

СУШІННЯ ТА ДЕЗІНСЕКЦІЯ ЗЕРНА ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Ю.Ф. Зіньковський, доктор технічних наук
Ю.К. Сидорук, кандидат технічних наук
А.О. Туровський, асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Доведено доцільність застосування електричного поля високої частоти для сушіння та дезінсекції зерна. Запропоновано принцип побудови установки для опромінення зерна та інших сипучих матеріалів електричним полем високої частоти на основі багатозфазної багатоелектродної структури. Використовуючи теорію інтегральних сингулярних рівнянь у вигляді задачі спряження, розраховано розподіл напруженості електричного поля в середині камери.

Електричне поле, висока частота, сушіння, дезінсекція, інтегральні сингулярні рівняння.

Використання сучасних досягнень технічних наук у сільському господарстві створює можливість вдосконалення технологій вирощування і зберігання вирощеної продукції. До таких новацій належать використання в агропромисловому комплексі електричного поля високої частоти (ВЧ) та електромагнітного поля надвисокої частоти (НВЧ) для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна, ягід, фруктів, грибів, овочів, іншої продукції тощо.

Основними перевагами таких технологій є малі енергетичні затрати, можливість сушіння при зниженому тиску повітря, рівномірність нагрівання і відсутність перегріву в окремих зонах. При сушінні зерна знищуються патогенна мікрофлора та комахи-шкідники, що забезпечує значно кращу якість зерна і зменшує його втрати при зберіганні.

Важливою проблемою, яку необхідно вирішувати при закладанні зерна на зберігання та в процесі його зберігання, є сушіння та боротьба з комахами-шкідниками. Для захисту зерна від комах застосовують різні методи обробки: теплову, протруюванням отрутохімікатами та слабкою радіацією. Однак, ці способи є або малоефективними, або небезпечними для людини.

Великі переваги в дезінсекції притаманні способам, що ґрунтуються на використанні електричного поля високих частот (10 – 100 МГц). При аналізі дії електричного та електромагнітного полів на комах використовується переважно теплова концепція, яка, однак, не відображає сутності процесів, що протікають у біологічних об'єктах. Є підстави вважати, що

струми, які протікають у тілі комах, руйнують важливі життєві центри, в тому числі клітини, і призводять до її загибелі ще до досягнення температури критичного для комах рівня.

Вивчення впливу ВЧ та НВЧ полів на комах-шкідників проводилося багатьма вченими, зокрема слід відзначити роботи [6, 8, 9], в яких зібрано значний обсяг матеріалу стосовно діелектричних властивостей зерна, комах та ефективних режимів їх знищення на всіх стадіях розвитку в пшениці, житі, ячменю тощо.

Доведено [8], що при певних режимах опромінення електричним полем високої частоти можна досягти повного знищення комах на всіх стадіях їх розвитку. Наприклад, при нагріванні зерна, зараженого рисовим довгоносиком, амбарним довгоносиком, мучним хрущак з використанням електричного поля частотою 39 МГц повне знищення досягалося за температури 39 °С, 41 °С та 47 °С, відповідно. З іншого боку зазначається, що для ефективного знищення цих комах звичайним нагріванням необхідна температура 61 °С при мінімальній витримці 10 хв, а для забезпечення того ж результату при використанні електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц температура зерна мала б досягти 57 °С. На користь ВЧ при боротьбі з комахами-шкідниками говорить і той факт, що при опроміненні ВЧ полем значна кількість комах гине і після опромінення. На рис. 1 наведено експериментальні криві залежності смертності дорослих комах рисового довгоносика при опроміненні зерна твердої озимої пшениці ВЧ та НВЧ полями в перший та восьмий день після опромінення [7, 8]. Видно, що опромінення полем ВЧ діапазону забезпечує знезараження при значно нижчих температурах, ніж при використанні поля НВЧ діапазону, до того ж має місце подальша смертність комах після обробки.

