TRANSFER DE CĂLDURĂ ŞI MASĂ
SEMINAR
- probleme propuse şi consideraţii teoretice -

1. CONDUCŢIA TERMICĂ ÎN REGIM STAŢIONAR

Teoria propagării sau transmiterii căldurii se ocupă cu cercetarea fenomenelor şi evaluarea schimburilor de căldură care au loc în sistemele materiale ale căror părţi componente se găsesc la temperaturi diferite.

Conducţia termică reprezintă fenomenul de transport direct al căldurii în interiorul aceluiaşi corp material, chiar neomogen, în masa căruia există diferenţe de temperatură, sau între corpuri diferite, atunci când între acestea există un contact perfect şi o diferenţă de temperatură. Acest mod de transmitere a căldurii este caracteristic pentru corpurile solide, iar la lichide şi gaze este caracteristic numai pentru stratul limită, de grosime mică.

Legea fundamentală a transmiterii căldurii prin conducţie este **legea lui Fourier,** obţinută experimental, lege ce exprimă proporţionalitatea directă a densităţii fluxului termic cu căderea de temperatură şi se exprimă cu relaţia:

$$\begin{aligned} Q &= -\lambda S\frac{dt}{dx}, (W), \\ q &= \frac{Q}{S} = -\lambda\frac{dt}{dx} = -\lambda \,\mathrm{grad}\,t, (W/m^2) \end{aligned} \qquad (1.1)$$

Factorul de proporţionalitate λ, din legea lui Fourier, se numeşte conductivitate termică şi reprezintă căldura conductivă ce trece în unitatea de timp între două suprafeţe unitare ale corpului, aşezate la distanţa de 1m una de cealaltă, a căror temperatură diferă cu un grad;

$$\lambda = -\frac{1}{\lfloor \mathrm{grad}\,t \rfloor} = \frac{Q}{\Delta\tau \cdot \Delta t / l} \quad \text{(W/m K; kcal/m h grd)} \qquad (1.2)$$

Coeficientul λ are valori deosebite pentru corpuri diferite, iar pentru un acelaşi corp depinde de structura sa, densitate, umiditate şi temperatură. Variaţia lui λ cu temperatura este cauzată de creşterea volumului corpului, amplificarea mişcărilor particulelor elementare şi de modificarea structurii reţelei cristaline a corpului.

Totalitatea valorilor instantanee ale temperaturilor la un moment dat, într-un spaţiu dat, constituie un câmp de temperatură.

Relaţia (1.2) este valabilă pentru pereţi sau corpuri rectangulare. Pentru corpurile sau pereţii cilindrici se folosesc relaţiile:

$$Q = q_1 l = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)l}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \tag{1.3}$$

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \tag{1.4}$$

În relaţiile anterioare, q_1 este fluxul unitar liniar, d_1 şi d_2 sunt diametrele interioare şi exterioare iar l este lungimea corpului (peretelui).

Mai mult, în considerarea cazului general (conducţie tridimensională în regim nestaţionar): t = t (x, y, z, τ), ecuaţia diferenţială generală a conducţiei este:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = \frac{1}{a}\frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{1.5}$$

unde notaţiile sunt:

$\nabla^2 t$ este laplacianul temperaturii ($\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$);

q_v este densitatea de volum a surselor interioare de căldură, W/m^3;

$a = \lambda / \rho c_p$ – difuzivitatea termică, m^2/s;

c_p – căldura specifică la presiune constantă, j/kg °C;

ρ – densitatea materialului, kg/m^3;

λ – conductivitatea termică a materialului, W/m °C;

τ – timpul, s.

Pentru cazul conducţiei în regim staţionar, neavând dependenţa temperaturii de timp, $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, rezultă:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \tag{1.6}$$

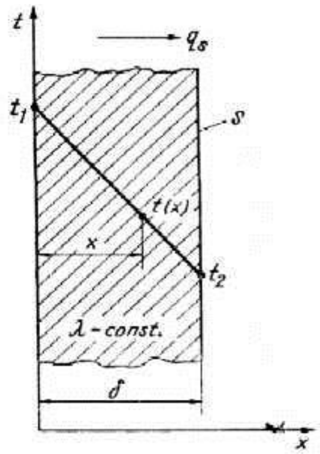
1.1. Să se afle legea de variaţie a temperaturii printr-un perete din cărămidă magnezitică, de grosime δ = 0,25m, ţinând cont că temperatura la interior este t_1 = 500°C, iar la exterior este t_2 = 200°C.

Să se calculeze fluxul de căldură prin peretele de grosimea considerată, q, pentru diferite materiale termorezistente.

Rezolvare:

Considerăm ecuaţia lui Laplace pentru conducţie în regim staţionar prin corpuri fără surse interioare de căldură (ecuaţia 1.8 pentru $q_v = 0$):
$\nabla^2 t = 0$,
ce se poate scrie:

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



şi ţinând cont de condiţiile la limită impuse, şi anume (vezi figura):
$t = t_1 \Rightarrow x = 0$
$t = t_2 \Rightarrow x = \delta$
se obţine, prin înlocuire şi integrare expresia variaţiei temperaturii în perete t(x).

$$\frac{\partial t}{\partial x} = C_1$$

După a doua integrare se obţine câmpul de temperatură:

$$\int \frac{\partial t}{\partial x} = t = C_1 \cdot x + C_2$$

Pentru determinarea constantelor C_1 şi C_2 prin trecerea la limită se obţine:
$C_1 = -(t_1 - t_2) / \delta = -1200$
$C_2 = t_1 = 500$,
care, înlocuite dau ecuaţia profilului temperaturii în perete
$t(x) = t_1 - (t_1 - t_2)\, x / \delta = 500 - 1200\, x$.

