



<https://doi.org/10.15407/polymerj.45.02.135>
УДК 544.23; 544.25; 678, 541(49+64):539.2:537.3

В.Л. ДЕМЧЕНКО,

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна,
e-mail: dvaleriyl@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9146-8984

Л.А. ГОНЧАРЕНКО,

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна,
ORCID: 0000-0003-0274-4938

С.В. РЯБОВ,

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна,
e-mail: sergii.riabov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2996-3794

Н.П. РИБАЛЬЧЕНКО,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: nrybalchenko@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0505-3406

Т.Т. ГНАТЮК,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: gmatuktatiana@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1557-3277

Л.Л. МОЖАЄВА,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: larysa.mozhaeva@gmail.com
ORCID: 0009-0003-6528-661X

П.Ю. ЗАРЕМБА,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: polinakarpet@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7253-0404

К.С. НАУМЕНКО,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: krystyn.naumenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4635-0690

Л.О. АРТЮХ,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: bilyavskal@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3163-2492

С.Д. ЗАГОРОДНЯ,

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, 154, вул. Академіка Заболотного, Київ,
03143, Україна,
e-mail: svetazagorodnya@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0892-772X

Цитування: Демченко В.Л., Гончаренко Л.А., Рябов С.В., Рибальченко Н.П., Гнатюк Т.Т., Можаяєва Л.Л., Заремба П.Ю., Науменко К.С., Артюх Л.О., Загородня С.Д., Рибальченко Т.В., Кохтич Л.М. Формування методом напилення срібловмісних плівок на основі поліелектролітичних комплексів та їх антимікробна і протівірусна активність. *Полімерний журнал*. 2023. **45**, № 2. С. 135—143. <https://doi.org/10.15407/polymerj.45.02.135>

Т.В. РИБАЛЬЧЕНКО,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 60, вул. Володимирська, Київ, 01033, Україна,
e-mail: taras_rybal@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0074-2170

Л.М. КОХТИЧ,

Інститут фізики НАН України, 46, проспект Науки, Київ, 03056, Україна,
e-mail: lyudmyla.kokhtych@hslu.ch

ORCID: 0000-0002-6973-9984

ФОРМУВАННЯ МЕТОДОМ НАПИЛЕННЯ СРІБЛОВМІСНИХ ПЛІВОК НА ОСНОВІ ПОЛІЕЛЕКТРОЛІТНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА ЇХ АНТИМІКРОБНА І ПРОТИВІРУСНА АКТИВНІСТЬ

Срібловмісні плівкові матеріали сформовані шляхом вакуумного напилення наночастинок срібла на поверхню поліелектролітних комплексів на основі хітозану та натрієвої солі карбоксиметилцелюлози (пектину). Отримані зразки охарактеризовано методами ширококутового рентгенівського розсіювання і трансмісійної електронної мікроскопії, а також досліджено їх антимікробні, противірусні й цитотоксичні властивості. Методом ширококутової дифракції рентгенівських променів підтверджували наявність металічного срібла на поверхні поліелектролітних комплексів. Встановлено, що при напиленні срібла протягом 5 хв утворюється шар завтовшки ~200 нм. Показано, що зразки Na-КМЦ–Ag–хітозан та пектин–Ag–хітозан, сформовані методом напилення срібла, проявляють антимікробну активність щодо тест-культур мікроорганізмів *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* та *C. albicans*. Також встановлено противірусну активність зразків щодо вірусу грипу А та вірусу простого герпесу 1 типу. Отримані зразки не були цитотоксичними, не пригнічували життєздатність культур клітин MDCK та ВНК.

Ключові слова: поліелектролітні комплекси, наночастинок срібла, структура, морфологія, антимікробні та противірусні властивості.

Вступ

Поширення інфекційних захворювань є однією з найбільших проблем сучасної медицини в усьому світі. Інфекційні захворювання, спричинені вірусами та мікроорганізмами, можуть стати епідемією або навіть пандемією, що призводить до високої смертності, ускладнень хвороби і величезних економічних втрат. Незважаючи на стрімкий прогрес у розвитку ліків і фармацевтичних технологій, інфекційні захворювання роблять значний внесок у загальний рівень захворюваності суспільства. Передача вірусів може відбуватися через прямий контакт з інфікованою людиною або опосередкований повітряно-крапельний та/або через інфіковані поверхні. Поверхні, включаючи наші руки, є найважливішими маршрутами передачі вірусів. Тому існує нагальна потреба в нових противірусних і антимікробних матеріалах з високою противірусною та бактерицидною дією й низькою токсичністю для людини і навколишнього середовища [1].

