

К.В. ДУБОВЕНКО, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедри, МНАУ, Миколаїв

Д.О. ЗАХАРОВ, зав. лабораторії, МНАУ, Миколаїв

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ЗЕРНОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ІМПУЛЬСНИМ КОРОННИМ РОЗРЯДОМ

На основі аналізу електричного поля в заповненій зерном камері та іонізації її об'єму обґрунтовано умови розвитку коронних розрядів в зерновій масі. З їх урахуванням розроблено резонансний генератор високих напруг і виконано обробку контрольних партій зерна, зараженого грибовою культурою. З використанням цифрової мікроскопії зафіксовано руйнування структури грибкових утворень.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, знезараження, зернова продукція.

На основе численного анализа электрического поля в заполненной зерном камере и ионизации ее объема обоснованы условия развития коронных разрядов в зерновой массе. С их учетом разработан резонансный генератор высоких напряжений и выполнена обработка контрольных партий зерна, зараженного грибковой культурой. С использованием цифровой микроскопии зафиксировано разрушение структуры грибковых образований.

Ключевые слова: импульсный коронный разряд, обеззараживание, зерновая продукция

On the base of the electric field analysis in the chamber filled with grain, and its volume ionization the conditions of corona discharge in the bulk grain mass are proved. With due regard for them the resonant high voltage generator is created and control processing of grain parties, contaminated with fungal culture, is executed. With the use of digital microscopy the destruction of fungal culture is registered.

Keywords: pulsed corona discharge, disinfection, grain products.

Вступ. Розробка сучасних електротехнологій для збереження зернових ресурсів країни є пріоритетним завданням, що за своєю важливістю відповідає вимогам державного рівня. Відомо, що близько 85 % збудників найбільш небезпечних хвороб злакових культур є грибовими мікроорганізмами, з них майже 80 % є токсикогенами [1]. Істотними недоліками методів хімічної дезинсекції, дезинфекції і детоксикації зернової продукції є те, що вони небезпечні для персоналу, вимагають тривалого часу знезараження з вимушеною зупинкою підприємства. Чималі матеріальні витрати потрібні й на виконання заходів щодо придбання, транспортування і зберігання дезінсектантів, інсектицидів

© Дубовенко К.В., Захаров Д.О., 2012

і фунгіцидів. Після фумігації в зерні залишаються отруйні речовини, вірогідність попадання яких в їжу людини лишається високою, одночасно відбувається забруднення навколишнього середовища. Слід зазначити, що щорічно всі великі елеватори, хлібоприймальні пункти, млини, круп'яні і комбікормові заводи також піддаються знезараженню отруйними газами.

У зв'язку з цим особливе значення набуває спрямування досліджень на створення сучасних засобів боротьби з грибковою мікрофлорою продовольчого зерна, що задовольняють вимогам підвищеної екологічної і токсикологічної безпеки. До таких засобів, безумовно, можна віднести методи знезараження продовольчого зерна енергією електричного поля високої напруженості [2].

Роботи [2, 3] присвячені розробці устаткування та впровадженню у виробництво обробки зерна коронним розрядом в постійному електричному полі. Запропонований метод є екологічно чистим, оскільки при використанні озону в середовищі, яке обробляється, не залишається хімічно небезпечних продуктів розкладу. Для порівняння слід зазначити, що при використанні отрутохімікатів дегазація триває кілька діб. Проте в теперішній час є актуальною мінімізація втрат енергії на обробку зернової продукції коронним розрядом в промислових масштабах та підвищення безпеки технічної експлуатації технологічних установок, призначених для такої обробки. В цьому сенсі є вельми перспективним застосування імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів (порядку сотень тисяч Герц).

Мета, завдання дослідження. В даній роботі аналізуються умови створення імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів в об'ємах розрядних камер та його застосування для знезараження зернової продукції.

