

01.01.77]. – М.: Изд-во стандартов, 1977 . – 7 с.

13. Соединения контактные электрические. Правила приемки и методы испытаний: ГОСТ 17441-84. – [Чинний від 29.11.84]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 199 с.

14. Теплофізичні випробування матеріалів. Терміни та визначення: ДСТУ Б А.1.1-6-94. – [Чинний від 10.01.94]. – К.: Держкоммістобудування України, 1994. – 34 с.

15. Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом. Загальні технічні вимоги: ДСТУ 2838-94. – [Чинний від 01.01.96]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 14 с.

Приведено задание, разработана программа для комплексного исследования электромагнитных пускателей с новыми композиционными материалами и приведены методики проведения экспериментальных исследований для обеспечения повышения эффективности и эксплуатационной надежности электромагнитных пускателей сельскохозяйственных электроустановок.

Электромагнитный пускатель, экспериментальные исследования, контактный материал, показатель надежности, контактное нажатие, переходное сопротивление, электрический износ, стойкость к свариванию.

Given task , a program for the integrated study of electromagnetic starters with new composite materials and methods are given for experimental research to improve the efficiency and operational reliability of electromagnetic starters agricultural installations.

Electromagnetic starter, experimental research, contact material, the reliability index, contact pressure, the contact resistance, the electric wear, resistance to welding.

УДК 631.563.2

ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПІВ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НВЧ-ТЕХНОЛОГІЙ

***С.Г. Білик, І.В. Калиній, кандидати технічних наук
В.Я. Бунько, А.П. Марисюк, старші викладачі
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»***

Наведено основні принципи сушіння зерна, які слід використовувати при оптимізації конструктивних параметрів, синтезі технологічних схем і виборі режимів сушіння зерна. Досліджено вплив коефіцієнта

конвективного теплообміну на динаміку нагріву зерна за допомогою НВЧ-технологій.

Коефіцієнт конвективного теплообміну, коефіцієнт конвективної дифузії, надвисока частота, температура, НВЧ поле, процес сушіння, волога, теплота, агент сушіння, конвективне сушіння, парціальний тиск.

Під час збирання врожаю ми отримуємо зерно з надлишковим вмістом вологи. Вологе зерно не підлягає тривалому зберіганню, оскільки швидко псується. Своєчасно і правильно проведена процедура сушіння не лише підвищує стійкість зерна при зберіганні, але й сприяє покращенню його якості, прискоренню дозрівання зерна, вирівнюванню зернової маси за вмістом вологи (на рівні кондиційного значення) і міри зрілості (на рівні повної стиглості), поліпшенню кольору і зовнішнього вигляду, призупиненню життєдіяльності мікроорганізмів і шкідників.

Мета дослідження – обґрунтування принципів конвективного сушіння зерна із використанням електромагнітного поля надвисокої частоти.

Матеріали та методика досліджень. З точки зору властивостей провідності, зерновий шар є діелектриком, і при потраплянні в поле НВЧ піддається нагріванню, інтенсивність якого залежить від багатьох параметрів. Тому, досліджується не тільки процес діелектричного нагріву, а вплив НВЧ на зміну поля вологовмісту і поля температур у зернівці, як це вплине на інтенсифікацію сушіння зерна в установках активного вентилявання.

Стан зерна, яке піддається діелектричному нагріву в НВЧ полі, прийнято описувати системою диференціальних рівнянь, одним із основних членів яких є коефіцієнт конвективного теплообміну.

Результати досліджень. Отримана залежність коефіцієнта конвективного теплообміну (коефіцієнта дифузії пари) дозволяє виконувати порівняльні розрахунки різних режимів НВЧ нагріву в активній зоні.

Широко розповсюджене теплове сушіння зерна. Сорбційне (контактне) сушіння застосовують як допоміжний елемент в деяких сушарках (при сушінні фуражного зерна), а механічне збезводнення (віджимання, центрифугування) зернових відходів – на деяких борошномельних підприємствах [4].

Теплове сушіння пов'язано з обов'язковим перетворенням рідини на парі, на що витрачається теплова енергія. Нині серед способів теплового сушіння найбільшого поширення набуло конвективне сушіння зерна, при якому як теплоносій (сушильний агент) використовується нагрітий газ, що подається в сушильну камеру, для підведення теплоти до зерна і який відводиться з неї для видалення поглиненої ним пари вологи, що виділяється із зерна.

