

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.124>

УДК 677.074 + 620.1 [661.8/57.04] + 579.6

Л.Д. Кістерська¹, <https://orcid.org/0000-0003-4611-695X>

О.Б. Логінова¹, <https://orcid.org/0000-0002-2360-2843>

Т.О. Кондратюк², <https://orcid.org/0000-0003-4130-2948>

Т.В. Берегова², <https://orcid.org/0000-0002-6525-1287>

Н.В. Бошицька³, <https://orcid.org/0000-0003-2241-1161>

¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

² ННЦ “Інститут біології та медицини”

Київського національного університету ім. Тараса Шевченка

³ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ

E-mail: pol@ism.kiev.ua, takbiofak@ukr.net, nata25lia@gmail.com

Біостійкість поліестерної тканини, модифікованої нанодисперсною суспензією срібла

Представлено академіком НАН України Л.М. Лобановим

*Вивчена можливість використання наночастинок срібла (НЧAg), отриманих за допомогою плазмової технології, для надання текстильним матеріалам біоцидного захисту. Стан НЧAg та наявність мікроорганізмів на поверхні водостійкого поліестерного полотна з поліуретановим просоченням досліджено методами растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу. Встановлено бактерицидний вплив препарату “Ag Nanofluid” щодо тест-культур бактерій *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та фунгістатичну дію щодо дріжджових грибів *Candida albicans* і значне підвищення біостійкості досліджуваної тканини, обробленої НЧAg. Під дією НЧAg вказані тест-культури бактерій і дріжджових грибів зазнають істотних морфологічних змін (деформацій, пошкоджень поверхні та цілісності клітин), клітини тест-культур мікроорганізмів за зазначених умов вибірково накопичують окремі хімічні елементи, що призводить до їх руйнування.*

Ключові слова: наночастинок Ag, розподіл за розміром, бактерицидна, фунгіцидна активність, біостійкість тканин.

Різноманітні мікроорганізми (бактерії, мікроскопічні міцеліальні гриби, дріжджі) існують і розвиваються всюди, де для цього є умови: відповідні волога, температура, джерела для живлення тощо. Поверхні будь-яких матеріалів можуть бути як опорним субстратом, так і сприятливим живильним середовищем для розвитку безлічі мікроорганізмів за наявності органічних складових: шкіряний жир, піт, інші органічні речовини. небезпека розвитку мікроорганізмів-пошкоджувачів на поверхні текстильних матеріалів пов'язана як з

Цитування: Кістерська Л.Д., Логінова О.Б., Кондратюк Т.О., Берегова Т.В., Бошицька Н.В. Біостійкість поліестерної тканини, модифікованої нанодисперсною суспензією срібла. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 1. С. 124–134. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.01.124>

наявністю патогенних мікроорганізмів, так і мікроорганізмів, які можуть призводити до втрати функціональних властивостей матеріалу, наприклад його еластичності або розривної міцності, що тягне за собою, зокрема, і матеріальні збитки.

Одним з головних призначень біоцидного захисту людини за допомогою спеціально оброблених текстильних матеріалів є профілактика шкірних захворювань, особливо в професійній сфері. За даними експертів комітету Всесвітньої організації охорони здоров'я, гнійничкові захворювання шкіри складають третину всієї шкірної патології і займають 3–4 місце в загальній структурі захворюваності після грипу, респіраторних і серцево-судинних захворювань. Тому актуальним питанням сьогодні є вибір ефективних засобів запобігання інфекційним захворюванням різної етіології та створення дезінфекційних препаратів у системі профілактики [1].

Одним із нових напрямів модифікації текстильних матеріалів, який розвивається впродовж останніх років, є застосування наноструктурованих біоцидів з розмірами частинок від 1 до 100 нм, що є проміжним між розмірами атомів і молекул та розмірами мікроструктур. Цей діапазон розмірів включає, зокрема, наночастинки (НЧ) різних металів, які, взаємодіючи з рідкими середовищами, утворюють прозорі, седиментаційно стійкі, ультрадисперсні колоїдні розчини (золі), властивості яких часто радикально відрізняються від властивостей цієї ж речовини у вигляді суцільної фази або макроскопічної дисперсії [2, 3].

Срібло та його сполуки є ефективними антимікробними препаратами, які знайшли широке застосування в медицині [4–6]. Нанопродукти срібла виготовляються у вигляді металевих наночастинок (НЧAg) та в іонній формі в різних хімічних сполуках. Усі вони виробляються за різними технологіями, що розподіляються на фізичні і хімічні. Вивчення *in vitro* і порівняння бактерицидного впливу іонів та НЧAg показали їх високу антибактеріальну активність навіть у дуже низьких концентраціях (близько декількох одиниць мг/л). Однак такі концентрації НЧAg не мали гострої цитотоксичності щодо клітин ссавців і гострої екотоксичності щодо еукаріотичних організмів. Водночас рівень цито- і екотоксичності іонного срібла зберігається навіть у концентрації 1 мг/л [7, 8].

Найбільше практичне значення для продуктивного виробництва мають нові фізичні процеси нанодиспергування електропровідних матеріалів, насамперед засновані на імпульсних процесах з високою швидкістю змін термодинамічних параметрів і високою щільністю концентрації енергії для диспергування матеріалів. У цьому сенсі іонно-плазмові технології на сьогодні найактуальніші у виробництві наноматеріалів з новими прогнозованими якостями.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України була розроблена інноваційна одностадійна іонно-плазмова технологія виготовлення концентрованих суспензій нанометалів у середовищах різної фізико-хімічної природи [9]. Встановлено, що розчин срібла в гліцерині з концентрацією срібла 100 мг/л є кінетично та структурно-механічно стабілізованою і значною мірою структурованою системою, оскільки розмір сольватованих частинок порівнянний з відстанню між ними. Малі розміри НЧAg надають їм високої рухливості в біологічних середовищах, а велика надлишкова поверхнева енергія зумовлює їх високу фізико-хімічну і біологічну активність [10–12].

