

Л.С. Семко, С.М. Махно, О.І. Кручек, П.П. Горбик

## Електрофізичні властивості нанокомпозитів на основі полівінілхлориду та нанокристалічного нікелю

*Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України,  
вул. Генерала Наумова 17, 03164 Київ, E-mail: [Stmax@ukr.net](mailto:Stmax@ukr.net)*

Досліджено залежності діелектричної проникності та питомого об'ємного електричного опору нанокомпозитів на основі полівінілхлориду від вмісту нанокристалічного Ni в області низьких і надвисоких частот. Для прогнозування значень діелектричної проникності й питомого об'ємного електричного опору залежно від вмісту Ni запропоновані вирази, типові для теорії перколяції. Визначено значення фрактальної розмірності  $D_f$  неперервних кластерів ПВХ і нанокристалічного Ni поблизу порога перколяції в системі полівінілхлорид-нанокристалічний Ni.

**Ключові слова:** нанокристалічний нікель, полімер, діелектрична проникність, електроопір, надвисокі частоти.

*Стаття поступила до редакції 17.12.2009; прийнята до друку 15.06.2010.*

### Вступ

Перехід до високих технологій потребує створення принципово нових матеріалів, функціональні параметри яких визначаються властивостями мікрообластей, що формуються заданим чином, моношарів та нанооб'ємів [1]. Дизайн на такому рівні може бути здійснений за участю кластерних структур, нанорозмірних і нанокристалічних частинок [2]. У зв'язку із цим велику увагу в наш час приділяється формуванню структури й властивостей нанокомпозитів, до складу яких входять наночастинки металів і полімерів. У ряді робіт [3 - 6] нами показано, що варіювання вмісту нанокристалічного нікелю в системі полімер - метал дозволяє одержувати однорідні матеріали з комплексом цінних поліфункціональних властивостей (широким діапазоном зміни електричних та магнітних характеристик, чутливість до впливу газоподібних сполук). Ступінь дисперсності, характеристики поверхні та структуроутворюючі властивості таких наночастинок у полімерній матриці відіграють істотну роль при формуванні властивостей нанокомпозитів. Не дивлячись на інтенсивні дослідження нанокомпозитів у системі полімер - Ni [6] немає достатньої ясності в питаннях, що стосуються закономірностей зміни діелектричної проникності та електропровідності нанокомпозитів в області надвисоких частот (НВЧ), а також про вплив зміни частоти електромагнітного поля на електрофізичні характеристики нанокомпозитів і положення порогів перколяції в

системі полімер - нанокристалічний Ni. Проте такі відомості необхідні для розробки матеріалів для виготовлення захисних екранів від дії електромагнітного випромінювання, виробів, що використовуються в радіотехніці та мікроелектроніці.

Мета роботи: дослідження зміни комплексної діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) та питомого об'ємного електроопору ( $\rho$ ) нанокомпозитів на основі полівінілхлориду (ПВХ) від вмісту нанокристалічного Ni у різних діапазонах частот електромагнітного випромінювання і виявлення впливу частоти на електрофізичні характеристики цих матеріалів.

### І. Об'єкти та методи дослідження

Для одержання нанокомпозитів як в'язуче обрано ПВХ - полімер промислового виробництва марки А4009, а електропровідний компонент - нанокристалічний нікель, синтезований за спеціально розробленою методикою. Нанокристалічний нікель одержували шляхом відновлення солі  $NiCl_2$  гіпофосфітом натрію в лужному середовищі (рН = 8,5...9) у присутності ліганду - цитрат іона, аналогічно, як описано в [5].

Зразки нанокомпозитів виготовляли за методикою [5], використовуючи гомогенізацію порошків Ni та ПВХ із наступним пресуванням плівок при нагріванні. Товщина зразків нанокомпозитів становила  $0,5 \pm 0,05$  мм. Вміст нанокристалічного нікелю в композитах змінювали

від 0 до 95 % мас., що становило (0 - 0,74 об'ємної частки  $\theta$ ).

