

PACS numbers: 61.05.cf, 61.25.hp, 62.23.Pq, 81.40.Jj, 82.35.Np, 83.80.Hj, 87.85.Rs

Структура та властивості полімерних кріогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту та наночастинок Ag_2O

В. Л. Демченко¹, Н. П. Рибальченко², М. В. Юрженко¹,
Д. В. Куницький¹, А. І. Маринін³, В. Б. Долгошей⁴,
В. О. Овсянкіна⁴, Т. В. Рибальченко⁵, О. А. Бур'янов⁶

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна

²Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України,
вул. Академіка Заболотного, 154,
03143 Київ, Україна

³Національний університет харчових технологій,
вул. Володимирська, 68,
01601 Київ, Україна

⁴Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Берестейський, 37,
03056 Київ, Україна

⁵Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 60,
01601 Київ, Україна

⁶Національний медичний університет ім. О. О. Богомольця,
вул. Бульварно-Кудрявська, 27,
01601 Київ, Україна

Сформовано полімерні кріогелеві матеріали на основі полівінілового спирту, поліглутамінової чи гіялуринової кислоти (ГК) та наночастинок Ag_2O . Дослідження кріогелевих нанокompозитних матеріалів методом ширококутного розсіювання Рентгенових променів показали, що в процесі формування зразків відбувається відновлення йонів Аргентуму в полімерних системах ПВС– Ag^+ –ГК з утворенням наночастинок Ag_2O . Виявлено, що зразки ПВС–3% мас. ГК мають найбільші значення водовібрання. Показано, що розривна міцність і відносна деформація зразків на основі полівінілового спирту та гіялуринової кислоти поліпшуються зі збільшенням концентрації наночастинок Ag_2O до 0,5% мас. Сформовані полімерні кріогелі проявляють антимікробну дію щодо

умовно-патогенних мікроорганізмів: *S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*.

Polymeric cryogel materials based on polyvinyl alcohol, polyglutamic or hyaluronic acid (HA) and Ag₂O nanoparticles are formed. Studies of cryogel nanocomposite materials by the method of wide-angle x-ray scattering show that during the formation of samples, silver ions are reduced in the polymer systems PVA–Ag⁺–HA with the formation of Ag₂O nanoparticles. As found, PVA–3 wt.% HA samples have the highest water-absorption values. As shown, the tensile strength and relative deformation of samples based on polyvinyl alcohol and hyaluronic acid improve with an increase in the concentration of Ag₂O nanoparticles to 0.5 wt.%. The formed polymer cryogels exhibit antimicrobial activity against opportunistic pathogenic microorganisms: *S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*.

Ключові слова: полівініловий спирт, гіялууронова кислота, кріогелеві матеріали, наночастинки Ag₂O, структура, морфологія, механічна міцність, антимікробна активність.

Key words: hyaluronic acid, polyvinyl alcohol, cryogel materials, Ag₂O nanoparticles, structure, morphology, mechanical strength, antimicrobial activity.

(Отримано 23 січня 2026 р.; після доопрацювання — 22 травня 2026 р.)

1. ВСТУП

Останнім часом зростає інтерес до вивчення структури та властивостей полімерних нанокомпозитів, що містять наночастинки різних металів чи оксидів металів, через їхні унікальну структуру, морфологію, фізико-хімічні та біологічні властивості [1–4]. Створення металонаповнених нанокомпозитів з використанням біополімерів [5] є актуальним напрямом наукових досліджень, що зумовлено широкими можливостями практичного застосування їх.

Полімерні гідрогелі характеризуються рядом переваг і належать до найбільш перспективних матеріалів для використання в біомедичній сфері, зокрема як ранові покриття, контактні лінзи, системи контрольованої доставки лікарських препаратів тощо [6]. Для біомедичного застосування гідрогелі мають відповідати низці вимог, серед яких — відсутність токсичності, висока біосумісність, здатність до біодеструкції та зручність технологічного оброблення.

Полівініловий спирт (ПВС) нині є одним із найбільш використовуваних синтетичних полімерів для створення гідрогелевих матеріалів. Він відзначається доброю плівкотвірною здатністю, сумісністю з полімерними компонентами різної природи, водороз-

чинністю, неканцерогенними властивостями та високою біосумісністю [7]. Разом з тим, використання ПВС-гідрогелів у медицині та біомедичних дослідженнях обмежується недостатньою механічною міцністю їх, особливо у гідратованому стані [8].