Відсутність стабілізаторів — поверхнево-активних речовин (ПАР), на поверхні НЧAg у суспензіях, отриманих даним методом, при високій бактерицидності та антивірусних

властивостях щодо широкого спектра вірусів і бактерій, дає можливість ефективно використовувати їх водні розчини для модифікації поверхонь різної фізико-хімічної природи. Відомо, що під час обробки контактних поверхонь наявність стабілізаторів істотно ускладнює процес адсорбції НЧ, не дає змоги впливати на ступінь заповнення поверхні частинками і отримати рівномірність та однорідність їхнього розподілення на поверхні [13]. Також істотним недоліком препаратів, що містять НЧА_g, стабілізовані електростатичним методом, є значна залежність розчинів від рН середовища.

Відсутність стабілізаторів у водних розчинах сприяє також сорбції НЧА_g рецепторами мікроорганізмів, тому вони значно швидше нейтралізують біологічну активність збудника. На додаток, у присутності кисню у водних розчинах НЧА_g швидше окиснюються з утворенням іонів срібла, тому в процесах сорбції беруть участь і самі НЧ, і сформовані з них іони (два в одному). Для того щоб знищити однакову кількість бактерій, іонів срібла в розчині потрібно в декілька сотень разів більше, ніж НЧА_g, тому навіть невеликий вміст НЧ у препараті здатен забезпечити дуже серйозний ефект. Бактерія розпадається і гине, а НЧ здатна функціонувати далі і далі. Цей шлях знищення бактерії не залишає їй можливості адаптуватися, виробити механізм захисту і передати його наступним поколінням.

Отже, дослідження наносуспензій срібла, отриманих за допомогою плазмової технології, щодо впливу на різні мікроорганізми є актуальними. Перспективними та актуальними є також дослідження щодо надання антибактеріальних властивостей текстильним матеріалам із використанням сучасних технологій отримання НЧ [1, 14].

Метою даного дослідження було визначення впливу нанодисперсної суспензії срібла, отриманої за допомогою плазмової технології, на тест-культури бактерій, мікроскопічних міцеліальних грибів та дріжджів для надання текстильним матеріалам біоцидного захисту.

Матеріали та методи досліджень. Як об'єкти та матеріали дослідження в роботі використовували:

- препарат “Ag Nanofluid” — водний розчин наносуспензії срібла, виготовлений з використанням іонно-плазмової технології в екологічно чистому технологічному циклі за міжнародним патентом РСТ WO 2008/039160 A1 (опубл. 03.04.2008) та патентом України 80513 (опубл. 25.09.2007). Вміст НЧ ультрарозчинного (99,99 %) металевих срібла у водно-гліцериновому розчині з контрольованим розміром НЧА_g 15–60 нм (75 %) становив 10 мг/л;

- тканину “Оксфорд” (виробництво Китай), 100 %-й поліестер з поліуретановим про-соченням, щільність 570 г/м²;

- тест-культури мікроорганізмів: бактерії *Staphylococcus aureus* Rosenbach, 1884, *Pseudomonas aeruginosa* (Schröter 1872) Migula 1900, *Escherichia coli* (Migula 1895), Castellani and Chalmers 1919 та дріжджоподібні гриби *Candida albicans* (C.P. Robin) Bekhout, які зберігаються в Колекції мікроорганізмів кафедри мікробіології та імунології ННЦ “Інститут біології та медицини” Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Використані штами бактерій депоновані також в Українській колекції мікроорганізмів (УКМ) Інституту мікробіології ім. Д.К. Заболотного НАН України (http://www.imv.kiev.ua/images/doc/catalog/UCM_catalog.pdf): *Staphylococcus aureus* B-904 УКМ (=ATCC 25923); *Pseudomonas aeruginosa* B-907 УКМ (=ATCC 27853); *Escherichia coli* B- 906 УКМ (=ГІСК 240533); *Candida albicans* Y-2681 УКМ (= ATCC 10231).

Тест-культури бактерій культивували на стандартних живильних середовищах LB (Luria-Bertani/lysogeny broth), NB (nutrient broth), NA (nutrient agar), TSB (trypticase soy broth), TSA (trypticase soy agar); дріжджових грибів — на середовищі Сабуро (Biolife, Італія, Merck KGaA, Німеччина; Sigma-Aldrich, HiMedia, Індія).

Вплив НЧАг (препарату “Ag Nanofluid”) щодо вказаних тест-культур бактерій *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та дріжджів *Candida albicans* досліджували загальноприйнятим методом дифузії в агар (із використанням для бактерій середовища Мюллера—Хінтона (HiMedia, Індія) та середовища Сабуро для дріжджів). Густину суспензії клітин бактерій ($5 \cdot 10^5$ КУО/мл) та дріжджів ($1 \cdot 10^6$ КУО/мл) визначали за допомогою денситометра “Vitek-2” (“Bio Merieux”, Франція) — початкові значення для бактеріальних тест-культур становили 0,5 за шкалою McFarland та 1,8—2,2 для дріжджів (з подальшими послідовними розведеннями). Контролем слугувала культура досліджуваних бактерій без внесення препарату “Ag Nanofluid”.

Бактерицидну та фунгістатичну дію препарату “Ag Nanofluid” оцінювали за діаметром зон пригнічення росту досліджуваних тест-культур мікроорганізмів.

