TRANSFER DE CĂLDURĂ CONVECTIV

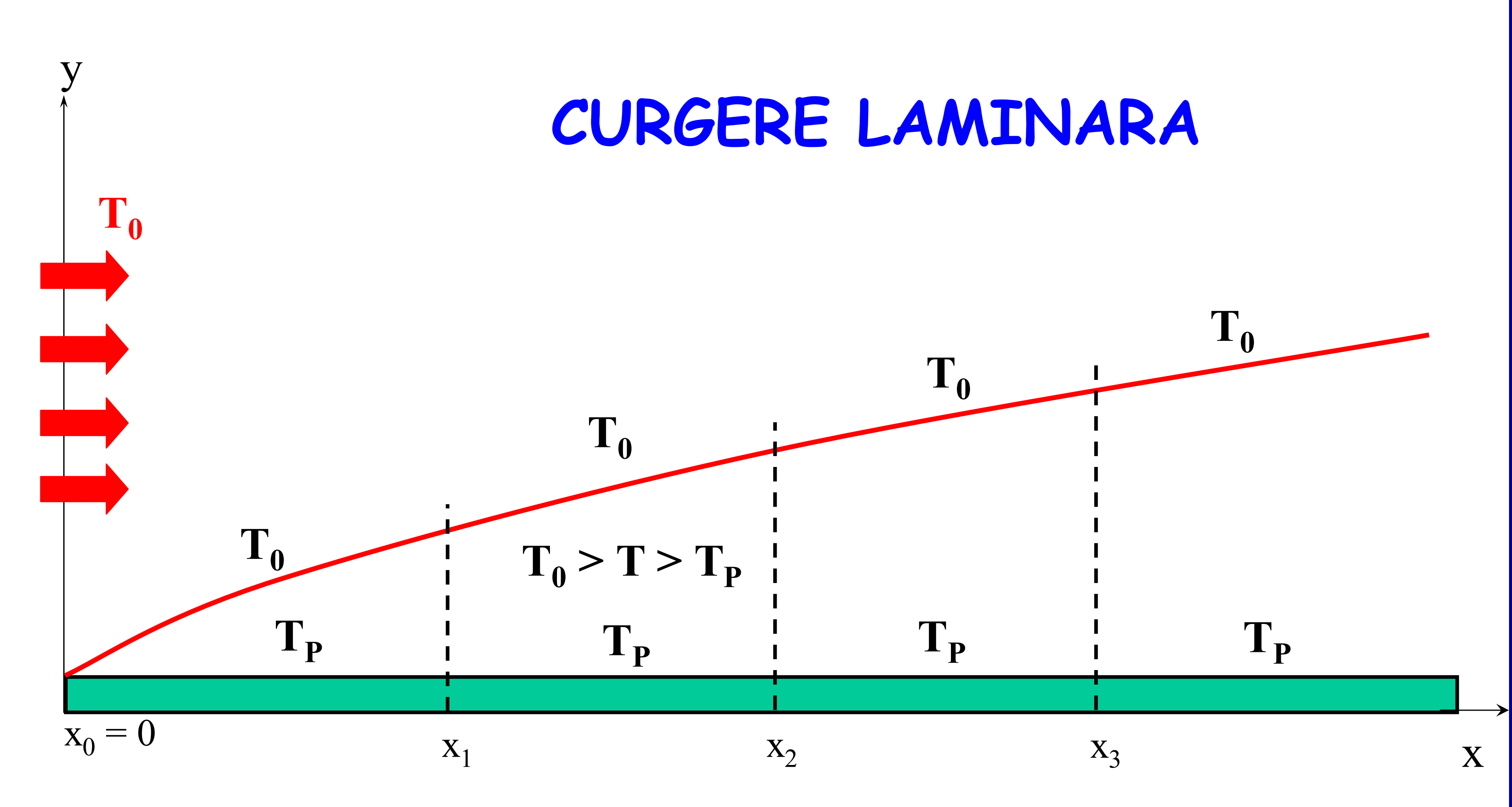
TRANSFER DE CĂLDURĂ CONVECTIV

- Transferul termic convectiv apare datorită mişcării macroscopice a fluidelor, sub formă de turbioane sau de curenți.
- Cele două cazuri limită ale transferului convectiv:
  - convecția liberă (naturală)
  - convecția forțată.
- În ambele cazuri, mişcarea fluidului este guvernată de legile transferului de impuls.

