

К.В. ДУБОВЕНКО, д-р техн. наук, доцент, МНАУ, Миколаїв
Д.О. ЗАХАРОВ, асистент, МНАУ, Миколаїв

**МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО
ПОЛЯ В ГЕТЕРОГЕННОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТВЕРДА
ФАЗА – ГАЗ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ВИЗНАЧЕНОЮ
ДИЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ**

Обґрунтовано обчислення діелектричної проникності твердої фази гранульованого гетерогенного середовища за даними експериментальних вимірювань діелектричної проникності його насипної маси. На основі виконаного аналізу розраховано характеристики електричного поля в об'ємі гетерогенного середовища, необхідні для визначення умов стійкої генерації коронних розрядів

Ключові слова: моделювання, електричне поле, гетерогенне середовище

Вступ. Характеристики багатьох технологічних процесів, заснованих на перетворенні енергії електромагнітного поля в неоднорідних середовищах, суттєво залежать від їх структури. Для середовищ, які мають діелектричні властивості, найважливішою характеристикою є діелектрична проникність. Окремим класом неоднорідних середовищ є гранульовані середовища з практично однаковою формою твердих часток – гранул штучного або біологічного походження, які мають симетрію, близьку до аксіальної. В своїй масі гранули утворюють між собою проміжки (пори), заповнені газом або рідиною. Таке гетерогенне середовище є двофазним. В даній роботі як гетерогенне середовище розглядається насипна зернова маса, що є об'єктом бактерицидного та інсектицидного знезараження високочастотним ($f < 1$ МГц) коронним розрядом.

Мета дослідження полягала у визначенні розподілу напруженості електричного поля в гетерогенному середовищі на основі обчислення відносної діелектричної проникності його твердої фази, що необхідно для виконання аналізу умов стійкої генерації коронних розрядів.

Аналіз сучасного стану проблеми. В роботах [1, 2] обґрунтовано перспективи застосування високочастотного коронного розряду для знезараження об'ємів зернової маси. Проте для широкого впровадження такої технології необхідно виконати комплекс досліджень. На рис. 1, а наведена характерна картина рівномірного світіння коронного розряду в об'ємі гетерогенного середовища (зернової маси). В такому ре-

© К.В. Дубовенко, Д.О. Захаров, 2013

жимі відбувається інтенсивна генерація озону, а температура об'єму в процесі обробки не перевищує припустимих значень. Порушення умов розвитку коронного розряду і контракція плазмового каналу (рис. 1, б) призводять до нерівномірного виділення енергії в об'ємі, зниження концентрації озону в камері обробки, а канал дугового розряду в цьому випадку палить зерно.



Рис. 1 – Утворення розрядів в гетерогенному середовищі:

а – височастотний коронний розряд; б – височастотний дуговий розряд.

Для з'ясування умов стійкого формування коронних розрядів в об'ємі гетерогенного середовища, необхідно знати розподіл напруженості електричного поля в ньому. Вирішення цієї задачі вимагає узагальнення відомих експериментальних даних про електрофізичні властивості зернової маси в залежності від її вологості, температури, насипної густини.

В останнє десятиріччя науковцями різних країн виконано комплекс досліджень, спрямованих на визначення електрофізичних властивостей гетерогенних гранульованих середовищ з використанням методів, побудованих на законах електростатичного поля, електромагнітної індукції, мікрохвильової та лазерної діагностики, рефлектометрії [3-5]. Так, в роботі [3] експериментально визначено ефективну відносну діелектричну проникність зернової маси пшениці для різних значень її насипної густини та вологості. Такі дані необхідні і широко застосовуються для побудови автоматизованих систем реєстрації та контролю вологості зернової маси в зерносховищах, елеваторах, силосах. Результати цієї роботи свідчать також про те, що ефективна відносна діелектрична проникність зернової маси практично не залежить від частоти електричного поля в діапазоні до одного мегагерца.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що на властивості гетерогенних середовищ (електропровідність, діелектричну проникність) в значній мірі впливає не тільки об'ємне співвідношення фаз

гетерогенної речовини, але й форма частинок твердої фази [4, 5]. Цей ефект вивчався теоретично в роботах [6-10], в яких показано, що в електричних полях форма частинок впливає на поляризацію речовини твердої фази. Кількісно поляризацію речовини можна характеризувати коефіцієнтом деполіризації N_j , який визначається розмірами осесиметричних часток за напрямками декартової системи координат $j = x, y, z$, які є осями обертання. Коефіцієнт деполіризації дозволяє визначити, наскільки наведена поляризація буде зменшена відповідно до форми часток та їх орієнтації у просторі відносно прикладеного електричного поля.

