

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

Кафедра фізики та астрономії

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**«Ефективна електрична провідність полімерних композитів із
сегрегованим розподілом частинок наповнювача»**

“ Effective electrical conductivity of polymer composites with a segregated filler particle
distribution ”

Виконав: здобувач денної форми навчання

спеціальності 104-Фізика та астрономія

Освітня програма Фізика та астрономія

Навроцький Олександр Сергійович

Керівник к.ф.-м.н.,доц.Сушко М.Я._____

(підпис)

Рецензент д.ф.-м.н.,проф. Козицький С.В.

Рекомендовано до захисту:
протокол засідання кафедри
фізики та астрономії _____
№ ____ від _____.____. 20__ р.

Захищено на засіданні ЕК № _____
протокол № __від _____.____.20__ р.
Оцінка _____/_____/_____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Завідувач кафедри
_____ ГОЦУЛЬСЬКИЙ Володимир
(підпис)

Голова ЕК
_____ ГОЦУЛЬСЬКИЙ Володимир
(підпис)

Одеса 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Модель ефективної електричної провідності полімерних композитів..	5
1.1. Досліджувані типи полімерних композитів.....	5
1.1. Метод досліджування ефективної електричної провідності	8
1.2. Електрична провідність композитів з хаотичним розподілом частинок наповнювача	10
1.3. Електрична провідність композитів із сегрегованим розподілом частинок наповнювача	12
2. Застосування моделі для реальних систем	16
2.1. Композити з хаотичним розподілом ЕС-Ni	16
2.2. Композити із сегрегованим розподілом ПВХ-Ni.....	18
Висновки	20
Список використаних джерел	21

ВСТУП

Полімерні матеріали з початку свого створення зазвичай мають малу електропровідність і належать до ізоляторів. Для технічних застосувань перспективним є створення матеріалу, які мають електропровідність на рівні провідника, при цьому зберігати фізико-механічні властивості полімеру. Такі полімерні композити мають дуже багато застосувань у техніці. Це електропровідні клеї, антистатичні матеріали, гнучкі нагрівачі, контактні матеріали для електронної техніки, захисні покриття від електромагнітного поля і багато інших [1-2]. Потенційність застосування таких композитів є актуальним для науки.

Об'єктом дослідження є електричні властивості композитних полімерів на базі полівінілхлорид(ПВХ) та епоксидна смола(ЕС) з диспергованими в них частинками нікелю(Ni). Форма частинок нікелю близька до сферичної, але їх поверхня не є ідеально гладкою. Розподіл частинок у першому випадку – хаотичний, у другому – сегрегований.

Метою роботи є розробка моделі електричної провідності полімерних композитів з сегрегованим типом розподілу її порівняння з відомою моделлю [9] для хаотичного розподілу та тестування обох моделей шляхом порівняння з експериментальними даними.

Існує багато методів, для опису ефективної електричної провідності неупорядкованих гетерогенних систем, кожний з яких має свої переваги та недоліки. Така задача є багаточастинковою, а тому кількість точних розв'язків надзвичайно обмежена. Типові методи дослідження електричної провідності таких систем можемо розділити на три групи: (1) числові симуляції [3], (2) теорія графів [4] та ренормалізаційної групи [5] та (3) електродинамічні методи включаючи метод Маквелла-Гарнетта [6], Бругеммана [6] і їх комбінації, а також метод компактних груп неоднорідностей (МКГ) [7-10]. Методи першої групи накладають суттєві

вимоги до швидкості і об'єму комп'ютерної пам'яті, є часозатратними. Методи другої групи оперують величинами, зміст яких і зв'язок з фізичними величинами не є завжди прозорим. Електродинамічні методи з фізичного погляду є більш адекватними, але зазвичай опираються на неконтрольовані одночастинкові наближення. З цього погляду МКГ видається достатньо перспективним, дозволяє розраховувати багаточастинкові ефекти без їх докладної деталізації.

Реалізація методу, перший крок полягає у моделюванні мікроструктури системи. Основні властивості мікроструктури досліджуваної композитів розглядається в підрозділ 1.1. У роботі аналіз цих систем в рамках дисперсних системи частинок, з морфологією тверде ядро проникна оболонка де, в якості ядер виступає або самі частинки наповнювача (хаотичний розподіл підрозділ 1.3) або глобули полімеру (сегрегований розподіл підрозділ 1.4), а оболонок міжфазні області, які у випадку сегрегованого розподілу включають частинки наповню і області самого полімеру.

Базові співвідношення в рамках такої моделі тестуються в підрозділах 2.1 та 2.2. Результати з порівнянням з експериментами показують хороше узгодження з теорію та експериментальних даних. Робота завершуються переліком висновків та використаних джерел.

1. Модель ефективної електричної провідності полімерних композитів

1.1. Досліджувані типи полімерних композитів

У цьому розділі йде опис досліджуваної системи. Зразки композитів готувались групою Є.П. Мамуні і його колег у роботі [11] таким чином. Для композитів бралися карбонілові нікелеві частинки з середнім розміром $d \approx 10$ мкм. Карбонілові частинки нікелю мають майже сферичну форму, але поверхня може бути з деякою шпилясто-дендритною структурою, показана на (Рис. 1).

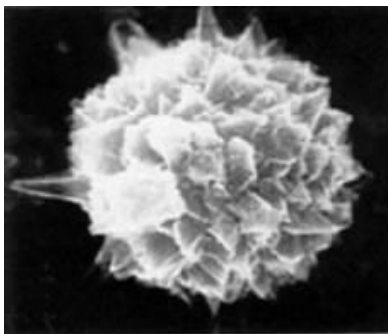


Рис. 1 Структура карбонілової частинки нікелю. Дані взяті [13].

Композит оснований на епоксидній смолі (ЕС) отримувався змішанням з частинок та смолою (Bisphenol A diglycidyl ether) порошком карбонілу нікелю і затверджувачем (Diethylenetriamine). Суміш після змішування заливали у форму і затверджувались на протязі 2 годин при температурі 120°C . Щоб запобігти осадженню наповнювача і добитись хаотичного розподіл в полімерній матриці, ємність оберталась з частотою 1 c^{-1} до тих пір, доки зразок не затвердів. Просторовий розподіл частинок наповнювача контролювався за допомогою оптичної мікроскопії.

