

## ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ОЛІГОГЛІКОЛІВ ТА ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК

Е. А. Лисенков<sup>1</sup>, В. В. Клепко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Миколаївський національний університет ім. В. О. Сухомлинського,  
Миколаїв, Україна,

<sup>2</sup>Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,  
Київ, Україна

Надійшла до редакції 20.11.2015

Використовуючи методи математичного моделювання проаналізовано основні теоретичні моделі електропровідності полімерних наноконкомпозитів та їх відповідність експериментальним результатам для систем поліетер-вуглецеві нанотрубки. Встановлено, що моделі, які не враховують існування порогу перколяції (модель Рагамана-Чакі-Хастгіра та модель перколяції з тунелюванням) не можуть використовуватися для точного опису експериментальних даних. Виявлено, що модель Фур'є демонструє гарну відповідність експерименту, проте застосовна лише для систем у яких спостерігається великий стрибок електропровідності при досягненні порогу перколяції, тобто систем з низькою власною електропровідністю. **Ключові слова:** перколяційна поведінка, полімерні наноконкомпозити, електропровідність, вуглецеві нанотрубки, теоретичні моделі електропровідності.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ОЛИГОГЛИКОЛЕЙ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Э. А. Лысенков, В. В. Клепко

Используя методы математического моделирования, проанализированы основные теоретические модели электропроводимости полимерных наноконкомпозитов и их соответствие экспериментальным результатам для систем простой полиэфир-углеродной нанотрубки. Установлено, что модели, которые не учитывают существования порога перколяции (модель Рагамана-Чакки-Хастгира и модель перколяции с тунелированием) не могут использоваться для точного описания экспериментальных данных. Обнаружено, что модель Фурье демонстрирует хорошее соответствие с экспериментом, однако применимая лишь для систем в которых наблюдается большой прыжок электропроводимости при достижении порога перколяции, то есть систем с низкой собственной электропроводимостью.

**Ключевые слова:** перколяционное поведение, полимерные наноконкомпозиты, электропроводимость, углеродные нанотрубки, теоретические модели электропроводимости.

## THEORETICAL ANALYSIS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF POLYMERIC NANOCOMPOSITES BASED ON OLIGOGLYCOLS AND CARBON NANOTUBES

E. A. Lysenkov, V. V. Klepko

The basic theoretical models of electrical conductivity of polymer nanocomposites and their accordance to experimental results are analysed for the systems based on polyethers and carbon nanotubes using the methods of mathematical simulation. It is set that models which do not take into account existence of percolation threshold (Rahaman-Chaki-Khastgir model and tunneling percolation model) and can't be using for exact definition of experimental data. It is discovered that the Fourier model demonstrates a good accordance with an experiment, however it is applicable only for the systems in which a large increase of conductivity under reaching the percolation threshold is observed, that systems with low own conductivity.

**Keywords:** percolation behavior, polymer nanocomposites, electrical conductivity, carbon nanotubes, theoretical models of conductivity.

**ВСТУП**

За останні декілька десятиліть композитні матеріали привертають значну увагу науковців та промисловців через їх економічну важливість, легкість переробки та екологічну стабільність [1]. Найбільшу цікавість як для фізики полімерів так і для виробництва викликають полімерні наноккомпозити — новий клас матеріалів, що складаються із полімерної матриці та наповнювачів, які є нанорозмірними [2]. На відміну від композитних систем, полімерні наноккомпозити володіють покращеними фізичними властивостями, такими як висока тепло- та електропровідність і механічна міцність. У наноккомпозитах, взаємодія між нанонаповнювачем та полімерною матрицею відбувається на молекулярному рівні. Властивості матричного полімеру та нанонаповнювача, їх кількість та розподіл наповнювача значно впливають на взаємодії між частинками наповнювача та полімером.

Важливою задачею фізики полімерних наноккомпозитів є визначення порогу перколяції, тобто мінімального вмісту наповнювача, при якому утворюється «неперервний» кластер; при цьому відбувається різкий стрибок більшості властивостей матеріалу [3]. На сьогодні, відкритим питанням залишається можливість впливати на утворення перколяційних кластерів, а отже і на величину порогу перколяції. Вирішення даної проблеми забезпечило б можливості створювати наноккомпозити з наперед заданим порогом перколяції та рівнем електропровідності, що б значно розширило сферу застосування таких матеріалів. Для створення електропровідних наноккомпозитів використовуються різні наповнювачі. Однак, високий вміст або великий розмір наповнювача приводять до суттєвого погіршення механічних властивостей та можливостей переробки даних матеріалів [4]. Тому важливим напрямком розвитку фізики полімерних наноккомпозитів є зниження порогу перколяції, яке б не приводило до погіршення механічних властивостей системи.

В даний час, недостатньо дослідженими залишаються фізичні процеси, які відбуваються у електропровідних перколяційних

кластерах та сітках із нанонаповнювачів, що розподілені у полімерній матриці. Проведено багато чисельних та експериментальних досліджень метою яких було зниження порогу перколяції та встановлення мінімальної кількості наповнювача при якій система досягає максимальної електропровідності [5]. Проте, дуже складною задачею є розділення впливу розмірів нанонаповнювача та їх розподілу у полімерній матриці на перколяційні властивості наноккомпозитів, тому що вплив цих факторів взаємопов'язаний [6]. Так, наприклад, вплив розмірів частинок на перколяційну поведінку наноккомпозитів складно точно встановити через неможливість оцінки рівномірності розподілу наповнювача у матриці. Фундаментальне розуміння впливу фізичних властивостей наповнювачів та методів приготування на перколяційну поведінку електропровідних композитів залишається повністю не вивченим.