Останнім часом велику увагу привертають полімерні наноматеріали з антимікробними та противірусними властивостями, що містять наночастинок срібла [1–6]. Відомо, що срібло виявляє високу токсичність щодо широкого кола мікроорганізмів [7]. Наночастинок срібла (AgНЧ) наразі широко використовуються в різних галузях, таких як медицина, фармацевтична і харчова промисловість, завдяки своїм унікальним фізичним і хімічним властивостям. Вивчення фізико-хімічних властивостей AgНЧ має велике значення, оскільки вони впливають на поглинання частинок клітиною, їх проникнення в біологічну мембрану, розподіл частинок у клітині й терапевтичний ефект лікарського засобу [8]. Прийнято вважати, що наночастинок срібла проникають до бактеріальної клітини, порушують її цілісність, що призводить до загибелі бактерій [9]. Тому розроблення методів отримання однорідних за морфологією та високої функціональності AgНЧ важливе для медичного застосування.

У роботі [8] класифікують такі методи синтезу наночастинок срібла, як хімічний синтез, біологічний синтез і фізичний синтез. Хімічний синтез широко застосовується як метод отримання наночастинок срібла в колоїдній дисперсії. Хімічний метод отримання AgНЧ включає воду або органічні розчинники як середовище для відновлення солей срібла, а також три компоненти: іон металу, відновник, стабілізатор. Як зазначено в [10], відновник є лімітуючим компонентом, який впливає на специфічні характеристики AgНЧ – розмір і фізико-хімічні властивості, а також запобігає коагуляції AgНЧ. Хімічний синтез дає змогу забезпечувати високий вихід і легко відтворювати стабільні параметри НЧ Ag. Недоліками хімічного синтезу AgНЧ є те, що наночастинок схильні до поверхневого забруднення внаслідок хімічного осадження, і використання шкідливих хімічних відновників [11].

Фізичні методи синтезу AgНЧ характеризуються однорідним фракційним складом і хорошою відтворюваністю розмірів наночастинок, а також високою чистотою їх поверхні за рахунок відсутності забруднення хімічними реагентами.

Значний потенціал для створення полімерних матеріалів із наночастинами срібла мають поліелектролітні комплекси на основі полімерів природного походження, а саме полісахаридів. З погляду хімічної будови це жорстколанцюгові полімери, для яких, окрім наявності іоногенних груп, властива також висока концентрація реакційноздатних ОН-груп, що сприяє стабілізації частинок срібла меншого розміру. Також полісахариди є нетоксичними, біосумісними і біодеградабельними речовинами.

Метою роботи було створення срібловмісних матеріалів на основі поліелектролітних комплексів Na-КМЦ (пектин)–хітозан методом вакуумного напилення наночастинок срібла і дослідження їх структури й морфології, а також антимікробних, противірусних і цитотоксичних властивостей.

Експериментальна частина

Матеріали

Для виготовлення полімерних систем на основі поліелектролітних комплексів і наночастинок

срібла використовували такі речовини: хітозан низької молекулярної маси (ХНММ) “Aldrich”, ступінь деацетилювання ~75%, M_w ~50,000–190,000, хітозан середньої молекулярної маси (ХСММ) “Aldrich”, ступінь деацетилювання \geq (75–85)%, M_w ~190,000–310,000, хітозан високої молекулярної маси (ХВММ) “Aldrich”, ступінь деацетилювання $>$ 85%, M_w ~310,000–375,000, натрієва сіль карбоксиметилцелюлози (Na-КМЦ) “Aldrich”, M_w ~90,000, пектин цитрусовий “Aldrich”, галактуронова кислота, \geq 74%, срібна фольга завтовшки 0,1 мм “Aldrich”.

Приготування полімерних систем

Поліелектролітні комплекси формували шляхом змішування 1% водних розчинів аніонного та катіонного поліелектролітів, взятих у стехіометричному співвідношенні функціональних іоногенних груп, при $T = 20 \pm 2$ °C. Хітозан розчиняли у 0,1М розчині HCl, до аніонного поліелектроліту Na-КМЦ (пектину) додавали відповідну кількість 0,1М розчину NaOH. Отримані таким чином ПЕК виливали на політетрафторетиленові (ПТФЕ) пластини і сушили за тієї самої температури до сталої маси. Сухі плівки ПЕК промивали в дистильованій воді до досягнення нейтрального рН, потім вакуумували і сушили за $T = 20 \pm 2$ °C до сталої маси.

Срібловмісні плівки одержували шляхом напилення срібла на поверхню поліелектролітних комплексів за допомогою пристрою FC-1100 (JEOL, Японія). Схема напилення наведена на рис. 1.

