6.4.Convecția

Convecția căldurii este fenomenul *elementar* de transfer termic care se manifestă în medii fluide şi la supafața de separație a fazelor. Este caracteristică mediilor în mişcare, căldura fiind transportată de particulele fluide care se deplasează. Deci, convecția implică schimb de substanță în interiorul fluidului. În general, convecția este însoțită de conducție, având în vedere faptul că particulele în mişcare sunt şi în contact direct unele cu altele.

Transferul de căldură prin convecție respectă principiile termodinamicii.

Convecția poate fi:

- ***Liberă*** (naturală), cauzată de neuniformitatea câmpului de temperaturi în fluidul considerat şi caracterizată de viteze mici ale fluidului. De exemplu, forțele arhimedice determină ridicarea aerului cald şi, deci, mai puțin dens, către partea superioară a unei incinte.
- ***Forțată***, generată de diferențe mari de presiune, care conduc la viteze mai ale fluidului. Diferențele de presiune se obțin cu ajutorul unor maşini hidraulice.

Legea de bază a convecției este ***legea lui Newton*** *care spune că intensitatea fluxului termic pe care suprafața unui corp solid îl transferă unui fluid în mişcare este dată de relația:*

(6.39) $\dot{q} = \alpha\left(T_s - T_\infty\right)$

unde T_s-temperatura termodinamică a suprafeței corpului solid,

T_∞-temperatura termodinamică medie a fluidului,

α-coeficient de transfer termic convectiv, care se determină experimental.

Intensitatea fluxului termic convectiv este influențată de factori variați, cum ar fi cauza mişcării fluidului, regimul de curgere a fluidului, forma şi poziția corpului solid, spațiul în care circulă fluidul (închis sau deschis).

6.5 Radiația

Radiația este unul dintre modurile elementare de transfer termic care are drept suport radiațiile electromagnetice. Fenomen independent de conducție şi convecție, radiația se poate manifesta şi în vid, nu numai în mediu material.

Toate corpurile emit şi absorb radiații în proporții diferite şi pe lungimi de undă specifice (sau pe tot domeniul lungimilor de undă). La nivel macroscopic, fenomenele radiante respectă principiile termodinamicii clasice.

Fenomenele radiante se manifestă la interacțiunea cu mediul material. Energia radiațiilor depinde de energia internă a corpurilor. Mecanismul radiației constă în transformarea unei părți a energiei interne a corpului radiant în energie radiantă, care se propagă sub formă de unde electromagnetice în spațiul înconjurător şi care, întâlnind un alt corp, se retransformă în energie termică, la zona de contact.

Explicarea proceselor de emisie şi absorbție a radiațiilor se bazează pe cunoaşterea materiei la nivel microscopic, pe cunoaşterea fenomenelor interatomice. *Teoria lui Niels Bohr* explică absorbția şi emisia de radiații pe baza ipotezei (verificată la atomul de hidrogen) conform căreia electronii se mişcă pe anumite orbite (nivele energetice) care dau atomului o stare staționară. Electronii pot sări de pe un nivel energetic pe altul prin absorbția sau emisia unei cantități de energie *cuantificată*.

6.5.1. Legi de propagare

Radiațiile care cad pe suprafața unui corp pot să se reflecte, să fie absorbite, sau să străbată corpul respectiv, în funcție de calitatea suprafeței, de natura şi dimensiunile corpului. Fie E_i energia totală primită prin radiație de un corp. Legea conservării energiei se aplică în acest caz sub forma:

(6.40) $E_i = E_r + E_a + E_d$

unde E_r -energia radiațiilor reflectate,
E_a -energia radiațiilor absorbite,
E_d -energia radiațiilor transmise în interiorul corpului.

Relația (6.40), dacă se împarte la E_i devine o relație între coeficienți adimensionali:

$1 = R + A + D$

unde R-coeficientul de reflexie,
A-coeficientul de absorbție,
D- coeficientul de transmitere.

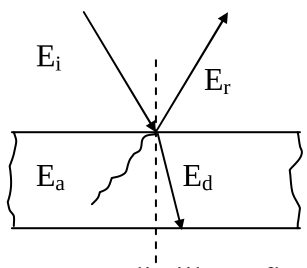

Fig. 6.10 Reprezentarea radiațiilor reflectate, absorbite şi transmise prin corp

În funcție de valorile acestor coeficienți, se pot defini noțiunile de :

- corp alb, $R = 1; A = D = 0$;
- corp negru (radiator integral), $R = 0; A = 1; D = 0$;
- corp diaterman absolut, $R = 0; A = 0; D = 1$;
- corp cenuşiu, $A \neq 0$.