Теоретичний аналіз умов реалізації імпульсних коронних розрядів в об'ємі зернової маси. Дослідження, виконані в [3-5], свідчать про те, що електрофізичні властивості зернової маси (питома електропровідність, відносна діелектрична проникність) значною мірою залежать від температури та вологості. Ці результати є передумовами для аналізу характеристик електричного поля в об'ємі зернової маси. Відомо, що в залежності від часу дії імпульсної або високочастотної напруги електричне поле формується струмом провідності або струмом зміщення відносно часу релаксації середовища [6]. Час релаксації середовища визначається співвідношенням (1)

$$\tau = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\sigma}, \quad (1)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність середовища; ε_0 – електрична стала; σ – питома електропровідність середовища.

В діапазоні зміни вологості зерна 12...34 % і температури 16...35 С питома електропровідність зернової маси змінюється від $10 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$ до $12 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$, а відносна діелектрична проникність відповідно знаходиться в межах від 2 до 22 одиниць. За таких умов час релаксації середовища ϵ на два порядки меншим, ніж тривалість імпульсів або період коливань напруги частотою 500 кГц і, таким чином, слід вважати, що електричне поле в області камери, заповненої зерновою масою формується струмом зміщення.

З урахуванням цього проблему теорії електричного поля можна сформулювати як знаходження функції потенціалу, що задовольняє еліптичному рівнянню в часткових похідних другого порядку (2) в декартовій системі координат

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

де ϕ – електричний потенціал; $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ – абсолютна діелектрична проникність; x, y – декартові координати.

Умови формування коронного розряду в будь-якому міжелектродному проміжку визначаються неоднорідним розподілом в ньому напруженості електричного поля. За відомим розподілом потенціалу вектор напруженості електричного поля E та його модуль визначаються з використанням рівнянь (3), (4).

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi = - \left(\vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$|E| = \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

Для аналізу розподілу характеристик електричного поля розмір розрядної камери набагато перевищує розмір зернини. Нульові граничні умови за електричним потенціалом задані на зовнішній граничній області, розташованій настільки далеко від стінок камери, що не впливали на розподіл напруженості електричного поля в камері.

Для розв'язку поставленого завдання застосовано чисельний метод верхньої релаксації [7]. Реалізоване на основі цього методу програмне забезпечення в попередніх роботах успішно використовувалося для аналізу роботи різних вузлів високовольтного устаткування [8-10].

Результати моделювання просторового розподілу характеристик електричного поля в об'ємі розрядної камери між високопотенціальним і низькопотенціальним електродами, отримані за допомогою метода верхньої релаксації, співпадають з результатами моделювання, виконаними з використанням об'єктно-орієнтованого пакету FEMM 4.2 і наведені на рис. 1. Під час розрахунків кінцево-елементна сітка містила 9722 вузли та складалася з 19055 елементів.

На рис. 1,а у відносних одиницях зображено розподіл напруженості електричного поля в об'ємі розрядної камери, заповненої вологим зерном (вологість зерна $\chi = 34\%$, з відносною діелектричною проникністю зернини $\epsilon = 22$) в момент максимуму напруги. Чітко виражені зони підвищеної напруженості поля в областях великої крутизни обрисів зернин. На рис. 1,а наведено два спрощених випадки, коли зернини торкаються одна іншої (знизу), і коли між гострими кінцями зернин існує невеликий повітряний проміжок (зверху). Результати чисельних розрахунків свідчать про те, що в останньому випадку локальні зони підвищеної напруженості поля займають значно більший об'єм, а напруженість електричного поля в цих локальних зонах є в 5...6 разів більшою, ніж поза їх межами. Таким чином, наявність зон підвищеної напруженості електричного поля свідчить про реальну можливість створення системи коронних розрядів в об'ємі середовища, які можуть ефективно виконувати функції бактерицидного знезараження зернової продукції в усьому об'ємі бункера з встановленими електродами за рахунок генерації озону. В процесі сушіння зерна його вологість зменшується. Це означає зменшення відносної діелектричної проникності середовища. На рис. 1,б наведено результати розрахунків розподілу напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку для іншого випадку сухого зерна вологістю $\chi = 12\%$ з відносною діелектричною проникністю зернини $\epsilon = 2$.