Для визначення середнього розміру частинок Ni та його кластерів, а також для дослідження структури отриманих наноматеріалів використовували оптичну та електронну мікроскопію. Середній розмір кристалітів Ni визначали, використовуючи рентгеноструктурний аналіз. Рентгенограми реєстрували на дифрактометрі ДРОН-4-07 у випромінюванні мідного анода ( $\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$ ) з нікелевим фільтром у відбитому пучку та геометрією згідно Брегга-Брентано.

Значення дійсної  $\varepsilon'$  та уявної складових  $\varepsilon''$  комплексної діелектричної проникності ( $\varepsilon = \varepsilon' + i \varepsilon''$ ), а також питомого об'ємного електричного опору ( $\rho_{\text{KM}}$ ) зразків наноккомпозитів визначали двоконттактним методом на частотах 0,1; 1; 10 кГц за допомогою приладу Е 7-14. Величини  $\varepsilon'$  та  $\varepsilon''$  на надвисоких частотах (НВЧ) вимірювали за методикою, описаною в [7], використовуючи НВЧ-інтерформетр. Електропровідність наноккомпозитів ( $\sigma_{\text{KM}}$ ) та питомий електроопір ( $\rho_{\text{KM}}$ ) при дослідженні на НВЧ розраховували за наступними рівняннями:

$$\sigma_{\text{KM}} = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''_{\text{KM}}, \quad (1)$$

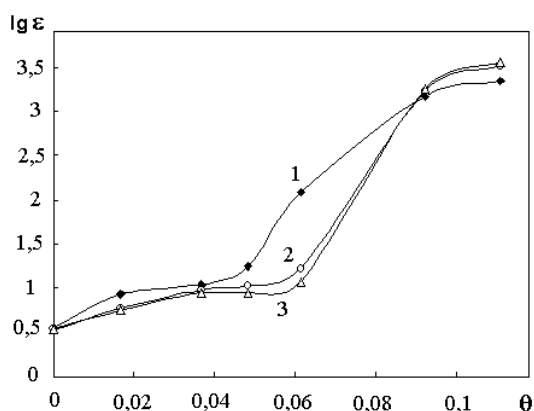
$$\rho_{\text{KM}} = 1 / \sigma_{\text{KM}} \quad (2)$$

де  $f$  – частота електромагнітного випромінювання,  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність вакууму,  $\varepsilon''_{\text{KM}}$  – уявна складова діелектричної проникності при заданій концентрації.

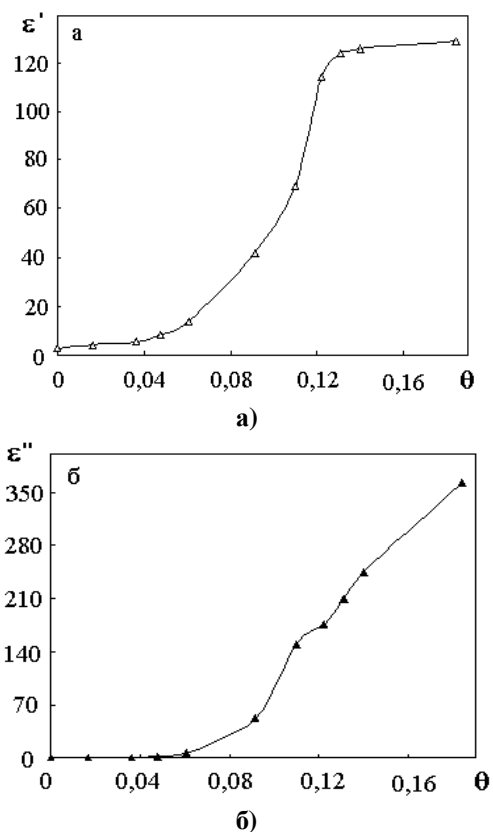
## II. Результати та їх обговорення

За допомогою зазначених методів встановлено, що отримані порошки нанокристалічного Ni мають наступні характеристики: середній розмір частинок 2,5 мкм, нанокристалітів – 25 нм, питома поверхня становить 0,5 м<sup>2</sup>/г.

