.

Ще одна властивість гідрогелів, що визначає доцільність їх використання для виробництва перев'язувальних матеріалів – це антибактеріальні властивості. Для надання гідрогелевим перев'язувальним матеріалам таких властивостей науковці пропонують в якості полімерної основи гідрогелів використовувати сполуки, що мають бактерицидну або бактериостатичну дію, наприклад хітозан (Г. Білецька [11], М. El-Nack [12], Y. Ou [13], M. Tian [13] та ін.), полівінілпіролідон (Ю. Клим [9], Г. Яцульчак [14] та ін.), полімери і кополімери на основі акриламідів та його похідних (Н. Носова [3], М. Чобіт [15] та ін.).

Отже, проблема створення гідрогелевих плівок з фізико-механічними та антимікробними властивостями, що визначають їхню придатність для виробництва перев'язувальних матеріалів, перебуває у колі інтересів науковців є актуальним напрямком наукових досліджень.

Мета дослідження – вивчення фізико-механічних та антимікробних властивостей гідрогелевих плівок основи хітозану і поліетиленгліколю.

Матеріали і методи досліджень

Для дослідження фізико-механічних та антимікробних властивостей гідрогелевих плівок готували серію розчинів, що містять хітозан і поліетиленгліколь 6000 (ПЕГ) у таких співвідношеннях: 40 / 60; 50 / 50; 60 / 40. Отримані розчини полімерів ділили навпіл. Одну частину залишали без змін, до другої додавали 1 г бентонітової глини, модифікованої іонами аргентуму (БГА^{g+}). Таким чином отримали 6 розчинів:

- хітозан / ПЕГ 40 / 60;
- хітозан / ПЕГ 50 / 50;
- хітозан / ПЕГ 60 / 40;
- хітозан / ПЕГ 40 / 60 (БГА^{g+});
- хітозан / ПЕГ 50 / 50 (БГА^{g+});
- хітозан / ПЕГ 60 / 40 (БГА^{g+}).

Для приготування плівок розчини полімерів заливали у скляну форму і висушували при кімнатній температурі декілька днів. Висушені до постійної маси зразки висушували в термостаті при температурі 30 °C впродовж доби для «зшивання» полімерних ланцюгів. Після висушування зразки мали товщину 0,25 мм.

Плівки без мінерального компонента (бентонітової глини) використовували для визначення оптимального співвідношення хітозану і ПЕГ у складі гідрогелевих плівок, плівки з бентонітовою глиною – для порівняння властивостей органічних і органо-мінеральних плівок. Для дослідження використовували зразки плівок 10 мм x 10 мм і товщиною 1 мм без поверхневих дефектів.

Під час дослідження визначали такі фізико-механічні властивості гідрогелевих плівок: ступінь набрякання у воді і розчині Рінгера, міцність під час розтягу.

Для визначення ступеня набрякання зразки плівок зважували і поміщали у бюкси так, щоб вони не доторкалися стінок. Бюкси заповнювали рідиною (водою або розчином Рінгера), щоб вона покривала зразки на 10 мм. Зразки витримували у рідині при кімнатній температурі 2 години. Визначення ступеня набрякання проводили через проміжки часу – 15 хв, 30 хв, 60 хв, 120 хв. Для проведення визначень зразки виймали з бюксів

і просушували фільтрувальним папером. Просушені зразки зважували на аналітичних вагах (зважування здійснювалося з точністю до 0,001 г). Ступінь набрякання плівок розраховували за формулою (1):

$$\alpha = \frac{(m - m_0)}{m_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m – маса зразка гідрогелевої плівки після витримання у рідині, г; m_0 – маса сухої плівки, г.

Для визначення міцності гідрогелевих плівок під час розтягу використовували розривну машину «Kіmura» із зусиллям до 10 кН. Руйнівне напруження під час розтягу (σ_r , МПа) розраховували за формулою (2):

$$\sigma_r = \frac{F_p}{A_0}, \quad (2)$$

де F_p – навантаження при якому зразок плівки зруйнувався, Н; A_0 – поперечний переріз зразка плівки, мм².

