

УДК 536.6:537.9:579.69

Лисенков Е. А.¹, Стрюцький О. В.²

¹Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв,
E-mail: ea.lysenkov@ukr.net

²Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, Київ

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1369-4609>

² <https://orcid.org/0000-0002-1457-2312>

Структура та електричні властивості антимікробних полімерних нанокомпозитів, наповнених вуглецевими нанотрубками та наночастинками срібла

*У роботі досліджено структуру, електропровідність та антимікробні властивості нанокомпозитів на основі поліетиленоксиду, модифікованих багатошаровими вуглецевими нанотрубками (ВНТ), наночастинками срібла (НЧС). Методами рентгеноструктурного аналізу встановлено, що введення наповнювачів різних типів приводить до зниження ступеня кристалічності полімерної матриці. Найбільше пригнічення кристалічності системи спостерігалось при наповненні гібридним наповнювачем. Методом імпульсної спектроскопії виявлено перколяційну поведінку електропровідності зі значеннями перколяційних переходів: 0,5% для ВНТ, 1% для НЧС та лише 0,3% для гібридного наповнювача. Антимікробні дослідження показали, що гібридні композити є найефективнішими проти *S. aureus*, *E. coli* та *C. albicans*, демонструючи зони інгібіції до 16 мм. Отримані результати підтверджують перспективність комбінованих нанонаповнювачів для створення функціональних матеріалів з покращеними електропровідними та біоцидними властивостями.*

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, наночастинки срібла, полімерні нанокомпозити, електрична перколяція, ступінь кристалічності, антимікробна активність.

Нанотехнології відкривають нові горизонти у створенні матеріалів з унікальними властивостями, недосяжними для макроскопічних систем. Упродовж останнього десятиліття спостерігається значне зростання кількості публікацій, присвячених полімерним нанокомпозитам із антимікробною дією [1]. У таких системах ключову роль відіграють неорганічні наночастинки (зокрема, срібла, міді, цинку, діоксиду титану), які забезпечують пролонговану антибактеріальну активність без потреби додаткової обробки. Зокрема, використання наночастинок срібла (НЧС) у складі полімерних матриць дозволяє ефективно реалізувати антимікробний потенціал срібла без перевищення токсикологічно безпечних концентрацій [2]. НЧС здатні інгібувати ріст широкого спектра грам-позитивних та грам-негативних бактерій, а також мікотичної мікрофлори, шляхом взаємодії з клітинною мембраною, генерації активних форм кисню, руйнування ДНК та порушення метаболічних процесів у клітині [3]. Крім того, вуглецеві нанотрубки (ВНТ), що володіють високими механічними, електричними, теплопровідними та поверхневими характеристиками, широко досліджуються як армувальні та функціональні нанофазові компоненти для полімерів [4]. Їхня здатність до створення перколяційних сіток у матриці, участь у формуванні міжфазної взаємодії

та сприяння транспорту зарядів роблять ВНТ особливо привабливими при створенні електропровідних або сенсорних матеріалів [5].

Ще більший науковий та практичний інтерес викликає одночасне використання НЧС та ВНТ у складі полімерного композиту [6]. Такий гібридний підхід дозволяє не лише об'єднати переваги окремих компонентів, а й досягти їхньої синергії – якісного посилення властивостей матеріалу завдяки взаємодії нанофаз між собою. Наприклад, ВНТ можуть виступати як носії для НЧС, сприяючи рівномірному їх розподілу у полімерній матриці та зменшуючи тенденцію до агрегації [7]. Натомість присутність срібла на поверхні ВНТ може посилювати електропровідність композиту або надавати йому нових фотокаталітичних властивостей. Завдяки цьому комбіновані нанокompозити на основі полімерів, ВНТ і НЧС можуть демонструвати не лише високу міцність, провідність і стабільність, а й виражену антимікробну активність, що робить їх ідеальними кандидатами для застосування у медицині, фармацевтиці, харчовій промисловості, а також у створенні покриттів для поверхонь, що підлягають частому мікробному забрудненню (хірургічні інструменти, пакування, фільтри тощо).

