

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.8>

УДК 677.072.6

ЩЕНКО О. В., ПЛАВАН В. П.,
ШИДЛОВСЬКА О. А., ХАРЧЕНКО Є.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОГО ЕФЕКТУ НАНОНАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Метою наукової роботи є дослідження антибактеріального ефекту нанонаповнених полімерних матеріалів на основі суміші поліпропілен/співполіамід з додаванням вуглецевих нанотрубок.

Методика. Для оцінки антибактеріального ефекту нанонаповнених полімерних матеріалів використали референтні штами бактерій *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 та *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853. Визначали антибактеріальну дію полімерних зразків методом окислювально-відновлювальної індикації із застосуванням резазуринату натрію. Для дослідження можливості бактеріальних клітин прикріплюватися до полімерних матеріалів, також аналізували зразки, відібрані після 24-годинного культивування, за допомогою тесту з резазуринатом натрію. Статистичну достовірність перевіряли за допомогою *t*-критерію Вілкоксона.

Результати. Досліджено антибактеріальний ефект нанонаповнених полімерних матеріалів на основі суміші поліпропілен/співполіамід з додаванням вуглецевих нанотрубок. Встановлено, що вихідний поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками достовірно пригнічує ріст *E. coli*. Дослідження антиадгезивних властивостей полімерів показало ефективні та достовірні відштовхувальні властивості проти прикріплення клітин *E. coli*, *P. aeruginosa* та *S. aureus* для поліпропілену/співполіаміду з вуглецевими нанотрубками.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні антибактеріальних та антиадгезивних властивостей нанонаповнених полімерних матеріалів на основі суміші поліпропілен/співполіамід з додаванням вуглецевих нанотрубок.

Практичне значення. Встановлено антибактеріальний ефект вихідного поліпропілену/співполіаміду з додаванням вуглецевих нанотрубок (1 мас. %), а також високу антиадгезивну дію поліпропілену/співполіаміду з додаванням вуглецевих нанотрубок проти ряду бактеріальних штампів, що є важливим для матеріалів біомедичного застосування.

Ключові слова: поліпропіленові волокна; вуглецеві нанотрубки; нанокompозити; антибактеріальні властивості.

Вступ. Розробка принципів одержання нанонаповнених волокон та нанокompозитів є перспективним напрямком науки. Ці матеріали з регульованими характеристиками отримують шляхом комбінацій полімеру з нанонаповнювачами різної конфігурації; розмірів та хімічної природи. Як нанодобавки застосовують вуглецеві нанотрубки, фулерени, глини, аеросили тощо. На властивості нанонаповнених волокон впливає багато факторів: об'ємна доля наповнювача, тип матриці і добавки, однорідність їх розподілу, ступінь диспергування та орієнтації частинок, властивості та величина міжфазного шару. Перспективними наповнювачами вважають вуглецеві нанотрубки (ВНТ) завдяки їх властивостям – механічним, теплофізичним, електричним та бактерицидним [1]. Матеріали з додавання нанонаповнювачів ВНТ широко використовують як фільтри [2], вогнестійкі матеріали [3], електромагнітні екрануючі матеріали [4], датчики [5], суперконденсатори [6], в медицині [7, 8] та інше.

ВНТ представляють собою перспективний клас наноматеріалів для біомедичного застосування. Дослідники продемонстрували, що ВНТ можна використовувати для транспортування ліків [9] і біомолекул [10], візуалізації пухлин і фототермічної терапії [11].

ВНТ широко використовують для одержання матеріалів з антимікробними властивостями. Антимікробна активність нанотрубок залежить від складу та властивостей поверхні, довжини, розміру, кількості графенових шарів дисперсії та агрегації [12].

Відомо [1–3], що ВНТ мають велику питому поверхню, що призводить до високої схильності до агрегації. Для подолання низької спорідненості ВНТ до полімеру в суміш вводять поверхнево-активні речовини, які фізично та хімічно впливають на поверхню, що викликає гомогенний розподіл нанотрубок в матриці [14].

