

**Я. С. КРИВОРУЧКО**, ст. викладач, Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ;

**Л. Б. ЛЕРМАН**, канд. техн. наук, с.н.с., Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, Київ ;

**Н. Г. ШКОДА**, канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник, Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, Київ

## **БАГАТОКОМПОНЕНТНІ ГЕТЕРОГЕННІ СИСТЕМИ: ЕФЕКТИВНА ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ ТА ПОГЛИНАННЯ**

Розглянуті математичні моделі, які описують ефективну діелектричну проникність багатокомпонентних гетерогенних середовищ. Для розрахунку використовуються узагальнені формули Максвелл-Гарнетта та Ліхтенекера. В першому випадку – чисельні розрахунки виконані для суміші діелектриків з малими втратами в діапазоні НВЧ частот, в другому випадку розглянуто водяні суспензії суміші наночастинок золота, срібла, частинок, що складаються з суміші золота і срібла. Розраховано частотну залежність діелектричної проникності суспензії в оптичному діапазоні. Встановлено, що для таких систем має місце багато екстремальна залежність уявної частини діелектричної проникності.

**Ключові слова:** ефективна діелектрична проникність; гетерогенне середовище, наночастинок, формули Максвелл-Гарнетта.

### **Вступ**

Діелектрична функція (ДФ) гетерогенних систем (ГС) та матрично-дисперсних систем (МДС) вводиться тоді, коли можна розглядати ефективне макроскопічне електричне поле, усереднене за об'ємами, більшими за характерні масштаби неоднорідності й [1–5]. Відносно такого поля ГС може вважатися однорідною, а часто також й ізотропною. Відразу зауважимо, що коректність подібного підходу обмежується великими відносно розмірів включень довжинами хвиль електромагнітного випромінювання (ЕМВ), в так званому електростатичному наближенні.

Для опису діелектричної проникності (ДП) сумішей запропоновано багато моделей, які всі виходять із того, що значення діелектричних проникностей і об'ємних фракцій включень відомі. Наявність поглинаючих складових в ГС приводить до того, що ефективна діелектрична проникність  $\epsilon$  системи в цілому – це комплексна функція дійсного аргументу, яка залежить від частоти прикладеного поля  $\omega$ , тобто  $\epsilon = \epsilon(\omega)$ . Про адекватність теорії судять по здатності пояснювати і передбачати експериментальні дані. Центральне положення серед подібних теорій для ГС з матричною топологією та МДС займають теорії Максвелл-Гарнетта [1-3], Д. Бруггемана [4], К. Ліхтенекера [5]. Порівняльний аналіз різних моделей між собою та з експериментальними даними на прикладі зволжених пористих середовищ виконано в [6]. Теорії Максвелл-Гарнетта і Д. Бруггемана допускають узагальнення на системи, що містять більше, ніж дві фракції [1–3, 7]. Трикомпоненту суміш докладно розглянуто в роботі [7]. Потрібно зауважити, що різні формули для розрахунку ДФ можливо застосовувати лише за певних умов, які покладені в основу одержання кожної з формул. Наприклад, формули Максвелл-Гарнетта можна застосовувати при малих концентрація включень, коли їх взаємодією між собою можна знехтувати, а формули К. Ліхтенекера дають правильний результат для дрібнодисперсних сумішей при близьких концентраціях компонентів, що входять до

© Я. С. КРИВОРУЧКО, Л. Б. ЛЕРМАН, Н. Г. ШКОДА, 2012

ДС [8, 9], але для більшості реальних систем зазначені умови не завжди виконуються [2].

Ця робота продовжує дослідження, результати яких викладені у роботах [3, 6, 11–15]. Так, оптична густина водних суспензій суцільних кульових наночастинок срібла із врахуванням їх розподілу за розмірами була знайдена у [3], і при цьому досягнуто добре узгодження з експериментом. Для двокомпонентної суміші води і двох типів ґрунтів (піску та суглинку) деякі результати наведено в [6]. В роботах [11, 12] розраховано ефективну ДП для МДС з напівпровідниковими кульовими включеннями та кульовими включеннями з напівпровідниковою оболонкою, а в [13-15] були розглянуті МДС з біметалевими кульовими частинками із срібним ядром та золотою оболонкою, або навпаки. Встановлено, що для суцільних частинок спостерігається один максимум у спектральних залежностях уявної частини ДП і поглинання.