Постановка задачі. Одним із перспективних методів модифікації полімерних матеріалів є введення в матрицю комбінованого наповнювача, який здатен покращити характеристики і водночас надати композитам певні функції, наприклад, антимікробні. У роботі [8] давно відомий антимікробний агент (Ag), був модифікований шляхом гібридизації наноматеріалів різних розмірів, а на вуглецевих нанотрубках були синтезовані наночастинки срібла контрольованих розмірів (95–200 нм) та різних форм (куб, сніжинка та сфера). Отримані наногібриди НЧС-ВНТ продемонстрували значно вищу ефективність знищення *Staphylococcus aureus* порівняно з НЧС при тій самій молярній концентрації та показали синергізм у знищенні *S. aureus* при 0,2 та 0,4 мМ.

У роботі [9] автори успішно синтезували гібридні нанокompозити зі наночастинок срібла та багат шарових вуглецевих нанотрубок (НЧС-ВНТ) екологічним одностадійним методом без використання будь-якого органічного розчинника. Синтез та прикріплення НЧС до поверхні ВНТ проводилися одночасно шляхом хімічного відновлення. На додаток до їх синтезу, було проведене спікання НЧС-ВНТ за кімнатної температури. Результати показали, що плівка з гібридним наповнювачем має гарні властивості, такі як висока міцність на згинання, високу прозорість та високу електропровідність, і тому може бути ефективною заміною звичайних плівок оксиду індію-олова з низькою гнучкістю.

Для отримання функціональних нанокompозитних матеріалів Krainoi et al. змішували гібридний наповнювач з вуглецевих нанотрубок та наночастинок срібла з натуральним каучуком (НК) у співвідношенні ВНТ:НЧС = 100:1 [10]. Виявлено, що гібридний наповнювач ВНТ-НЧС покращив різні властивості композитів НК, включаючи механічні характеристики, порівняно зі звичайним композитом НК-ВНТ. Крім того, була виявлена вища електропровідність з порівняно низьким порогом перколяції гібридних композитів порівняно з композитом НК-

ВНТ. Це може бути пов'язано з декоруванням частинок НЧС на поверхнях вуглецевих нанотрубок або між пучками ВНТ, що перешкоджає агломерації ВНТ та сприяє тунелюванню електронів.

Гібридні нанокompозити на основі ВНТ і НЧС вже активно досліджуються у таких різних сферах біомедичного сектору: від антимікробних плівок та покриттів для імплантатів і інструментів до сенсорів та електродів з самостерилізацією. Ноang et al. виготовили тонкі композитні плівки ВНТ-НЧС за допомогою процесу трафаретного друку на основі розчину [11]. Вони створили п'єзорезистивні сенсори з високим коефіцієнтом деформації до 221,2. Також було показано, що включення ВНТ зміцнює композитну плівку, що призводить до створення міцних сенсорів, які можуть витримувати 500 циклів розтягування-стиснення (максимальна деформація 0,5 %) без погіршення чутливості.

Отже, поєднання ВНТ та НЧС у полімерній матриці є досить перспективним шляхом для покращення властивостей конструкційних матеріалів. Тому метою даної роботи було вивчення впливу вуглецевих нанотрубок та наночастинок срібла на структурні, електричні характеристики та антимікробну активність полімерних нанокompозитів на основі поліетиленоксиду, та встановлення їх синергетичного ефекту.

Експериментальна частина. Поліетиленоксид (ПЕО-10000), $H-[O-CH_2-CH_2-]_nOH$ ($n \approx 220$) молекулярної маси $M_w = 10000$, виробництва компанії Fluka, був обраний полімерною матрицею. При $T = 298$ К ПЕО-10000 є твердою речовиною з густиною $\rho = 1070$ кг/м³. Температура плавлення $T_{пл} \approx 64-65$ °С. Перед використанням ПЕО-10000 зневоднювали нагріванням у вакуумі протягом чотирьох годин при 100-120 °С при залишковому тиску 300 Па.

