

Е.А. ЛИСЕНКОВ,¹ С.А. БІЛИЙ,^{1,2} С.Д. НЕСІН,² В.В. КЛЕПКО²

¹ Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
(Вул. 68 десантників, 10, Миколаїв 54003; e-mail: ealysenkov@ukr.net)

² Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
(Харківське шосе, 48, Київ 02160)

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВІ ПОЛІМОЛОЧНОЇ КИСЛОТИ ТА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК

УДК 539.2:541.64:
546.26:678.742

У роботі досліджено діелектричні властивості та релаксаційні процеси у нанокompозитах на основі полімолочної кислоти з додаванням вуглецевих нанотрубок. Встановлено залежність діелектричної проникності від частоти та концентрації наповнювача, визначено поріг перколяції, а також проаналізовано релаксаційну поведінку системи за допомогою електричного модуля. Отримані результати свідчать про вплив структурних та міжфазних ефектів на діелектричні характеристики композита, що є важливим для розробки нових функціональних матеріалів.

Ключові слова: полімолочна кислота, вуглецеві нанотрубки, діелектрична проникність, перколяція, електричний модуль, релаксація.

1. Вступ

У сучасній фізиці конденсованого стану значна увага приділяється дослідженню полімерних нанокompозитів, які поєднують у собі властивості полімерних матриць та нанонаповнювачів. Полімолочна кислота (ПМК) є біорозкладним полімером з високою полярністю, що робить її перспективною основою для створення функціональних нанокompозитів [1]. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ), завдяки своїм унікальним електричним, тепловим та механічним властивостям, широко використовуються як наповнювачі для модифікації полімерів [2].

Комбінація ПМК з ВНТ дозволяє створювати нанокompозити з покращеними діелектричними та релаксаційними характеристиками, що є актуальним для застосування в електроніці, сенсоріці та енергетиці [3]. Діелектричні властивості таких нанокompозитів визначаються не лише властивостями компонентів, а й їхньою взаємодією на мікротановірвнях. Зокрема, при досягненні певної концентрації ВНТ у матриці ПМК спостерігається перколяційний перехід, що призводить до різкого зростання електропровідності та зміни діелектричної проникності композита [4]. Цей ефект пов'язаний з формуванням безперервної провідної сітки з ВНТ у полімерній матриці, що суттєво впливає на електрофізичні властивості матеріалу [5–7]. Інші дослідження показують, що діелектричну проникність можна збільшити при збереженні низьких діелектричних втрат, що робить ці нанокompозити придатними для застосування в електронних пристроях і захисті від електромагнітних перешкод

Цитування: Лисенков Е.А., Білий С.А., Несін С.Д., Клепко В.В. Діелектричні властивості та релаксаційні процеси у нанокompозитах на основі полімолочної кислоти та вуглецевих нанотрубок. *Укр. фіз. журн.* **70**, № 12, 876 (2025).
© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2025.
Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

[8]. Релаксаційні процеси в нанокompозитах зумовлені міжфазною поляризацією, рухом макромолекулярних сегментів та взаємодією нанотрубок з полімерним середовищем [9]. Ці процеси впливають на діелектричні втрати та частотну залежність діелектричної проникності, що є важливим для розуміння механізмів зарядового переносу та поляризації в таких системах. Вивчення релаксаційних властивостей дозволяє глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються в нанокompозитах, та оптимізувати їхні властивості для конкретних застосувань [10]. Особливості релаксаційних процесів були детально проаналізовані в композитах на основі ПМК та ВНТ. Наприклад, Сю та ін. досліджували утворення сітки з нанонаповнювача, де ВНТ створюють провідні шляхи всередині ПМК матриці, сприяючи збільшенню діелектричної проникності полімеру [11]. Підвищення діелектричної проникності пов'язана з механізмами поляризації, де унікальна структура ВНТ взаємодіє з полімерною матрицею, впливаючи на процеси релаксації під дією електричного поля. Отже, поліпшення діелектричних властивостей у цих композитах пояснюється різними механізмами поляризації. Додавання ВНТ сприяє міжфазній поляризації, де заряди накопичуються на межах поділу провідних нанотрубок та ізоляційної ПМК матриці, ефективно збільшуючи діелектричну проникність матеріалу [12, 13]. Ця міжфазна поляризація стає більш вираженою в міру збільшення концентрації ВНТ, що призводить до збільшення діелектричної проникності. Таким чином, дослідження діелектричних та релаксаційних властивостей нанокompозитів на основі ПМК та ВНТ має як фундаментальне, так і прикладне значення. Розуміння фізичних механізмів, що визначають ці властивості, сприятиме розробці нових матеріалів з покращеними характеристиками для використання в різних галузях науки і техніки.