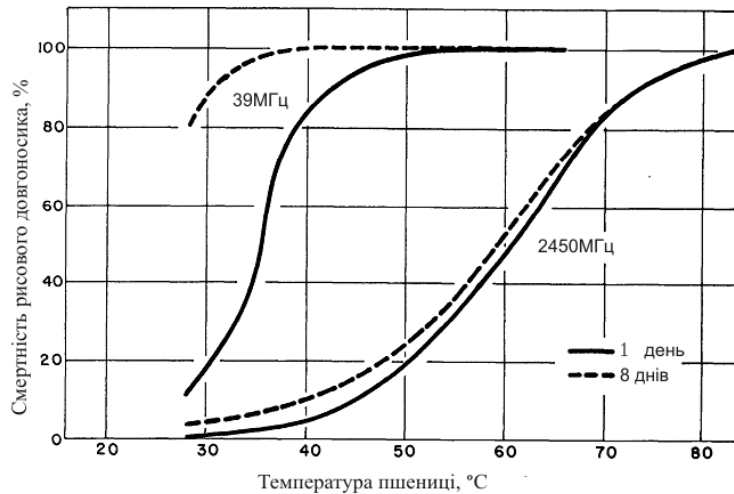


Рис. 1. Характеристики смертності комах при опроміненні зерна полем ВЧ та НВЧ

Підвищити ефективність впливу ВЧ опромінення на смертність комах вдається шляхом зниження тиску в камері опромінення. Так, при тиску 40 мм рт. ст. виникають плазмові мікророзряди в середовищі, які негативно діють на комах. Крім того, мікророзряди спричиняють синтез молекул озону, що

додатково пригнічує життєдіяльність живих організмів. При цьому ефекті для знищення комах достатньо експозиції 3 – 5 с. При сушінні зерна зниження тиску в активній камері призводить до зниження температури кипіння води, що значно збільшує ефективність пароутворення.

Мета досліджень – створення теоретичних та конструкційних основ розробки обладнання для сушіння та дезінсекції зерна електричним полем високої частоти.

Матеріали та методика досліджень. Однією з найважливіших технологічних особливостей апаратної реалізації сушіння і дезінсекції зерна є рівномірність нагрівання всієї маси об'єкта. Електричне поле, що є носієм енергії, в активній зоні, де відбувається взаємодія електричного поля з зерном, має бути суттєво однорідним.

При створенні ВЧ установок необхідно також враховувати, що навантаження генератора характеризується переважно ємнісним характером і при значній ємності електродів виникає складність узгодження генератора з навантаженням, що суттєво впливає на коефіцієнт корисної дії обладнання. З іншого боку, обмеження напруги на електродах і ємності електродів знижує продуктивність установки.

Результати досліджень. Найпростіший варіант електродної системи, в якій може існувати однорідне електричне поле, складається з двох металевих паралельно розташованих пластин. Щоб зменшити вплив крайових ефектів і забезпечити потрібну однорідність поля, необхідно значно збільшити розміри електродів, але при цьому значно збільшується і їх ємність.

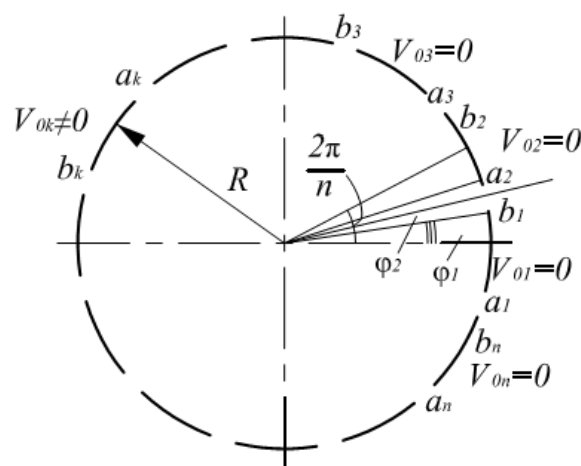


Рис. 2. Схема до опису задачі

Запропонована авторами електродна структура має в активній зоні високий ступінь однорідності електричного поля, вищу енергетичну ефективність і значно меншу ємність, порівняно з плоскими електродами, при однаковій продуктивності установок.