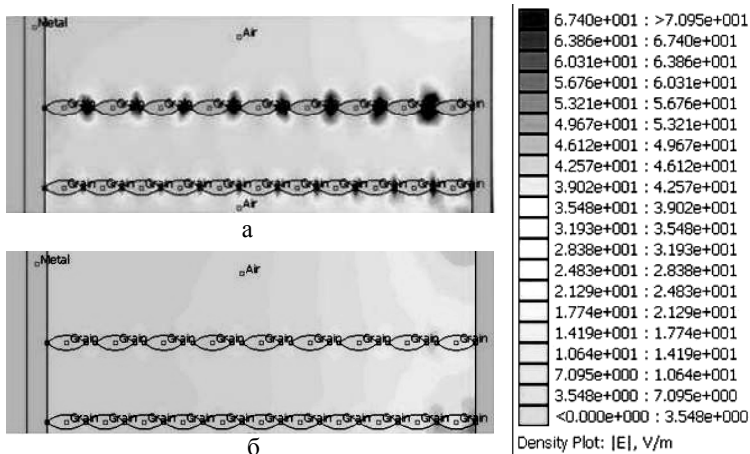


Рис. 1 – Розподіл напруженості електричного поля в розрядній камері:
а – вологе зерно; б – сухе зерно

Відомо, що шорсткість поверхні зернин впливає на розподіл електричного поля. Аналіз експериментальних даних з визначення шорсткості матеріалів, опублікованих у [11] та отриманих в результаті вимірювань, виконаних у цій роботі, свідчить про те, що у багатьох характерних випадках вони з припустимою похибкою можуть бути апроксимовані залежностями

$$f(h) = -kh + 1, \text{ при } 0 \leq h \leq h_1, \quad (5)$$

$$f(h) = v/h - u, \text{ при } h_1 \leq h \leq h_m \quad (6)$$

$$k = [1 - f(h_1)]/h_1, \quad v = f(h_1) / \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_m} \right), \quad u = v/h_m, \quad (7)$$

де $h_1 < h < h_m$ – відстань збурення поля уздовж осі мікровиступу.

Весь простір міжзернинного проміжку від вершини виступу до протилежної зернини можна умовно вважати таким, що складається з двох частин. Перша частина відповідає області поля, збуреної мікроставом, а друга – зоні, де мікростав не впливає на розподіл напруженості електричного поля. Якщо мікростави знаходяться на такій відстані, що збурення поля одним з них не впливає на розподіл поля біля іншого, і за формою їх з достатньою точністю можна моделювати напівеліпсоїдом, то напруженість поля уздовж його осі у газовому середовищі визначається, як показано в [12], співвідношенням

$$E_z(x) = E \left[\left[1 - \frac{\operatorname{arth}(c/x) - c/x}{\operatorname{arth}(c/h) - c/h} \right] + \frac{1}{(\operatorname{arth}(c/h) - c/h)(x^2/c^2 - 1)x/c} \right], \quad (8)$$

де c – половина відстані між фокусами еліпсоїду.

Відомо, що пробій проміжків у газі може відбуватися як за таунсендовським, так і за стримерним механізмом. В алгоритмі, що застосовано, враховано обидві можливості розвитку пробією в залежності від характеристик газової ізоляції, матеріалу електродів та розподілу напруженості електричного поля [10]. Таунсендівському механізмові відповідає багатолавинний процес, коли до розмноження носіїв заряду залучено усю поверхню катоду та весь об'єм газу між катодом та анодом. У процесі генерації нових електронних лавин під час їх руху від катоду до аноду утворюється канал розряду. Критерієм багатолавинного пробією [14] є співвідношення

$$\int_0^d (\alpha_j(x) - \eta_j(x)) dx \geq \ln \left(\frac{\alpha(d) - \eta(d)}{\alpha(d) \cdot \gamma} \right) = K, \quad (9)$$

де d – довжина шляху лавини між електродами; α_j – значення першого іонізаційного коефіцієнту Таунсенда при виході лавини з j -ої ділянки катоду; x – відстань, що пройшла лавина у полі ($0 \leq x \leq d$); η_j – коефіцієнт прилипання; γ – другий іонізаційний коефіцієнт Таунсенда.

Ймовірність пробією q_j , що розвивається з S_j ділянки електродної поверхні, обчислювалася з урахуванням наступного. При появі вільного електрону біля поверхні електроду ймовірність того, що він опиниться саме біля S_j , дорівнюватиме відношенню S_j/S_0 . Але процес утворення лавин від цього електрону може бути ефективним і призвести до пробією лише тоді, коли електрон не просто буде на цій ділянці, а буде саме біля мікроступів з висотою, більшою за h_{\min} , тобто у полі, збуреному мікроступами з найменшою висотою, при якій для заданої напруги справджуються нерівності (8), (9). При висотах, більших за h_{\min} , цей процес буде найбільш ефективним. Загальна площа мікроступів ділянки j з висотою, більшою за h_{\min} , є лише частиною площі S_j . Тому вона менша за S_j і обчислюється за характеристикою шорсткості електродів (4)-(8). Це означає, що

$$q_j(U) = f(h) = \frac{S_{h_{\min}}}{S_0}, \quad (10)$$

В математичній моделі аналізу розвитку високочастотного коронного розряду необхідно врахувати швидкість зміни напруги на електродах.

Якщо $U=U(t)$, тоді $dt=dU/U'$ та $U'=dU/dt$, і у кінцевому рахунку ймовірність пробою як функцію U можна навести у вигляді [8]

$$Q(U)=1-\exp\left(-n_0 \int_{U_0}^U \sum_{j=1}^N S_j \int_0^{x_{\min j}} g_j dx \cdot \frac{q_j(U)}{U'} dU\right), \quad (11)$$

де U_0 – значення напруги у момент t_0 .

Слід зауважити, що при обраних в результаті моделювання геометричних розмірах камери та електродної системи, значення напруженості електричного поля не перевищують значення напруженості пробою міжелектродного проміжку, але є достатніми для виникнення коронних розрядів.

Розрахункові залежності ймовірності пробою міжелектродного проміжку розрядної камери від напруги, отримані з використанням зазначеного підходу, наведені на рис. 2 для різних значень вологості зернової маси, що варіювалися в діапазоні від 12 до 34 відсотків. Моделювання виконано для розрядної камери з внутрішнім радіусом 60 мм і внутрішнім електродом радіусом 2 мм. Густина насипної зернової маси, що визначає середню щільність просторового розташування зернин, мала характерне значення $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Умови формування коронного розряду в будь-якому міжелектродному проміжку визначаються неоднорідним розподілом в ньому напруженості електричного поля. За граничну напругу коронного розряду згідно цим кривим слід приймати максимальні значення напруги, для яких ймовірність електричного пробою розрядної камери ще дорівнює нулю (точки U_1, U_2, U_3 та U_4 на рис. 2).

В розрахунках залежності ймовірності пробою розрядної камери, заповненої зерновою масою, від напруги враховано залежність розподілу в ній відносної діелектричної проникності від вологості та температури, яка збільшується із підвищенням їх значень. Цей вплив в певній мірі компенсується підвищенням електричної міцності зволоженого повітря, що заповнює міжзернинний простір камери. Таке підвищення обумовлено збільшенням електронегативного впливу газу з підвищеною концентрацією полярних молекул води, що враховано в математичній моделі значенням коефіцієнту прилипання η в (11).

Експериментальні дослідження. На основі виконаного аналізу умов розвитку імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсі в об'ємі зернової маси обґрунтована можливість їх створення для реалізації процесу бактерицидного та інсектицидного знезараження зернової продукції. Це обумовило необхідність проведення експериментальних досліджень і перевірки можливості

створення імпульсних коронних розрядів в об'ємі зернової маси.

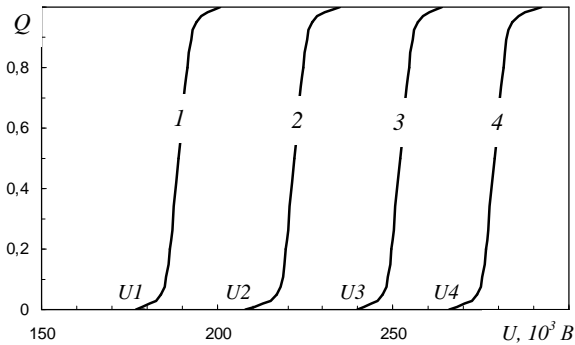


Рис. 2 – Розрахункові залежності ймовірності пробую міжелектродного проміжку розрядної камери від напруги для різних значень вологості χ зернової маси. Криві: 1 – $\chi = 33\%$; 2 – $\chi = 26\%$; 3 – $\chi = 19\%$; 4 – $\chi = 12\%$.