TRANSFER DE CĂLDURĂ CONVECTIV

- În regim laminar, transferul de căldură după normala la direcția de curgere decurge preponderent prin conductivitate;
- În regim turbulent determinant este transferul de căldură care se face simultan cu mişcarea elementelor macroscopice de fluid.
- Transferul de căldură va fi cu atât mai intens, cu cât regimul de curgere va fi mai puternic turbulent.

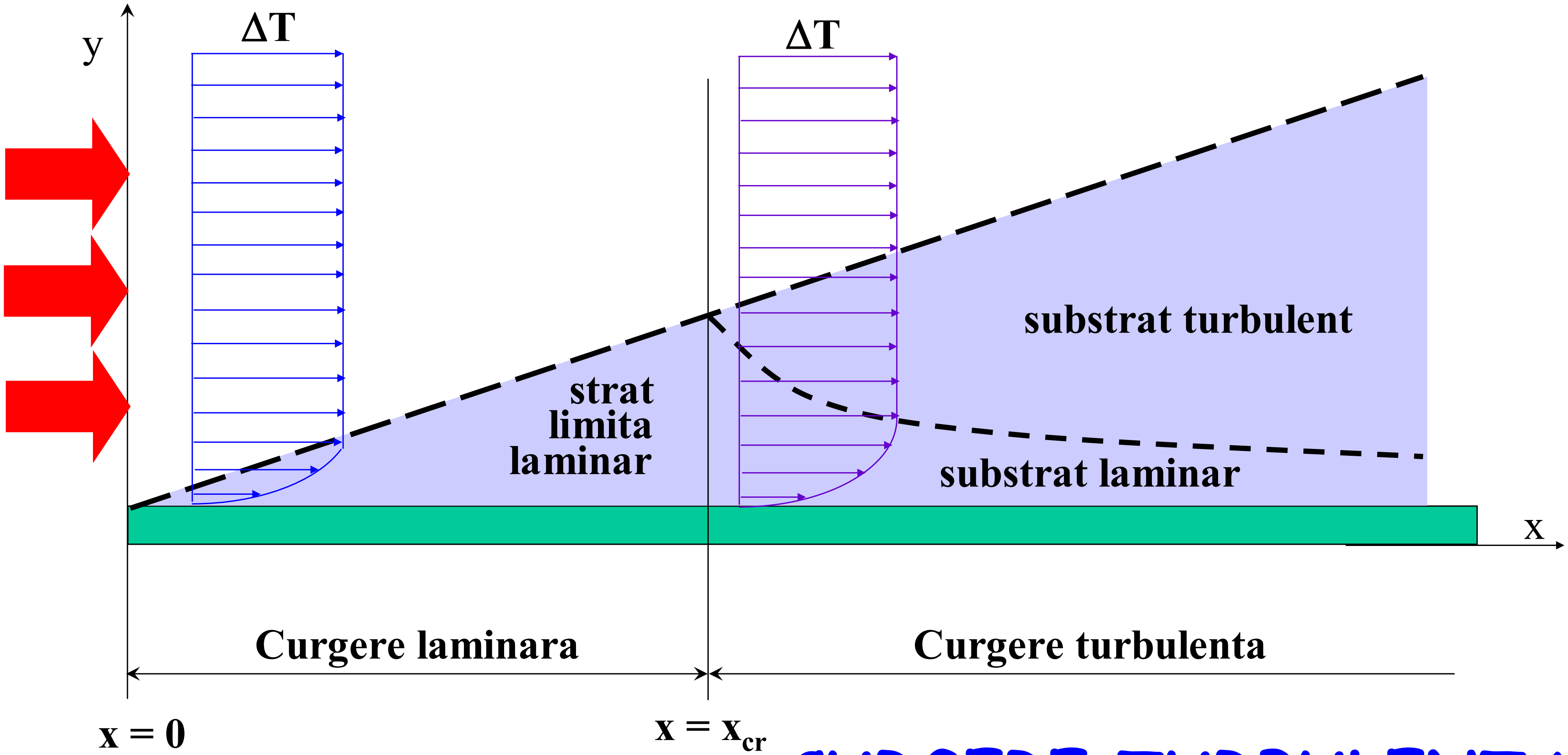
Stratul limită termic



Stratul limită termic

- Se consideră $T_0 > T_p$ → fluidul adiacent la placă se va răci, având pe diverse zone, temperaturi intermediare între T_0 si T_p.
- Distanța de la placă, pe direcția y, pentru care temp. T a fluidului:
  - $T_0 > T > T_p$ = **grosimea stratului limită termic**,
- Zona de existență a variației de temp. de-a lungul suprafeței plăcii = **strat limită termic (SLT)**.