Конвективне сушіння – це випаровування вологи з поверхні зерна в сушильну камеру. При цьому, очевидно, необхідний процес перенесення цієї вологи із зерна на його поверхню. Теплота, що підводиться сушильним агентом (тепломасоносієм), витрачається не лише для випаровування вологи, але і для нагрівання зерна, нагрівання вологи до температури випаровування, перегріву утвореної пари.

Процес конвективного сушіння зерна є складним процесом, котрий являє собою результуючу зовнішню динаміку великого числа внутрішніх досить простих, добре вивчених, одночасно протікаючих і впливаючих один на одного процесів тепло- і вологообміну:

- подачу сушильного агента (і кількості теплоти, що міститься в ньому) в зони сушильної камери;
- перенесення теплоти від сушильного агента до зерна через його поверхню;
- перенесення вологи усередині зерна;
- випаровування вологи з поверхні зерна;
- поглиблення поверхні випаровування всередину зерна;
- перенесення вологи з поверхні зерна в середовище сушильної камери;
- поглинання пари вологи сушильного агента;
- відведення відпрацьованого сушильного агента (і поглиненої ним кількості пари вологи).

Однією з умов правильно організованого сушіння зерна є обов'язкове подальше охолодження його до температури, близької до температури зовнішнього повітря (що не перевищує її більш ніж на 5 °С).

Для зберігання на склад можна закладати лише зерно з кондиційними параметрами за вологістю, чистотою і температурою.

Коефіцієнт конвективного теплообміну (конвективної дифузії пари) відіграє важливу роль в обґрунтуванні процесів тепло- і вологопереносу, в тому числі і при НВЧ обробці. Визначення чисельно величини цього коефіцієнта – один із вагомих етапів розрахунку НВЧ сушіння зерна.

Стан продукту, який підлягає діелектричному нагріву в НВЧ полі, описується системою диференціальних рівнянь [2,3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 \theta + \frac{\varepsilon}{c \cdot r} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c \cdot \rho_o}; \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha_{m_2} \nabla^2 U + \alpha_{m_2} \delta_2 \nabla^2 \theta + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = \alpha_p \nabla^2 P + \frac{\varepsilon}{c_v} \frac{\partial U}{\partial \tau}, \end{cases} \quad (1)$$

де ε – коефіцієнт фазового перетворення рідина-пара; ρ_o – густина сухої речовини взірця, кг/м³; α_{m_2} – коефіцієнт дифузії рідини, м²/с; c – питома теплоємність взірця, Дж/кг·°С; δ_2 – відносний коефіцієнт термодифузії; α_p – коефіцієнт конвективної дифузії; P – надлишковий тиск у взірці, Па; c_v – ємність взірця відносно вологого повітря. r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; Q_v – потужність внутрішніх джерел теплоти, Вт.

Коефіцієнт конвективної дифузії пари (α_p) може бути визначений за допомогою експериментальних кривих релаксації надлишкового тиску пари в зернівці.

Для нагріву зернового шару необхідно відзначити дві особливості:

- а) швидкість зміни температури зернового шару набагато менша

швидкості зміни температури в одній зернівці;

б) швидкість зміни тиску парів всередині зернівки значно більша швидкості зміни температури. Інтенсивність НВЧ нагріву характеризується величиною критерію Померанцева $P_o(\tau)$.

У цьому випадку [2]:

$$P_o(\tau) = \frac{2(\Theta_{ц}-\Theta_{п})}{\Theta_c} - \frac{r\rho_s c_v R^2}{\lambda \cdot \Theta_c} \left[\frac{\partial P}{\partial \tau} - a_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right], \quad (2)$$

де $\Theta_{ц}$ – температура центральної точки тіла, °С; $\Theta_{п}$ – температура поверхні тіла, °С; Θ_c – середня температура тіла в інтервалі часу Δt , для якого

визначається величина $\frac{\partial P}{\partial \tau}$, °С; x – відстань від центра зернівки, м; R – визначальний розмір матеріалу (для зерна – радіус зернівки), м.

Криві розподілу надлишкового тиску (рис.1) можуть бути апроксимовані в першому наближенні формулою [3]:

$$P = P_{ц} \left[1 - A \left(\frac{x}{l} \right)^2 + B \left(\frac{x}{l} \right)^4 \right], \quad (3)$$

де $P_{ц}$ – тиск пари в центрі зернівки, Па.

Звідки, для центра зернівки:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -P_{ц} \frac{2A}{R^2}, \quad (4)$$

де $A = \frac{1}{1 - \frac{1}{6} \left(\frac{l}{x} \right)_n}$, $\left(\frac{l}{x} \right)_n$ – відстань до точки згину кривої $P = f \left(\frac{x}{R} \right)$, м; B – коефіцієнт.

