

## 11 Determinarea coeficientului global de transfer termic și a conductivității termice echivalente la un cuptor încălzit electric

Lucrarea de laborator prezintă modul în care se determină coeficientul global de transfer termic și a conductivității termice echivalente a unui cuptor încălzit electric.

**Scopul lucrării** este însușirea noțiunilor fundamentale cu privire la schimbul global de căldură, transferul de căldură prin conducție și a algoritmului de calcul.

### 11.1 Noțiuni teoretice

Necesitatea cunoașterii coeficientului global de transfer termic  $k$  și a conductivității termice echivalente  $\lambda_e$  se impune în multe domenii ale tehnicii și în special în cazul:

- ☞ izolațiilor termice pentru alegerea corectă a materialelor necesare construcției diferitelor aparate, instalații;
- ☞ construcțiilor civile, industriale, comerciale;
- ☞ autovehiculelor, construcției de mașini - unelte pentru echilibrarea schimburilor de căldură între diferite componente.

Schimbul de căldură dintre părțile componente ale diverselor instalații și mediul înconjurător constituie o problemă deosebit de importantă [2]. Deși transferul de căldură este structurat în cele trei moduri fundamentale de schimb de căldură: conducție, convecție și radiație, în majoritatea cazurilor practice, căldura este transmisă între corpuri prin două sau chiar prin toate cele trei procese combinate simultan [66].

Fluxul de căldură reprezintă cantitatea de căldură transmisă printr-o suprafață în unitatea de timp:

$$\dot{Q} = Q/\tau \text{ [W]} \quad (11.1)$$

unde:  $Q$  [J] reprezintă cantitatea de căldură; iar  $\tau$  [s] – timpul [67].

Fluxul unitar de căldură reprezintă fluxul de căldură transmis prin unitatea de suprafață [67]:

$$\dot{q} = \dot{Q}/A \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (11.2)$$

unde:  $A$  [m<sup>2</sup>] reprezintă aria suprafeței de schimb de căldură.

Prin schimb global de căldură se înțelege transferul termic între două fluide de temperaturi diferite, despărțite printr-un perete omogen sau compus din mai multe straturi. În acest schimb termic sunt prezente

simultan: conducția, convecția și radiația termică în proporții diferite [66]. Transferul global de căldură indirect între două fluide este cel mai întâlnit în practică: două fluide, separate de un perete schimbă căldură între ele, prin intermediul peretelui, fluidul cu temperatura mai ridicată cedând căldura fluidului cu temperatura mai coborâtă [64]. Schimbul global de căldură are loc între două fluide despărțite printr-un perete (Fig.11.1).

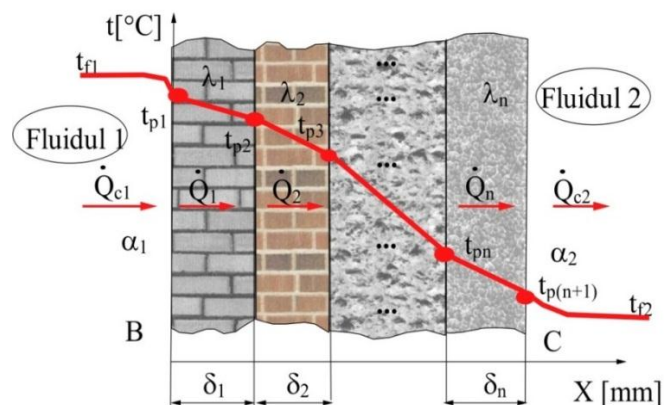


Fig. 11.1 Distribuția temperaturii între fluide despărțite printr-un perete plan neomogen

Schimbul global de căldură este realizat din succesiunea transferului termic prin:

- ☞ convecție și radiație între fluidul 1 de temperatură  $t_{f1} > t_{p1}$  și suprafața B a peretelui;
- ☞ conducția termică prin peretele neomogen (format din straturile de grosime  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  având conductivitățile termice  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ );
- ☞ convecție și radiație între suprafața C a peretelui și fluidul 2, având temperatura  $t_{f2} < t_{p(n+1)}$ .

În cadrul schimbului global de căldură, aportul radiației termice la transmiterea căldurii se ia în considerare prin coeficientul de transfer termic de suprafață prin radiație, rezultând valoarea coeficientului de transfer termic de suprafață  $\alpha$  :

$$\alpha = \alpha_{\text{conv}} + \alpha_{\text{rad}} \left[ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \right] \quad (11.3)$$

unde:  $\alpha_{\text{conv}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] este coeficientul de transfer termic prin convecție;  $\alpha_{\text{rad}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] - coeficientul de transfer termic de suprafață prin radiație [2].