Для дослідження антибактеріальної активності гідрогелевих плівок зразки за допомогою стерильних піпетт поміщали в чашки Петрі з посівом на агарі грампозитивних бактерій *Staphylococcus aureus* і грамнегативних бактерій *Escherichia coli* та інкубували при температурі 37 °С впродовж 24 год. Для оцінки антибактеріальної активності гідрогелевих плівок визначали зону інгібування росту бактерій [16].

Результати досліджень

В результаті визначення ступеня набрякання гідрогелевих плівок з'ясовано, що більшу поглинальну здатність мають плівки, що містять хітозан і ПЕГ у співвідношенні 60 / 40. При збільшенні вмісту ПЕГ поглинальна здатність зменшується (рис. 1а) [16]. Причиною цього, на нашу думку, є зменшення пор полімерної сітки при додаванні ПЕГ. Відповідно, чим менші пори, тим менший ступінь набрякання гідрогелів.

Порівняння ступеня набрякання гідрогелевих плівок з мінеральним наповнювачем і без нього дозволило зробити висновок, що бентонітова глина, модифікована іонами аргентуму, підвищує здатність гідрогелів поглинати воду (рис. 1). Ступінь набрякання гідрогелевих плівок із різним співвідношенням хітозан / ПЕГ при додаванні модифікованої бентонітової глини суттєво не змінився. Максимальний ступінь набрякання плівок досягається через 120 хв і складає 601 % для плівки хітозан / ПЕГ 60 / 40 (рис. 1а), 628 % для плівки хітозан / ПЕГ 60 / 40 (БГА^{g+}) (рис. 1б). Варто зазначити, що найбільш активно вода поглиналася у перші 30 хв. Подальше витримання плівок у воді суттєво не впливало поглинальну здатність [16].

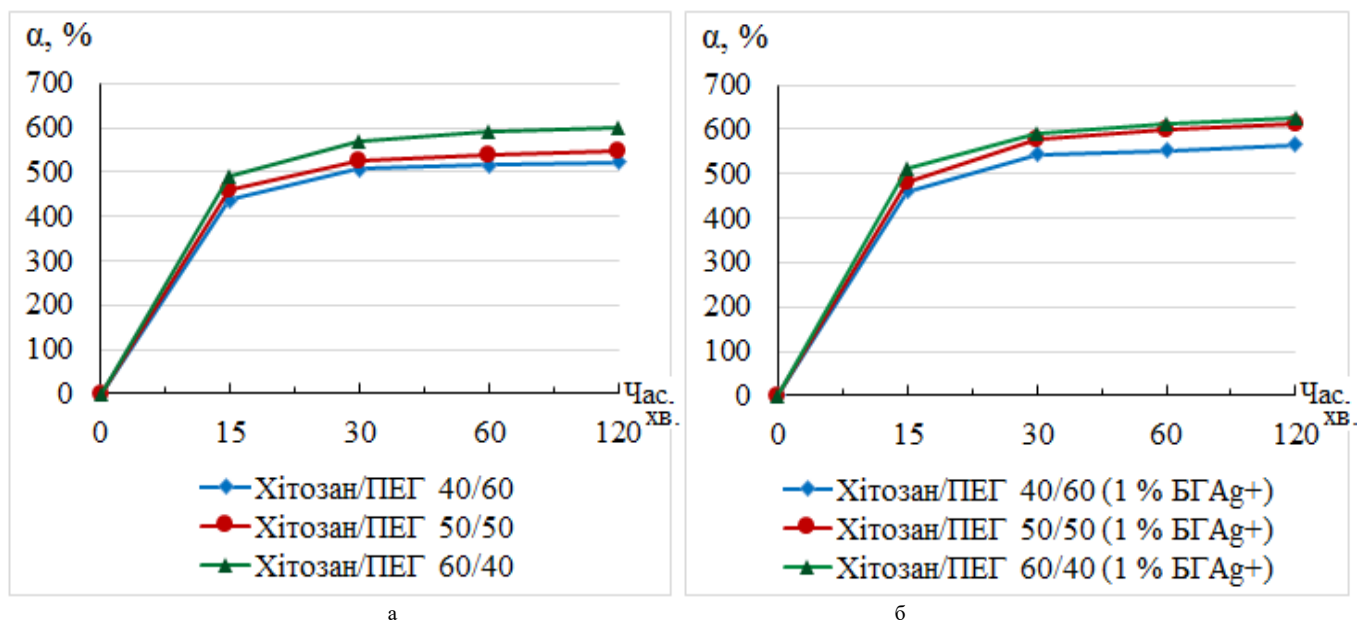


Рис.1. Результати визначення ступеня набрякання гідрогелевих плівок у воді

Додавання до полімерної основи гідрогелевої плівки бентонітової глини, модифікованої іонами аргентуму, значно підвищує поглинання розчину Рінгера, хімічний склад якого подібний до біологічних рідин (рис. 2).