Фундаментальні дослідження в галузі фізико-хімічних розплавів сумішей полімерів, виконані в лабораторії хімічних волокон Київського національного університету технологій та дизайну, сприяли розробці наукових основ одержання ультратонких синтетичних волокон [15–17]. ПП-волокна наповнені вуглецевими нанотрубками можуть використовуватися як хірургічні шовні матеріали для попередження ранової інфекції і післяопераційних ускладнень. Вони мають достатні міцність і еластичність, забезпечують надійну фіксацію вузла. Створені нитки проявляють мінімальну травматичну дію при проходженні через тканини [16].

В останні роки фармацевтична промисловість використовує наночастинки для зниження токсичності та побічних ефектів ліків. Незважаючи на те, що ВНТ мають азбестоподібні токсичні властивості, які залежать від їх наноструктури та біостійкості, дослідження продовжуються, враховуючи їх вражаючий потенціал у біомедичному застосуванні [13]. Застосування ВНТ в медицині на даний момент перебуває на рубежі між визнаною концепцією та статусом доклінічного кандидата для різноманітних терапевтичних та діагностичних використань. Прогрес у клінічних випробуваннях буде залежати від результатів досліджень ефективності та токсикології, які забезпечать необхідну оцінку співвідношення між ризиком та користю для матеріалів, що містять вуглецеві нанотрубки.

Тому актуальним завданням є розробка технології та дослідження властивостей нанопоповнених поліпропіленових волокон з додаванням нанотрубок для біомедичного застосування.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження антибактеріального ефекту нанопоповнених полімерних матеріалів на основі суміші поліпропілен/співполіамід з додаванням вуглецевих нанотрубок.

Методологія досліджень. В роботі аналізували зразки волокон поліпропілен/співполіамід (ПП/СПА) та поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками (ПП/СПА/ВНТ). Волокна одержані з поліпропілену (ПП марки А-7 ТУУ 24.1–32292929 – 003:2007) з показником текучості розплаву ($7 \div 10$) г/10 хв. (поліпропілен дозволений до використання в медичній промисловості) з додаванням співполіаміду (СПА) марки 21060 (ТУ 6-05-1756-78 та тришарових вуглецевих нанотрубок (ТУ У 26.8 – 30969031-014-2007) з питомою поверхнею $340 \text{ м}^2/\text{г}$ зовнішнім діаметром – $(10 \div 20)$ нм. Вміст ВНТ 1,0 мас. % від маси ПП.

СПА є матричним компонентом, відповідає вимогам, які пред'являються до матричного полімеру, має низьку температуру плавлення та розчиняється в дешевому, нетоксичному розчиннику – етиловому спирті. Поліпропілен модифікований (ППіГМА) – поліпропілен зі щепленим малеїновим ангідридом, вміст прищепленого малеїнового ангідриду – 2,6 мас. %.

Змішування полімерів та введення ВНТ здійснювали на черв'ячно-дисковому екструдері марки ЛГП-25.

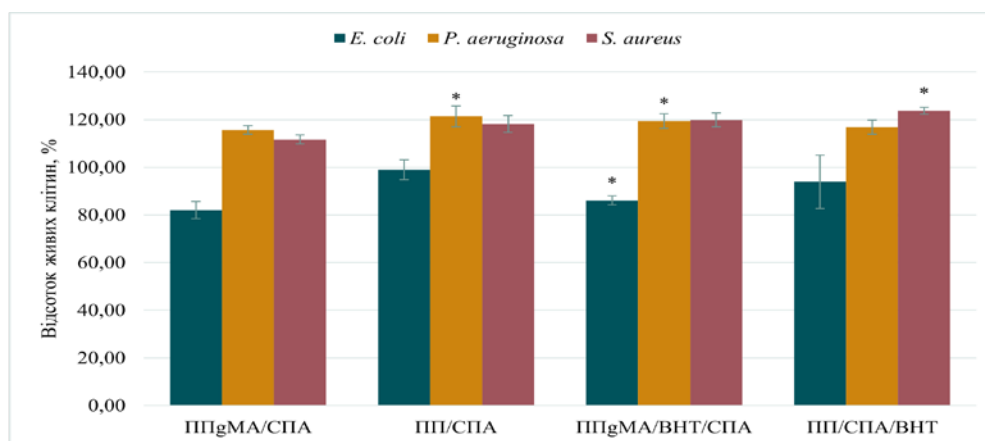
Для порівняння та в якості контролю аналізували біологічні властивості вихідних ниток поліпропілену/співполіаміду (ППіГМА/СПА; ПП/СПА) та поліпропілену/співполіаміду з вуглецевими нанотрубками (ППіГМА/ВНТ/СПА; ПП/СПА/ВНТ).