В роботі [6] обґрунтовано вираз для коефіцієнта деполіризації

$$N_j = \int_0^{\infty} \frac{(abc)du}{2(u+i^2)\sqrt{(9u+a^2)(u+b^2)(u+c^2)}}, \quad (1)$$

де $N_x + N_y + N_z = 1$.

Згідно даним робіт [7-9] можна виділити три характерні форми часток твердої фази з аксіальною симетрією: сферична, коли розміри гранульованих часток за трьома координатами є однаковими, тоді $N_a = N_b = N_c = 0,333$; дископодібна, якщо розміри часток за двома координатами значно переважають розміри за третьою координатою; голкоподібна, у випадку, коли розміри часток за однією координатою деполіризації набагато переважають розміри за двома іншими координатами. Зернина пшениці має форму, близьку до форми еліпсоїду обертання, тобто її форма є перехідною до голкоподібної. Залежності значень коефіцієнтів деполіризації від співвідношення розмірів частинок за двома осями координат x і y , отримані інтегруванням виразу (1), мають вигляд [9]

$$N_x = \frac{1}{1 + 1,6\left(\frac{a}{b}\right) + 0,4\left(\frac{a}{b}\right)^2}; \quad N_y = N_z = 0,5(1 - N_x), \quad (2)$$

де a і b – відповідно напрямкам x, y довжина та діаметр зернини.

Виклад теоретичного матеріалу. Визначення коефіцієнтів деполіризації дозволило отримати співвідношення для розрахунку ефективної діелектричної проникності двофазного гранульованого середовища в залежності від об'ємного вмісту твердої фази. В роботі [9] наведено залежність, в якій математично пов'язано ефективне значення відносної діелектричної проникності двокомпонентної суміші ϵ_{ef} із значеннями відносних діелектричних проникностей її компонент з урахуванням геометричної форми елементів компоненти твердої фази.

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \varepsilon_0 + \left\{ \sum_{j=x,y,z} \frac{\gamma(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{эф}} - \varepsilon_2))}{3(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{эф}} - \varepsilon_2) + N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2))} \right\} \times \left[1 - \sum_{j=x,y,z} \frac{\gamma \cdot N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{3(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{эф}} - \varepsilon_2) + N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2))} \right]^{-1}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{\text{эф}}$ – ефективна відносна діелектрична проникність гетерогенного середовища (зернової маси); γ – об’ємна частина твердої субстанції в гетерогенному середовищі; v – величина когерентного потенціалу ($v = 1$ згідно роботі [10]); ε_1 – відносна діелектрична проникність твердої фази (зернової субстанції); ε_2 – відносна діелектрична проникність повітря ($\varepsilon_2 = 1$); N_j – фактор деполяризації за координатами x, y, z , який визначається згідно [9] виразом (2).

Проте для обчислення розподілу напруженості електричного поля в об’ємі гетерогенного середовища необхідно оперувати не значеннями його ефективної відносної діелектричної проникності, а значеннями відносної діелектричної проникності твердої фази (зернової субстанції) та повітря, що заповнює проміжки між зернами. Тобто суть проблеми, що вирішується, полягає у визначенні діелектричної проникності твердої фази за експериментально отриманими значеннями ефективної діелектричної проникності гетерогенного середовища із заданою густиною насипної маси з використанням співвідношення (3). Для цього необхідно спочатку визначити об’ємний вміст твердої фази на основі даних про насипну густину середовища для значень якої експериментально визначено ефективну діелектричну проникність $\varepsilon_{\text{эф}}$.

Маса двохфазного гетерогенного середовища m визначається як маса його складових речовин $m = m_1 + m_2$ або $\rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$, де індекс 1 відноситься до твердої, а індекс 2 – до газової фази.