Pentru calculul fluxului de temperatură q prin perete se foloseşte relaţia:

$$q = \frac{\lambda \Delta t}{\delta}$$

unde se înlocuieşte valoarea conductivităţii termice pentru fiecare material în parte, ştiind că temperatura medie a stratului este:

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = 350\,°C,$$

iar Δt este variaţia de temperatură în strat:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 300\ °C.$$

1.2. Să se determine fluxul termic unitar ce trece prin zidăria de cărămidă a unui cuptor dacă grosimea peretelui este δ=350 mm; temperatura suprafeţei interioare este t_1 = 740 °C, iar a celei exterioare t_2 =40 °C. Conductivitatea stratului de cărămidă variază liniar cu temperatura după expresia: λ = 0,523(1+ 0,95·10−3 t).

1.3. O conductă cu raza interioară r_1=66 mm şi raza exterioară r_2=76 mm are temperatura peretelui la interior t_1=400 °C şi la exterior t_2=200 °C iar conductivitatea termică variază cu temperatura după relaţia λ=54,2 (1- 0,0007 t). Să se calculeze fluxul de căldură pentru 1 m lungime de conductă.

2. ANALOGIA ELECTRICĂ A TRANSMISIEI CĂLDURII. CONCEPTUL DE REZISTENŢĂ TERMICĂ

Două sisteme sunt analoage când împreună respectă ecuaţii similare, care au condiţii la limită similare. Aceasta presupune că ecuaţiile care descriu comportarea unui sistem pot fi transformate în ecuaţiile celuilalt sistem prin simpla schimbare a simbolurilor variabilelor. Astfel, legea lui Ohm, care exprimă în electrotehnică legătura dintre curentul electric I, diferenţa de tensiune (potenţial) ΔU şi rezistenţa electrică R_e, are o formă analoagă în transmisia căldurii, prin relaţia dintre fluxul termic q_s, diferenţa de temperatură (potenţial termic) Δt şi o mărime denumită rezistenţă termică R, adică:

$$I = \Delta U/R_e; \qquad q_s = \Delta t/R. \tag{2.1}$$

În baza acestei analogii, se pot aplica la problemele de transmisie a căldurii o serie de concepte din teoria curentului continuu (de exemplu, un circuit electric are un circuit termic echivalent şi invers) şi alternativ (de exemplu, modelarea electrică a proceselor termice tranzitorii). Analogia electrică a transmisiei căldurii poate fi astfel folosită ca un instrument de calcul şi vizualizare a ecuaţiilor din transferul căldurii prin legarea acestora de domeniul electrotehnicii.

Pentru cele trei moduri fundamentale de transfer de căldură, urmează a se stabili expresii de calcul ale rezistenţei termice la conducţie, radiaţie şi respectiv convecţie, care pot avea scheme electrice echivalente de legare în serie sau derivaţie. În ecuaţia precedentă, când q_s se măsoară în W/m^2 şi Δt în ^0C, rezistenţa termică se exprimă în $m^2\ ^0C/W$.

Relaţia de bază a **conducţiei termice** unidimensionale printr-un material este *legea lui Fourier*:

$$\begin{aligned} Q &= -\lambda S \frac{dt}{dx}, (W), \\ q_s &= \frac{Q}{S} = -\lambda \frac{dt}{dx}, (W/m^2) \end{aligned} \tag{2.2}$$

unde: Q este cantitatea de căldură schimbată prin conducţie, în W;

q_s – fluxul termic de suprafaţă, în W/m^2;

λ - conductivitatea termică a materialului, în W/ m °C;

S – aria suprafeţei izoterme de schimb de căldură, măsurată perpendicular pe direcţia de curgere a căldurii, în m^2;

$-\dfrac{dt}{dx}$- căderea elementară de temperatură(gradientul de temperatură) în secţiunea considerată, în °C/m.

Radiaţia termică se poate estima cu Legea Stefan – Boltzmann:

$$Q = eQ_0 = eC_0\left(\frac{T}{100}\right)^4 = C\left(\frac{T}{100}\right)^4, \text{ (W/m}^2\text{)}, \qquad (2.4)$$

în care:

$e = C/C_0 < 1$ este factorul de emisie al corpului cenuşiu oarecare,

C_0 = 5.76 W/m²K⁴.

C_0 este coeficientul de radiaţie al corpului negru absolut, în $W/m^2\ K^4$.

C este coeficientul de radiaţie al corpului cenuşiu, în $W/m^2\ K^4$.

