

Capitolul 5

TRANSFERUL GLOBAL DE CĂLDURĂ

5.1. Generalități

Procesele reale de transfer de căldură sunt procese complexe în care două sau toate cele trei moduri fundamentale au loc simultan și se influențează reciproc.

În funcție de valorile temperaturilor și caracteristicile corpurilor, unul sau două dintre modurile fundamentale pot deveni determinante iar restul se neglijează.

Transferul global de căldură poate fi exemplificat prin schimbul de căldură dintre două fluide separate de un perete despărțitor.

Se consideră un cazan de preparare a apei calde cu ajutorul gazelor de ardere având peretele despărțitor plan paralel. Fluxul termic cedat de gazele de ardere suprafeței peretelui se realizează atât prin convecție cât și prin radiație. Același flux termic este transferat conductiv prin perete și apoi convectiv către apa care se încălzește.

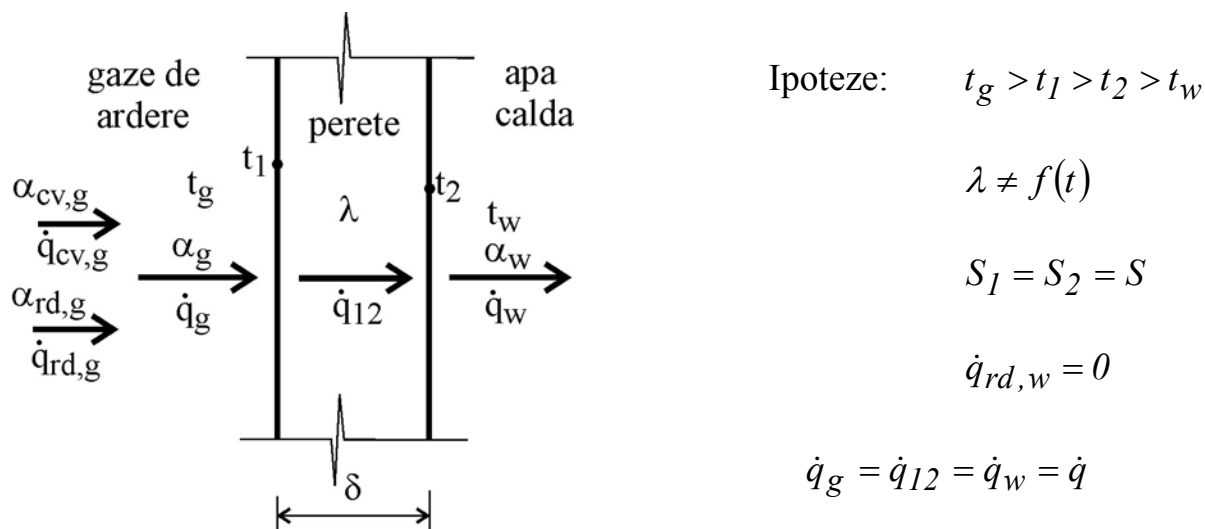


Fig. 5.1: Transferul căldurii prin peretele cazanului

Fluxul termic unitar primit de suprafața "1" a peretelui de la gazele de ardere va fi egal cu suma dintre fluxul convectiv și cel radiant:

$$\dot{q}_g = \dot{q}_{cv,g} + \dot{q}_{rd,g}$$

$$\dot{q}_{cv,g} = \alpha_{cv,g} \cdot (t_g - t_l)$$

$$\dot{q}_{rd,g} = \frac{\varepsilon_l + 1}{2} \cdot \sigma_o \cdot (\varepsilon_g \cdot T_g^4 - \varepsilon_{gl} \cdot T_l^4) = \alpha_{rd,g} \cdot (t_g - t_l)$$

$$\dot{q}_g = (\alpha_{cv,g} + \alpha_{rd,g}) \cdot (t_g - t_l)$$

Se definește **coeficientul superficial de transfer de căldură** pe partea gazelor de ardere, α_g , ca suma dintre coeficientul de convecție și cel de radiație:

$$\alpha_g = \alpha_{cv,g} + \alpha_{rd,g} = \frac{\dot{q}_g}{t_g - t_l} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

