TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI MASĂ LA USCAREA PRIN CONVECȚIE CU AJUTORUL UNEI POMPE DE CĂLDURĂ

Leonid IVANOV, Igor GÎDEI, Vasile CARTOFEANU, Ivan COJOCARU

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: *Uscarea este un proces ce necesită cantități mari de energie. Întregul proces de uscare poate fi împărțit în 3 perioade: stabilirea parametrilor regimului de proces, perioada vitezei constante de uscare și perioada de scădere a vitezei de uscare. Sa făcut calculul celor 3 regimuri de uscare bazat pe sistemul de ecuații* А. В. Лыков. *Rezultatele obținute permit distribuirea câmpului de temperaturi și umiditate a produsului pentru o eficientizare a procesului de uscare.*

Cuvinte cheie – *pompă de căldură (PC), transfer de căldură și masă, umiditate, evaporare, sistem de ecuații.*

Introducere

Uscarea produselor este un proces care necesită consum mare de energie. Scăderea costului produsului final se datorează, în mare parte, reducerii costurilor de energie. O modalitate de reducere a costului produsului final este de a utiliza surse de căldură (energie) cu potențial scăzut. În acest sens, în opinia noastră una din direcția cea mai promițătoare este de a utiliza pompa de căldură ca sursă de energie și ca uscător al aerului umed în vaporizatorul mașinii frigorifice. Aerul sau un mediu inert (azot sau alt gaz) pot fi utilizate ca mediu de răcire de la condensator la produs și apoi la evaporatorul mașinii frigorifice. Un element important în această instalație este interacțiunea agentului purtător de căldură cu produsul. Managementul rațional al procesului este posibil numai în cazul când se determină câmpul de temperatură și conținutul de umiditate al produsului uscat.

Materiale și metode

Pentru a rezolva problema, folosim sistemul de ecuații diferențiale parțiale al lui А. В. Лыков, [1]. La soluționarea sarcinii propuse se acceptă o serie de ipoteze: alimentarea energetică internă este absentă, parametrii termofizici sunt constanți (în cazul unei funcții de temperatură iau valorile medii în intervalul de funcționare), presiunea excesivă (de obicei, caracteristică pentru alimentarea internă cu energie sau a proceselor intensive de transfer de căldură și masă) este neglijată. În acest caz, sistemul de ecuații

А. В. Лыков pentru o placă poate fi scris în forma:

Ecuația energiei:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c}\cdot\frac{\partial u}{\partial \tau} \tag{1}$$

Ecuația de masă:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \delta\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \varepsilon\cdot\frac{\partial u}{\partial \tau} \tag{2}$$

Condițiile limită pentru problema simetrică din figura 1 sunt scrise astfel:

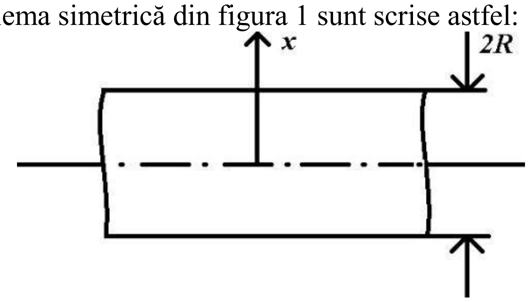

Figura 1

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=R} = -\frac{\alpha}{\lambda}\left(T_n - T_c\right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0 : \mathrm{T}\big|_{x=0} \neq \infty \tag{4}$$

$$T(0,x) = T_n \tag{5}$$

$$u(0,x) = u_n \tag{6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0 : \mathrm{u}\big|_{x=0} \neq \infty \tag{7}$$

$$u\big|_{x=R} = u_n \tag{8}$$

unde : T - temperatura, K ; u - conținutul de umiditate, kg/kg ; a , a_m - coeficienții de conductivitate de căldură și masă, m^2/s ; ε - coeficient de transformare de fază ce determină cantitatea de umiditate eliminată în flux în timpul tranziției de fază; δ - coeficientul termogradient, K^{-1} ; τ - timp, s ; r - căldura latentă din tranziția de fază lichid-vapori, J/kg ;

Întregul proces de uscare poate fi împărțit în 3 perioade [2]: stabilirea parametrilor regimului de proces, perioada vitezei constante de uscare (îndepărtarea umezelii libere) și perioada de scădere a vitezei de uscare.

Luăm în considerare prima perioadă, aceasta poate fi numită perioada de încălzire a produsului până la temperatura specificată tehnologic.

Neglijăm energia care merge la tranziția de fază, luând în considerare acest factor datorită introducerii unei căldurii specifice eficiente. În acest caz, avem legătură cu produsul "uscat" și energia utilizată la evaporare e neglijată.

$$\varepsilon r \frac{\partial u}{\partial \tau} \approx 0$$

Soluția ecuației (1) în acest caz este cunoscută [3] și poate fi înlocuită sub forma:

$$\frac{T_c - T(x,\tau)}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cdot \cos\mu_n} \cdot \cos\mu_n \frac{x}{e} \exp\left(-\mu_n{}^2 \frac{a\tau}{R^2}\right) \tag{9}$$

unde: $ctg\ \mu = \dfrac{\mu^2 - \beta i^2}{2\mu \cdot \beta i}$.