Багатошарові ВНТ виробництва ВАТ «Спецмаш» (Україна) виготовлені з етилену методом хімічного осадження парів. Вміст мінеральних домішок складав не більше 0,1%. За даними виробника, питома поверхня – 190 м²/г, зовнішній діаметр – 15 нм, довжина (5÷10) мкм, аспектне відношення $L/d \approx 250 \pm 170$, а густина ВНТ становить $\rho = 2045$ кг/м³.

Для отримання наночастинок срібла (НЧС) використовували цитратний метод відновлення, запропонований Туркевичем для колоїдних частинок металів [12]. НЧС отримували відновленням срібла в складі AgNO₃ тринатрійцитратом [13] у присутності іонвмісного олігомеру гіперрозгалуженої будови ГР-([SO₃]⁻[NMim⁺])₃₂ як стабілізатора їх поверхні. Більш детально синтез НЧС приведено у [14]. Розміри наночастинок срібла становили 7-19 нм.

Нанокompозити на основі ПЕО були приготовані методом ультразвукового змішування наночастинок у розплаві за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД-А650. Час диспергування становив 5 хв, потужність – 150 Вт. Вміст наповнювача варіювали від 0,5 до 2 мас. %.

Отримані зразки досліджували методом ширококутової рентгенографії (ШКР) на дифрактометрі XRD-7000 (Shimadzu, Японія), з використанням CuK_α-випромінювання ($\lambda = 1,54$ Å) і графітового монохроматора. Дослідження виконували методом автоматичного покрокового сканування в режимі $U = 30$ кВ, $I = 30$

мА у інтервалі кутів розсіювання від 3,0 до 80 градусів, час експозиції становив 5 с.

Електричні властивості досліджували методом імпедансної спектроскопії, реалізованої на базі вимірювача іммітансу E7-20. При цьому вимірювали дійсну (Z') та уявну (Z'') частини імпедансу у частотному інтервалі від 10 Гц до 1 МГц. Товщина зразків становила 100 мкм.

Антимікробну активність наночастинок вивчали методом дифузії в агар на твердому поживному середовищі Мюллера-Хінтона для бактерій, та середовищі Сабуро – для кандид. Чашки Петрі з поживним середовищем засівали 10 μ L інокуляту тест-мікроорганізмів *S. aureus*, *E. coli* та *C. albicans* з розрахунку $2 \cdot 10^5$ КУО/мл. Отримані матеріали масою 0,1 г поміщали на поверхню поживного середовища, засіяного тест-мікроорганізмами. Чашки інкубували 24 год за температури 37 °С. Показником антимікробної активності була наявність чіткої вільної від мікроорганізмів зони навколо диска зразка з наночастинками срібла. Чим більша зона навколо диска, тим вища інгібуюча ефективність зразка. Контролем слугувала область на чашці Петрі, яка не містила антимікробних препаратів. Дослід повторювали тричі. Достовірність результатів оцінювали за t -критерієм Стьюдента.

Результати та обговорення. Для вивчення впливу вуглецевих нанотрубок та наночастинок срібла на формування та кінцеві властивості полімерних нанокompatитів на основі поліетиленоксиду проводили дослідження структурних особливостей, електричних характеристик та антимікробної активності.

Структура нанокompatитів на основі поліетиленоксиду та різних типів наповнювачів. Вивчення структурної організації та морфології полімерних нанокompatитів має ключове значення для розуміння механізмів формування їхніх функціональних властивостей, зокрема електропровідності, механічної міцності та біоактивності.