2. Експериментальна частина

Для дослідження використовували нанокompозити на основі полімолочної кислоти та вуглецевих нанотрубок. Полімолочна кислота (ПМК), виробництва компанії Devil Design (Польща), була вибрана полімерною матрицею. При $T = 20^\circ\text{C}$ ПМК є твердою речовиною з густиною $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$. Перед використанням полімер зневоднювали нагріванням протягом чотирьох годин при 80°C . Багато-

шарові ВНТ виробництва ВАТ “Спецмаш” (Україна) виготовлені з етилену методом хімічного осадження парів. Вміст мінеральних домішок становив не більше 0,1%. Питома поверхня – $190 \text{ м}^2/\text{г}$, зовнішній діаметр – 20 нм, довжина (5–10) мкм, аспектне відношення $L/d = 250 \pm 170$. Для приготування матеріалів для дослідження полімер розчиняли у суміші розчинників диметилсульфоксиду та диметилацетаміду (1:1). При цьому отримували 10% полімерний розчин. Нанокompозити готували методом ультразвукового змішування у розчині полімеру за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД А-650 (Україна). Диспергація тривала неперервно протягом 5 хв. на частоті 22 кГц, потужність ультразвуку становила 300 Вт. Вміст ВНТ варіювали у межах (0,1–1,5) мас.%. (далі %). Після ультразвукової обробки отриману суміш виливали на скляну поверхню та сушили до повного видалення розчинників при температурі $80\text{--}100^\circ\text{C}$. Дослідження діелектричних властивостей та релаксаційних ефектів проводили використовуючи метод діелектричної релаксаційної спектроскопії, реалізованої на базі імпедансметра Z-2000. Зразок поміщали між електродами комірки, при цьому вимірювали його дійсну (Z') та уявну (Z'') частини імпедансу. Зі значень імпедансу розраховували діелектричні характеристики. Виміри проводили при кімнатній температурі в частотному діапазоні 1–2 МГц. Постійний зазор між електродами становив 80 мкм.

3. Вплив ВНТ та діелектричні властивості систем на основі полімолочної кислоти

На наступному етапі експерименту досліджували вплив вмісту вуглецевих нанотрубок у матриці ПМК на діелектричну проникність, яка наведена на рис. 1. На рис. 1 наведено залежність дійсної частини діелектричної проникності (ϵ') полімолочної кислоти та нанокompозитів, які містять ВНТ, від частоти у подвійних логарифмічних координатах. Графіки демонструють типову поведінку полімерних діелектриків, що підлягають релаксаційним процесам. У низькочастотній області ($f < 100 \text{ Гц}$) спостерігається високе значення ϵ' , що свідчить про значний внесок поляризаційних механізмів, зокрема міжфазної та дипольної поляризації. Із зростанням частоти значення ϵ' швидко зменшується, що характерно для релаксаційних

