

ANALIZA PIERDERILOR DE CĂLDURĂ PRIN PEREȚII CUPTORULUI DE COACERE A PÂINII

Corina CHELMENCIUC, Constantin COCIMARI, Nicolai DZERO

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: Lucrarea dată reprezintă o analiză a fluxului de căldură cedat în mediul ambiant prin pereții cuptorului electric de copt pâine BN - 50, prin convecție și radiație. Sunt expuse mărimile care influențează transferul de căldură. Sunt calculate aporturile fiecărui tip de transfer de căldură în pierderile totale de căldură. De asemenea, este expusă influența reducerii acestor pierderi asupra bilanțului energetic al cuptorului. În final sunt propuse câteva măsuri de diminuare a acestor pierderi.

Cuvinte cheie: bilanț energetic, transfer de căldură, convecție, radiație, criterii de similitudine, regim de curgere.

1. Generalități

Cuptorul electric BN-50 este destinat coacerii pâinii la nivel industrial. Pentru coacerea pâinii acesta consumă energie electrică. Energia electrică este transformată în energie termică cu ajutorul încălzitoarelor electrice, a căror putere sumară este de $N_{el} = 326 \text{ kW}$. Schema de principiu a acestuia este prezentată în fig.1.

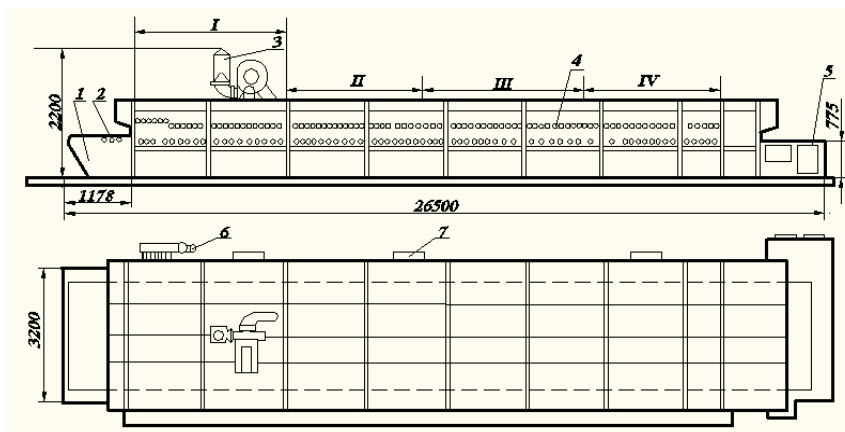


Fig. 1. Schema cuptorului electric BH-50:

- 1- dispozitiv de întindere; 2 - preîncălzire a benzii transportoare; 3 - ventilator pentru evacuarea amestecului de abur-aer; 4 - încălzitor electric; 5 - motor; 6 - introducerea aburului; 7 - fereastră vizor.

Dimensiunile de gabarit ale cuptorului sunt: $l \times L \times h = 3,2 \times 26,5 \times 2,2$ m. Temperatura suprafeței exterioare a pereților cuptorului este de $t_p = 43^\circ \text{C}$, iar temperatura aerului din hala de producție $t_a = 25^\circ \text{C}$.

Din totalul fluxului de căldură introdus în cuptor, o parte se pierde prin pereții carcasi cuptorului în mediul secției de producție. Pierderile de căldură prin carcasa cuptorului au loc prin intermediul transferului de căldură prin convecție și radiație.

2. Randamentul energetic al cuptorului

În termodinamica tehnică eficiența energetică a unui ciclu oarecare se caracterizează printr-un indice special, numit randament, care reprezintă raportul dintre căldura totală utilă și consumul integral de căldură [1], adică:

$$\eta = \frac{Q_{ut}}{Q_{tot}}; \quad (1)$$

unde: Q_{ut} este căldura utilă folosită pentru coacerea pâinii;

Q_{tot} - căldura totală consumată în procesul tehnologic de coacerea pâinii.

Căldura totală consumată în instalație va fi egală cu:

$$Q_{tot} = Q_{ut} + \sum_{i=2}^6 Q_i, \quad (2)$$

unde $\sum_{i=2}^6 Q_i = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$ (3)

în care: Q_2 reprezintă consumul de căldură pentru obținerea aburului;

Q_3 - cantitatea de căldură consumată pentru încălzirea aerului de ventilație;

Q_4 - cantitatea de căldură consumată pentru încălzirea benzii de transport;

Q_5 - cantitatea de căldură pierdută în mediul ambiant prin carcasa cuptorului;

Q_6 - căldura pierdută prin radiație, prin deschiderile de evacuare – alimentare ale cuptorului.