В цій роботі розглядаються багатокомпонентні ДС на основі діелектричних включень з малими втратами в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) та водяні суспензії наночастинок благородних металів в оптичному діапазоні. Наводиться графічно-табличний матеріал, який ілюструє виконані розрахунки та обговорюються отримані результати.

### Основні розрахункові співвідношення

Узагальнене рівняння Максвелл-Гарнетта для суміші декількох компонентів має вигляд [1, 2]:

$$\frac{\epsilon_0 - \epsilon_m}{\epsilon_0 + 2\epsilon_m} = \sum_{i=1}^n f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m}. \quad (1)$$

де  $\epsilon_m$  діелектрична проникність оточуючого середовища (матриці),  $\epsilon_i$  – діелектрична проникність включень,  $f_i$  – об’ємна частка  $i$ -ї фракції.

Для проведення практичних розрахунків це рівняння зручно розв’язати відносно  $\epsilon_0$ :

$$\epsilon_0 = \epsilon_m \frac{1 + 2 \sum_{i=1}^n f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m}}{1 - \sum_{i=1}^n f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m}}. \quad (2)$$

Введемо в формули (1) та (2) поляризованості  $\alpha_i$  у явному вигляді. Для суцільної кулі [1, 2]

$$\alpha_i = 4\pi r_i^3 \epsilon_m \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m}, \quad (3)$$

де  $r_i$  – радіус частинки. Тоді із врахуванням (3) замість (2) отримуємо формулу

$$\epsilon_0 = \epsilon_m \frac{1 + 2 \sum_{i=1}^n \frac{f_i \alpha_i}{4\pi r_i^3 \epsilon_m}}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{f_i \alpha_i}{4\pi r_i^3 \epsilon_m}}. \quad (4)$$

У такому вигляді формулу (4) можна використовувати і для неоднорідних частинок, якщо відома їх поляризованість. Зокрема, вираз для поляризованості кулі в оболонці має вигляд [1]

$$\alpha_i = 4\pi r_{2i}^3 \frac{(\epsilon_{2i} - \epsilon_m)(\epsilon_{1i} + 2\epsilon_m) + (\epsilon_{1i} - \epsilon_{2i})(\epsilon_m + 2\epsilon_{2i})v_i}{(\epsilon_{2i} + 2\epsilon_m)(\epsilon_{1i} + 2\epsilon_{2i}) + 2(\epsilon_{2i} - \epsilon_m)(\epsilon_{1i} - \epsilon_{2i})v_i}, \quad (5)$$

де  $v_i = r_{1i}^3 / r_{2i}^3$  – об’ємна доля ядра у  $i$ -ої частинки, а  $r_{1i}$ ,  $r_{2i}$  – її внутрішній і зовнішній радіуси відповідно.

Для опису ГС із статистичною топологією характерним є застосування симетричних теорій ефективного середовища [2]. Якщо вважати, що кожна частинка ГС знаходиться в оточуючому середовищі з ефективною діелектричною проникністю  $\epsilon_0$ , то розрахунок

ефективної діелектричної проникності багатофазної системи можна проводити за формулою

$$\sum_{i=1}^n f_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_0} = 0. \quad (6)$$

Формула (6) – це узагальнена формула Бруггемана [2]. Для неї обмежень на об’ємну частку включень не виникає. Але на відміну від формули Максвелл-Гарнетта визначення  $\varepsilon_0$  у явному вигляді приводить до полінома  $n$ -го ступеня в загальному випадку з комплексними коефіцієнтами, розв’язок якого для  $n > 2$  можливо отримати тільки чисельно.

Поглинання  $\kappa$  в МДС визначається уявною частиною ефективної ДП

$$\kappa = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon_0}, \quad (7)$$

де  $\omega$  – частота,  $c$  – швидкість світла,  $\lambda$  – довжина хвилі. Зауважимо, що МДС вважаються нескінченими, тому формула (7) визначає поглинання на одиницю довжини. З наведених вище співвідношень випливає, що для багатокомпонентної суміші функція  $\operatorname{Im} \varepsilon$  і, відповідно, поглинання  $\kappa$  буде мати декілька екстремумів. Якщо врахувати функції розподілу частинок окремих фракцій за розмірами, то відповідні спектри поглинання будуть «розмиватися».