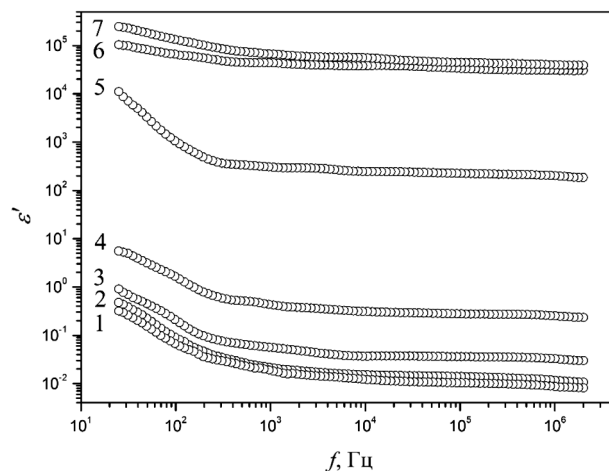


Рис. 1. Частотні залежності діелектричної проникності для систем на основі матриці ПМК (1), яка містить: 0,1% (2); 0,25% (3); 0,5% (4); 0,75% (5); 1% (6); 1,5% (7) ВНТ

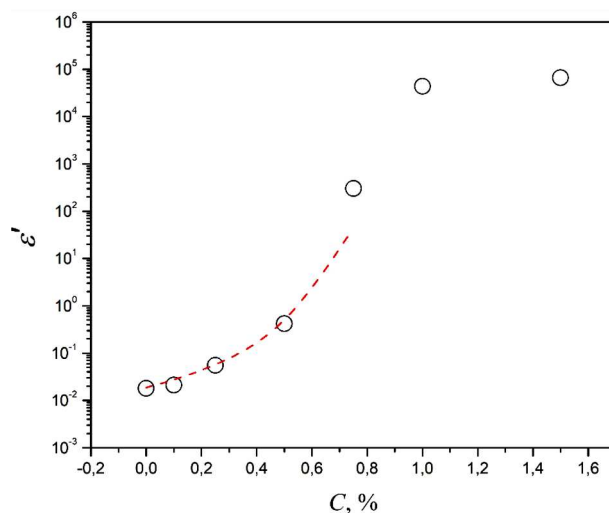


Рис. 2. Концентраційна залежність діелектричної проникності на частоті 1 кГц для систем на основі ПМК та ВНТ. Пунктирна червона лінія – перколяційна модель (рівняння (1))

втрат у системі. При частотах понад 10^3 Гц темп зниження ϵ' уповільнюється, що вказує на домінування електронної та іонної поляризації, які менш чутливі до частотних змін у даному діапазоні. На високих частотах ($f > 10^5$ Гц) значення діелектричної проникності наближається до насичення, що може бути пов'язано з обмеженням рухливості диполів і зменшенням впливу макроскопічної поляризації.

4. Перколяційна поведінка діелектричної проникності

Для більш зручного аналізу на рис. 2 наведено графік залежності дійсної частини діелектричної проникності від вмісту вуглецевих нанотрбоек при частоті 1 кГц. Для кращої наочності та спрощення моделювання графік $\epsilon'(\varphi)$ наведений у напівлогарифмічних координатах.

З рис. 2 видно різке зростання функції $\epsilon'(\varphi)$ зі зростання вмісту наповнювача у системі. Таке зростання пояснюється формуванням у полімерній матриці розгалуженого кластера із частинок ВНТ. Згідно із скейлінговим підходом теорії критичної перколяції, концентраційна залежність діелектричної проникності системи до порога перколяції описується за допомогою такого рівняння [14]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_m \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_c - \varphi} \right)^q, \quad (1)$$