Біостійкість вихідної тканини “Оксфорд” та обробленої НЧАг визначали методом вологих камер, для дотримання стерильності зразки тканини розміщували в одноразових секційних чашках Петрі діаметром 90 мм, які розставляли у скляних великих чашках Петрі діаметром 180 мм. Для створення високих показників відносної вологості повітря (не менше за 90 %) поряд із досліджуваними зразками тканини розміщували чашки Петрі діаметром 80 мм, заповнені стерильною водою.

Зразки тканини розміром 3×3 см (у трьох повторях) інокулювали суспензіями (0,3 мл) тест-культур мікроорганізмів, які попередньо культивували в середовищі NB (для бактерій) та Сабуро (для дріжджів). Щільність суспензії бактерій становила $5 \cdot 10^5$ КУО/мл, дріжджів — $1 \cdot 10^6$ КУО/мл. Густину суспензій тест-культур мікроорганізмів визначали так само, як і в першому варіанті досліджень. З поверхні зразків досліджуваної тканини через 24 год (для бактерій) і 48 год (для дріжджів) робили змиви стерильним розчином 0,9 %-м NaCl (5 мл). Контрольними в цих дослідженнях слугували два варіанти:

1 — суспензія мікроорганізмів після культивування 24—48 год у середовищі NB (для бактерій) та Сабуро (для дріжджів); після культивування 0,3 мл суспензії розміщували у 5 мл 0,9 %-го NaCl;

2 — суспензії мікроорганізмів, отримані шляхом змиву із поверхні зразків тканини, необробленої препаратом “Ag Nanofluid”.

Здатність тест-культур бактерій *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та дріжджів *Candida albicans* розвиватися на текстильному матеріалі, що оброблений препаратом “Ag Nanofluid”, досліджували шляхом вимірювання та порівняння показників каламутності отриманих суспензій на автоматичному мікропланшетному рідері (Sinnova ER-500 BiORad) при довжині хвилі 600 нм (для бактерій) та 450 нм (для дріжджів) з використанням 96-ямкових плоскодонних планшетів. Культивування у всіх варіантах досліджень здійснювали за температури 32 °C у термошафі Venticel. Отримані результати статично обробляли з використанням програми Statistica 12. Визначали показники середнього арифметичного і стандартної похибки середнього арифметичного. Як контроль використовували тканину без нанесення препарату “Ag Nanofluid”.

Обробка тканини препаратом “Ag Nanofluid” здійснювалася ультразвуковим процесом за допомогою приладу Transsonik Ti-H.

Стан та параметри агрегації НЧАг у гліцерині та водно-гліцериновому середовищі визначали за допомогою аналізатора Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd, Велика Британія). Динаміку агрегування НЧ оцінювали за зміною їх розмірів у процесі розведення водою препарату “Ag Nanofluid” методом динамічного розсіювання світла.

Стан НЧАг і наявність мікроорганізмів на поверхні досліджуваної тканини вивчали методами растрової електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу з програмно-цифровою обробкою зображення за допомогою електронного мікроскопа ZEISS EVO 50XVP з роздільною здатністю до 2 нм та можливістю роботи в умовах низького вакууму. Мікроскоп укомплектовано енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCAPenteFETx3 для елементного аналізу з похибкою ~0,1 % в діапазоні від бору до урану та системою HKL CHANNEL 5 для дифракції електронів з локальної ділянки понад 10 нм фірми OXFORD. Рентгеноспектральний мікроаналіз проводили при напрузі 6 та 20 кВ.

Результати роботи та обговорення. Дослідження стану та параметрів агрегації наночастинок срібла у водно-гліцериновому середовищі. Виміри розмірів НЧАг для вихідного розчину (чистий гліцерин з концентрацією срібла 100 мг/л) та для водно-гліцеринового середовища з концентрацією срібла 10 мг/л проводили в часовому обліку від моменту розведення вихідного розчину водою протягом 20 діб. Динаміку агрегування НЧАг оцінювали за зміною їх розмірів. Ця процедура була обумовлена необхідністю з'ясування впливу зміни складу розчину на процес агломерації НЧАг, оскільки препарат не містить стабілізаторів (ПАР), а його нанесення здійснюється з водних розчинів.

Як показали вимірювання, середній розмір НЧАг у вихідному розчині (гліцерині) становив 34 нм. Після розведення водою через 20 хв середній розмір частинок збільшився до 196 нм, проте через 5 діб він зменшився до 142 нм, а через 20 діб — до 60 нм. Тобто спостерігається тенденція до зменшення розмірів агломератів з часом. Тому для запобігання процесу агломерації НЧАг водно-гліцериновий розчин наносили в процесі ультразвукової обробки. Нами доведено, що така обробка ефективно руйнує агрегати з НЧАг [12].

Слід додати, що НЧАг з препарату “Ag Nanofluid” не втрачають стабільність у лужних середовищах, але частково втрачають стабільність у кислотних розчинах (при рН нижче 4). Це дає можливість використовувати отримані водні розчини суспензії наносрібла без подальшої стабілізації в лужних середовищах для нанесення на контактні поверхні різної фізико-хімічної природи, а також додавати в усі рідкі миючі засоби та косметики для надання їм антибактеріальних властивостей.

Дослідження впливу на тест-культури мікроорганізмів. Згідно з результатами досліджень, препарат “Ag Nanofluid” виявляє стійкий бактерицидний вплив на грамнегативні (*Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*) та грампозитивні (*Staphylococcus aureus*) бактерії: впродовж 8 діб діаметр зон відсутності росту був незмінним і становив для *P. aeruginosa*, *E. coli* та *S. aureus* $18,5 \pm 0,04$, $16,9 \pm 0,03$ та $20,3 \pm 0,07$ мм відповідно (рис. 1).