Rezultă că:

$$\dot{q}_g = \alpha_g \cdot (t_g - t_l)$$

Fluxul termic unitar ce străbate peretele despărțitor este:

$$\dot{q}_{12} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2)$$

iar cel cedat de suprafața "2" a peretelui apei calde:

$$\dot{q}_w = \dot{q}_{cv,w} = \alpha_{cv,w} \cdot (t_2 - t_w) = \alpha_w \cdot (t_2 - t_w)$$

Remarcă: Pe partea apei, coeficientul superficial de transfer de căldură este egal cu coeficientul de convecție.

$$\alpha_w = \alpha_{cv,w}$$

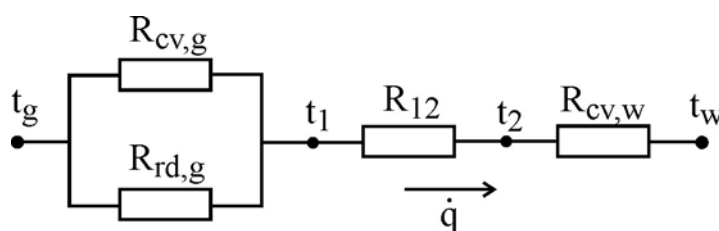


Fig. 5.2: Schema electrică analoagă

$$\dot{q} = \frac{t_g - t_w}{R_{ech}} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$R_{ech} = R_g + R_{I2} + R_w = \frac{l}{\frac{l}{R_{cv,g}} + \frac{l}{R_{rd,g}}} + R_{I2} + R_{cv,w}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{cv,g} = \frac{l}{\alpha_{cv,g}} \\ R_{rd,g} = \frac{l}{\alpha_{rd,g}} \end{array} \right\} \Rightarrow R_g = \frac{l}{\alpha_g}$$

$$R_{I2} = \frac{\delta}{\lambda} \quad \text{și} \quad R_w = \frac{l}{\alpha_w}$$

Rezultă fluxul termic unitar sub forma:

$$\dot{q} = \frac{l}{\frac{l}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{l}{\alpha_w}} \cdot (t_g - t_w) = k \cdot (t_g - t_w) \quad [\text{W/m}^2]$$

unde k este **coeficientul global de transfer de căldură** și este egal cu inversul rezistenței termice echivalente:

$$k = \frac{l}{R_{ech}} = \frac{l}{\frac{l}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{l}{\alpha_w}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

Fluxul termic total transferat de întreaga suprafață S va fi:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot (t_g - t_w) \quad [\text{W}]$$

Observatie: În cazul în care cele două fluide sunt separate de un perete cilindric coaxial, suprafețele peretelui depind de rază și deci nu mai sunt egale:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = 2\pi \cdot r_1 \cdot l \\ S_2 = 2\pi \cdot r_2 \cdot l \end{array} \right\} \Rightarrow S_1 < S_2$$

$$\dot{Q}_g = \alpha_g \cdot S_1 \cdot (t_g - t_1) = 2\pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \alpha_g \cdot (t_g - t_1) = \frac{t_g - t_1}{R_{tg}}$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{R_{t12}}$$

$$\dot{Q}_w = \alpha_w \cdot S_2 \cdot (t_2 - t_w) = 2\pi \cdot r_2 \cdot l \cdot \alpha_w \cdot (t_2 - t_w) = \frac{t_2 - t_w}{R_{tw}}$$

$$R_{tech} = \frac{l}{\alpha_g \cdot S_1} + \frac{l}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{l}{\alpha_w \cdot S_2}$$

$$\dot{Q} = \frac{t_g - t_w}{\frac{l}{\alpha_g \cdot S_1} + \frac{l}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{l}{\alpha_w \cdot S_2}} = \frac{t_g - t_w}{R_{tech}} \quad [\text{W}]$$

Se definesc doi coeficienți globali de transfer de căldură, k_g (pe partea gazelor de ardere) care se raportează la suprafața interioară a peretelui cilindric, respectiv k_w (pe partea apei) care se raportează la suprafața exterioară.

$$k_g = \frac{l}{R_{tech} \cdot S_1} = \frac{l}{\frac{l}{\alpha_g} + \frac{r_1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2 \cdot \alpha_w}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

$$k_w = \frac{l}{R_{tech} \cdot S_2} = \frac{l}{\frac{r_2}{r_1 \cdot \alpha_g} + \frac{r_2}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{l}{\alpha_w}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

$$\dot{Q} = k_g \cdot S_1 \cdot (t_g - t_w) = k_w \cdot S_2 \cdot (t_g - t_w) \quad [\text{W}]$$

$$\dot{q}_1 = \frac{\dot{Q}}{S_1} = k_g \cdot (t_g - t_w) \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\dot{q}_2 = \frac{\dot{Q}}{S_2} = k_w \cdot (t_g - t_w) \quad [\text{W/m}^2]$$

5.2. Schimbătoare de căldură

Schimbătoarele de căldură (SC) sunt aparate termice care realizează transferul căldurii între două fluide numite **agenți termici**. Fluidul care cedează căldură poartă numele de **agent primar**, iar cel care primește căldură, **agent secundar**. Cei mai utilizați agenți termici sunt apa, aburul, aerul și gazele de ardere.

După forma constructivă (geometrică), schimbătoarele de căldură pot fi tubulare (țeavă-în-țeavă sau fascicul de țevi în manta), cu plăci, cu suprafețe extinse, etc.

Schimbătoarele de căldură pot funcționa în regim staționar (continuu) sau nestaționar (discontinuu sau cu acumulare), iar agenții termici își pot schimba sau nu starea de agregare la trecerea prin schimbător. După modul în care cei doi agenți străbat schimbătorul de căldură, circulația lor relativă poate fi în echicurent, în contracurent, în cruce sau mixtă.

După principiul de funcționare, schimbătoarele de căldură se clasifică în recuperatoare, regeneratoare și de amestec.

În schimbătoarele de căldură recuperatoare, agenții termici circulă simultan iar transferul de căldură se realizează prin pereții care separă cele două fluide. Exemple de schimbătoarele de căldură recuperatoare sunt: radiatoarele, convectoarele, bateriile de încălzire, preîncălzitoarele, vaporizatoarele, condensatoarele, subrăcitoarele, etc..

În schimbătoarele de căldură regeneratoare, agenții termici circulă alternativ și periodic, căldura cedată de agentul primar fiind acumulată într-un material inert și preluată apoi de agentul secundar. Exemple de schimbătoarele de căldură regeneratoare sunt schimbătoarele de căldură cu umplutură ceramică sau metalică.

În schimbătoarele de căldură de amestec, transferul de căldură se realizează prin contact direct și prin amestecul celor doi agenți termici. Exemple schimbătoarele de căldură de amestec sunt: turnurile de răcire, degazoarele, scrubberile.

5.2.1. Schimbătoare de căldură recuperatoare

Se consideră un schimbător de căldură de tip recuperator, care funcţionează în regim staţionar şi în care cei doi agenţi termici circulă în echicurent (în acelaşi sens) fără a-şi modifica starea de agregare. Schimbătorul de căldură este izolat termic la exterior astfel încât transferul de căldură are loc numai între cei doi agenţi termici. Mărimile caracteristice notate cu indicele "1" se referă la agentul primar iar cele notate cu indicele "2" la cel secundar. Intrarea în schimbătorul de căldură se simbolizează cu prim iar ieşirea cu secund. Pentru fiecare agent termic, proprietăţile fizice se consideră constante şi se determină la valoarea medie a temperaturii agentului respectiv.

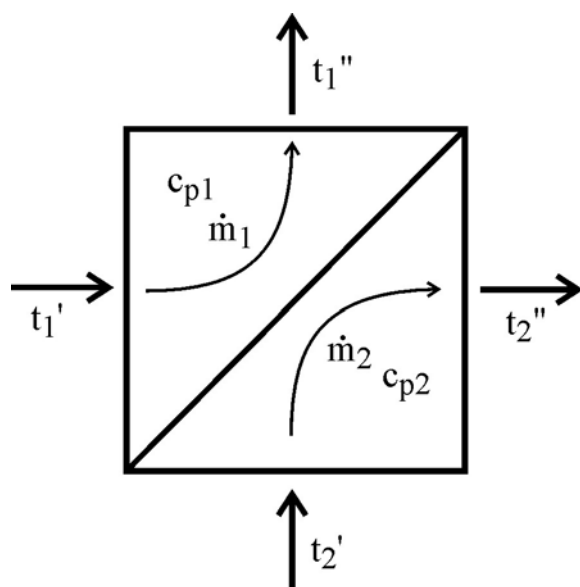


Fig. 5.3: Schema SC în echicurent

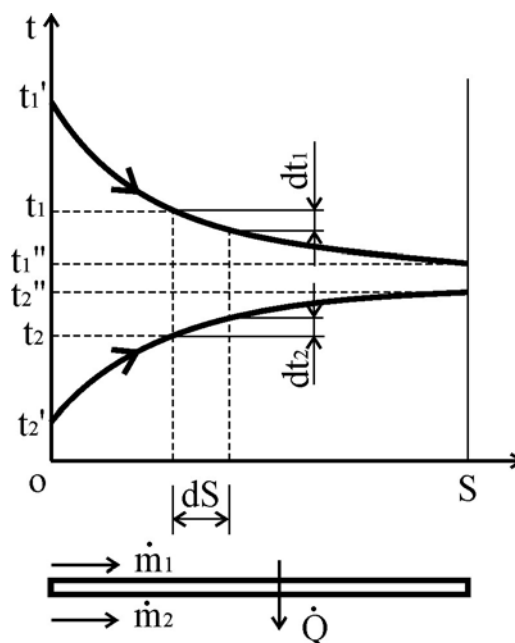


Fig. 5.4 Variația temperaturilor

Ipoteze:

$$t_1 > t_2$$

$$t_1' > t_1''$$

$$t_2' < t_2''$$

$$t_{1m} = \frac{t_1' + t_1''}{2}$$

$$t_{2m} = \frac{t_2' + t_2''}{2}$$

$$c_{p1} = f(t_{1m})$$

$$c_{p2} = f(t_{2m})$$

$$\dot{m}_1 \neq \dot{m}_2$$

Ecuția de bilanț termic a schimbătorului: fluxul de căldură cedat de agentul primar este egal cu fluxul de căldură primit de agentul secundar:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_{12}$$

$$\dot{Q}_1 = \int_{t_1'}^{t_1''} d\dot{Q}_1 = \int_{t_1'}^{t_1''} -\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot dt_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') \quad [\text{W}]$$

$$\dot{Q}_2 = \int_{t_2'}^{t_2''} d\dot{Q}_2 = \int_{t_2'}^{t_2''} \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot dt_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') \quad [\text{W}]$$

$$\dot{Q}_{12} = \int_0^S d\dot{Q}_{12} = \int_0^S k \cdot (t_1 - t_2) \cdot dS = k \cdot \int_0^S (t_1 - t_2) \cdot dS$$

Notă: Coeficientul global de transfer de căldură se consideră constant pe întreaga suprafață.

În cazul schimbătoarelor în contracurent, cei doi agenți termici circulă în sensuri opuse. Ipotezele și notațiile rămân aceleași ca la cele în echicurent.