Для дослідження можливого антибактеріального ефекту полімерних матеріалів використали референтні штами бактерій *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 та *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 отримані в Державній установі «Інститут епідеміології та інфекційних хвороб ім. Л. В. Громашевського» Національної академії медичних наук України. Визначення антибактеріального ефекту проводили методом окислювально-відновлювальної індикації із застосуванням резазуринату натрію [18]. Зразки полімерів уніфікували за розміром: розмір зразків ППіГМА/СПА та ППіГМА/ВНТ/СПА склав

0,5 см та 0,1–0,2 см в діаметрі, розмір зразків ПП/СПА та ПП/СПА/ВНТ склав 1,0×0,2 см. Кожен зразок був поміщений у відповідну лунку 96-лункового планшета. Одноденні культури *E. coli*, *S. aureus* та *P. aeruginosa*, вирощені на середовищі NB (Фармактив, Україна), вносили у відповідну лунку в концентрації, що відповідає 0,1 ОД. Після цього, планшети інкубували при 37°C протягом 24 год. Зразки полімерів забирали з лунок. До культур бактеріальних клітин вносили по 100 мкл розчину резазуринату натрію для досягнення кінцевої концентрації 0,01%. Планшети інкубували при 37°C протягом 20 хвилин. Після цього, проводили спектроскопічні дослідження на планшетному рідері з вертикальним променем (Thermo Labsystems, Вантаа, Фінляндія) при довжинах хвиль 570 нм та 620 нм. Для оцінки бактеріального ефекту приймали контроль бактеріальних клітин без внесення волокон за 100%. Всі визначення були проведені у трьох дослідах, дані усереднені за допомогою медіани, похибка представляє собою інтерквартильний розкид. Для перевірки нульової гіпотези застосовували т-критерій Вілкоксона.

Для дослідження можливості бактеріальних клітин прикріплюватися до волокон, відібрані після 24-годинного культивування зразки також аналізували за допомогою тесту з резазурином натрію. Після 20-хвилинної інкубації, зразки волокон виймали і оцінювали рівень відновлення резазурину окисно-відновними ферментами бактерій. Аналогічно з попередньою методикою, проводили спектроскопічні дослідження на планшетному рідері з вертикальним променем при довжинах хвиль 570 нм та 620 нм. Для оцінки рівня прикріплених клітин як контроль використовували зразки, що не містили клітин бактерій, а інкубувалися в середовищі NB при 37°C протягом 24 год. Всі дані представлені у вигляді медіан з інтерквартильним розкидом. Статичну достовірність перевіряли за допомогою т-критерію Вілкоксона. Достовірну відмінність між вибірками, що порівнювалися, приймали за $p \leq 0,05$.

Результати дослідження. При аналізі впливу полімерних матеріалів на ріст бактеріальних клітин, було встановлено, що зразки ПП/СПА та ППgМА/ВНТ/СПА достовірно підвищують життєздатність клітин бактерій штаму *P. aeruginosa* на 21,4 та 19,4% відповідно ($p \leq 0,05$; рис. 1).



* $p \leq 0,05$

Рис. 1. Вплив полімерних матеріалів на життєздатність бактеріальних клітин *E. coli*, *S. aureus* та *P. Aeruginosa*; ПП/СПА – поліпропілен/співполіамід, ПП/СПА/ВНТ – поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками, ППgМА/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід, ППgМА/ВНТ/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками

Достовірне підвищення росту клітин *S. aureus* на 23,7% було показано для зразку ПП/СПА/ВНТ.

Достовірне зниження життєдіяльності бактеріальних клітин *E. coli* було показано для зразку ППgМА/ВНТ/СПА. Зниження було показано на 13,9%.

Таким чином, можна зробити висновок, що жоден з досліджених полімерів не володіє яскраво-вираженою антибактеріальною дією, проте зразок ППгМА/ВНТ/СПА проявляє достовірне пригнічення росту бактеріальних клітин *E. coli*.

Наступний етап дослідження полягав в оцінці кількості прикріплених клітин до полімерів. Таким чином, було встановлено, що клітин культури *E. coli* не змогли прикріпитися до жодного з досліджуваних матеріалів (рис. 2).

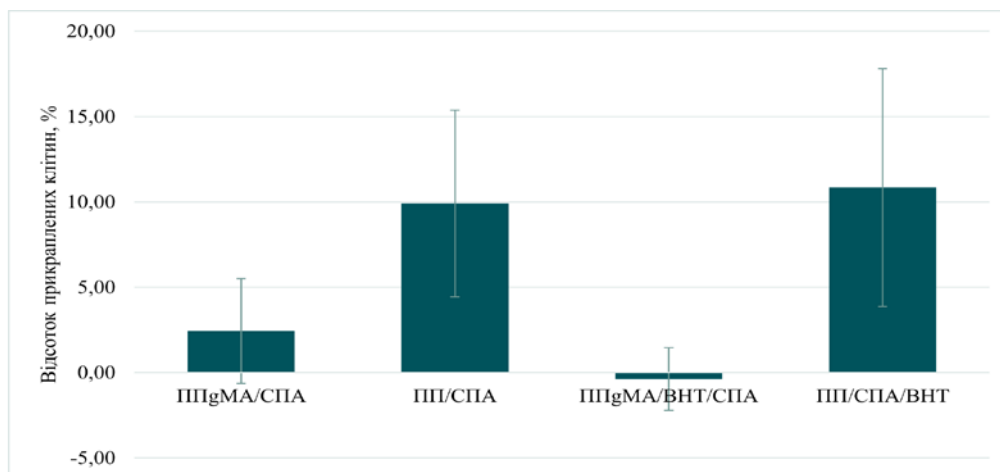
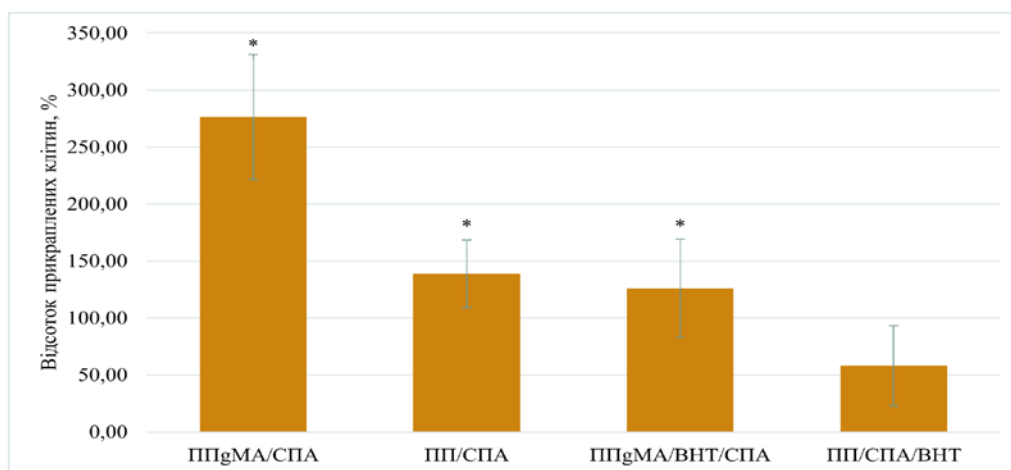


Рис. 2. Кількість прикріплених клітин *E. coli*, до зразків полімерних матеріалів; ПП/СПА – поліпропілен/співполіамід, ПП/СПА/ВНТ – поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками, ППгМА/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід, ППгМА/ВНТ/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками

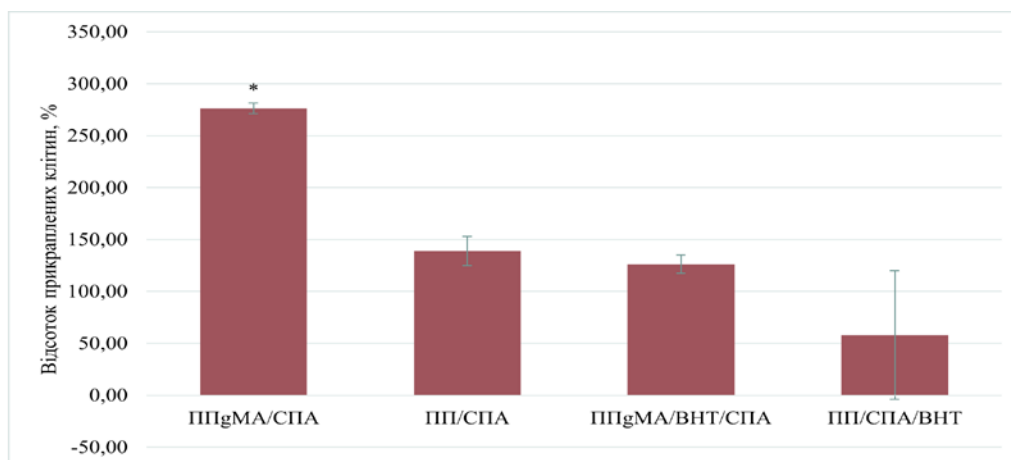
Найбільш значущі результати ми отримали при дослідженні рівня прикріплених клітин *P. aeruginosa*. У всіх зразках був відзначений високий рівень прикріплення клітин, проте, зразок ПП/СПА/ВНТ не мав прикріплених клітин (рис. 3). Це означає, що технологія виробництва хімічних волокон складу поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками забезпечує ефективні відштовхувальні властивості від бактеріальних клітин.



* $p \leq 0,05$

Рис. 3. Кількість прикріплених клітин *P. aeruginosa* до зразків полімерних матеріалів; ПП/СПА – поліпропілен/співполіамід, ПП/СПА/ВНТ – поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками, ППгМА/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід, ППгМА/ВНТ/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками

При дослідженні рівня прикріплених клітин культури *S. aureus*, лише для зразку ППгМА/СПА показано достовірне прикріплення клітин до поверхні. Ні до зразку ПП/СПА, ППгМА/ВНТ/СПА, ПП/СПА/ВНТ клітини бактерій *S. aureus* не прикріплюються (рис. 4).



* $p \leq 0,05$

Рис. 4 Кількість прикріплених клітин *P. aureus* до зразків полімерних матеріалів; ПП/СПА – поліпропілен/співполіамід, ПП/СПА/ВНТ – поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками, ППгМА/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід, ППгМА/ВНТ/СПА – модифікований поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками

Загалом, можна сказати, що волокна поліпропілену/співполіаміду мають гарні відштовхувальні властивості щодо клітин бактерій *E. coli*, *S. aureus* та *P. aeruginosa*.

Висновок. В ході дослідження було встановлено, що жоден з досліджених зразків полімерних матеріалів не володіє яскраво-вираженою антибактеріальною дією, проте зразок вихідного поліпропілену/співполіаміду з вуглецевими нанотрубками проявляє достовірне пригнічення росту бактеріальних клітин *E. coli*. Важливою оцінкою можливості застосування полімерних матеріалів для медичних цілей є їх відштовхувальні або антиадгезивні властивості. Таким чином, при оцінці антиадгезивних властивостей на моделі *E. coli* було встановлено, що всі досліджувані полімерні матеріали мають високі антиадгезивні властивості. На моделі бактеріальних клітин *P. aeruginosa* було показано високу відштовхувальну здатність проти прикріплення клітин лише для зразку поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками. На модельній культурі *S. aureus* було продемонстровано антиадгезивні властивості для зразків поліпропілен/співполіамід та поліпропілен/співполіамід з вуглецевими нанотрубками. Підсумовуючі отримані результати, можна впевнено констатувати, що технологія створення нанополімерних матеріалів на основі суміші поліпропілену/співполіаміду з вуглецевими нанотрубками дозволяє отримати матеріали з високими антиадгезивними властивостями. Це надає надзвичайні перспективи для застосування розроблених матеріалів у виробництві шовних ниток та інших виробів медикобіологічного призначення.

References

1. Lee, D.-K. Et al. (2022). Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Polymer Composites with Various Aspect Ratios. *Materials*, Vol. 15, No. 4, P. 1356. <https://doi.org/10.3390/ma15041356>.

Література

1. Lee D.-K. Et al. Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Polymer Composites with Various Aspect Ratios. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 4. P. 1356. <https://doi.org/10.3390/ma15041356>.

2. Mai, Y. W., Yu, Z. Z. (2006). Polymer nanocomposites. 608 p.
3. Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J. (2016). The effects of cryomilling CNTs on the thermal and electrical properties of CNT/PMMA composites. *Polymers*, 8.5. P. 169.
4. Butenko, O. O. et al. (2020). Osoblyvosti vplyvu nanomaterialiv na ekranuvannya elektromahnitnoho vuprominiuvannya kompozytamy [Peculiarities of the effect of nanomaterials on the shielding of electromagnetic radiation by composites]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dizainu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, No. 3 (146), P. 155–164. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.13> [in Ukrainian].
5. Kim, Y., Lee, S., Yoon, H. (2021). Fire-Safe Polymer Composites: Flame-Retardant Effect of Nanofillers. *Polymers*, Vol. 13, No. 4, P. 540. <https://doi.org/10.3390/polym13040540>.
6. Senyk, I. V. et al. (2020). Development and Application of Thin Wide-Band Screening Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, Vol. 21, No. 4, P. 771–778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>.
7. Alanazi, A. et al. (2016). Carbon nanotubes buckypaper radiation studies for medical physics applications. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 117, P. 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.01.001>.
8. Saleemi, M. A. et al. (2021). An Overview of Antimicrobial Properties of Carbon Nanotubes-Based Nanocomposites. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. <https://doi.org/10.34172/apb.2022.049>.
9. Liu, Z. et al. (2007). Supramolecular Chemistry on Water-Soluble Carbon Nanotubes for Drug Loading and Delivery. *ACS Nano*, Vol. 1, No. 1, P. 50–56. <https://doi.org/10.1021/nn700040t>.
10. Podesta, J. E. et al. (2009). Antitumor Activity and Prolonged Survival by Carbon-Nanotube-Mediated Therapeutic siRNA Silencing in a Human Lung Xenograft Model. *Small*. <https://doi.org/10.1002/sml.200801572>.
11. Robinson, J. et al. (2010). High performance in vivo near-IR (>1 μm) imaging and photothermal cancer therapy with carbon nanotubes. *Nano Research*, Vol. 3, No. 11, P. 779–793. <https://doi.org/10.1007/s12274-010-0045-1>.
12. Kang, S., Mauter, M. S., Elimelech, M. (2008). Physicochemical Determinants of Multiwalled Carbon Nanotube Bacterial Cytotoxicity. *Environmental Science &*
2. Mai Y. W., Yu Z. Z. Polymer nanocomposites. 2006. 608 p.
3. Mittal G., Rhee K. Y., Park S. J. The effects of cryomilling CNTs on the thermal and electrical properties of CNT/PMMA composites. *Polymers*. 2016. 8.5. P. 169.
4. Бутенко О. О. та ін. Особливості впливу наноматеріалів на екранування електромагнітного випромінювання композитами. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2020. № 3 (146). С. 155–164. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.13>.
5. Kim Y., Lee S., Yoon H. Fire-Safe Polymer Composites: Flame-Retardant Effect of Nanofillers. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 540. <https://doi.org/10.3390/polym13040540>.
6. Senyk I. V. et al. Development and Application of Thin Wide-Band Screening Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, No. 4. P. 771–778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>.
7. Alanazi A. et al. Carbon nanotubes buckypaper radiation studies for medical physics applications. *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. Vol. 117. P. 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.01.001>.
8. Saleemi M. A. et al. An Overview of Antimicrobial Properties of Carbon Nanotubes-Based Nanocomposites. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. 2021. URL: <https://doi.org/10.34172/apb.2022.049>
9. Liu Z. et al. Supramolecular Chemistry on Water-Soluble Carbon Nanotubes for Drug Loading and Delivery. *ACS Nano*. 2007. Vol. 1, No. 1. P. 50–56. <https://doi.org/10.1021/nn700040t>.
10. Podesta J. E. et al. Antitumor Activity and Prolonged Survival by Carbon-Nanotube-Mediated Therapeutic siRNA Silencing in a Human Lung Xenograft Model. *Small*. 2009. <https://doi.org/10.1002/sml.200801572>.
11. Robinson J. et al. High performance in vivo near-IR (>1 μm) imaging and photothermal cancer therapy with carbon nanotubes. *Nano Research*. 2010. Vol. 3, No. 11. P. 779–793. <https://doi.org/10.1007/s12274-010-0045-1>.
12. Kang S., Mauter M. S., Elimelech M. Physicochemical Determinants of Multiwalled Carbon Nanotube Bacterial Cytotoxicity.

- Technology, Vol. 42, No. 19, P. 7528–7534. <https://doi.org/10.1021/es8010173>.
13. Lu, X. et al. (2019). Long-term pulmonary exposure to multi-walled carbon nanotubes promotes breast cancer metastatic cascades. *Nature Nanotechnology*, Vol. 14, No. 7, P. 719–727. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0472-4>.
14. Rezanova, V. H., Rezanova, N. M. (2020). Prohramne zabezpechennia dlia doslidzhennia polimernykh system: monohrafiia [Prohramne zabezpechennia dlia doslidzhennia polimernykh system: monohrafiia]. Kyiv: ArtEk. 358 p. [in Ukrainian].
15. Tsebrenko, M. V., Rezanova, V. H., Melnyk, I. A., Rezanova, N. M., Viltsaniuk, O. A., Khutorianskyi, M. O. (2012). Nanonapovneni polipropilenovi mononytky [Nano-filled polypropylene monofilaments]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizainu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, No. 4, P. 93–96 [in Ukrainian].
16. Melnyk, I. A., Rezanova, V. H., Tsebrenko, M. V., Rezanova, N. M., Hotfrid, A. O., Viltsaniuk, O. A. (2013). Polipropilenovi khirurhichni mononytky z antimikrobnymy vlastyvostiamy [Polypropylene surgical monofilaments with antimicrobial properties]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizainu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, No. 2, P. 79–85 [in Ukrainian].
17. Rezanova, N. M., Plavan, V. P., Dziubenko, L. S., Sapiianenko, O. O., Horbyk, P. P., Korshun, A. V. (2018). Strukturoutvorennia u kompatybilizovanykh nanonapovnenykh roztopakh polipropilen/plastyfikovanyi polivinilovyi spyrnt [Structure formation in compatibilized nanofilled melts of polypropylene/plasticized polyvinyl alcohol]. *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohii = Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies*, Vol. 16, No. 1, P. 55–70 [in Ukrainian].
18. Chakansin, Chanthiwa et al. (2022). Resazurin rapid screening for antibacterial activities of organic and inorganic nanoparticles: Potential, limitations and precautions. *Analytical Biochemistry*, 637 (2022): 114449.
- Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 42, No. 19. P. 7528–7534. <https://doi.org/10.1021/es8010173>.
13. Lu X. et al. Long-term pulmonary exposure to multi-walled carbon nanotubes promotes breast cancer metastatic cascades. *Nature Nanotechnology*. 2019. Vol. 14, No. 7. P. 719–727. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0472-4>.
14. Резанова В. Г., Резанова Н. М. Програмне забезпечення для дослідження полімерних систем: монографія. К.: АртЕк, 2020. 358 с.
15. Цебренко М. В., Резанова В. Г., Мельник І. А., Резанова Н. М., Вільцанюк О. А., Хуторянський М. О. Нанонаповнені поліпропіленові мононитки. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2012. № 4. С. 93–96.
16. Мельник І. А., Резанова В. Г., Цебренко М. В., Резанова Н. М., Готфрід А. О., Вільцанюк О. А. Поліпропіленові хірургічні мононитки з антимікробними властивостями. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2013. № 2. С. 79–85.
17. Резанова Н. М., Плаван В. П., Дзюбенко Л. С., Сап'яненко О. О., Горбик П. П., Коршун А. В. Структуроутворення у компатибілізованих нанонаповнених розтопах поліпропілен/пластифікований полівініловий спирт. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2018. Т. 16, № 1. С. 55–70.
18. Chakansin, Chanthiwa et al. Resazurin rapid screening for antibacterial activities of organic and inorganic nanoparticles: Potential, limitations and precautions. *Analytical Biochemistry*. 2022. 637. 114449.