Тому метою даної роботи був аналіз основних теоретичних моделей електропровідності полімерних наноккомпозитів та їх застосування для опису експериментальних даних на прикладі модельних систем на основі поліетерів та ВНТ.

**ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА****Модель Рагамана-Чакі-Хастгіра (модель Р-Ч-Х)**

Запропоновані у роботах теоретичні моделі електропровідності Буче [7] та Скарісбріка [8] ґрунтуються на гелеутворенні у полімері та статистичній ймовірності утворення електропровідної сітки з нанонаповнювача відповідно. Проте вони мають значні обмеження. Автори роботи [9] покладали в основу два основних припущень попередніх моделей Буче та Скарісбріка. Математичне рівняння, на якому базується дана модель, має вигляд:

$$\log \sigma_{DC} = \frac{p_m \log \sigma_m + p_f \log \sigma_f}{p_m \exp(p_f) + p_f \exp(p_m)} \quad (1)$$

У формулу (1) для моделі Р-Ч-Х входять чотири параметри, які по своїй суті є постійними величинами. Однак, ця модель

не враховує основні морфологічні особливості системи, такі як аспектне відношення, рівномірність розподілу, агрегація, орієнтація наповнювача тощо. Проте, як відомо, морфологічні параметри мають визначальний вплив на поріг перколяції та величину електропровідності полімерних нанокомпозитів [10]. Саме тому автори роботи [9] запропонували модифікувати модель Р-Ч-Х, помноживши об'єму частку наповнювача на параметр, який був названий морфологічним фактором  $M$ . Основне рівняння модифікованої Р-Ч-Х моделі записується як:

$$\log \sigma_{DC} = \frac{p_m \log \sigma_m + Mp_f \log \sigma_f}{p_m \exp(Mp_f) + Mp_f \exp(p_m)} \quad (2)$$

### Модель перколяції з тунелюванням

Враховуючи ефекти тунелювання при утворенні перколяційного кластера у наповнених полімерних системах Жу та ін. запропонували модель перколяції з тунелюванням [11]. У рамках даної моделі частинки, введені до складу полімерного нанокомпозиту, є складеними сферичними частинками і представляються у вигляді електропровідного ядра та полімерної оболонки товщиною до 10 нм, через яку можуть тунелювати електрони. Полімерна оболонка приймає участь у перенесенні зарядів, тому її існування значно розширює ефективний об'єм частинок, при цьому перколяційні кластери утворюються при менших концентраціях наповнювача.

Таку систему складених частинок можна описати типовою моделлю ядро-оболонка для багатьох частинок. Об'ємний вміст  $\Phi$  наповнювача у моделі ядро-оболонка з об'ємним вмістом ядер  $\phi$  (реальний вміст частинок наповнювача), радіусом ядра  $r$  та товщиною оболонки  $\tau$  визначається як [12]:

$$\Phi_{eq} = 1 - (1 - \phi) \exp \left[ \frac{\phi(1 - \lambda^{-3})}{(1 - \phi)^3} \right] \exp \left\{ - \frac{\phi^2 \lambda^{-3} (\lambda - 1)}{2(1 - \phi)^3} \times \left[ (7\lambda^2 + 7\lambda - 2) - 2\phi(7\lambda^2 - 5\lambda + 1) + \phi^2(5\lambda^2 - 7\lambda + 2) \right] \right\}, \quad (3)$$

де  $\lambda = r/(r + \tau)$ . Модель ядро-оболонка є одним із прикладів континуальної перколяції. Для даної моделі, поріг перколяції  $\Phi_{eq}^c$  — це критична концентрація наповнювача, при якій утворюється неперервна сітка із частинок наповнювача через всю систему. Однак, аналітичного виразу для знаходження  $\Phi_{eq}^c$  не існує. Запропоновані у роботах [11, 12] вирази для знаходження не є  $\Phi_{eq}^c$  універсальними і підбираються для певного типу частинок. Розрахований за цими виразами поріг перколяції становить приблизно 30–40 %, що для нанокомпозитних систем є значно завищеним.

Основа на припущенні існування складених частинок та теорії критичної перколяції, модель перколяції з тунелюванням для розрахунку ефективної електропровідності системи полімер-наповнювач має вигляд:

$$\sigma_{DC} = \sigma_{eq} \left( \frac{\Phi_{eq} - \Phi_{eq}^c}{1 - \Phi_{eq}^c} \right)^t, \quad (4)$$

де  $\sigma_{eq}$  — еквівалентна електропровідність, яка залежить від електропровідностей ядра частинки та полімерної оболонки,  $t$  — універсальний критичний індекс, який при ідеальному контакті та рівномірному розподілі складених частинок у композиті рівний 2.

За даними авторів [11] за допомогою запропонованої моделі можливо передбачити зміну електропровідності системи у всьому діапазоні концентрацій наповнювача. Так для системи Ni/SiO<sub>2</sub> модель добре описує експеримент, враховуючи навіть утворення двох перколяційних переходів, де спочатку перколюють оболонки складеного наповнювача, а потім їх ядра. Для опису ефекту подвійної перколяції у моделі перколяції з тунелюванням припускається, що параметр  $\sigma_{eq}$  не є константою, залежить від вмісту наповнювача. У такому випадку,  $\sigma_{eq}$  визначається складними формулами, наведеними у [11].