Для приготування композитів на основі полівінілхлориду (ПВХ) використовували порошок полімеру, середній розмір частинок якого $D \approx 100$ мкм. Суміш полімеру і порошка карбонілу нікелю клали в гарячу

прес-форму при температурі 170°C і пресували після витримки на протязі 1 хвилини. Про додаткові домішки автори роботи нічого не вказували в цих композитах.

Електропровідність чистих полімерів ПВХ і ЕС складала 10^{-14} та 10^{-12} См/м. Про провідність частинок нікелю не повідомлялась. Провідність Композиту змінювалась, в залежності від об'ємної концентрації металу від 10^{-14} до 10^5 См/м [11] (Рис 2.).

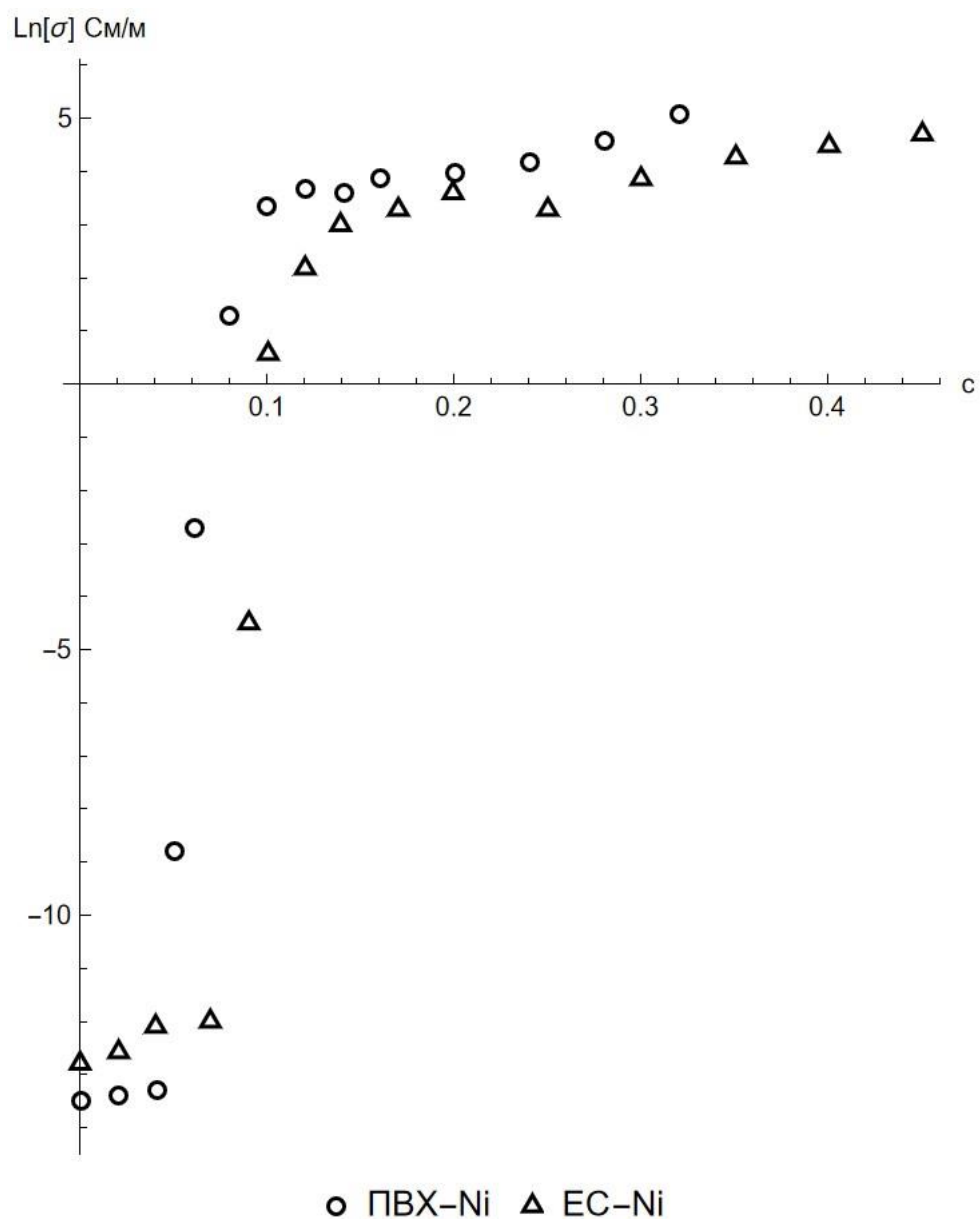


Рис. 2 Експериментальні залежності логарифма провідності від концентрації частинок Ni в ЕС та ПВХ. Дані взяті з роботи [11].

Характер розподілу частинок досліджувався методом оптичної мікроскопії. Аналіз показав, що у композиті ЕС-Ni розподілені хаотично. (див. рис. 3, де разом з розподілом частинок вказані міжфазні шари, існування яких припускається в даній роботі). Розподіл частинок ПВХ-Ni має сегрегований характер (див. рис. 4).