În acest fel, transferul de căldură prin convecție și radiație între fluidul 1 și peretele B, respectiv între peretele C și fluidul 2, se înlocuiește cu un transfer de căldură de suprafață [2].

Transferul de căldură dintre fluidul 1 și suprafața B a peretelui, se poate exprima cu ajutorul legii lui Newton:

$$\dot{Q}_{c_1} = \alpha_1 \cdot A \cdot (t_{f1} - t_{p1}) [\text{W}] \quad (11.4)$$

unde:  $\dot{Q}_{c_1}$  [W] este fluxul de căldură transmis prin convecție;  $\alpha_1$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] – coeficient de transfer termic de suprafață de la fluidul 1 la peretele B;  $A$  [ $\text{m}^2$ ] – aria suprafeței de contact dintre fluid și corpul solid;  $t_{p1}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – temperatura medie a suprafeței corpului solid;  $t_{f1}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – temperatura medie a fluidului care scaldă suprafața corpului solid.

Conform legii lui Fourier, fluxul de căldură transmis prin conducție în primul strat al peretelui este dat de relația:

$$\dot{Q}_1 = \frac{A \cdot (t_{p1} - t_{p2})}{R_{t1}} [\text{W}] \quad (11.5)$$

unde:  $A$  [ $\text{m}^2$ ] este suprafața de schimb de căldură;  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – temperaturile medii ale suprafeței primului strat al corpului solid;  $R_{t1}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ] - rezistența termică a primului strat de perete:

$$R_{t1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} \left[ \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad (11.6)$$

Transferul de căldură dintre suprafața C a peretelui și fluidul 2 se poate exprima cu ajutorul legii lui Newton:

$$\dot{Q}_{c_2} = \alpha_2 \cdot A \cdot (t_{p2} - t_{f2}) [\text{W}] \quad (11.7)$$

unde:  $\dot{Q}_{c_2}$  [W] este fluxul de căldură transmis prin convecție;  $\alpha_2$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] – coeficient de transfer termic de suprafață de la peretele C la fluidul 2;  $A$  [ $\text{m}^2$ ] – aria suprafeței de contact dintre fluid și corpul solid;  $t_{p2}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – temperatura medie a suprafeței corpului solid,  $t_{f2}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – temperatura medie a fluidului care scaldă suprafața corpului solid.

Din relațiile (11.4)-(11.7) rezultă că:

- diferența de temperatură dintre fluidul 1 și temperatura medie a suprafeței B a corpului solid:

$$t_{f1} - t_{p1} = \frac{\dot{Q}_{c_1}}{\alpha_1 \cdot A} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.8)$$

- diferența de temperatură pe stratul de grosime  $\delta_1$ :

$$t_{p1} - t_{p2} = R_{t1} \cdot \frac{\dot{Q}_1}{A} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.9)$$

- diferența de temperatură pe stratul de grosime  $\delta_2$ :

$$t_{p2} - t_{p3} = R_{t2} \cdot \frac{\dot{Q}_2}{A} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.10)$$

...

- diferența de temperatură pe stratul de grosime  $\delta_n$ :

$$t_{pn} - t_{p(n+1)} = R_{tn} \cdot \frac{\dot{Q}_n}{A} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.11)$$

➤ diferența de temperatură dintre suprafața C a corpului solid și fluidul 2:

$$t_{p(n+1)} - t_{f2} = \frac{\dot{Q}_{c_2}}{\alpha_2 \cdot A} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.12)$$

Considerând procesul de transmitere a căldurii staționar, adică:

$$\dot{Q}_{c_1} = \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dots = \dot{Q}_n = \dot{Q}_{c_2} = \dot{Q} \quad (11.13)$$

și adunând relațiile (11.8) - (11.12), rezultă:

$$t_{f1} - t_{f2} = \frac{\dot{Q}}{A} \left[ \frac{1}{\alpha_1} + R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + \frac{1}{\alpha_2} \right] [^{\circ}\text{C}] \quad (11.14)$$

sau:

$$t_{f1} - t_{f2} = \frac{\dot{Q}}{A} \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \right] [^{\circ}\text{C}] \quad (11.15)$$

De unde rezultă că:

$$\dot{Q} = A \cdot (t_{f1} - t_{f2}) \cdot \frac{1}{\left[ \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right]} = k \cdot A \cdot (t_{f1} - t_{f2}) [\text{W}] \quad (11.16)$$

unde:  $k$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] este coeficientul global de transfer termic:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n R_{ti} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (11.17)$$

Coeficientul global de transfer de termic  $k$  reprezintă cantitatea de căldură transferată între două medii pe unitatea de suprafață și în unitatea de timp, sub acțiunea unui potențial termic de 1K. Acesta depinde de: natura și proprietățile mediilor prin care se transferă căldura; condițiile geometrice și hidrodinamice în care decurge procesul; temperatura mediilor; valoarea potențialului termic la care decurge transferul [64].