З урахуванням співвідношення $V_2 = V - V_1$, визначимо відносний об’ємний вміст твердої фази γ як

$$\gamma = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (4)$$

Пікнометричні дослідження, виконані в роботі [11], свідчать про те, що на густину зернової субстанції пшениці ρ_1 практично не впливають температура і вологість, густина зернової субстанції пшениці різних сортів відрізняється незначно, в межах одного відсотка, а її середнє значення дорівнює $1,45 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

З урахуванням цього і з використанням експериментально отриманих значень ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ насипної зернової маси із співвідношення (3) в даній роботі було обчислено діелектричну проникність зернової субстанції ϵ_1 . Результати обчислень ϵ_1 для значення вологості насипної зернової маси 19% і різних значень її густини в діапазоні від 758 до 818 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ наведено на рис. 2.

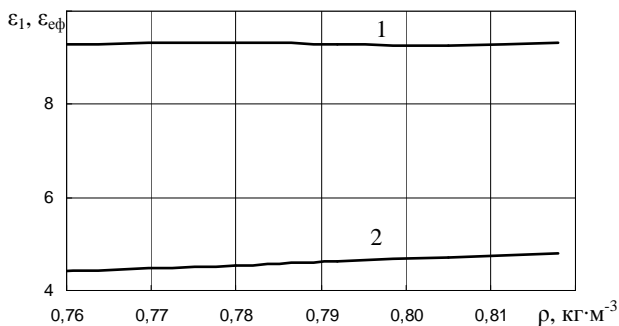


Рис. 2 – Результати обчислення діелектричної проникності твердої фази ϵ_1 (1) за даними експериментальних вимірювань [3] ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ гетерогенного середовища різної густини (2).

Те, що розраховані значення діелектричної проникності зернової субстанції практично не залежать від змінного параметру ρ , свідчить з одного боку про вірність виконаних в цій роботі обчислень, а з іншого – про належну точність експериментального вимірювання еквівалентної діелектричної проникності насипної зернової маси в роботі [3].

В реальних умовах виникає необхідність обробки коронним розрядом зернової маси різної вологості. Тому для визначення умов генерації коронного розряду в зерновій масі необхідно знати залежність діелектричної проникності зернової субстанції ϵ_1 від цього параметру. Результати обчислень значень ϵ_1 за даними експериментальних вимірювань ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ зернової маси різної вологості наведено на рис. 3. Отримані дані свідчать про те, що в діапазоні зміни значень вологості насипної маси від 9 % до 20 % густиною 786 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ відносна діелектрична проникність зернової маси $\epsilon_{\text{еф}}$ змінюється в інтервалі від 3,32 до 4,43, а діелектрична проникність зернової субстанції ϵ_1 змінюється в інтервалі від 6,24 до 8,92 для усереднених значень співвідношення довжини зернин a до діаметру b , що відповідає усередненим розмірам зерен пшениці [7].

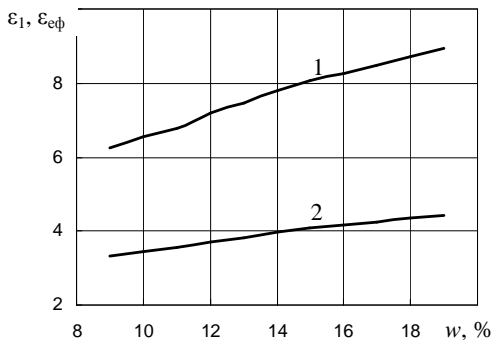


Рис. 3 – Залежності діелектричної проникності від вологості: 1 – розрахункові значення діелектричної проникності ϵ_1 зернової субстанції пшениці; 2 – значення діелектричної проникності насипної зернової маси ϵ_{eff} , отримані експериментально в роботі [3] і використані тут для визначення ϵ_1 .

Результати виконаних розрахунків використано для визначення розподілу напруженості електричного поля в об'ємі зернової маси з використанням програмного пакету FEMM 4.2. Розв'язок проблеми теорії електричного поля можна сформулювати як знаходження функції скалярного електричного потенціалу, що задовольняє диференціальному рівнянню в часткових похідних другого порядку еліптичного типу в декартовій системі координат

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

де ϕ – електричний потенціал; $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ – діелектрична проникність; x, y – декартові координати; ϵ_0 – електрична стала; ϵ_r – відносна діелектрична проникність; індекс $r = 1, 2$ відповідно для твердої і газової фази гетерогенного середовища.