Stratul limită termic

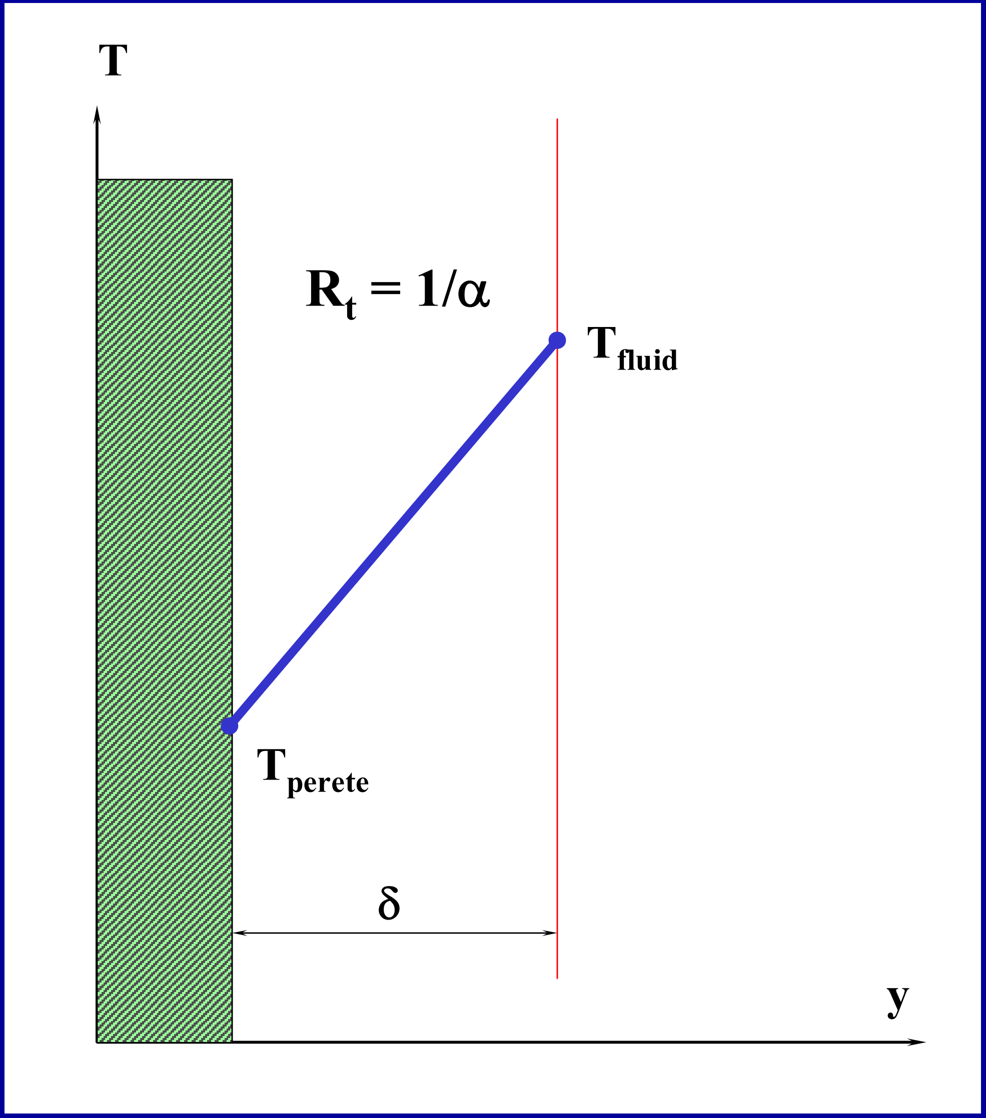


CURGERE TURBULENTA

Coeficientul individual de transfer termic

- Zona din stratul limită în care apare căderea cea mai mare de temperatură se consideră ca fiind zona determinantă de rezistență termică în transferul de căldură.
- Deoarece vitezele de curgere ale fluidului în apropierea peretelui sunt mici, tinzând la zero la perete, se poate admite că în această zonă transferul de căldură decurge preponderent prin mecanism conductiv.

Coeficientul individual de transfer termic



Se consideră toată rezistența la transf. concentrată în SLT, şi în special în apropierea supraf. de transfer, unde vitezele de curgere sunt foarte mici, ➔ transferul se realizează prin conductivitate, a.î.:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \qquad (104)$$

Coeficientul individual de transfer termic

- Mărimea α, inversul rezistenței termice, arată intensitatea cu care se petrece transferul de căldură într-un fluid în mişcare şi poartă denumirea de **coeficient de transfer convectiv**.
- Deoarece în transferul termic global schimbul de căldură are loc între două fluide, apar **doi** coeficienți de transfer convectiv. Din acest motiv, mărimea α se mai numeşte şi **coeficient individual (parțial) de transfer termic**.

Coeficientul individual de transfer termic