де ϵ_{eff} – діелектрична проникність нанокомпозитної системи, ϵ_m – діелектрична проникність матриці, φ_c – поріг перколяції, критична концентрація, при якій наповнювач утворює неперервну сітку у полімерній матриці, q – критичний індекс діелектричної проникності, який, на основі експериментальних результатів, варіюється від 0,3 до 1,8 [15–17]. Провівши моделювання даних на рис. 2 за допомогою рівняння (1), було визначено, що $\varphi_c = 0,8\%$, а $q = 1,8$. Значення критичного показника $q = 1,8$ значно перевищує типовий діапазон 0,7–1,3, характерний для класичної перколяційної теорії. Проте, подібне значення $q = 1,78$ отримали автори роботи [16] для системи поліуретан–нановуглець. Такі великі значення q для системи ПМК–ВНТ можуть бути пояснені кількома факторами, пов'язаними зі специфікою композитів та взаємодією наповнювача з матрицею. По-перше, система має фрактальну структуру, тобто нанотрубки утворюють ієрархічні кластери, значення q може бути суттєво більшим. Вуглецеві нанотрубки здатні формувати розгалужені структури з тунельними контактами, що змінює ефективну розмірність перколяційного процесу. По-друге, матриця або самі нанотрубки мають високу поляризованість, тому спостерігається аномальне зростання ϵ' . Це спричиняє більш різке зростання проникності біля φ_c , що й призводить до високих значень

q . По-третє, розподіл ВНТ у матриці є нерівномірним, а система містить агрегати з нанотрубок, тому реальний механізм перколяції відрізняється від ідеалізованих моделей. У таких випадках критичний показник може змінюватися в широких межах. Варто відмітити, що у полімерних нанокомпозитах ПМК–ВНТ поріг перколяції для діелектричної проникності ($\varphi_c = 0,8\%$) виявився вищим, ніж для електропровідності, який лежить у діапазоні $0,2 < \varphi_c < 0,5$ для більшості систем типу ПМК–ВНТ [4, 18]. Цей ефект пояснюється різними фізичними механізмами, що визначають ці властивості. Електропровідність визначається утворенням неперервної сітки з електропровідних частинок, якою може протікати струм. Як тільки виникає хоча б один зв'язаний ланцюжок нанотрубок система починає проводити електричний струм. Це призводить до різкого збільшення електропровідності при досягненні низького порога перколяції. Діелектрична проникність залежить від поляризованості матеріалу та концентрації провідних частинок. Збільшення кількості провідних наночастинок призводить до зростання поляризованості за рахунок посилення міжчасткових взаємодій. Однак помітна зміна діелектричної проникності відбувається лише тоді, коли значна частина системи вже заповнена провідними частинками, що потребує більш високої концентрації.

5. Вплив ВНТ на релаксаційні процеси у системі на основі ПМК

Використання електричних модулів (M^*) для опису релаксаційної поведінки полімерних нанокомпозитів особливо корисно, оскільки дозволяє аналізувати динаміку поляризації та механізм перенесення заряду [19]. Електричний модуль M^* пов'язаний з комплексною діелектричною проникністю ϵ^* через співвідношення:

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + iM'', \quad (2)$$

де M' – дійсна частина, що відображає пружність середовища до електричного збудження, M'' – уявна частина, пов'язана з релаксаційними процесами. На відміну від аналізу через ϵ^* , який підкреслює внесок провідності та поляризації, M^* краще виявляє процеси з низькою рухливістю зарядів (наприклад, дипольну релаксацію та обме-

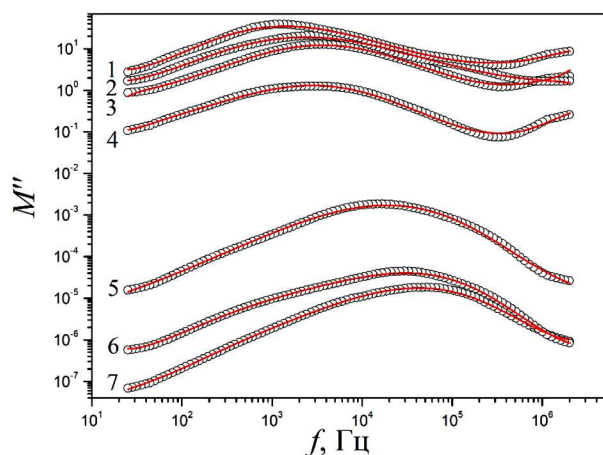


Рис. 3. Залежність уявної частини електричного модуля від частоти для систем на основі матриці ПМК (1), яка містить: 0,1% (2); 0,25% (3); 0,5% (4); 0,75% (5); 1% (6); 1,5% (7) ВНТ. Порожні кола – експериментальні дані, суцільна лінія – апроксимація емпіричної функцією Гавриляка–Негами