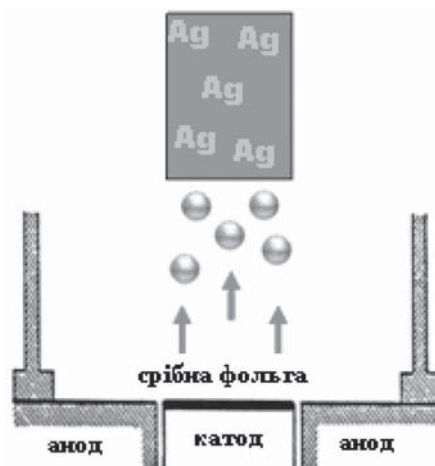


Рис. 1. Схема напилення наночастинок срібла на поверхню полімерної плівки

Напилення проводили у вакуумі $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па при струмі 5 мА і анодній напрузі 1,2 кВ протягом 5 хв. Температура дослідження $T = 20 \pm 2$ °С. *Експериментальні методи*

Структуру зразків досліджували методом ширококутової рентгенівської дифракції на дифрактометрі XRD-7000 (Shimadzu, Японія), рентгенооптичну схему якого виконували на відбиття первинного пучка з використанням CuK_α випромінювання ($\lambda = 1,54$ Å) і графітового монохроматора за температури $T = 20 \pm 2$ °С.

Морфологію наночастинок срібла на поверхні полімерної матриці досліджували за допомогою просвічувального електронного мікроскопа JEM-1230 (JEOL, Японія) з роздільною здатністю 0,2 нм.

Антимікробну активність матеріалів досліджували щодо штамів умовно-патогенних мікроорганізмів: грамозитивні *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, грамнегативні *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 та дріжджоподібні гриби *Candida albicans* ATCC 885-653 методом дифузії в агар.

Противірусну активність зразків вивчали відносно вірусу грипу типу А (ВГА), H1N1, штам А/FM/1/47, вірусу простого герпесу 1 типу (ВПГ-1), шляхом визначення інфекційного титру вірусу. Цитотоксичну дію зразків досліджували на клітинах MDCK та ВНК-21 МТТ методом.

Результати дослідження та їх обговорення

Як відомо [12], у вихідному стані Na-KMЦ має аморфну структуру як основних макроланцюгів, так і бічних (метилкарбоксільних і метилкарбоксилатних) відгалужень. На це вказує прояв на рентгенівській дифрактограмі цього аніонного поліелектроліту (рис. 2, крива 1) двох асиметричних дифракційних максимумів дифузного типу (аморфних гало) різної інтенсивності, при цьому кутове положення ($2\theta_{max}$) основного за інтенсивністю максимуму становить $19,6^\circ$, а вторинного – $9,6^\circ$ (крива 1). Судячи з кількості атомів (електронів) у глюкозидному циклі й метилкарбоксилатному бічному відгалуженні, інтенсивніше аморфне гало ($2\theta_{max} \approx 19,6^\circ$) характеризує близьку впорядкованість при трансляції у просторі (в об'ємі зразка Na-KMЦ) фрагментів основних макроланцюгів, а

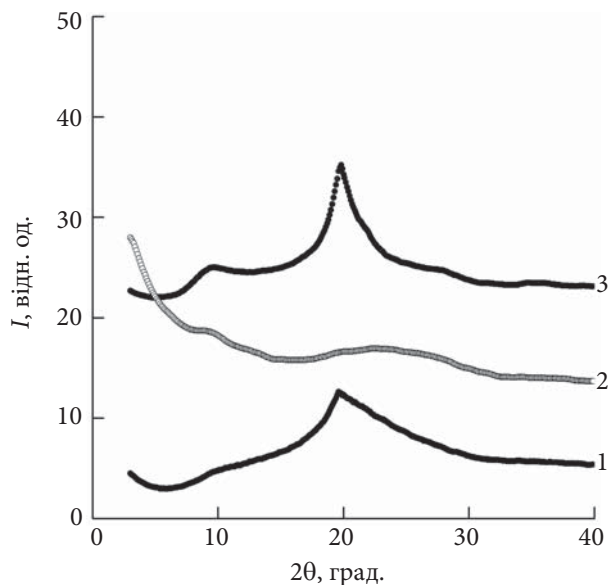


Рис. 2. Ширококутові рентгенівські дифрактограми аніонного (Na-KMЦ) (1) та катіонного (ХНММ) (3) поліелектролітів і поліелектролітних комплексів на їх основі (Na-KMЦ – ХНММ) (2)

менш інтенсивне ($2\theta_{max} \approx 9,6^\circ$) – близький порядок при розміщенні у просторі фрагментів метилкарбоксільних і метилкарбоксилатних бічних відгалужень. Згідно з рівнянням Брегга, середня величина періоду (d) близького порядку при розміщенні у просторі основних макромолекулярних ланцюгів в об'ємі Na-KMЦ становить 4,5 Å, а бічних відгалужень – 9,2 Å.

Слід відзначити, що на дифрактограмі Na-KMЦ зафіксовано також прояв малопомітного аморфного гало при $2\theta_{max} \sim 36,2^\circ$, існування якого зумовлене близьким упорядкуванням у просторі –ОН-груп, що відгалужуються від глюкозидних циклів.