У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка гідрогелевих композитів шляхом поєднання полівінілового спирту з природними полімерними сполуками, зокрема полісахаридами [9], у різних масових співвідношеннях з метою формування матеріалів з поліпшеною структурою та регульованими фізико-механічними й біологічними характеристиками [10].

Для підвищення фізико-механічних властивостей гідрогелевих композитних матеріалів застосовують різні методи зшивання полімерних ланцюгів. Найбільш поширеними є фізичні методи [11, 12] і хемічні методи [13], що передбачають використання зшивальних агентів (борної кислоти, епіхлоргідрину, глутаральдегіду), а також методи радіаційного опромінення [14]. Особливе місце серед методів структурування полімерних систем посідає метод кріотропного гелеутворення (заморожування–розморожування). Цей підхід базується на формуванні фізично зшитої тривимірної сітки полімеру в процесі кристалізації розчинника та подальшої агрегації макромолекул у міжкристалітних ділянках. Формування кріогелів таким методом уможливлює уникати використання токсичних хемічних зшивальних агентів, що є критично важливим для матеріалів біомедичного призначення. Одержані кріогелі характеризуються унікальною пористою морфологією, високою проникністю та здатністю до значного водоувібрання. Такі властивості є особливо важливими для створення ранових покриттів і біомедичних імплантатів, де необхідне ефективне видалення ексудату та забезпечення газообміну.

Метою даної роботи було дослідження водоувібрання, структури, морфології, механічних та антимікробних властивостей кріогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту та наночастинок Ag_2O , одержаних методом заморожування–розморожування. Вибір оксиду Аргентуму (Ag_2O) як функціонального наповнювача зумовлений його специфічною реакційною здатністю та пролонгованим вивільненням йонів Аргентуму у водному середовищі, що забезпечує стабільний антибактеріальний ефект за мінімальної цитотоксичності, порівняно з чисто металевими наночастинами. Водночас систематичні дослідження впливу Ag_2O на структуру, фізико-механічні й антимікробні властивості кріогелів на основі ПВС і біополімерів залишаються обмеженими.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для формування кріогелевих полімерних матеріалів використо-

ували такі реагенти виробництва Sigma-Aldrich: гранули полівінілового спирту марки 17-99 ($M \approx 74,800$ г/моль), високомолекулярну гіялуранову кислоту (ГК) ($M \approx 2$ МДа), високомолекулярну γ -поліглутамінову кислоту (ПГК) (молекулярна маса знаходиться у діапазоні 1,5–2,5 МДа), нітрат Аргентуму (169,87 г/моль), очищену дистильовану воду.

При формуванні зразків спочатку полівініловий спирт розчиняли у воді за температури у 95°C , а гіялуранову чи поліглутамінову кислоту — за температури у 20°C , перемішуючи водні розчини впродовж 30 хвилин. Далі розчин гіялуранової чи поліглутамінової кислоти додавали до розчину ПВС в різних співвідношеннях і перемішували впродовж 30 хвилин за температури у 85°C . Вміст гіялуранової чи поліглутамінової кислоти в криогелевому композиті варіювався від 3 до 9% мас. Потім готували 0,2 М-водні розчини нітрату Аргентуму та додавали до суміші композитів ПВС–ГК або ПВС–ПГК за температури у 85°C та перемішували впродовж 60 хвилин. Вміст наночастинок Ag_2O , сформованих *in situ* в криогелевих композитах становив 0,05, 0,1, 0,5, 1% мас. рН розчинів становив приблизно 6,8. На наступному етапі розчини охолоджували до 60°C , розливали в поліетиленові зір-пакети розміром 10×12 см та охолоджували до температури у 20°C . Далі проводили зшивання гелевих розчинів шляхом циклічного заморожування їх за температури $T = -20^\circ\text{C}$ (витримка впродовж 5 год. за $T = -20^\circ\text{C}$, 5 год. за $T = +20^\circ\text{C}$, 5 год. за $T = -20^\circ\text{C}$ ($5^{\text{год}^-} - 5^{\text{год}^+} - 5^{\text{год}^-}$). Одержані криогелі зберігали за кімнатної температури. Товщина зразків становила 5 мм.

Водоувібрання (ВУ) криогелевих матеріалів визначали за формулою: $\text{ВУ} [\%] = (m - m_0)/m_0 \cdot 100$, де m — маса зразка в певний момент його перебування у воді [г], m_0 — маса зразка до поміщення його у воду [г].

Зразки розміром 30×30 мм і товщиною у 5 мм зважували з точністю до 0,001 г і поміщали у посудини з дистильованою водою для набухання. Зразки зважували через певні проміжки часу: 0, 5, 15, 30 хв. та 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 годин.

Структуру досліджуваних матеріалів вивчали методом широкутнього рентгенівського розсіяння на дифрактометрі XRD-7000 (Shimadzu, Японія), рентгенооптичну схему якого було налаштовано за методом Дебая–Шеррера на проходження первинного променя через досліджуваний зразок, з використанням CuK_α -випромінювання ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) і графітового монохроматора. Дослідження проводили методом автоматичного покрокового сканування в режимі $U = 30$ кВ, $I = 30$ мА в діапазоні кутів розсіяння (2θ) від $3,0$ до 50 градусів; час експозиції становив 5 с. Температура під час досліджень становила $T = 293 \pm 2 \text{ K}$ [15].

Розмір наночастинок Ag_2O та статистичний розподіл їх у полі-

мерній матриці досліджували за допомогою просвітлювального електронного мікроскопа JEM-1230 (JEOL, Японія) з роздільною здатністю у 0,2 нм.

Механічну міцність матеріалів досліджували за допомогою випробувальної машини AGS-10kNX (Shimadzu, Японія) в режимі одновісного розтягування за $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Антимікробну активність кріогелевих матеріалів вивчали щодо референсних штамів умовно-патогенних мікроорганізмів *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25923 та *Staphylococcus epidermidis* (*S. epidermidis*) ATCC 12228 як модельних грам-позитивних бактерій, а також *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25922 та *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) ATCC 27853 як модельних грам-негативних бактерій. Бактеріяльні штами було одержано з Української колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України. Антимікробну активність оцінювали за допомогою модифікованого методу диско-дифузії на агарі Мюллера–Хінтона. Зразки діаметром у 10 мм поміщали на поверхню агару. Пластини інкубували за 37°C впродовж 24 годин. Наявність зони, вільної від мікроорганізмів, навколо зразків свідчила про антимікробну активність. Було поміряно діаметри зон інгібування [мм].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіза досліджуваних кріогелевих матеріалів показала, що водоувібрання зразків на основі ПВС із вмістом 3% мас. гіялуринової кислоти зі збільшенням часу витримування їх у дистильованій воді послідовно зростає та впродовж 12 год. становить 17% (рис. 1, а, крива 1). Збільшення вмісту гіялуринової кислоти у складі ПВС приводить до зменшення водоувібрання зразків. Для зразків на основі ПВС, що містить 5 і 9% мас. гіялуринової кислоти величина водоувібрання зразків упродовж 12 год. становить 12 і 7% відповідно (рис. 1, а, криві 2, 3).

Для зразків на основі ПВС і ГК із вмістом 1% мас. наночастинок Ag_2O зі збільшенням концентрації гіялуринової кислоти водоувібрання зразків зростає. Для зразків ПВС–3% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , ПВС–5% мас. ГК–1% мас. Ag_2O та ПВС–9% мас. ГК–1% мас. Ag_2O водоувібрання впродовж 12 год. становить 6, 14 і 19% відповідно (рис. 1, б, криві 1–3).