З цією метою була розроблена експериментальна установка для генерації імпульсних коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів, принцип дії якої заснований на резонансі первинного і вторинного кіл трансформатора. Схема електрична принципова установки наведена на рис. 3.

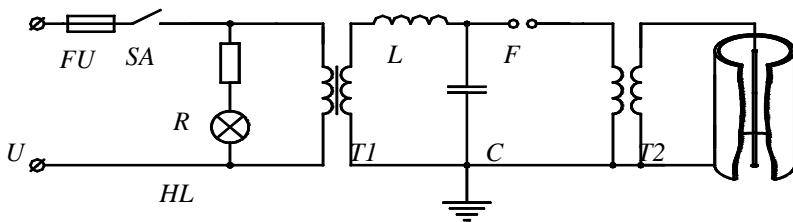


Рис. 3 – Схема електрична принципова силової частини установки для генерації імпульсних коронних розрядів.

Установка живиться від мережі 220 В і споживає потужність 120 Вт. Трансформатор $T1$ підвищує напругу мережі до діючого значення 10 кВ на виході вторинної обмотки. Вихідна напруга трансформатора контролюється кіловольтметром С196. Згідно схеми конденсатор C ємністю 5 нФ заряджається в коливальному режимі через індуктор струмообмеження індуктивністю 30 мкГн. В результаті пробую повітряного розрядника амплітудним значенням напруги 12...14 кВ конденсатор розряджається на первинну обмотку повітряного трансфор-

матора $T2$, яка утворена п'ятьма витками мідної трубки радіусом 4 мм, навитих у формі усіченого конуса з діаметром першого витка 15 см і діаметром останнього – 35 см. Власна частота контуру розряду конденсатора C на первинну обмотку повітряного трансформатора дорівнює 490 кГц. Вона співпадає з власною частотою вторинного контуру, до складу якого належить вторинна обмотка діаметром 8 см, яка має 510 витків мідного проводу діаметром 0,2 мм, та розподілена ємність осесиметричної розрядної камери діаметром 100 мм з центральним високовольтним стрижневим електродом діаметром 4 мм. Коефіцієнт взаємної індукції обмоток трансформатора $T2$ може регулюється в межах $M = 0,05 \dots 0,15$ зміною висоти первинної обмотки. Зміною M досягається максимальна довжина дуги контрагованого розряду (приблизно 8...9 см) при піднесенні до розрядної камери заземленого електрода з радіусом кривизни робочої поверхні 5 мм. При цьому ж значення взаємної індуктивності обмоток реалізується й найбільш яскраве свічення коронного розряду уздовж всієї поверхні внутрішнього електрода радіусом 2 мм, а також найбільш інтенсивне утворення озону в розрядній камері (рис. 4).

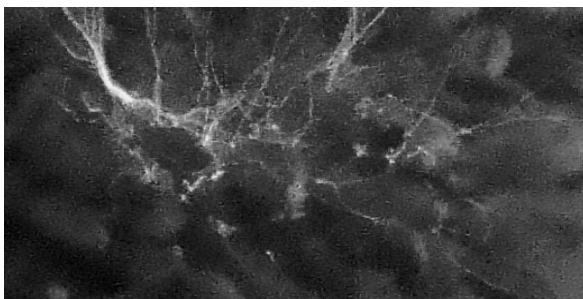


Рис. 4 – Генерація імпульсних коронних розрядів в зерновій масі, що заповнює розрядну камеру.

З використанням даної установки виконано ряд досліджень з обробки збіжжя пшениці. Спочатку було відібрано зернини, незаражені грибковими захворюваннями. На рис. 5,а наведено фотографію поверхні однієї з таких зернин. Після цього для частини зерна було створено сприятливі умови для утворення грибкових колоній (підвищена вологість та температура), що викликало характерне поверхневе зараження зернин токсикогенною грибковою мікрофлорою (рис. 5,б). Заражена зернова маса засипалася в розрядну камеру експериментальної установки і піддавалася дії коронного розряду [4]. Середня тривалість оброб-

ки дослідних зразків зерна складала 10 хвилин. Аналіз результатів обробки виконувався з використанням мікроскопа MICROMED XS-2610 і цифрової фотокамери. Отримані дані (рис. 5,в) свідчать про те, що в результаті впливу коронного розряду з високою частотою проходження імпульсів відбулося практичне повне руйнування структури грибкових утворень.