Теоретичний аналіз електричного поля в багатозв'язній електродній структурі. Електродна структура має n електродів, роз-

ташованих на поверхні циліндра радіусом R та довжиною l . Оскільки $l \gg R$, то при визначенні напруженості електричного поля і потенціалу в середині циліндра теоретично задача зводиться до плоскої задачі на комплексній необмеженій площині з n -зв'язною кільцевою границею L , радіусом R . Кільцева границя L розділена на окремі відрізки розімкнених дуг $L_1, L_2, \dots, L_n \in L$, що не мають спільних точок (рис. 2). Дуги L_1, L_2, \dots, L_n , що знаходяться в інтервалах $a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3, \dots, a_nb_n$, еквіпотенціальні, тобто фізично мають нескінченно високу провідність. Потенціал кожної згаданої дуги, відповідно, дорівнює $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$. Повна комплексна площина z розділена на дві симетричні відносно кола радіусом R області: зовнішню S^+ , для якої $|z| \geq R$, та внутрішню S^- , для якої $|z| \leq R$, де z – незалежна комплексна змінна. Визначається комплексний потенціал $\Phi(z) = U(z) + jV(z)$, де $V(z)$ – потенціал поля. Напруженість електричного поля $\vec{E}(z) = -\nabla[\Phi'(z)]^*$, де $\Phi'(z)$ – похідна від потенціалу по z . $\vec{E}(z)$ є однозначною аналітичною функцією, а символ $[\dots]^*$ позначає комплексне спряження. Вказані функції задані у всіх точках відкритої n -зв'язної комплексної площини z [3].

Визначити напруженість електричного поля в цій електродній структурі можна методом теорії інтегральних сингулярних рівнянь [4], згідно з якою загальний вираз напруженості електричного поля має вигляд:

$$E(z) = X(z^*)P(z^*). \quad (1)$$

У цьому виразі

$$P(z^*) = \sum_{k=2}^n C_{k-1} (z^*)^{n-k}, \quad (2)$$

$$X(z^*) = \frac{C}{\sqrt{R(z^*)}}, \quad (3)$$

де k – номер відповідного електрода, $R(z^*) = \prod_{k=1}^n (z^* - a_k)(z^* - b_k)$, постійна

C визначається з умови на граничному колі і дорівнює $C = \sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_n}$.

Подальші вирази напруженості електричного поля і потенціалу доцільно подати через нормовану змінну $Z = z/R$, що реалізується шляхом конформного відображення даної комплексної площини z на площину з одиничним граничним колом Z . Використавши вирази (1, 2, 3) і виконавши процедуру конформного відображення, одержимо вираз напруженості електричного поля [1]:

$$E(z_1) = \frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_n}}{R} \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k}}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}}. \quad (4)$$

Відповідно, потенціал

$$V = -\operatorname{Re} \left[\frac{\sqrt[4]{\prod_{k=1}^n a_k b_k}}{R} \int_z \frac{\sum_{k=2}^n C_{k-1} (Z^*)^{n-k} dZ^*}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (Z^* - a_k)(Z^* - b_k)}} \right]. \quad (5)$$