На рис. 1 приведені криві ШКР для нанокompatитів на основі ПЕО. На дифрактограмі для ненаповненого ПЕО спостерігаються інтенсивні піки, характерні для кристалічних фаз, із головними максимумами у ділянці $2\theta \sim 19,2^\circ$ та $23,3^\circ$, що відповідає міжплощинним відстаням у межах 0,46–0,37 нм.

Після введення нанопоповнювачів спостерігається послідовне зменшення інтенсивності кристалічних піків, що свідчить про часткову аморфізацію полімерної матриці [15].

У випадку наповнення ВНТ інтенсивність кристалічних піків зменшується на 10-12 % вже при 0,3 % наповнювача. При 1,5 % вмісту спостерігається падіння ступеня кристалічності до 40 %, що обумовлено ефектом перешкоджання регулярному укладанню макромолекул ПЕО в присутності жорстких трубчастих структур.

Наночастинки срібла мають менш виражений вплив на кристалічність. Зменшення становить близько 5-8 % при 0,3-0,6 % і досягає 45-47 % при 1,5 %. Це пов'язано з меншою геометричною анізотропією частинок та локальністю їх взаємодії з ланцюгами ПЕО.

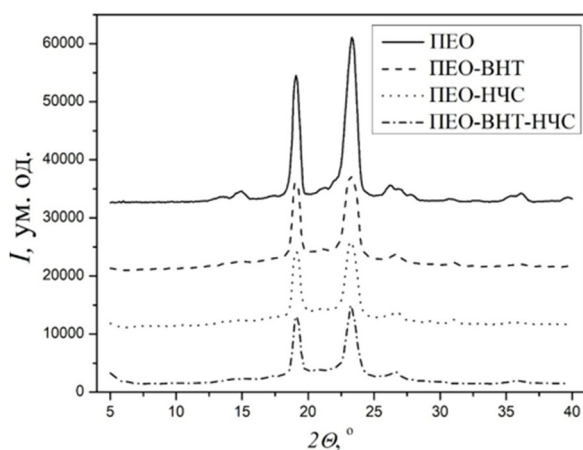


Рис 1. Дифрактограми для систем на основі ПЕО та нанонаповнювачів різних типів.

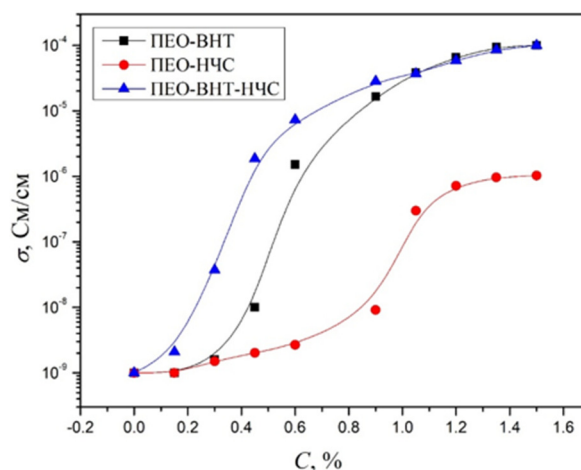


Рис. 2. Графіки залежності логарифму електропровідності від концентрації наповнювача для систем на основі ПЕО.

Найбільш виражений ефект зниження кристалічності спостерігається у гібридних системах ВНТ–НЧС. Вже при 0,45 % загального вмісту наповнювачів ступінь кристалічності знижується до 48 %, а при 1,5 % – до менше ніж 35 %. Це може бути наслідком комбінованого механічного та хімічного впливу [16]: ВНТ порушують впорядкування макромолекул за рахунок просторових обмежень, а НЧС – через можливу координаційну взаємодію з функціональними групами полімеру.

Електричні властивості систем поліетиленоксид – нанонаповнювач. Електричні властивості полімерних нанокомпозитів мають вирішальне значення для їх застосування у біомедичних сенсорах, електропровідних покриттях, антистатичних матеріалах, а також у системах із самостерилізацією за допомогою локального нагріву. Поліетиленоксид є за своєю природою діелектриком, проте додавання до нього електропровідних нанонаповнювачів здатне суттєво змінити електричну поведінку матеріалу завдяки ефектам перколяції [17].