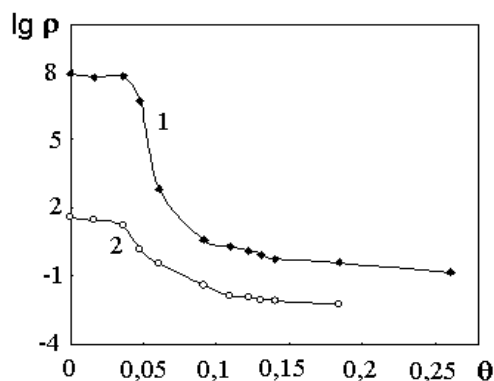
Основні результати експериментальних досліджень електрофізичних характеристик наноккомпозитів ПВХ – нанокристалічний нікель представлені на рис. 1 - 3.



**Рис. 1.** Залежності логарифма діелектричної проникності ( $\varepsilon$ ) наноккомпозитів від вмісту нанокристалічного Ni, при  $295 \pm 2 \text{ K}$  на частотах 0,1 (крива 1), 1 (крива 2) і 10 кГц (крива 3).



**Рис. 2.** Залежність дійсної  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  (а) та уявної  $\varepsilon''_{\text{KM}}$  складової комплексної діелектричної проникності від вмісту нанокристалічного Ni у системі ПВХ–Ni на частоті 9 ГГц.



**Рис. 3.** Залежність логарифма питомого електроопору від вмісту нанокристалічного нікелю в системі ПВХ–Ni: 1 – на частоті 1кГц; 2 – 9 ГГц.

Для вивчення структури та властивостей композиційних матеріалів (KM) у широкому діапазоні концентрацій компонентів та інтерпретації отриманих результатів використана концепція, запропонована нами раніше [3-6, 8, 9]. Ця концепція ґрунтується на кластерному підході та використанні явищ перколяції до формування полімерних композиційних систем (PKC), принципах подібності та самоподібності кластерів, уявленнях про утворення фрактальних структур PKC.

На рис. 1 показані залежності логарифма

діелектричної проникності ( $\varepsilon_{\text{KM}}$ ) зразків нанокompatитів від вмісту нанокристалічного Ni, виміряних при  $295 \pm 2$  К на частотах 0,1 (крива 1), 1 (крива 2) та 10 кГц (крива 3); а на рис. 2 –  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  та  $\varepsilon''_{\text{KM}}$  на частоті 9 ГГц. Як видно з рисунків ці залежності мають стрибкоподібний характер, типовий для систем ізолятор (полімер) – провідник. Аналіз цих залежностей свідчить, що система ПВХ–Ni має порого перколяції ( $\theta_c$ ) на частоті 0,1 кГц  $\theta_c = 0,063$  та 0,070 об'ємної частки на частотах 1 і 10 кГц. При цьому зі збільшенням частоти змінного струму спостерігається зниження значень  $\varepsilon'$ . Аналогічна тенденція зміни  $\varepsilon'$  для наповнених композиційних матеріалів спостерігалася в [10].

Аналіз залежностей  $\varepsilon'_{\text{KM}} = f(\theta)$  і  $\varepsilon''_{\text{KM}} = f(\theta)$ ,  $\lg \varepsilon'_{\text{KM}} = f(\theta)$  і  $\lg \varepsilon''_{\text{KM}} = f(\theta)$  на частоті 9 ГГц свідчать також про стрибкоподібну зміну  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  та  $\varepsilon''_{\text{KM}}$  при збільшенні вмісту Ni в області порога перколяції при підході зліва ( $\theta \leq \theta_c$ ). При цьому для цих характеристик пороги перколяції спостерігаються в області до 0,1 об'ємної частки Ni.