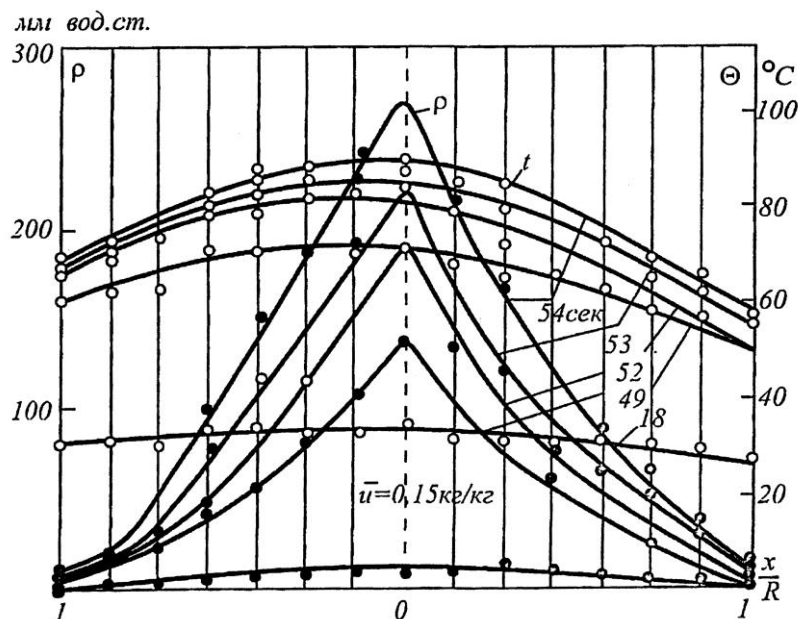


Рис.1. Криві зміни тиску пари і температури при НВЧ нагріві

Приймаючи $x=0,45R$, а $l=1$, отримаємо $\left(\frac{l}{x} \right)_n = 2,222$.

$$A = \frac{1}{1 - \frac{1}{6} \cdot 2,222} = 1,588$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -P_y \frac{3,176}{R^2} \quad (5)$$

З врахуванням, що $P_0 = \frac{Q_v \cdot R^2}{\lambda \cdot T_c}$, і підставивши (2) в (1) отримаємо:

$$\frac{Q_v R^2}{\lambda \cdot \theta_c} = \frac{2(\theta_{ц} - \theta_{п})}{\theta_c} - \frac{r \rho_z R^2 c_v}{\lambda \cdot \theta_c} \left[\frac{dP}{d\tau} + a_p P_y \frac{3,176}{R^2} \right] \quad (6)$$

Звідки

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{2(\theta_{ц} - \theta_{п})\lambda - Q_v R^2}{r \rho_z R^2 c_v} - 3,176 a_p \frac{P_{ц}}{R^2} \quad (7)$$

де $Q_v = 0,556 \cdot 10^{-10} E^2 f \varepsilon t g \delta$; Q_v – кількість тепла, яке виділяється в матеріалі, Вт/м³; E – напруженість електричного поля, В/м; f – частота коливань, Гц; ε – діелектрична проникність матеріалу; $t g \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

r – теплота пароутворення, кДж/кг; ρ_z – густина зерна, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності зерна, $\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{с}^\circ\text{C}}$; c_v – ємність тепла відносно вологого повітря, $c_v = \frac{1}{P_H}$, Па⁻¹; P_H – тиск пари матеріалу при даному вологовмісті, Па.

Щоб вирішити диференційне рівняння (5) та отримати залежність $P=f(\tau)$ необхідно прийняти початкові умови $P(0)$.

Перед НВЧ сушінням шару зерна, який не продувається примусово повітрям, між зерном і повітрям міжзернового простору встановлюється стан гігromетричної рівноваги. Тому, можна прийняти, що $P(0)=P_H$. Для вологості зерна 20 % і температурі нагріву зерна 20 °С тиск насиченої пари P_H при температурі рідини, яка випаровується становить 2327,5 Па [3]. Тиск пари матеріалу буде таким:

$$P_H = W_{0,3} P_H = 0,2 \cdot 2327,5 = 465,50 \text{ Па.}$$

$$c_v = \frac{1}{P_H} = 0,0021; \quad P(0)=465,5 \text{ Па.}$$

У результаті вирішення рівняння (5) отримаємо:

$$P(\tau) = \frac{2\lambda(\theta_{ц} - \theta_{п}) - Q_v R^2 - 3,176 a_p P_{ц} r \rho_z c_v}{r \rho_z c_v R^2} \tau + 465,5. \quad (8)$$

$$P(\tau) = \frac{2\lambda(\theta_{ц} - \theta_{п}) - Q_v R^2 - 3,176 a_p P_{ц} r \rho_z c_v}{r \rho_z c_v R^2} \tau + c1. \quad (9)$$

Цей вираз дозволяє отримати зміну тиску пари в центрі зернівки при її НВЧ нагріві.