Досліджені тест-культури бактерій охарактеризовані нами як чутливі щодо дії препарату “Ag Nanofluid”, оскільки діаметр зон інгібування їх росту в умовах проведеного експерименту відповідав загальновідомим критеріям інтерпретації результатів визначення чутливості мікроорганізмів (граничних значень діаметрів зон пригнічення росту, мм). Дані

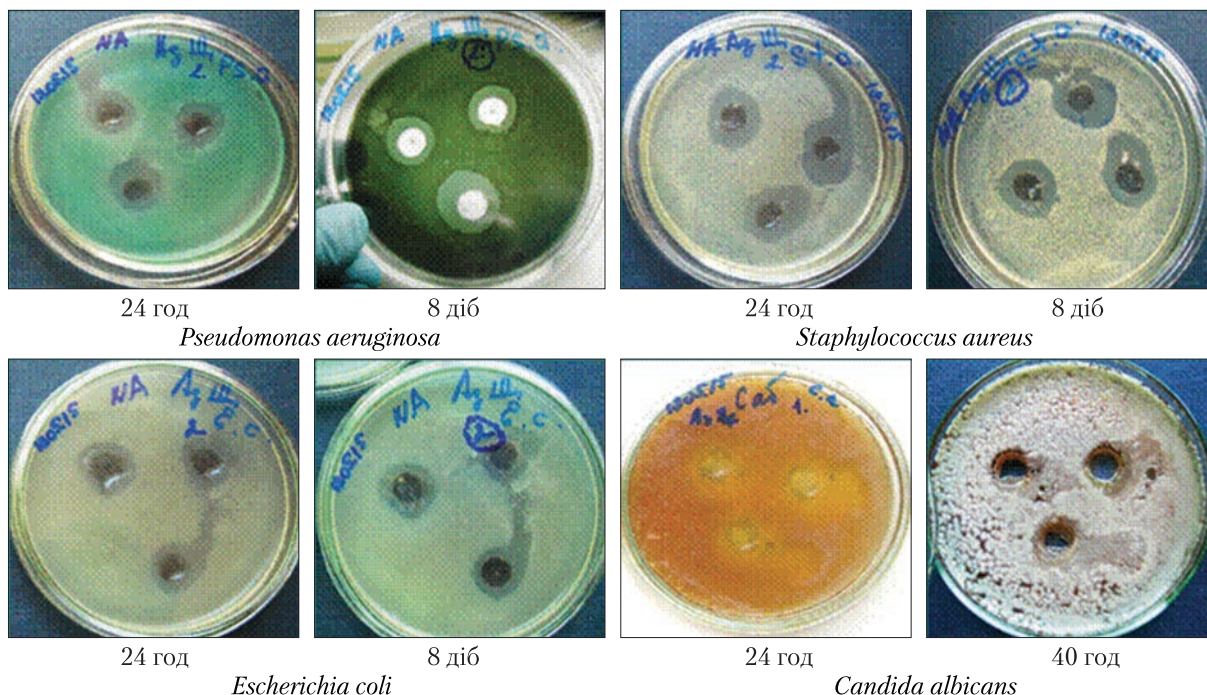


Рис. 1. Бактерицидний вплив препарату “Ag Nanofluid” на тест-культури бактерій *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* та *Staphylococcus aureus* через 24 год та 8 діб культивування і фунгістатичний вплив препарату “Ag Nanofluid” на тест-культуру *Candida albicans* через 24 та 40 год культивування

щодо чутливості вказаних бактерій до низки відомих антибактеріальних препаратів (бета-лактамів, аміноглікозидів, фторхінолонів, макролідів тощо) зведені в табл. 2, 4 та 5 методичних вказівок “Визначення чутливості мікроорганізмів до антибактеріальних препаратів” (затверджено наказом МОЗ України 05.04.2007 № 167).

Аналіз отриманих результатів дає нам підставу охарактеризувати вплив препарату “Ag Nanofluid” на дріжджові гриби *Candida albicans* як фунгістатичний, оскільки через 40 год культивування *Candida albicans* в присутності препарату зони пригнічення росту були відсутні (див. рис. 1).

Дослідження стану наночастинок срібла та наявність мікроорганізмів на поверхні досліджуваної тканини. Електронно-мікроскопічні зображення вихідної поверхні тканини наведено на рис. 2, а, обробленої НЧАг – на рис. 2 б, в. Як видно з рис. 2, присутні на поверхні тканини НЧАг відрізняються за розмірами. Спостерігаються окремі частинки розміром 58 нм та їх агрегати розміром 174 нм (див. рис. 2, в). Електронно-мікроскопічні зображення окремих агрегатів з НЧАг на поверхні тканини та криві розподілу елементів у точках проведення рентгеноспектрального аналізу наведено на рис. 2. Згідно з отриманими даними, на поверхні тканини крім срібла присутні вуглець та кисень, проте вміст кисню та вуглецю залишається на рівні фону.