Залежності логарифма питомого об'ємного електроопору  $\rho_{\text{KM}}$  від вмісту нанокристалічного Ni ( $\theta$ ) на різних частотах (1 – 1 кГц, 2 – 9 ГГц) представлені на рис. 3. При дослідженні  $\rho_{\text{KM}}(\theta)$  на частотах 0,1, 1 та 10 кГц, встановлено, що значення  $\rho_{\text{KM}}$  мають близькі значення при однаковому вмісті Ni і практично не залежать від частоти змінного струму. Визначення на цих частотах значення  $\theta_c$  у системі ПВХ – Ni становить  $0,077 \pm 0,002$  та не залежить від частоти в цьому діапазоні частот.

Раніше [5] при дослідженні залежності  $\rho_{\text{KM}}$  від вмісту Ni аналогічних зразків нанокompatитів чотиризондовим потенціометричним методом при постійному струмі (Держстандарт 20214-74) було встановлено, що система ПВХ–Ni має один поріг перколяції при  $\theta = \theta_c = 0,095$  об'ємної частки. Порівняння значень  $\theta_c$  для системи ПВХ–Ni, обчислених за даними залежності  $\lg \rho_{\text{KM}}(\theta)$ , виміряних при постійному й змінному струмі, свідчить про дещо нижче значення  $\theta_c$  при змінному струмі.

Перехід до надвисоких частот призводить до зміни значень  $\rho_{\text{KM}}$ , однак характер залежності  $\lg \rho_{\text{KM}} = f(\theta)$  залишається таким же, як і на низьких частотах. При цьому значення  $\theta_c$  для залежності  $\lg \rho_{\text{KM}} = f(\theta)$  зміщується в область низьких концентрацій і досягають  $\theta_c = 0,05$  об'ємної частки.

Проаналізувавши отримані дані з позиції теорії перколяції й порівнявши їх з літературними даними [11-13] встановлено, що значення  $\theta_c$  для системи ПВХ – нанокристалічний Ni значно менші, ніж для аналогічної системи з полікристалічними частинками Ni ( $\theta_c \approx 0,2$  об'ємні частки) [11]. Ці значення також менші у порівнянні з величиною  $\theta_c$ , визначеною для моделей тривимірних електропровідних ґраток ( $\theta_c = 0,16$ ), де існує взаємодія лише між найближчими сусідами [12]. Зниження значення порога перколяції в досліджуваній системі в порівнянні з теоретичними ( $\theta_c = 0,16$ ) обумовлено підвищенням активності частинок нанокристалічного Ni до структуроутворення в полімері. Можна припустити, що формування фрактального неперервного

нескінченного кластера (ННК) Ni поблизу порога перколяції відбувається із окремих протяжних кластерів шляхом агрегації частинок (кластер – кластер). Зменшення порога перколяції (у порівнянні з  $\theta_c = 0,16$ ) для систем полімер – металеві частинки автори робіт [13-14] також пов'язують із утворенням (ННК) металевих частинок з агломератів.

З аналізу концентраційних залежностей  $\varepsilon'_{\text{KM}}(\theta) = f(\theta)$ ,  $\rho_{\text{KM}}(\theta) = f(\theta)$  встановлено, що у відповідних областях концентрацій справедливі степеневі вирази теорії перколяції.

$$\varepsilon'_{\text{KM}}(\theta) \sim (\theta_c - \theta)^{-\nu}, \quad 0 < \theta < \theta_c, \quad (3)$$

$$\rho_{\text{KM}}(\theta) \sim \rho_2(\theta - \theta_c)^{-t}, \quad \theta_c < \theta < 1 \quad (4)$$

де  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  – дійсна складова діелектричної проникності нанокompatитів;  $\rho_{\text{KM}}$ ,  $\rho_2$  – питомі об'ємні електричні опори композита й монолітного Ni відповідно,  $\theta_c$  – поріг перколяції;  $\nu$ ,  $t$  – критичні індекси.