### Модель контактуючих волокон

Модель контактуючих волокон була запропонована Вебером та Камалем та [13] для обчислення об'ємного опору армованих волокнами композитів. Дана модель враховує мікроструктурні параметри, такі як концентрація наповнювача і його розмірність, аспектне відношення та орієнтація волокон. У своїй моделі Вебер та Камал припустили, що електропровідність полімерної матриці є настільки малою, що не впливає на загальну електропровідність композиту. У такому випадку дана модель має значні обмеження для опису наповнених систем на основі полімерної матриці з високою власною електропровідністю. Для розширення області застосування даної моделі Тайпалус та ін. [14] запропонували врахувати електропровідність полімерної матриці. Основне рівняння моделі контактуючих волокон записується у вигляді:

$$\sigma_{DC} = \sigma_m + \left[ \frac{4d_c l \varphi_p \sigma_f \cos^2 \theta}{\pi d^2} X \right], \quad (5)$$

де,  $\sigma_{DC}$ ,  $\sigma_m$  та  $\sigma_f$  — електропровідності композиту, матриці та наповнювача відповідно,  $d$  — діаметр волокна,  $l$  — довжина волокна,  $d_c$  — діаметр області контакту,  $\theta$  — кут орієнтації волокон.

У моделі передбачається, що основним типом контактів між волокнами є не контакт типу «кінець до кінця», а, ймовірніше, контакти типу «тіло до кінця» або «тіло до тіла» [15]. Область контакту для цих двох випадків набагато менша, ніж при утворенні контактів типу «кінець до кінця», що значно проявляється на загальній електропровідності композиту. Крім цього, модель контактуючих волокон базується на припущенні, що частинки мають плоску круглу область контакту [14]. Діаметр цієї круглої області  $d_c$  має дуже маленьке значення, і його не можливо точно виміряти. Значення  $d_c$  можна оцінити шляхом співставлення експериментальних та розрахованих даних за допомогою даної моделі, а потім використовувати це значення для всіх інших зразків з різними вмістом однакового наповнювача.

Величина  $\varphi_p$  показує об'ємну частку волокон наповнювача, що беруть участь

в утворенні електричних провідних шляхів. Тільки волокна, які формують провідну сітку, впливають на електропровідність композитної системи. Решта волокон оточуються матрицею і, фактично перебуваючи в ізоляції, не покращують електропровідність. Величину  $\varphi_p$  можна визначити як:

$$\varphi_p = \beta \varphi_f, \quad (6)$$

де  $\varphi_f$  — об'ємна частка волокон наповнювача,  $\beta$  — фактор, що показує, яка частина волокон бере участь в утворенні провідної сітки. При вмісті наповнювача нижчому за поріг перколяції  $\varphi_c$ ,  $\beta = 0$ , тому що волокна не контактують між собою. Об'ємна частка «насичення»  $\varphi_t$  характеризує стан системи в якій достатньо волокон наповнювача, щоб утворити як мінімум один досконалий провідний канал. Ця величина оцінюється з результатів вимірювань електропровідності і дорівнює вмісту наповнювача після порогу перколяції, при якому провідність системи майже не змінюється. При вмісті наповнювача більшому за  $\varphi_t$ , параметр  $\beta = 1$ , а  $\varphi_p = \varphi_f$ . Для концентрацій наповнювача в області  $\varphi_c < \varphi_f < \varphi_t$ ,  $\beta$  можна обчислити як:

$$\beta = \frac{\varphi_f - \varphi_c}{\varphi_t - \varphi_c}, \quad (7)$$

де  $X$  — фактор, який залежить від числа контактів волокон наповнювачів між собою. Вебер та ін. [13] запропонували математичне співвідношення між величинами  $X$  та  $m$ .

$$X = 0,59 + 0,15m, \quad (8)$$

де  $m$  — число контактів, яке розраховується за наступним виразом:

$$m = m_{\max} \left( \frac{\varphi_p}{\varphi_t} \right). \quad (9)$$

Для більшості систем, максимальне число контактів становить 15 [13].

### Модель Фур'є

Фур'є та ін. запропонували аналітичну модель, яка ґрунтується на розподілу Фермі-Дірака та описує перехід діелектрик-провідник.

Основне рівнянням даної моделі записується як [16]:

$$\log(\sigma_{DC}) = \log(\sigma_f) + \frac{\log(\sigma_m) - \log(\sigma_f)}{1 + \exp[b(p - p_c)]}, \quad (10)$$

де  $\sigma_{DC}$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_m$  — електропровідність композиту, наповнювача і полімерної матриці, відповідно,  $p$  — вміст наповнювача,  $b$  — емпіричний параметр, який приводить до зміни електропровідності системи при досягненні порогу перколяції  $p_c$ .

Загалом, модель Фур'є є дуже подібною до сигмоїдальної моделі і за «S»-подібною формою, яка якісно відповідає типовій перколяційній кривій, і за впливом більшості параметрів на значення загальної електропровідності системи. Основним варіативним параметром моделі Фур'є є параметр  $b$ , який змінює форму кривої.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для встановлення відповідності теоретичних моделей та експерименту, використовували експериментальні результати концентраційної залежності електропровідності для систем на основі поліетиленгліколю-400 (ПЕГ-400–ВНТ) [17], поліпропіленгліколю-400 (ППГ-400–ВНТ) [18] та поліетиленгліколю-10000 (ПЕГ-10000–ВНТ) [19].