Електронно-мікроскопічні дослідження поверхні зразка вихідної тканини з клітинами дріжджових грибів *Candida albicans* свідчать про те, що клітини *Candida albicans* брунькуються на поверхні (рис. 3, а). Водночас на тканині, яка була оброблена НЧАг, спосте-

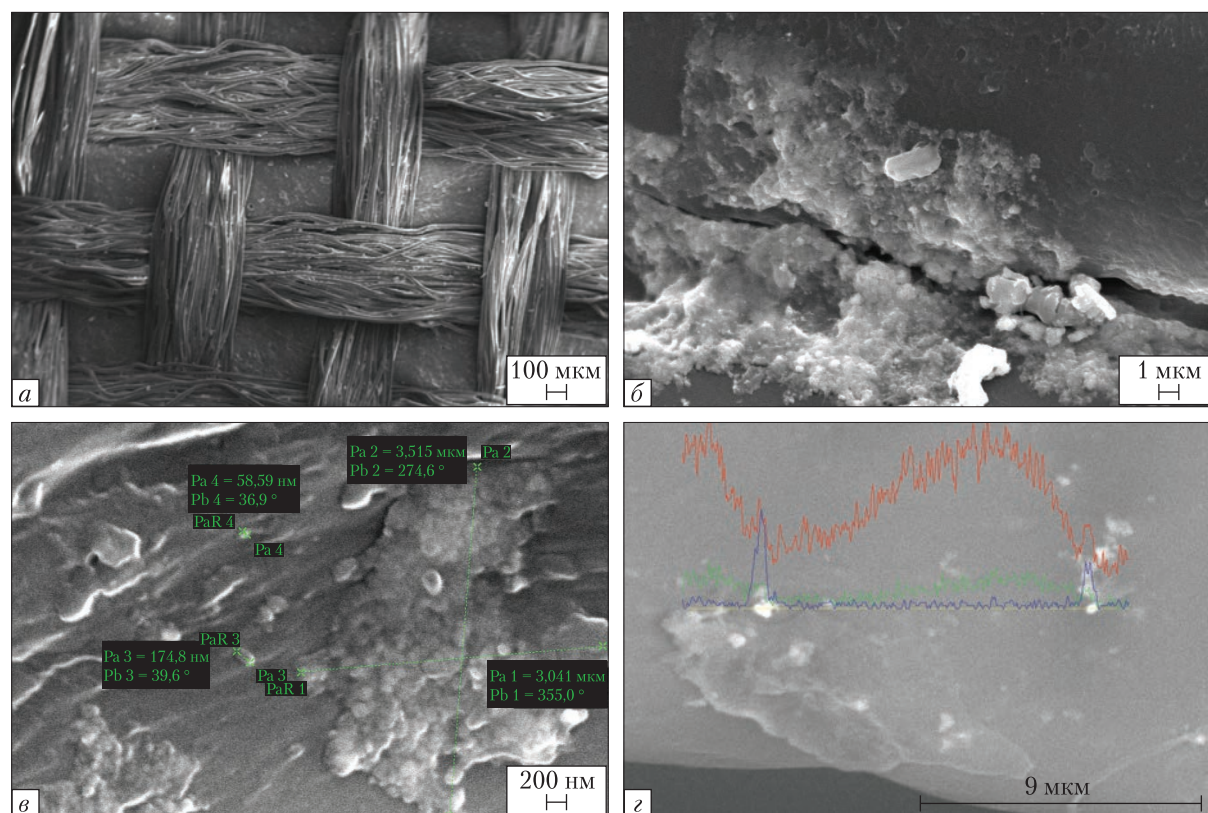


Рис. 2. СЕМ зображення вихідної поверхні тканини (а), НЧАг на поверхні тканини (б, в) та криві розподілу елементів у точках проведення рентгеноспектрального аналізу (з). Червоний спектр — вуглець, зелений — кисень, синій — срібло

рігаються лише поодинокі клітини неправильної форми (див. рис. 3, б). Встановлено, що у складі залишку клітин грибів *Candida albicans* на поверхні тканини, обробленої НЧАг, крім срібла та залишків фізрозчину, присутній кремній (див. рис. 3, в).

Обробка тканини НЧАг зумовлює морфологічні зміни клітин мікроорганізмів. На поверхні зразка досліджуваної тканини в присутності НЧАг клітини *Pseudomonas aeruginosa* мають неправильну форму, перегини, здуття, поверхня та цілісність клітин мають ознаки пошкоджень (див. рис. 3, з). Отримані нами результати збігаються з даними літератури. Так, Е. Dosunmu із співавт. [15] зазначають, що виникнення морфологічних змін у формі клітин, пошкодження та руйнація мембрани клітин *Pseudomonas aeruginosa* під впливом вкритих сріблом вуглецевих нанотрубок (AgCNT) вказує на можливий механізм дії AgCNT та його антимікробну активність.

Біостійкість тканини, обробленої наночастинками срібла. Біостійкість вихідної тканини (контрольних зразків) та тканини, обробленої НЧАг, визначали за показниками росту тест-культур мікроорганізмів. Аналіз отриманих результатів (рис. 4) свідчить про те, що на тканині, обробленій НЧАг, ріст тест-культур мікроорганізмів був значно слабший порівняно з контрольними варіантами. Це підтверджується даними щодо показників оптичної густини суспензій всіх тест-культур. Так, значення оптичної густини *Candida*