### Ефективна діелектрична проникність МДС, у яких матеріал включень є діелектриком з малими втратами

Розглянемо багатокомпонентні ДС у випадку, коли матеріали включень є діелектриками з малими втратами, якими при розрахунках можна знехтувати, і визначимо ефективну ДП у діапазоні НВЧ. У цьому діапазоні ДП включень в матриці майже не залежить від частоти, і, наприклад у сантиметровому діапазоні при довжинах хвиль від 2 до 10 см їх можна вважати сталими.

В роботі досліджувалось пористе середовище, яке складалося з ґрунту і включень води та повітря. Розглядалися два види ґрунтів: піщаний та суглинистий. При розрахунках прийнято для піщаного ґрунту діелектрична проникність  $\varepsilon_m = 4$ , суглинистого –  $\varepsilon_m = 6$ , води –  $\varepsilon_1 = 80$ , повітря –  $\varepsilon_2 = 1$ , а діелектричні втрати не враховувались. Для об’ємної частки повітря  $f_2$  були прийняті значення 0,05; 0,1; 0,15.

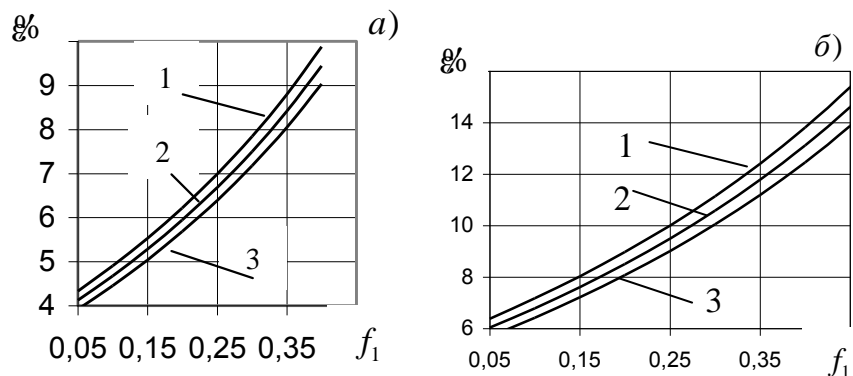


Рис.1 – Залежність ефективної діелектричної проникності  $\varepsilon_0$  від об’ємної частки води  $f_1$  для трикомпонентної суміші при різному вмісту повітря  $f_2$ : 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; (а)  $\varepsilon_m = 4$ , (б)  $\varepsilon_m = 6$

Для визначення ефективної ДП проникності використовувалась формула Максвелл-Гарнетта у вигляді (2). Деякі результати розрахунків наведено на рис.1 а для піщаного і на рис.1 б для суглинистого ґрунту. З наведених графіків видно, що залежність ефективної ДП від вмісту води має подібний характер для різних значень  $\varepsilon_m$ , і згідно з рівнянням (2) для суглинистого ґрунту значення ефективної ДП більше, ніж для

піщаного ґрунту. Разом з тим збільшення об'ємної частки води до  $f_1 = 0,4$  для суглинистого ґрунту більше ніж на 40% по відношенню до піщаного ґрунту, в той час як відношення ДП різних типів ґрунтів складає  $6/4 = 1,5$ , тобто пропорційність ефективної ДП  $\epsilon_m$  порушується. Як і очікувалось, при збільшенні об'ємної частки повітря зменшується значення  $\epsilon$  пористого середовища. Так, при  $f_1 = 0,4$  ефективна ДП зменшується на 11% при збільшенні об'ємної частки повітря з 0,05 до 0,15. Розрахунки показали, що аналогічні результати мають місце і для інших типів діелектричних матеріалів.

### **Ефективна діелектрична проникність водяних суспензій благородних металів**

Розглядаються системи, які складаються з включень різного сорту. Вважається, що кульові наночастинки можуть бути золотими, срібними, або змішаними, коли атоми золота і срібла розподілені випадковим чином. До інших типів включень відносяться кульові частинки з оболонкою.

Слід відмітити, що благородні метали (золото, срібло, платина і ще мідь) мають унікальні оптичні властивості [1, 16], і тому їх використовують в багатьох сучасних нанотехнологіях. Оскільки частоти поверхневих плазмонів золота і срібла істотно відрізняються, то комбінуючи об'ємний вміст металів, можна впливати на максимуми коефіцієнтів відбиття та поглинання таких систем. Зауважимо, що при цьому можна очікувати появи додаткових екстремумів у спектрах поглинання, але їх кількість і абсолютні значення можна визначити тільки чисельно.

