

## АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 620.179

## АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В НЕПРОВІДНИХ МАТЕРІАЛАХ ПРИ ВПЛИВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

<sup>1)</sup>Шевченко К. Л., <sup>1)</sup>Яненко О. П., <sup>2)</sup>Штефура Ю. В.<sup>1)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна<sup>2)</sup>Київський Національний університет технологій та дизайну, м. Київ, УкраїнаE-mail: [autom1@meta.ua](mailto:autom1@meta.ua)

Розглянуто процес нагрівання непровідних матеріалів під впливом електромагнітного поля в умовах зміни механічного навантаження на матеріал. Запропонована аналітична модель, яка враховує взаємодію електричних та теплових полів, які виникають при обробці непровідних матеріалів в електромагнітному полі. Наведені результати чисельного моделювання режимів нагрівання. Отримані результати можуть використовуватись при проектуванні обладнання для термічної обробки капілярно-пористих матеріалів та вдосконалення режимів його роботи.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, непровідний матеріал, нагрівання.

**Вступ**

Використання електромагнітної енергії для теплової обробки непровідних матеріалів має великі переваги у порівнянні з традиційними методами. Найважливіші з них – це значне підвищення швидкості нагрівання, відсутність зовнішніх нагрівачів, зниження енергоємності технологічного обладнання [1]. Завдяки цьому енергія електромагнітних хвиль все частіше використовується при волого-тепловій обробці виробів з капілярно-пористих матеріалів, нанесенні декоративних аплікацій, з'єднанні деталей різного призначення та ін. Поведінка діелектричних матеріалів в електромагнітному полі розглядалась багатьма авторами [2, 3]. Одним із прийнятих на сьогоднішній день підходів при рішенні задач нагрівання діелектричного середовища є розгляд та аналіз еквівалентних схем заміщення на основі використання елементів з зосередженими параметрами.

У якості таких параметрів використовують ємність, індуктивність, діелектричні втрати чи зміни діелектричної проникності речовини. Як правило, зазначені параметри визначаються експериментально. Такий підхід викликає певні труднощі при моделюванні температурних полів, що значно зростають при виникненні подвійного електричного шару на границі розділу середовищ, які мають суттєво різні електричні властивості. У зазначених випадках еквівалентні схеми заміщення включають додаткові зосереджені параметри, наприклад, такі, як поверхнева ємність і поверхневий опір.

Крім того, в процесі теплової обробки матеріал як правило піддається дії механічних факторів, які суттєво змінюють не тільки фізико-механічні, а і електричні характеристики матеріалу, що необхідно враховувати при аналізі режимів нагрівання.

**Постановка задачі**

Розглянемо процес нагрівання непровідного середовища, розташованого між двома металевими електродами, побудованими за принципом конденсатора.

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

$$\frac{\partial D}{\partial t} + J_q = \nabla \times H; \nabla \cdot D = \rho;$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E; \nabla \cdot B = 0, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність об'ємного заряду;  $J_q$  – потік заряду;  $D = \varepsilon \varepsilon_0 E$  – електричний зсув, пропорційний напруженості електричного поля;  $B = \mu \mu_0 H$  – магнітна індукція, пропорційна напруженості магнітного поля;  $\varepsilon$  і  $\mu$  – відповідно, діелектрична і магнітна проникності середовища.

Оскільки досліджуване середовище є діелектриком, із системи рівнянь (1) відповідно до [4, 5], виключимо напруженість магнітного поля, після чого одержимо рівняння для напруженості електричного поля:

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

Використання рівняння (2) дає можливість зменшити кількість феноменологічних коефіцієнтів порівняно з випадком роздільного опису потоків заряджених часток в електромагнітному полі.