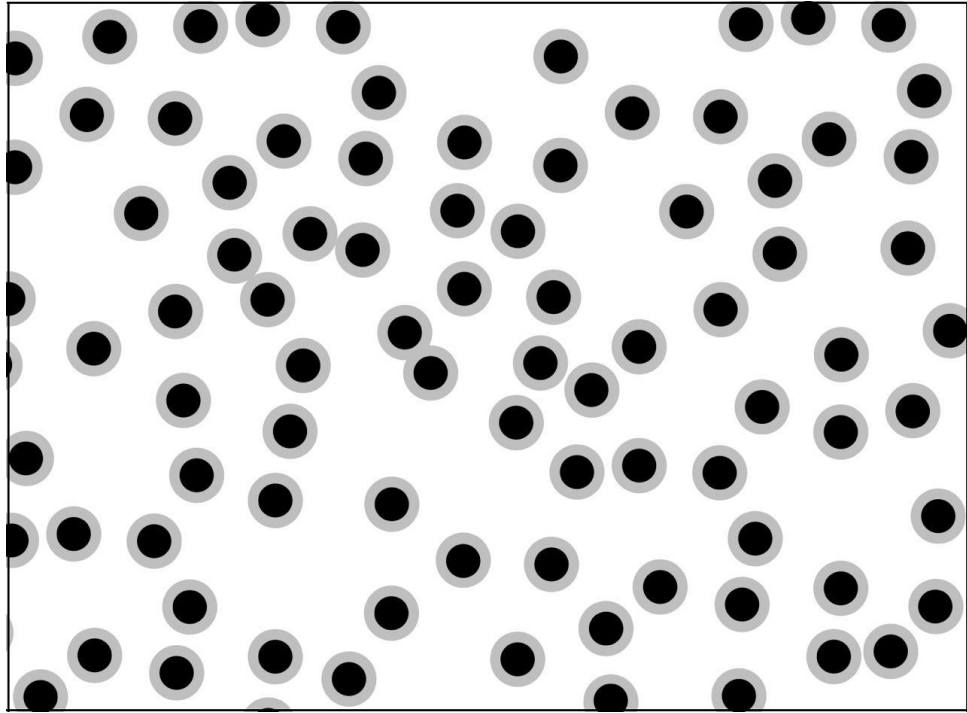


Рис. 3 Схематичне зображення хаотичного розподілу.

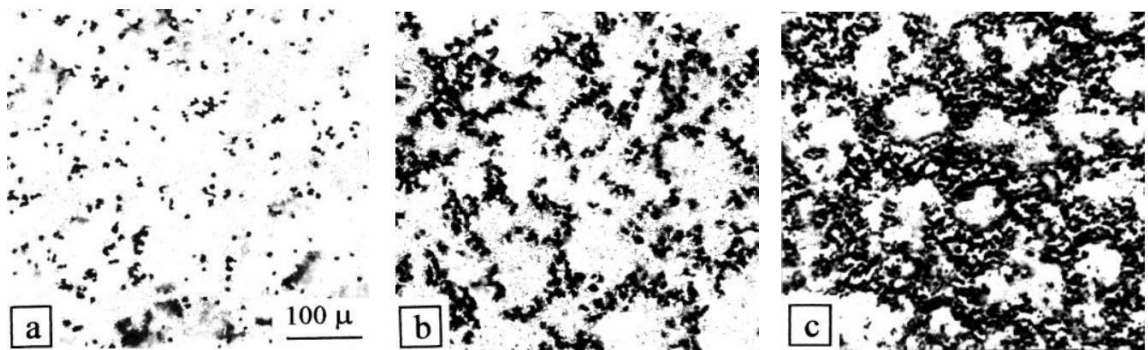


Рис. 4 Структура сегрегованого розподілу в композиті ПВХ-Ni, за даними оптичної мікроскопії. На трьох рисунках різний вміст наповнювача: (a) $c_{Ni} < c_c$, (b) $c_{Ni} \approx c_c$, (c) $c_{Ni} > c_c$. Дані взяті з роботи [12].

Важливою характеристикою вказаних систем є об'ємна концентрація наповнювача (нікелю) c_{Ni} . З (рис. 2) видно, що при досяганні певного значення c_c – так званого порогу перколяції – провідності композитів зростають у концентраційному інтервалу шириною приблизно 0.02 на 19 порядків. Значення порогу перколяції у сегрегованого розподілу є нижчим.

1.1. Метод досліджування ефективної електричної провідності

Для опису ефективної електричної провідності σ наведених систем використовується метод компактних груп (МКГ) неоднорідностей [6-9]. Провідність σ описує відгук гетерогенної системи на квазістаціонарне поле $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ і визначається коефіцієнт пропорційності у співвідношенні [14]:

$$\langle \mathbf{J}(\mathbf{r}) \rangle = \langle \sigma(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle = \sigma \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle, \quad (1)$$

де $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ і $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ – локальні значення напруженості поля і електричного струму, кутові дужки означають статистичне усереднення або усереднення за об'ємом, набагато більшими за розміри неоднорідностей, $\sigma(\mathbf{r})$ – локальне значення електричної провідності в системі.

Компактною групою (Рис. 5) [7-10] називають будь-яку макроскопічну частину системи, всередині якої відстані між неоднорідностями набагато менша ніж довжина хвилі в середовищі.

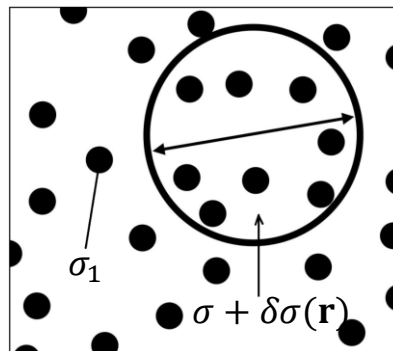


Рис. 5 Виділена біла область з чорними частинками – макроскопічна область гетерогенного середовища з розмірами набагато меншими за довжину хвилі в середовищі (компактна група).

Компактні групи утворюють відхилення місцевого значення електричної провідності від значення σ : $\sigma(\mathbf{r}) = \sigma + \delta\sigma(\mathbf{r})$. Ці відхилення моделюються за допомогою характеристичних функцій компонентів

$$\delta\sigma(\mathbf{r}) = (\sigma_0 - \sigma)\Pi_0(\mathbf{r}, \Omega_0) + \sum_{a=1}^N (\sigma_1 - \sigma)\Pi_1(\mathbf{r}, \Omega_a) + \sum_{b=2}^{N'} (\sigma_2 - \sigma)\Pi_2(\mathbf{r}, \Omega'_a),$$

де $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ – електрична провідність матриці, ядер та оболонок; $\Pi_i(\mathbf{r}, \Omega)$ – характеристична функція області Ω :

$$\Pi_i(\mathbf{r}, \Omega) = \begin{cases} 1, & \mathbf{r} \in \Omega \\ 0, & \mathbf{r} \notin \Omega \end{cases}$$