При припиненні дії НВЧ енергії настає релаксація надлишкового тиску пари в середині зернівки. В цьому випадку при припущенні, що $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$, диференціальне рівняння переносу пари перетвориться в рівняння, ана-

логічне рівнянню Фур'є [3], $\frac{\partial P}{\partial \tau} = \alpha_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$.

Із теорії теплопровідності вирішення цього рівняння має такий вигляд:

$$P(x, \tau_1) = \cos\left(\frac{\pi x}{2R}\right) e^{-\tau_1 \frac{\alpha_p \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \frac{2}{R} \int_0^R P_y \left(1 - 1,588 \left(\frac{x}{R}\right)^2 + 0,588 \left(\frac{x}{R}\right)^4\right) \cos\left(\frac{\pi x}{2R}\right) dx. \quad (10)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$P(x, \tau_1) = 0,9492 P_{ц_0} e^{-\tau_1 \frac{\alpha_p \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \cos\left(\frac{\pi x}{2R}\right). \quad (11)$$

Для центра зернівки:

$$P(\tau_1) = P_{ц_0} e^{-\tau_1 \cdot 0,25 \cdot \frac{\alpha_p \pi^2}{R^2}}, \quad (12)$$

де $P_{ц_0}$ – парціальний тиск у центрі зернівки в момент припинення дії НВЧ поля, Па; τ_1 – час, який відраховується з моменту припинення дії НВЧ енергії.

Прийmemo, що при зростанні тиску пари в зернівці при його обробці НВЧ і при релаксації тиску можливі моменти часу τ , коли величини цих тисків збігаються $P(\tau) = P(\tau_1)$. Тому, записавши спільно рівняння (9) та (12) отримаємо систему, вирішуючи яку можна знайти залежність $\alpha_p = f(Q, R, \tau, \lambda \dots)$

$$\begin{cases} P(\tau) = \frac{2\lambda(\Theta_{ц} - \Theta_n) - Q_v R^2 - 3,176 \alpha_p P_{ц} r \rho_3 c_v}{r \cdot \rho_3 \cdot c_v \cdot R^2} \tau + c1; \\ P(\tau_1) = P_{ц_0} e^{-\tau_1 \cdot 0,25 \cdot \frac{\alpha_p \pi^2}{R^2}}. \end{cases} \quad (13)$$

Вирішуючи систему відносно α_p , отримаємо:

$$\alpha_p = -0,0037 \left(\frac{-1081 \cdot \text{lambert} w[-0,1156 \tau_1 \pi^2 P_{ц_0} \exp(-0,1156 \tau_1 \pi^2 \cdot (2\tau \lambda \cdot (\Theta_n - \Theta_{ц})) + R^2(\tau Q_v - c1 r' \rho_3 c_v)) + r' \rho_3 c_v R^2 \tau P_{ц}] / \tau P_{ц}}{r' \rho_3 c_v \tau P_{ц} \tau_1 \pi^2} \right) \quad (14)$$

де *lambert w* – функція Ламберта, яка визначена як залежність знаходження x трансцендентного рівняння $w e^w = x$ від параметра w , який входить у рівняння.

Температури $\Theta_{ц}$ і Θ_n можуть бути знайдені з виразу (7):

$$\Theta = \Theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Q_v R^2 (-1)^n}{\lambda \pi^3 n^3} \sin\left(\frac{\pi n}{R} x\right) (e^{K_p \tau} - 1), \quad (15)$$

де Θ_0 – вихідне значення температури зерна, °C; K_p – коефіцієнт розділу,

$K_p = \left(\frac{\pi n}{\beta R}\right)^2$; $\beta = \frac{1}{\sqrt{a}}$; a – коефіцієнт температуропровідності.