Умови формування коронного розряду в міжелектродному проміжку визначаються характером розподілу в ньому напруженості електричного поля. За відомим розподілом потенціалу вектор напруженості електричного поля \vec{E} та його модуль знаходяться з використанням рівнянь (6), (7).

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi = -\left(\vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right), \quad (6)$$

$$|E| = \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

Результати моделювання характеристик електричного поля.

Під час аналізу розподілу характеристик електричного поля розмір розрядної камери набагато (на три порядки) перевищував розмір зернини. Нульові граничні умови за електричним потенціалом задані на зовнішній граничній області, розташованій настільки далеко від стінок камери, що останні не впливають на розподіл напруженості електричного поля в ній. З метою більш ґрунтовного аналізу умов формування коронних розрядів в об'ємі зернової маси виконано ряд розрахунків розподілу характеристик електричного поля для різних відносних положень зернин. Обчислення виконано у відносних одиницях для різних типових випадків відносного розташування зернин. Отримані дані в перерахунку на одиничну напругу між електродами ($U = 1$ В) наведено на рис. 4. Вони свідчать про значне підсилення напруженості електричного поля в зонах, які характеризуються великою крутизною їх поверхонь та малою відстанню між зернинами (рис. 4, а – рис. 4, в).

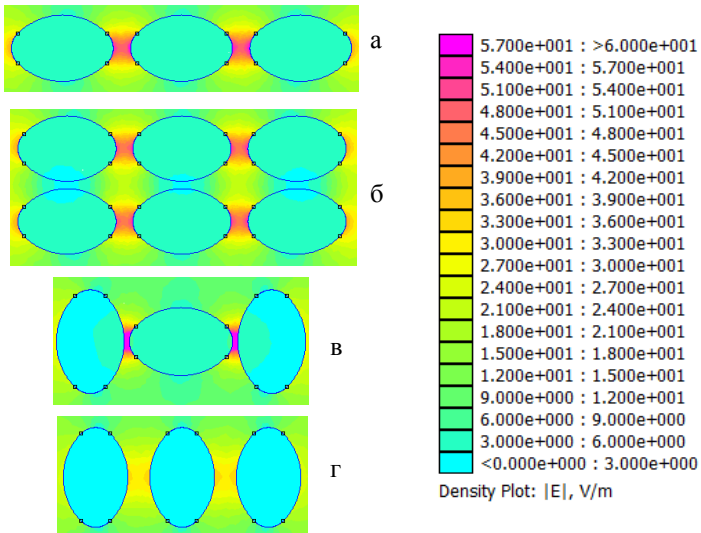


Рис. 4 – Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в міжзернинному просторі для різних положень зернин.

Так, в області великої крутизни форми зернин значення напруженості електричного поля в 3-5 разів перевищують фонові значення. Разом з тим, в зонах близького розташування бокових поверхонь меншої крутизни підсилення напруженості електричного поля характеризується меншими значеннями на 40-50 відсотків, проте розміри областей підвищених значень напруженості електричного поля в цих випадках є значно більшими (рис. 4, г), що також сприяє розвитку коронних розрядів в гетерогенному середовищі.

При розрахунку розподілу напруженості електричного поля в об'ємі гетерогенного середовища слід звернути увагу на те, що в деяких режимах обробки зернової маси вологість в об'ємі кожної зернини може бути розподілена нерівномірно. Так, при зволоженні сухого зерна на його поверхневому шарі вологість збільшується, а в середині залишається на деякий час меншою, і навпаки, під час сушіння зерна вологість є зменшеною на зовнішньому шарі та збільшується в напрямі до центру. Для моделювання в такому випадку зернину поділено на три умовні шари з вологістю 14, 16 та 18 % (рис. 3). З рис. 3 видно, що розподіл вологості в зернині майже не впливає на характеристики поля в міжзернинному проміжку.

