

УДК 535.3

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 ефективно макроскопічне електричне поле, усереднене за об'ємами, більшими за характерні масштаби неоднорідності γ [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 $\tilde{\epsilon}$ системи в цілому – це комплексна функція дійсного аргументу, яка залежить від частоти прикладеного поля ω , тобто $\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}(\omega)$. 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 взаємодію між собою можна знехтувати, а формули К. Ліхтенекера дають правильний результат для дрібнодисперсних сумішей при близьких концентраціях компонентів, що входять до

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]:

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

де ϵ_m діелектрична проникність оточуючого середовища (матриці), ϵ_i – діелектрична проникність включень, f_i – об’ємна частка i -ї фракції.

Для проведення практичних розрахунків це рівняння зручно розв’язати відносно $\tilde{\epsilon}$:

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

Введемо в формули (1) та (2) поляризованості α_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

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

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 $\tilde{\epsilon}$, то розрахунок ефективної діелектричної проникності багатофазної системи можна проводити за формулою

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

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 $\tilde{\epsilon}$ 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 κ в МДС визначається уявною частиною ефективної ДП

$$\kappa = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\tilde{\epsilon}} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im} \sqrt{\tilde{\epsilon}}, \quad (7)$$

де ω – частота, c – швидкість світла, λ – 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 $\text{Im} \tilde{\epsilon}$ і, відповідно, поглинання κ 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 $\epsilon_m = 4$, суглинистого – $\epsilon_m = 6$, води – $\epsilon_1 = 80$, повітря – $\epsilon_2 = 1$, а діелектричні втрати не враховувались. Для об’ємної частки повітря f_2 були прийняті значення 0,05; 0,1; 0,15.

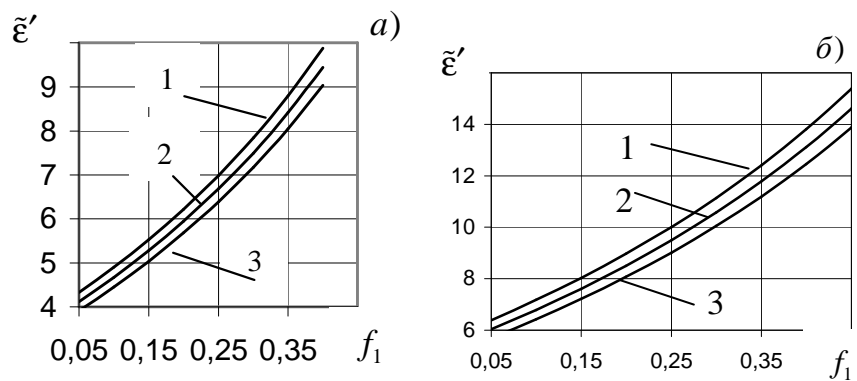


Рис.1 – Залежність ефективної діелектричної проникності $\tilde{\epsilon}'$ від об’ємної частки води f_1 для трикомпонентної суміші при різному вмісту повітря f_2 : 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; (а) $\epsilon_m = 4$, (б) $\epsilon_m = 6$

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 ϵ_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 ϵ_m порушується. Як і очікувалось, при збільшенні об'ємної частки повітря зменшується значення ϵ' 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 ϵ_∞ - діелектрична проникність при $\omega \rightarrow \infty$, ω_p - плазмонна частота та γ_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 $\epsilon_\infty = 4,5$, $\omega_p = 1,46 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$, $\gamma_p = 0,24 \times 10^{14} \text{ н}^{-1}$, для золота - $\epsilon_\infty = 10,0$, $\omega_p = 1,37 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$, $\gamma_p = 0,34 \times 10^{14} \text{ н}^{-1}$. 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

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

де ϵ_1, ϵ_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.