Aceste denumiri nu au legătură cu culoarea cu acelaşi nume din domeniul vizibil. Corpurile tehnice, cu excepția gazelor, se comportă din punct de vedere al radiației ca nişte corpuri cenuşii

Radiațiile termice respectă legile reflexiei şi refracției stabilite pentru undele luminoase.

Legea lui Max Plank , considerată fundamentală pentru radiație, se bazează pe teoria cuantificării energiei radiante. Ea spune că, *pentru corpul negru, intensitatea radiațiilor termice depinde de lungimea de undă, λ, şi de temperatura termodinamică, T, a corpului*.

Mărimea care caracterizează radiația, din punct de vedere energetic, este emisivitatea. ***Emisivitatea*** reprezintă energia totală radiată de unitatea de suprafață a unui corp, în unitatea de timp. Se notează cu *e* şi se măsoară în $\left[W/m^2 \right]$.

Legea lui Plank permite să se determine emisivitatea spectrală, adică radiațiile corpului negru emise pe unitatea de suprafață radiantă în unitatea de timp. Se obține *legea Stefan –Boltzmann* care se exprimă prin relația matematică:

(6.41) $e_0 = \sigma T^4, \left[W/m^2 \right]$

unde e_0 -emisivitatea spectrală a corpului negru,

σ -constanta,

Legea Stefan –Boltzmann arată că orice corp cu temperatura termodinamică $T > 0K$ emite radiații, iar la corpul negru emisivitatea este proporțională cu T^4.

Energia radiațiilor nu este distribuită uniform în spectru, ci variază cu lungimea de undă. Radiațiile infraroşii transportă maximum de energie termică.

Corpurile tehnice sunt considerate corpuri cenuşii din punct de vedere termic. Emisivitatea unui corp cenuşiu, *e*, este mai mică decât a corpului negru, e_o, la aceeaşi temperatură. Raportul acestor două mărimi:

(6.94) $$\varepsilon = \frac{e}{e_o}$$

se numeşte coeficient de emisivitate, sau indice de negru. El are, deci, valori subunitare. În regim staționar, Kirchhoff a constatat că indicele de negru este egal cu coeficientul de absorbție al corpului, A_r.

Emisivitatea unui corp cenuşiu este de forma:

(6.95) $$e = \varepsilon\sigma \cdot T^4 = A_r \sigma T^4 = A_r C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 [w/m^2]$$

unde C_o este constanta corpului negru, $C_o = 5{,}67\, W/m^2K$

Coeficientul de emisivitate de emisivitate ,*ε,* depinde de natura şi gradul de prelucrare al suprafețelor corpului radiant. În cazul materialelor metalice, emisivitatea creşte odată cu temperatura. În cazul materialelor nemetalice, emisivitatea scade la creşterea temperaturii. În tabelul9 din anexă sunt date câteva valori ale coeficientului de emisivitate pentru diverse materiale.

Expresia transferului de radiații între două corpuri cenuşii, în regim permanent, este:

(6.99b) $$\dot{q} = e = \frac{C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{A_{r1}} + \frac{1}{A_{r2}} - 1}$$

Fluxul termic depinde de aria pereților:

(6.100) $$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A$$

6.5.2 Efectul de ecran

Transferul de radiații între doi pereți plani, paraleli nu este influențat de distanța dintre ei, dacă mediul dintre pereți nu este absorbant. Dacă între pereți se interpun un număr n de ecrane, emisivitatea se reduce. Ecranele se consideră plane şi paralele, infinite şi paralele cu pereții. Se presupune că au gradientul de temperatură nul şi coeficienții de absorbție, A, identici pe ambele fețe. Ecranele pot fi plăci metalice foarte subțiri.

În regim staționar, dacă între pereți şi ecrane mediul este transparent la radiații, condiția de conservare a emisivității conduce la relația:

(6.42) $$e_E = \frac{e}{n+1}$$

unde e_E-emisivitatea în cazul existenței ecranelor,
e-emisivitatea în lipsa ecranelor,
n-numărul de ecrane.

Relația indică faptul că prezența a n ecrane face ca emisivitatea să se reducă de n+1 ori.

Întrebări test

1.Regimul tranzitoriu de transfer al căldurii presupune:
a)independența de timp a transferului;.. ☐ ☐ ☐
b)dependența de timp a transferului; a) b) c)
c)încălzirea sau răcirea corpului care suportă transferul.

2.Conducția termică este modul elementar predominant de transfer termic în:
a)corpuri imobile în care apare un gradient de temperatură;................................ ☐ ☐ ☐
b)fluide în mişcare în care apare un gradient de temperatură; a) b) c)
c)fluide în mişcare şi suprafețe de separație a fazelor.

3.Convecția termică este un mod elementar de transfer termic specific pentru:
a)corpuri imobile în care apare un gradient de temperatură;................................ ☐ ☐ ☐
b)fluide în repaus în care apare un gradient de temperatură ; a) b) c)
c)fluide în mişcare şi suprafețe de separație a fazelor.

4.Fluxul termic unitar, $\dot{q}$, reprezintă:
a)fluxul termic raportat la unitatea de suprafață;.. ☐ ☐ ☐
b) fluxul termic raportat la unitatea de masă; a) b) c)
c)fluxul termic raportat la unitatea de timp.

5.Legea lui Fourier pentru conducția termică:
a)stabileşte proporționalitatea dintre fluxul termic unitar şi
gradientul de temperatură dintr-un corp imobil;... ☐ ☐ ☐
b)este exprimată matematic de relația $\dot{q} = \lambda gradT$; a) b) c)
c)permite calculul direct al fluxului termic unitar, după ce s-a determinat experimental gradientul de temperatură.

6.Convecția forțată este modul de transfer termic:
a) generat de diferențe mici de presiune, apărute în mod natural.......................... ☐ ☐ ☐
b) generat de diferențe mari de presiune; a) b) c)
c)obținut cu ajutorul unor maşini hidraulice.

7.Radiația este fenomenul de transfer termic:
a)al cărui mecanism se bazează pe transformarea
unei părți a energiei interne a corpului radiant;.. ☐ ☐ ☐
b)care se poate manifesta şi în vid; a) b) c)
c)care respectă principiile termodinamicii clasice, la nivel macroscopic.

8.Care dintre următoarele legi descrie convecția termică:
a) legea Stefan-Boltzmann: $e_e = \sigma T^4$;... ☐ ☐ ☐
b) legea lui Newton: $\dot{q} = \alpha(T - T_\infty)$; a) b) c)
c) legea lui Fourier: $\dot{q} = -\lambda gradT$

Problema 6.1

6.1. Să se determine fluxul termic printr-un perete plan, din aluminiu, având grosimea $\delta = 3mm$. Se cunoaşte coeficientul de conducţie termică al aluminiului, $\lambda = 237 \, W/m \cdot K$. Temperatura feţei calde a peretelui este $T_o = 500K$, iar cea a peretelui rece este $T_1 = 288K$. Peretele nu are surse interioare de căldură.

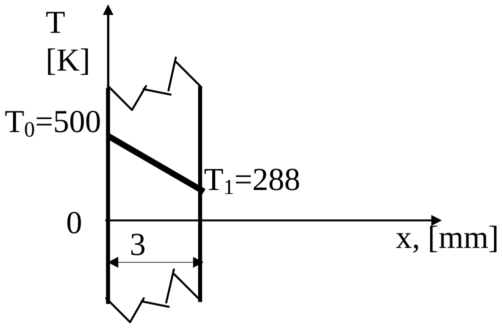

Fig.6.1

În cazul unui perete plan, fără surse interioare de căldură, se consideră că temperatura variază numai în direcţia *x*. Ecuaţia lui Fourier devine:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

Prin integrare se obţine soluţia generală, adică se află câmpul de temperatură în interiorul peretelui:

$$T = C_1 x + C_2$$

Deci temperatura variază liniar în lungul axei *Ox* a peretelui, aşa cum se poate observa în figura 6.1. Datele din problemă permit punerea c*ondiţiilor de unicitate tip Dirichlet:*

$$x = 0; \;\; T = T_0 = 500K$$

$$x = \delta = 3mm; \; T = T_1 = 288K$$

Punând aceste condţii în soluţia generală, se determină constantele de integrare C_1 şi C_2. Rezultă soluţia particulară:

$$T = \frac{288 - 500}{0{,}003} x + 500 = -166378{,}67 J$$

Această relaţie reprezintă *câmpul de temperatură* în condiţiile puse de problemă. Relaţia permite calculul temperaturii în oricare punct interior al peretelui, în funcţie de distanţa x de la faţa caldă.

Introducând câmpul de temperatură în legea lui Fourier, se determină fluxul termic unitar:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta}(T_0 - T_1) = \frac{237}{0{,}003}(500 - 288) = 16{,}75 \cdot 10^6 \quad \left[\frac{W}{m^2}\right].$$

Probleme propuse

6.2. Pe suprafața unui perete plan circulă un curent de aer cu temperatura $T_\infty = 289K$. temperatura suprafeței peretelui este $T_s = 422K$. Cunoscând coeficientul de transfer termic al suprafeței, $\alpha = 100 W/m^2K$, să se detremine fluxul termic unitar transferat prin convecție. Ce cantitate de căldură se transferă printr-o arie $A = 3m^2$ într-un interval de timp $\tau = 2ore$?

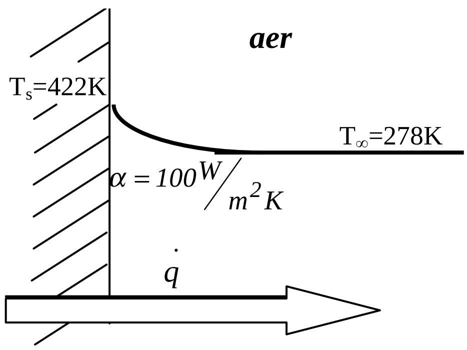

Fig 6.2. Variația temperaturii datorită transferului convectiv la suprafața de separație între un perete plan şi aer

6.3. Peretele plan reprezentat în fig.6.3P este scăldat de curenți de fluid care au temperaturile $T_i = 350K$ şi $T_e = 278K$. Grosimea peretelui este $\delta = 5mm$. Ştiind că peretele este confecționat din oțel inox, care are coeficientul de conducție termică $\lambda = 14{,}4 W/m \cdot K$, să se determine fluxul termic unitar, $\dot{q}$. Se cunosc coeficienții de transfer termic prin suprafețele laterale, $\alpha_i = 1000 W/m^2K$ şi $\alpha_e = 100 W/m^2K$

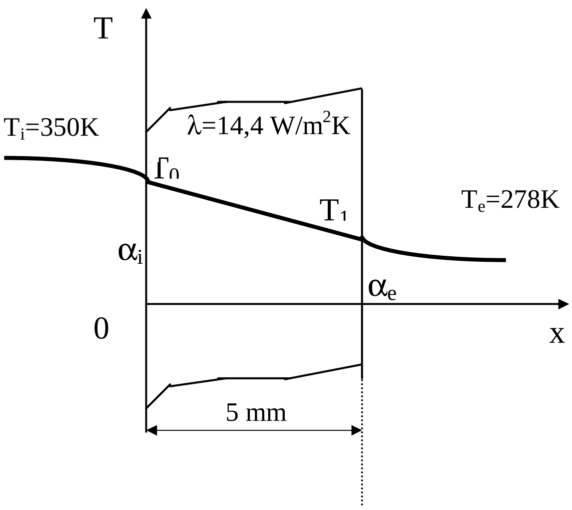

Fig.6.3P

6.4.Să se calculeze fluxul de căldură radiat de o suprafață cu temperatura $T = 363K$ şi coeficientul de emisivitate $\varepsilon = 0{,}8$. Se cunoaşte constanta Stefan-Boltzman $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K^4}$.

6.5.Să se calculeze fluxul termic transferat printr-un metru liniar din conducta de rază $r_o = 2{,}5cm$ şi grosime $\delta = 3mm$ reprezentată în figura 6.5P. Prin conductă circulă apă caldă cu temperatura $T_i = 338K$. Temperatura mediului ambiant este $T_e = 293K$ Se cunosc:

-coeficientul de conducție al materialului din care este confecționată conducta, $\lambda = 43\, {}^{W}\!/_{m \cdot K}$;

-coeficientul de transfer termic la suprafața interioară, $\alpha_i = 6000\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$;

-coeficientul de transfer termic la suprafața exterioară, $\alpha_e = 20\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$.

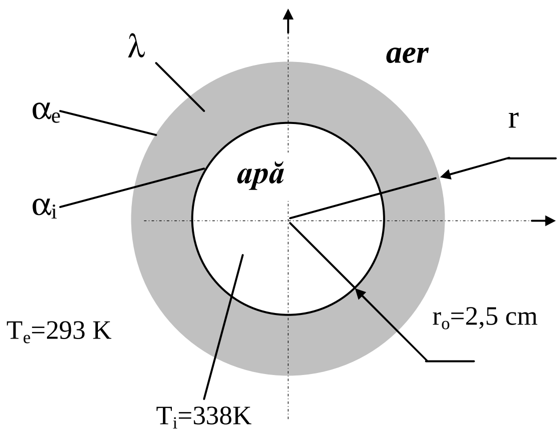

Fig.6.5P. Transfer termic prin pereți cilindrici

6.6. Fie o conductă de rază interioară $r_o = 10mm$. Prin conductă circulă apă caldă cu temperatura $T_e = 322K$. Temperatura mediului ambiant este $T_e = 289K$. Să se calculeze raza exterioară care trebuie impusă pentru ca transferul de căldură să fie maxim. Care este valoarea fluxului termic maxim transferat printr-un metru liniar de conductă dacă se cunosc:

-coeficientul de convecție al materialului din care este confecționată conducta, $\lambda = 14{,}4\, {}^{W}\!/_{m \cdot K}$;

-coeficientul de transfer termic la suprafața interioară, $\alpha_i = 8000\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$;

-coeficientul de transfer termic la suprafața exterioară, $\alpha_e = 1000\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$.

RĂSPUNSURI ŞI REZOLVĂRI

Întrebări test

1.b,c; 2.a; 3.c; 4.a; 5.a; 6.b,c; 7.a,b,c; 8.b.

Probleme

6.2. Rezolvare

Fluxul termic unitar, preluat prin convecție la suprafața de separație a două faze este dat de legea lui Newton:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_\infty) = 100(422 - 289) = 13300\, W/m^2$$

Cantitatea de căldură transferată va fi:

$$Q = \dot{q} \cdot A \cdot \tau = 13300 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3600 = 287280kJ$$

6.3. Rezolvare

În acest caz, căldura se propagă prin convecție în fluidul de la interior, apoi este transmisă prin conducție prin perete şi preluată din nou prin convecție de către fluidul de la exterior. Fuxul termic unitar se conservă la trecerea prin cele două suprafețe.

Punând condițiile de tip Fourier la cele două suprafețe limită ale peretelui, se determină coeficientul specific total de transfer termic:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{5}{14{,}4} + \frac{1}{100}} = 2{,}791 \left[W/m^2K\right]$$

Fluxul termic unitar:

$$\dot{q} = K(T_i - T_e) = 2{,}791(350 - 278) = 200{,}95\, W/m^2$$

6.4. Rezolvare

Fluxul termic transferat prin radiație este :

$$\dot{q} = \varepsilon\sigma \cdot T^4 = 0{,}8 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 363^4 = 787{,}58\, W/m^2$$

6.5. Rezolvare

Fluxul termic ce străbate pereții conductei pe o lungime de 1 m este:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L(T_i - T_e)}{\frac{1}{\alpha_i r_0} + \frac{1}{\lambda}\ln\frac{r_e}{r_o} + \frac{1}{\alpha_e r_e}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot (338 - 293)}{\frac{1}{6000 \cdot 0{,}025} + \frac{1}{43}\ln\frac{0{,}028}{0.025} + \frac{1}{20 \cdot 0{,}028}} = 157{,}4W$$

6.6. Rezolvare

Fluxul termic conductiv atinge valoarea maximă, $\dot{Q}^{max}$, atunci când raza exterioară ia valoarea critică:

$$r_{cr} = \frac{\lambda}{\alpha_e} = \frac{14{,}4}{1000} = 0{,}014m$$

$$\dot{Q}^{max} = \frac{2\pi L(T_i - T_e)}{\frac{1}{\alpha_i r_0} + \frac{1}{\lambda}\ln\frac{r_{cr}}{r_o} + \frac{1}{\alpha_e r_{cr}}} =$$

$$= \frac{2\cdot\pi\cdot 1\cdot(322-289)}{\frac{1}{8000\cdot 0{,}01} + \frac{1}{14{,}4}\ln\frac{0{,}014}{0.01} + \frac{1}{1000\cdot 0{,}014}} = 1932W$$