Dacă se consideră numai procesul de transmitere a căldurii prin conducție în interiorul peretelui, din însumarea relațiilor (11.9) - (11.11), rezultă:

$$t_{p1} - t_{p(n+1)} = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} [^{\circ}\text{C}] \quad (11.18)$$

de unde:

$$\dot{Q} = A \cdot (t_{p1} - t_{p(n+1)}) \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = A \cdot (t_{p1} - t_{p(n+1)}) \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_{ti}} [\text{W}] \quad (11.19)$$

$$\dot{Q} = A \cdot (t_{p1} - t_{p(n+1)}) \cdot \frac{\lambda_e}{\delta} [\text{W}] \quad (11.20)$$

când:  $\lambda_e$  [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ] reprezintă conductivitatea termică echivalentă a peretelui:

$$\lambda_e = \frac{\delta}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (11.21)$$

iar  $\delta$  [m] este grosimea totală a peretelui.

## 11.2 Descrierea instalației și desfășurarea lucrării

Instalația experimentală (Fig. 11.2) se compune din cuptorul electric încălzit prin intermediul barelor de silită și aparatura de reglare și măsurare a temperaturii din cuptor. Fluxul de căldură ce ia naștere în cuptor se reglează cu ajutorul reostatului. Dimensiunile cuptorului sunt date în

figura 11.2 și 11.3. Lucrarea se efectuează numai după ce cuptorul a ajuns în stare de echilibru termic. În acest scop, întrucât inerția termică este destul de mare, încălzirea cuptorului începe cu câteva ore înainte, prin acționarea întrerupătoarelor. După obținerea regimului staționar de transfer de căldură, se determină consumul de energie electrică prin măsurarea intensității  $I$  și a tensiunii  $U$  a curentului electric cu ajutorul ampermetrului și a voltmetrului plasate pe panoul de comandă.

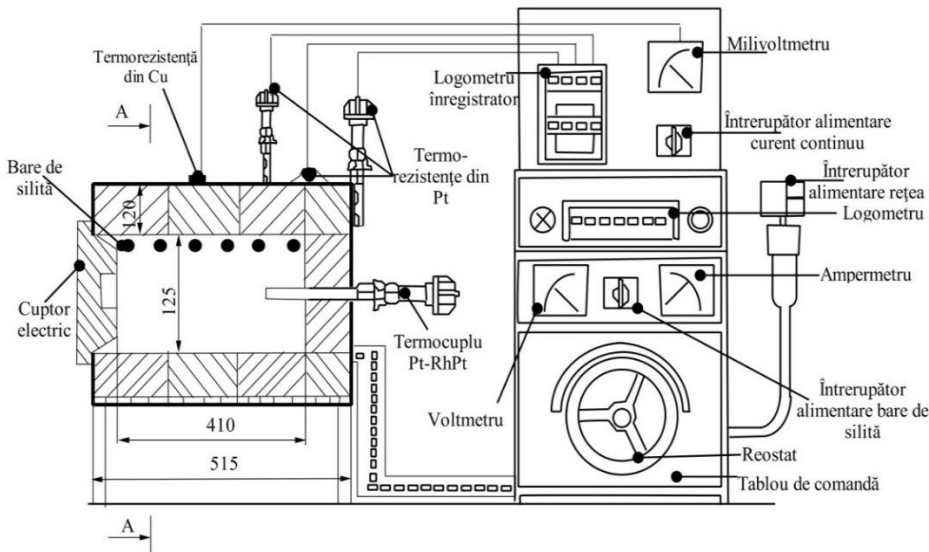


Fig. 11.2 Instalația utilizată pentru determinarea coeficientului de global de transfer termic și a conductivității termice echivalente

Fluxul de căldură se determină cu relația:

$$\dot{Q} = 0,85 \cdot I \cdot U \quad [\text{W}] \quad (11.22)$$

unde:  $U$  [V] este tensiunea curentului electric și  $I$  [A] - intensitatea curentului electric.

Temperatura aerului din laborator se citește de pe termometrul cu lichid aflat în spatele cuptorului încălzit electric.

Temperatura din interiorul cuptorului se măsoară cu un termocuplu Platină-Rhodium-Platină, prin intermediul logometrului. Se efectuează corecția temperaturii cu relația:

$$t_{c\_real} = t_{c\_ind} + k_t \cdot (t_{amb} - t_0) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (11.23)$$

unde:  $t_{c\_real}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] este temperatura reală;  $t_{c\_ind}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] - temperatura indicată de aparat;  $t_0$  - temperatura sudurii reci la etalonare ( $t_0=0^{\circ}\text{C}$  în cadrul lucrării);  $t_{amb}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] - temperatura sudurii reci în timpul măsurării (adică temperatura mediului ambiant);  $k_t$  [-] - coeficient care depinde de tipul termocuplului și de intervalul de referință. Pentru termocuplul Platină-Rodiu-Platină coeficientul  $k_t=0,006$ .