Для опису частотно-залежних діелектричних функцій металів в модельних розрахунках прийнята модель Друде [1]

$$\epsilon = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_p)}, \quad (8)$$

де  $\epsilon_\infty$  - діелектрична проникність при  $\omega \rightarrow \infty$ ,  $\omega_p$  - плазмонна частота та  $\gamma_p$  - частота поглинання масивного металу. Ця модель добре описує ДП алюмінію, але для золота і срібла узгодження погіршується [1].

Із загальної теорії електродинаміки випливає, що для будь-яких матеріалів повинно бути  $\epsilon_\infty = 1$ . Для золота і срібла це не так, і заради більш-менш доброго узгодження з експериментальними даними значення цього параметра змінюється. В розрахунках згідно з [1, 15] у формулі (8) прийнято: для срібла  $\epsilon_\infty = 4,5$ ,  $\omega_p = 1,46 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 0,24 \times 10^{14} \text{ п}^{-1}$ , для золота -  $\epsilon_\infty = 10,0$ ,  $\omega_p = 1,37 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 0,34 \times 10^{14} \text{ п}^{-1}$ . Для отримання більш точних результатів доцільно використовувати експериментальні залежності ДП золота і срібла, отримані для масивних зразків матеріалів [15], а для малих частинок  $r < 20 \text{ нм}$  врахувати розмірну поправку, як це, наприклад, зроблено в [3].

Для визначення діелектричної проникності змішаної частинки зручно використовувати симетричну формулу К. Ліхтенекера [5], яка має вигляд

$$\epsilon^k = f_1 \epsilon_1^k + f_2 \epsilon_2^k, \quad (9)$$

де  $\epsilon_1, \epsilon_2$  - діелектричні проникності золота і срібла відповідно,  $f_1, f_2$  - об'ємні доли металів у частинці, а показник  $k$  знаходиться в інтервалі  $-1 \leq k \leq 1$  [2].

Наведемо деякі результати виконаних розрахунків, які представлені на рис. 2–11. Було розглянуто водні суспензії чисто золотих, чисто срібних і змішаних наночастинок (однокомпонентні суміші); суспензії, до складу яких входили і золоті, і срібні наночастинки (двокомпонентні суміші); а також трикомпонентна суміш з золотих, срібних і змішаних наночастинок. Об'ємні доли вважалися однаковими і рівними 0,05. При розрахунках визначались залежність ефективної ДП від довжини хвилі світла і спектри поглинання. Додатково у формулі (9) для простоти прийнято, що  $k = 1$ , а

$f_1 = f_2 = 0,5$ . Для води у оптичному діапазоні прийнято  $\epsilon_m = 1,77$ , без врахування втрат.