жену провідність). На рис. 3 наведені частотні залежності уявної частини електричного модуля для нанокомпозитів на основі ПМК. На залежностях $M''(f)$ при низьких частотах спостерігаються максимуми, які пов'язують з релаксаційними процесами. З ростом вмісту наповнювача вершини цих максимумів, як показано на рис. 3, зсуваються в область високих частот. Крім того, на залежностях $M''(f)$ при високих частотах спостерігаються ознаки максимуму

$$M''(\omega) = \Delta M' \times \frac{\sin(\beta\theta)}{(1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)})^{\beta/2}}. \quad (3)$$

Для кількісного аналізу спектра уявної частини комплексного електричного модуля була використана емпірична функція вигляду (3):

$$\theta = \arctg \left(\frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)} \right), \quad (4)$$

$$\Delta M' = M'_u - M'_r, \quad (5)$$

де τ – характеристичний час релаксаційного процесу, який відповідає частотному максимуму на спектрі $M''(f)$, $\omega = 2\pi f$, M_u та M_r – низькочастотний та високочастотний межі дійсної частини електричного модуля, α , β – параметри, які описують розподіл часів релаксації [20]. Результат апро-

ксимації емпіричною функцією (3) частотних залежностей уявної частини електричного модуля наведено суцільною лінією на рис. 3. Значення параметрів апроксимації наведено в таблиці. З рис. 3 та таблиці видно, що з ростом концентрації ВНТ спостерігається зміщення максимумів у високочастотну область, що вказує на зростання рухливості макромолекулярних сегментів та носіїв заряду.

З таблиці видно, що релаксаційні процеси у системі ПМК–ВНТ значно відрізняються від класичної Дебаєвської релаксації, яка характеризується одним чітко визначеним часом релаксації. Для всіх досліджених систем β близько до 1, $\alpha \neq 0$, що є дуже близьким до релаксаційної моделі Коул-Коула, яка характеризується широким розподілом часів релаксації, характерним для гетерогенних систем [21]. Також варто відзначити, що параметр α зменшується зі збільшенням вмісту наповнювача, що вказує на зростання гетерогенності системи і релаксація стає більш розподіленою. Аналогічна поведінка спостерігається і з параметром β , що вказує на збільшення асиметрії, яка виникає через появу бар'єрних ефектів (наприклад, тунельних переходів між наночастинками). На рис. 3 спостерігається зміщення максимумів уявної частини електричного модуля $M''(f)$ в область більш високих частот зі збільшенням вмісту вуглецевих нанотрубок. Максимум уявної частини електричного модуля пов'язаний з характерним часом релаксації τ_0 через частоту $f_{\max}$, на якій спостерігається пік: $f_{\max} = 1/(2\pi\tau_0)$ [22]. З таблиці видно, що при збільшенні концентрації ВНТ у матриці ПМК зменшується характерний час релаксації, оскільки нанотрубки полегшують транспортування за-