Calculul cantităţii de căldură transmise prin **convecţie** se face cu ajutorul formulei lui Newton:

$Q = \alpha S(t_p-t_f)$, (W); (2.5)

$q_s = Q/S = \alpha(t_p-t_f)$, (W/m^2), (2.6)

unde:

α este coeficientul de schimb de căldură prin convecţie (coeficientul de convecţie), în $W/m^2°C$;

S – suprafaţa de schimb de căldură, în m^2;

t_p, t_f – temperatura peretelui, respectiv a fluidului, în °C;

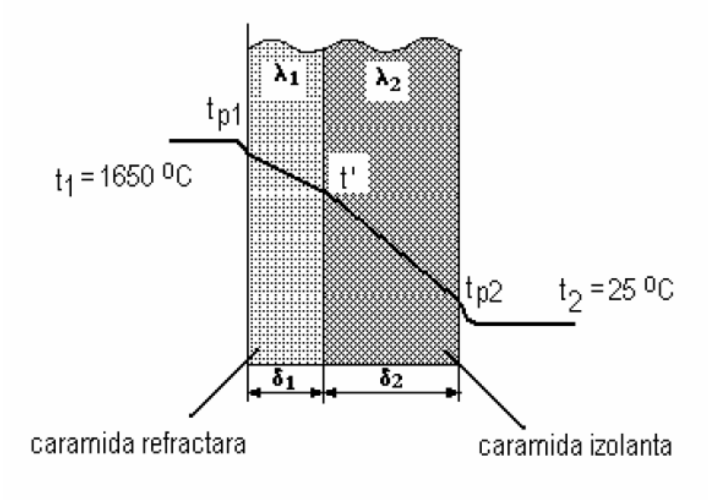
q_s – fluxul termic de suprafaţă, în W/m^2.

Definirea în acest mod a schimbului de căldură prin convecţie face ca în coeficientul de convecţie să fie înglobaţi toţi factorii care determină procesul de convecţie: tipul mişcării, regimul decurgere, proprietăţile fizice ale fluidului, forma şi orientarea suprafeţei de schimb de căldură.

2.1. Peretele unui cuptor este compus din două straturi. Primul este din cărămidă refractară cu grosimea δ_1=0,20 m, conductivitatea termică λ_1=1,38 W/m°C, iar al doilea strat este alcătuit din cărămidă izolantă cu grosimea δ_2=0,10 m, conductivitatea termică λ_2=0,17 W/m°C. Temperatura în interiorul cuptorului, t_1, este de 1650 °C iar coeficientul de schimb α_1 la peretele interior 70 W/m^2K.

Temperatura aerului ambiant este t_2=25 °C iar coeficientul de schimb α_2 la peretele exterior 10 W/m^2K.

Să se calculeze fluxul de căldură pe metru pătrat, temperaturile feţelor interioare şi exterioare, precum şi valoarea temperaturii la contactul celor două straturi de cărămidă ce formează cuptorul.



Rezolvare:

Fluxul termic este dat de relaţia:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1650 - 25}{0{,}0143 + 0{,}1449 + 0{,}5882 + 0{,}100} = 1916\ \mathrm{W/m^2}$$

Se observă slaba contribuţie a rezistenţelor convective la valoarea rezistenţei totale. Din contră, cărămida izolantă reprezintă a treia parte din valoarea rezistenţei totale.

Temperatura peretelui interior este dată de relaţia:

$$t_{p1} = t_1 - q\frac{1}{\alpha_1} = 1650 - 1916\frac{1}{70} = 1622{,}6\ \text{°C}$$

valoare puţin diferită decât valoarea temperaturii t_1.

Temperatura la contactul celor două straturi de cărămidă:

$$t' = t_{p1} - q\frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1622{,}6 - 1916\frac{0{,}2}{1{,}38} = 1344{,}6\ \text{°C}$$

Temperatura peretelui exterior:

$$t_{p2} = t_2 + q\frac{1}{\alpha_1} = 25 + 1916\frac{1}{10} = 216{,}6\ \text{°C}$$

Pantele dreptelor t(x) sunt date de:

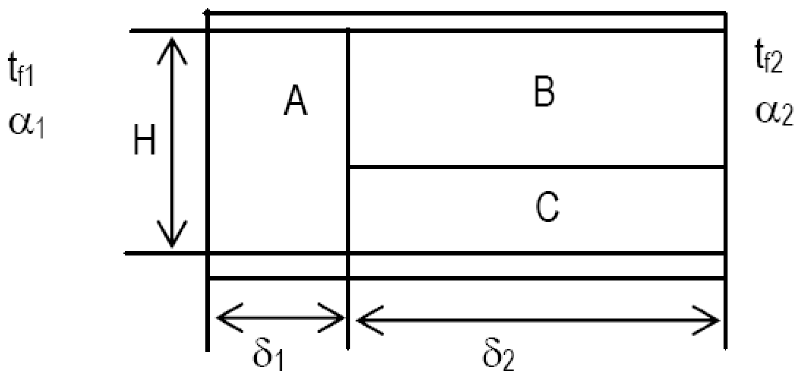
$$\frac{t_{p1} - t'}{\delta_1} = \frac{q}{\lambda_1} = 1388\ \text{°C/m} \qquad \text{şi} \qquad \frac{t' - t_{p2}}{\delta_2} = \frac{q}{\lambda_2} = 11270\ \text{°C/m}$$

fiind invers proporţionale cu conductivitatea mediului. Astfel, pentru cărămida refractară (λ_1=1,38 W/m°C), panta este de aproximativ 8 ori mai mică decât în cazul cărămizii izolante (λ_2=0,17 W/m°C).

