

ÎNCĂLZIREA UNIFORMĂ A MATERIALELOR UMEDE ÎN CÂMP DE MICROUNDE PROGRESIVE

L. IVANOV*, T. SAJIN**

* UNIVERSITATEA TEHNICĂ din Moldova, Chișinău, ** UNIVERSITATEA din Bacău

Abstract. The heat transfer in partial filled with treated material waveguide is analysed. The conditions of uniform heat treatment at high efficiency of installation are determined.

Notății

- a – coeficientul de difuzie termică, [m^2/s];
 a, b – lățimile pereților ghidului de unde cu secțiune dreptunghiulară, [m];
 c – căldura specifică, [$\text{J}/(\text{kg K})$];
 H – componenta magnetică a intensității câmpului electromagnetic, [A/m];
 k – constantă de undă determinată pentru componentele respective conform lucrării [1], [m^{-1}];
 l – lungimea ghidului de microunde, [m];
 Nu – criteriul Nusselt;
 Q_V – puterea termică specifică a surselor interioare de căldură, [W/m^3];
 r – raza secțiunii transversale ghidului de unde coaxial, [m];
 s – grosimea peretelui ghidului de unde, [m];
 T – temperatura absolută, [K];
 x, y, z – coordonate carteziene, [m];
 α – coeficient de atenuare, [m^{-1}], coeficient de convecție, [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];
 $\text{tg}\delta$ – tangenta unghiului de pierderi dielectrice; ε – permisivitatea dielectrică absolută, [F/m];
 $\varphi(x, y, z, \tau)$ – funcție adimensională de coordonate și timp; λ – lungimea de undă, [m], coeficientul de conducție termică, [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]; $\pi \approx 3,14$; ρ – densitatea, [kg/m^3]; τ – timpul, [s].

Indici

- d – referitor la dielectric; G – referitor la ghidul de unde; $n, m, p = 1, 2, 3, \dots$ – indici de sumare pe coordonate; p – referitor la peretele ghidului de unde; V – volumic; x, y, z , – indicii componentelor intensităților câmpului electromagnetic; 0 – valoarea inițială; 1 – referitor la aer; 2 – referitor la materialul tratat termic; în exteriorul picăturii; ∞ – la infinit.

1. INTRODUCERE

La tratamentul termic al diverselor materiale în câmp de microunde sau de înaltă frecvență, spre exemplu, în procesele de uscare și decongelare, caracteristicile electrofizice ale acestora variază în mod esențial, ce conduce la redistribuția energiei oscilațiilor electromagnetice în volumul materialului tratat. Această redistribuție are un caracter aperiodic și conduce la încălzirea neuniformă a materialului umed.

În această lucrare sunt determinate condițiile de încălzire uniformă a materialelor umede în ghiduri de microunde cu secțiune transversală dreptunghiulară.

2. DETERMINAREA LUNGIMII OPTIMALE DE UNDĂ PENTRU ÎNCĂLZIREA UNIFORMĂ A MATERIALULUI

Una din condițiile încălzirii uniforme poate fi definită fără a soluționa problema cu valori inițiale și finale a conducției termice. În acest scop este necesar ca puterea specifică a surselor interioare de căldură $Q_V = \text{const}$. Variația în perioada de încălzire a mărimii Q_V pe seama dependenței $k_z [\varepsilon'_2(T), \text{tg} \delta_2(T)]$ poate fi reglată prin variația grosimii profilului ghidului neregular de unde. Soluționarea problemei [1, 2] permite determinarea lungimii optimale de undă a generatorului.

Spre exemplu, în ghidurile de unde coaxiale și cvasicoaxiale, pentru absorbția uniformă a energiei în raport cu unghiul φ , este necesar ca în ghidul G să se propage de la generator o undă cu lungimea care respectă condiția:

$$\lambda > \pi \cdot (r_1^G + r_2^G) \quad (1)$$

Lungimea optimală de undă într-un ghid cu secțiune dreptunghiulară cu strat absorbant pe peretele lat, la propagarea undei $H_{1,0}$, poate fi determinată cu relația:

$$Q_V = Q_{V0} \cdot \varphi(x, y, z, \tau), \quad (2)$$

în care

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, \tau) = & \left[k_x^2 |k_{y2}|^2 \sin k_{y2} (b_2 + \right. \\ & \left. + y) \right]^2 \cos^2 k_x x + \left[k_x^2 + k_z^2 \right]^2 \cos k_{y2} (b_2 + \\ & \left. + y) \right]^2 \sin^2 k_x x + \left| k_z \right|^2 \left| k_{y2} \right|^2 \sin k_{y2} (b_2 + \\ & \left. + y) \right|^2 \sin^2 k_x x \cdot \exp(-2\alpha \cdot z). \end{aligned} \quad (3)$$

Repartiția $Q_V/Q_{V0} = \varphi(x, y)_{z=\text{const}}$ într-un ghid de unde cu secțiune dreptunghiulară pentru valorile $\varepsilon'_2 = 30$; $\text{tg} \delta_2 = 0,5$; $\varepsilon'_1 = 1$; $\text{tg} \delta_1 = 0$ este reprezentată grafic pentru un ghid cu dimensiunile $a \times b = 90 \times 45 \text{ mm}$ (fig. 1). Pentru $\lambda \approx \sqrt{2} \cdot a$ se observă o repartiție practic uniformă a degajării de căldură cu excepția unui strat subțire care aderă la peretele metalice al ghidului de unde

cu lățimea mai mare. Gradul de uniformitate a acestei repartiții este cu atât mai înalt, cu cât mai bine se realizează inegalitatea $|\varepsilon_2| >> 1$, adică cu cât unda propagată tinde mai mult către cvasiunda $H_{1,0}$ și $|E_{y2}| \rightarrow 0$. În acest caz relația (2) poate fi scrisă sub forma:

$$Q_V = Q_{V0} \cdot k_x^2 |k_{y2}|^2 |\sin k_{y2}(b+y)|^2. \quad (4)$$

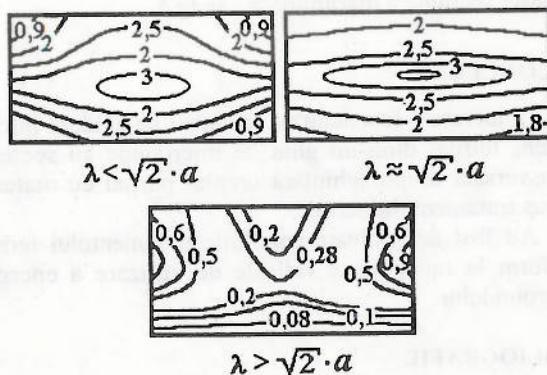


Fig. 1. Repartitia $Q_V / Q_{V0} = \varphi(x, y)_{z=\text{const}}$ într-un ghid unde cu secțiune dreptunghiular și dimensiunile $a \times b = 90 \times 45 \text{ mm}$.

Atunci, când $|\varepsilon_2| >> 1$, schimbul de căldură între mediul aerian și materialul tratat poate fi descris cu ajutorul ecuației:

$$\begin{aligned} Nu_y \sim & |k_z|^2 \sin^2 k_x x + |k_x|^2 \sin^2 k_z z \sim \\ & \sim 2 |k_z|^2 \sin^2 k_z z, \end{aligned}$$

deoarece $k_x^2 = k_z^2$.

3. CÂMPUL DE TEMPERATURĂ ÎN GHIDUL DE MICROUNDE CU SECȚIUNE TRANSVERSALĂ UMPLUT PARȚIAL CU MATERIAL UMED

Vom considera în continuare problema determinării regimului termic într-un ghid de unde cu secțiune dreptunghiulară, umplut parțial cu material umed (fig. 2).

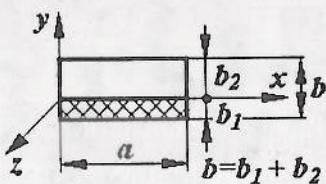


Fig. 2. Schema de calcul a ghidului de unde parțial umplut.

Ecuația conducției termice, cu care se determină câmpul de temperatură și în care coeficienții termofizici se consideră constanți, se scrie sub forma [3, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = & a \cdot \nabla^2 T(x, y, z, \tau) + \\ & + \frac{Q_V(x, y, z, \tau)}{c\rho}. \end{aligned} \quad (5)$$

În momentul inițial temperatura materialului este egală cu temperatura mediului ambiant:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z). \quad (6)$$

Să admitem că în exterior schimbul de căldură cu mediul ambiant are loc conform legii lui Newton:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot T(x, y, z, \tau). \quad (7)$$

La frontieră $x = 0, y = -b_2, z = 0, -l$ are loc contactul termic direct între pereții ghidului de unde, adică se realizează condiția la limită de speță a patra:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=-b_2} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=-b_2}. \quad (8)$$

Considerând că valoarea coeficientului de conducție termică a peretelui λ_p este mare, iar complexul $s \cdot \alpha / \lambda_p \ll 1$, condiția la limită (8) se simplifică.

Soluția ecuației conducției termice (5) cu condițiile de unicitate (6)-(8) este următoarea:

$$T(x, y, z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} T_{nmp}(\tau) X_n(x) Y_m(y) Z_p(z), \quad (9)$$