Din relația (3) se observă că diminuarea $\sum_{i=2}^6 Q_i$ va duce la micșorarea căldurii totale consumată în proces totodată mărinnd valoare randamentului energetic calculat cu relația (1).

3. Relații generale de calcul ale pierderilor de căldură

Pierderile de căldură prin carcasa cuptorului au valoare destul de mare. Pentru evaluarea acestor pierderi vom se vor utiliza relații preluate din teoria transferului de căldură, expusă în [2].

Pierderile de căldură în mediul ambiant, prin carcasa cuptorului, vor avea loc prin convecție Q_c și prin radiație Q_r :

$$Q_5 = Q_c + Q_r, \quad W \quad (4)$$

Fluxul termic cedat prin convecție va fi calculat cu relația:

$$Q_c = \alpha \cdot S \cdot (t_p - t_a), \quad W \quad (5)$$

unde: α este coeficientul de convecție termică de la suprafața peretelui exterior către aerul din încăpere, în $W/(m^2 \cdot K)$;

S - aria suprafeței exterioare a cuptorului, în m^2 ;

$t_p = 43 \text{ } ^\circ C$ - temperatura suprafeței exterioare a cuptorului;

$t_a = 25 \text{ } ^\circ C$ - temperatura aerului din încăpere.

Coeficientul de convecție termică se va determina cu relația:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{h}, \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}; \quad (6)$$

unde: Nu este criteriul de similitudine Nusselt;

λ - conductivitatea termică a aerului, în $W/(m \cdot K)$, se ia din [3] în funcție de temperatura medie -

$$t_m = \frac{t_p + t_a}{2} = \frac{43 + 25}{2} = 34 \text{ } ^\circ C;$$

h - dimensiunea caracteristică a cuptorului, în m .

Dat fiind faptul că cuptorul are o formă exterioară regulată, determinată de suprafețe plane orizontale și verticale, pierderile de căldură prin convecția liberă se vor determina aparte pentru ambele tipuri de suprafețe.

Fluxul termic cedat prin radiație se va calcula cu relația:

$$Q_r = \varepsilon \cdot c_o \cdot S \cdot [(0,01 \cdot T_p)^4 - (0,01 \cdot T_a)^4], \quad W \quad (7)$$

unde: $c_o = 5,67 \text{ } W/(m^2 \cdot K^4)$ este constanta lui Boltzman;

$\varepsilon = 0,9$ - coeficient de emisivitate al suprafeței exterioare a cuptorului.

4. Calculul pierderilor de căldură prin convecție

a) Calculul transferului de căldură convectiv la suprafețele orizontale ale cuptorului

Aerul spală liber suprafața cuptorului. Deci, transferul de căldură va avea loc prin convecție liberă. Dimensiunea caracteristică, în acest caz, va fi egală cu lungimea cuptorului $h = 26,5 \text{ m}$.

Cu ajutorul criteriului Grasshoff se determină regimul de curgere al aerului pe suprafața plană a cuptorului:

$$Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \frac{1}{T_a} \cdot (t_p - t_a) = \frac{9,81 \cdot 26,5^3}{(16,38 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{25 + 273} (43 - 25) = 40,4 \cdot 10^{12} \quad (8)$$

unde: g este accelerația căderii libere, în m/s^2 ;

$\nu = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ - viscozitatea cinematică a aerului, se ia din [3] în funcție de temperatura medie t_m .

Pentru valori ale criteriului Grasshoff mai mari de 10^9 , regimul de curgere al fluidului se consideră turbulent.

Pentru convecția liberă, în regim de curgere turbulentă a aerului, criteriul de similitudine Nusselt se determină cu ajutorul următoarei relații de calcul, [2]:

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33} = 0,15(40,4 \cdot 10^{12} \cdot 0,7)^{0,33} = 3847, \quad (9)$$

în care $Pr = 0,7$ este criteriul de similitudine Prandtl, se ia din [3] în funcție de temperatura medie t_m .

Coeficientul de transfer de căldură prin convecție liberă se va calcula conform relației (6):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{h} = \frac{3847 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}}{26,5} = 3,92 \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

Astfel, fluxul termic cedat prin convecție va fi egal cu:

$$Q_c^o = \alpha \cdot S \cdot (t_p - t_a) = 3,92 \cdot 26,5 \cdot 3,2 \cdot (43 - 25) = 5983 \text{ W}.$$

b) Calculul transferului de căldură convectiv la suprafețele verticale ale cuptorului

Aerul spală liber suprafața cuptorului. Deci, transferul de căldură va avea loc prin convecție liberă. Dimensiunea caracteristică, în acest caz, va fi egală cu înălțimea cuptorului $h = 2,2 \text{ m}$.