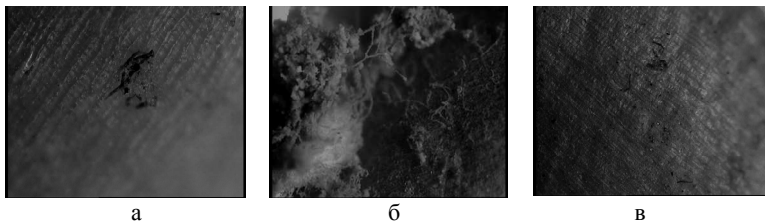


Рис. 5 – Фотографії поверхні зерен (збільшення в 400 разів): а – незаражена зернина; б – зернина, заражена токсинотворними грибами; в – заражена грибами зернина після обробки імпульсним коронним розрядом.

Висновки. Результати даної роботи свідчать про достатню для практичних розрахунків точність оцінки умов утворення коронних розрядів з високою частотою проходження імпульсів в неоднорідному електричному полі розрядної камери, заповненої гетерогенним середовищем – зерною масою та про ефективність обробки зараженого зерна коронним розрядом з високою частотою проходження імпульсів (490 кГц).

Список літератури: 1. *Берека О.М.* Обробка насіння сільськогоспо-дарських культур в електричному полі високої напруги. Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – К., 2010. – 33 с. 2. *Берека О.М., Усенко С.М.* Дослідження концентрації озону в зерновій масі під дією електричного поля високої напруги // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. Вип. 153. – С. 176-182. 3. *Берека, О.М.* Закономірності зміни питомої електропровідності насінневої маси в електричних полях високої напруги // Аграрна наука і освіта. – 2008. – Т.9, №5/6. – С. 146-148. 4. *Nelson S.O.* Dielectric Properties of Agricultural Products and Some Applications // Results in Agriculture Engineering., 2008. Vol. 54, N2. – P. 104-112. 5. *Serdyuk V.M.* Dielectric Study of Bound Water in Grain at Radio and Microwave Frequencies // Progress in Electromagnetics Research (PIER). – 2008. Vol. 84. – P. 379-406. 6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Електродинамика сплошних сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с. 7. *Ильин В.П.* Численные методы решения задач электрофизики. – М.: Наука, 1985. – 334 с. 8. *Дубовенко К.В.* Моделювання імовірності пробую газовой ізоляції високовольтних пристроїв систем імпульсної електроенергетики / Технічна електроди-

наміка. – 2006. – №2. – С. 15-20. **9. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I.** The Design, Fabrication and Testing of a Closing Switch for Compact Electrical Discharge Industrial Equipment // 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers. Baltimore, Maryland, USA. – 1997. – Vol. 2. – P. 868-874. **10. Щерба А.А., Дубовенко К.В.** Высоковольтные электроразрядные компактные системы / К.: Наукова думка, 2008. – 264 с. **11. Аверуцкий В.А.** Влияние шероховатости электродов на пробивные напряжения и их разброс // Журн. техн. физики. – 1973. – Т. 43, № 3. – С. 295. **12. Сливков И.Н.** Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

Надійшла до редколегії 25.10.12



Дубовенко Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, доцент. Захистив диплом інженера в Миколаївському кораблебудівному інституті за фахом "Електроустановка 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 і 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 різного технологічного призначення.



Захаров Дмитро Олександрович, закінчив Миколаївський національний аграрний університет в 2012 р. за спеціальністю "Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі". Магістрант за фахом "Інженер-дослідник із енергетики сільського господарства". Завідувач лабораторії електротехнологій Миколаївського національного аграрного університету з 2012 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням впливу імпульсних та високочастотних електромагнітних полів на біологічні середовища, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії агропромислового призначення.