Значення критичних індексів визначали, як описано в [9]. З урахуванням коефіцієнтів вирази (3) і (4) мають вигляд:

$$\varepsilon'_{\text{KM}}(\theta) = (\varepsilon'_1)^{\alpha} (\theta_3 - \theta)^{-\nu}, \quad (5)$$

$$\rho_{\text{KM}}^{\pm}(\theta) = \rho_2^{\alpha_1} (\theta - \theta_c)^{-t}, \quad (6)$$

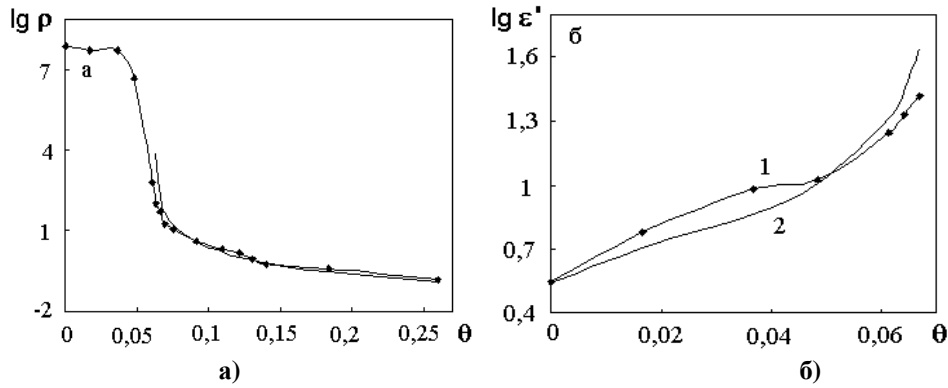
де: коефіцієнти  $\alpha$  і  $\alpha_1$  характеризують зміну значень  $\varepsilon'$  під впливом Ni та останнього під впливом полімеру, відповідно. Нами встановлено, що значення  $\nu$  при різних частотах становлять  $0,73 \pm 0,02$ , а  $t = 1,6 \pm 0,1$ .

Відомо, що для моделей електропровідних ґраток та систем діелектрик – провідник з одним порогом перколяції  $\nu = 0,8 \pm 0,1$ , а  $t = 1,65 \pm 0,15$  [8, 9, 12, 13].

Тому отримані в даній роботі критичні індекси відповідають літературним даними. На рис. 4 побудовані залежності  $\lg \varepsilon'_{\text{KM}} = f(\theta)$  та  $\lg \rho_{\text{KM}} = f(\theta)$  за експериментальними результатами (крива 1) і розрахунковим даним (крива 2) відповідно до виразів (5) і (6). Відхилення розрахункових значень  $\rho_{\text{KM}}$  від експериментальних становить 8 %, для  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  – 10 %.

Таким чином, вирази (3)–(6) можна використовувати для прогнозування залежностей  $\varepsilon'_{\text{KM}}$  та  $\rho_{\text{KM}}$  від вмісту електропровідного компонента в системах діелектрик – провідник.

В [8,9,15] було показано, що пороги перколяції й критичні індекси  $\beta$ ,  $\nu$ ,  $t$  є важливими характеристиками процесів формування ПКС. Значення  $\theta_c$  в значній мірі залежать від умов виготовлення КМ, хімічної природи полімеру, характеристик наповнювача та умов випробування КМ. На відміну від порогів перколяції значення критичних індексів не залежать від умов випробування й характеризують закономірності формування певного типу фрактальних структур компонентів ПКС. Відомо [12,15,16], що критичний індекс  $\beta$  пов'язаний зі зміною структурних одиниць у кластері (його щільністю),  $\nu$  – з кореляційною довжиною,  $t$  – із скелетом неперервного нескінченного кластера, по якому здійснюється електропровідність у зразку. При цьому між критичними індексами існує взаємозв'язок [12, 13, 15] :



**Рис. 4.** Залежності логарифмів питомого електроопору (а) і діелектричної проникності (б) від об'ємної частки нанокристалічного Ni у системі ПВХ–Ni : 1 – експериментально одержана на частоті 1 кГц; 2 – теоретично розрахована.