При визначенні $\Theta_{ц} I_{x=0}$ використовують спрощений вираз:

$$\Theta_{ц} = \Theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2 n^2} (-1)^n (e^{K_p \tau} - 1) \quad (16)$$

Або при $n=1$

$$\Theta_{ц} = \Theta_0 + \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2} - \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2} e^{K_p \tau} \quad (17)$$

При $x = R$ і $n = 1$ вираз (14) буде виглядати так:

$$\Theta_n = \Theta_0 + \frac{2Q_v R^2 (-1)^n}{\lambda \pi^2 n^2} \sin \pi (e^{K_p \tau} - 1) \quad (18)$$

або

$$\Theta_n = \Theta_0 + \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2} \sin \pi e^{K_p \tau} - \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2} \sin \pi \quad (19)$$

Оскільки $\sin \pi = 0$, то $\Theta_n = \Theta_0$, тому для розрахунків приймаємо $x = 0,9R$. Тоді (17) запишеться так:

$$\Theta_n = \Theta_0 - \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2 0,9} \sin(0,9\pi) + \frac{2Q_v R^2}{\lambda \pi^2 0,9} \sin(0,9\pi) e^{K_p \tau}; \quad (20)$$

$$\Theta_n = \Theta_0 + 0,687 \frac{Q_v R^2 (e^{K_p \tau} - 1)}{\lambda \pi^2} \quad (21)$$

Криві зростання і релаксації тиску наведено на рис.2.

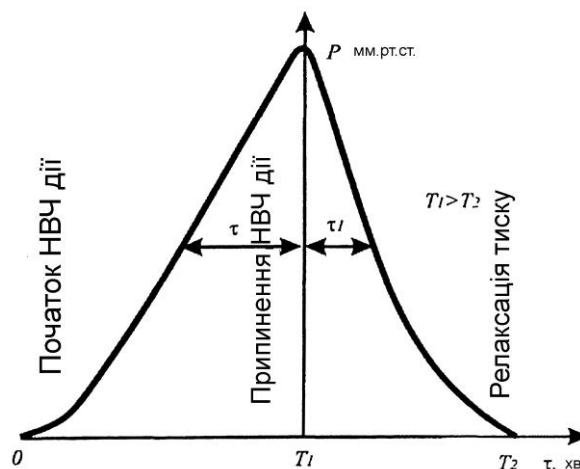


Рис.2. Динаміка зміни тиску парів у зерні при НВЧ нагріві

Висновки

Зерно, як об'єкт сушіння, є колоїдним капілярно-пористим тілом складної структури. Сушіння зерна – складний нестационарний нелінійний динамічний процес з розподіленими за довжиною, висотою і шириною сушильної камери параметрами. Отримана функціональна залежність $a_p = f(Q, R, \tau, \lambda \dots)$ дозволяє якісно оцінити вплив коефіцієнта конвективного теплообміну на динаміку НВЧ нагріву і показує, що величина конвективного теплообміну змінюється в певному діапазоні.

Список літератури

1. Билько М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.
2. Бородин И.Ф. Изменение всхожености семян зерновых культур под влиянием СВЧ-обработки / И.Ф. Бородин, С.В. Вендин, А.Д. Горин. // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1993. - №2. – С. 92–95.
3. Бородин И.Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / Бородин И.Ф., Шарков Г.А., Горин А.Д. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 56 с.
4. Жидко В.И. Зерносушение и зерносушилки / Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. – М.: Колос, 1982. – 239 с.

Приведены основные принципы сушки зерна, которые следует использовать при оптимизации конструктивных параметров, синтезе технологических схем и выборе режимов сушки зерна. Исследовано влияние коэффициента конвективного теплообмена на динамику нагрева зерна с помощью СВЧ-технологий.

Коэффициент конвективного теплообмена, коэффициент конвективной диффузии, сверхвысокая частота, температура, СВЧ поле, процесс сушки, влага, теплота, агент сушки, конвективная сушка, парциальное давление.

The basic principles of grain drying, which can be used in the optimization of the design parameters, the synthesis of technological scheme and selecting of modes of the grain drying are shown. The influence of convective heat transfer, coefficient on the dynamics of grain heating using microwave technology are investigated.

Coefficient of convective heat transfer, coefficient of convective diffusion, ultra-high frequency, temperature, microwave field, the process of drying, moisture, heat, drying agent, convective drying, partial pressure.

УДК 697.1+621.311(075.8)

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ У ПРИМІЩЕННЯХ НАВЧАЛЬНОГО КОРПУСУ №8 НУБІП УКРАЇНИ ПІСЛЯ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЛІ

***А.В. Міщенко, О.В. Шеліманова, кандидати технічних наук
Є. О. Антипов, аспірант****

Визначено величини температур внутрішнього повітря в окремих приміщеннях корпусу №8 після виконання робіт з термомодернізації будівлі. Виявлено вирівнювання розподілу температур внутрішнього по-

* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець.

А.В. Міщенко, О.В. Шеліманова, Є. О. Антипов, 2014