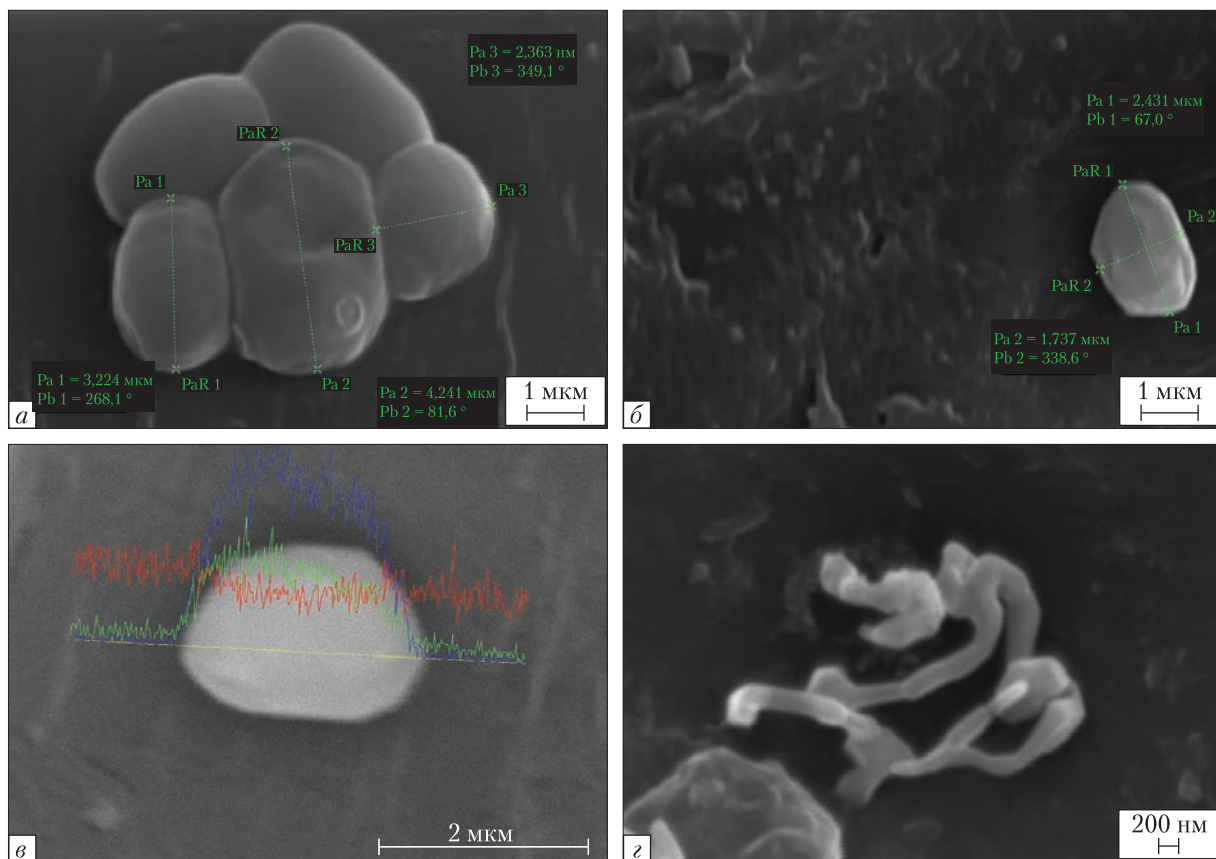


Рис. 3. СЕМ зображення клітин *Candida albicans* (а — на поверхні вихідної тканини, б — на поверхні обробленої НЧАг тканини, в — криві розподілу елементів у точках проведення рентгеноспектрального аналізу: червоний спектр — вуглець, зелений — кисень, синій — кремній) та *Pseudomonas aeruginosa* (з)

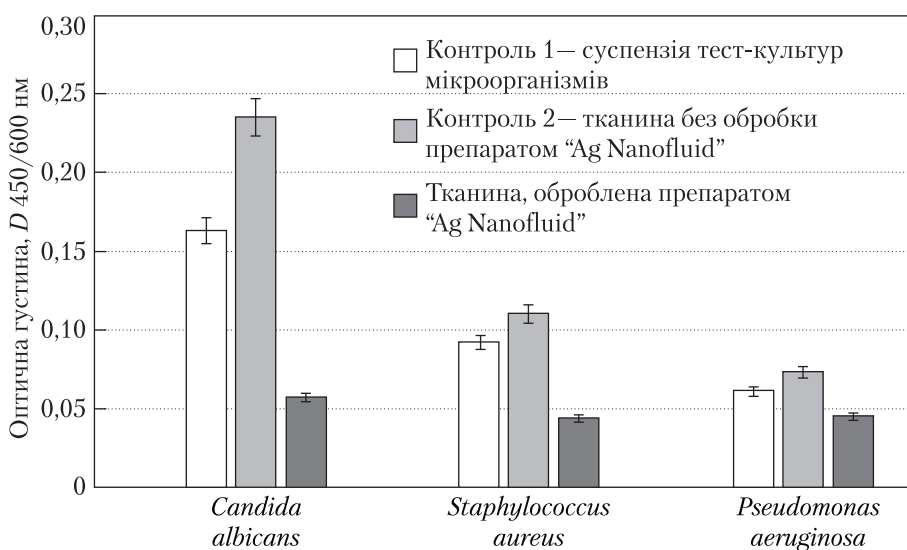


Рис. 4. Біостійкість дослідних зразків тканини в умовах експерименту

albicans на зразках тканини, обробленої НЧА_g, становили 0,057 ум. од. проти 0,235 ум. од. для контрольних варіантів; для *Staphylococcus aureus* ці значення становили відповідно 0,044 та 0,11 ум. од., для *Pseudomonas aeruginosa* — 0,045 та 0,073 ум. од. Отримані результати дають нам підстави стверджувати, що біостійкість тканини, обробленої НЧА_g, збільшувалася в 1,62—4,13 раза залежно від використаних тест-культур мікроорганізмів.

Висновки. Отже, обробка текстильних матеріалів препаратом “Ag Nanofluid”, що містить НЧА_g, отриманих за допомогою плазмової технології, є перспективною для надання текстильним матеріалам біоцидного захисту.

Показано, що на поверхні поліестерної тканини “Оксфорд”, обробленої препаратом “Ag Nanofluid”, клітини тест-культур бактерій *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та дріжджових грибів *Candida albicans* зазнають істотних морфологічних змін (деформацій, пошкоджень поверхні та цілісності клітин). Клітини вказаних тест-культур мікроорганізмів за зазначених умов вибірково накопичують окремі хімічні елементи, що призводить до руйнування клітин.

Встановлено стійку бактерицидну дію препарату “Ag Nanofluid” для тест-культур бактерій *Pseudomonas aeruginosa* В-907 УКМ (=АТСС 27853), *Staphylococcus aureus* В-904 УКМ (=АТСС 25923), *Escherichia coli* В-906 УКМ (ГИСК 240533) та фунгістатичний вплив цього препарату щодо дріжджових грибів *Candida albicans* Y-2681 УКМ (=АТСС 10231). Зона інгібування росту бактеріальних тест-культур після внесення срібловмісного препарату залишається незмінною до 8 діб, що свідчить про стабільну та тривалу бактерицидну дію препарату.

Доведено, що біостійкість композиційного матеріалу на основі поліестерної тканини, модифікованої НЧА_g, збільшується в 1,62—4,13 раза залежно від використаних тест-культур мікроорганізмів (порівняно з контрольними варіантами).

Автори висловлюють вдячність В.М. Ткачу, д-ру фіз.-мат. наук, провід. н. с. Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, за проведення електронно-мікроскопічних досліджень, О.О. Моргаєнко, співробітнику ННЦ “Інститут біології та медицини”, Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, за технічну допомогу під час виконання досліджень.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сегодня и завтра медицинского, технического и защитного текстиля. Роль традиционных и высоких технологий («Медтекстиль – 2012»): Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 8–9 окт. 2012). Москва, 2012. 106 с.
2. Фостер Л. Нанотехнологии, наука, инновации и возможности. Москва: Техносфера, 2008. 352 с.
3. Андрусишина И.Н. Наночастицы металлов: способы получения, физико-химические свойства, методы исследования и оценка токсичности. *Сучасні проблеми токсикології*. 2011. № 3. С. 5–14.
4. Santos C.L., Albuquerque A.J.R., Sampaio F.C., Keyson D. Nanomaterials with antimicrobial properties: Applications in health sciences. *Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education*. Méndez-Vilas A. (Ed.). Badajoz: Formatex Research Center, 2013. P. 143–154.
5. Lok C.-N., Ho C.-M., Chen R., He Q.-Y., Yu W.-Y., Sun H., Tam P.K.-H., Chiu J.-F., Che C.-M. Silver nanoparticles: partial oxidation and antibacterial activities. *J. Biol. Inorg. Chem.* 2007. 12, № 4. P. 527–534. <https://doi.org/10.1007/s00775-007-0208-z>

6. Shahverdi A.R., Fakhimi A., Shahverdi H.R., Minaian S. Synthesis and effect of silver nanoparticles on the antibacterial activity of different antibiotics against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Nanomedicine*. 2007. **3**, № 2. P. 168–171. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2007.02.001>
7. Kvitek L., Panacek A., Prucek R., Soukupova J., Vanickova M., Kolar M., Zboril R. Antibacterial activity and toxicity of silver – nanosilver versus ionic silver. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011. **304**, № 1. 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/304/1/012029>
8. Pal S., Tak Y.K., Song J.M. Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the Gram-negative bacterium *Escherichia coli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 2007. **73**, № 6. P. 1712–1720. <https://doi.org/10.1128/AEM.02218-06>
9. Кістерська Л.Д., Логінова О.Б., Садохін В.В., Садохін В.П. Інноваційна технологія виробництва біо-сумісних нанодезінфектантів нового покоління. *Вісн. НАН України*. 2015. № 1. С. 39–48. <https://doi.org/10.15407/visn2015.01.039>
10. Кістерська Л.Д., Зозуля В.В., Перевертайло В.М., Садохін В.В., Садохін В.П., Логінова О.Б., Прокопенко В.А., Багно Н.Г., Приходько В.О., Мокрицька О.А., Волинець Н.М., Рибальченко Н.П. Дослідження фізико-хімічних властивостей та протимікробної активності наносуспензій срібла. *Наноструктурное материаловедение*. 2009. № 2. С. 33–39.
11. Кістерська Л.Д., Співак М.Я., Перевертайло В.М., Лазаренко Л.М., Садохін В.В., Садохін В.П., Логінова О.Б., Багно Н.Г. Нанодисперсні суспензії срібла та їх антивірусні властивості. *Наноструктурное материаловедение*. 2010. № 3. С. 62–69.
12. Кістерська Л.Д., Логінова О.Б., Ульянович Н.В., Коломієць В.В., Ткач В.М., Панова А.Н., Уварова І.В. Створення антибактеріальної поверхні частинками наносрібла на імплантатах із біоактивним покриттям. *Порошковая металлургия*. 2019. № 3/4. С. 85–95. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00063-2>
13. Тепанов А.А. Адсорбционная иммобилизация наночастиц серебра: закономерности и применение в химическом анализе: дис. ... канд. хим. наук / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, Москва, 2015.
14. Fouda M.M.G. Antibacterial modification of textiles using nanotechnology. *A search for antibacterial agents*. Varaprasad Bobbarala, IntechOpen, 2012. P. 47–72. <https://doi.org/10.5772/45653>
15. Dosunmu E., Chaudhari A.A., Singh S.R., Dennis V.A., Pillai S.R. Silver-coated carbon nanotubes downregulate the expression of *Pseudomonas aeruginosa* virulence genes: a potential mechanism for their antimicrobial effect. *Int. J. Nanomedicine*. 2015. P. 5025–5034. <https://doi.org/10.2147/IJN.S85219>

Надійшло до редакції 02.09.2021

REFERENCES

1. Today and tomorrow medical, technical and protective textiles. The role of traditional and high technologies (“Medtextil – 2012”). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Moscow (in Russian).
2. Foster, L. (2008). Nanotechnology, science, innovation and opportunities. Moscow: Tekhnosfera (in Russian).
3. Andrusishina, I. N. (2011). Metal nanoparticles: methods for obtaining, physicochemical properties, research methods and toxicity assessment. *Modern Problems of Toxicology*. No. 3, pp. 5-14 (in Russian).
4. Santos, C. L., Albuquerque, A. J. R., Sampaio, F. C. & Keyson, D. (2013). Nanomaterials with antimicrobial properties: Applications in health sciences. In Méndez-Vilas A. (Ed.). *Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education* (pp. 143-154). Badajoz: Formatex Research Center.
5. Lok, C.-N., Ho, C.-M., Chen, R., He, Q.-Y., Yu, W.-Y., Sun H., Tam P. K.-H., Chiu J.-F. & Che, C.-M. (2007). Silver nanoparticles: partial oxidation and antibacterial activities. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 12, No. 4, pp. 527-534. <https://doi.org/10.1007/s00775-007-0208-z>
6. Shahverdi, A. R., Fakhimi, A., Shahverdi, H. R. & Minaian, S. (2007). Synthesis and effect of silver nanoparticles on the antibacterial activity of different antibiotics against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Nanomedicine*, 3, No. 2, pp. 168-171. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2007.02.001>
7. Kvitek, L., Panacek, A., Prucek, R., Soukupova, J., Vanickova, M., Kolar, M. & Zboril, R. (2011). Antibacterial activity and toxicity of silver – nanosilver versus ionic silver. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 304, No. 1, 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/304/1/012029>

8. Pal, S., Tak, Y. K. & Song, J. M. (2007). Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the Gram-negative bacterium *Escherichia coli*. Appl. Environ. Microbiol., 73, No. 6, pp. 1712-1720. <https://doi.org/10.1128/AEM.02218-06>
9. Kisterska, L. D., Loginova, O. B., Sadokhin, V. V. & Sadokhin, V. P. (2015). New generation biocompatible nanodisinfectants innovative manufacturing technology. Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr., No.1, pp. 39-48 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/visn2015.01.039>
10. Kisterskaya, L. D., Zozulya, V. V., Perevertaylo, V. M., Sadokhin, V. V., Sadokhin, V. P., Loginova, O. B., Prokopenko, V.A., Bahno, N. H., Prykhodko, V.O., Mokrytska, O. A., Volynets, N. M. & Rybalchenko, N. P. (2009). Investigation of physico-chemical properties and antimicrobial activity of silver nanosuspensions. Material Science of Nanostructures, No. 2, pp. 33-39 (in Ukrainian).
11. Kisterskaya, L. D., Spivac, M. Ya., Perevertaylo, V. M., Lazarenko, L. M., Sadokhin, V.V., Sadokhin, V. P., Loginova, O. B. & Bahno, N. H. (2010). Nano-dispersed suspensions of silver and their antiviral properties. Material Science of Nanostructures, No. 3, pp. 62-69 (in Ukrainian).
12. Kisterskaya, L. D., Loginova, O. B., Ulyanchich, N. V., Kolomiets, V. V., Tkach, V. M., Panova, A. N. & Uvorova, I. V. (2019). Antibacterial surfaces formed by silver nanoparticles on bone implants with bioactive coatings. Powder Metall. Met. Ceram., 58, pp. 189-196. <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00063-2>
13. Tepanov, A. A. (2015). Adsorption immobilization of silver nanoparticles: patterns and application in chemical analysis (Unpublished Candidate thesis). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "M.V. Lomonosov Moscow State University". Moscow, Russia (in Russian).
14. Fouda, M. M. G. (2012). Antibacterial modification of textiles using nanotechnology. In A search for antibacterial agents (pp. 47-72). Varaprasad Bobbarala, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/45653>
15. Dosunmu, E., Chaudhari, A. A., Singh, S. R., Dennis, V. A. & Pillai, S. R. (2015). Silver-coated carbon nanotubes downregulate the expression of *Pseudomonas aeruginosa* virulence genes: a potential mechanism for their antimicrobial effect. Int. J. Nanomedicine, 10, pp. 5025-5034. <https://doi.org/10.2147/IJN.S85219>

Received 02.09.2021

L.D. Kisterska¹, <https://orcid.org/0000-0003-4611-695X>

O.B. Loginova¹, <https://orcid.org/0000-0002-2360-2843>

T.O. Kondratiuk², <https://orcid.org/0000-0003-4130-2948>

T.V. Bereгова², <https://orcid.org/0000-0002-6525-1287>

N.V. Boshitska³, <https://orcid.org/0000-0003-2241-1161>

¹ V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, Kyiv

² Institute of Biology and Medicine of Taras Shevchenko National University of Kyiv

³ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: pol@ism.kiev.ua, takbiofak@ukr.net, nata25lia@gmail.com

BIOSTABILITY OF POLYESTER FABRIC MODIFIED BY SILVER NANOSUSPENSION

The possibility of using silver nanoparticles (NAg), obtained by the innovative ion-plasma technology proved to provide biocidal protection for textile materials.

Substance of NAg in the presence of microorganisms was investigated on the surface of a waterproof polyester fabric with polyurethane impregnation by the methods of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis. The bactericidal effect of the "Ag Nanofluid" nanosuspension is shown for test cultures of bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, as well as the fungistatic effect for the yeast *Candida Albicans*, a significant increase in the biostability is proved for the studied tissue treated "Ag Nanofluid". Under the action of NAg these test cultures of bacteria and yeasts undergo significant morphological changes (deformations, surface damage and cell integrity), test cell cultures of microorganisms under these conditions selectively accumulate certain chemical elements, which leads to their destruction.

Keywords: Ag nanoparticles, size distribution, bactericidal, fungicidal activity, tissue biostability.