На рис. 1. приведені результати моделювання експериментальних результатів електропровідності для систем поліетер-ВНТ у рамках модифікованої моделі Р-Ч-Х. За даними авторів роботи [20], які проаналізували ряд експериментальних результатів електропровідності систем полімер-наповнювач модель добре корелює із експериментом. Однак, за результатами моделювання систем поліетер-ВНТ (рис. 1), модифікована модель Р-Ч-Х показує погану відповідність експерименту. Це пояснюється значним обмеженням даної моделі, яка не враховує існування порогу перколяції. Тому, за допомогою даної моделі можна описати електропровідність нанонаповнених систем лише після порогу перколяції. Однак, як видно з рис. 1, модифікована модель Р-Ч-Х не описує експериментальні дані навіть на ділянці кривої після порогу перколяції. Автори роботи [20]

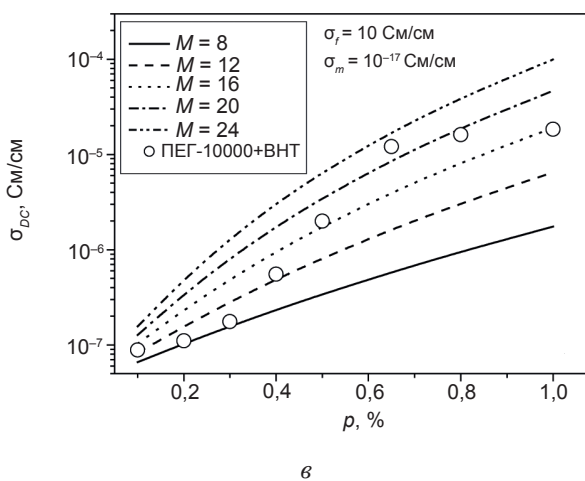
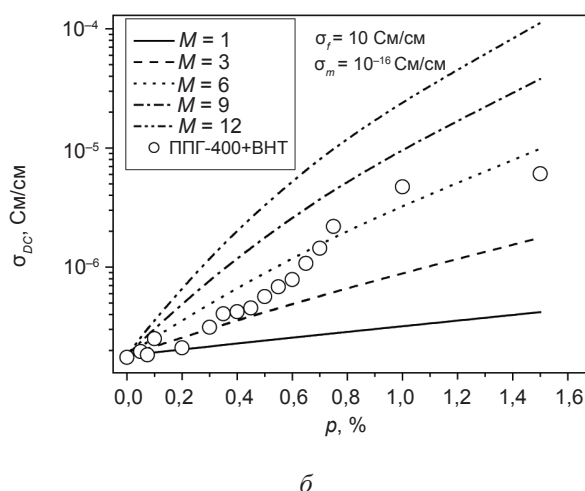
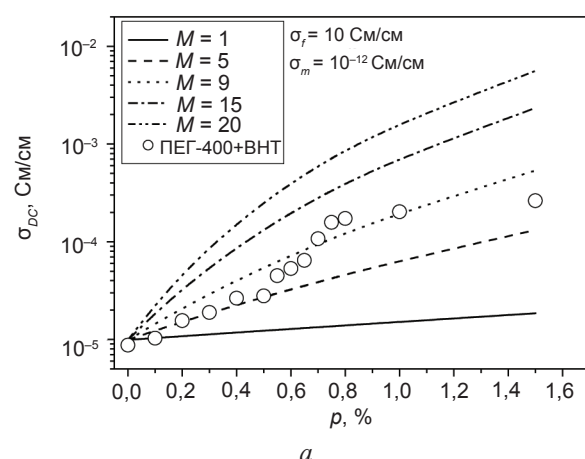


Рис. 1. Промодельовані за допомогою рівн. (2) експериментальні дані для нанонаповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель Р-Ч-Х

також стверджують, що для наповнених полімерних систем справедливе співвідношення  $M \times p_c \approx 0,2$ . Однак, добуток, визначених за допомогою моделювання, значень морфологічного фактора  $M$  на поріг перколяції для систем поліетер-ВНТ, складає 0,09, 0,06 та 0,128 для систем на основі ПЕГ-400, ППГ-400 та ПЕГ-10000, відповідно. Ще одним

недоліком цієї моделі є те, що для її підгонки треба використовувати дуже низькі значення електропровідності полімерної матриці. Це обмежує застосування даної моделі для опису систем на основі полімерів з високою власною електропровідністю.

На рис. 2. показано моделювання електропровідності систем поліетер-ВНТ у рамках моделі перколяції з тунелюванням. При

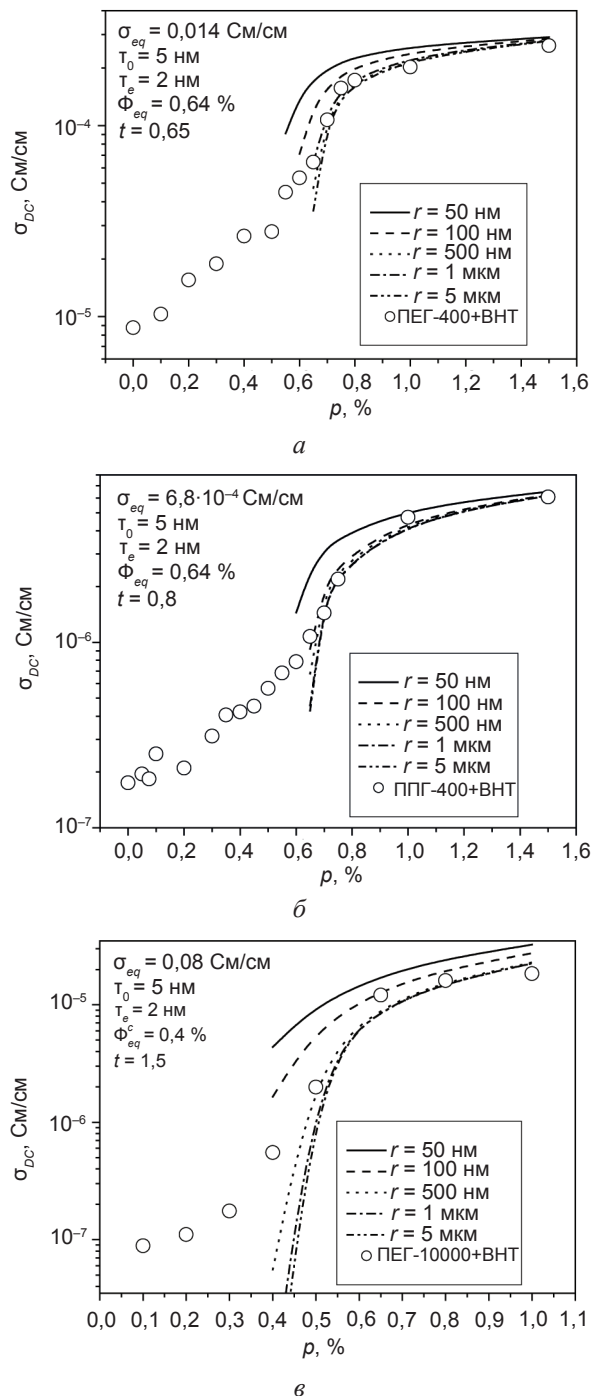


Рис. 2. Промодельовані за допомогою рівн. (4) експериментальні дані для нанонаповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель перколяції з тунелюванням

описі експериментальних даних для систем поліетер-ВНТ за допомогою даної моделі, приймали, що  $\sigma_{eq}$  є константою та не залежить від вмісту наповнювача в області малих концентрацій. Оскільки модель описує перколяційну поведінку систем, які наповнені лише сферичними частинками, складність викликає оцінка радіуса частинки, оскільки нанотрубка має дуже витягнуту форму. Для розрахунків, опираючись на дослідження авторів роботи [21], було прийнято, що нанотрубки існують у згорнутій, а не витягнутій формі, тому їх можна представити у вигляді сферичних частинок. Як встановлено у роботі [21], діаметр такої згорнутої нанотрубки становить 0,17 мкм та 1,14 мкм для одношарових та багатшарових ВНТ відповідно.

З рис. 2, видно, що модель перколяції з тунелюванням добре описує експериментальні дані лише в області концентрацій більших за поріг перколяції. Також модель обмежена описом полімерних систем, які містять лише частинки сферичної форми, що утруднює її використання для об'єктів, які не здатні утворювати сферичні структури, наприклад графен, орієнтовані ВНТ тощо.

На рис. 3. представлені результати аналізу моделі контактуючих волокон. Згідно з рис. 3 а–б, функція моделі контактуючих волокон при зміні деяких її параметрів дуже подібна до типової перколяційної кривої. Вона враховує структурні особливості частинок наповнювача, їх орієнтацію у просторі, а також кількість і площу прямих контактів між ними. Однак, при її застосуванні для опису експериментальних даних систем на основі поліетерів, модель показує погану відповідність експерименту (рис. 3 в). Причина такої розбіжності теорії та експерименту полягає в тому, що у системах на основі поліетерів стрибок електропровідності після досягнення порогу перколяції становить 1–2 порядки. При детальному аналізі функції моделі контактуючих волокон було встановлено, що для адекватного кількісного опису експериментальних даних стрибок електропровідності після досягнення порогу перколяції повинен становити не менше 5 порядків. Тому, дану модель можна використовувати для опису систем на основі полімерних матриць з надзвичайно низькою власною

