

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО НАГРІВУ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Використання енергії електромагнітних хвиль для теплової обробки діелектричних матеріалів має великі переваги у порівнянні з традиційними методами. Найважливіші з них – це значне підвищення швидкості нагріву, відсутність зовнішніх нагрівачів, зниження енергоємності технологічного обладнання.

Поведінка діелектричних матеріалів в електромагнітному полі розглядалась багатьма авторами [1, 2]. Але часто матеріал піддається дії механічних факторів, які суттєво змінюють його фізико-механічні і електричні характеристики. Це необхідно враховувати при аналізі режимів нагріву.

Електромагнітні явища, які відбуваються в діелектричному середовищі під впливом електромагнітного поля, описуються відомим рівнянням Максвелла [3]:

$$\frac{\varepsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial J_q}{\partial t} = \frac{1}{\mu} [\nabla E - \nabla(\nabla \cdot E)], \quad (1)$$

Для визначення температурного поля доцільно скористатися рівнянням теплопровідності:

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -J_\tau + f, \quad (2)$$

де  $f$  - щільність теплових джерел;  $c_p$  - теплоємність середовища;  $\rho_0$  - щільність середовища.

Щільності потоків заряду і тепла можна описати за допомогою рівнянь:

$$J_q = \lambda(E - \lambda_A^* \nabla n); J_\tau = -k \nabla T, \quad (3)$$

де  $\lambda$  - питома електрична провідність середовища;  $\lambda_A^*$  - коефіцієнт питомої амбіполярної провідності;  $k$  - коефіцієнт теплопровідності.

При протіканні електричного струму через середовище відбувається його нагрівання за рахунок ефекту Джоуля. Кількість теплоти, що виділяється при цьому, визначається доданками функції

$$f = |J_q \cdot E| + \alpha \varepsilon_0 \left| E \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \right|, \quad (4)$$

де  $\alpha = \varepsilon - 1$  - діелектрична сприйнятливості матеріалу.

Приймемо, що щільність  $\rho$  в початковий момент часу дорівнює нулю і, як показано в роботі, в такому випадку надалі може вважатися незмінною. Для середовища з нульовою щільністю об'ємного заряду рівняння (1, 2) можуть бути подані таким чином [4]:

$$\frac{\varepsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \lambda \left( E - \lambda_A^* \frac{\partial n}{\partial x} \right) \right] = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \left| \left( E - \lambda_A^* \frac{\partial n}{\partial x} \right) E \right| + \alpha \varepsilon_0 \left| E \frac{\partial E}{\partial t} \right|. \quad (6)$$

Рівняннями (5,6) описується нагрів діелектричного середовища, розміщеного між двома металевими електродами, побудованими за принципом конденсатора.

При виконанні технологічних операцій волого-теплової обробки, нанесення аплікації, з'єднанні деталей швейних виробів, матеріали піддаються механічному навантаженню. Прикладання механічних зусиль до матеріалу змінює три параметри запропонованої моделі, а саме, відстань між електродами, щільність матеріалу внаслідок стискування та діелектричну проникність через видалення з матеріалу частини повітря. В реальних умовах зміна цих параметрів суттєво змінює режим нагрівання, тому при проведенні розрахунків їх необхідно приймати до уваги.

Орієнтовні розрахунки, проведені для середовища з параметрами  $\varepsilon=6$ ;  $\mu=1$ ;  $\lambda = 1 \times 10^{-12} \left( \frac{1}{\text{Ом} \times \text{м}} \right)$ ;  $l = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$ ;

$\rho = 80 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  при частоті електромагнітного поля 1 і 10 МГц та тиску на матеріал 20 і 100 кПа показали наступне:

- збільшення тиску електродів на матеріал прискорює нагрів;
- підвищення частоти електромагнітного поля підвищує інтенсивність нагріву;
- основний внесок у нагрів матеріалу доводиться на діелектричну складову, вплив омичної складової малий.

### Література

1. P. Perre, I.W. Turner. A complete coupled model at the combined microwave and convective drying of softwood in an oversized waveguide // Drying '96 – Proceedings of the 10<sup>th</sup> Int. Symposium (IDS'96), Krakow, Poland, 30 July – 2 August 1996, v. A, p. 183-184.
2. В.Г. Ренне. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969, 592 с.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика, т.8. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982, 526 с.
4. А.И. Шваб. Новые интегральные операторы rot-1, div-1, grad-1. // Электричество, 1994, №4, с. 59-67.