### Основна частина

Для визначення температурного поля доцільно скористатися рівнянням теплопровідності:

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -J_\tau + f, \quad (3)$$

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

Щільності потоків заряду і тепла можна описати за допомогою рівнянь:

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

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

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

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

Прийемо, що щільність об'ємного заряду  $\rho$  в початковий момент часу дорівнює нулю і, як показано в роботі [6], в такому випадку надалі може вважатися незмінною. Для середовища, що задовольняє зроблене допущення в одномірному вигляді рівняння (2, 3) можуть бути подані таким чином:

$$\frac{\varepsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \lambda \left( E - \lambda_A^* \frac{\partial n}{\partial x} \right) \right] = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}; \quad (6)$$

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \left[ \left( E - \lambda_A^* \frac{\partial n}{\partial x} \right) E \right] + \alpha \varepsilon_0 \left| E \frac{\partial E}{\partial t} \right|. \quad (7)$$

Розглянемо нагрівання діелектричного середовища, розміщеного між двома металевими електродами, побудованими за принципом конденсатора. Нагрівання діелектрику може бути описане за допомогою рівнянь, наведених в [2].

Початкові умови при нагріванні діелектрику (9, 10) при використанні плоских металевих електродів мають такий вигляд:

$$T(x,0) = T_0; \quad E(x,0) = 0; \quad \frac{\partial E(x,0)}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

де  $T_0$  – початкова температура середовища.

Будемо вважати, що на межах діелектричного

матеріалу виконується умова теплоізоляції, тобто

$$k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = -k \frac{\partial T(l,t)}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

де  $l$  – товщина діелектричного середовища.

Крайові умови для рівняння (6) мають вигляд

$$E(0,t) = E(l,t) = E_0, \quad (10)$$

де  $E_0$  – напруга на металевих пластинах.

Потоки, описувані виразами (4) є початковими і граничними умовами, які доповнюючи систему (6, 7) визначають початково-крайову задачу, за допомогою якої описується взаємодія електричних і теплових полів в діелектричному середовищі.

Співвідношення для нормальної і дотичної складових векторів  $D$  і  $E$  має вигляд:

$$\varepsilon_2 \varepsilon_0 E_{n2} - \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_{n1} = \sigma; \quad E_{t1} = E_{t2}. \quad (11)$$

При плоскому одномірному контакті впливом поверхневих струмів можна знехтувати відповідно до роботи [7]. Тоді струм провідності на межі розподілу середовищ буде визначатися умовою

$$J_{q2} - J_{q1} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t}. \quad (12)$$

Після диференціювання за часом першої рівності з (11) і з урахуванням співвідношення (12) одержимо умову рівності повних струмів на межі розподілу:

$$J_{q1} + \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial E_1}{\partial t} = J_{q2} + \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{\partial E_2}{\partial t}. \quad (13)$$

Наведене рівняння є наслідком закону збереження заряду, внаслідок чого залишається справедливим і для випадку, коли метал стикається з діелектриком. Однак, на відміну від контакту однорідних середовищ, при плоскому контакті метал-діелектрик необхідно враховувати струм зсуву і струм, зумовлений амбіполярною дифузією. Для цього випадку з урахуванням (4) одержимо:

$$\lambda_1 E_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial E_1}{\partial t} = \lambda_2 \left( E_2 - \lambda_A^* \nabla n \right) + \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{\partial E_2}{\partial t}. \quad (14)$$

При виконанні технологічних операцій волого-теплової обробки, нанесення аплікації, з'єднанні деталей виробів з пластику, матеріали піддаються механічному навантаженню, яке приводить до суттєвої зміни режимів нагрівання. Зумовлено це декількома факторами. Більшість діелектричних матеріалів, над якими виконуються згадані операції, можуть бути віднесені до класу капілярно-пористих. Капілярно-пористі матеріали являють собою складні у структурному відношенні багатокомпонентні системи, які складаються власне з матеріалу, вологи, що міститься в капілярах та міжкапілярному просторі у різних формах, заповнених повітрям порожнин, розчинених солей та нерозчинних включень. Діелектрична проникність капілярно-пористого матеріалу визначається змістом кожного з компонентів і може бути підрахована за допомогою, наприклад, формули Ліхтенекера для  $n$ -компонентної статистичної суміші

[11]. При обробці матеріалу до металевих електродів, між якими створюється електромагнітне поле, прикладається механічне зусилля, необхідне для виконання технологічної операції. Матеріал стискується та зменшується його товщина. Зменшення товщини обумовлене як еластичними властивостями матеріалу, так і частковим видаленням повітря з матеріалу. Таким чином, прикладення механічних зусиль до матеріалу одночасно 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.