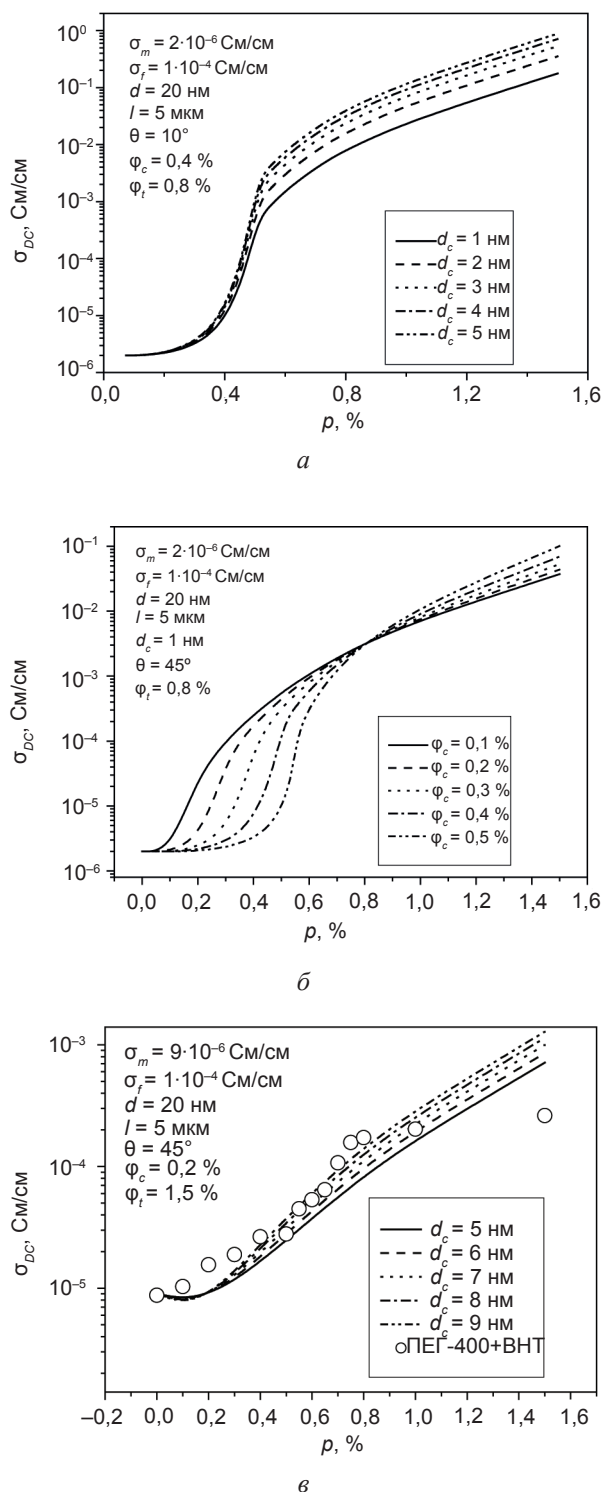


Рис. 3. Загальний вигляд функції моделі контактуючих волокон рівн. (5) (а, б) та промодельовані за допомогою рівн. (5) експериментальні дані для нанопоповнених систем на основі ПЕГ-400 (в). Лінії — модель контактуючих волокон

електропровідністю. За умови високого стрибка електропровідності при досягненні системою порогу перколяції за допомогою даної моделі можна дуже точно описати експериментальні дані.

Найбільш коректно експериментальні результати електропровідності систем поліетер-ВНТ описує модель Фур'є (рис. 4). Проте, для підгонки функції (10), значення параметрів  $\sigma_f$  та  $\sigma_m$  були значно нижчими у порівнянні з власними електропровідностями ВНТ та поліетерної матриці. Це значно знижує точність моделі і обмежує її застосування. Така невідповідність пояснюється невеликим стрибком електропровідності при проходженні порогу

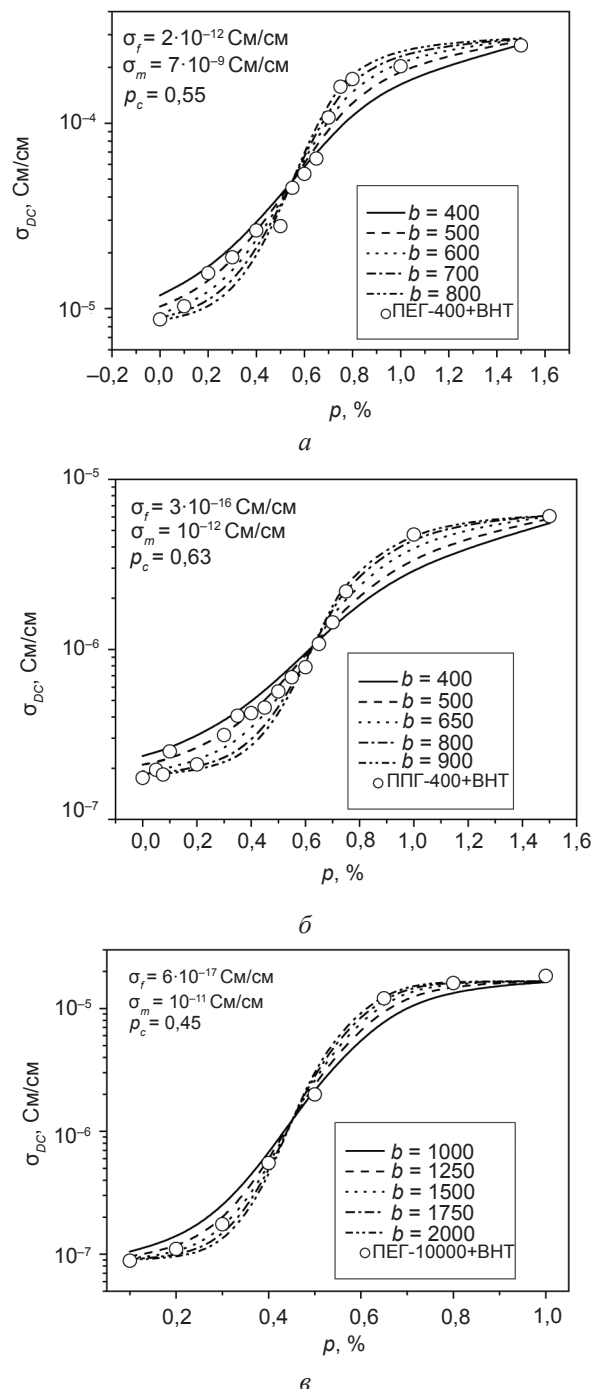


Рис. 4. Промодельовані за допомогою рівн. (10) експериментальні дані для нанопоповнених систем на основі ПЕГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЕГ-10000 (в). Лінії — модель Фур'є

перколяції у системах поліетер-ВНТ. Автори даної моделі описували результати електропровідності, для систем, у яких спостерігався стрибок електропровідності рівний 10–11 порядкам [16].