На рис. 2 приведена залежність електропровідності від вмісту наповнювачів для систем на основі ПЕО. На графіку типу $\log(\sigma) = f(C)$ для кожної серії спостерігається характерний S-подібний перколяційний перехід.

З рис. 2 видно, що для зразків ПЕО-ВНТ характерне різке зростання електропровідності при досягненні критичної концентрації ВНТ, тобто перколяційного порогу. Для системи ПЕО-ВНТ поріг перколяції становить близько 0,5 %. Це узгоджується з літературними даними і зумовлено формуванням неперервної електропровідної сітки з нанотрубок у діелектричній матриці [18].

До перколяційного порогу (до 0,45 %), електропровідність становить $\sim 10^{-9}$ См/см, що є типовим для ізоляційних полімерів. При 0,6 % вмісту ВНТ електропровідність зростає до $\sim 10^{-6}$ См/см, а при 1,5 % – перевищує $\sim 10^{-4}$ См/см. Це свідчить про добре сформовану сітку із ВНТ, яка пронизує весь об'єм матеріалу.

З рис. 2 також видно, що системи з наночастинками срібла демонструють вищий поріг перколяції – близько 1 %, що пов'язано з частковим покриттям НЧС стабілізатором – ГР-ОІР. Присутність на поверхні частинок срібла молекул стабілізатора унеможливує прямий контакт між частинками. У такому випадку основним механізмом переносу зарядів є тунелювання [19].

До 0,9 % вмісту НЧС електропровідність залишається низькою – $\sim 10^{-8}$ См/см. При 1,05 % спостерігається початок перколяційного підйому, а на рівні 1,5 % досягається електропровідність $\sim 10^{-6}$ См/см.

Найбільш вражаючі результати були отримані для комбінованого нанопоповнювача. Гібридні композити з рівною масовою часткою ВНТ і НЧС (по 0,075 % – 0,75 % кожного в парі) демонстрували знижений поріг перколяції – близько 0,3 % загального наповнення.

Це свідчить про виражений синергетичний ефект, пов'язаний з тим, що ВНТ, як лінійні структури, утворюють каркас для формування електропровідної мережі, а НЧС виступають як містки, що з'єднують розірвані кластери ВНТ, заповнюючи мікропроміжки [20]. Таким чином підвищується кількість контактних точок між провідними фрагментами.

Електропровідність зростає вже на рівні 0,3 % до $\sim 10^{-7}$ См/см, а при 0,6 % – перевищує $\sim 10^{-5}$ См/см, що майже вдвічі ефективніше за індивідуальні наповнювачі при тому ж вмісті. При 1,5 % наповнення гібридні зразки досягають електропровідності порядку $\sim 10^{-4}$ См/см, що відповідає антистатичним полімерним матеріалам.

Антимікробна активність досліджуваних матеріалів. Антимікробні властивості полімерних нанокомпозитів є ключовим параметром при їх використанні у біомедичних застосуваннях, особливо у виробництві перев'язувальних матеріалів, пакувальних систем для фармацевтичної продукції, антимікробних плівок та покриттів. У цьому дослідженні було проаналізовано антимікробну активність нанокомпозитних матеріалів на основі поліетиленоксиду з молекулярною масою 10000, модифікованих багатошаровими вуглецевими нанотрубками, наночастинками срібла, а також їх гібридною комбінацією.