Для числового розв'язку задачі доцільно використати метод кінцевих різниць. Нехай ділянкою моделювання буде прямокутник  $[0 \leq x \leq l] \times [0 \leq t \leq t_k]$ , де  $t_k$  – кінцевий час подання напруги на металеві пластини. У виділеній ділянці моделювання побудуємо просторову та часову сітку вузлів з постійними кроками  $h$  та  $\tau$  відповідно. Для спрощення подальших позначень приймемо  $y$ , як наближене значення  $E$ , а  $z$  – як наближене значення  $T$  у вузлах сітки. Після апроксимації диференціальних операторів їх різницеви аналогами, як запропоновано в [10], для початково-краєвої задачі, що розглядається, отримаємо таку різницеву схему:

$$\left(\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\right)y_{ii} + \mu\mu_0\lambda_0 = \bar{y}_{xx}; \quad (15)$$

$$c_p\rho_0z_0 = (k\bar{z}_x)_x + \lambda\bar{y}^2 + \alpha\varepsilon_0|\bar{y}y_0|; \quad (16)$$

$$z(x,0) = T_0; \quad y(x,0) = 0; \quad (17)$$

$$c_p\rho_0z_0 = \frac{k\bar{z}_x}{0,5h} + \lambda\bar{y}^2 + \alpha\varepsilon_0|\bar{y}y_0|; \quad x = 0; \quad (18)$$

$$c_p\rho_0z_0 = -\frac{k\bar{z}_x}{0,5h} + \lambda\bar{y}^2 + \alpha\varepsilon_0|\bar{y}y_0|; \quad x = l; \quad (19)$$

$$y(0,t) = y(i,t) = E_0, \quad (20)$$

де  $\bar{y} = \frac{\hat{y} - y}{2}$ ;  $\bar{z} = \frac{\hat{z} + z}{2}$ , а їх значення на першому часовому шарі знаходять відповідно до роботи [9].

Розв'язок отриманої системи рівнянь знаходять методом прогонки.

Орієнтовні розрахунки, проведені для діелектричного середовища з параметрами  $\varepsilon = 6$ ;  $l = 5 \times 10^{-3}$  м;  $\mu = 1$ ;  $\lambda = 1 \times 10^{-12}$  ( $1/O_M \times M$ );

$\rho = 80 \frac{Kz}{M^3}$  при частоті електромагнітного поля 1 і 10 МГц та тиску на матеріал 20 і 100 кПа наведені на рис. 1.

Аналіз результатів модельних розрахунків показав наступне:

- при підвищенні тиску електродів на матеріал інтенсивність нагрівання підвищується;

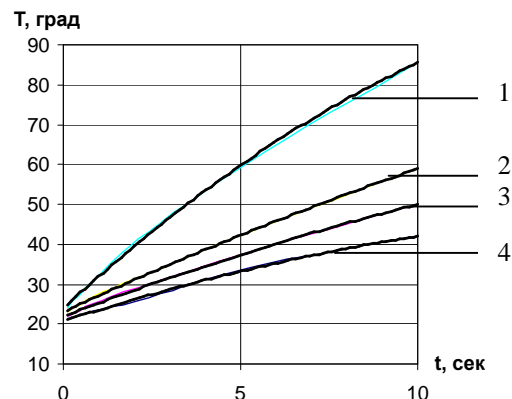


Рис. 1. Графік нагрівання діелектричного матеріалу за різних значень впливових факторів: 1 – частота 10 МГц, тиск 100 кПа; 2 – частота 1 МГц, тиск 100 кПа; 3 – частота 10 МГц, тиск 20 кПа; 4 – частота 1 МГц, тиск 20 кПа

- підвищення частоти опромінюючого електромагнітного поля також приводить до підвищення інтенсивності нагрівання;
- вплив омичної складової нагрівання дуже малий, основний внесок у підвищення температури матеріалу доводиться на діелектричну складову нагріву нагрівання.