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи було проаналізовано основні теоретичні моделі електропровідності полімерних наноккомпозитів та їх застосування для опису експериментальних даних на прикладі модельних систем на основі поліетерів та ВНТ. Встановлено, що модифікована теоретична модель Рагамана-Чакі-Хастгіра, хоч і враховує певний морфологічний фактор, не враховує існування порогу перколяції та не може коректно описати експериментальні дані електропровідності полімерних наноккомпозитів у широкому діапазоні концентрацій наповнювача. Показано, що модель перколяції з тунелюванням може використовуватися лише для систем, які містять частинки сферичної форми та добре описує експериментальні дані лише в області концентрацій більших за поріг перколяції. Виявлено, що модель контактуючих волокон враховує велику кількість структурних параметрів наповнювача (взаємодію, ступінь розподілу, орієнтацію тощо), проте не може адекватно описати експеримент для систем, на основі полімерних матриць з високою власною електропровідністю. Тому, дану модель можна використовувати для опису систем на основі полімерів з надзвичайно низькою власною електропровідністю. Встановлено, що модель Фур'є найбільш коректно експериментальні результати електропровідності для нанонаповнених полімерних систем. Проте, вона також має свої обмеження пов'язані з величиною стрибка електропровідності при досягненні порогу перколяції.

Аналіз теоретичних моделей електропровідності показав, що не існує єдиної моделі, яка б враховувала структурні особливості матриці та наповнювача та точно описувала експериментальні результати перколяційної поведінки електропровідності у полімерних наноккомпозитах. Отже, створення універсальної моделі дозволить прогнозувати функціональні властивості полімерних наноккомпозитних матеріалів, наповнених ВНТ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite materials: design and applications. — Boca Raton: «CRC Press», 2002. — 568 p.
2. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite Science and Technology. — Weinheim: «Wiley-VCH», 2003. — 230 p.
3. Swain S. K., Jena I. Polymer / Carbon Nanotube Nanocomposites: A Novel Material // Asian J. of Chem. — 2010. — Vol. 22, No. 1. — P. 1–15.
4. Min C., Shen X., Shi Z., Chen L., Xu Z. The Electrical Properties and Conducting Mechanisms of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites: A Review // Polym. -Plast. Tech. and Engin. — 2010. — Vol. 49. — P. 1172–1181.
5. Zeng X., Xu X., Shenai P. M., Kovalev E., Baudot C., Mathews N., Zhao Y. Characteristics of the Electrical Percolation in Carbon Nanotubes / Polymer Nanocomposites // J. Phys. Chem. C. — 2011. — Vol. 115, No. 44. — P. 21685–21690.
6. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // Polymers. — 2012. — Vol. 4. — P. 275–295.
7. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43. — P. 4837–4838.
8. Scarisbrick R. M. Electrically conducting mixtures // J. Phys. D Appl. Phys. — 1973. — Vol. 6. — P. 2098–2110.
9. Rahaman M., Chaki T. K., Khastgir D. Modeling of DC conductivity for ethylene vinyl acetate (EVA)/Polyaniline conductive composites prepared through in-situ polymerization of aniline in EVA matrix // Compos. Sci. Technol. — 2012. — Vol. 72. — P. 1575–1580.
10. Mao C., Zhu Y., Jiang W. Design of electrical conductive composites: tuning the morphology to improve the electrical properties of graphene filled immiscible polymer blends. // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2012. — Vol. 4, No 10. — P. 5281–5286.
11. L. -J. Zhu, W. -Z. Cai, B. -Q. Gu, S. -T. Tu. Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // Mod. Phys. Lett. B. — 2009. — Vol. 23, No 10. — P. 1273–1279.