ряду. Це означає, що релаксаційні процеси відбуваються швидше, а отже, їх характерні частоти рухаються вгору. Також у даній системі відбувається прискорення дипольної релаксації через міжфазні взаємодії. При цьому нанотрубки створюють міжфазні шари, у яких рухливість полімерних ланцюгів змінюється. Поляризовані групи в полімері, взаємодіючи з нанотрубками, стають більш обмеженими, але їх дипольна релаксація відбувається швидше. Отже, цей ефект є важливим індикатором зміни транспортних властивостей нанокомпозита. Важливою складовою діелектричних досліджень полімерних нанокомпозитів є аналіз ширини на половині висоти (ШПВ) максимумів на залежностях $M''(f)$ [23, 24]. Значення ШПВ максимумів релаксації для всіх досліджуваних систем наведені у таблиці та є значно більшими за частотну декаду. Це свідчить про наявність розподілу часів релаксації і є також типовим для процесів структурної релаксації більшості гнучколанцюгових полімерів. З графіків на рис. 3 та таблиці видно, що ШПВ максимумів релаксації проявляє тенденцію до збільшення при зростанні вмісту наповнювача у системі. Основною причиною збільшення ШПВ є гетерогенність системи та міжфазні взаємодії. У полімерних нанокомпозитах існує багатозафазна структура, яка представлена полімерною матрицею, вуглецевими нанотрубками та міжфазними шарами із зміненою рухливістю молекул. Внаслідок цього частинки та полімерні сегменти мають різні часи релаксації, що розширює релаксаційні максимуми. Ще однією причиною розширення максимумів є перколяційні процеси, які визначають особливості транспорту зарядів [25, 26]. При концентраціях наночастинок нижче за поріг перколяції заряди переносяться в основному за рахунок локальних поляризаційних ефектів. При збільшенні концентрації електропровідних наночастинок у системі починають виникати нові шляхи для транспорту заряду (наприклад, тунелювання) [27, 28], що створює додаткові механізми релаксації і розширює спектр часів релаксації.

6. Висновки

У ході дослідження впливу вуглецевих нанотрубок на діелектричні властивості нанокомпозитів на основі полімолочної кислоти було встановлено, що введення ВНТ до полімерної матриці зумовлює значне зростання діелектричної проникності,

Значення параметрів апроксимації емпіричною функцією Гавриляка–Негамі залежностей $M''(f)$ нанокомпозитів на основі ПМК–ВНТ

Вміст ВНТ, %	$\Delta M'$	α	β	f_m , кГц	$\tau \cdot 10^{-6}$, с	lg(ШПВ)
0	0,08	0,12	0,99	1,3	120	2,19
0,1	0,10	0,12	0,99	2,8	93	2,44
0,25	0,10	0,10	0,99	3,2	63	2,25
0,5	0,07	0,09	0,98	2,7	45	2,55
0,75	0,08	0,09	0,97	15,9	10	2,7
1,0	0,06	0,08	0,99	31,2	5	3,03
1,5	0,06	0,08	0,98	65,1	2	3,26

що пов'язано з міжфазною та дипольною поляризацією. Частотний аналіз засвідчив наявність характерної релаксаційної поведінки з домінуванням поляризаційних механізмів у низькочастотній області та насиченням проникності на високих частотах. Визначено поріг перколяції для діелектричної проникності на рівні 0,8%, що перевищує типовий поріг для електропровідності, і пояснюється різними фізичними механізмами формування відповідних властивостей. Спостережене значення критичного індексу q свідчить про складну фрактальну структуру системи та її високу гетерогенність. Дослідження релаксаційних процесів, які проявлялись на електричному модулі показало, що збільшення вмісту ВНТ спричиняє зсув максимумів уявної частини модуля в область вищих частот, що відображає зростання динаміки сегментів макромолекул і носіїв заряду. Застосування емпіричної функції Гавриляка–Негамі дозволило підтвердити наявність широкого розподілу часів релаксації та зростання асиметрії відповідно до зростання концентрації наповнювача. Це свідчить про важливу роль міжфазних взаємодій і перколяційних ефектів у формуванні релаксаційної поведінки композитної системи. Отримані результати демонструють потенціал ПМК–ВНТ на композитів як функціональних матеріалів із керованими діелектричними властивостями, зокрема для застосування в електроніці та сенсорних технологіях.

Дана робота виконана в рамках науково-дослідного проекту “Створення багатофункціональних полімерних на композитних матеріалів, армованих параарамідними волокнами та вуглецевими нанотрубками, в яких передбачено та встановлено взаємозв'язок між їх структурою та властивостями”, який фінансується з державного бюджету Міністерством освіти і науки України. Державний реєстраційний № 0124U001739. Автори також щиро вдячні усім мужнім захисникам України, які дозволяють нам продовжувати наукову роботу.