2.2. Un perete plan neomogen, de înălţime H este izolat la feţele laterale. Peretele este alcătuit din trei materiale diferite, aşezate ca în figura de mai jos.

a. Să se traseze circuitul echivalent al sistemului descris în figură;

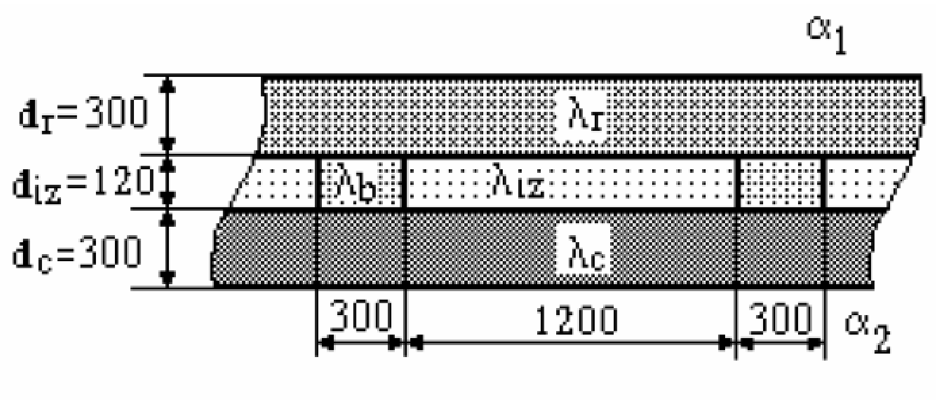
b. Se consideră că peretele are următoarele date cunoscute: H=4 m, H_B=H_C=2,5 m, δ_1=0,1 m, δ_2=0,25 m, λ_A=50 W/(m.K), λ_B=2,5 W/(m.K); λ_C=10 W/(m.K). Dacă $t_{f,1}$=250 °C, α_1=75 W/(m^2.K), t_{f2}=20 °C şi α_2=10 W/(m^{2}K), să se calculeze fluxul termic transferat prin perete şi să se determine temperatura intermediară, t_1.



2.3. Să se determine temperaturile intermediare ale straturilor de material la trecerea unui flux termic între două fluide despărţite printr-un perete plan cu feţe paralele compus din trei straturi de material omogen ale cărui caracteristici constructive şi termice sunt: α_i=29 W/m^{2}K; λ_1=1,047 W/mK; λ_2=0,175 W/mK; λ_3=0,582 W/mK; α_e=8,14 W/m^{2}K; δ_1=δ_2=δ_3=0,20 m; t_i=650 °C; t_e=20 °C.

2.4. Să se calculeze coeficientul global de schimb de căldură pentru zidăria unui cuptor a cărei secţiune este prezentată în figura de mai jos. Din loc în loc, stratul de izolaţie este traversat de grinzi de beton care leagă zidăria exterioară din cărămidă roşie cu zidăria interioară din cărămidă refractară.

Se cunosc: α_1=58,15 W/m^{2}K; α_2=8,14 W/m^{2}K; λ_r=1,75 W/mK; λ_b=0,588 W/mK; λ_{iz}=0,175 W/mK; λ_c=0,58 W/mK.



2.5. Printr-o conductă din oţel cu diametrul d_i/d_e =180/200 mm curge apă fierbinte cu temperatura t_{f1} = 90 °C; temperatura mediului ambiant este t_{f2} = 10 °C. Se dau valorile:

- coeficientul de convecţie dintre apă şi peretele interior al conductei: α_i =45 W/m^{2}K;

- coeficientul de convecţie dintre peretele exterior şi mediul ambiant: α_e=20 W/m^{2}K;

- coeficientul de conductivitate termică al oţelului: λ_{OL}=53 W/mK.

Să se determine:

1) fluxul termic total transmis către mediul exterior dacă lungimea conductei este L=110 m;

2) căldura pierdută în cazul când conducta ar fi izolată cu un strat de vată de sticlă (λ_{iz}=0,04 W/mK) de grosime d=5 cm.

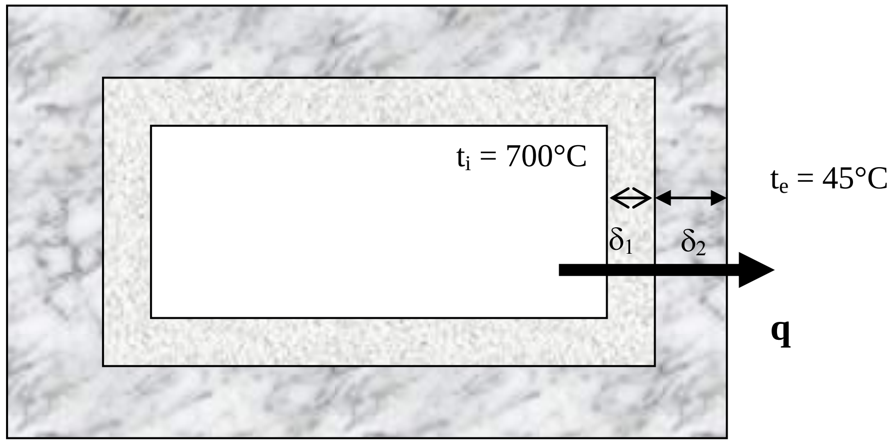
2.6. Să se compare valorile obţinute pentru fluxul termic unitar longitudinal care trece printr-o conductă, cu diametrul d_i/d_e=55/64 mm calculat cu relaţia pereţilor cilindrici şi cu relaţia aproximativă referitoare la pereţi plani, pentru un sistem constructiv ce prezintă următoarele caracteristici: α_i=10003 W/m^{2}K; α_e=5165 W/m^{2}K; λ=58,5 W/mK; t_1=36 °C; t_2=20 °C.