Максимальне набрякання плівок Плівки хітозан / ПЕГ досягається через 120 хв і складає 628 % (рис. 2а). Плівки хітозан / ПЕГ (БГА^{g+}) за такий самий проміжок часу набрякають на 699 % (рис. 2б) [16].

В результаті визначення міцності гідрогелевих плівок з'ясовано, що міцність плівок збільшується при збільшенні вмісту ПЕГ у полімерній основі (рис. 3). Найбільшу міцність під час розтягу мають плівки із співвідношенням хітозан / ПЕГ 40 / 60. Також з'ясовано, що плівки з бентонітовою глиною, модифікованою іонами аргентуму, майже у два рази міцніші, за аналогічні без мінерального наповнювача. Значення максимального руйнівного напруження, при якому вони порвалися складає 0,531 МПа (рис. 3б). Значення максимального руйнівного напруження для плівок хітозан / ПЕГ дорівнювало 0,373 МПа (рис. 3а) [16].

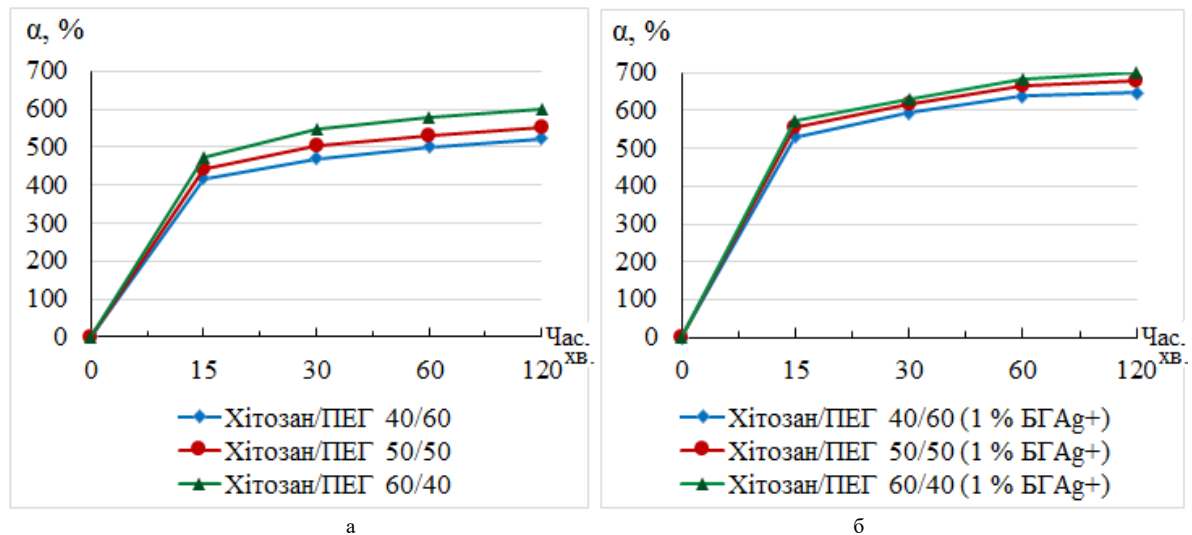


Рис.2. Результати визначення ступеня набрякання гідрогелевих плівок у розчині Рінгера

