

УДК 628.1:66.08

ДЕМЧЕНКО В. Л.¹, РИБАЛЬЧЕНКО Н. П.², ЮРЖЕНКО М. В.¹, КУНИЦЬКИЙ Д. В.¹,
МАРИНІН А. І.³, ДОЛГОШЕЙ В. Б.⁴, ОВСЯНКИНА В. О.^{4*}, БУР'ЯНОВ О. А.⁵

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

² Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України,

³ Національний університет харчових технологій

⁴ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

⁵ Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ, СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТНИХ ПОЛІМЕРНИХ КРІОГЕЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Екологічні катастрофи та техногенні аварії часто мають довготривалі наслідки: забруднення води й повітря, деградацію ґрунтів, зниження якості життя населення. Саме тому питання запобігання таким подіям стає одним із ключових завдань сучасного суспільства. Науковці шукають нові підходи до управління ризиками, впроваджують ефективні системи контролю та підвищують рівень екологічної відповідальності. Особливу роль у цьому процесі відіграють інноваційні технології та наукові розробки, які спрямовані на покращення екології та здоров'я населення.

Актуальність створення нового типу перев'язувальних матеріалів пов'язана зі збільшенням кількості пацієнтів, які щороку страждають від ран різного інфекційного походження. Традиційні перев'язувальні матеріали, які тривалий час використовуються у медицині, мають низку недоліків. Зокрема, вони не завжди ефективно поглинають рановий ексудат і можуть прилипати до поверхні рани, що ускладнює процес перев'язки та може спричинити додатковий біль або пошкодження тканин.

У зв'язку з цим зростає інтерес до сучасних матеріалів для лікування ран, зокрема до полімерних гідрогелів. Такі матеріали вважаються перспективними, оскільки вони здатні створювати оптимальні умови для загоєння. Гідрогелі мають бути біосумісними та нетоксичними, добре утримувати вологу, забезпечувати поглинання ранових виділень і водночас підтримувати вологе середовище, яке сприяє швидшому відновленню тканин.

Крім того, важливою характеристикою таких матеріалів є наявність антимікробних властивостей. Це дозволяє зменшити ризик інфікування рани та підвищити ефективність лікування, що робить полімерні гідрогелі одним із перспективних напрямів розвитку сучасних перев'язувальних засобів.

Робота присвячена формуванню та дослідженню кріогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту (ПВС), гіалуронової кислоти (ГК) та наночастинок Ag_2O . Кріогелеві матеріали формували шляхом відновлення іонів Ag^+ у полімерній матриці до металічних наночастинок срібла за допомогою гіалуронової кислоти при нагріванні з подальшим зшиванням зразків шляхом заморожування-розморозжування. Методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів було досліджено структуру кріогелевих матеріалів та підтверджено наявність частинок Ag_2O у досліджуваних полімерних системах. Було виявлено, що в полімерних системах ПВС-ГК формуються ультрадисперсні наночастинки Ag_2O із середнім розміром близько 5 нм, статистично розподілені в об'ємі кріогелю. Було встановлено, що полімерні кріогелеві системи проявляють антимікробну активність щодо грампозитивних *Staphylococcus aureus*, *S. epidermidis* та грамнегативних *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* мікроорганізмів. Показано, що збільшення концентрації наночастинок оксиду срібла у композиті приводить до зростання антимікробної активності матеріалів. Найбільші зони інгібування росту мікроорганізмів спостерігалися для зразків із вмістом 1,0 % мас. Ag_2O . Отримані результати свідчать про перспективність використання розроблених кріогелевих матеріалів як основи для сучасних ранових пов'язок із бактерицидними властивостями.

Ключові слова: техногенно-екологічна безпека, біомедицина, кріогель, частинки оксиду срібла, структура, антимікробна активність.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2026.356020

*Corresponding author: ovsankinaviktoria@gmail.com

Received 04 February 2026; Accepted 03 March 2026

Вступ. Криогелеві матеріали широко використовуються у медицині для створення сучасних перев'язувальних засобів, які здатні ефективно поглинати рановий ексудат, підтримувати оптимальне вологе середовище та забезпечувати доступ кисню до тканин [1–3]. Це сприяє швидшому загоєнню ран і зменшує ризик розвитку інфекцій. Крім того, такі матеріали можуть слугувати носіями для лікарських препаратів, поступово вивільняючи активні речовини безпосередньо в зоні ушкодження.

Окрім медицини, полімерні криогелі знаходять застосування у біотехнологіях, фармацевтиці та екології. Їх використовують як матриці для культивування клітин, сорбенти для очищення води та середовища для іммобілізації ферментів [4–6].

Завдяки поєднанню механічної міцності, високої пористості та біосумісності криогелеві матеріали вважаються перспективними для розробки нових технологій і матеріалів майбутнього.

Сучасні матеріали, що використовуються для захисту уражених ділянок шкіри, повинні відповідати наступним критеріям: 1 – забезпечення належної вологості середовища; 2 – здатність поглинати ранову рідину та ексудат; 3 – запобігання зневодненню рани; 4 – запобігання редукційному некрозу поверхні рани; 5 – імітація факторів росту; 6 – захист рани від мікробів (бактерій, інфекцій тощо); 7 – гнучкість, нетоксичність, біосумісність та належна біорозкладність [7]. Однак не всі комерційні перев'язувальні матеріали мають усі зазначені характеристики: вони мають певні особливості та недоліки. Зокрема, вони мають низьку швидкість транспортування водяної пари, низьке поглинання ранової рідини, нездатність підтримувати вологе середовище для загоєння ран, неефективну антимікробну дію, низьку біорозкладність, високу вартість тощо [8].