Cu ajutorul criteriului Grasshoff se determină regimul de curgere al aerului pe suprafața plană a cuptorului:

$$Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \frac{1}{T_a} \cdot (t_p - t_a) = \frac{9,81 \cdot 2,2^3}{(16,38 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{25 + 273} (43 - 25) = 2,3 \cdot 10^{10}.$$

Pentru convecția liberă, în regim de curgere turbulentă a aerului, criteriul de similitudine Nusselt se determină cu ajutorul relației de calcul (9):

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33} = 0,15(2,3 \cdot 10^{10} \cdot 0,7)^{0,33} = 350,2.$$

Coeficientul de transfer de căldură prin convecție liberă se va calcula conform relației (6):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{h} = \frac{350,2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}}{2,2} = 4,29 \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

Fluxul termic cedat prin convecție va fi egal cu:

$$Q_c^v = \alpha \cdot S \cdot (t_p - t_a) = 4,29 \cdot 2,2 \cdot 2 \cdot 26,5 \cdot (43 - 25) = 9003 \text{ W}.$$

Astfel, fluxul termic total, cedat prin convecție de către pereții cuptorului, aerului din încăperea, va fi:

$$Q_c = Q_c^o + Q_c^v = 5983 + 9003 = 14986 \text{ W}.$$

5. Calculul pierderilor de căldură prin radiație

Determinarea fluxului de căldură prin radiație termică de la suprafața exterioară a cuptorului în mediul ambiant se va calcula conform relației (7):

$$Q_r = \varepsilon \cdot c_o \cdot S \cdot \left[(0,01 \cdot T_p)^4 - (0,01 \cdot T_a)^4 \right] = 0,9 \cdot 5,67 \cdot 201,4 \cdot \left[(0,01 \cdot 316)^4 - (0,01 \cdot 298)^4 \right] = 21377 \text{ W},$$

unde $S = S_p^v + S_p^o = 2 \cdot 2,2 \cdot 26,5 + 26,5 \cdot 3,2 = 201,4 \text{ m}^2$.

6. Pierderi totale de căldură în mediul ambiant prin carcasa cuptorului

Fluxul termic cedat prin carcasa cuptorului aerului din secția de producere va fi egal cu:

$$Q_5 = Q_c + Q_r = 14986 + 21377 = 36363 \text{ W} \approx 36,4 \text{ kW}.$$

Se observă, că ponderea pierderilor de căldură prin carcasa cuptorului în consumul total de căldură pentru efectuarea procesului tehnologic, constituie:

$$\frac{36,4 \cdot 100}{326} \approx 12\%. \quad (10)$$

Această pondere este destul de mare. De aceea, neapărat trebuie de întreprins măsuri pentru diminuarea pierderilor de căldură prin pereții exteriori ai cuptorului.

În urma analizei pierderilor de căldură a cuptorului în mediul ambiant, prin carcasa cuptorului, s-a ajuns la concluzia că, din întregul flux de căldură pierdut în mediul ambiant, 41 % reprezintă pierderile de căldură prin convecție și 59 % prin radiație.

Reducerea pierderilor de căldură prin pereții cuptorului va micșora valoarea componentei $\sum_{i=2}^6 Q_i$ din relația 2, astfel, cantitatea totală de căldură consumată pentru efectuarea procesului tehnologic se va micșora și, în rezultat, randamentul energetic al instalației va crește. Aceasta va presupune că cuptorul va avea un consum mai mic de energie electrică, ceea ce va avea o influență benefică asupra prețului de cost al pâinii.

Această lucrare demonstrează că pierderile de căldură prin carcasa cuptorului au o valoare considerabilă și nicidecum nu trebuie neglijată posibilitatea de reducere a acestora.

Pentru diminuarea acestor pierderi se propun următoarele soluții:

- Izolarea termică a pereților exteriori ai cuptorului, cu materiale termoizolante de calitate și cu o așa compoziție, încât să nu afecteze calitatea pâinii.
- Crearea unui mediu vid între peretele exterior și izolația cuptorului.
- Pentru diminuarea intensității transferului de căldură prin radiație este oportună analiza opțiunii utilizării ecranelor de radiație, utilizarea cărora poate reduce de două ori fluxul de căldură radiativ.

Bibliografie

1. V. Musteață. *Termodinamica tehnică și procese tehnologice*, Editura UTM, Chișinău, 2006.
2. D. Ștefănescu, A. Leca. *Transfer de căldură și masă*. Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
3. B. Popa, E. Man, M. Popa. *Termotehnică, agregate și instalații termice*. Editura Tehnică, București, 1979.