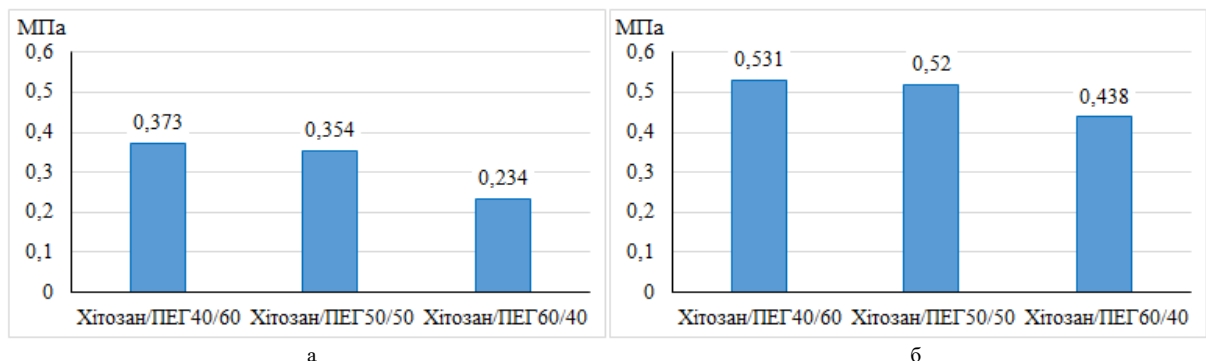
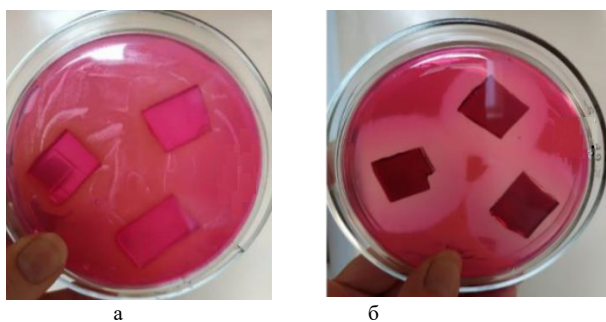
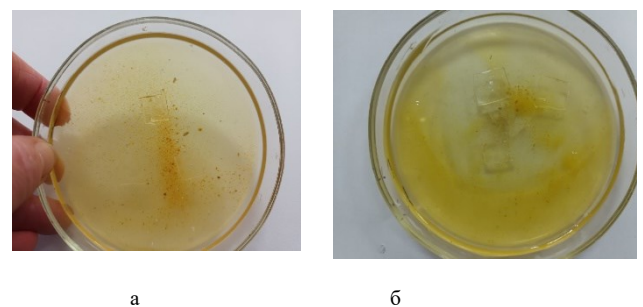


Рис.3. Результати визначення міцності гідрогелевих плівок під час розтягу

В результаті дослідження антибактеріальної активності гідрогелевих плівок з'ясовано, що і плівки хітозан / ПЕГ, і плівки хітозан / ПЕГ (БГАg⁺) пригнічують ріст бактерій. Разом з тим плівки хітозан / ПЕГ (БГАg⁺) мають кращу антибактеріальну активність, порівняно з плівками хітозан/ПЕГ (рис. 4б і 5б), що зумовлено вмістом у складі бентонітової глини іонів аргентуму, які мають антибактеріальну дію [16]. Пригнічення росту бактерій плівками хітозан / ПЕГ, на нашу думку, зумовлене антибактеріальними властивостями складників полімерної основи гідрогелевої плівки, зокрема хітозану.

Рис. 4. Результати дослідження антибактеріальної активності гідрогелевих плівок відносно *staphylococcus aureus*: а – плівка хітозан / ПЕГ; б – плівка хітозан / ПЕГ (БГАg⁺)Рис. 5. Результати дослідження антибактеріальної активності гідрогелевих плівок відносно *escherichia coli*: а – плівка хітозан / ПЕГ; б – плівка хітозан / ПЕГ (БГАg⁺)

Висновки

В результаті дослідження з'ясовано, що оптимальне поєднання механічної міцності і ступеня набрякання мають гідрогелеві плівки із співвідношенням хітозан / ПЕГ 50 / 50. Включення до складу гідрогелевих плівок мінерального наповнювача – бентонітової глини, модифікованої іонами аргентуму, підвищує їхню механічну міцність і ступінь набрякання. Плівки з бентонітовою глиною також краще поглинають розчини, що за хімічним складом подібні до біологічних рідин, і мають більшу антибактеріальну активність.