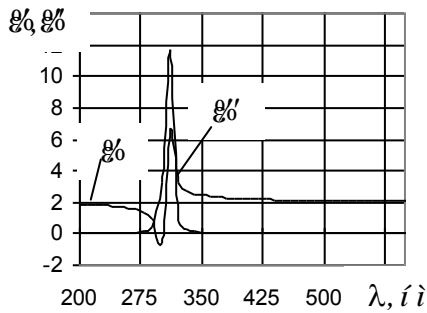


Рис.2 – Діелектрична функція суспензії золотих наночастинок

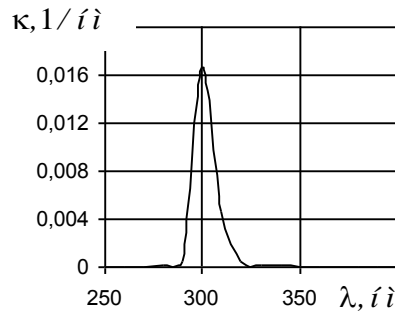


Рис.3 – Поглинання суспензії золотих наночастинок

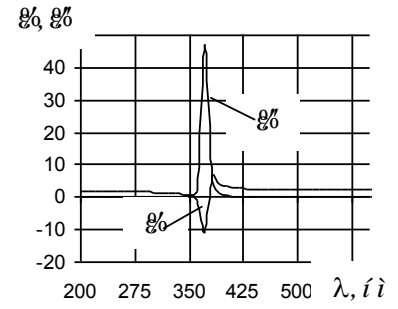


Рис.4 – Діелектрична функція суспензії срібних наночастинок

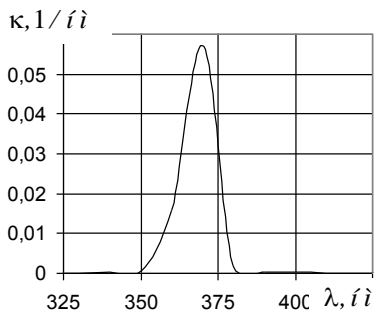


Рис.5 – Поглинання суспензії срібних наночастинок

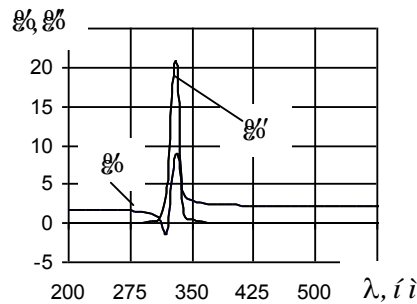


Рис.6 – Діелектрична функція суспензії наночастинок із суміші золота і срібла

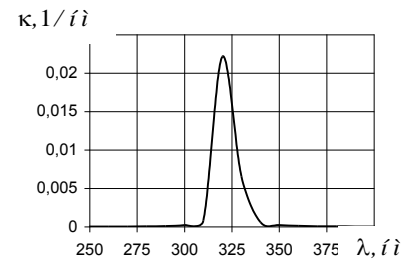


Рис.7 – Поглинання суспензії наночастинок із суміші золота і срібла

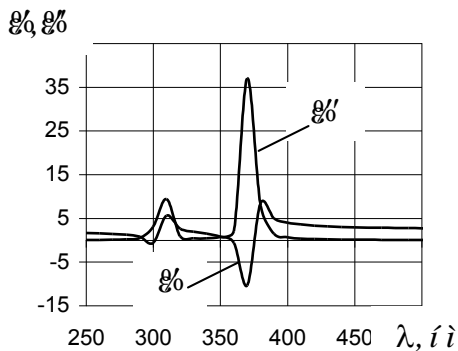


Рис.8 – Діелектрична функція суспензії двокомпонентної суміші наночастинок золота і срібла

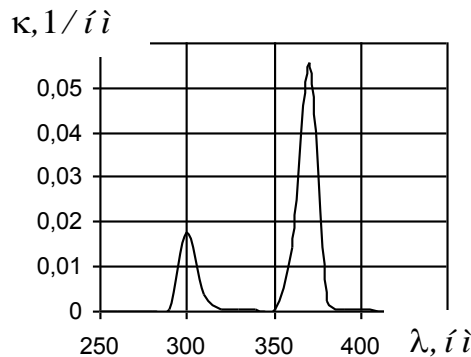


Рис.9 – Поглинання в суспензії двокомпонентної суміші наночастинок золота і срібла

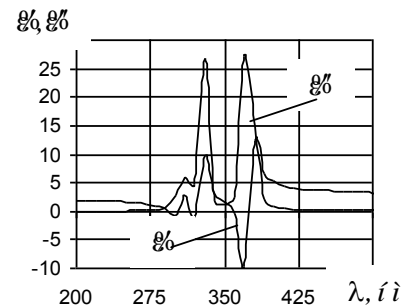


Рис.10 – Діелектрична функція суспензії трикомпонентної суміші наночастинок золота, срібла і мішаних частинок

З наведених результатів можна зробити деякі узагальнення. Згідно з формулою (7) максимуми поглинання відповідають максимумам уявної частини ефективної ДП суспензій і досягаються при однакових довжинах хвилі. Цей досить тривіальний результат тільки підтверджує правильність виконаних розрахунків. Основний отриманий результат полягає в тому, що кількість екстремумів відповідає кількості фракцій: для включень одного типу спостерігається один максимум, для включень двох типів – два максимуми, а для трьох типів – три.

Для однотипних включень довжина хвилі, яка відповідає максимуму уявної частини  $\epsilon''$ , відповідно, максимуму поглинання, залежить від характеристик матеріалу включень. Для мішаної частинки (золото+срібло) ця довжина хвилі  $\lambda_{\text{mix}}$  знаходиться в інтервалі між довжинами хвиль складових. Для обраних значень параметрів має місце нерівність  $300 \leq \lambda_{\text{mix}} \leq 370$  (довжини хвиль у нм), і, зокрема для  $k=1$ ,  $f_1 = f_2 = 0,5$  визначено, що  $\lambda_{\text{mix}} = 320 \text{ нм}$ .