$$2\beta \approx \nu, \quad (7)$$

$$t \approx 2\nu, \quad (8)$$

В [16] показано, що для тривимірних систем ( $d = 3$ ) між розміром кластера ( $R$ ), кількістю в ньому частинок  $N$  (або масою кластера) та фрактальною розмірністю ( $D_\beta$ ) справедливі залежності:

$$N \sim R^{D_\beta}, \quad (9)$$

$$R \sim N^{1/D_\beta}, \quad (10)$$

$$\beta = 1/D_\beta, \quad (11)$$

Використовуючи значення критичних індексів та вирази (2) – (6), (7), (8) і (9) – (11) ми визначили значення фрактальних розмірностей відповідних перколяційних кластерів ПВХ та Ni поблизу порога перколяції.

Розрахунки показують, що для перколяційного кластера ПВХ значення  $\nu = 0,73 \pm 0,02$ ,  $\beta = 0,36 \pm 0,06$ ,  $D_\beta = 2,74 \pm 0,10$ . Згідно з експериментальними даними для діелектричної проникності показано, що значення  $D_\beta$  для ННК поліетилену (ПЕ) в системі ПЕ – терморозширений графіт становить  $2,60 \pm 0,04$  [9]. Отримані значення  $D_\beta$  добре корелюють з літературними даними [9, 15, 16], а також свідчать про досить високу щільність упакування кластера ПВХ.

Використовуючи дані з електроопору та вирази (3), (5), (8) ми встановили, що для перколяційного кластера Ni поблизу порога перколяції  $\theta_c$  при підході праворуч ( $\theta \geq \theta_c$ ) значення  $t$  знаходиться в межах 1,6 – 1,7,  $\beta \approx 0,40 - 0,42$ , а  $D_\beta \approx 2,38 - 2,50$ . На основі аналізу отриманих даних можна вважати, що існує менш щільне упакування кластера Ni у порівнянні із кластером ПВХ. Отримані значення  $D_\beta$  перебувають у межах  $D_\beta$ , встановлених для інших перколяційних систем [9, 15, 16]. Так, для перколяційного кластера Ni у системі ПЕ – Ni,  $D_\beta = 2,5 \pm 0,05$  [3]. Отже, одержані дані свідчать про загальні закони формування перколяційних кластерів у системах полімер–провідник.

Крім вищевикладеного, викликає інтерес з'ясувати причину зниження порога перколяції в системах ПВХ – нанокристалічний Ni при НВЧ – дослідженнях у порівнянні з дослідженнями на

постійному струмі. Відомо [5, 6], що електроопір на постійному струмі КМ визначається виразом  $R_{\text{км}} = R_1 + R_2 + R_3$ , де  $R_1$  – сумарний електроопір часток Ni,  $R_2$  – опір обумовлений контактом частинок Ni між собою,  $R_3$  – опір, що виникає при протіканні електричного струму через зазор між частинками. Встановлено, що в області концентрації  $\theta_c \leq \theta \ll 1$  для систем ПВХ – Ni поблизу порога перколяції при підході праворуч  $R_{\text{км}} \gg R_1$ , тому  $R_{\text{км}} \approx R_2 + R_3$ .

У випадку досліджень на змінному струмі та надвисоких частотах на відміну від вимірів на постійному струмі, коли електропровідні шляхи утворюють скелет ННК, на високих частотах вони поряд з ланцюжками контактуючих часток містять у собі зазори між частками, а струми зсуву замикають проміжки між “мертвими кінцями” та шунтують довгі петлі [17]. У зв'язку з цим автори [17] вважають неможливим використання теорії перколяції при дослідженнях композиційних матеріалів на НВЧ. Проте на відміну від думки авторів [17] ми показали можливість використання теорії перколяції для опису концентраційної залежності  $\rho_{\text{км}} = f(\theta)$  при дослідженнях на НВЧ.