Особливу увагу в останні роки приділяють нанокompозитним полімерним системам, що містять наночастинки металів або їх оксидів. Серед них найбільш поширеними є наночастинки срібла, які характеризуються вираженими антибактеріальними та противірусними властивостями. Антимікробна дія наночастинок срібла пов'язана з їх здатністю взаємодіяти з клітинними мембранами мікроорганізмів, порушувати метаболічні процеси та інгібувати синтез ДНК і білків.

Використання наночастинок срібла у складі полімерних матриць дозволяє створювати матеріали із контрольованим вивільненням іонів Ag^+ , що забезпечує тривалий бактерицидний ефект та зменшує ризик розвитку резистентності мікроорганізмів.

Криогелі на основі полівінілового спирту є перспективними матеріалами для медичних застосувань завдяки їхній високій макропористості, механічній стабільності та здатності до багаторазового набухання. Поєднання ПВС із біополімерами, зокрема гіалуроновою кислотою, дозволяє отримувати біосумісні композитні матеріали з покращеними реологічними та біологічними властивостями.

У зв'язку з цим ідея створення бактерицидного криогелевого матеріалу як основи для сучасних ранових пов'язок викликає значний науковий інтерес.

Метою даної роботи є дослідження структури, морфології та антимікробної дії криогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту, гіалуронової кислоти та наночастинок Ag_2O , зшитих методом заморожування-розморожування.

Для синтезу зразків використовували такі реагенти виробництва Sigma-Aldrich: гранули полівінілового спирту марки 17-99 ($M \approx 74,800$ г/моль), високомолекулярну гіалуронову кислоту ($M \approx 2$ МДа), нітрат срібла (169,87 г/моль), очищену дистильовану воду.

Полівініловий спирт розчиняли у воді за температури 95 °С, а гіалуронову кислоту за температури 20 °С шляхом перемішування протягом 30 хвилин. Далі розчин гіалуронової кислоти додавали до розчину ПВС в різних співвідношеннях та перемішували протягом 30 хвилин за температури 85 °С. Вміст гіалуронової кислоти в криогелевому композиті ПВС-ГК варіювався від 3,0 до 9,0 % мас. Потім готували 0,2 М водні розчини нітрату срібла та додавали до суміші ПВС-ГК за температури 85 °С та перемішували протягом 60 хвилин. Вміст наночастинок Ag_2O в криогелевих композитах ПВС-ГК становив 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 % мас. На наступному етапі розчини охолоджували до 60 °С, розливали в поліетиленові zip-пакети розміром 10×12 см та охолоджували до температури 20 °С. Далі проводили зшивання розчинів гелів шляхом їх циклічного заморожування при температурі $T = -20$ °С (витримка протягом 5 год при $T = -20$ °С, 5 год при $T = +20$ °С, 5 год при $T = -20$ °С (5 год⁻–5 год⁺–5 год⁻). Товщина зразків становила 5 мм.

Структуру криогелевих матеріалів досліджували методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів на дифрактометрі XRD-7000 (Shimadzu, Японія), рентгенооптичну схему якого виконували на пропускання первинного пучка крізь зразок, з використанням CuK_{α} випромінювання ($\lambda = 1,54$ Å) і графітового монохроматора при температурі $T = 20 \pm 2$ °С.

Розмір наночастинок Ag_2O та їх статистичний розподіл у криогелевих матеріалах досліджували за

допомогою просвічуючого електронного мікроскопа JEM-1230 (JEOL, Японія) з роздільною здатністю 0,2 нм.

Для дослідження антимікробної активності криогелевих матеріалів використовували референтні штами умовно-патогенних мікроорганізмів: *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25923 та *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*) ATCC 12228 як модельні грамозитивні бактерії, а також *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25922 та *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) ATCC 27853 як модельні грамнегативні бактерії. Штами бактерій були отримані з Української колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології та вірусології ім. Заболотного НАН України. Антимікробну активність оцінювали за допомогою методу дифузії на агарі Мюллера-Хінтона (МНА) [9, 10].

Результати та їх обговорення

Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм досліджуваних зразків показав, що гіалуронова кислота, сформована у вигляді плівки має аморфну структуру як основних макроланцюгів, так і її бічних відгалужень (з функціональними групами COONa, COOH). На це вказує прояв на рентгенівській дифрактограмі цього поліелектроліту (рис. 1, крива 1) двох асиметричних дифракційних максимумів дифузного типу (аморфних гало) різної інтенсивності. При цьому кутове положення ($2\theta_{max}$) основного за інтенсивністю максимуму становить $20,4^\circ$, а вторинного – $9,6^\circ$ (крива 1). Судячи з кількості атомів (електронів) у основному ланцюзі (глюкопіранозній ланці) і бічному відгалуженні, більш інтенсивне аморфне гало ($2\theta_{max} \approx 20,4^\circ$) характеризує ближній порядок при трансляції у просторі (об'ємі зразка ГК) фрагментів основних макроланцюгів, а менш інтенсивне ($2\theta_{max} \approx 9,6^\circ$) – ближній порядок при розміщенні у просторі фрагментів бічних відгалужень.

Полівініловий спирт, отриманий у вигляді плівки характеризується напівкристалічною структурою. Це підтверджується дифракційними максимумами при $2\theta_m \sim 11,2^\circ, 19,5^\circ, 23,0^\circ, 40,8^\circ$, які відповідають кристаліграфічним площинам із індексами Міллера (100), (101), (200), (201) (рис. 2, крива 2).

При додаванні гіалуронової кислоти у кількості 3,0 % мас. до складу ПВС її структура не проявляється у складі композиту ПВС-ГК (рис. 1, криві 2, 3), що пов'язано із малим вмістом кислоти.