Să analizăm ecuația (9).

Dacă criteriul βi este mic <0,1, atunci soluția poate fi scrisă lăsând primul termen din serie, luând în considerare că $\mu \approx tg\mu$.

$$\frac{T_c - T(x,\tau)}{T_c - T_0} = 1 - \cos\sqrt{\beta i} \cdot \frac{x}{R} \cdot e^{-\frac{a\tau}{R^2} \cdot \frac{\alpha R}{\lambda}} \tag{10}$$

$a\ \mu_1^2 = \beta i$

În acest mod, câmpul conținutului de umiditate din probă se modifică nesemnificativ.

În cea de-a doua perioadă, când viteza de uscare este constantă, umiditatea este aplicată pe suprafață datorită gradientului de umiditate de-a lungul capilarelor, iar coeficientul perioadei de fază este zero, adică , evaporarea provine de la suprafața materialului. Toate acestea permit ca sistemul de ecuații să fie scris în forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 0 = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{12}$$

Condițiile limită pentru uscarea constantă le scriem în a doua categorie:

$$\frac{du}{dx}(1,\tau) = j_m = const \tag{13}$$

unde: $j_m = \left(\dfrac{\beta}{D} u\right)$

Soluția ecuației (12) cu condițiile limită (13) și (7) poate fi scrisă în forma:

$$u_0 - u(x,\tau) = j_m \left[\frac{a_m \tau}{R} - \frac{R^2 - 3x^2}{6R} + R \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n{}^2} \cos\mu_n \frac{x}{R} \cdot \exp\left(-\mu_n{}^2 F_0\right) \right] \tag{13}$$

În esență, soluția (13) este similară soluției non-staționare de transfer a căldurii cu condiții limită de tipul II. Pentru valori mari Fourier sau într-un regim staționar cu un flux de masă constant, putem scrie (13) în forma:

$$u-u(x,\tau)=j_m\left[\frac{a_m\tau}{R}-\frac{R^2-3x^2}{6R}\right] \tag{14}$$

La o viteză de uscare scăzută, atunci când zona de tranziție de fază este adâncită în grosimea produsului, transferul de umiditate are loc la $\varepsilon=1$, iar sistemul de ecuații care descrie procesul de uscare este scris în forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{r}{c}\cdot\frac{\partial u}{\partial \tau} \tag{15}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\delta\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=0 \tag{16}$$

Din ecuația (16) se poate observa că câmpul de temperatură și conținutul de umiditate sunt similare, semnul minus înseamnă că acolo, unde temperaturile sunt ridicate umiditatea este redusă și invers $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}=-\delta\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$.

Integrând și anulând constantele, avem $u=-\delta T$.

Ecuația (14) poate fi transformată în forma:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau}=\frac{a}{\delta\left(\frac{r}{c}+\frac{1}{\delta}\right)}\cdot\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{17}$$

Condițiile limită pentru a treia perioadă vor fi scrise astfel:

$$u(x,0)=u_{k1} \tag{18}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}\Big|_{x=n}=\frac{\beta}{D}u(R,\tau) \tag{19}$$

În cazul în care complexul $a\Big/\delta\left(\frac{r}{c}+\frac{1}{\delta}\right)$ joacă rolul ca și coeficientul de difuzivitate termică și îl vom numi coeficientul efectiv al conductivității de masă termică și îl vom nota $a_{эm}$. Condițiile limită pentru a treia perioadă vor fi scrise astfel:

$$u(x,0)=u_{k1} \tag{18}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,\tau)=hu(0,\tau) \tag{19}$$

unde: $h=\frac{\beta}{D}$

β - coeficient de transfer de masă, $\frac{kg}{m^2\cdot s}$;

D - coeficient de difuzie, $\frac{kg}{m\cdot s}$.

$$u=\frac{1}{2\sqrt{a_{эm}\pi\tau}}\int_0^\infty u_{k1}\left[e^{-\frac{x^2}{4a_{эm}\tau}}-2h\int_0^\infty e^{-\frac{x^2}{4a_{эm}\tau}-hx}\cdot dx\right]dx \tag{20}$$

Concluzii

Ecuațiile (13) și (20) obținute permit determinarea câmpului de umiditate din produsul de uscare și ecuația (9) și (10) câmpul de temperatură în perioada stabilirii parametrilor de proces.

Stabilirea parametrilor optimi de proces permit reducerea costurilor și a materialelor necesare procesului, astfel obținem o eficientizare

BIBLIOGRAFIE

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.
3. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. М.: Наука, 1979. - 685 с.