Se măsoară în continuare temperatura suprafețelor exterioare ale cuptorului cu ajutorul celor trei termorezistențe de platină, temperaturi indicate de logometrul indicator și a termorezistenței de cupru, temperatura indicată de milivoltmetru. Temperatura medie pe suprafața exterioară a cuptorului se determină cu relația:

$$t_e = \frac{(t_{Cu} + t_{Pt1} + t_{Pt3} + t_{Pt5})}{4} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (11.24)$$

unde:  $t_{Cu}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] este temperatura indicată de termorezistența de cupru și citită pe milivoltmetru;  $t_{Pt1}$ ,  $t_{Pt3}$ ,  $t_{Pt5}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] - temperaturile indicate de cele trei termorezistențele de platină (1, 3, 5) și citită pe logometrul indicator.

Aria suprafeței medii de transfer de căldură ( $A_m$ ) se calculează luând în considerare forma și dimensiunile cuptorului:

$$A_m = A_i + 0,54 \cdot \delta \cdot \sum y_i + 1,2 \cdot \delta^2 \quad [\text{m}^2] \quad (11.25)$$

unde:  $A_i$  [ $\text{m}^2$ ] este aria suprafeței interioare a cuptorului;  $\delta$  - grosimea pereților, se poate adopta  $\delta = 0,120$  m;  $y_i$  - suma muchiilor interioare ale cuptorului,  $\sum y_i = 0,175$  m.

Aria suprafeței interioare a cuptorului se calculează cu relația:

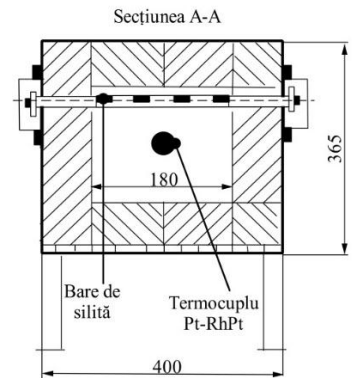


Fig. 11.3 Secțiunea A-A a cuptorului încălzit electric

$$A_i = 2 \cdot [(L \cdot l) + (L \cdot h) + (l \cdot h)] \quad [m^2] \quad (11.26)$$

unde:  $L = 410 \text{ mm}$ ,  $l = 180 \text{ mm}$  și  $h = 125 \text{ mm}$ .

Coeficientul global de transfer termic  $k$  se calculează cu relația (11.16) care, prin transformare și adaptarea notațiilor de mai sus, devine:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A_m \cdot (t_{c\_real} - t_{amb})} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (11.27)$$

Conductivitatea termică echivalentă rezultă din relația (11.20) în care s-a ținut seama de notațiile de mai sus și în ipoteza că  $\alpha_1 = \infty$ :

$$\lambda_e = \frac{\dot{Q} \cdot \delta}{A_m \cdot (t_{c\_real} - t_e)} \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (11.28)$$

unde termenii au semnificațiile de mai sus.

### 11.3 Prelucrarea datelor și rezultatele măsurătorilor

Rezultatele măsurătorilor și mărimile obținute prin calcul se centralizează în tabelele 11.1 și 11.2.

*Tabel 11.1 Valori măsurate*

Nr. crt.	Mărimea	Simbol	U.M.	Determinarea
1.	Temperatura aerului din laborator	$t_{amb}$	[°C]	
2.	Temperatura din interiorul cuptorului	$t_{c\_ind}$	[°C]	
3.	Temperaturi măsurate pe suprafața exterioară a cuptorului	$t_e \text{ Cu}$	[°C]	
		$t_e \text{ Pt1}$	[°C]	
		$t_e \text{ Pt3}$	[°C]	
		$t_e \text{ Pt5}$	[°C]	
4.	Intensitatea curentului electric	$I$	[A]	
5.	Tensiunea curentului electric	$U$	[V]	

*Tabel 11.2 Mărimi calculate*

Nr. crt.	Mărimea	Simbol	U.M.	Determinarea
1.	Temperatura din interiorul cuptorului corectată (reală)	$t_{c\_real}$	[°C]	
2.	Temperatura medie pe suprafața exterioară a cuptorului	$t_e$	[°C]	
3.	Fluxul de căldură	$\dot{Q}$	[W]	
4.	Aria suprafeței medii de transfer de căldură	$A_m$	[m <sup>2</sup> ]	
5.	Coeficientul global de transfer termic	$k$	[W/m <sup>2</sup> ·K]	
6.	Conductivitatea termică echivalentă	$\lambda_e$	[W/m·K]	