ISHCHENKO OLENA

Doctor of Sci., Associate Professor
Department of Chemical Technologies and Resource
Saving, Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

Scopus Author ID: 57200013816

Researcher ID: GYV-0809-2022

E-mail: ishhenko.ov@knutd.com.ua

PLAVAN VIKTORIIA

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of
Department of Chemical Technologies and Resource
Saving, Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

Scopus Author ID: 6603130130

Researcher ID: I-5852-2015

E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua

SHYDLOVSKA OLGA

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Department of Biotechnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-6926-3672>

Scopus Author ID: 57073833800

Researcher ID: D-6578-2019

E-mail: shydlovska.oa@knutd.edu.ua

KHARCHENKO YEVHEN

master's student Department of Chemical Technologies
and Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-4246-3746>

E-mail: y.kharchenko@farmak.ua

ISHCHENKO O. V., PLAVAN V. P., SHYDLOVSKA O. A., KHARCHENKO Ye.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**RESEARCH OF THE ANTIBACTERIAL EFFECT
OF NANO-FILLED POLYMER MATERIALS**

Purpose. The aim of the scientific work is to research the antibacterial effect of nano-filled polymer materials based on a mixture of polypropylene/co-polyamide with the addition of carbon nanotubes.

Methodology. To evaluate the antibacterial effect of nano-filled polymer materials, reference strains of *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 bacteria were used. The antibacterial effect of polymer samples was determined by the method of redox indication using sodium resazurate. To investigate the ability of bacterial cells to attach to polymeric materials, samples taken after 24-hour cultivation were also analyzed using the sodium resazurate test. Statistical validity was tested using the Wilcoxon *t*-test.

Findings. The antibacterial effect of nanofilled polymer materials based on a mixture of polypropylene/copolyamide with the addition of carbon nanotubes was studied. It was established that the original polypropylene/co-polyamide with carbon nanotubes reliably inhibits the growth of *E. coli*. Investigation of anti-adhesive properties of polymers showed effective and reliable repellency against *E. coli*, *P. aeruginosa* and *S. aureus* cell attachment for polypropylene/co-polyamide with carbon nanotubes.

Originality. The scientific novelty of the work consists in establishing the antibacterial and anti-adhesive properties of nano-filled polymer materials based on a mixture of polypropylene/co-polyamide with the addition of carbon nanotubes.

Practical value. The antibacterial effect of the original polypropylene/co-polyamide with the addition of carbon nanotubes (1 wt.%) was established, as well as the high anti-adhesive effect of polypropylene/co-polyamide with the addition of carbon nanotubes against a number of bacterial strains, which is important for materials in contact with wound surfaces.

Keywords: polypropylene fibers; carbon nanotubes; nanocomposites; antibacterial properties.