Отримані вище вирази можуть бути використані як вихідні для розрахунку напруженості електричного поля і потенціалу в кожній точці області Z при довільному розподілі точок a_k та b_k на граничному колі L , а також при довільному розподілі потенціалів між граничними дугами L_k . Але в цій електродній структурі згідно з постановкою задачі необхідно створити однорідне електричне поле, що можливо лише при $L_1=L_2=L_3=\dots=L_m$ та при однакових проміжках між ними $b_1 a_2 = b_2 a_3 = \dots = b_n a_1$. Позначимо кутом $2\varphi_1$ кут, на який спирається дуга L_k , а кутовий проміжок між дугами L_k і L_{k+1} кутом $2\varphi_2$, кутова відстань між серединами сусідніх дуг – $2\pi/n$ (рис. 2). Кожна дуга має потенціал $V_{01}, V_{02}, \dots, V_{0n}$, відповідно. В зв'язку з прийнятою лінійністю середовища, в якому визначаються основні параметри електричного поля, його напруженість і потенціал в заданій структурі при довільному розподілі напруги між дугами L_k можна знайти як суму напруженостей і потенціалів, одержаних при часткових розв'язках задачі, коли лише одна дуга L_k має потенціал V_{0k} , а решта дуг мають нульовий потенціал. При цих умовах вираз напруженості електричного поля (4) приймає вигляд:

$$E(Z^*) = \frac{1}{R} \frac{\sum_{i=2}^n C_{i-1} (Z^*)^{n-i}}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}}. \quad (6)$$

Структура електричного поля симетрична відносно дуги L_k , що має потенціал V_{0k} , тому симетричні коефіцієнти мають бути однаковими: $C_1=C_{n-1}$, $C_2=C_{n-2}$ і т.д. При цьому кількість невідомих коефіцієнтів зменшується до $N=n/2$ при парному значенні n та $N=(n+1)/2$ при непарному значенні n .

Після виконання симетризації граничних умов відносно осі дуги L_k і з врахуванням наведеного вище, вираз (6) прийме вигляд:

$$\dot{E}(Z)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{R} Z^{* \frac{n-1}{2}} \frac{\sum_{i=1}^N C_i \left\{ Z^{* \frac{n-i}{2}} e^{j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1)} + Z^{* \frac{n+i}{2}} e^{-j \left(\frac{n-i}{2} \right) \frac{2\pi}{n} (k-1)} \right\}}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_1 + 1}}. \quad (7)$$

На граничному колі змінна $Z = t = \exp(j\varphi)$. Підставляючи значення t в (7) замість Z і використовуючи перетворення Ейлера, одержимо вираз напруженості електричного поля на граничному колі:

$$E_\varphi(t)_k = \frac{(-1)^{k-1}}{R} \sqrt{2} \times \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cos(n/2 - i) [\varphi - 2\pi(k-1)]}{\sqrt{\cos n\varphi - \cos n\varphi_1}}. \quad (8)$$

Вираз (8) використовується для визначення невідомих коефіцієнтів C_i . Це відбувається шляхом інтегрування $E_\varphi(t)_k$ у межах вузлів $b_k a_{k+1}$, різниця потенціалів між якими відома. Оскільки кількість таких проміжків становить N , то кількість лінійних незалежних рівнянь, з яких визначаються N невідомих коефіцієнтів C_i , також дорівнює N . Система рівнянь порядку N для визначення невідомих коефіцієнтів C_i записується так:

$$\sum_{i=1}^N C_i \sin i \frac{\pi}{n} (2p-1) P_{-i/n}(\cos n\varphi_2) = \frac{nVb_{k+p-1}a_{k+p}}{2\pi}, \quad (9)$$

де $P_{-i/n}(\cos n\varphi_2)$ – функція Лежандра порядку $(-i/n)$; $p = 1, 2, \dots, N$. У цій системі кожне рівняння визначається цілим числом p , яке змінюється від 1 до N і лише перше рівняння, для якого $p=1$, має праву частину, тобто $V_{0k} \neq 0$, в решті рівнянь, для яких $p>1$, права частина дорівнює нулю. Детальне математичне обґрунтування цих виразів викладено раніше у [2].