Результати досліджень свідчать, що тип нанопоповнювача має вирішальний вплив на антимікробну активність отриманих матеріалів. Кількісні значення діаметра зон інгібіції наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що нанокompозити, модифіковані лише вуглецевими нанотрубками, виявили слабку інгібуючу активність відносно тест-культур. Це пояснюється тим, що ВНТ, хоча й можуть механічно пошкоджувати клітинну мембрану мікроорганізмів та викликати локальний оксидативний стрес, не є класичними антисептиками. Їх дія, ймовірно, реалізується через фізичну взаємодію із зовнішньою мембраною бактерій та грибків, зокрема через адсорбцію й перешкоджання біоплівкоутворенню. Найбільшу, хоч і помірну, інгібуючу активність спостерігали щодо *Staphylococcus aureus*, ймовірно, через чутливішу клітинну оболонку до механічного ушкодження.

Матеріали з наночастинками срібла очікувано показали високу антимікробну активність проти всіх протестованих мікроорганізмів. Найбільший ефект спостерігався щодо *S. aureus* (зона інгібіції до 12 мм), що узгоджується з літературними даними про високу чутливість грампозитивних бактерій до срібла [21]. *E. coli* виявила дещо меншу чутливість, ймовірно через наявність додаткового зовнішнього ліпополісахаридного шару, який частково перешкоджає проникненню іонів Ag^+ . *Candida albicans* проявила стійкість у межах, близьких до бактеріального рівня, що свідчить про здатність срібла пригнічувати й грибкову мікрофлору.

Матеріали, що містили одночасно ВНТ та НЧС у рівному співвідношенні, продемонстрували найвищу інгібуючу активність серед усіх зразків. Усі протестовані мікроорганізми показали суттєве пригнічення росту, з максимальними зонами інгібіції – до 16 мм для *S. aureus*, 14 мм для *E. coli* та 12 мм для *C. albicans*. Такий результат є яскравим свідченням синергетичної дії наповнювачів: ВНТ сприяють рівномірному розподілу НЧС у полімерній матриці, підвищують доступність срібла до поверхні, запобігають агрегації частинок, а також можуть додатково механічно пошкоджувати клітини. Водночас вміст кожного компонента був лише 1 %, що важливо з точки зору біосумісності та зниження токсичності.

Отже, отримані результати демонструють, що гібридна система на основі ПЕО, ВНТ і НЧС має потенціал для створення нових матеріалів із потужними антимікробними властивостями. Особливо важливо, що синергетичний ефект дозволяє знизити концентрацію срібла, що позитивно впливає на токсикологічний профіль та зменшує собівартість матеріалу.

Висновки. У результаті виконаної роботи було досліджено вплив вуглецевих нанотрубок, наночастинок срібла та їх комбінацій як наповнювачів на структуру та електричні властивості антимікробних полімерних нанокompозитів, на

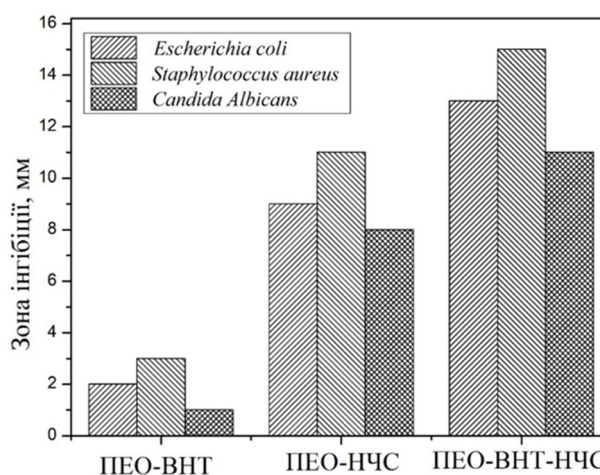


Рис. 3. Значення діаметрів зон інгібіції різного типу мікроорганізмів для нанокompозитних систем на основі ПЕО.

основі поліетиленоксиду. Розроблено нові нанокомпозитні матеріали на основі ПЕО, які містять вуглецеві нанотрубки, наночастинки срібла або їх комбінацію. Встановлено, що гібридний наповнювач (ВНТ-НЧС у співвідношенні 1:1) демонструє покращені характеристики в порівнянні з системами, що містять лише один тип нанофази.

Дослідження структури показало зниження ступені кристалічності полімерної матриці при введенні наноаповнювачів різного типу. Найбільш виражений ефект зниження кристалічності спостерігається у гібридних системах ВНТ–НЧС.

Імпедансна спектроскопія показала різкий ріст електропровідності поблизу порогів перколяції: 0,5 % для ВНТ, 1 % для НЧС та лише 0,3 % для комбінованих систем у ПЕО. Це підтверджує наявність синергетичного ефекту, при якому комбіноване використання двох провідних нанофаз забезпечує формування провідної сітки при нижчих концентраціях.

Антимікробні дослідження, проведені диско-дифузійним методом, підтвердили ефективність НЧС та, особливо, гібридного наповнювача проти *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* та *Candida albicans*. Найбільші зони інгібіції досягали 15 мм для, що перевищує значення для систем із НЧС окремо. Таким чином, поєднання ВНТ з НЧС сприяє більш активному вивільненню іонів срібла завдяки збільшенню питомої площі розподілу.

Отже, у роботі встановлено синергетичну дію наночастинок срібла та вуглецевих нанотрубок, яка проявляється у зниженні порогу перколяції, покращенні електричних характеристик, а також підвищенні антибактеріальної активності.

Література:

1. Reddy S.J. The Recent Advances in the Nanotechnology and Its Applications – A Review // IOSR J. Biotechnol. Biochem. (IOSR-JBB). – 2020. – Vol. 6 (1). – P. 24–30.
2. Liao C., Li Y., Tjong S.C. Bactericidal and cytotoxic properties of silver nanoparticles // Int. J. Mol. Sci. – 2019. – Vol. 20 (2). – P. 449.
3. Yin I.X., Zhang J., Zhao I.S., Mei M.L., Li Q., Chu C.H. The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry // Int. J. Nanomedicine. – 2020. – Vol. 15. – P. 2555–2562.
4. Sivasubramaniyam V., Ramasamy S., Venkatraman M., Gatto G., Kumar A. Carbon Nanotubes as an Alternative to Copper Wires in Electrical Machines: A Review // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3665.
5. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // Compos. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 69 (10). – P. 1486–1498.
6. Huang J., Li D., Zhao M., Mensah A., Lv P., Tian X., Huang F., Ke H., Wei Q. Highly Sensitive and Stretchable CNT-Bridged AgNP Strain Sensor Based on TPU Electrospun Membrane for Human Motion Detection // Adv. Electron. Mater. – 2019. – Vol. 5. – P. 1900241.
7. Yusof Y., Zaidi M.I., Johan M.R. Enhanced Structural, Thermal, and Electrical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Hybridized with Silver Nanoparticles // J. Nanomater. – 2016. – P. 1–9.