Література

1. Демченко, В.Л., Загородня, С.Д., Рибальченко, Н.П., Заремба, П.Ю., Артюх, Л.О., Ситник, І.О., Куницький, Д.В., Овсянкіна, В.О., & Неймаш, В.Б. (2025). Полімерні гідрогелі на основі полівінілового спирту і оксиду цинку. *Bulletin of national technical university of Ukraine «Igor Sikorsky kyiv polytechnic institute»*, Series «Chemical engineering, ecology and resource saving», 3(24), 70-11. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340380
2. Іщенко О.В., Плаван, В.П., Ляшок, І.О., Цибенко, О.В., & Ресницький І.В. (2021). Трансдермальні терапевтичні системи на основі альгінату натрію. *Фізико-органічна хімія, фармакологія та фармацевтична технологія біологічно активних речовин*, 3, 315-324.
3. Носова, Н.Г. (2020). *Технологія формування гідрогелевих засобів медичного призначення на основі поліакриламідів з використанням реакційноздатних поліпероксидів*. (дис. д-ра техн. наук). Національний університет «Львівська політехніка», Львів.
4. Ahmed, E.M. (2015). Hydrogel: preparation, characterization and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105-121.
5. Alberts, A., Moldoveanu, E.-T., Niculescu, A.-G., & Grumezescu, A.M. (2025). Hydrogels for Wound Dressings: Applications in Burn Treatment and Chronic Wound Care. *Journal of Composites Science*, 9, 133. <https://doi.org/10.3390/jcs9030133>
6. Altunbek, M., Gezek, M., Gouveia E.M.T., & Camci-Unal G. (2024). Development of a Sprayable Hydrogel-Based Wound Dressing: An In Vitro Model. *Gels*, 10(3), 176. <https://doi.org/10.3390/gels10030176>
7. Nguyen, H.M., Ngoc Le, T.T., Nguyen, A.T., Thien Le, H.N., & Pham, T.T. (2023). Biomedical materials for wound dressing: recent advances and applications. *RSC Advances*, 13, 5509-5528. <https://doi.org/10.1039/D2RA07673J>
8. Thomas S. (1988). Comparative review of the properties of six semipermeable film dressings. *Pharmaceutical Journal*, 240, 785-797.
9. Клим, Ю.В. (2019). *Розроблення основ технології одержання термопластичних нанокмполімерів на основі монтморилоніту та полівінілпіролідону*. (дис. канд. техн. наук). Національний університет «Львівська політехніка», Львів.
10. Aktas, N., Alpaslan, D., & Dudu, T.E. (2022) Polymeric Organo-Hydrogels: Novel Biomaterials for Medical, Pharmaceutical, and Drug Delivery Platforms. *Frontiers in Materials* 9:845700. DOI:10.3389/fmats.2022.845700.
11. Білецька, Г.А., Стадницька, Н.С., & Назарко, І.С. (2023). Склад і технологія виробництва гідрогелевих медичних пов'язок з бентонітовою глиною. *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки*, 5(2), 14-18. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-14-18>
12. El-Hack, M., El-Saadony, M., Shafi, M., Zabermawi, N., Arif, M., Batiha, G., Khafaga, A., Abd El-Hakim, Y., & Al-Sagheer, A. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. *International journal of biological macromolecules*, 164, 2726-2744. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153>
13. Ou, Y., & Tian, M. (2021). Advances in multifunctional chitosan-based self-healing hydrogels for biomedical applications. *The Journal of Materials Chemistry B*, 9(38), 7955-7971. <https://doi.org/10.1039/D1TB01363G>
14. Яцульчак, Г.В. (2021). *Основи технології формування композиційних гідрогелевих плівок з кополімерів полівінілпіролідону та поліакроамідів*. (Дис. канд. тех. наук). Національний університет «Львівська політехніка», Львів.
15. Чобіт, М.Р., Токарев, В.С., Васильєв, В.П., & Панченко, Ю.В. (2022). Комплексні гідрогелі на основі аквазолу та поліакриламідів. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 5(2), 196-201. <https://doi.org/10.23939/ctas2022.02.196>
16. Білецька, Г.А. (2023). *Розроблення технології гідрогелевих пов'язок з бентонітовою глиною*. (Магістерська кваліфікаційна робота). Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