12. Lee S. B., Torquato S. Pair connectedness and mean cluster size for continuum percolation models: Computer simulation results // *J. Chem. Phys.* — 1988. — Vol. 89. — P. 6427–6433.
  13. Weber K., Kamal M. R. Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites // *Polym. Compos.* — 1997. — Vol. 18. — P. 711–725.
  14. Taipalus R., Harmina T., Zhang M. Q., Friedrich K. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene/polyaniline complex blends: experimental characterisation and modelling // *Compos. Sci. Tech.* — 2001. — Vol. 61. — P. 801–814.
  15. Wang S. F., Ogale A. A. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry // *Compos. Sci. Tech.* — 1993. — Vol. 46, No. 4. — P. 389–398.
  16. Fourier J., Boiteux G., Seytre G., Marichy G. Percolation Network of Polypyrrole in Conducting Polymer Composites // *Synth. Met.* — 1997. — Vol. 84. — P. 839–840.
  17. Лисенков Е. А., Клепко В. В. Особливості переносу зарядів у системі поліетиленгліколь / вуглецеві нанотрубки // *Журнал нано- та електронної фізики.* — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 03052-1–03052-6.
  18. Lysenkov E. A., Yakovlev Y. V., Klepko V. V. Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes // *Ukr. Phys. J.* — 2013. — Vol. 58, № 4. — P. 378–384.
  19. Лисенков Е. А., Клепко В. В., Яковлев Ю. В. Вплив особливостей полімерної матриці на перколяційну поведінку нанокомпозитів поліетер-вуглецеві нанотрубки // *Нано-структурне матеріалознавство.* — 2013. — № 3–4. — С. 46–54.
  20. Ram R., Rahaman M., Khastgir D. Electrical properties of polyvinylidene fluoride (PVDF)/ multi-walled carbon nanotube (MWCNT) semi-transparent composites: Modelling of DC conductivity // *Compos.: Part A.* — 2015. — Vol. 69. — P. 30–39.
  21. Lisetski L. N., Fedoryako A. P., Samoilov A. N., Minenko S. S., Soskin M. S., Lebovka N. I. Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes // *Eur. Phys. J. E.* — 2014. — Vol. 37. — P. 68-1–68-7.
- ## LITERATURA
1. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite materials: design and applications. — Boca Raton: «CRC Press», 2002. — 568 p.
  2. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V. Nanocomposite Science and Technology. — Weinheim: «Wiley-VCH», 2003. — 230 p.
  3. Swain S. K., Jena I. Polymer / Carbon Nanotube Nanocomposites: A Novel Material // *Asian J. of Chem.* — 2010. — Vol. 22, No. 1. — P. 1–15.
  4. Min C., Shen X., Shi Z., Chen L., Xu Z. The Electrical Properties and Conducting Mechanisms of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites: A Review // *Polym. -Plast. Tech. and Engin.* — 2010. — Vol. 49. — P. 1172–1181.
  5. Zeng X., Xu X., Shenai P. M., Kovalev E., Baudot C., Mathews N., Zhao Y. Characteristics of the Electrical Percolation in Carbon Nanotubes / Polymer Nanocomposites // *J. Phys. Chem. C.* — 2011. — Vol. 115, No. 44. — P. 21685–21690.
  6. Huang Y. Y., Terentjev E. M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties // *Polymers.* — 2012. — Vol. 4. — P. 275–295.
  7. Bueche F. Electrical resistivity of conducting particles in an insulating matrix // *J. Appl. Phys.* — 1972. — Vol. 43. — P. 4837–4838.
  8. Scarisbrick R. M. Electrically conducting mixtures // *J. Phys. D Appl. Phys.* — 1973. — Vol. 6. — P. 2098–2110.
  9. Rahaman M., Chaki T. K., Khastgir D. Modeling of DC conductivity for ethylene vinyl acetate (EVA) / Polyaniline conductive composites prepared through in-situ polymerization of aniline in EVA matrix // *Compos. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 72. — P. 1575–1580.
  10. Mao C., Zhu Y., Jiang W. Design of electrical conductive composites: tuning the morphology to improve the electrical properties of graphene filled immiscible polymer blends. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2012. — Vol. 4, No. 10. — P. 5281–5286.
  11. L. -J. Zhu, W. -Z. Cai, B. -Q. Gu, S. -T. Tu. Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // *Mod. Phys. Lett. B.* — 2009. — Vol. 23, No. 10. — P. 1273–1279.
  12. Lee S.B., Torquato S. Pair connectedness and mean cluster size for continuum percolation

- models: Computer simulation results // *J. Chem. Phys.* — 1988. — Vol. 89. — P. 6427–6433.
13. Weber K., Kamal M. R. Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites // *Polym. Compos.* — 1997. — Vol. 18. — P. 711–725.
  14. Taipalus R., Harmina T., Zhang M. Q., Friedrich K. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene / polyaniline complex blends: experimental characterisation and modelling // *Compos. Sci. Tech.* — 2001. — Vol. 61. — P. 801–814.
  15. Wang S. F., Ogale A. A. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry // *Compos. Sci. Tech.* — 1993. — Vol. 46, No. 4. — P. 389–398.
  16. Fourier J., Boiteux G., Seytre G., Marichy G. Percolation Network of Polypyrrole in Conducting Polymer Composites // *Synth. Met.* — 1997. — Vol. 84. — P. 839–840.
  17. Lisenkov E. A., Klepko V. V. Osoblivosti perenosu zaryadiv u sistemi polietilenglikol' / vuglecevi nanotrubki // *Zhurnal nano- ta elektronnoï fiziki.* — 2013. — Vol. 5, No. 3. — P. 03052-1–03052-6.
  18. Lysenkov E. A., Yakovlev Y. V., Klepko V. V. Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes // *Ukr. Phys. J.* — 2013. — Vol. 58, No.4. — P. 378–384.
  19. Lisenkov E. A., Klepko V. V., Yakovlev Yu. V. Vpliv osoblivostej polimernoï matrici na perkolyacijnu povedinku nanokompozitiv polieter-vuglecevi nanotrubki // *Nanostrukturne materialoznavstvo.* — 2013. — No. 3–4. — P. 46–54.
  20. Ram R., Rahaman M., Khastgir D. Electrical properties of polyvinylidene fluoride (PVDF) /multi-walled carbon nanotube (MWCNT) semi-transparent composites: Modelling of DC conductivity // *Compos.: Part A.* — 2015. — Vol. 69. — P. 30–39.
  21. Lisetski L. N., Fedoryako A. P., Samoilov A. N., Mینenko S. S., Soskin M. S., Lebovka N. I. Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes // *Eur. Phys. J. E.* — 2014. — Vol. 37. — P. 68-1–68-7.