în care

$$X_n(x) = \cos \lambda_{1n} x - \frac{\alpha}{\lambda_d \cdot \lambda_{1n}} \sin \lambda_{1n} x;$$

$$Y_m(y) = \cos \lambda_{2m} y - \frac{\alpha}{\lambda_d \cdot \lambda_{2m}} \sin \lambda_{2m} y;$$

$$Z_p(z) = \cos \lambda_{3p} z - \frac{\alpha}{\lambda_d \cdot \lambda_{3p}} \sin \lambda_{3p} z;$$

$$T_{nmp}(\tau) = \frac{1}{c_d \rho_d} \int_0^a \int_{-b_2}^0 \int_{-l}^0 \varphi_{nmp} \cdot \exp[-\lambda_{nmp}^2 a_d (\tau - \tau_0)] \cdot d\tau + T'_{nmp} \cdot \exp(-\lambda_{nmp}^2 a_d \tau);$$

$$\varphi_{nmp} = \frac{\int_0^a \int_{-b_2}^0 \int_{-l}^0 Q_V(x, y, z, \tau) X_n(x) Y_m(y) Z_p(z) dx dy dz}{\int_0^a \int_{-b_2}^0 \int_{-l}^0 X_n^2(x) Y_m^2(y) Z_p^2(z) dx dy dz};$$

$$T'_{nmp} = \frac{\int_0^a \int_{-b_2}^0 \int_{-l}^0 T_0(x, y, z, \tau) X_n(x) Y_m(y) Z_p(z) dx dy dz}{\int_0^a \int_{-b_2}^0 \int_{-l}^0 X_n^2(x) Y_m^2(y) Z_p^2(z) dx dy dz};$$

$$\lambda_{nmp}^2 = \lambda_{1n}^2 + \lambda_{2m}^2 + \lambda_{3p}^2,$$

în care $\lambda_{1n}, \lambda_{2m}, \lambda_{3p}$ sunt rădăcinile ecuațiilor transcen-

$$\operatorname{tg} \lambda_{1n} a = \frac{\frac{2\alpha}{\lambda_d \lambda_{1n}}}{1 - \left(\frac{\alpha}{\lambda_d \lambda_{1n}} \right)^2};$$

$$\operatorname{tg} \lambda_{2m} b_2 = \frac{\frac{\alpha}{\lambda_d \lambda_{2m}} + \frac{\alpha_0}{\lambda_d \lambda_{2m}}}{1 - \frac{\alpha \cdot \alpha_0}{\lambda_d^2 \cdot \lambda_{2m}^2}};$$

$$\operatorname{tg} \lambda_{3p} l = \frac{\frac{2\alpha}{\lambda_d \lambda_{3p}}}{1 - \left(\frac{\alpha}{\lambda_d \lambda_{3p}} \right)^2},$$

iar $n, m, p = 1, 2, 3, \dots$

Valoarea coeficientului de convecție α_0 se determină în conformitate cu temperatura medie a suprafeței materialului și ghidului de unde, ca lungime caracteristică folosindu-se grosimea stratului de aer deasupra materialului.

Pentru creșterea uniformității tratamentului termic și a randamentului instalației, este necesar ca ghidul de unde să aibă pereți cât mai subțiri și să se asigure o termoizolare bună a acestuia de mediul ambiant. Reprimarea fluxurilor convective din spațiul aerian al ghidului, situat deasupra materialului, poate fi obținut prin umplerea acestuia cu dielectric având valoare mică a factorului de pierderi dielectrice $\operatorname{tg} \delta$. În acest caz $\alpha_0 = 0$ și problema se simplifică.

La determinarea puterii surselor interioare Q_v , este suficient să se țină seama doar de cvasiunda $H_{1,0}$ care are amplitudine maximă pentru grosimea optimală a stratului încălzit. Cu cât este mai mic intervalul de timp τ , cu atât mai precis poate fi calculată relația $T_{mp}(\tau)$. De faptul, că în secțiunea transversală a materialului câmpul de temperatură nu este strict staționar, se poate ține seama la calculul temperaturii în fiecare interval ulterior de timp τ prin introducerea valorilor medii în această secțiune a mărimilor ε'_2 și $\operatorname{tg} \delta_2$.

4. CONCLUZII

În lucrare a fost analizat schimbul de căldură într-un sistem format dintr-un ghid de microunde cu secțiune transversală dreptunghiulară umplut parțial cu material supus tratamentului termic.

Au fost determinate condițiile tratamentului termic uniform la randamente ridicate de utilizare a energiei microundelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] IVANOV L., SAJIN T., BERNIC M. *Modelul transferului interconexat de căldură și masă la uscarea materialelor umede în câmp electromagnetic*, Lucrările Conferinței Naționale de Termotehnică, Ediția a IX-a, Craiova, 27–29 mai 1999, Vol. 2, p.163–168.
- [2] IVANOV L., SAJIN T., BRAGIȘ M. *Calculul câmpului de temperatură în materialul congelat cu zonă migratoare de schimb de fază*, Lucrările Conferinței Naționale de Termotehnică, Ediția a X-a, Sibiu, 25–27 mai 2000, Vol. I, Editura Universității „Lucian Blaga”, p.189–192.
- [3] KURANT R., GHILBERT D. *Metodi matematicescoi fizichi*, Nauca, Moscova-Leningrad, 1966.
- [4] KUTATELADZE S.S., BORIȘANSKII V.M. *Spravocinic po teploperedache*, Moscova-Leningrad, 1959.

Noi apariții