Підраховуючи моменти відхилень $\langle [\delta\sigma(\mathbf{r})]^s \rangle$, підставляючи знайдені моменти у вирази для середніх значень напруженості і струму, виконуючи підсумовування відповідних рядів, з формули (1) для ефективної провідності можна отримати рівняння:

$$(1 - \varphi) \frac{\sigma_0 - \sigma}{2\sigma + \sigma_0} + c \frac{\sigma_1 - \sigma}{2\sigma + \sigma_1} + (\varphi - c) \frac{\sigma_2 - \sigma}{2\sigma + \sigma_2} = 0, \quad (2)$$

де c – об'ємна концентрація ядер, φ – об'ємна концентрація ядер разом з оболонками. Рівняння (2) є основним для подальшого моделювання провідності полімерних композитів. Розглянені композити розрізняються змістом, поняттям ядер, оболонок і матриц. Які повинні відображати різні типи розподілів частинок наповнювача.

1.2. Електрична провідність композитів з хаотичним розподілом частинок наповнювача

Розглянемо модель для хаотичного розподілу частинок в рамках МКГ [7-10]. Модель така: в якості твердого ядра з провідністю σ_1 і діаметром d виступає диспергована частинка наповнювача, проникна оболонка з провідністю σ_2 і відносною товщиною δ враховує міжфазні явища та механізми на поверхні розділу частинка-матриця, вкраплені в полімер з провідністю σ_0 див. (рис.6).

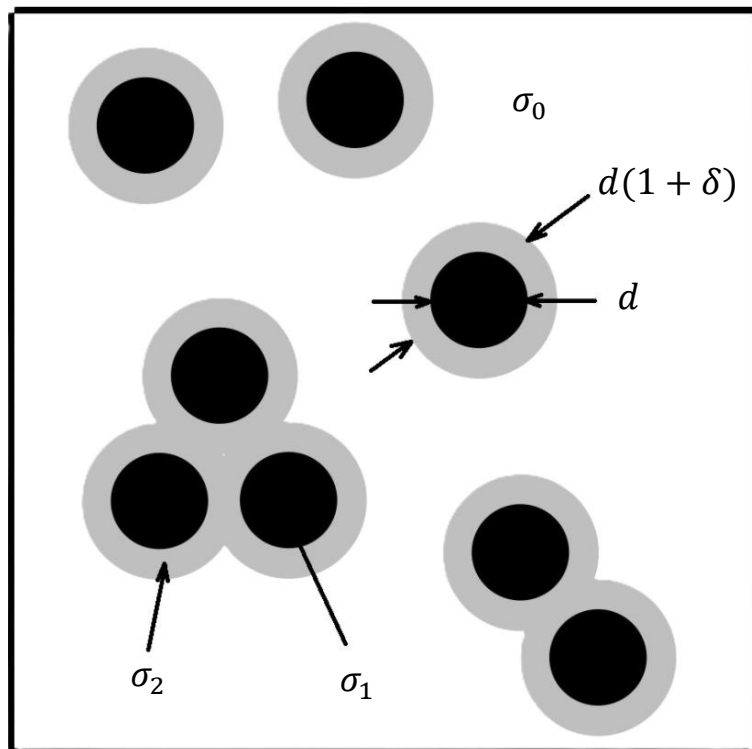


Рис. 6. Чорна область – ядро диспергуючої частинки, сіра область – оболонка, біла область – матриця полімеру. Провідності позначені відповідно.

Модель використовує аналіз рівняння (2) взятий з МКГ [7-10] у відносних провідностях $x = \frac{\sigma}{\sigma_1}$, $x_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1}$, $1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_1}$, $x_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$:

$$(1 - \varphi) \frac{x_0 - x}{2x + x_0} + c \frac{1 - x}{2x + 1} + (\varphi - c) \frac{x_2 - x}{2x + x_2} = 0, \quad (3)$$

Для об'ємної концентрації φ , яка залежить від товщини шару δ і об'ємної концентрації c_{Ni} частинок нікелю, використовується вираз [15] отриманий в рамках статистичної фізики:

$$\begin{aligned} \varphi(c_{Ni}, \delta) = & 1 - (1 - c_{Ni}) \exp \left[-\frac{(1 - \psi)\varphi_t}{1 - c_{Ni}} \right] \times \\ & \times \exp \left[-\frac{3c\varphi_t}{2(1 - c_{Ni})^3} (2 - 3\psi^{\frac{1}{3}} + \psi - c_{Ni}(3\psi^{\frac{1}{3}} - 6\psi^{\frac{2}{3}} + 3\psi)) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де $\psi = (1 + \delta)^{-3}$, $\varphi_t = c_{Ni}/\psi$.

Щоб описати такий композит, можна виділити три режими поведінки провідності такого композиту:

1. Доперкаляційна поведінка: коли у системі об'ємна концентрація частинок нікелю менше, ніж значення порогу перколяції ($c_{Ni} < c_c$). У цьому випадку у рівнянні (3) в другому і третьому доданках вважаємо $\sigma_1 \gg \sigma_{ef}$, $\sigma_2 \gg \sigma_{ef}$. Тоді отримаємо лінійне рівняння для x , звідки знаходимо:

$$x = \frac{x_0}{1 - 3\varphi(c_{Ni}, \delta)}, \quad (5)$$

2. Окіл порогу перколяції ($c_{Ni} \approx c_c$), коли у системі відбувається різке зростання провідності. У цьому випадку у рівнянні (3) в другому доданку вважаємо $\sigma_1 \gg \sigma_{ef}$. Звідки дістаємо квадратне рівняння, розв'язок якого має вигляд:

$$x = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{3} - c_{Ni}\right)} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} + c_{Ni} \right) x_0 + \left(\frac{1}{3} - \varphi(c_{Ni}, \delta) \right) (x_0 - x_2) + \right.$$

$$+ \sqrt{\frac{8}{3} \left(\frac{1}{3} - c_{Ni} \right) x_0 x_2 + \left(\left(\frac{1}{3} + c_{Ni} \right) x_0 + \left(\frac{1}{3} - \varphi(c_{Ni}, \delta) \right) (x_0 - x_2) \right)^2}, \quad (6)$$