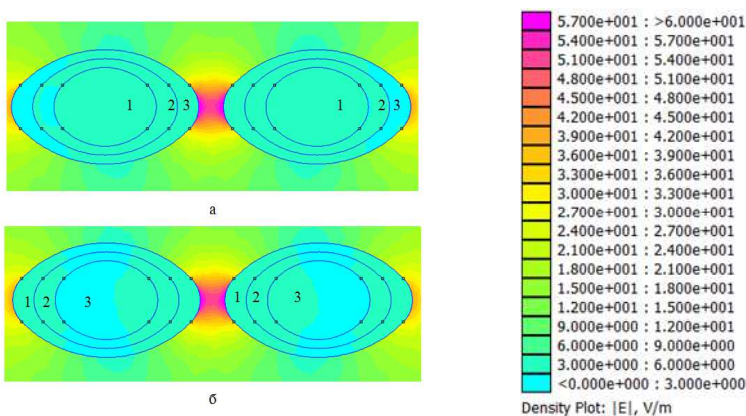


Рис. 5 – Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в міжзернинному проміжку: а – для процесу зволоження, б – для процесу сушіння зерна: 1 – зона з вологістю 14 %, $\epsilon_1 = 7,8$; 2 – зона з вологістю 16 %, $\epsilon_1 = 8,2$; 3 – зона з вологістю 18 %, $\epsilon_1 = 8,7$.

Будова зерен деяких злакових культур і, зокрема, пшениці характеризується наявністю борідки [12], яка з фізичної точки зору є сукупністю мікроступів на поверхні твердої фази матеріалу (рис. 6).

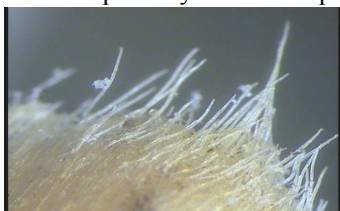


Рис. 6 – Борідка на поверхні зернини (збільшено в 400 разів).

визначення умов формування коронного розряду.

Моделювання розподілу характеристик електричного поля показало, що наявність борідки зумовлює значне (на 40-50 відсотків) підвищення напруженості електричного поля (рис. 7, а) порівняно з випадком, коли таке підсилення поля не враховується (рис. 7, б). Тому цей ефект також потребує залучення до аналізу під час

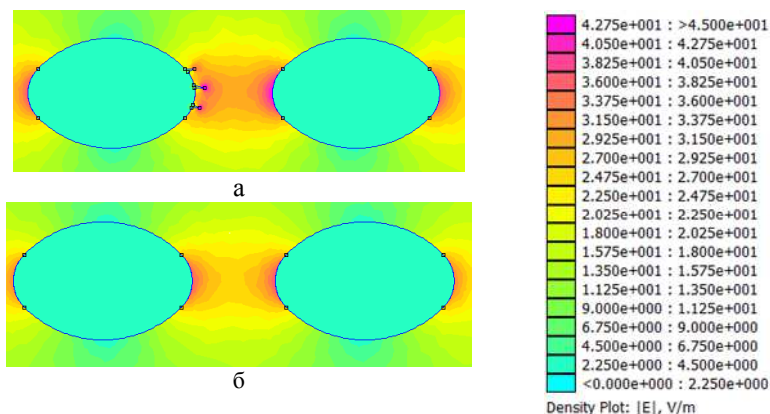


Рис. 7 – Розподіл напруженості в міжзернинному проміжку для зерна з вологістю 14 %, $\epsilon_1 = 7,8$: а – для зерен без борідки; б – для зерен з борідкою.

Висновки. Таким чином, в роботі обґрунтовано обчислення діелектричної проникності твердої фази гранульованого гетерогенного середовища за даними експериментальних вимірювань діелектричної проникності його насипної маси. З використанням чисельної моделі визначено просторовий розподіл характеристик електричного поля, результати розподілу електричного потенціалу, напруженості електричного поля в об'ємі зернової маси для різних значень її вологості і температури. Особливу увагу приділено аналізу впливу розташування зернин в зерновій масі на максимальні значення напруженості електричного поля.

За результатами аналізу виконаних обчислень зроблено висновок

про доцільність застосування отриманих даних для чисельного моделювання умов генерації коронних розрядів в гетерогенних середовищах на частотах до 1 МГц.