Аналіза ширококутніх рентгенівських дифрактограм досліджуваних зразків показала, що гіялуринова кислота, сформована у вигляді плівки, має аморфну структуру, яку становлять як основні макроланцюги, так і їхні бічні відгалуження (з функціональними групами COONa , COOH). На це вказує прояв на рентгенівській дифрактограмі цього поліелектроліту (рис. 2, а, крива 1)

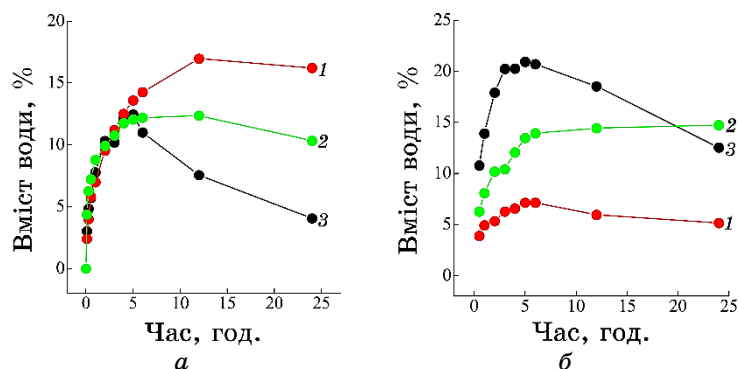


Рис. 1. Криві водоувібрання кріогелів на основі полівінілового спирту та гіялуранової кислоти: (а) 1 — ПВС–3% мас. ГК, 2 — ПВС–5% мас. ГК, 3 — ПВС–9% мас. ГК; (б) 1 — ПВС–3% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , 2 — ПВС–5% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , 3 — ПВС–9% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , одержаних методом циклічного заморожування–розморожування впродовж часу $5^{\text{год}}-5^{\text{год}}+5^{\text{год}}-1$.

двох асиметричних дифракційних максимумів дифузного типу (аморфних гало) різної інтенсивності. Водночас кутове положення ($2\theta_{\text{max}}$) 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) та бічному відгалуженні, більш інтенсивне аморфне гало ($2\theta_{\text{max}} \approx 20,4^\circ$) характеризує близький порядок за трансляції у просторі (об'ємі зразка ГК) фрагментів основних макроланцюгів, а менш інтенсивне ($2\theta_{\text{max}} \approx 9,6^\circ$) — близький порядок за розміщення у просторі фрагментів бічних відгалужень.

Зразки полівінілового спирту із різним вмістом гіялуранової кислоти характеризуються напівкристалічною структурою. Це підтверджується дифракційними максимумами при $2\theta_{\text{max}} \approx 11,2^\circ$, $19,5^\circ$, $23,0^\circ$, $40,8^\circ$, які відповідають кристалографічним площинам із Міллеровими індексами (100), (101), (200), (201) (рис. 2, а, криві 2–4) [16].

Проведена оцінка відносного рівня кристалічності ($X_{\text{кр}}$) зразка ПВС–3% мас. ГК згідно з рівнянням [17]: $X_{\text{кр}} = Q_{\text{кр}}(Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}})^{-1} \cdot 100$, де $Q_{\text{кр}}$ — площа дифракційних максимумів, які характеризують кристалічну структуру полімеру, а $Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}}$ — площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіяння ($2\theta_1-2\theta_2$), в якому має прояв аморфно-кристалічна структура полімеру, показала, що він становить близько 48%.

Аналіза ширококутних рентгенівських дифрактограм зразків на основі полівінілового спирту із різним вмістом гіялуранової кислоти та наночастинок оксиду Аргентуму у 1% мас. показала

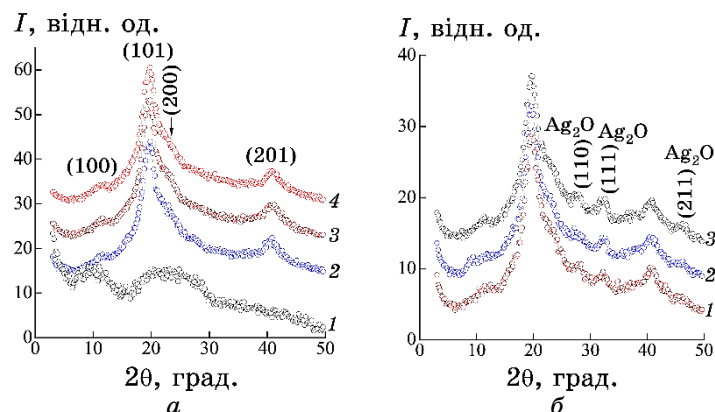


Рис. 2. Ширококутні рентгенівські дифрактограми: (а) 1 — гіялуранової кислоти, 2 — ПВС–3% мас. ГК, 3 — ПВС–5% мас. ГК, 4 — ПВС–9% мас. ГК; (б) 1 — ПВС–3% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , 2 — ПВС–5% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , 3 — ПВС–9% мас. ГК–1% мас. Ag_2O , одержаних методом циклічного заморожування–розморожування впродовж часу $5^{\text{год}^-} - 5^{\text{год}^+} - 5^{\text{год}^-}$.

присутність дифракційних максимумів при $2\theta_{\text{max}} \cong 28,0^\circ$, $32,2^\circ$, $46,2^\circ$, що відповідають площинам (110), (111) і (211) відповідно (рис. 2, б, криві 1–3). Вони відповідають гранецентрованій кубічній структурі й узгоджуються з попередніми дослідженнями частинок Ag_2O [18].

Дослідження морфології зразків на основі полівінілового спирту та гіялуранової кислоти показали, що під час формування криогелевих матеріалів утворюються наночастинки оксиду Аргентуму із середнім розміром, меншим за 10 нм, які статистично розподілені у полімерній матриці (рис. 3).

Аналіза графіка залежності напруження–деформація криогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту та гіялуранової кислоти з різним вмістом наночастинок Ag_2O , одержаних упродовж часу $5^{\text{год}^-} - 5^{\text{год}^+} - 5^{\text{год}^-}$, показала, що зі збільшенням концентрації наночастинок Аргентуму від 0,05 до 0,5% мас. механічна міцність і деформація зразків закономірно зростають (рис. 4, криві 1–4). Величини розривної міцності та деформації для зразка ПВС–3% мас. ГК–0,5% мас. Ag_2O є найбільшими й становлять 233,07 кПа і 157,03% відповідно. Слід зазначити, що за максимальної концентрації наночастинок Ag_2O (1% мас.) у полімерній матриці механічні характеристики зразків різко погіршуються та стають подібними до вихідної полімерної матриці ПВС–ГК. Поліпшення механічних властивостей композитів із втіленням наночастинок Ag_2O до 0,5% мас. можна пояснити утворенням додаткових гідрогенових зв'язків між наночастинка-

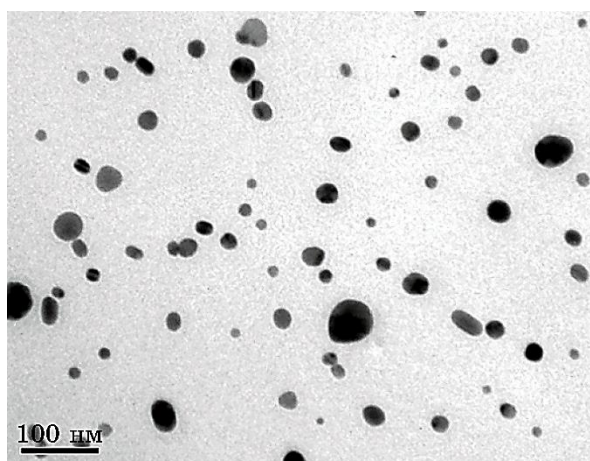


Рис. 3. Зображення у трансмісійному електронному мікроскопі нанокмпозиту на основі ПВС, гіялуранової кислоти та наночастинок оксиду Аргентуму.³

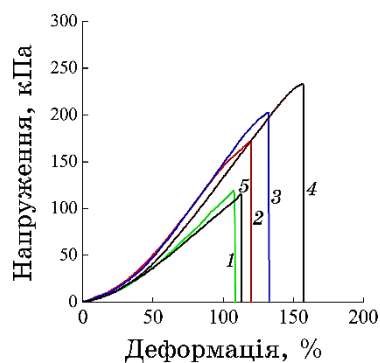


Рис. 4. Механічна міцність зразків на основі полівінілового спирту та гіялуранової кислоти з різним вмістом наночастинок Ag_2O : 1 — 0% мас., 2 — 0,05% мас., 3 — 0,1% мас., 4 — 0,5% мас., 5 — 1% мас., одержаних методом циклічного заморожування-розморожування впродовж часу $5^{\text{год-}}-5^{\text{год+}}-5^{\text{год-}}$.⁴

ми та полімерною матрицею, що сприяє підвищенню цупкості та еластичності. Водночас пониження механічних показників із досягненням концентрації нанонаповнювача у 1% мас. може бути пов'язане з ефектом агрегації наночастинок, що призводить до формування дефектів у структурі кріогелю та виникнення локальних центрів напруження, які пришвидшують руйнування матеріалу.

Наступним етапом дослідження було вивчення антимікробної

активності кріогелевих матеріалів із наночастинками оксиду Аргентуму щодо умовно-патогенних мікроорганізмів.

Результати досліджень антимікробної активності зразків ПВС–3% мас. ГК з наночастинками Ag_2O наведено в таблиці. Контрольні зразки (без наночастинок срібла) не продемонстрували антимікробного ефекту щодо жодного з протестованих мікроорганізмів (*S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*) (табл., зразки №1, №2). Це вказує на те, що полімерна матриця ПВС–ГК не проявляє антимікробної активності.

Кріогелеві матеріали з низьким вмістом наночастинок Ag_2O (0,05% мас.) мали помірну антимікробну активність. Діаметри зон затримки росту зразків щодо *S. epidermidis* і *E. coli* становлять $10,48 \pm 0,26$ мм і $10,57 \pm 0,26$ мм відповідно (табл., зразок №3). Зразки із вмістом 0,1 та 0,5% мас. Ag_2O показали значне підвищення антимікробної активності (табл., зразки №4 і №5). Діаметри зон затримки росту зразків щодо грам-позитивної бактерії *S. aureus* становлять $12,32 \pm 0,28$ мм (0,1% мас. Ag_2O) та

ТАБЛИЦЯ. Антимікробна активність кріогелевих матеріалів із різними концентраціями наночастинок Ag_2O .⁵

№	Зразок	<i>S. aureus</i>	<i>S. epidermidis</i>	<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1	ПВС ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	0	0	0	0
2	ПВС–3% мас. ГК ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	0	0	0	0
3	ПВС–3% мас. –ГК– 0,05% мас. Ag_2O ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	0	$10,48 \pm 0,26$	$10,57 \pm 0,26$	0
4	ПВС–3% мас. –ГК– 0,1% мас. Ag_2O ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	$12,32 \pm 0,28$	$11,56 \pm 0,27$	$11,91 \pm 0,27$	0
5	ПВС–3% мас. ГК– 0,5% мас. Ag_2O ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	$12,52 \pm 0,28$	$12,89 \pm 0,25$	$13,89 \pm 0,28$	0
6	ПВС–3% мас. ГК– 1% мас. Ag_2O ($5^{\text{год}^-}$ – $5^{\text{год}^+}$ – $5^{\text{год}^-}$)	$14,91 \pm 0,33$	$14,07 \pm 0,32$	$14,77 \pm 0,33$	$14,82 \pm 0,33$
7	ПВС–3% мас. ПГК– 0,1% мас. Ag_2O (150^{min^-})	$13,45 \pm 0,29$	$16,14 \pm 0,41$	$15,81 \pm 0,41$	$18,03 \pm 0,42$

12,52 ± 0,28 мм (0,5% мас. Ag₂O). Діаметри зон затримки росту зразків щодо *S. epidermidis* становлять 11,56 ± 0,27 мм (0,1% мас. Ag₂O) та 12,89 ± 0,25 мм (0,5% мас. Ag₂O). Антимікробний ефект зразків щодо грам-негативних бактерій *E. coli* відмічали за концентрацій у 0,1 та 0,5% мас. Ag₂O. Діаметри зон затримки росту становили 11,91 ± 0,27 мм і 13,89 ± 0,58 мм відповідно. Антимікробного ефекту для зразків із концентраціями у 0,1 та 0,5% мас. щодо *P. aeruginosa* не спостерігали.

Найвищу антимікробну активність щодо всіх протестованих мікроорганізмів проявляли криогелеві матеріали з високими концентраціями наночастинок Ag₂O (1% мас.). Діаметри зон затримки росту відповідно становили для *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., зразок №6).

Проведена порівняльна аналіза зразків на основі ПВС із різними кислотами, — гіялуроною чи поліглутаміною, — з наночастинами Ag₂O показала, що зразки ПВС-3% мас. ПГК-0,1% мас. Ag₂O проявляють вищу антимікробну активність щодо досліджуваних мікроорганізмів (табл., зразки №4 та №7).

4. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень було сформовано полімерні криогелеві матеріали на основі полівінілового спирту з різним вмістом гіялуронової кислоти та наночастинок Ag₂O за допомогою методу заморожування-розморожування. За допомогою рентгеноструктурної аналізи було підтверджено, що в процесі формування гідроґелів через відновлення солей Аргентуму за допомогою гіялуронової кислоти утворюються наночастинки Ag₂O. Було встановлено, що зразки на основі ПВС з меншим вмістом гіялуронової кислоти (3% мас.) проявляли ліпшу здатність до водоувібрання, ніж зразки із більшим вмістом ГК (5 і 9% мас.). Встановлено, що механічні властивості досліджуваних зразків поліпшуються зі збільшенням концентрації наночастинок Ag₂O до 0,5% мас. Було встановлено, що створені полімерні криогелі проявляють антимікробну дію щодо умовно-патогенних мікроорганізмів, включаючи грам-позитивних (*S. aureus*, *S. epidermidis*) і грам-негативних (*E. coli*, *P. aeruginosa*) бактерій.

Таким чином, одержані результати підтверджують можливість створення багатофункціональних криогелевих матеріалів із регульованими фізико-хімічними та біологічними властивостями. Вони можуть бути використані як перев'язувальні засоби для лікування інфікованих ран.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національно-

го фонду досліджень України «Розробка біополімерних наноконструктивних матеріалів для стимуляції регенерації живих тканин та загоєння ран» (ідентифікатор заявки 2023.05/0009).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. L. Demchenko, S. M. Kobylinskyi, S.V. Riabov, V. I. Shtompel, M. V. Iurzhenko, and N. P. Rybalchenko, *Applied Nanoscience*, **10**, No. 12: 5409 (2020); <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01368-0>
2. V. L. Demchenko, V. I. Shtompel', and S. V. Riabov, *Polymer Science*, **A57**: 635 (2015); <https://doi.org/10.1134/S0965545X15050065>
3. Valeriy Demchenko, Sergii Riabov and Volodymyr Shtompel', *Nanoscale Research Letters*, **12**: Article No. 235 (2017); <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1967-2>
4. V. Demchenko, V. Shtompel', S. Riabov, and E. Lysenkov, *Nanoscale Research Letters*, **10**: 479 (2015); <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1181-z>
5. W. Sikorska, M. Zięba, M. Musioł, M. Kowalczyk, H. Janeczka, P. Chaber, O. Masiuchok, V. Demchenko, V. Talanyuk, M. Iurzhenko, J. E. Puskas, and G. Adamus, *Polymers*, **12**, Iss. 5: 1167 (2020); <https://doi.org/10.3390/polym12051167>
6. Kathrina Lois M. Taaca, Eloise I. Prieto, and Magdaleno R. Vasquez, Jr., *Polymers*, **14**: 2560 (2022); <https://doi.org/10.3390/polym14132560>
7. Valeriy Demchenko, Yevgen Mamunya, Illia Sytnyk, Maksym Iurzhenko, Nataliia Rybalchenko, Svitlana Zahorodnia, Olena Demchenko, Stanislav Rushkovsky, Dmytro Kunytskyi, Donghu Zeng, Viktoriia Talaniuk, and Marta Musioł, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, Iss. 38: 53312 (2025); <https://doi.org/10.1021/acsami.5c14960>
8. G. Singh, A. Lohani, and S. Bhattacharya, *Journal of Fundamental Pharmaceutical Research*, **2**: 35 (2024).
9. Valeriy Demchenko, Polina Zaremba, Nataliia Rybalchenko, Svitlana Zahorodnia, Liubov Artiukh, Taras Rybalchenko, Olena Demchenko, Illia Sytnyk, Donghu Zeng, Serhii Kobylinskyi, Lyudmila Goncharenko, and Maksym Iurzhenko, *Scientific Reports*, **15**: Article No. 35087 (2025); <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18932-9>
10. Mohammad Taghi Khorasani, Alireza Joorabloo, Hassan Adeli, Zohreh Mansoori-Moghadam, and Armaghan Moghaddam, *Carbohydrate Polymers*, **207**: 542 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.021>
11. A. S. Montaser, Mohamed Rehan, Mehrez E. El-Naggar, *International Journal of Biological Macromolecules*, **124**: 1016 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.252>
12. Amin Zeinali, Mohammad Sirousazar, Zeinab Hosseini Dastgerdi, and Farshad Kheiri, *Journal of Macromolecular Science*, **B59**: 263 (2020); <https://doi.org/10.1080/00222348.2019.1709714>
13. Yang Liu, Ying Lv, Meiwen An, Fen Li, Ying Lu, and Jianbo Song, *Journal of Macromolecular Science*, **B58**: 634 (2019); <https://doi.org/10.1080/00222348.2019.1615688>
14. Mohammad Taghi Khorasani, Alireza Joorabloo, Armaghan Moghaddam, Hamidreza Shamsi, and Zohreh Mansoori Moghadam, *International Journal*

- of *Biological Macromolecules*, **114**: 1203 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.010>
15. Liubov Matkovska, Maksym Iurzhenko, Yevgen Mamunya, Olga Matkovska, Valeriy Demchenko, Eugene Lebedev, Gisele Boiteux, and Anatoli Serghei, *Nanoscale Research Letters*, **9**: Article No. 674 (2014); <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-674>
 16. Ping Liu, Wenhua Chen, Cuihua Liu, Ming Tian, and Pengju Liu, *Scientific Reports*, **9**: Article No. 9534 (2019); <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46061-7>
 17. Anatoliy Galchun, Nikolay Korab, Volodymyr Kondratenko, Valeriy Demchenko, Andriy Shadrin, Vitaliy Anistratenko, and Maksym Iurzhenko, *Nanoscale Research Letters*, **10**: Article No. 138 (2015); <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0832-4>
 18. Divya Dharmaraj, Madhuri Krishnamoorthy, Kumar Rajendran, Kannan Karuppiyah, Jeyameenakshi Annamalai, Karthick Rajan Durairaj, Prakash Santhiyagu, and Kannapiran Ethiraj, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **61**: 102111 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102111>

¹E. O. Paton Institute of Electric Welding, N.A.S. of Ukraine,
11, Kazymyr Malevych Str.,
UA-03150 Kyiv, Ukraine

²D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, N.A.S. of Ukraine,
154, Academician Zabolotny Str.,
UA-03143 Kyiv, Ukraine

³National University of Food Technologies,
68, Volodymyrs'ka, Str.,
UA-01601 Kyiv, Ukraine

⁴National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',
37, Beresteyskyi Ave.,
UA-03056 Kyiv, Ukraine

⁵Educational and Scientific Centre 'Institute of Biology and Medicine',
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
2, Academician Glushkov Ave.,
UA-03022 Kyiv, Ukraine

⁶Bogomolets National Medical University,
27, Bulvarno-Kudryavs'ka Str.,
UA-01601 Kyiv, Ukraine

¹ Fig. 1. Water absorption curves of cryogels based on polyvinyl alcohol and hyaluronic acid (HA): (a) 1—PVA-3 wt.% HA, 2—PVA-5 wt.% HA, 3—PVA-9 wt.% HA, (б) 1—PVA-3 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, 2—PVA-5 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, 3—PVA-9 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, which are obtained by the method of cyclic freezing-defrosting over time 5^h–5^h–5^h.

² Fig. 2. Wide-angle x-ray diffraction patterns of: (a) 1—hyaluronic acid, 2—PVA-3 wt.% HA, 3—PVA-5 wt.% HA, 4—PVA-9 wt.% HA; (б) 1—PVA-3 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, 2—PVA-5 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, 3—PVA-9 wt.% HA-1 wt.% Ag₂O, which are obtained by the method of cyclic freezing-defrosting over time 5^h–5^h–5^h.

³ Fig. 3. Transmission electron microscopy image of a nanocomposite based on PVA, hyaluronic acid, and silver oxide nanoparticles.

⁴ Fig. 4. Mechanical strength of samples based on polyvinyl alcohol and hyaluronic acid with different contents of Ag₂O nanoparticles: 1—0 wt.%, 2—0.05 wt.%, 3—0.1 wt.%, 4—0.5 wt.%, 5—1 wt.%, which are obtained by the method of cyclic freezing-defrosting over time 5^h–5^h–5^h.

⁵ TABLE. Antimicrobial activity of cryogel materials with different concentrations of Ag₂O nanoparticles.