3. Післяперколяційна поведінка ($c_{Ni} > c_c$), коли провідність виходить на насичення. У порівняння з іншими провідностями можна вважати, що $\sigma_0 \rightarrow 0$, в результаті чого рівняння (5) дає розв'язок:

$$x = \frac{3}{4} \left\{ \left(c_{Ni} - \frac{1}{3} \right) + \left(\varphi - \frac{1}{3} - c_{Ni} \right) x_2 + \sqrt{\frac{4}{3} \left(\varphi - \frac{1}{3} \right) x_2 + \left[\left(c_{Ni} - \frac{1}{3} \right) + \left(\varphi - \frac{1}{3} - c \right) x_2 \right]^2} \right\}, \quad (7)$$

1.3. Електрична провідність композитів із сегрегованим розподілом частинок наповнювача

Щоб змодельовати сегрегований розподіл, розглянемо зображення композиту ПВХ-Ni, отримані методом оптичної мікроскопії (рис. 4). Вони підтверджують висновок роботи [11], що тепер центрами утворення його мікроструктури виступають полімерні глобули. У формулі (2) ці глобули повинні розглядатися як ядра з провідністю σ_0 , у якості оболонок виступають прилеглі шари полімеру, заповнені металевими частинками. Провідність оболонок позначимо σ_2 , вона є невідомою величиною. Частинки з такою морфологією дисперговані в полімерній матриці (див. рис. 7).

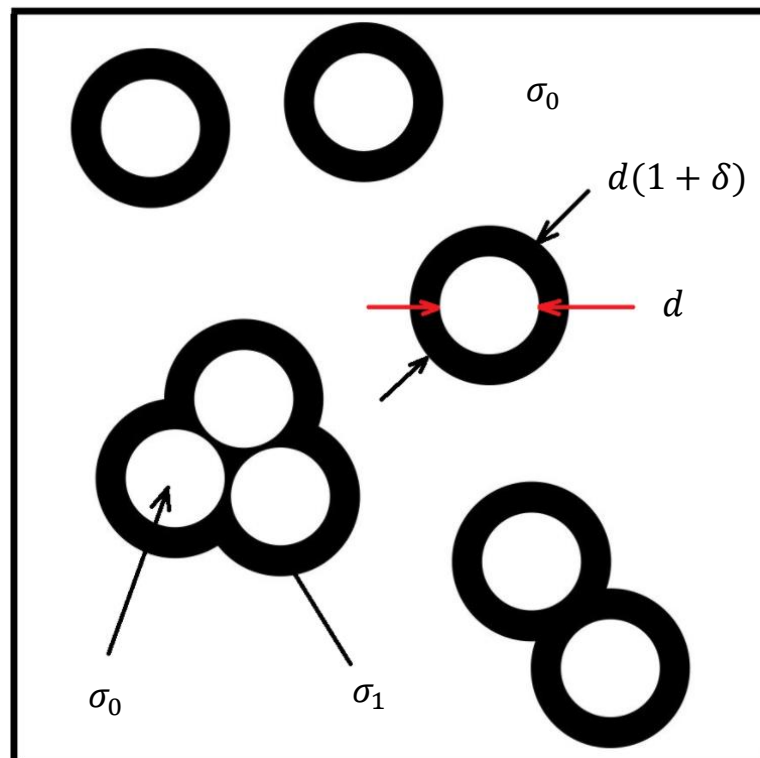


Рис. 7 Модель структури для сегрегованого розподілу. Біла область полімерні ядра, чорна область – проникна оболонка, яка містить полімер і металічні частинки. Такі частинки разом з оболонками вкраплені в полімерну матрицю.

Така модель ще є не повністю доозначеною, оскільки з експерименту нам невідомі ані розмір ядер d і їх концентрація, ані товщина оболонок δ , ані концентрація частинок, які належать оболонці. У зв'язку з цим, щоб замкнути модель, треба зробити певні додаткові припущення. В даній роботі таких припущень два.

1. Розглядаємо частинку разом з оболонкою як однорідну частинку з деякою ефективною провідністю σ_x . Значення цієї провідності можна обчислити в рамках підходу Максвелла для обчислення ефективної провідності частинки з провідністю σ_0 у середовищі з провідністю σ_2 (рис. 8). Така провідність дається формулою Максвелла-Гарнетта [6] і у відносних величинах ($x' = \frac{\sigma_x}{\sigma_1}$) має вигляд:

$$x' = x_2 \left(\frac{2(x_0 - x_2) + (x_0 + 2x_2)(1 + \delta)^3}{x_2 - x_0 + (x_0 + 2x_2)(1 + \delta)^3} \right), \quad (8)$$

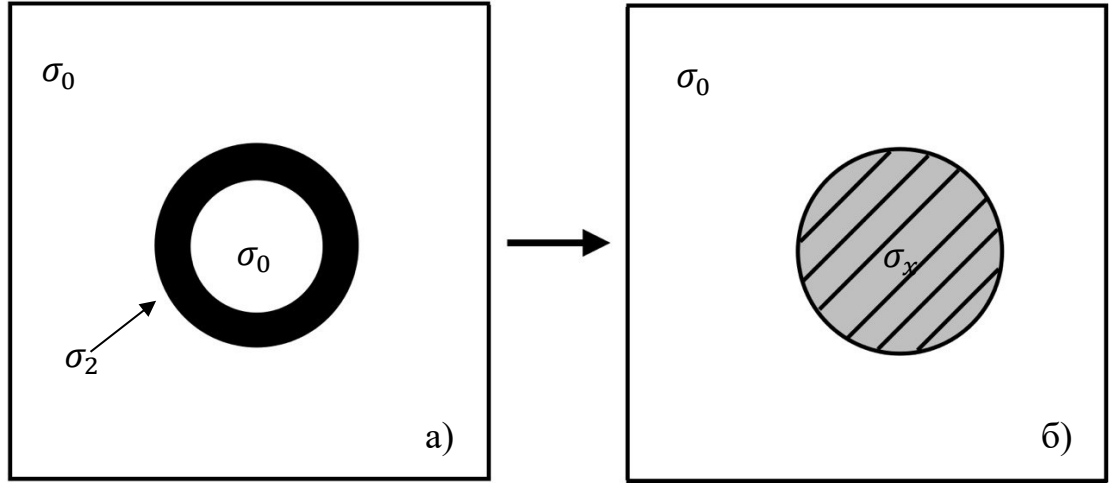


Рис. 8. а) Вихідна 3-и фазна система з диспергованими частинками типу ядро-оболонка. б) Ефективна 2-а фазна система з диспергованими однорідними частинками.