References

1. Demchenko, V.L., Zahorodnia, S.D., Rybalchenko, N.P., Zarembo, P.Iu., Artiukh, L.O., Sytnyk, I.O., Kunytskyi, D.V., Ovsiankina, V.O., & Neimash, V.B. (2025) Polimerni hidroheli na osnovi polivinilovoho spyrtu i oksydu tsynku. Bulletin of national technical university of ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Series «Chemical engineering, ecology and resource saving», 3(24), 70-11. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340380
2. Ishchenko O.V., Plavan, V.P., Liashok, I.O., Tsybenko, O.V., & Resnytskyi I.V. (2021). Transdermalni terapevtychni systemy na osnovi alhinatu natriiu. Fyzyko-orhanichna khimiia, farmakolohiia ta farmatsevtychna tekhnolohiia biolohichno aktyvnykh rechovyn, 3, 315-324.
3. Nosova, N.H. (2020). Tekhnolohiia formuvannia hidrohelevykh zasobiv medychnoho pryznachennia na osnovi poliakrylamidu z vykorystanniam reaktsiinozdatnykh poliperoksydiv. (Dys. d-ra tekhn. nauk). Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», Lviv.
4. Ahmed, E.M. (2015). Hydrogel: preparation, characterization and applications: A review. Journal of Advanced Research, 6(2), 105-121.
5. Alberts, A., Moldoveanu, E.-T., Niculescu, A.-G., & Grumezescu, A.M. (2025). Hydrogels for Wound Dressings: Applications in Burn Treatment and Chronic Wound Care. Journal of Composites Science, 9, 133. <https://doi.org/10.3390/jcs9030133>
6. Altunbek, M., Gezek, M., Gouveia E.M.T., & Camci-Unal G. (2024). Development of a Sprayable Hydrogel-Based Wound Dressing: An In Vitro Model. Gels, 10(3), 176. <https://doi.org/10.3390/gels10030176>
7. Nguyen, H.M., Ngoc Le, T.T., Nguyen, A.T., Thien Le, H.N., & Pham, T.T. (2023). Biomedical materials for wound dressing: recent advances and applications. RSC Advances, 13, 5509-5528. <https://doi.org/10.1039/D2RA07673J>
8. Thomas S. (1988). Comparative review of the properties of six semipermeable film dressings. [Pharmaceutical Journal](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153), 240, 785-797.
9. Klym, Yu.V. (2019). Rozroblennia osnov tekhnolohii oderzhannia termoplastychnykh nanokompozitiv na osnovi montmorylonitu ta polivinilpirolidonu. (Dys. kand. tekhn. nauk). Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», Lviv.

10. Aktas, N., Alpaslan, D., & Dudu, T.E. (2022) Polymeric Organo-Hydrogels: Novel Biomaterials for Medical, Pharmaceutical, and Drug Delivery Platforms. *Frontiers in Materials* 9:845700. DOI:[10.3389/fmats.2022.845700](https://doi.org/10.3389/fmats.2022.845700).
11. Biletska, H.A., Stadnytska, N.Ie., & Nazarko, I.S. (2023). Sklad i tekhnolohiia vyrobnytstva hidrohelevykh medychnykh poviazok z bentonitovoiou hlynoiu. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Serii: Tekhnichni nauky*, 5(2), 14-18. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-14-18>
12. El-Hack, M., El-Saadony, M., Shafi, M., Zabermawi, N., Arif, M., Batiha, G., Khafaga, A., Abd El-Hakim, Y., & Al-Sagheer, A. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. *International journal of biological macromolecules*, 164, 2726-2744. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153>
13. Ou, Y., & Tian, M. (2021). Advances in multifunctional chitosan-based self-healing hydrogels for biomedical applications. *The Journal of Materials Chemistry B*, 9(38), 7955-7971. <https://doi.org/10.1039/D1TB01363G>
14. Yatsulchak, H.V. (2021). Osnovy tekhnolohii formuvannia kompozytsiinykh hidrohelevykh plivok z kopolimeriv polivinilpirolidonu ta polikaproamidu. (Dys. kand. tekhn. nauk). Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», Lviv.
15. Chobit, M.R., Tokarev, V.S., Vasyliiev, V.P., & Panchenko, Yu.V. (2022). Kompleksni hidroheli na osnovi akvazolu ta poliakrylamid. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 5(2), 196-201. <https://doi.org/10.23939/ctas2022.02.196>
16. Biletska, H.A. (2023). Rozroblennia tekhnolohii hidrohelevykh poviazok z bentonitovoiou hlynoiu. (Mahisterska kvalifikatsiina robota). Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», Lviv.