На рентгенівській дифрактограмі катіонного поліелектроліту – хітозану проявляється мультиплетний дифракційний максимум ($2\theta_m \approx 9,7^\circ$), а також кілька синглетних дифракційних максимумів на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_m \sim 20,0^\circ$, серед яких найінтенсивніший при $2\theta_m = 19,8^\circ$ (рис. 2, крива 3).

ПЕК має зовсім іншу структуру порівняно зі структурою протилежно заряджених поліелектролітів, на основі яких він сформований. Зокрема на рентгенівській дифрактограмі ПЕК проявляються малоінтенсивний максимум при $2\theta_m \sim 9,6^\circ$ та інтенсивний максимум

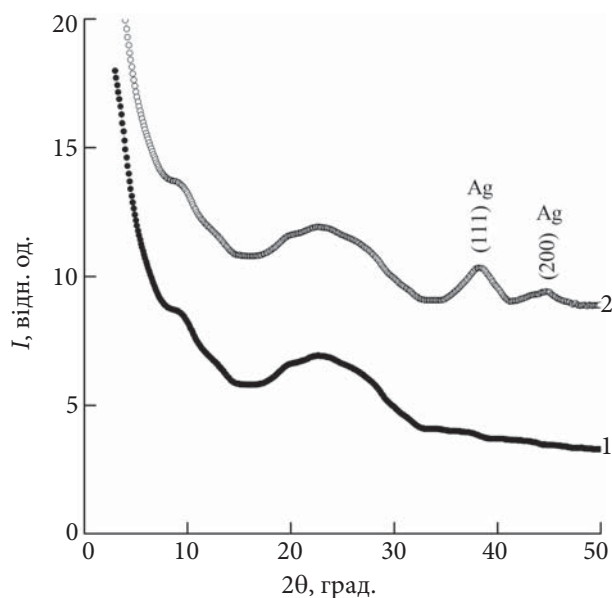


Рис. 3. Ширококутові рентгенівські дифрактограми поліелектролітних комплексів Na-КМЦ – ХНММ (1) та срібловмісних зразків на їх основі Na-КМЦ – Ag – ХНММ (2), отриманих шляхом напилення наночастинок срібла на поверхню поліелектролітних комплексів

при $2\theta_m \sim 23,8^\circ$ (рис. 2, крива 2). Середня величина періоду близького упорядкування фрагментів макромолекулярних ланцюгів протилежно заряджених поліелектролітів в об'ємі ПЕК (середня бреггівська відстань між макромолекулярними ланцюгами аніонного і катіонного поліелектролітів в об'ємі ПЕК), згідно з рівнянням Брегга, становить $9,2 \text{ \AA}$ та $3,7 \text{ \AA}$.

При напиленні наночастинок срібла на поверхню поліелектролітних комплексів Na-КМЦ–ХНММ формуються срібловмісні плівки з шаром металічного срібла. На це вказують відповідні дифракційні максимуми при $2\theta_m \sim 38^\circ$ і 44° , які характеризують структуру металічного срібла (рис. 3).

При напиленні наночастинок на поверхню поліелектролітних комплексів Na-КМЦ – хітозан низької молекулярної маси утворюється шар наносрібла завтовшки $\sim 200 \text{ нм}$ (рис. 4).

Для детального вивчення впливу молекулярної маси катіонного полісахариду в ПЕК на антимікробні властивості срібловмісних матеріалів використовували хітозан низької, середньої та високої молекулярної маси. Для порівняння антимікробної ефективності

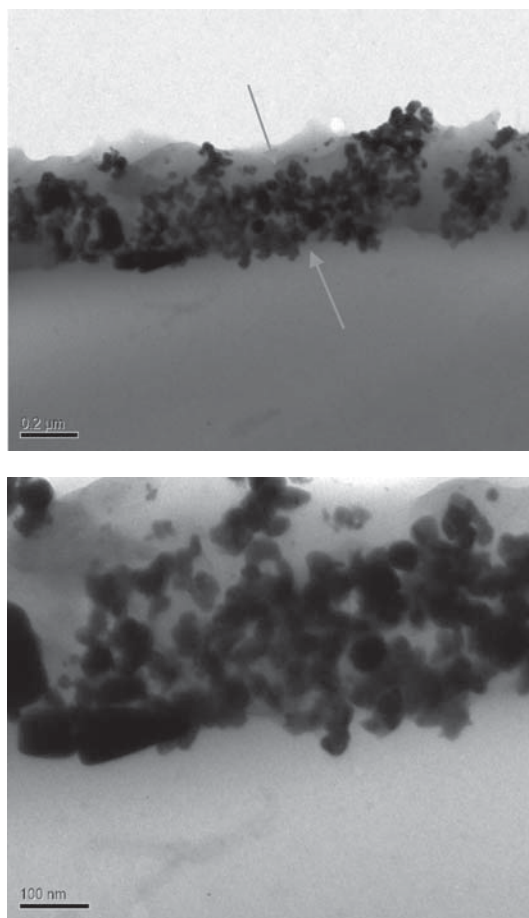


Рис. 4. Мікрофотографії трансмісійної електронної мікроскопії срібловмісних плівок, отриманих шляхом напилення наночастинок срібла на поверхню поліелектролітних комплексів Na-КМЦ–ХНММ протягом 5 хв