У результаті такого підходу вихідна система може розглядатися як система однорідних частинок з провідністю σ_x і об'ємною концентрацією φ . Тобто замість 3-х фазної системи, маємо ефективну 2-х фазну систему її ефективна провідність визначається з рівняння:

$$(1 - \varphi) \frac{x_0 - x}{2x + x_0} + \varphi \frac{x' - x}{2x + x'} = 0, \quad (9)$$

2. Уводимо в теорію додаткову залежність між об'ємними концентраціями і провідностями компонентів ефективної частинки. Для цього користуємося середньозваженим співвідношенням між ними у вигляді

$$\varphi \sigma_x = \sigma_1 c_{Ni} + (\varphi - c_{Ni}) \sigma_0, \quad (10)$$

Нагадаємо, що тут φ і σ_x – об'ємна концентрація і провідність ефективних частинок, c_{Ni} і σ_1 – об'ємна концентрація і провідність нікелевих частинок,

$(\varphi - c_{Ni})$ і σ_0 – об’ємна концентрація і провідність полімеру в ефективних частинках. Формула (10) дозволяє виключити невідому об’ємну концентрацію таких ефективних частинок і виразити їх через об’ємну концентрацію нікелевих частинок за формулою

$$\varphi = c_{Ni} \frac{x_1 - x_0}{x' - x_0}, \quad (11)$$

Рівняннями (8), (9) і (11) визначається замкнена модель для провідності системи з сегрегованим розподілом частинок. Параметрами моделі виступають: відносна товщина оболонки δ , відносна провідність оболонки x_2 , відносна провідність нікелевих частинок в системі x_1 і концентрація нікелевих частинок c_{Ni} .

Загальний розв’язок рівняння (9) відносно x має два корені, з яких нетривіальним фізичним є:

$$x = \frac{1}{4} (2x_0 - x' - 3x_0\varphi + 3x'\varphi + \sqrt{8x_0x' + (2x_0 - x' - 3x_0\varphi + 3x'\varphi)^2}), \quad (12)$$

Формула (12) набуває достатньо простого вигляду у випадку доперколяційного режиму, коли відносна провідність частинки x' набагато більша за відносну ефективну провідність x ($x' \gg x$). Тоді дістаємо:

$$x = -\frac{x_0}{3\varphi - 1}. \quad (13)$$

2. ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ДО РЕАЛЬНИХ СИСТЕМ

2.1. Композити з хаотичним розподілом ЕС-Ni

Для аналізу придатності розвинутих моделей використовувались експериментальні дані [11] для композитів ЕС-Ni (хаотичний розподіл частинок наповнювача) і ПВХ-Ni (сегрегований розподіл, див. наступний підрозділ).

Аналіз провідності композитів ЕС-Ni виконувався за допомогою формул (3)-(7) (див. рис. 9). Залежності ефективної провідності композиту від об'ємної концентрації нікелевих частинок c_{Ni} будувались для трьох граничних віток (5), (6) і (7), які описують провідність до порогу перколяції, в околі порогу перколяції і після порогу перколяції. Для обробки даних бралось значення провідності епоксидної смоли $\sigma_0 = 1.6 \cdot 10^{-13}$ См/м. Значення товщини δ визначалося по положенню порогу перколяції. Найкраще узгодження з експериментальними даними досягалося при $c_c = 0.08$, що відповідає відносній товщині міжфазної оболонки $\delta = 0.57$ мкм. Усі три вітки (5), (6) і (7) плавно переходять одна в одну при значеннях провідності нікелевих частинок $\sigma_1 = 8.7 \cdot 10^4$ См/м і провідності оболонки $\sigma_2 = 2.04 \cdot 10^3$ См/м.

Як і слід було очікувати провідність нікелевих частинок значно перевищує провідність міжфазних оболонок. В той самий час провідність нікелевих частинок в композиті виявляється нижчою на один порядок від табличного значення для провідності чистого нікелю. Це пояснюється тим, що ці частинки нікелю не є ідеально сферичною і гладкою (див. також рис. 1), а тому частина міжконтактного простору між частинками нікелю заповнена полімером.