Звертає на себе увагу той факт, що для двокомпонентної суміші мінімуми поглинання близькі до нуля, то для трикомпонентної суміші перший мінімум при  $\lambda \approx 310 \text{ нм}$  суттєво відрізняється від нуля. Спектральна залежність дійсної і уявної частин ефективної ДП має досить складний характер, зокрема існують інтервали, у яких  $\epsilon'$  приймає від'ємні значення.

### Висновки

Практично реалізована можливість знаходження ефективної діелектричної проникності гетерогенних систем, які містять більше ніж дві фракції (матриця, вода і повітря). Встановлено вплив наявності води в порах на ефективну діелектричну проникність. Зокрема, отримано чисельні результати залежності ефективної діелектричної проникності для піщаного та суглинистого ґрунтів від об'ємної частки води в порах. Для водяних суспензій благородних металів (золота і срібла) було враховано можливість наявності включень трьох різних сортів. Показано, що максимуми поглинання відповідають плазмонним резонансам матеріалів включень. Кількість екстремумів відповідає кількості фракцій.

**Список літератури:** 1. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами [Текст] / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с. 2. Венгер, Е. Ф. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ [Текст] / Е. Ф. Венгер, А. В. Гончаренко, М. Л. Дмитрук. – К.: Наукова думка, 1999 – 348 с. 3. Гречко, Л. Г. Оптичні властивості малих частинок срібла в колоїдних розчинах [Текст] / Л. Г. Гречко, А. М. Єременко, Г. В. Крилова, Л. Б. Лерман, Н. П. Смірнова, Н. Г. Шкода // Вісник Київського університету. – Сер. фіз.-мат. – 2004. – № 4. – С. 450 – 458. 4. Bruggeman, D.A.J. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterigenen Substanzen. P. II [Text] // Ann. Phys. (Leipzig). – 1935. – V. 24, №. 8. – P. 665–679. 5. Lichtenecker, K. Die Dielectrizitatskonstante naturlicher und Kunstlicher Mischkorper [Text] // Physik Z. – 1926. – V. 27. – P. 115-255. 6. Криворучко, Я. С. Визначення ефективної діелектричної проникності гетерогенних середовищ та оцінка вмісту вологи в ґрунтах [Текст] // Поверхність – 2011. – Вип.3 (8). – С. 22– 28. 7. Jayannavar, A. M. Generalization of Bruggeman's unsymmetrical effective-medium theory to a three-component composite [Text] / A.M. Jayannavar, N. Kumar // Phys. Rev. B. – 1991. – V. 44, № 21. – P. 12014-12015. 8. Wang, J.R. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content [Text] / J.R. Wang, T.J. Schugge // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1980. – V. 18, № 4. – P. 288-295. 9. Головка, Д. Б. Методи та засоби частотно-дисперсійного аналізу речовини та матеріалів: У 2 кн.; Кн.1.Фізичні основи. [Текст] / Д. Б. Головка, Ю. О. Скрипник // К.: ФАДА, ЛТД. – 2000. – 200 с. Федюнин, П. А. Микроволновая термовлагодетрия [Текст] / П. А. Федюнин, Д. А. Дмитриков, А. А. Воробьев, В. Н. Чернышов // М.: Изд-во: Машиностроение. – 2004. – 208 с. 10. Гончарук, Ю. С. Максвелл-Вагнерівська поляризація матричних дисперсних систем з кульовими напівпровідниковими включеннями в електричному полі [Текст] / Ю. С. Гончарук, Л. Г. Гречко, О. Ю. Гришук, Л. Б. Лерман, С. В. Шостак // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. – 2006. – № 2. – С. 376-384. 11. Гречко, Л. Г. Поляризація матричних дисперсних систем з кульовими напівпровідниковими включеннями в електричному полі (чисельні результати) [Текст] / Л. Г. Гречко., Л. Б. Лерман, Ю. С. Гончарук, О. Ю. Гришук, Д. Л. Водоп'янов // Вісник Київського