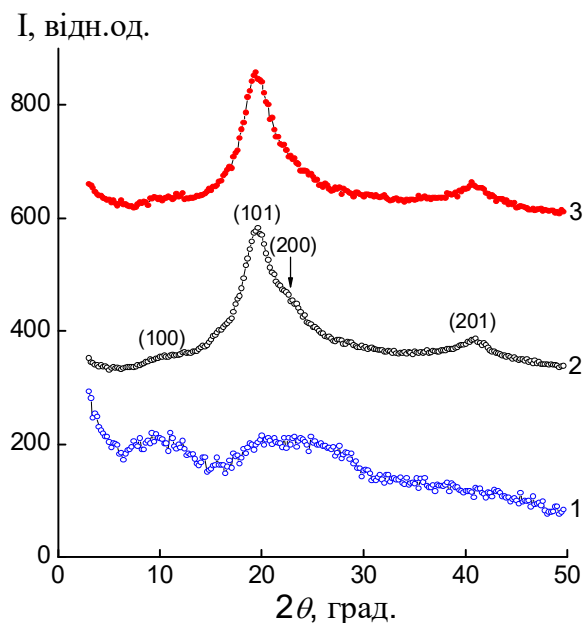


Рис. 1 – Ширококутові рентгенівські дифрактограми зразків гіалуронової кислоти (1), ПВС (2), ПВС- 3 % мас. гіалуронової кислоти (3)

Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків на основі полівінілового спирту із різним вмістом гіалуронової кислоти та наночастинками оксиду срібла, які були отримані шляхом циклічного заморожування-розморожування протягом часу ($5\text{год}^-5\text{год}^+-5\text{год}^-$) показав, що при концентрації наночастинок Ag_2O у полімерній матриці 1,0 % мас. з'являються дифракційні максимуми при $2\theta_m \sim 28,0^\circ, 32,2^\circ, 46,2^\circ$, що відповідають площинам (110), (111) та (211), відповідно (рис. 2, криві 1–3). Ці площини відповідають гранецентрованої кубічній структурі та узгоджуються з попередніми дослідженнями формування частинок Ag_2O [3].

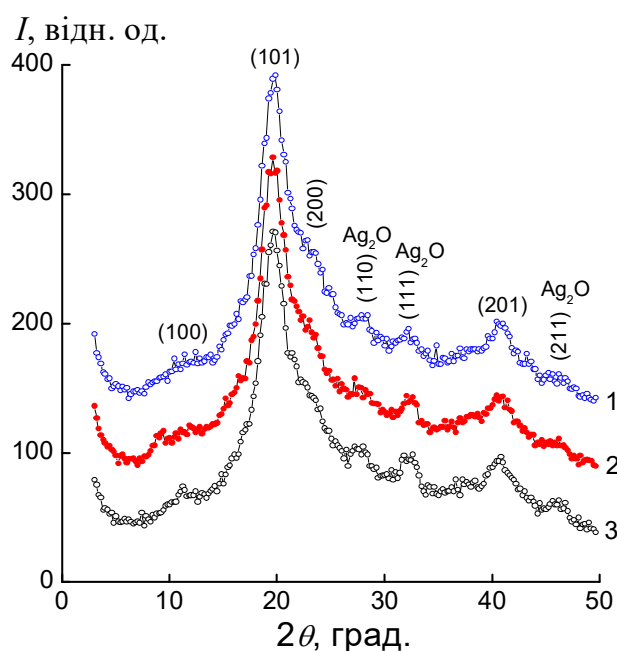


Рис. 2 – Ширококутові рентгенівські дифрактограми зразків на основі полівінілового спирту та 1,0 % мас. наночастинок Ag_2O із різним вмістом гіалуронової кислоти: 3,0 % мас. (1), 5,0 % мас. (2), 9,0 % мас. (3)

Слід відмітити, що збільшення гіалуронової кислоти у складі ПВС не приводило до зміни кристалічної структури частинок Ag_2O у полімерній матриці. На дифрактограмах зразків ПВС із різним вмістом ГК (3,0, 5,0 та 9,0 % мас.) інтенсивність дифракційних максимумів, які характеризують структуру Ag_2O не змінюється (рис. 2, криві 1 – 3).

Дослідження морфології зразків ПВС-ГК-0,1 мас.% Ag_2O , отриманих шляхом заморожування протягом 2,5 год, показали, що під час синтезу криогелевих матеріалів утворюються наночастинки із середнім розміром близько 5 нм, які статистично розподілені в полімерній матриці (рис. 3).

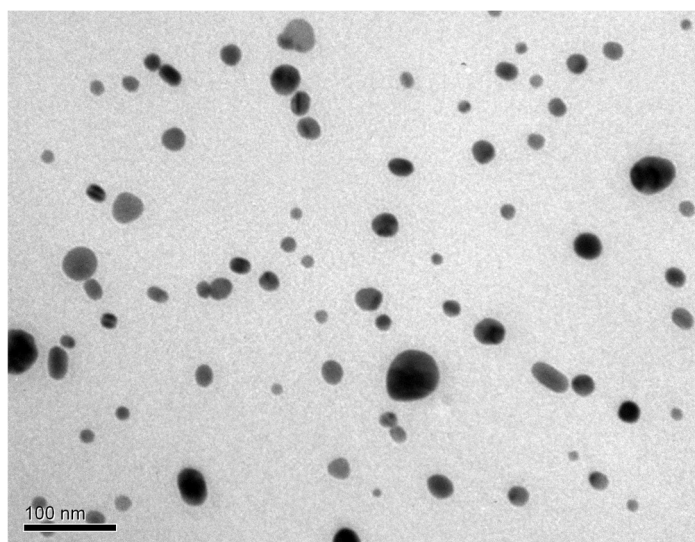


Рис. 3 – Зображення трансмісійної електронної мікроскопії зразка нанокompозиту на основі ПВС, 3,0 % мас. гіалуронової кислоти та 0,1 % мас. наночастинок Ag_2O , отриманих шляхом заморожування протягом 2,5 год

Наступним етапом дослідження було вивчення антимікробної активності криогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту і наночастинок Ag_2O із різним вмістом гіалуронової кислоти щодо умовно-патогенних мікроорганізмів.