1. L. Ranakoti, B. Gangil, S.K. Mishra, T. Singh, S. Sharma, R.A. Ilyas, S. El-Khatib. Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. *Materials (Basel)* **15**, 4312 (2022).
2. S. Rathinavel, K. Priyadharshini, D. Panda. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, propert-

- ies, functionalization, characterization, and the application. *Mater. Sci. Eng. B* **268**, 115095 (2021).
3. W. Wu, T. Liu, D. Zhang, Q. Sun, K. Cao, J. Zha, Y. Lu, B. Wang, X. Cao, Y. Feng, V.A.L. Roy, R.K.Y. Li. Significantly improved dielectric properties of polylactide nanocomposites via TiO₂-decorated carbon nanotubes. *Composites A* **127**, 105650 (2019).
 4. Y. Wang, C. Yang, Z. Xin, Y. Luo, B. Wang, X. Feng, Z. Mao, X. Sui. Poly(lactic acid)/carbon nanotube composites with enhanced electrical conductivity via a two-step dispersion strategy. *Composit. Commun.* **30**, 101087 (2022).
 5. A.S. Zeraati, S.A. Mirkhani, U. Sundararaj. Enhanced dielectric performance of polymer nanocomposites based on CNT/MnO₂ nanowire hybrid nanostructure. *J. Phys. Chem. C* **121**, 8327 (2017).
 6. E.A. Lysenkov, V.V. Klepko, Y.V. Yakovlev. Specifics of percolation behavior in the polyether-carbon nanotube systems doped with LiClO₄. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **52**, 186 (2016).
 7. E.A. Lysenkov, Y.V. Yakovlev, V.V. Klepko. The influence of the LiClO₄ salt on the percolation behavior of the systems based on the polypropylene glycol and carbon nanotubes. *J. Phys. Stud.* **17**, 1 (2013).
 8. I. Lakin, Z. Abbas, R.S. Azis, N.A. Ibrahim, M.A. Abd Rahman. The effect of MWCNTs filler on the absorbing properties of OPEFB/PLA composites using microstrip line at microwave frequency. *Materials* **13**, 4581 (2020).
 9. E.A. Lysenkov, I.P. Lysenkova, V.V. Klepko. Relaxation processes in nanocomposite polymer electrolytes based on polyethylene glycol and hybrid nanofiller. In: *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine (2020), p. 134.
 10. Z.A. Alrowaili, R.M. Ahmed, A. Saleh, et al. Broadband dielectric relaxation investigations of polyvinyl chloride-rGO nanocomposite films. *Polymer Bull.* **80**, 3293 (2023).
 11. L. Xu, X. Zhang, C. Cui, P. Ren, D. Yan, Z. Li. Enhanced mechanical performance of segregated carbon nanotube/poly(lactic acid) composite for efficient electromagnetic interference shielding. *Industr. Eng. Chem. Res.* **58**, 4454 (2019).
 12. H. Sun, H. Zhang, S. Liu, N. Ning, L. Zhang, M. Tian, Y. Wang. Interfacial polarization and dielectric properties of aligned carbon nanotubes/polymer composites: The role of molecular polarity. *Composit. Sci. Technol.* **154**, 145 (2018).
 13. P.P. Deshpande, M.S. Radue, P. Gaikwad, S. Bamane, S.U. Patil, W.A. Pisani, G.M. Odegard. Prediction of the interfacial properties of high-performance polymers and flattened CNT-reinforced composites using molecular dynamics. *Langmuir* **37**, 11526 (2021).
 14. L. Zhang, W. Wang, X. Wang, P. Bass, Z.-Y. Cheng. Metal-polymer nanocomposites with high percolation threshold and high dielectric constant. *Appl. Phys. Lett.* **103**, 232903 (2013).