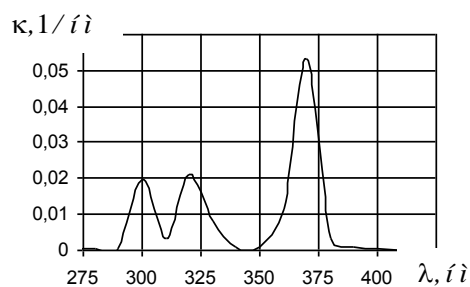


Рис.11 – Поглинання суспензії трикомпонентної суміші наночастинок золота, срібла і мішаних частинок

університету. Сер. фіз.-мат. – 2006. – № 3. – С. 451-456. **12.** Гречко, Л. Г. Поляризованість структурно-неоднорідних кульових частинок [Текст] / Л. Г. Гречко, Л. Б. Лерман, Д. Л. Водоп'янов, С. В. Шостак // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. – 2007. – № 1. – С. 416 – 425. **13.** Гречко, Л. Г. Поглинання електромагнітного випромінювання в матрично-дисперсних системах з багатошаровими кульовими включеннями [Текст] / Л. Г. Гречко, О. Ю. Грищук, Л. Ю. Куницька, Л. Б. Лерман, М. О. Люценко // Металлофізика: новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 789-804. **14.** Гречко, Л. Г. Поглинання електромагнітного випромінювання біметалевими частинками та матрично-дисперсними системами на їх основі [Текст] / Л. Г. Гречко, Л. Б. Лерман, С. Л. Корецький, Я. С. Криворучко, С. В. Шостак // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. – 2008. – № 4. – С. 260 – 264. **15.** Гречко, Л. Г. Розрахунок ефективної діелектричної проникності матричних дисперсних систем з двошаровими кульовими включеннями [Текст] / Л. Г. Гречко, Л. Б. Лерман, Н. Г. Шкода, О. Я. Покопило, С. В. Шостак // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. – 2009. – № 4. – С. 195 – 200. **16.** Jonson, P.V. Optical Constants of the Noble Metals [Text] / P. V. Jonson, R. W. Christy // Phys. Rev. B. – 1972. – V. 6, № 12. – P. 4370 – 4379.

Надійшла до редколегії 20.11.2012

УДК 535.3

**Багатокомпонентні гетерогенні системи: ефективна діелектрична проникність та поглинання / Я. С. Криворучко, Л. Б. Лерман, Н. Г. Шкода // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2012. – № 66 (972). – С. 167--173. – Бібліогр.: 16 назв.**

Рассмотрены математические модели, описывающие эффективную диэлектрическую проницаемость многокомпонентных гетерогенных сред. Для расчета используются обобщенные формулы Максвелл-Гарнетта и Лихтенеккера. В первом случае численные расчеты проведены для смеси диэлектриков с малыми потерями в диапазоне СВЧ частот. В другом случае рассмотрено водные суспензии смеси наночастиц золота, серебра, а также частиц, которые состоят из смеси золота и серебра. Рассчитано частотную зависимость диэлектрической проницаемости суспензии в оптическом диапазоне. Установлено, что для таких систем имеет место многоэкстремальная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости. Из.: 11. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** эффективная диэлектрическая проницаемость; гетерогенные системы; наночастицы; формулы Максвелл-Гарнетта.

The mathematical model describing the effective dielectric constant of heterogeneous environments. For calculations, the Generalized Maxwell-Garnett and Lihtenekker. In the first case, the numerical calculations were carried out for a mixture of low-loss dielectrics in the microwave range of frequencies. In another case, the aqueous suspensions examined mixtures of nanoparticles of gold, silver, and the particles that are composed of a mixture of gold and silver. Calculated frequency dependence of the dielectric constant of the suspension in the optical range. Found that for such systems there is a Multiple-dependence of the imaginary part of permittivity. Im.:11 : Bibliogr.: 16.

**Keywords:** the effective dielectric constant, heterogeneous systems, nanoparticles, formulas Maxwell-Garnett.

УДК 621.374

**А.А. ОЛЕНЮК**, аспирант, Харьковський національний технічний університет сільськогосподарського господарства ім. Петра Василенка, Харків

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ЭМП ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕМЕНА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Проведено теоретичне обґрунтування частоти ЕМП для передпосівної обробки насіння сферическої форми.

**Ключевые слова:** семена; частота ЭМП; передпосевная обработка семян.

### **Введение**

Основным направлением по повышению урожайности культурных растений

© А.А. ОЛЕНЮК, 2012