зразків як аніонну складову використовували Na-КМЦ та пектин у складі ПЕК з хітозаном. Встановлено, що досліджувані зразки проявляли антимікробну дію щодо всіх досліджуваних тест-культур мікроорганізмів – *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *C. albicans* (таблиця). Після 24 год інкубування срібловмісних зразків Na-КМЦ–Ag – хітозан низької, середньої та високої молекулярної маси при 37°C на поживному середовищі спостерігали чітку зону навколо досліджуваних матеріалів (рис. 5). Діаметр зон затримки росту *S. aureus* становив (16,07; 18,64; 18,36) мм, *E. coli* – (19,34; 19,21; 19,27) мм, *P. aeruginosa* – (19,34; 16,53; 14,26) мм, *C. albicans* – (21,34; 17,09; 16,82) мм за дії срібловмісних зразків Na-КМЦ–Ag – хітозан низької, середньої та високої молекулярної маси відповідно.

Таблиця. Антимікробна активність срібловмісних зразків Na-КМЦ–Ag–хітозан і пектин цитрусовий – Ag–хітозан, отриманих шляхом наплення наночастинок срібла на поверхню зразка

Полімерні системи	Діаметр зон затримки росту, мм			
	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>C. albicans</i>
Контрольний зразок Na-КМЦ–ХНММ	0	0	0	0
Na-КМЦ–Ag–ХНММ	16,07±0,40	19,34±0,70	19,34±0,70	21,34±1,10
Na-КМЦ–Ag–ХСММ	16,5±0,60	19,21±0,70	16,53±0,40	17,09±0,50
Na-КМЦ–Ag–ХВММ	16,5±0,60	19,27±0,70	14,26±0,30	16,82±0,50
пектин–Ag–ХНММ	19,69±0,70	19,58±0,70	20,25±0,80	17,86±0,50
пектин–Ag–ХСММ	20,98±0,80	19,70±0,80	21,17±1,10	19,82±0,80
пектин–Ag–ХВММ	20,96±0,80	20,91±0,80	21,42±1,10	18,32±0,50

Спостерігалася дещо вища антимікробна активність щодо грамнегативних бактерій *P. aeruginosa*, *E. coli* та дріжджоподібних грибів *C. albicans* срібловмісних зразків Na-КМЦ–Ag – хітозан низької молекулярної маси, натомість щодо *S. aureus* їхня активність була нижчою (таблиця). При цьому значення антимікробної активності срібловмісних зразків Na-КМЦ–Ag – хітозан середньої та високої молекулярної маси мали вищі показники щодо грампозитивної бактерії *S. aureus* та дещо нижчою активністю характеризувалися щодо тест-культур *E. coli*, *P. aeruginosa*, *C. albicans*. Така активність, імовірно, може бути пов'язана саме з різною будовою клітин досліджених мікроорганізмів та з впливом на них відповідних срібловмісних зразків на основі поліелектролітних комплексів із хітозаном різної молекулярної маси.

Срібловмісні зразки пектин цитрусовий – Ag – хітозан низької, середньої та високої молекулярної маси, отримані шляхом наплення наночастинок срібла на поверхню полімеру протягом 5 хв, також відзначилися ефективною антимікробною дією щодо умовно патогенних тест-культур мікроорганізмів *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *C. albicans* (таблиця). Діаметр зон затримки росту *S. aureus* становив (19,69; 20,98; 20,96) мм, *E. coli* – (19,58; 19,70; 20,91) мм, *P. aeruginosa* – (20,25; 21,17; 21,42) мм, *C. albicans* – (17,86; 19,82; 18,32) мм відповідно. Отримані результати близькі, виразної залежності антимікробної активності від молекулярної маси катіонного поліелектроліту досліджених срібловмісних зразків не виявлено.

У контрольних зразках поліелектролітних комплексів Na-КМЦ–хітозан і пектин

цитрусовий – хітозан, які не містили наночастинок срібла, спостерігався активний ріст тест-культур мікроорганізмів і відсутність зон затримки росту.

Наступним етапом було дослідження протівірусної активності зразків. Як показано на рис. 6а, зразки проявляли виражену активність щодо ВПГ-1, зафіксовано інгібування інфекційного титру вірусу на (2,60–2,68) $\lg\text{TCID}_{50}/\text{мл}$ для зразків Na-КМЦ–Ag–хітозан і

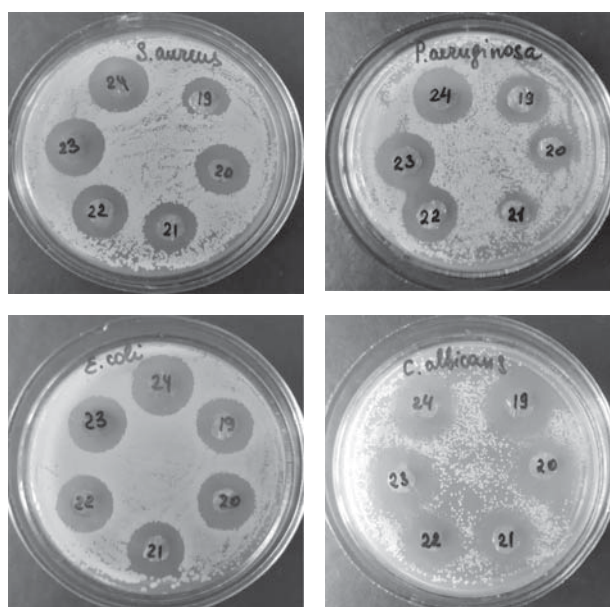


Рис. 5. Антимікробна активність зразків: Na-КМЦ–Ag–ХНММ (19), Na-КМЦ–Ag–ХСММ (20), Na-КМЦ–Ag–ХВММ (21), пектин–Ag–ХНММ (22), пектин–Ag–ХСММ (23), пектин–Ag–ХВММ (24), отриманих шляхом наплення наночастинок срібла на поверхню поліелектролітних комплексів протягом 5 хв

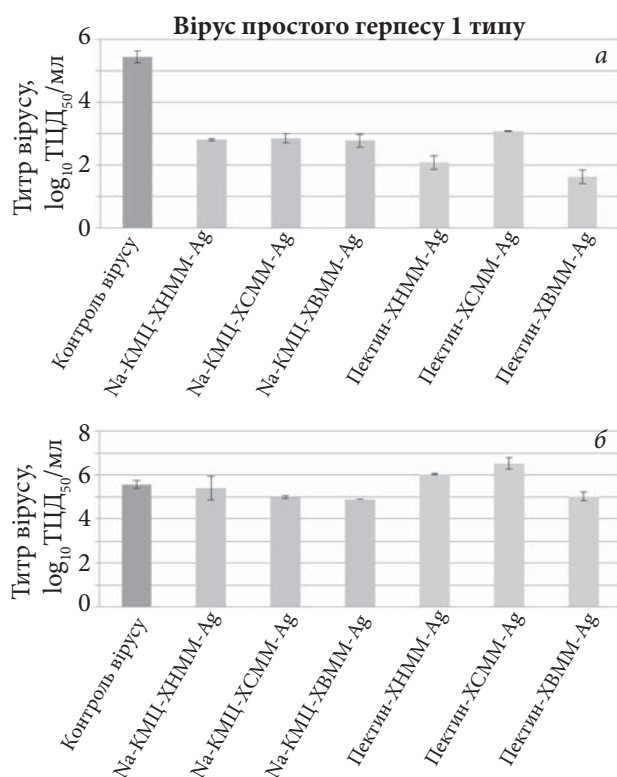


Рис. 6. Інфекційний титр вірусу простого герпесу 1 типу (а) та вірусу грипу (б) після інкубації зі срібловмісними зразками, отриманими шляхом напилення наночастинок срібла на поверхню полімеру протягом 5 хв

(2,38–3,82) $\lg \text{TCID}_{50}/\text{мл}$ для пектин–Ag–хітозан. Варто зауважити, що молекулярна маса хітозану в комплексах з Na-KMЦ не впливала на ефективність зразків, оскільки титр ВПГ-1 був близький для всіх трьох зразків, натомість для зразків на основі пектину і хітозану найбільшу ефективність відзначено для зразків, що містять хітозан низької та високої молекулярної маси.

Як показано на рис. 6б, слабку антивірусну дію щодо вірусу грипу показали срібловмісні зразки на основі Na-KMЦ та хітозану, зменшення інфекційного титру становило від 0,18 до 0,76 $\lg \text{TCID}_{50}/\text{мл}$, а зразки на основі пектину й хітозану навіть трохи стимулювали розвиток вірусу.

На завершальному етапі досліджували цитотоксичну дію срібловмісних матеріалів.

Як показано на рис. 7, срібловмісні зразки, отримані шляхом напилення наночастинок Ag на поверхню полімеру протягом 5 хв, не пригнічували життєздатність культур клітин MDCK і ВНК; показник варіював від 74 до 100 %.