Список літератури. 1. *Дубовенко К.В.* Знезараження зернової продукції імпульсним коронним розрядом / *К.В. Дубовенко, Д.О. Захаров* // Вісник національного технічного університету "ХПІ" № 61 (967). – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – С. 139-149. 2. *Захаров Д.О.* Аналіз ефективності обробки зернової продукції імпульсним коронним розрядом / *Д.О. Захаров, К.В. Дубовенко* // Матеріали 8-ої Міжнар. науково-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. – Миколаїв: МДАУ, 2012. – С. 28-30. 3. *Lawrence K.C.* Measuring dielectric properties of hard red winter wheat from 1 to 350 MHz with a flow-through coaxial sample holder / *K.C. Lawrence, S.O. Nelson, P.G. Bartley* // Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1998. – PP. 143-150. 4. *Kenyon W.E.* Texture Effects on Megahertz Dielectric Properties of Calcite Rock Samples // Journal of Applied Physics. – 1984, Vol. 55, No 11. – PP. 3153-3159. 5. *Берега О.М.* Дослідження питомої електропровідності насінневої маси в електричних полях високої напруги // Праці Таврійського державного аграрного університету. – 2008, Т. 7, Вип. 8. – С. 213-217. 6. *Ландау Л.Д.* Электродинамика сплошных сред / *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*. – М.: Наука, 1982. – 621 с. 7. *Doyle W.T.* The Influence of Particle Shape on Dielectric Enhancement in Metal-Insulator Composites / *W.T. Doyle, I.S. Jacobs* // Journal of Applied Physics, 1992, Vol. 71. – PP. 3926-3936. 8. *Sihvola A.H.* Effective Permittivity of Dielectric Mixtures / *A.H. Sihvola, J.A. Kong* // IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing. – 1988, Vol. 26, No 3. – PP. 420-429. 9. *Jones S.B.* Particle shape effects on effective permittivity / *S.B. Jones, S.P. Friedman* // Water Resources Research. – 2000, Vol. 36, No. 10. – PP. 2821-2833. 10. *Tsang J.* Theory of Microwave Remote Sensing / *J. Tsang, J.A. Kong, R.T. Shin*. – NY: John Wiley, 1985. – 476 p. 11. *Chang C.S.* Measuring Density and Porosity of Grain Kernels Using a Gas Pycnometer // American Association of Cereal Chemists, Vol. 65. No. 1. 1988. – P. 13-15. 12. *Танайлова Е.А.* Анатомо-морфологическая характеристика зерновок яровой пшеницы сортов *tritium durum*. – Дис...к-та биологических наук. 03.00.05. – Саратов: Саратовский гос. ун-г., 2009. – 180 с.

Надійшла до редколегії 13.11.2013

УДК 621.314

Моделювання характеристик електричного поля в гетерогенному середовищі тверда фаза-газ за експериментально визначеною діелектричною проникністю / Дубовенко К.В., Захаров Д.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 118-128. Бібліогр.: 12 назв.

Обоснован расчет диэлектрической проницаемости твердой фазы гранулированной гетерогенной среды по данным экспериментальных измерений

диэлектрической проницаемости ее насыпной массы. На основании выполненного анализа рассчитаны характеристики электрического поля в объеме гетерогенной среды, необходимые для определения условий стойкой генерации коронного разряда.

Ключевые слова: моделирование, электрическое поле, гетерогенная среда.

Calculation of the electric permittivity for the solid phase of the granulated heterogeneous medium is grounded by the data of experimental measurements of its bulk mass electric permittivity. On the base of the analysis the electric field characteristics, necessary for determination of the conditions for stable corona discharge generation, are calculated.

Keywords: simulation, electric field, heterogeneous medium.



Дубовенко Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, доцент. Отримав диплом інженера в Миколаївському кораблебудівному інституті за фахом "Електроукомплектування суден" в 1981 р. Захистив дисертацію кандидата технічних наук за фахом "Теоретична електротехніка" в 1988 р. і дисертацію доктора технічних наук за фахом "Електротехнічні комплекси та системи" в 2007 р. в Інституті електродинаміки НАН України. Завідувач кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету з 2008 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами фізичних полів електричних розрядів в суцільних середовищах, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії.



Захаров Дмитро Олександрович, в 2013 році закінчив магістратуру в Миколаївському національному аграрному університеті за спеціальністю "Енергетика сільськогосподарського виробництва" та здобув кваліфікацію інженера-дослідника. Працював на посадах старшого лаборанта та завідувача лабораторіями кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету. Асистент цієї ж кафедри з 2013 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням впливу імпульсних та високочастотних електромагнітних полів на біологічні середовища, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії.