

CALCULUI CÂMPULUI DE TEMPERATURA LA ÎNCĂLZIREA CORPURILOR ÎN CÂMP DE MICROUND

Sandu BELIBOV

Departamentul Inginerie Mecanică, grupa: MIFSC-201, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi

Autorul corespondent: Ivanov Leonid, e-mail: leonid.ivanov@pmai.utm.md

Îndrumător/coordonator științific: Igor GÎDEI, asistent universitar, UTM.

Rezumat: Se prezintă soluția ecuației termice la încălzirea produselor congelate în timp de microunde, care permite calculul câmpului de temperatură în fazele de defrostare și de pregătire a bucatelor calde.

Cuvinte cheie: microunde, defrostare, încălzire, cuptor, produs.

Introducere

În timpul celui de-Al Doilea Război Mondial, a fost inventat magnetronul, un tub care producea microunde. Între anii 1937 – 1940, fizicianul britanic, Sir John Turton Randall, împreună cu o echipă britanică de fizicieni, au construit un magnetron pentru instalațiile radar ale armatelor britanice și americane, pe timpul celui de-Al Doilea Război Mondial. Pe data de 8 octombrie 1945, compania “Raytheon” a depus un brevet pentru procesul de gătit cu ajutorul cuptorului cu microunde. Spencer a plasat un cuptor ce încălzea alimentele cu ajutorul microundelor într-un restaurant din Boston pentru testare. În anul 1947, compania a construit “Radarange”, primul cuptor cu microunde din lume. Acesta avea aproape 1,8 m înălțime, cântărea 340 kg, costa aproximativ 5.000 de dolari și consuma 3 kilowați, aproximativ de trei ori mai mult decât cuptoarele cu microunde de astăzi. Un model comercial rapid, a fost introdus în 1954. Consuma 1600 W și s-a vândut între 2000 – 3000 de dolari. “Raytheon” a licențiat tehnologia de la compania “Tappan Stove” în 1952. În anul 1965 cei de la “Raytheon” a achiziționat compania “Amana”. În 1967, compania a scos pe piață primul cuptor cu microunde pentru uz casnic, faimosul “Countertop Radarange”, la un preț de 495 de dolari, marcând începutul utilizării cuptoarelor cu microunde în bucătării. Microundele generează căldură prin inducerea unei oscilații în moleculele alimentelor, de milioane de ori pe secundă, încălzind din interior spre exterior, nu prin transferul de energie termică de la o sursă de căldură ca un element de încălzire tradițional, încălzire din exterior spre interior. Oscilația este indusă de un tub magnetron care excită moleculele polare de apă din alimente, iar mișcarea lor rapidă generează căldură prin frecare între ele și celelalte molecule din alimente. Această căldură este, în general, limitată la punctul de fierbere al apei, care este mult mai scăzută decât temperatura necesară pentru a prăji sau rumeni alimentele. Există câteva cuptoare hibride care combină atât încălzirea cu microunde, cât și elementele tradiționale de încălzire, atât pentru a rumeni mâncarea, cât și pentru a le încălzi rapid, dar acestea nu sunt foarte frecvente.

Încălzirea cu microunde Fig.1 a diverselor semifabricate alimentare, păstrate, de regulă, în stare congelată, permite a accelera în mod esențial procesul de preparare a hrănilor. Marele avantaj economic îl constituie faptul, ca în orele de vârf ale consumului, atât produse finite, cât și semifabricate preparate preventiv se încălzesc în câmpul de microunde de la starea congelată până la temperatura bucatelor calde. Rezervele produselor consumate sunt reîntregite în perioada cererii minime sau chiar a lipsei ei pe piața de consum, urmărindu-se scopul utilizării uniforme a utilajului de bază și a resurselor de muncă. În acest context combinarea congelatoarelor cu cuptoarele cu microunde permit asigurarea în mod flexibil a cererii în orele de vârf ale consumului.

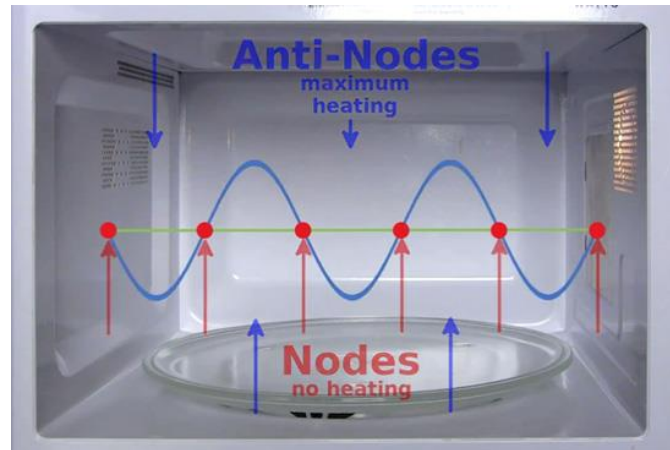


Figura 1 Cuptor cu microunde.

Modelul matematic al procesului de încălzire

Unul din aspectele principale ale procesului tehnologic considerat îl constituie încălzirea (sau defrostarea) produsului congelat în cuptorul cu microunde, care în esență prezintă o incintă radiantă cu volum limitat. Produsul este amplasat în cuptor nemijlocit în câmpul radiatorului (antenei). Incinta funcționează în regimul reflectării interactive a unei electromagnetice de la pereții ei metalici, condiții, în care calculul distribuției densității energiei electromagnetice în interiorul cuptorului, iar prin urmare și soluționarea problemei termice sunt practic imposibile. De aceea proiectarea și definibilitatea construcției sunt bazate pe date experimentale. Însă, dacă dimensiunile liniare ale produsului sunt mai mari decât adâncimea de pătrundere în el a unei electromagnetice, atunci ne putem limita cu determinarea câmpului de temperatura în condiții de incidență normală a unei plane pe un semispațiu. În caz unidimensional problema se reduce la soluționarea ecuației conducției termice sub forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_V(x, \tau)}{c\rho}, \quad (1)$$

cu condiții de univocitate:

$$T(0, \tau) = f(\tau); T(l, \tau) = 0; T(x, 0) = T_0 \quad (2)$$

Intensitatea sursei interioare de căldură $Q(x, \tau)$, incluse în ecuația (1), se determină din relația:

$$Q_V = 0,555 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 f \varepsilon'' \exp(-2\alpha x), \quad (3)$$

În care componenta E a intensității câmpului electromagnetic este data de soluțiile ecuațiilor lui Maxwell, cunoscute pentru cazul considerat sub forma [1].

$$E = E_0 \exp[j(\omega\tau - kx)], \left(k = 2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\lambda^*}} \right);$$

$$H = \frac{E}{z_0}, \left(z_0 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'}} \right);$$

f – este frecvența câmpului; ε' - permitivitatea dielectrică a produsului; ε'' - factorul pierderilor dielectrice; V – volumul produsului; α – coeficientul de absorbție a energiei electromagnetice; E_0 – amplitudinea vectorului intensității electrice a câmpului în punctul $x = 0$; $j = \sqrt{-1}$; ω – frecvența ciclică a câmpului; k – constanta de amortizare a oscilațiilor; λ^* - lungimea de undă; H – componenta intensității magnetice a câmpului.

La defrostare Fig.2 procesul de încălzire este însoțit de schimbarea de fază la punctul crioscopic și de variația bruscă a proprietăților termofizice. Procesul în întregime poate fi divizat convențional în trei faze: 1) încălzirea de la temperatura inițială T_0 până la punctul crioscopic T_{cr} ; 2) dezghețarea produsului la punctul crioscopic T_{cr} ; 3) încălzirea produsului de la punctul crioscopic T_{cr} până la temperatura de consum T_c .



Figura 2 Defrostarea unei bucăți de carne.

Câmpul de temperatură în interiorul produsului la defrostare și încălzirea lui în câmp de microunde

Soluționarea ecuației (1) cu condițiile (2) permite obținerea repartiției temperaturii produsului în fazele 1 și 3. Pentru valori constante ale parametrilor termofizice soluția acestei ecuație, obținute prin metoda surselor punctiforme se scrie sub forma:

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \int_0^l \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \exp \left[\frac{-(x - \xi - 2nl)^2}{4a\tau} \right] - \exp \left[\frac{-(x + \xi + 2nl)^2}{4a\tau} \right] \right\} d\xi \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^{\tau} \frac{f(\tau)}{(t - \tau)^{\frac{3}{2}}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ (x + 2nl) \exp \left[\frac{-(x + 2nl)^2}{4a(t - \tau)} \right] \right\} d\tau \\
 & + \frac{T^*}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{(t - \tau)} \int_0^{\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \exp \left[\frac{-(x - \xi + 2nl)^2}{4a(t - \tau)} \right] \right. \\
 & \left. - \exp \left[\frac{-(x - \xi - 2nl)^2}{4a(t - \tau)} \right] \right\} d\xi, \quad (4)
 \end{aligned}$$

În care pentru prima fază $T^* = T_0$, iar pentru faza a treia $T^* = T_{cr}$ valorile coeficientului de difuzie termică a , căldurii masice c și densității produsului ρ corespund în prima fază caracteristicilor produsului congelat (indicele „c”), iar în faza a treia – caracteristicilor produsului umed dezghețat (indicele „u”); ξ – coordonata sursei punctiforme.

Pentru valori medii constante ale coeficienților $\bar{\alpha} = \frac{(\alpha_i + \alpha_f)}{2}$, $\alpha = \frac{(\alpha_i + \alpha_f)}{2}$ (indicii „i” și „f” sunt respectiv valorile inițiale și finale) și puterii sursei interioare de căldură $Q = Q_0$ și în condiții adiabatică de încălzire soluția se scrie sub forma [2]:

$$\begin{aligned}
 T(x, \tau) = & \frac{Q_0}{4\bar{\alpha}^2 \lambda} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(-\frac{x}{2\sqrt{\bar{\alpha}\tau}} + 2\bar{\alpha}\sqrt{\bar{\alpha}\tau} \right) \right] \exp(4\bar{\alpha}^2 \bar{\alpha}\tau - 2\bar{\alpha}x) \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\bar{\alpha}\tau}} + 2\bar{\alpha}\sqrt{\bar{\alpha}\tau} \right) \right] \exp(4\bar{\alpha}^2 \bar{\alpha}\tau + 2\bar{\alpha}x) \\
 & \left. - \exp(-2\bar{\alpha}x) - 2\bar{\alpha}x \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\bar{\alpha}\tau}} \right) \right] + \frac{4\bar{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\bar{\alpha}\tau} \exp \left(\frac{x^2}{4\bar{\alpha}\tau} \right) \right\}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

în care

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) du \quad [3].$$

Însă, ipoteza condițiilor adiabatică de încălzire conduce apriori la limitarea utilizării rezultatelor obținute.

Pentru straturile îndepărtate de suprafața produsului relația (5) are forma:

$$T = \frac{Q_0}{4\bar{\alpha}^2\lambda} [\exp(4\bar{\alpha}^2\bar{a}\tau) - 1] \exp(-2\bar{\alpha}x). \quad (6)$$

În cazul când transferul de căldură prin conducție este neglijabil, adică pentru condiția $4\bar{\alpha}^2\bar{a}\tau \ll \tau$ soluția are o formă mai și simplă:

$$T = \frac{Q_0}{c\rho} t \exp(-2\bar{\alpha}x). \quad (7)$$

Durata fazei de dezghețare a produsului poate fi determinată din formula lui Planck [4]. Introducând noțiunea de capacitate calorică masică efectivă:

$$c_{ef} = \frac{c_c(T_0 - T_{cr}) + l_v + c_u(T_c - T_{cr})}{T_c - T_0} \quad (8)$$

și operând cu valoarea medie a coeficientului de conducție termică

$$\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_c + \lambda_u), \quad (9)$$

putem determina durata procesului de încălzire din formula (5), substituind în ea relația (8) și (9).

Formula lui Planck, însă, conduce la erori considerabile de calcul al câmpului de temperatura cu surse interioare de căldură. În cazul nostru conducția termică și convecția nu limitează transferul global de căldură, adică transferul interior și exterior. Durata procesului, în general este determinată de puterea sursei interioare de căldură și de dimensiunile produsului, care influențează absorbția energiei câmpului electromagnetic la defrostare. Prin urmare, calculul procesului în întregime cu ajutorul formulei (5), utilizând valorile efective și medii ale proprietățile termofizice are o precizie mai mare la determinarea duratei lui. Însă, calculul câmpului de temperatură a produsului prin utilizarea unei singure formule conduce la o eroare mai mare, decât în cazul determinării pentru fiecare fază în parte. Aceasta se referă mai ales la faza a doua de dezghețare a produsului. Controlul câmpului de temperatura este necesar în faza a treia (finală) în scopul evitării procesului torrențial de încălzire în straturile centrale ale produsului ce este posibil datorită faptului că în procesul real diminuarea acțiunii undei electromagnetice este neomogenă, depinzând de conținutul de umiditate din produs.

Concluzie

Relațiile obținute permit determinarea duratei de defrostare a produsului cu proprietăți termofizice cunoscute, calculul câmpului de temperatura și argumentarea proiectării unor defrostarea rațională ce utilizează energiei.

Referințe

1. SVC ănerghetica (ciasti 2). Pod redacției E. Okressa. Moskva, Mir, 1971.
2. Kurant R., Ghilbert D. Metodi matematicescoi fizichi (tom 1 și 2). Moskva-Leningrad, 1961.
3. Tihonov A.I., Samarskii A.A. Uravnenia matematicescoi fizichi. Moskva, Nauca, 1972.
4. Cijov G.V. Teplofiziceschie proțessi v holodilinoi tehnologii piscevâh productov. Moskva. Piscevaia promâșlenosti, 1971.