Перша група зразків на основі ПВС і Ag_2O містила 3 % мас. гіалуронової кислоти (табл. 1). Контрольні зразки вихідного ПВС та ПВС – 3 % мас. ГК без наночастинок оксиду срібла (№1 і №2) не продемонстрували антимікробного ефекту проти жодного з протестованих мікроорганізмів (*S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*). Це вказує на те, що полімерна матриця на основі ПВС і ГК сама по собі не має антимікробних властивостей щодо вище згаданих мікроорганізмів.

Таблиця 1 – Антимікробна активність криогелевих матеріалів на основі ПВС- 3% мас. ГК з різними концентраціями наночастинок Ag_2O

№	Зразок	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>E.coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1	ПВС	0	0	0	0
2	ПВС- 3,0 % мас. ГК	0	0	0	0
3	ПВС- 3,0 % мас. ГК- 0,05 %мас. Ag_2O	0	10,48±0,26	10,57±0,26	0
4	ПВС- 3,0 % мас. ГК- 0,1 %мас. Ag_2O	12,32±0,28	11,56±0,27	11,91±0,27	0
5	ПВС- 3,0 % мас. ГК- 0,5 %мас. Ag_2O	12,52±0,28	12,89±0,25	13,89±0,28	0
6	ПВС- 3,0 % мас. ГК- 1,0 %мас. Ag_2O	14,91±0,33	14,07±0,32	14,77±0,33	14,82±0,33

Криогелеві матеріали з низькими концентраціями Ag_2O (0,05 % мас., зразок №3): мали помірну антимікробну активність проти *S. epidermidis* (10,48±0,26 мм) і *E. coli* (10,57±0,26 мм) (табл. 1). Зразки № 4 і № 5 із середніми концентраціями Ag_2O (0,1 % мас. – 0,5 % мас.) показали значне підвищення антимікробної активності. Після 24 годин інкубування при температурі 37 °C навколо дисків дослідних зразків № 4 та № 5 спостерігалася чітка зона інгібування росту мікроорганізмів, що свідчить про антибактеріальний ефект (рис. 4).

Зокрема, для грампозитивної бактерії *S. aureus* діаметр зони затримки росту становив 12,32±0,28 мм у зразка з концентрацією 0,1% мас. Ag_2O і 12,52±0,28 мм у зразка з концентрацією 0,5% мас. Ag_2O (табл. 1, рис. 4). Діаметр зони затримки росту щодо *S. epidermidis* становили 11,56±0,27 мм (0,1% мас. Ag_2O) та 12,89±0,25 мм (0,5 % мас. Ag_2O). Антимікробний ефект проти грамнегативних бактерій *E. coli* відмічали на рівні 11,91±0,27 мм (0,1 % мас. Ag_2O) та 13,89±0,58 мм (0,5 % мас. Ag_2O). Щодо *P. aeruginosa* антимікробного ефекту зразків № 4 і № 5 із середніми концентраціями Ag_2O (0,1 % мас. – 0,5 % мас.) не спостерігалось. Найвищу антимікробну активність проти всіх протестованих мікроорганізмів спостерігали за дії криогелевих матеріалів (зразок №6) з високими концентраціями Ag_2O (1,0 % мас.): *S. aureus*: 14,91±0,33 мм, *S. epidermidis*: 14,07±0,32 мм, *E. coli*: 14,77±0,33 мм, *P. aeruginosa*: 14,82±0,33 мм (табл. 1, рис. 4).

Наступна група досліджуваних криогелевих зразків на основі ПВС із різним вмістом Ag_2O містила у своєму складі 5,0 % мас. гіалуронової кислоти (табл. 2). У контрольних зразках (№ 1 і № 2, без наночастинок Ag_2O) не було виявлено антимікробної активності проти жодного з протестованих мікроорганізмів. За дії криогелевих матеріалів з низькими концентраціями Ag_2O (0,05 % мас. Ag_2O , зразок № 3) спостерігалася помірною антимікробна активність проти *S. epidermidis* (11,25±0,27 мм) та *E. coli* (11,35±0,27 мм). Проти *S. aureus* та *P. aeruginosa* ефект був відсутній (табл. 2, рис. 5).

Антимікробна активність підвищувалась за дії криогелевих матеріалів з середніми концентраціями Ag_2O (0,1 % мас. Ag_2O , зразок № 4) для протестованих мікроорганізмів: *S. aureus* 10,94±0,26 мм, *S. epidermidis* 12,80±0,28 мм, *E. coli* 12,13±0,28 мм. Проти *P. aeruginosa* антимікробний ефект зразка № 4 (0,1 % мас. Ag_2O) був відсутній. Подальше збільшення концентрації Ag_2O до 0,5 % мас. (зразок №5) призвело до значного підвищення антимікробної активності: *S. aureus* 12,65±0,28 мм, *S. epidermidis* 15,39±0,48 мм, *E. coli* 13,80±0,60 мм, *P. aeruginosa* 10,37±0,26 мм. Найвища концентрація Ag_2O (1,0 % мас. Ag_2O , зразок № 6) продемонструвала максимальний антимікробний ефект: *S. aureus* 13,48±0,58 мм, *S. epidermidis* 16,20±0,50 мм, *E. coli* 15,36±0,48 мм, *P. aeruginosa* 11,51±0,27 мм. Зони інгібування росту для всіх мікроорганізмів досягли максимальних значень, що підтверджує потужну антимікробну активність наночастинок срібла при високих концентраціях (рис. 5).