### Висновки

Запропонована модель може бути використана при проектуванні обладнання для теплової обробки капілярно-пористих матеріалів та вдосконалення режимів його роботи. Проведене моделювання може мати перспективу для подальшого використання та дослідження параметрів капілярно-порожнинних матеріалів, легкої та хімічної промисловості, деяких параметрів виробів харчового призначення тощо.

### Література

1. Скрипник Ю. А. Повышение эффективности микроволнового оборудования для тепловой обработки диэлектрических материалов / Ю. А. Скрипник, К. Л. Шевченко, В. В. Горкун // 13-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», 8 – 12 сентября, 2003, Севастополь. С. 707 – 709.
2. 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.

3. Ренне В. Г. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969. – 592 с.
4. Ландау Л. Д. Теоретическая физика, т.8. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 526 с.
5. Гринчик Н. Н. Диффузные явления в электролитах // ИФЖ. – 1993. – т. 64, №5. – С. 610-617.
6. Шваб А. И. Новые интегральные операторы  $\text{rot-1}$ ,  $\text{div-1}$ ,  $\text{grad-1}$ . 1 // Электричество. – 1994. – №4. – С. 59-67.
7. Шваб А. И. Новые интегральные операторы  $\text{rot-1}$ ,  $\text{div-1}$ ,  $\text{grad-1}$ . 2 / А. И. Шваб, Ф. Имо // Электричество, 1994. – №5. – С. 55-59.
8. Стреттон Дж. А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1948. – 812 с.
9. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 642 с.
10. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
11. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. // ЖТФ. – 1951. – т. XXI, вып. 6.

УДК 620.179

<sup>1</sup>К. Л. Шевченко, <sup>1</sup>А. Ф. Яненко, <sup>2</sup>Ю. В. Штефура<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», г. Київ, Україна;<sup>2</sup>Київський Національний університет технологій і дизайну, г. Київ, Україна

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрен процесс нагрева непроводящих материалов под воздействием электромагнитного поля в условиях изменения механической нагрузки на материал. Предложена аналитическая модель, учитывающая взаимодействие электрических и тепловых полей, возникающих при обработке непроводящих материалов в электромагнитном поле. Приведены результаты численного моделирования режимов нагрева. Полученные результаты будут полезны при проектировании оборудования для термической обработки диэлектрических материалов и оптимизации режимов его работы.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, непроводящий материал, нагрев.<sup>1</sup>K.L. Shevchenko, <sup>1</sup>A.F. Yanenko, <sup>2</sup>Yu.V. Shtefura<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;<sup>2</sup>National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine

## ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES DYNAMICS IN NON-CONDUCTING MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

**Introduction**

The use of electromagnetic energy for heat treatment of non-conductive materials has a lot of advantages over traditional methods. The most important ones are a significant increase in the heating rate, the absence of external heaters, and the reduction of the energy intensity of process equipment.

**Problem Statement**

The process of heating non-conductive materials under the influence of an electromagnetic field under conditions of a change in the mechanical load on the material is considered.

**Main part**

An analytical model of the processing nonconducting materials in electromagnetic field that takes into account the interaction of electric and thermal fields arising is proposed. The results of numerical modeling of heating regimes are presented. The influence of frequency and pressure on heating of concrete dielectric material was studied. A positive effect on the increase in the intensity of heating of the dielectric material with an increase in the external pressure and frequency of the electromagnetic field is noted.

**Results**

The proposed model can be used in the design of equipment for heat treatment of capillary-porous materials and improvement of its modes of operation. The simulation can have a perspective for further use and research of parameters of capillary-cavity materials, light and chemical industry, some parameters of food products, etc.

**Key words:** electromagnetic radiation, nonconductive material, heating.Надійшла до редакції  
16 жовтня 2017 рокуРецензовано  
27 жовтня 2017 року

© Шевченко К. Л., Яненко О. П., Штефура Ю. В., 2017