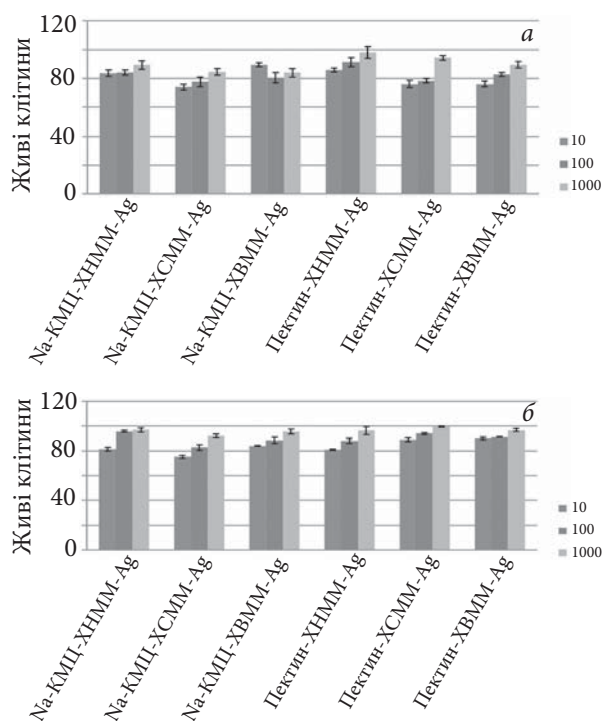


Рис. 7. Життєздатність епітеліальних культур MDCK (а) та ВНК (б) під впливом зразків на основі поліелектролітних комплексів, отриманих шляхом напилення наночастинок Ag на поверхню полімеру протягом 5 хв

Спостерігався дозозалежний зв'язок між показником життєздатності клітин і розведенням елюату. Однак навіть за мінімального розведення елюату життєздатність клітин становила 74 – 93 % для клітин MDCK і 72 – 95 % для клітин ВНК.

Таким чином, сформовано срібловмісні плівки на основі поліелектролітних комплексів Na-KMЦ–хітозан та пектин–хітозан і наночастинок срібла методом вакуумного напилення. Наявність металічного срібла на поверхні поліелектролітних комплексів підтверджували методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів. Виявлено, що при напиленні срібла протягом 5 хв утворюється шар наносрібла завтовшки ~200 нм. Встановлено, що всі досліджені зразки проявляють антимікробну активність щодо тест-культур мікроорганізмів *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *C. albicans*. Зразки Na-KMЦ–Ag–хітозан низької молекулярної маси були дещо активніші щодо грамнегативних бактерій

P. aeruginosa, *E. coli* та дріжджоподібних грибів *C. albicans* на відміну від *S. aureus*. Натомість зразки Na-КМЦ–Ag – хітозан середньої та високої молекулярної маси характеризувалися високою антимікробною активністю щодо грампозитивної бактерії *S. aureus* та нижчою щодо тест-культур *E. coli*, *P. aeruginosa*, *C. albicans*. Срібловмісні зразки на основі пектину і хітозану показали близькі результати і не виявили суттєвої залежності антимікробної активності

від молекулярної маси хітозану. Виражену антивірусну дію щодо вірусу простого герпесу 1 типу чинили майже всі досліджені срібловмісні зразки, інгібування інфекційного титру вірусу детектували в діапазоні від 2,6 до 3,8 lgТЦД₅₀/мл. Досліджені зразки не проявляли цитотоксичного впливу на культури клітин, оскільки показник життєдіяльності клітин відповідав контрольним значенням.