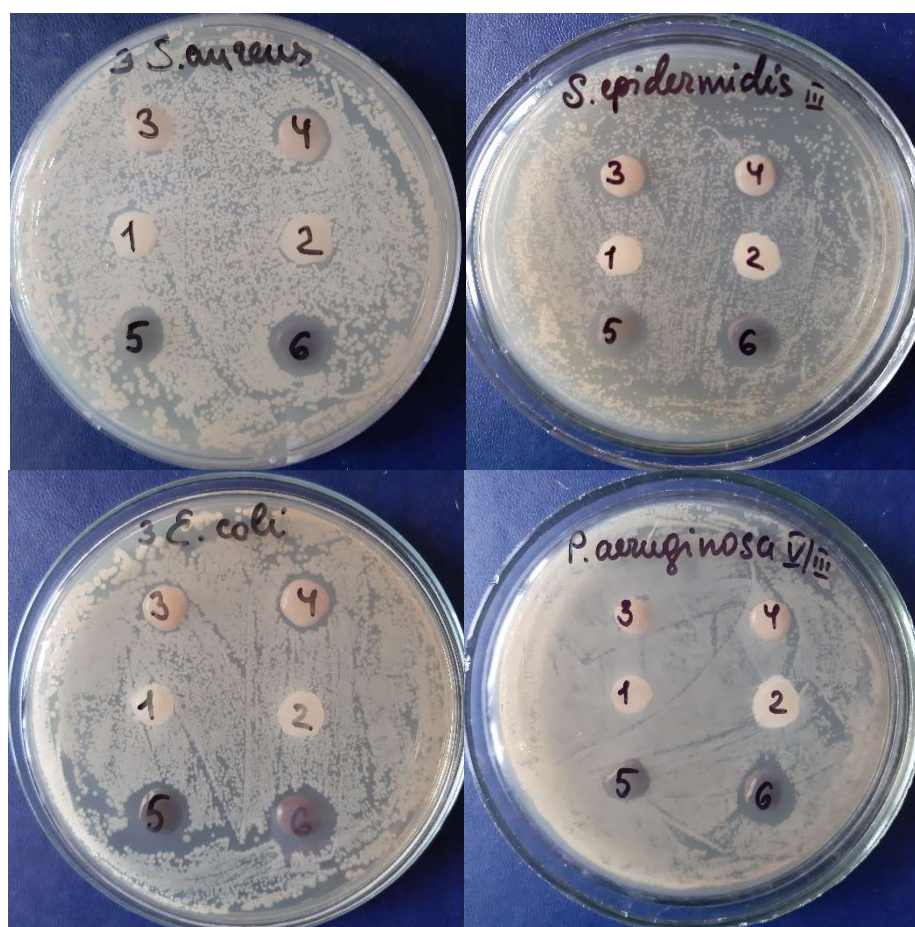


Рис. 4 – Антимікробна активність кріогелевих матеріалів на основі ПВС, наночастинок Ag_2O та 3,0 % мас. гіалуронової кислоти

Таблиця 2 – Антимікробна активність кріогелевих матеріалів на основі ПВС- 5,0 % мас. ГК з різними концентраціями наночастинок Ag_2O

№	Зразок	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>E.coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1	ПВС	0	0	0	0
2	ПВС- 5,0 % мас. ГК	0	0	0	0
3	ПВС- 5,0 % мас. ГК- 0,05 %мас. Ag_2O	0	11,25±0,27	11,35±0,27	0
4	ПВС- 5,0 % мас. ГК- 0,1 %мас. Ag_2O	10,94±0,26	12,80±0,28	12,13±0,28	0
5	ПВС- 5,0 % мас. ГК- 0,5 %мас. Ag_2O	12,65±0,28	15,39±0,48	13,80±0,28	10,37±0,26
6	ПВС- 5,0 % мас. ГК- 1,0 %мас. Ag_2O	13,48±0,28	16,20±0,50	15,36±0,48	11,51±0,27

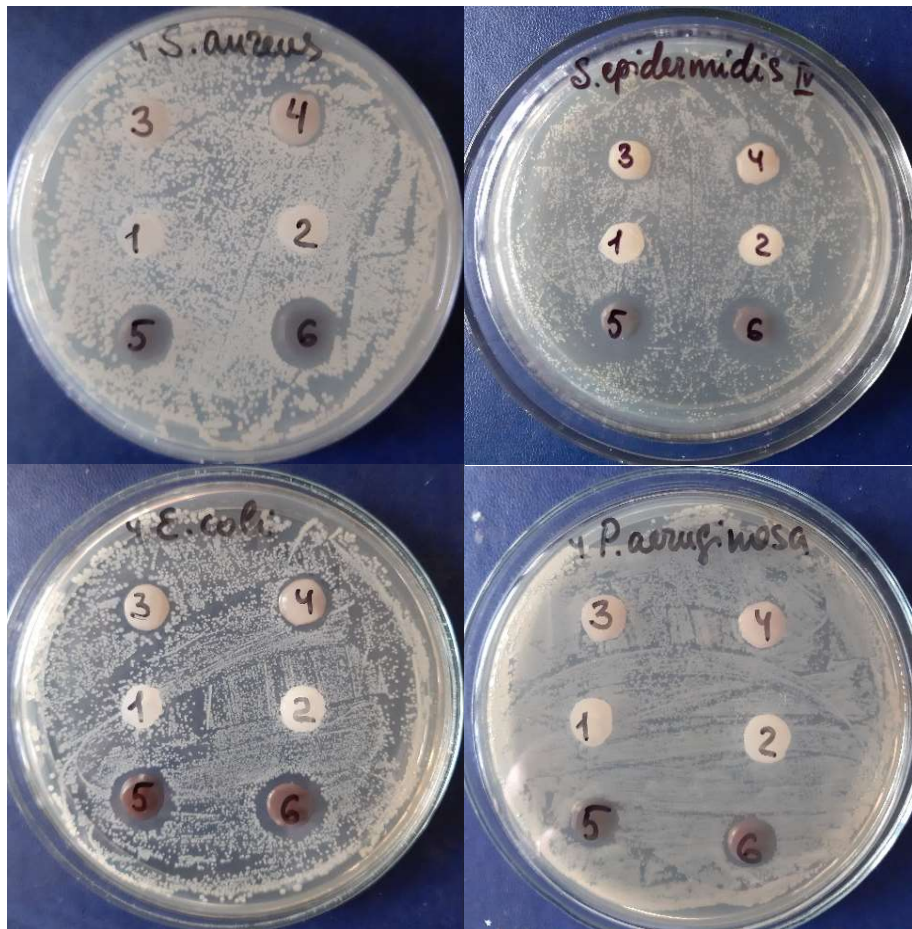


Рис. 5 – Антимікробна активність криогелевих матеріалів на основі ПВС, наночастинок Ag_2O та 5,0 % мас. гіалуронової кислоти

Третя група криогелевих матеріалів на основі ПВС із різним вмістом наночастинок Ag_2O , яка містила 9,0 % мас. гіалуронової кислоти (табл. 3) продемонструвала тенденцію щодо зростання антимікробної активності зразків при підвищенні концентрації наночастинок срібла аналогічну зразкам із вищим вмістом ГК – 3,0 та 5,0 % мас. Проте було зафіксовано певні відмінності у значеннях зон інгібування росту для різних мікроорганізмів.

Таблиця 3 – Антимікробна активність криогелевих матеріалів на основі ПВС- 9,0 % мас. ГК з різними концентраціями наночастинок Ag_2O

№	Зразок	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>E.coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1	ПВС	0	0	0	0
2	ПВС - 9,0 % мас. ГК	0	0	0	0
3	ПВС - 9,0 % мас. ГК- 0,05 %мас. Ag_2O	0	13,05±0,28	10,92±0,26	0
4	ПВС - 9,0 % мас. ГК- 0,1 %мас. Ag_2O	11,97±0,27	13,56±0,28	10,95±0,26	0
5	ПВС - 9,0 % мас. ГК- 0,5 %мас. Ag_2O	11,59±0,27	15,70±0,48	10,58±0,26	0
6	ПВС - 9,0 % мас. ГК- 1,0 %мас. Ag_2O	12,80±0,28	17,41±0,52	15,11±0,48	0

Контрольні зразки (№ 1 і № 2), що не містили наночастинок оксиду срібла, не проявили антимікробної активності проти жодного з протестованих мікроорганізмів (*S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*), підтверджуючи відсутність бактерицидних властивостей вихідної криогелевої матриці. Зразок №3 із низькою концентрацією Ag_2O (0,05 % мас.) проявив помірну антимікробну активність щодо *S. epidermidis* (13,05±0,28 мм) і *E. coli* (10,92±0,26 мм). Проте проти *S. aureus* та *P. aeruginosa* антимікробний ефект не спостерігався (табл. 3, рис. 6). Зразки № 4 і № 5 криогелевих матеріалів з концентрацією 0,1 % мас. та 0,5 % мас. Ag_2O також демонстрували помірну антимікробну дію. Зокрема, для грампозитивної бактерії *S. aureus* діаметр зон затримки росту складав 11,97±0,27 мм (0,1 % мас. Ag_2O) і 11,59±0,27 мм (0,5 % мас. Ag_2O), для *E. coli* 10,95±0,26 мм (0,1 % мас. Ag_2O) і 10,58±0,26 мм (0,5 % мас. Ag_2O). Дещо вищі показники були зафіксовані щодо грампозитивної бактерії *S. epidermidis* 13,56±0,28 мм (0,1 % мас. Ag_2O) і 15,70±0,48 мм (0,5 % мас. Ag_2O). Щодо грамнегативної бактерії *P. aeruginosa* антимікробний ефект був відсутній для обох зразків (табл. 3, рис. 6). Зразок №6 із найвищою концентрацією Ag_2O (1,0 % мас.) продемонстрував максимальну антимікробну активність: для *S. aureus* 12,80±0,28 мм, для *S. epidermidis* 17,41±0,52 мм, для *E. coli* 15,11±0,48 мм. Однак, проти *P. aeruginosa* антимікробний ефект не спостерігався.

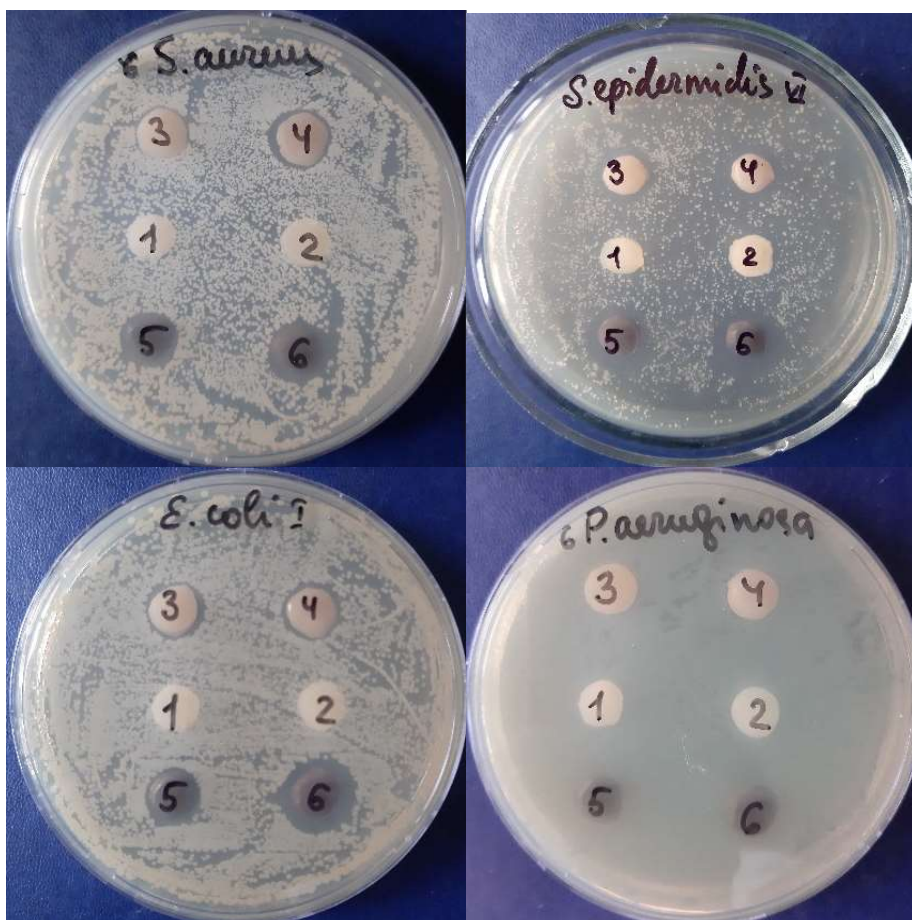


Рис. 6 – Антимікробна активність криогелевих матеріалів на основі ПВС, наночастинок Ag_2O та 9,0 % мас. гіалуронової кислоти.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що антимікробна активність залежала від концентрації наночастинок оксиду срібла. Мікроорганізми *S. aureus* і *S. epidermidis* виявилися чутливішими до наночастинок Ag_2O навіть за низьких концентрацій. Для *S. epidermidis* активність була значно вищою, ніж для інших тестових мікроорганізмів. Грамнегативна бактерія *E. coli* також проявляла чутливість до наночастинок Ag_2O , причому зі зростанням їх концентрації спостерігалось збільшення діаметрів зон інгібування росту. Грамнегативна бактерія *P. aeruginosa* залишалася нечутливою до впливу наночастинок Ag_2O . У зразках ПВС- Ag_2O із 9 % мас. ГК діаметри зон інгібування росту були дещо нижчими, ніж у зразках із 5 та 3 % мас. ГК.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України (Розробка біополімерних нанокompозитних матеріалів для стимуляції регенерації живих тканин та загоєння ран. Ідентифікатор заявки 2023.05/0009).

Список використаної літератури

1. Демченко В.Л., Куницький Д.В., Маринін А.І., Рибальченко Н.П., Заремба П.Ю. Особливості структури та властивості полімерних мембран на основі полівінілового спирту і наночастинок Ag/ZnO. *Наукові праці НУХТ*. 2025. Т. 31, № 5. С. 236–246. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-5-19>
2. 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. Полімерні гідрогелі на основі полівінілового спирту і оксиду цинку. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2025. № 3. С. 70–77. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2025.340380>
3. Demchenko V., Mamunya Ye., Sytnyk I., Iurzhenko M., Rybalchenko N., Zahorodnia S., Demchenko O., Rushkovsky S., Kunytskyi D., Zeng D., Talaniuk V., Musiol M. Wound Dressing Cryogel Materials Based on Poly(vinyl alcohol), Hyaluronic Acid, and Ag₂O Nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2025. Vol. 17. P. 53312–53326. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c14960>
4. Lozinsky V.I. Cryogels on the basis of natural and synthetic polymers: preparation, properties and application. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, No 3. P. 553. <https://doi.org/10.1070/RC2002v071n06ABEH000720>
5. Lozinsky V.I. Cryogels: macroporous polymeric materials with biomedical and biotechnological applications. *Biomacromolecules*. 2008. Vol. 9, No 10. P. 2719–2727.
6. Kumar A., Srivastava A. Polymeric cryogels: preparation, properties and applications. *Gels*. 2023. Vol. 11, No 8. P. 634.
7. Wang M., Bai J., Shao K., Tang W., Zhao X., Lin D., Huang S., Chen C., Ding Z., Ye J. Poly(vinyl alcohol) Hydrogels: The Old and New Functional Materials. *International Journal of Polymer Science*. 2021. Vol. 2021. P. 1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/2225426>
8. Wang X., Wu P., Hu X., You Ch., Guo R., Shi H., Guo S., Zhou H., Yu Ch., Zhang Y., Han Ch. Polyurethane membrane/knitted mesh-reinforced collagen-chitosan bilayer dermal substitute for the repair of full-thickness skin defects via a two-step procedure. *J. Mech. Behav. Biomed*. 2016. Vol. 56. P. 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.021>
9. Case C.L., Johnson T.R. *Laboratory experiments in microbiology*. (San Francisco, CA: Benjamin Cummings). 1984. 126 p.
10. Rybalchenko N.P., Demchenko V.L., Hnatiuk T.T., Vasyliuk O.M., Iurzhenko M.V., Rybalchenko T.V., Sytnyk I.O., Shtepa D.V., Marynin A.I. Antimicrobial effect of biopolymer packaging materials with silver nanoparticles for food storage. *Microbiological journal*. 2024. Vol. 6. P. 30–41. <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.06.030>

Valerii Demchenko, Nataliia Rybalchenko, Maksym Yurzhenko, Dmytro Kunytskyi, Andrii Marynin, Volodymyr Dolgoshey, Viktoriia Ovsiankina, Oleksandr Buryanov

FEATURES OF FORMATION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOCOMPOSITE POLYMER CRYOGEL MATERIALS

Environmental disasters and man-made accidents often have long-term consequences: water and air pollution, soil degradation, and a decrease in the quality of life of the population. That is why the issue of preventing such events is becoming one of the key tasks of modern society. Scientists are looking for new approaches to risk management, implementing effective control systems, and increasing the level of environmental responsibility. Innovative technologies and scientific developments aimed at improving the environment and public health play a special role in this process.

The urgency of creating a new type of dressing material is associated with the increase in the number of patients who suffer from wounds of various infectious origins every year. Traditional dressing materials, which have been used in medicine for a long time, have a number of disadvantages. In particular, they do not always effectively absorb wound exudate and can stick to the wound surface, which complicates the dressing process and can cause additional pain or tissue damage.

In this regard, there is growing interest in modern materials for wound treatment, in particular, polymer hydrogels. Such materials are considered promising, since they are able to create optimal conditions for healing. Hydrogels should be biocompatible and non-toxic, retain moisture well, ensure the absorption of wound secretions and at the

same time maintain a moist environment that promotes faster tissue regeneration.

In addition, an important characteristic of such materials is the presence of antimicrobial properties. This allows to reduce the risk of wound infection and increase the effectiveness of treatment, which makes polymer hydrogels one of the promising areas of development of modern dressings.

The work is devoted to the formation and study of cryogel materials based on polyvinyl alcohol (PVA), hyaluronic acid (HA) and Ag₂O nanoparticles. Cryogel materials were formed by reducing Ag⁺ ions in the polymer matrix to metallic silver nanoparticles using hyaluronic acid upon heating with subsequent crosslinking of the samples by freeze-thaw. The structure of cryogel materials was studied by the method of wide-angle X-ray scattering and the presence of Ag₂O particles in the studied polymer systems was confirmed. It was found that in the polymer systems PVA-HA ultradisperse Ag₂O nanoparticles with an average size of about 5 nm are formed, statistically distributed in the volume of the cryogel. It was found that polymer cryogel systems exhibit antimicrobial activity against gram-positive *Staphylococcus aureus*, *S. epidermidis* and gram-negative *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* microorganisms. It was shown that an increase in the concentration of silver oxide nanoparticles in the composite leads to an increase in the antimicrobial activity of the materials. The largest zones of inhibition of the growth of microorganisms were observed for samples with a content of 1.0 wt. % Ag₂O. The results obtained indicate the prospects for using the developed cryogel materials as a basis for modern wound dressings with bactericidal properties.

Keywords: technogenic and environmental safety, biomedicine, cryogel, silver oxide particles, structure, antimicrobial activity

References

1. Demchenko V.L., Kunytskyi D.V., Marynin A.I., Rybalchenko N.P., Zaremba P.Yu. (2025). Osoblyvosti struktury ta vlastyvoli polimernykh membran na osnovi polivinilovoho spyrtu i nanochastynok Ag/ZnO. [Structural features and properties of polymer membranes based on polyvinylalcohol and Ag/ZnO nanoparticles] // *Scientific Works of National University of Food Technologies*. Vol. 31, No 5. P. 236–246. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-5-19> [in Ukrainian]
2. Demchenko V.L., Zahorodnia S.D., Rybalchenko N.P., Zaremba P.Yu., 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 [Polymer hydrogels based on polyvinyl alcohol and zinc oxide] // *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical engineering, ecology and resource saving»*. No 3. P. 70–77. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2025.340380> [in Ukrainian]
3. Demchenko V., Mamunya Ye., Sytnyk I., Iurzhenko M., Rybalchenko N., Zahorodnia S., Demchenko O., Rushkovsky S., Kunytskyi D., Zeng D., Talaniuk V., Musiol M. (2025). Wound Dressing Cryogel Materials Based on Poly(vinyl alcohol), Hyaluronic Acid, and Ag₂O Nanoparticles // *ACS Applied Materials & Interfaces*. Vol. 17. P. 53312–53326. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c14960>
4. Lozinsky V.I. (2019). Cryogels on the basis of natural and synthetic polymers: preparation, properties and application // *Applied Sciences*. Vol. 9, No 3. P. 553. <https://doi.org/10.1070/RC2002v071n06ABEH000720>
5. Lozinsky V.I. (2008). Cryogels: macroporous polymeric materials with biomedical and biotechnological applications. *Biomacromolecules*. Vol. 9, No 10. P. 2719–2727.
6. Kumar A., Srivastava A. (2023). Polymeric cryogels: preparation, properties and applications. *Gels*. Vol. 11, No 8. P. 634.
7. Wang M., Bai J., Shao K., Tang W., Zhao X., Lin D., Huang S., Chen C., Ding Z., Ye J. (2021). Poly(vinyl alcohol) Hydrogels: The Old and New Functional Materials. *International Journal of Polymer Science*. Vol. 2021. P. 1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/2225426>
8. Wang X., Wu P., Hu X., You Ch., Guo R., Shi H., Guo S., Zhou H., Yu Ch., Zhang Y., Han Ch. (2016). Polyurethane membrane/knitted mesh-reinforced collagen-chitosan bilayer dermal substitute for the repair of full-thickness skin defects via a two-step procedure. *J. Mech. Behav. Biomed*. Vol. 56. P. 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.021>
9. Case C.L., Johnson T.R. (1984). *Laboratory experiments in microbiology*. (San Francisco, CA: Benjamin Cummings). 126 p.
10. Rybalchenko N.P., Demchenko V.L., Hnatiuk T.T., Vasyliuk O.M., Iurzhenko M.V., Rybalchenko T.V., Sytnyk I.O., Shtepa D.V., Marynin A.I. (2024). Antimicrobial effect of biopolymer packaging materials with silver nanoparticles for food storage. *Microbiological journal*. Vol. 6. P. 30–41. <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.06.030>