Вищу ступінь однорідності електричного поля у внутрішній частині області z ($r < R$) можна досягти, забезпечивши рівномірне обертання поляризації електричного поля. Це можливо, якщо забезпечити синхронізоване живлення усіх електродів гармонійною напругою зі зміщенням фази, що відповідає кутовому положенню відповідного електрода на колі:

$$V_{0k} = V_{0m} \sin[\Omega t + (k-1) 2\pi/n], \quad (10)$$

де Ω – колова частота напруги живлення електродів. Це призведе до того, що картина розподілу поля між електродами буде обертатися з частотою Ω , що актуально при обробленні дисперсних об'єктів продовгуватої форми.

Оскільки $C_i = V_{0k} F_i$, а $F_i = -n/2\pi \cdot A/A_i \cdot 1/P_{-i/n}(\cos n\varphi_2)$, де A та A_i – відповідно, визначник та алгебраїчне доповнення його i -го елемента. У зв'язку з цим вираз (7) після підстановки в нього (10) та знаходження сумарного поля, що створюється всіма n граничними дугами, тобто після знаходження відповідної суми по k , приймає вигляд:

$$E(Z)_n = \frac{n V_{0m}}{2 R} F_1 \left[\frac{\sin \Omega t (1 + Z^{*(n-2)}) + j \cos \Omega t (1 - Z^{*(n-2)})}{\sqrt{Z^{*2n} - 2Z^{*n} \cos n\varphi_2 + 1}} \right], \quad (11)$$

Розрахунок напруженості електричного поля згідно з виразом (11) свідчить, що при малих значеннях n електричне поле у внутрішній частині області ($r < R$) комплексної площини z суттєво неоднорідне, але при збільшенні n з'являється зона, в якій поле має високу однорідність, що зростає зі збільшенням n . Для показу цього на рис. 3 наведені результати розрахунків $|E(z)|$ в графічній формі для $n=8$. Видно, що при $n=8$ радіус зони однорідності $r_{од} = 0,6R$, тоді як при $n=4$ зона однорідності практично відсутня. З подальшим збільшенням n розмір зони однорідності зростає.

Принцип побудови приладу для опромінення зерна електричним полем високої частоти. Основою пристрою є електродна система, яка має циліндричну форму. Електроди виконані в формі тонких металевих смуг з дуговим поперечним перетином, розташованих у діелектричній оболонці 1, 3 (рис. 4). Діелектрична оболонка (труба), в середині якої знаходиться зерно або інший сипучий матеріал, що підлягає опроміненню, орієнтована вертикально так, що зерно рухається в ній під дією сили тя-

жіння. Розташування електродів у середині суцільного діелектричного циліндра створює умови високої електричної міцності і, відповідно, безпеки при подачі на електроди високої напруги. Електроди мають однаковий розмір, кут між серединами електродів дорівнює $2\pi/n$. Зовні електродна система закрыта металевим екраном 4 [5].