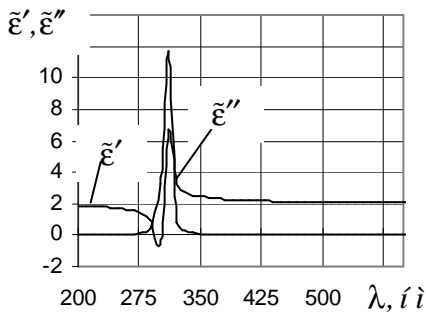


Рис.2 – Діелектрична функція суспензії золотих наночастинок

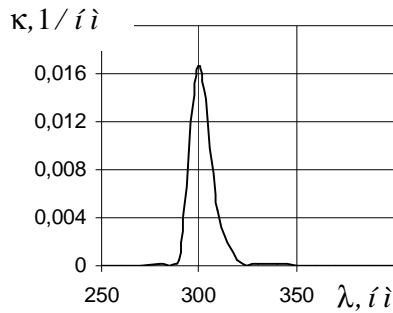


Рис.3 – Поглинання суспензії золотих наночастинок

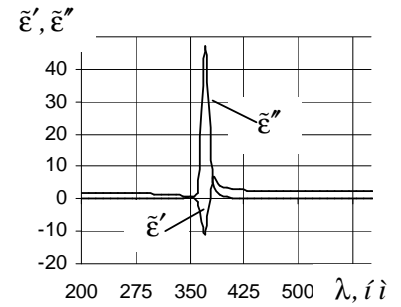


Рис.4 – Діелектрична функція суспензії срібних наночастинок

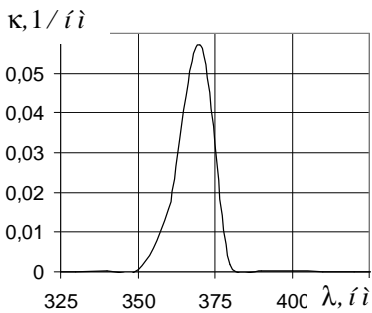


Рис.5 – Поглинання суспензії срібних наночастинок

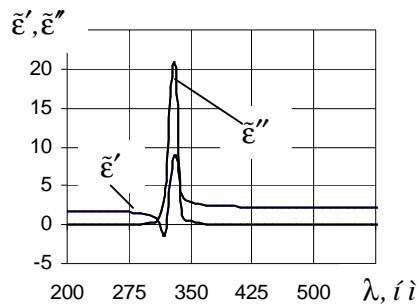


Рис.6 – Діелектрична функція суспензії наночастинок із суміші золота і срібла

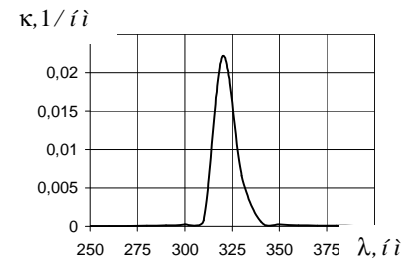


Рис.7 – Поглинання суспензії наночастинок із суміші золота і срібла

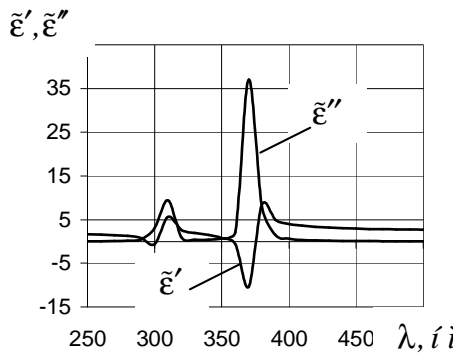


Рис.8 – Діелектрична функція суспензії двокомпонентної суміші наночастинок золота і срібла

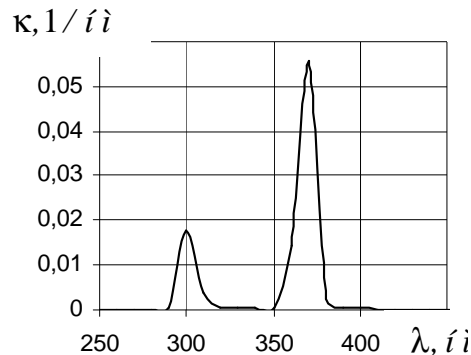


Рис.9 – Поглинання в суспензії суспензії двокомпонентної суміші наночастинок золота і срібла

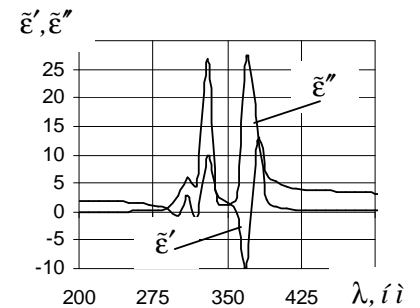


Рис.10 – Діелектрична функція суспензії трикомпонентної суміші наночастинок золота, срібла і мішаних частинок

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 $\tilde{\epsilon}''$, відповідно, максимуму поглинання, залежить від характеристик матеріалу включень. Для мішаної частинки (золото+срібло) ця довжина хвилі λ_{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 ϵ' 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. Schmutge // 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

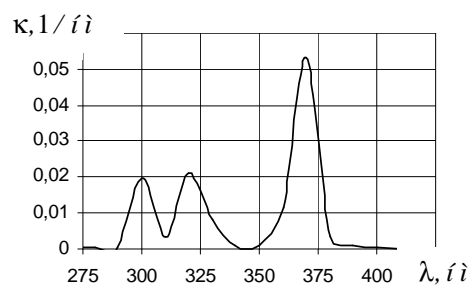


Рис.11 – Поглинання суспензії трикомпонентної суміші наночастинок золота, срібла і мішаних частинок

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. Грициук, 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. Покошило, 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, аспірант, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенко, 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