15. L. Wang, Z.-M. Dang. Carbon nanotube composites with high dielectric constant at low percolation threshold. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 042903 (2005).
16. J. Macutkevicius, D. Seliuta, G. Valusis, J. Banys, V. Kuznetsov, S. Moseenkov, O. Shenderova. High dielectric permittivity of percolative composites based on onion-like carbon. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 112901 (2009).
17. A. Buketov, S. Smetankin, E. Lysenkov, K. Yurenin, O. Akimov, S. Yakushchenko, I. Lysenkova. Electrophysical properties of epoxy composite materials filled with carbon black nanopowder. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 6361485 (2020).
18. L. Pietrzak, G. Raniszewski, L. Szymanski. Multiwalled carbon nanotubes polylactide composites for electrical engineering – Fabrication and electrical properties. *Electronics* **11**, 3180 (2022).
19. L.H. Gaabour. Study of the structural, AC electrical conductivity, electric modulus, and dielectric properties of novel PVDF/LiCoO₂ nanocomposites for Li-ion batteries. *AIP Advances* **11**, 095114 (2021).
20. K. Gorska, A. Horzela, L. Bratek, G. Dattoli, K.A. Penson. The Havriliak–Negami relaxation and its relatives: the response, relaxation and probability density functions. *J. Phys. A* **51**, 135202 (2018).
21. R. Dhar. Comments on the fitting of Cole–Cole/Havriliak–Negami equation with the dielectric data under the influence of parasitic effects in order to extract correct parameters of the materials. *J. Mol. Liq.* **343**, 117682 (2021).
22. A. Schonhals, F. Kremer. Theory of dielectric relaxation. In: *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Edited by F. Kremer, A. Schonhals (Springer, 2003).
23. N. Tripathi, A. Shukla, A.K. Thakur, D.T. Marx. Dielectric modulus and conductivity scaling approach to the analysis of ion transport in solid polymer electrolytes. *Polymer Eng. Sci.* **60**, 297 (2020).
24. A. Telfah, M.M.A. Jafar, I. Jum'ah, M.J.A. Ahmad, J. Lambert, R. Hergenroder. Identification of relaxation processes in pure polyethylene oxide (PEO) films by the dielectric permittivity and electric modulus formalisms. *Polymer. Adv. Technol.* **29**, 1974 (2018).
25. Y. Nioua, B.M.G. Melo, P. Prezas *et al.* Analysis of the dielectric relaxation in reduced graphene oxide/epoxy composites materials using the modulus formalism. *Eur. Phys. J. E* **44**, 109 (2021).
26. H. Tao, M. Yan, L. Zhang, Z. Zou, B. Han, H. Dong, B. Zhu, X. Li. Progress in preparation, processing, and application of high dielectric polypropylene matrix composite materials. *Polymer Composit.* **45**, 4819 (2024).
27. E.A. Lysenkov, V.V. Klepko. Features of charges transfer in the polyethylene glycol/carbon nanotubes system. *J. Nano. Electron. Phys.* **5**, 03052 (2013).
28. E.A. Lysenkov, V.V. Klepko. Analysis of percolation behavior of electrical conductivity of the systems based on polyethers and carbon nanotubes. *J. Nano. Electron. Phys.* **8**, 01017 (2016).

Одержано 13.04.25

E.A. Lysenkov, S.A. Bilyi,
S.D. Nesin, V.V. Klepko

DIELECTRIC PROPERTIES AND RELAXATION PROCESSES IN NANOCOMPOSITES BASED ON POLYLACTIC ACID AND CARBON NANOTUBES

The dielectric properties of nanocomposites based on polylactic acid with the addition of carbon nanotubes, as well as relaxation processes in them, have been studied. The dependence of the dielectric permittivity on the frequency and the filler concentration is found, the percolation threshold is determined, and the relaxation behavior of the system is analyzed using the electric modulus. The results obtained testify to the influence of the structural and interfacial effects on the dielectric characteristics of the composite, which is important for the development of new functional materials.

Keywords: polylactic acid, carbon nanotubes, dielectric permittivity, percolation, electric modulus, relaxation.