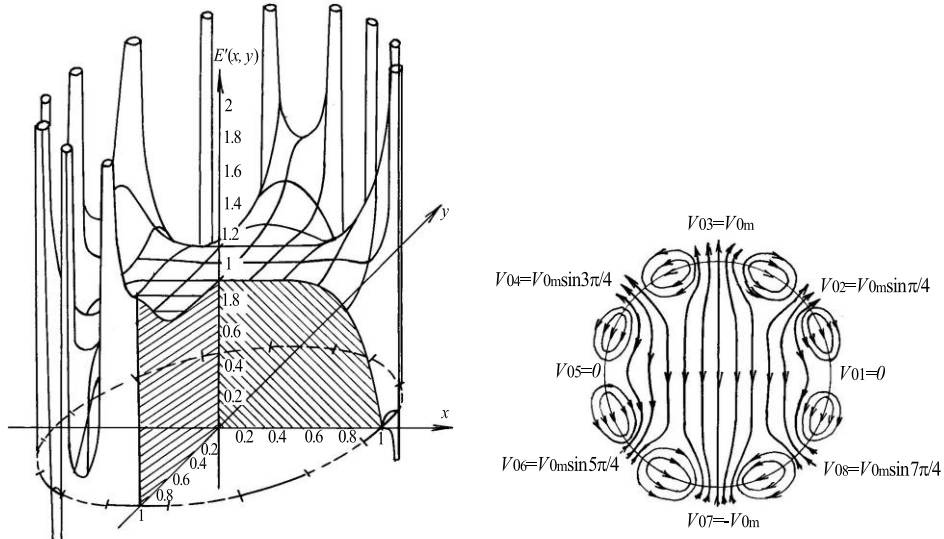


Рис.3. Залежність $|E(z)|$ при $n = 8$

Багатофазний (n -фазний) генератор, що живить електродну систему, має n вихідних блоків, розташованих навколо електродної системи так, що кожний вихідний блок знаходиться безпосередньо за електродом, який ним живиться, в окремій камері 5 і з'єднаний з відповідним електродом кабелем 6. Об'єкт сушіння 7 з вхідного бункера 8 через активну зону надходить у вихідний бункер 9. Швидкість руху об'єкта сушіння і, відповідно, час сушіння регулюються розсувною діафрагмою 10.

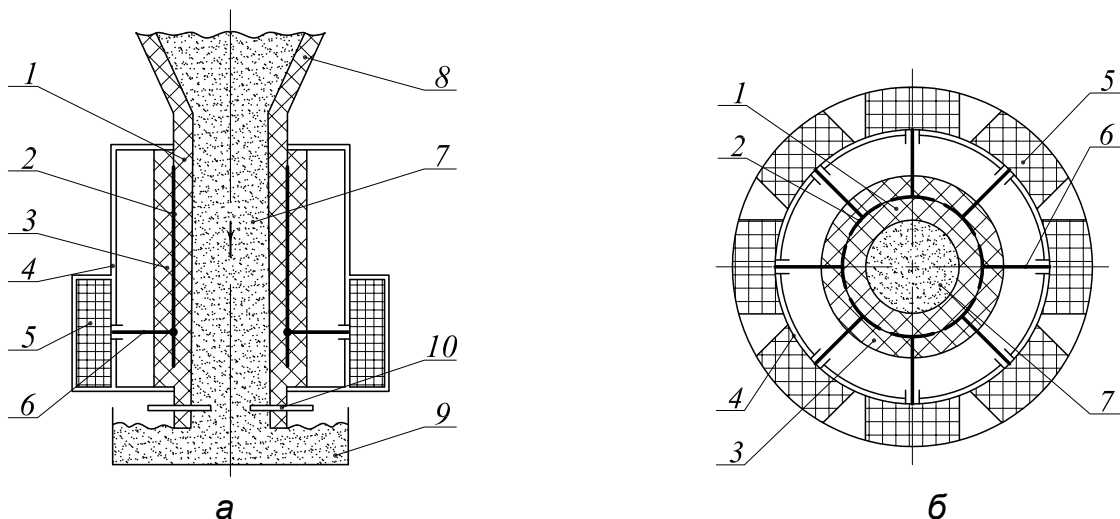


Рис. 4. Пристрій для опромінення зерна електричним полем високої частоти у вертикальному (а) та горизонтальному перетині (б)

Висновки

Для високоякісного процесу сушіння та дезінсекції зерна необхідне забезпечення рівномірного розподілу напруженості електричного поля в зоні взаємодії поля з зерном.

Запропоновано конструкцію камери обробки, що будується на основі циліндричної багатоелектродної багатофазної електродної структури. Доведено, що така конструкція забезпечує в активній камері зону однорідності, розмір якої залежить від кількості електродів так, що чим більше електродів, і, відповідно, фаз, тим більший розмір зони однорідності досягається. Шляхом подачі на кожен електрод гармонічної напруги із зсувом за фазою, рівним куту між сусідніми дугами, можливо забезпечення рівномірного обертання поля, при цьому досягається максимальний розмір зони однорідності поля між електродами.

Багатофазний високовольтний генератор формує вихідні сигнали високої напруги, що мають відповідні фази на кожному електроді. Для забезпечення високої однорідності електричного поля генератор має в своєму складі пристрій контролю і корекції амплітуд та фаз напруги на електродах.

Аналіз розподілу напруженості електричного поля всередині простору, обмеженого багатозв'язною кільцевою границею, виконаний на основі теорії інтегральних сингулярних рівнянь у вигляді задачі спряження. Наведено розрахункові формули для визначення напруженості електричного поля всередині області.

Список літератури

1. Зиньковский Ю.Ф. Задача сопряжения в расчётах напряженности и потенциала электрического поля кольцевой многосвязной структуры / Ю.Ф. Зиньковский, Ю.К. Сидорук, А.В. Голощапов // Известия ВУЗов. Серия «Радиоэлектроника». – 2007. – Т.50, №5. – С. 76–80.
2. Зиньковский Ю.Ф. Напряженность электрического поля в области с кольцевой многосвязной границей и равными длинами граничных дуг / Ю.Ф. Зиньковский, Ю.К. Сидорук, А.В. Голощапов // Известия ВУЗов. Серия «Радиоэлектроника». – 2009. – Т.52, № 1/2. – С. 14–22.
3. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – СПб: Лань, 2002. – 688 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения: Граничные задачи теории функций и некоторые их приложения к математической физике / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1968. – 512 с.
5. Пат. 69812 Україна А01С 1/00. Установка для сушки зерна та інших сипучих матеріалів електромагнітним полем високої частоти / Сидорук Ю.К.; заявл. 21.11.2011, опубл. 10.05.2012, Бюл.№ 9.
6. Черепнев А. Использование импульсного электромагнитного излучения для обеззараживания зерновой смеси / А. Черепнев, И. Черепнев, Г. Ляшенко // Зб. наук. праць ХУПС. – 2008. – Вип. 2. – №17. – С.53–55.
7. Mishenko A. Complex high-frequency technology for protection of grain against pests / A. Mishenko, O. Malinin, V. Rashkovan, A. Basteev et al.// JMPEE. – 2000. – Vol. 35. – No.3. – P. 179–184.

8. Nelson S.O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control // Transactions of the ASAE. – 1996. – Vol.39. – No.4. – P. 1475–1484.

9. Rajagopal V. Disinfestation of stored grain insects using microwave energy: a thesis of doctor of philosophy / V. Rajagopal. – Manitoba, 2009. – 197 p.

Доказана целесообразность применения электрического поля высокой частоты для сушки и дезинсекции зерна. Предложен принцип построения установки для облучения зерна и других сыпучих материалов электрическим полем высокой частоты на основе многофазной многоэлектродной структуры. Используя теорию интегральных сингулярных уравнений в виде задачи сопряжения, рассчитано распределение напряженности электрического поля внутри камеры.

Электрическое поле, высокая частота, сушка, дезинсекция, интегральные сингулярные уравнения.

The usefulness of high-frequency electric field for drying and disinfestation of grain is proven. The construction principles of systems for irradiation of grain and other bulk materials with the high frequency electric field base on a multiphase multi-electrode structure is suggested. By using the theory of singular integral equations in the form of the conjugation problem the distribution of the electric field inside the chamber is calculated.

Electric field, high frequency, drying, disinfestation, singular integral equations.

УДК 621.324

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАНЕСЕННЯ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ НА РОСЛИНИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

**Г. Б. Іноземцев, доктор технічних наук
С. Д. Ващишин, аспірант***

Досліджено процеси нанесення живильних розчинів з низьким питомим об'ємним опором на рослини. Показано значні переваги індукційного методу зарядки краплин у технологічному процесі електростатичного нанесення живильних розчинів. Встановлено лінійну залежність зміни часу стікання електричного заряду з краплин живильних розчинів від їх питомого об'ємного опору.

Електричний заряд, електричне поле, діелектрична проникність, електропровідність, питомий об'ємний опір, індукційна, контактна зарядка, осадження краплин, рослина.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Г.Б. Іноземцев.