2.7. Se consideră cazul unei instalaţii industriale de încălzire, ce funcţionează la temperatura t_i = 700°C. Izolaţia se realizează din două materiale, şi anume:

- la interior: şamotă cu grosimea δ_1 = 0,25m,

- la exterior: vată minerală cu grosimea δ_2 = 0,2 m.

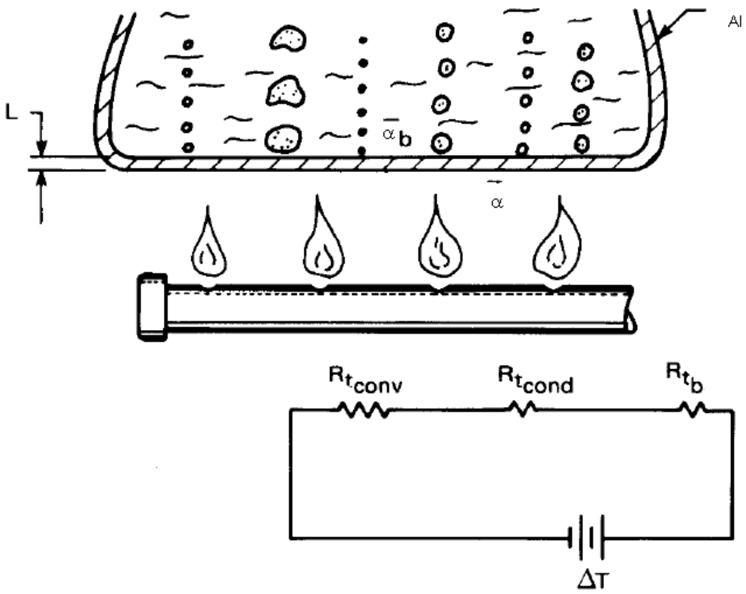
Temperatura la exterior se adoptă: t_e = 45°C. Să se calculeze fluxul de căldură (q) prin izolaţie.



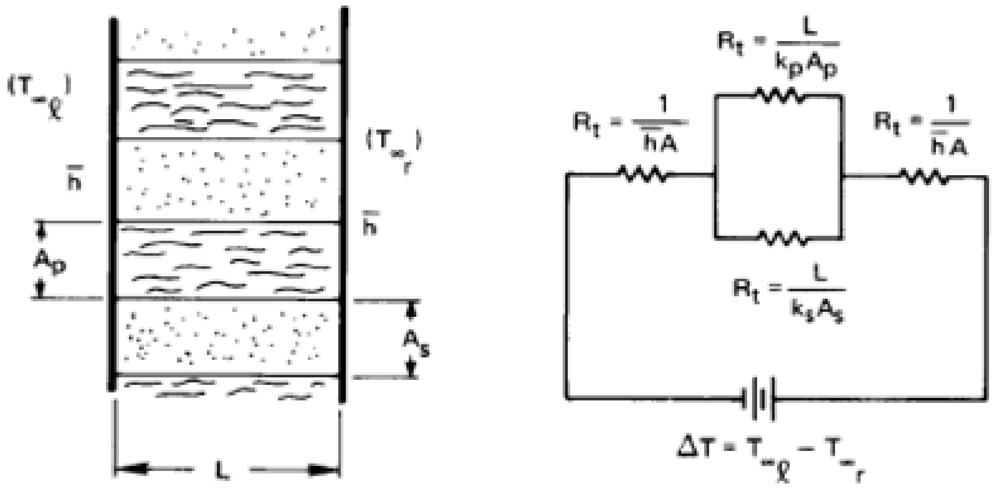
2.8. Estimați coeficientului global de transfer de căldură pentru ibricul de ceai prezentat în figură. Rețineți că flacăra transferă căldură prin convecție către tabla subțire de aluminiu.

Căldura este apoi condusă prin aluminiu și, în final prin convecție prin fierbere în apă.

Datele problemei: L = 0,001 m; λ_{Al} =160 W/m·K iar α = 200 W/m^{2}K (pentru flacără) şi α_b = 5000 W/m^{2}K (pentru fierbere ceai).



2.9. Un perete constă în straturi alternante de rumeguș și lemn de pin, conform figurii. Învelișul exterior are o rezistență termică neglijabilă iar coeficientul de transfer de căldură la exterior, α, este cunoscut. Calculați Q și αt_{ot} pentru perete.



(T_{∞_ℓ})
$\bar{h}$
A_p
(T_{∞_r})
$\bar{h}$
A_s
L
$R_t = \frac{L}{k_p A_p}$
$R_t = \frac{1}{\bar{h}A}$
$R_t = \frac{1}{\bar{h}A}$
$R_t = \frac{L}{k_s A_s}$
$\Delta T = T_{\infty_\ell} - T_{\infty_r}$

3. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ PRIN CONVECŢIE

Elemente de hidrodinamică

Hidrodinamica consideră două tipuri de bază de curgere a unui fluid: laminară şi turbulentă.

În curgerea laminară, fiecare particulă din fluid se deplasează în cadrul aceluiaşi strat, paralel cu suprafaţa peretelui şi cu traseul celorlalte particule; curgerea se desfăşoară în straturi paralele, fără transfer de particule între acestea.

În curgerea turbulentă, particulele individuale din fluid au o mişcare dezordonată, cu o direcţie şi viteză de deplasare permanent variabilă; mişcarea are o viteză rezultantă paralelă cu suprafaţa peretelui, dar suprapus peste aceasta există fluctuaţii continue de viteză care produc un transfer reciproc de particule între straturi.

Regimul de curgere se caracterizează cu ajutorul criteriului Reynolds:

$$Re = wl/\upsilon \qquad (3.1)$$

în care:

w este viteza medie de curgere a fluidului, în m/s;

l – lungimea caracteristică a curgerii, în m;

υ - vâscozitatea cinematică a fluidului, în m^2/s;

ρ - densitatea fluidului, în kg/m^3;

$\eta = \rho\, \upsilon$ este vâscozitatea dinamică a fluidului, în Ns/m^2.

În cazul curgerii prin conducte circulare, $l=d$, unde d este diametrul interior al conductei. Pentru canale sau secţiuni transversale de curgere necirculare, $l = d_{ech}$, unde d_{ech} este diametrul echivalent, determinat cu relaţia:

$$d_{ech} = 4S/P \text{ (m)}, \qquad (3.2)$$

în care:

S este secţiunea transversală de curgere, în m^2;

P – perimetrul udat de fluid, în m.

În funcţie de valoarea numărului Re, se deosebesc următoarele regimuri de curgere:

a: Re = 0…2320, regim laminar;

b: Re = 2320…4000 (10000), regim tranzitoriu;

c: Re > 4000 (10000), regim turbulent.

Valoarea Re_{crit} = 2320 este numărul Reynolds critic, căruia îi corespunde o anumită viteză critică, w_{crit}.

Stratul limită reprezintă stratul de fluid din vecinătatea peretelui care îşi păstrează regimul laminar de curgere, indiferent de regimul de curgere al restului masei de fluid. Stratul limită se datorează forţelor de frecare cu peretele şi forţelor cauzate de vîscozitatea fluidului. Efectul acestor forţe este acela al reducerii vitezei fluidului în stratul limită pînă la zero pentru particulele în contact cu peretele. Grosimea stratului limită δ se defineşte ca distanţa de la suprafaţa peretelui pînă în punctul în care viteza locală atinge 99% din viteza fluidului în zona centrală de curgere. Grosimea acestui strat scade cu creşterea vitezei medii a fluidului şi rugozităţii peretelui şi cu reducerea vîscozităţii fluidului.

Factori care influenţează transferul de căldură prin convecţie

1. Natura mişcării, care depinde de cauza care o generează, influenţează transferul de căldură prin convecţie prin:

a) Diferenţa de densitate a fluidului, produsă de diferenţa de temperatură între diverse puncte ale acestuia. Mişcarea este denumită mişcare liberă, iar transferul de căldură între un perete şi un fluid avînd acest tip de mişcare, convecţie liberă.

b) Efectul unei acţiuni mecanice exterioare (pompă, ventilator etc.), care împinge fluidul. Mişcarea poartă numele de mişcare forţată, iar transferul de căldură între un perete şi un fluid cu acest tip de mişcare, convecţie forţată.

Mişcările libere şi forţate pot exista separat sau simultan. Cînd viteza mişcării forţate este mare, se neglijează efectul mişcării libere.

2. Regimul de curgere, ce este caracterizat prin numărul Reynolds. În funcţie de valoarea acestuia se deosebesc următoarele categorii de procese de transfer prin convecţie:

a) convecţie în regim laminar, cînd $0 < Re < 2320$;

b) convecţie în regim tranzitoriu, cînd $2320 < Re < 4000$ (10000);

c) convecţie în regim turbulent, cînd $Re > 4000$ (10000).

În funcţie de regimul de curgere al fluidului, mecanismul de transfer de energie prin convecţie se desfăşoară astfel:

- în regim laminar, convecţia se face cu precădere prin conducţie termică în fluid; aportul mişcării de amestec este foarte redus;
- în regim turbulent, convecţia are loc prin conducţie termică în stratul limită şi prin transfer de masă şi amestec de fluid în zona centrală a curgerii.

Datorită turbulenţei în fluid, care generează transfer de masă, convecţia turbulentă este mult mai intensă decît convecţia laminară.

3. Proprietăţile fizice ale fluidului influenţează schimbul de căldură prin convecţie, fluidele diferenţiindu-se între ele ca agenţi termici. În mod special, transferul de căldură prin convecţie este afectat de conductivitatea termică, căldura specifică c_p, difuzivitatea termică a, densitatea şi vâscozitatea dinamică, proprietăţi dependente de temperatură şi, într-o măsură mai mică, de presiune.

4. Forma şi dimensiunile suprafeţei de schimb de căldură, care au un efect esenţial asupra procesului de transfer de energie prin convecţie. Geometria suprafeţei de schimb de căldură (plană, cilindrică, nervurată, etc.) şi orientarea acesteia faţă de direcţia de curgere a fluidului afectează caracteristicile stratului limită şi crează condiţii specifice de curgere şi de transfer de căldură.

Legea lui Newton. Coeficient de convecţie

Calculul cantităţii de căldură transmise prin convecţie nu se poate face cu ajutorul relaţiei lui Fourier, datorită imposibilităţii cunoaşterii complete a stratului limită şi a gradientului de temperatură dt/dx pe suprafaţa de contact între perete şi fluid.

Rezolvarea acestor dificultăţi pentru calculele practice se face cu ajutorul formulei lui Newton, care permite calculul debitului de căldură Q schimbat prin convecţie între un perete şi un fluid:

$$Q = \alpha S(t_p - t_f), \text{ (W)}; \tag{3.4}$$

$$q_s = Q/S = \alpha(t_p - t_f), \text{ (W/m}^2\text{)}, \tag{3.5}$$

unde: α este coeficientul de schimb de căldură prin convecţie (coeficientul de convecţie), în $W/m^2{}^\circ C$;

S – suprafaţa de schimb de căldură, în m^2;

t_p, t_f – temperatura peretelui, respectiv a fluidului, în °C;

q_s – fluxul termic de suprafaţă, în W/m^2.

Definirea în acest mod a schimbului de căldură prin convecţie face ca în coeficientul de convecţie să fie înglobaţi toţi factorii care determină procesul de convecţie: tipul mişcării, regimul de curgere, proprietăţile fizice ale fluidului, forma şi orientarea suprafeţei de schimb de căldură.

Convecţia este caracterizată prin patru invarianţi adimensionali şi anume:

1. Numărul lui Nusselt:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}; \tag{3.6}$$

2. Numărul lui Prandtl:

$$Pr = 3600\frac{\upsilon}{\alpha}; \tag{3.7}$$

3. Numărul lui Reynolds:

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta g} = \frac{wd}{\upsilon}; \tag{3.8}$$

4. Numărul lui Grashof:

$$Gr = \frac{d^3 g\beta\Delta t}{\upsilon^2}; \tag{3.9}$$

unde:

α - coeficient de transfer de căldură, (W/m^2 K);

d - dimensiune caracteristică, (m);

a - difuzivitatea termică; $a = \frac{\lambda}{\rho c}$

c - căldura specifică, (j /kg K);

ρ - densitatea, (kg/m^3);

λ - conductivitate termică, (W/m K);

w - viteza, (m/s);

υ - vâscozitatea dinamică, (Ns/m^2);

η - vâscozitatea cinematică, (m^2/s); $\upsilon = \frac{\eta g}{\rho}$

β - coeficient de dilatație termică, $\beta = \frac{1}{T}$ (pentru gaze), (1/K);

g – accelerația gravitațională, (m/s^2)

Δt - diferența de temperatură între gaz și perete, (K).

3.1. Să se determine fluxul termic convectiv unitar longitudinal între suprafața exterioară a unei conducte drepte așezate vertical în aer. Conducta este neizolată, cu diametrul exterior d = 100 mm și o înălțime h = 4 m. Temperatura peretelui exterior al conductei este t_p = 170 °C, iar temperatura aerului t_a = 30 °C. Mișcarea aerului în lungul conductei are loc sub acțiunea forțelor gravitaționale (convecție liberă).

Rezolvare:

Pentru temperatura t_a = 30 °C, constantele termofizice ale aerului au valorile:

$\nu = 16 \cdot 10^{-6}\ m^2/s$;

$Pr_f = 0{,}71$;

$Pr_f/Pr_p \sim 1$;

$\lambda_{aer} = 0{,}0267$ W/mK

unde:

Pr_f - valoarea criteriului Prandtl a aerului pentru temperatura medie de 30°C;

Pr_p - valoarea criteriului Prandtl a aerului pentru temperatura medie a peretelui de 170°C;

Criteriul Grashoff pentru aer, la t = 30°C, are valoarea:

$$Gr = \frac{h^3 g \beta \Delta t}{\upsilon^2} = \frac{4^3 \cdot 9{,}81 \cdot 33 \cdot 10^{-4}(170-30)}{(16 \cdot 10^{-6})^2} = 1{,}133 \cdot 10^{12}$$

în care:

$\beta = 1/T_a = 1/303 = 33 \cdot 10^{-4}$

$(Gr \cdot Pr)_f = 1{,}133 \cdot 10^{12} \cdot 0{,}71 = 8 \cdot 10^{11}$

Deoarece produsul $(Gr \cdot Pr)_f > 10^9$ curgerea aerului în lungul conductei are loc în regim turbulent şi pentru determinarea coeficientului de convecţie al aerului la peretele exterior al conductei se poate folosi ecuaţia criterială de forma:

$Nu = 0{,}15(Gr \cdot Pr)_f^{0{,}33} = 0{,}15(8 \cdot 10^{11})^{0{,}33} = 1271$

Coeficientul de convecţie are atunci valoarea:

$\alpha = Nu \cdot \lambda_{aer}/h = (1271 \cdot 0{,}0267)/4 = 8{,}5$ W/m^2 K

iar fluxul termic convectiv între conductă şi aer este:

$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot \Delta t = 1495$ W

3.2. În lungul unei plăci netede cu lăţimea b = 1 m şi lungimea l = 1,2 m se suflă aer rece cu viteza $w_a = 8$ m/s. Să se determine coeficientul de convecţie de la aer la placă şi fluxul termic convectiv, dacă temperatura plăcii este $t_p = 60$ °C, iar a aerului $t_a = 20$°C.

Rezolvare

Pentru $t_a = 20$ °C, mărimile termofizice ale aerului au următoarele valori:

$\nu_a = 15{,}06 \cdot 10^{-6}$ m^2/s;

$\lambda_a = 0{,}259$ W/m·K

4. RADIAŢIA TERMICĂ

Într-un echilibru dinamic, corpurile unui sistem radiază şi absorb energie radiantă, pentru fiecare corp energia primită fiind egală cu cea radiată. Considerând toate radiaţiile care formează spectrul (cu lungimi de undă între 0 şi ∞), echilibrul dinamic de mai sus poate fi considerat şi pentru intervalul radiaţiilor calorice cuprinse între lungimile de undă 0,8 şi 400 μm. Aceste radiaţii se mai numesc şi infraroşii, fiind situate la frecvenţe imediat inferioare celor corespunzătoare culorii din spectrul vizibil.

Dintr-un flux de energie care ajunge la un corp, sub formă de energie de radiaţie E, o parte este absorbită de corp E_A, o parte reflectată E_R şi o parte traversează corpul prin transparenţă E_D. Astfel, conform primului principiu al termodinamicii:

$$E = E_A + E_R + E_D. \qquad (8.1)$$

rezultă:

$$1 = \frac{E_A}{E} + \frac{E_R}{E} + \frac{E_D}{E} \qquad (8.2)$$

sau

$$A + R + D = 1 \qquad (8.3)$$

unde A este coeficient de absorbţie;

R – coeficient de reflexie;

D – coeficient de transparenţă.

Legile radiaţiei

Legile clasice ale radiaţiei se referă la corpuri cu spectru continuu de emisie. Aplicaţiile tot mai numeroase ale radiaţiei pentru medii cu spectre discontinue (gaze radiante, medii disperse) fac ca la legile clasice să se adauge o serie de legi noi, de asemenea cu caracter fundamental.

Din legile clasice există două legi cu caracter mai pronunţat calitativ – Lambert şi Kirchoff – apoi legile cu caracter cantitativ – Planck, Stefan-Boltzmann.

Legea lui Stefan – Boltzmann a fost stabilită empiric în anul 1879 de către Stefan şi apoi fundamentată experimental de Boltzmann în 1884. Aceasta se exprimă sub forma:

$$I_0 = C_0\, T^4, \ (W/cm^2) \qquad (8.4)$$

Constanta C_0, pentru corpul negru are valoarea: $C_0 = 5{,}695 \cdot 10^{-12}\ W / cm^2\, K^4$.

4.1. Uscarea lentă, pe bandă rulantă, a hârtiei sau ţesăturilor din bumbac, se poate face cu ajutorul unui aparat de uscare prin radiaţie. Materialul circulă printre două plăci încălzite, paralele, apropiate, cu temperatura medie de T_1 = 673 K şi coeficientul de radiaţie C_1 = 4,66 W/(m^2 K^4). Să se calculeze cantitatea de căldură primită prin radiaţie de la plăci, de către un metru pătrat de material umed supus uscării, dacă viteza sa de deplasare este de l,2 m/s . Temperatura medie a materialului la intrarea în uscător este de T_2 = 333 K, iar coeficientul de radiaţie corespunzător este C_2=5,36W/m^2 K^4.

Care va fi umiditatea eliminată dintr-un m^2 de material?

Cantitatea de căldură schimbată prin radiaţie se calculează cu ajutorul legii Stefan – Boltzmann:

$$Q = SC_0\varepsilon\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

Fluxul termic resultă deci de forma:

$$q = C_0\varepsilon\left(\frac{T}{100}\right)^4 = C_1\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

În cazul schimbului de căldură prin radiaţie între două corpuri, densitatea fluxului radiant este:

$$q_{12} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right],$$

în care coeficientul redus de radiaţie al sistemului plăci-material va fi:

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}\right)};$$

4.2. Două piese metalice plane din oţel, după ce sunt scoase din cuptorul de tratamente termice sunt amplasate la o distanţă mică una faţă de alta comparativ cu dimensiunile lor.

Temperaturile pereţilor învecinaţi sunt 773 K, respectiv 295 K. Factorul energetic de emisie (gradul de radiaţie) pentru oţel este ε_{OL} =0,7, iar coeficientul de radiaţie al corpului negru C_0 =5,67 W/m^2K^4.

Să se determine:

1) densitatea fluxului termic transmis prin radiaţie între cei doi pereţi plani;

2) de câte ori se reduce densitatea fluxului termic dacă între cei doi pereţi plani se intercalează un ecran din tablă subţire din aluminiu (ε=0,4).

Densitatea fluxului termic va fi: $q_{12} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$