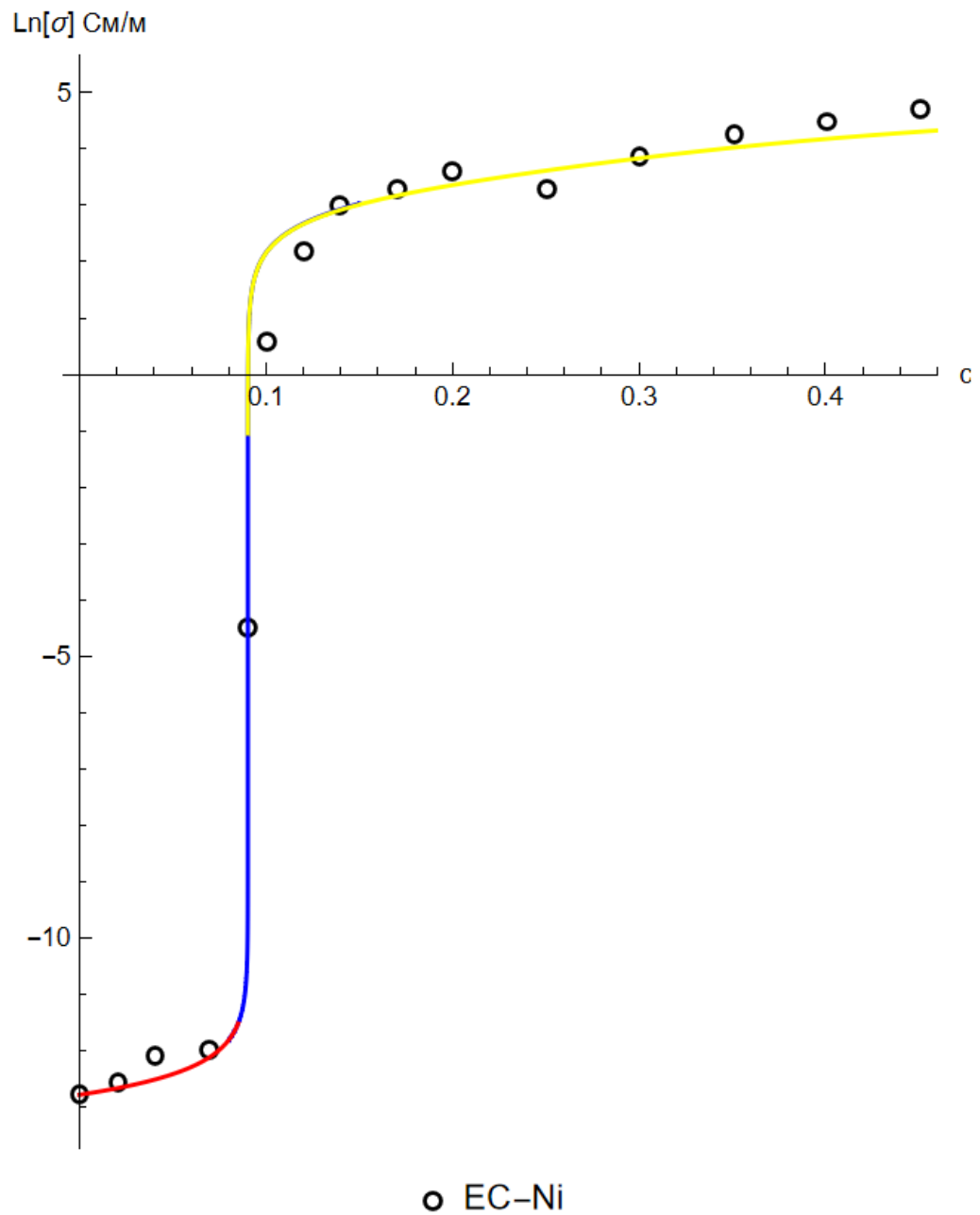


Рис. 9 Залежність логарифму ефективної провідності композиту EC-Ni від об'ємної концентрації частинок нікелю. Кругечки – експериментальні дані [11]. Червона лінія – теоретичні залежність за формулою (5), синя лінія – за формулою (6), жовта лінія – за формулою (7).

2.2. Композити із сегрегованим розподілом ПВХ-Ni

Результати аналізу ефективної провідності композитів ПВХ-Ni виконувався за допомогою формул (8), (11)-(13) представлено на (рис. 10). Як і раніше значення провідності полівінілхлорид $\sigma_0 = 3.26 \cdot 10^{-14}$ См/м. Згідно з повідомлення роботи [11] розмір полімерних глобул складав приблизно - 100 мкм, товщина частинок нікелю - 10 мкм. Припускаючи, що товщина оболонки має порядок товщини одного шару частинок нікелю, для відносної товщини оболонки бралось значення $\delta = 0.20$ мкм. Виявилось, що низконцентраційна і висококонцентраційні вітки теоретичної залежності провідності плавно переходять одна в одну і вказують на значення порогу перколяції $c_c = 0.06$ при значеннях провідності нікелевих частинок $\sigma_1 = 8.7 \cdot 10^4$ См/м та провідності оболонок $\sigma_2 = 4.6 \cdot 10^5$ См/м. Останнє значення видається розумним (оскільки оболонки значною мірою утворені нікелевими частинками) і узгоджується з результатом для провідності міжфазних оболонок у випадку хаотичного розподілу наповнювача, де природа оболонок інша. Зазначимо також, що характер поведінки теоретичних кривих дуже чутлива до вибору відносної товщини δ і провідностей σ_1 та σ_2 .

Результати, отримані в підрозділах 2.1. і 2.2. вказують, що розвинені моделі добре описують експериментальні дані для відповідних систем, а тому можуть скласти основу для подальших досліджень.