Сутність полягає в тому, що при цих дослідженнях через несприйняття методом НВЧ досить малих зазорів між ланцюжками кластера, неперервність кластера відчувається при більш низьких концентраціях Ni. Це приводить до зниження значень  $\theta_c$  у порівнянні з величиною  $\theta_c$ , визначеною на постійному струмі.

Аналізуючи дані наших попередніх робіт [3 - 9] та узагальнюючи результати цього дослідження можна оцінити ієрархічну структуру кластерів КМ при дослідженні різними методами. Наприклад, для двокомпонентної системи полімер – провідник (м'який–твердий) метод визначення модуля пружності є чутливим до всіх вузлів твердого кластера КМ [18], при дослідженні залежності  $\rho_{\text{км}} = f(\theta)$  на постійному струмі відчуваються тільки вузли неперервного нескінченного кластера, а при дослідженні магнітних властивостей системи полімер – Ni оцінюється сукупність магнітного кластера [3].

Таким чином, для бінарних систем полімер-електропровідний компонент відмінність у фізичних

процесах, що відповідають за різні показники властивостей КМ, можуть зумовити невелику різницю в значеннях порога перколяції  $\theta_c$ , отриманих з функцій залежностей цих показників від вмісту електропровідного компонента. Проте, для математичного опису залежностей  $\rho_{\text{км}}(\theta)$  та  $\varepsilon'_{\text{км}}(\theta)$  в певних концентраційних інтервалах можуть бути застосовані вирази теорії перколяції. При цьому критичні індекси  $\beta$ ,  $\nu$ ,  $t$  будуть характеризувати топологію будови кластерів компонентів ПКС.

## Висновки

Встановлено закономірності зміни дійсної ( $\varepsilon'$ ) та уявної ( $\varepsilon''$ ) складових комплексної діелектричної проникності, а також питомого об'ємного електричного опору нанокompatитів від вмісту нанокристалічного нікелю в області частот 0,1 – 1 – 10 кГц та 9 ГГц.

Для прогнозування значень  $\varepsilon'_{\text{км}}$  та  $\rho_{\text{км}}$  нанокompatитів в залежності від вмісту нікелю запропоновано вирази типові для теорії перколяції.

Показано, що значення порога перколяції при

дослідженнях на НВЧ у системі ПВХ-Ні значно нижче ( $\theta_c = 0,05$  об'ємної частки) у порівнянні з залежностями  $\lg \rho_{\text{км}} = f(\theta)$ , дослідженими на постійному струмі ( $\theta_c = 0,095$  об'ємної частки).

Визначено значення фрактальної розмірності  $D_\beta$  поблизу порога перколяції неперервних кластерів ПВХ ( $\theta \leq \theta_c$ ) та Ні ( $\theta \geq \theta_c$ ).

**Семко Л.С.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України;

**Махно С.М.** – кандидат фізико - математичних наук, завідувач лабораторії електрофізики наноб'єктів Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України;

**Кручек О.І.** – молодший науковий співробітник Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України;

**Горбик П.П.** – доктор фізико - математичних наук, професор, завідувач відділу Наноматеріалів Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України.