8. *Yan J., Wang Q., Yang J., Rutter P., Xing M., Li B.* Chemical Synthesis of Innovative Silver Nanohybrids with Synergistically Improved Antimicrobial Properties // *Int. J. Nanomedicine.* – 2023. – Vol. 18. – P. 2295–2305.
9. *Natsuki J., Natsuki T.* Silver Nanoparticle/Carbon Nanotube Hybrid Nanocomposites: One-Step Green Synthesis, Properties, and Applications // *Nanomaterials.* – 2023. – Vol. 13. – P. 1297.
10. *Krainoi A., Kummerlöwe C., Nakaramontri Y., Wisunthorn S., Vennemann N., Pichaiyut S., Kiatkamjornwong S., Nakason C.* Novel natural rubber composites based on silver nanoparticles and carbon nanotubes hybrid filler // *Polym. Compos.* – 2019. – P. 1–16.
11. *Tran Hoang P., Salazar N., Porkka T.N., Joshi K., Liu T., Dickens T.J., Yu Z.* Engineering Crack Formation in Carbon Nanotube-Silver Nanoparticle Composite Films for Sensitive and Durable Piezoresistive Sensors // *Nanoscale Res. Lett.* – 2016. – Vol. 11. – P. 422.
12. *Turkevich J., Stevenson P.C., Hillier J.* A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold // *Discuss. Faraday Soc.* – 1951. – Vol. 11. – P. 55–75.
13. *Rivas L., Sanchez-Cortes S., García-Ramos J.V., Morcillo G.* Growth of silver colloidal particles obtained by citrate reduction to increase the Raman enhancement factor // *Langmuir.* – 2001. – Vol. 17 (3). – P. 574–577.
14. *Lysenkov E.A., Striutskyi O.V., Klymenko L.P., Shevchenko V.V.* Silver nanoparticles stabilized by oligomeric hyperbranched ionic liquid: structure and antimicrobial properties // *Azerbaijan Chem. J.* – 2024. – No. 1. – P. 60–69.
15. *Tarani E., Arvanitidis I., Christofilos D., et al.* Calculation of the degree of crystallinity of HDPE/GNPs nanocomposites by using various experimental techniques: a comparative study // *J. Mater. Sci.* – 2023. – Vol. 58. – P. 1621–1639.
16. *Sarhan A.S., Abdel-Hamid M.I., Hanie R.* Green synthesis of (CS/OLE) AgNPs and evaluation of their physico-chemical characteristic // *Appl. Nanosci.* – 2022. – Vol. 12. – P. 2765–2776.
17. *Klepko V.V., Lysenkov E.A.* Features of percolation transition in systems on the basis of oligoglycols and carbon nanotubes // *Ukr. J. Phys.* – 2015. – Vol. 60, No. 9. – P. 944–949.
18. *Lysenkov E.A., Klepko V.V., Lysenkova I.P.* Features of microstructure and percolation behavior of polypropylene glycol, filled by multiwalled carbon nanotubes // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2017. – Vol. 9, No. 5. – P. 05021-1–05021-6.
19. *Zhu L.-J., Cai W.-Z., Gu B.-Q., Tu S.-T.* Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // *Mod. Phys. Lett. B.* – 2009. – Vol. 23, No. 10. – P. 1273–1279.
20. *Sagalianov I., Vovchenko L., Matzui L., Lazarenko O.* Synergistic enhancement of the percolation threshold in hybrid polymeric nanocomposites based on carbon nanotubes and graphite nanoplatelets // *Nanoscale Res. Lett.* – 2017. – Vol. 12, No. 1. – P. 140.
21. *Chapa González C., González García L.I., Burciaga Jurado L.G., Carrillo Castillo A.* Bactericidal activity of silver nanoparticles in drug-resistant bacteria // *Braz. J. Microbiol.* – 2023. – Vol. 54, No. 2. – P. 691–701.

E. A. Lysenkov, O. V. Striutskyi

Structure and electrical properties of antimicrobial polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes and silver nanoparticles

SUMMARY

*The work investigated the structure, electrical conductivity and antimicrobial properties of polyethylene oxide-based nanocomposites modified with multi-walled carbon nanotubes (CNTs) and silver nanoparticles (AgNPs). X-ray diffraction analysis showed that the introduction of different types of fillers leads to a decrease in the degree of crystallinity of the polymer matrix. The greatest suppression of the crystallinity of the system was observed when filled with a hybrid filler. Impedance spectroscopy revealed a percolation behavior of electrical conductivity with the values of percolation transitions: 0.5% for CNTs, 1% for AgNPs and only 0.3% for the hybrid filler. Antimicrobial studies showed that hybrid composites are the most effective against *S. aureus*, *E. coli* and *C. albicans*, demonstrating inhibition zones up to 16 mm. The results obtained confirm the promising potential of combined nanofillers for creating functional materials with improved conductive and biocidal properties.*

Keywords: *carbon nanotubes, silver nanoparticles, polymer nanocomposites, electrical percolation, degree of crystallinity, antimicrobial activity.*