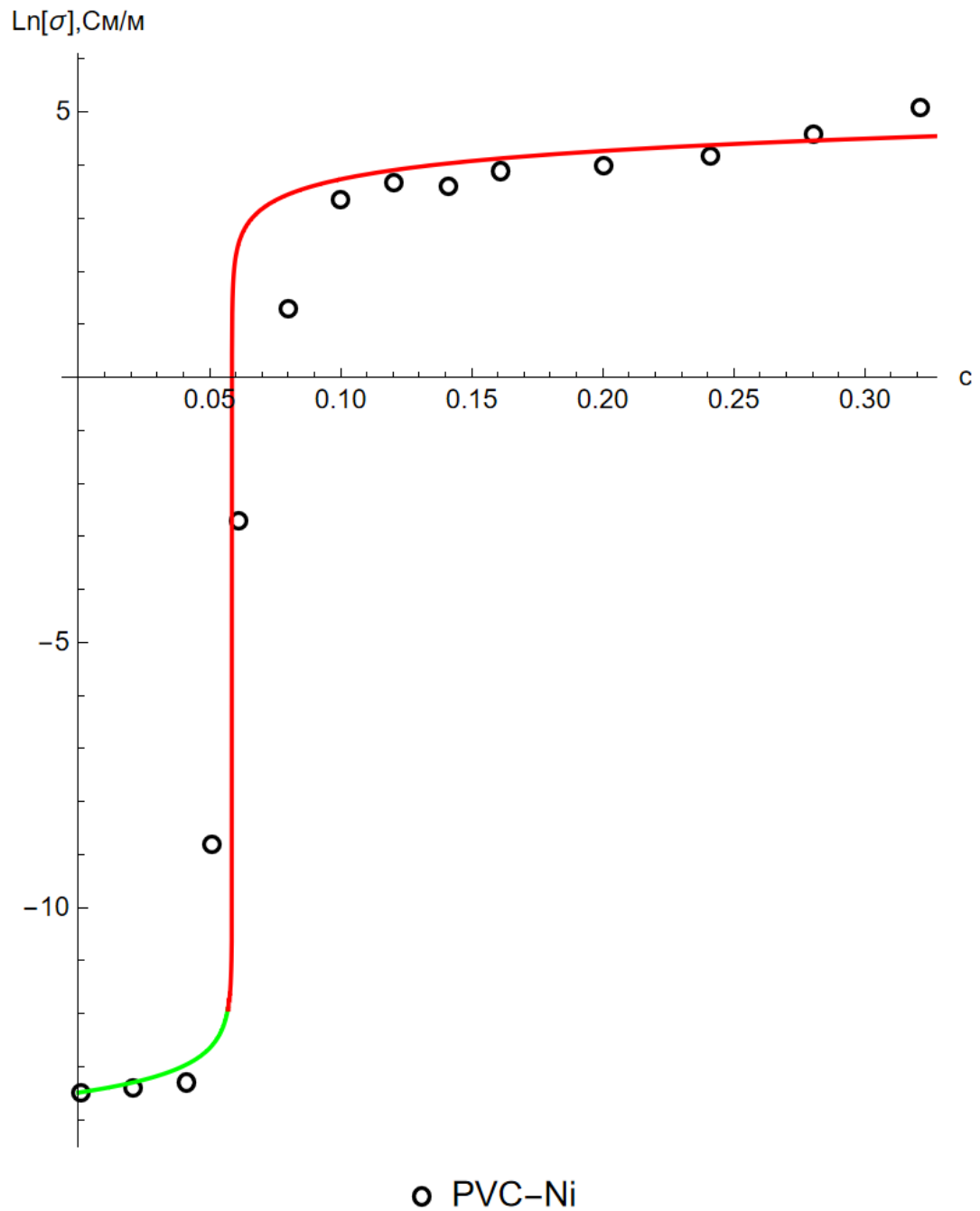


Рис. 10 Залежність логарифму ефективної провідності композиту ПВХ-*Ni* від об'ємної концентрації частинок нікелю. Кругечки – експериментальні дані [11]. Зелена лінія – теоретичні залежність за формулою (11) і (13), червона лінія – за формулою (8), (11) і (12).

ВИСНОВКИ

1. Ефективну електричну провідність σ полімерних композитів з диспергованими металевими частинками можна успішно описувати в рамках моделі дисперсної системи частинок з морфологією тверде ядро - проникна оболонка. Ця оболонка може бути асоційована з міжфазним шаром, який формується в системі і природа якого залежить від типу системи, зокрема, характеру розподілу частинок наповнювача.

2. Загальний вираз для квазістатичної σ , отриманий раніше [9] в рамках методу компактних груп для дисперсної системи із вказаною морфологією і частинками наповнювача як центрами її формування, дозволяє кількісно описати перколяційну поведінку σ реальних полімерних композитів ЕС-Ni на всьому концентраційному інтервалі. Значення порогу перколяції визначається товщиною перехідного міжфазного шару.

3. У випадку композитів із сегрегованим розподілом частинок наповнювача центрами формування мікроструктури виступають полімерні глобули, навколо яких формуються вископровідні оболонки, які містять полімерні включення разом з металічними частинками. Електричні властивості композиту визначається перколяцією в системі таких оболонок.

4. Електричну перколяцію в композитах ПВХ-Ni можна кількісно описати, розглядаючи непровідні глобули з провідними оболонками як ефективні однорідні частинки з певною провідністю, у яких об'ємні концентрації і провідності є середньозваженими.

5. Теоретичні результати для композитів з обома типами розподілів частинок наповнювача узгоджується з експериментальними даними.

Підпис автора



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Swapan K. Bhattacharya / Metal Filled Polymers properties and applications // New York and Basel, 1986.
2. Delmonte J. / Metal-polymer composites // Van Nostrand Reinhold NY, USA, 1990.
3. Pike G. E., Seager C. H. / Percolation and conductivity: A computer study I, II // Phys. Rev. B. – Vol. 10 (4). – P. 1421-1446. – 1974.
4. Callaway D., Newman M./ Strogatz S., Watts D. / Network Robustness and Fragility: Percolation on Random Graphs // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V.85. – P. 5468-5471.
5. Strauffer D., Aharony A. / Introduction to percolation theory 2 ed. // Taylor & Francis 2003.
6. Sihvola A. / Electromagnetic mixing formulas and applications // The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom 1999.
7. Sushko M. Ya. / Effective permittivity of mixtures of anisotropic particles // JETP 105, 426 (2007).
8. Sushko M. Ya. and Kris'kiv S.K. / Compact group method in the theory of permittivity of heterogeneous systems // Tech. Phys. 54, 423 (2009).
9. Sushko M. Ya. / A mesoscopic model for the effective electrical conductivity of composite polymetric electrolytes // J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 155410 (2009).
10. Sushko M. Ya. / Effective dielectric response of dispersions of graded particles // Phys. Rev. E 96, 062121 (2017).
11. Mamunya Ye., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. / Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // European Polymer Journal 38 (2002) P. 1887-1897.
12. Mamunya Ye., Iurzhenko M., Lebedev E., Levchenko V., Chervakov O., Matkovska O., Sverdlyakovska O. Electroactive Polymeric Materials. – 2013. Kyiv.

13. Jones J./ Materials World – Vol. 6 No. 10. – P. 610-11 – October 1998.
14. Landau L.D., Lifshitz E.M. / Electrodynamics of continuous media Vol.8
// Pergamon, Oxford 1984.
15. Rottereau M., Gimel J., Nicolai T., Duran. D., / 3D Monte Carlo simulation
of site-bond continuum percolation of spheres // Eur. Phys. J. E, 2003, 11,
61;