REFERENCES

1. Demchenko V., Riabov S., Sinelnikov S., Radchenko O., Kobylinskyi S., Rybalchenko N. Novel approach to synthesis of silver nanoparticles in interpolyelectrolyte complexes based on pectin, chitosan, starch and their derivatives. *Carbohydrate Polymers*, 2020, **242**: 116431. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116431>.
2. Demchenko V., Riabov S., Kobylinskyi S., Goncharenko L., Rybalchenko N., Kruk A., Moskalenko O., Shut M. Effect of the type of reducing agents of silver ions in interpolyelectrolyte-metal complexes on the structure, morphology and properties of silver-containing nanocomposites. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 7126. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64079-0>.
3. Demchenko V., Shtompel' V., Riabov S., Lysenkov E. Constant electric and magnetic fields effect on the structuring and thermomechanical and thermophysical properties of nanocomposites formed from pectin–Cu²⁺–polyethyleneimine interpolyelectrolyte–metal complexes. *Nanoscale Research Letters*, 2015, **10**: 479–485. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1181-z>.
4. Shevtsova T., Cavallaro G., Lazzara G., Milioto S., Donchak V., Harhay K., Korolko S., Budkowski A., Stetsyshyn Y. Temperature-responsive hybrid nanomaterials based on modified halloysite nanotubes uploaded with silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, **641**: 128525. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128525>.
5. Merkl P., Long S., McInerney G.M., Sotiriou G.A. Antiviral activity of silver, copper oxide and zinc oxide nanoparticle coatings against SARS-CoV-2. *Nanomaterials*, 2021, **11**: 1312. <https://doi.org/10.3390/nano11051312>.
6. Lishchynskyi O., Shymborska Y., Stetsyshyn Y., Raczowska J., Skirtach A.G., Peretiak T., Budkowski A. Passive antifouling and active self-disinfecting antiviral surfaces. *Chemical engineering journal*, 2022, **446**: 137048. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137048>.
7. Sadowski Z. Biosynthesis and application of silver and gold nanoparticles, *Silver Nanoparticles*, Edited by Dr. D.P. Perez. In-Tech, Vukovar, Croatia, 2010, **13**: 257 – 276. <https://doi.org/10.5772/8508>.
8. Salleh A., Naomi R., Utami N.D., Mohammad A.W., Mahmoudi E., Mustafa N., Fauzi M.B. The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: A mechanism of action. *Nanomaterials*, 2020, **10**: 1566. <https://doi.org/10.3390/nano10081566>.
9. Gogoi K.S., Gopina P., Paul A., Ramesh A., Ghosh S.S., Chattopadhyay A. Green fluorescent protein expressing *Escherichia coli* as a model system for investigating the antimicrobial activities of silver nanoparticles. *Langmuir*, 2006, **22**: 9322–9328. <https://doi.org/10.1021/la060661v>.
10. Noroozi M., Radiman S., Zakaria A., Soltaninejad S. Fabrication, characterization, and thermal property evaluation of silver nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 2014, **9**: 645. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-645>.
11. Gasaymeh S.S., Radiman S., L.Y. Heng, Saion E., Mohamed G.H. Saeed. Synthesis and characterization of silver/Polyvinylpyrrolidone (AG/PVP) nanoparticles using gamma irradiation techniques. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, **7**: 879–888. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.892.901>.
12. Demchenko V.L., Shtompel V.I., Honcharenko L.A. The structure and thermomechanical properties of polyelectrolyte complexes based on carboxymethylcellulose and polyethyleneimine. *Polymer journal*. 2017. **39**, no. 1: P. 39–43. <https://doi.org/10.15407/polymerj.39.01.39>.

Received 23.05.2023

V.L. Demchenko¹,

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine, 48, Kharkivs'ke shose, Kyiv, 02155, Ukraine,
e-mail: dvaleriyl@ukr.net

L.A. Goncharenko,

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine, 48, Kharkivs'ke shose, Kyiv, 02155, Ukraine

S.V. Riabov,

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine, 48, Kharkivs'ke shose, Kyiv, 02155, Ukraine,
e-mail: sergii.riabov@gmail.com

N.P. Rybalchenko,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: nrybalchenko@ukr.net

T.T. Hnatiuk,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: gnatuktatiana@gmail.com

L.L. Mozhaeva,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: larysa.mozhaeva@gmail.com

P.Yu. Zaremba,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: polinakarpets@gmail.com

K.S. Naumenko,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: krystyn.naumenko@gmail.com

L.O. Artiukh,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: bilyavskal@ukr.net

S.D. Zahorodnia,

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine, 154, Akademika Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine,
e-mail: svetazagorodnya@ukr.net

T.V. Rybalchenko,

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60, Volodymyrs'ka St., Kyiv, 01033, Ukraine,
e-mail: taras_rybal@ukr.net

L.M. Kokhtych,

Institute of Physics of the NAS of Ukraine, Ukraine, 46, Prospect Nauky, Kyiv, 03680, Ukraine,
e-mail: lyudmyla.kokhtych@hslu.ch

FORMATION OF SILVER-CONTAINING FILMS BASED ON POLYELECTROLYTE COMPLEXES BY SPUTTERING DEPOSITION AND THEIR ANTIMICROBIAL AND ANTIVIRAL ACTIVITY

Silver-containing film materials are formed by vacuum sputtering of silver nanoparticles on the surface of polyelectrolyte complexes based on chitosan and sodium salt of carboxymethylcellulose (pectin). The obtained samples were characterized by the methods of wide-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy, and their antimicrobial, antiviral and cytotoxic properties were also investigated. The presence of metallic silver on the surface of polyelectrolyte complexes was confirmed by the method of wide-angle X-ray diffraction. It was established that upon sputtering of silver, a ~200 nm thick layer is formed within 5 minutes. It was shown that Na-CMC-Ag-chitosan and pectin-Ag-chitosan samples, formed by silver sputtering, exhibit antimicrobial activity against test cultures of *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, and *C. albicans*. Antiviral activity of samples against influenza A virus and herpes simplex virus type 1 was also established. The obtained samples were not cytotoxic, did not inhibit the viability of MDCK and BHK cell cultures.

Keywords: polyelectrolyte complexes, silver nanoparticles, structure, morphology, antimicrobial and antiviral properties.