

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

К. т. н. О. В. Алексашин¹, Ю. В. Штефура², д. т. н. К. Л. Шевченко³

¹Одеська національна академія харчових технологій;

²Київський національний університет технологій та дизайну;

³Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Україна

autom1@meta.ua

Розглянуто модель взаємодії теплових та електромагнітних полів при термічній обробці діелектричних матеріалів. Показано можливість інтенсифікації процесів термічної обробки при комбінованому впливі теплового та електромагнітного поля. Отримані результати можуть використовуватись при проектуванні обладнання для термічної обробки діелектричних матеріалів.

Ключові слова: термічна обробка, теплове поле, електромагнітне поле, моделювання.

В багатьох галузях промисловості при обробці матеріалів та напівфабрикатів використовуються термічний вплив на матеріал. Ефективність теплового впливу при конвекційному та контактному нагріві вкрай низька внаслідок специфіки процесів теплопередачі, розсіювання теплової енергії та ін. В той же час перспективним є використання електромагнітної енергії для термічної обробки діелектричних матеріалів. Основні переваги електромагнітного нагріву — значне підвищення швидкості нагрівання, відсутність зовнішніх нагрівачів, зниження енергоємності обладнання [1].

Метою даного дослідження є моделювання процесу нагріву діелектричних матеріалів при поєднанні традиційних методів нагріву з впливом енергії електромагнітних полів та оцінка шляхів інтенсифікації процесів термічної обробки.

Поведінка діелектричних матеріалів в електромагнітному полі розглядалась багатьма авторами (наприклад, [2, 3]). Одним із підходів при рішенні задач нагріву діелектричного середовища є аналіз еквівалентних схем заміщення на основі елементів з зосередженими ємністю, індуктивністю. Діелектричні втрати чи зміни діелектричної проникності речовини визначаються експериментально. Такий підхід ускладнює моделювання температурних полів при виникненні подвійного електричного шару на межі розподілу середовищ з різними електричними властивостями. Крім того, в процесі термічної обробки матеріал часто піддається дії механічних факторів, які суттєво змінюють його фізико-механічні і електричні характеристики, що необхідно враховувати при аналізі режимів нагріву.

Розглянемо процес нагріву діелектричного середовища, розташованого між двома металевими електродами, побудованими за принципом конденсатора.

Для визначення температурного поля доцільно скористатися рівнянням теплопровідності

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -J_\tau + f, \quad (1)$$

де c_p , ρ_0 — теплоємність та щільність середовища відповідно; f — щільність теплових джерел.

Електромагнітні явища, які відбуваються в непровідному середовищі під впливом електромагнітного поля, описуються відомими рівняннями Максвелла:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + J_q = \nabla \times H; \quad \nabla \cdot D = \rho; \quad -\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E; \quad \nabla \cdot B = 0, \quad (2)$$

де ρ — щільність об'ємного заряду; J_q — потік заряду; $D = \epsilon \epsilon_0 E$ — електричний зсув, пропорційний напруженості електричного поля; $B = \mu \mu_0 H$ — магнітна індукція, пропорційна напруженості магнітного поля; ϵ , μ — відповідно, діелектрична і магнітна проникності середовища.

Оскільки досліджуване середовище є діелектриком, з системи рівнянь (1) виключимо згідно з [4, 5] напруженість магнітного поля. Рівняння для напруженості електричного поля при цьому буде мати вигляд

$$\frac{\varepsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial J_q}{\partial t} = \frac{1}{\mu} [\nabla E - \nabla(\nabla \cdot E)] \quad (3)$$

Щільність потоків заряду і тепла можна описати за допомогою рівнянь

$$J_q = \lambda(E - \lambda_A^* \nabla n); \quad J_r = -k \nabla T, \quad (4)$$

де λ — питома електрична провідність середовища; λ_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

$$f = |J_q \cdot E| + \alpha \varepsilon_0 \left| E \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \right|, \quad (5)$$

де α — діелектрична сприйнятливність матеріалу, $\alpha = \varepsilon - 1$.

Початкові умови при нагріванні діелектрика за використання плоских металевих електродів мають наступний вигляд:

$$T(x,0) = T_0; \quad E(x,0) = 0; \quad \frac{\partial E(x,0)}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

де T_0 — початкова температура середовища.

Чисельний розв'язок системи рівнянь, отриманих за наведеними умовами, показав наступне:

— інтенсивність нагрівання зростає при підвищенні тиску електродів на матеріал та при підвищенні частоти опромінюючого електромагнітного поля;

— внесок омичної складової у нагрівання дуже малий, основну роль у підвищенні температури матеріалу відіграє діелектрична складова нагрівання.

Наведений підхід до моделювання процесу комбінованого нагріву показав його перспективність для подальшого розвитку технологій термічної обробки діелектричних матеріалів та дослідження їх характеристик. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні режимів роботи обладнання для термічної обробки діелектричних матеріалів легкої, хімічної та харчової промисловості.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Скрипник Ю.А., Шевченко К.Л., Горкун В.В. Повышение эффективности микроволнового оборудования для тепловой обработки диэлектрических материалов / 13-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, Севастополь. — 2003. — С. 707 – 709.
2. Perre P., Turner I.W. A complete coupled model at the combined microwave and convective drying of softwood in an oversized waveguide // Drying'96 – Proceedings of the 10th Int. Symposium (IDS'96). — Poland, Krakow. — 1996. — Vol. A. — P. 183—184.
3. Ренне В.Г. Электрические конденсаторы. — Ленинград: Энергия, 1969, 592 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. — Москва: Наука, 1982.
5. Гринчик Н.Н. Диффузные явления в электролитах // ИФЖ. — 1993. — Т. 64, № 5. — С. 610—617.

O. V. Aleksashin, Yu. V. Shtefura, K. L. Shevchenko

Modeling of heat treatment dielectric materials

The authors consider the model of the interaction of thermal and electromagnetic fields during thermal processing of dielectric materials. The possibility of intensification of heat treatment processes under the combined influence of the thermal and electromagnetic fields is shown. The results obtained can be used in the design of equipment for the heat treatment of dielectric materials.

Keywords: thermal treatment, thermal field, electromagnetic field, modeling.