- [1] *Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований.* / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса: Пер. с англ. Мир, М. 292 с. (2002).
- [2] Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфленд И.Е. *Наночастицы металлов в полимерах.* Химия, М. 2000. 672 с. (2000).
- [3] L.S. Semko, V.M. Ogenko, S.L. Revo and al / Electric and magnetic properties of composite materials the polyethylene – nano – crystalline nickel system // *Functional Materials*, **9**(3), pp. 513-518 (2002).
- [4] L.S. Semko, L.S. Dzyubenko, V.M. Ogenko, S.L. Revo. Melting and thermodestruction processes in the polyethylene – nanocrystalline nickel system // *J. Therm. Analysis and Colorimetry*, **70**, pp. 621-631 (2002).
- [5] Л.С. Семко, Е.И. Кручек, Ю.А. Шевляков, П.П. Горбик. Получение, структура, электрические и сенсорные свойства композиционных материалов на основе полимеров и нанокристаллического никеля // *Химия, физика и технология поверхности*, **13**, сс. 322-329 (2007).
- [6] Л.С. Семко, Е.И. Кручек, П.П. Горбик, Ю.А. Шевляков. Влияние магнитного поля на сенсорные характеристики композиционных материалов на основе нанокристаллического никеля // *Химия, физика и технология поверхности*, **14**, сс. 398-406 (2008).
- [7] Л.М. Ганюк, В.Д. Ігнатков, С.М. Махно, П.М. Сорока. Дослідження діелектричних властивостей волокнистого матеріалу // *Укр. фіз. журн.*, **40**(6), сс. 627-629 (1995).
- [8] Л.С. Семко. Сучасні підходи до створення макроструктури полімерних композиційних систем. // *Хімічна промисловість України*, **4**, сс. 46-50 (1997).
- [9] Л.С. Семко. Использование концепции фракталов для формирования свойств полимерных композиционных систем // *Проблемы эксплуатации и надежности авиационной техники.: Сб. научн. тр. КМУГА*, К. сс. 141-147 (1998).
- [10] Л.С. Семко, А.Н. Алексеев, И.Г. Черныш, Р.Е. Попов Диэлектрические свойства ПЭВД, наполненного терморасширенным графитом // *Пластические массы*, **2**, сс. 59-63. (1990).
- [11] Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. *Электропроводящие полимерные композиции*, Химия, М, 240 с. (1984).
- [12] А.Л. Эфрос *Физика и геометрия беспорядка.* Наука, М. 186 с. (1982).
- [13] В.Е. Харитонов. *Диэлектрические материалы с неоднородной структурой.* Радио и связь, М. 127 с. (1983).
- [14] Н.Н. Колосова, К.К. Бойцов. Электропроводность бинарных композиционных материалов с сильно неоднородными свойствами компонентов // *Физика твердого тела*, **21**(8), сс. 2314-2317 (1979).
- [15] Л.С. Семко, П.П. Горбик, В.М. Огенко, В.В. Левандовский, О.М. Гаркуша. Визначення перколяційних характеристик та фрактальних розмірностей кластерів компонентів у системі поліхлортрифторетилен – йодид срібла // *Доповіді НАНУ*, **9**, сс. 94-100 (2000).
- [16] Е. Федер. *Фракталы* / Пер. с англ., Мир, М. 254 с. (1991).

- [17] И.А. Чмутин, Н.Г. Рывкина, А.Т. Пономаренко, В.Г. Шевченко. Концентрационная зависимость электропроводности композитов в области высоких частот // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, **38**(2), сс. 291-295 (1996).
- [18] Л.С. Семко, И.Г. Черныш, Н.И. Свиницкий. Динамические механические свойства композиционных материалов на основе полиэтилена и терморасширенного графита // *Проблемы прочности*, 7, сс. 84-91 (1994).

L.S. Semko, S.N. Makhno, O.I. Kruchek, P.P. Gorbyk

## **Electrophysical Properties of Nanocomposites Based on Polyvinylchloride and Nanocrystalline Nickel**

*O.O. Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine,  
General Naumov Str. 17, 03164 Kyiv-164, E-mail: [Stmax@ukr.net](mailto:Stmax@ukr.net)*

Dependences of dielectric permeability and specific volume electric resistance of nanocomposites based on polyvinylchloride on content of nanocrystalline Ni in a field of low and ultrahigh frequencies were investigated. Expressions typical for percolation theory were proposed in order to forecast the values of dielectric permeability and specific volume electric resistance depending on Ni content. Values of fractale dimension  $D_f$  of continuous clusters PVH and nanocrystalline Ni near of percolation threshold in polyvinylchloride-nanocrystalline Ni system were determined.

**Key words:** nanocrystalline Ni, polymer, dielectric permeability, electric resistance, ultrahigh frequencies.