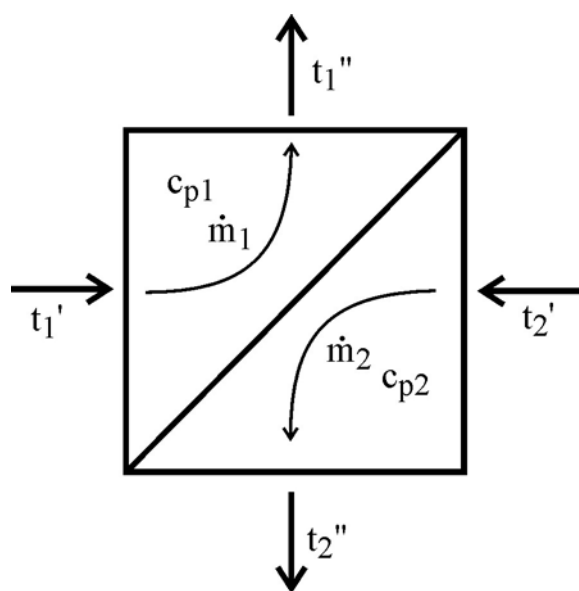


Fig. 5.5: Schema SC în contracurent

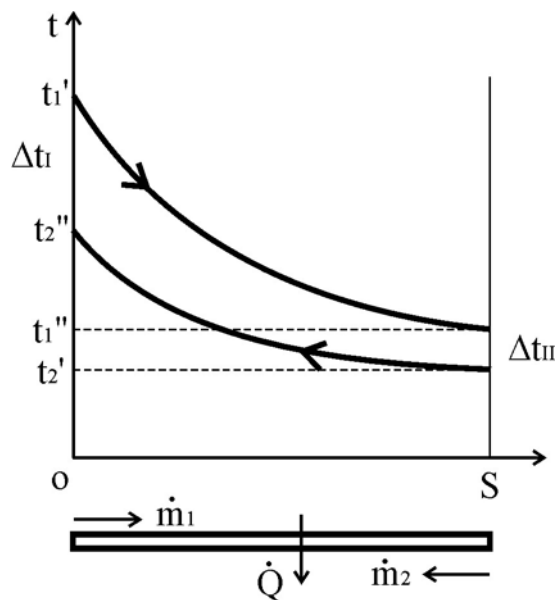


Fig. 5.6 Variația temperaturilor

Ipoteze: $t_1' > t_1''$
 $t_2' < t_2''$

5.2.2 Diferența medie logaritmică de temperatură

Fluxul termic total schimbat între cei doi agenți termice se poate scrie sub forma:

$$\dot{Q}_{12} = k \cdot S \cdot \Delta t_m$$

unde Δt_m reprezintă **diferența medie de temperatură** a celor doi agenți termici și are următoarea expresie:

$$\Delta t_m = \frac{1}{S} \cdot \int_0^S (t_1 - t_2) \cdot dS$$

Diferența medie de temperatură se determină din ecuația de bilanț termic:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_{12} = \dot{Q}$$

$$\left. \begin{array}{l} dt_1 = \frac{-d\dot{Q}}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} \\ dt_2 = \frac{d\dot{Q}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \end{array} \right\} \Rightarrow dt_1 - dt_2 = d(t_1 - t_2) = -d\dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \right)$$

$$d(t_1 - t_2) = -k \cdot (t_1 - t_2) \cdot dS \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} = \frac{t_1' - t_1''}{\dot{Q}} \\ \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} = \frac{t_2'' - t_2'}{\dot{Q}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} = \frac{1}{\dot{Q}} \cdot (t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2')$$

$$\frac{d(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2)} = -\frac{k}{\dot{Q}} \cdot (t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2') \cdot dS$$

$$\ln(t_1 - t_2) \Big|_{t_1', t_2'}^{t_1'', t_2''} = -\frac{k}{\dot{Q}} \cdot (t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2') \cdot S \Big|_0^S$$

$$\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''} = \frac{k \cdot S}{\dot{Q}} \cdot (t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2')$$

Se notează cu Δt_I diferența dintre temperaturile agenților la intrarea în schimbătorul de căldură și cu Δt_{II} diferența dintre temperaturile agenților la ieșire:

$$\Delta t_I = t_1' - t_2' \quad \text{și} \quad \Delta t_{II} = t_1'' - t_2''$$

$$\ln \frac{\Delta t_I}{\Delta t_{II}} = \frac{k \cdot S}{\dot{Q}} \cdot (\Delta t_I - \Delta t_{II})$$

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \frac{\Delta t_I - \Delta t_{II}}{\ln \frac{\Delta t_I}{\Delta t_{II}}} = k \cdot S \cdot \Delta t_m$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_I - \Delta t_{II}}{\ln \frac{\Delta t_I}{\Delta t_{II}}} \quad [\text{K}]$$

Remarcă: Deoarece în expresia diferenței medii de temperatură apare funcția logaritmică, aceasta se mai numește și **diferență medie logaritmică de temperatură**.

În cazul în care circulația se realizează în contracurent, diferența medie logaritmică de temperatură se determină asemănător și rezultă aceeași expresie, în care $\Delta t_I = t_1' - t_2''$ și $\Delta t_{II} = t_1'' - t_2'$.

Remarcă: Diferența medie logaritmică de temperatură poate fi calculată cu o expresie valabilă atât pentru circulația în echicurent cât și pentru cea în contracurent:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}$$

în care Δt_{max} și Δt_{min} reprezintă maximum, respectiv minimumul diferenței dintre temperaturile fluidelor la cele două capete ale schimbătorului de căldură.

$$\Delta t_{max} = \max(\Delta t_I, \Delta t_{II}) \quad \text{și} \quad \Delta t_{min} = \min(\Delta t_I, \Delta t_{II})$$