- Fluxul termic convectiv care trece printr-o suprafață A este dat de **legea de răcire a lui Newton**, care se poate scrie:

$$Q_s = \alpha \cdot A \cdot \left(T_p - T_f\right)$$
$$\text{sau}\quad Q_s = \alpha \cdot A \cdot \left(T_f - T_p\right) \qquad (105)$$

- Pentru α şi $(T_f - T_p)$ variabile, ecuația (105) se poate scrie sub forma:

$$dQ_s = \alpha\left(T_f - T_p\right)dA \qquad (106)$$

Coeficientul individual de transfer termic

- Transferul în stratul limită termic realizându-se conductiv, este aplicabilă legea Fourier:

$$dQ_s = \lambda \left(\frac{dT}{dy} \right) dA \qquad (107)$$

- Egalând (106) cu (107) se obține expresia coeficientului individual de transfer termic:

$$\alpha = \frac{\lambda}{T_f - T_p} \cdot \left(\frac{dT}{dy} \right) \qquad (108)$$

Coeficientul individual de transfer termic

- Ecuația (108) arată că mărimea α crește cu creșterea gradientului de temperatură.
- Creșterea turbulenței (creșterea lui Re) → creșterea gradientului termic → creșterea coeficientului individual de transfer termic.
- Ecuațiile (105 – 108) arată că α reprezintă *fluxul termic transferat pe unitatea de suprafață sub acțiunea unei forțe motrice de 1 K.*

Coeficientul individual de transfer termic

- Dimensional,

$$[\alpha] = \left[\frac{Q_s}{A \cdot \left(T_f - T_p\right)}\right] = \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}}\right] \qquad (109)$$

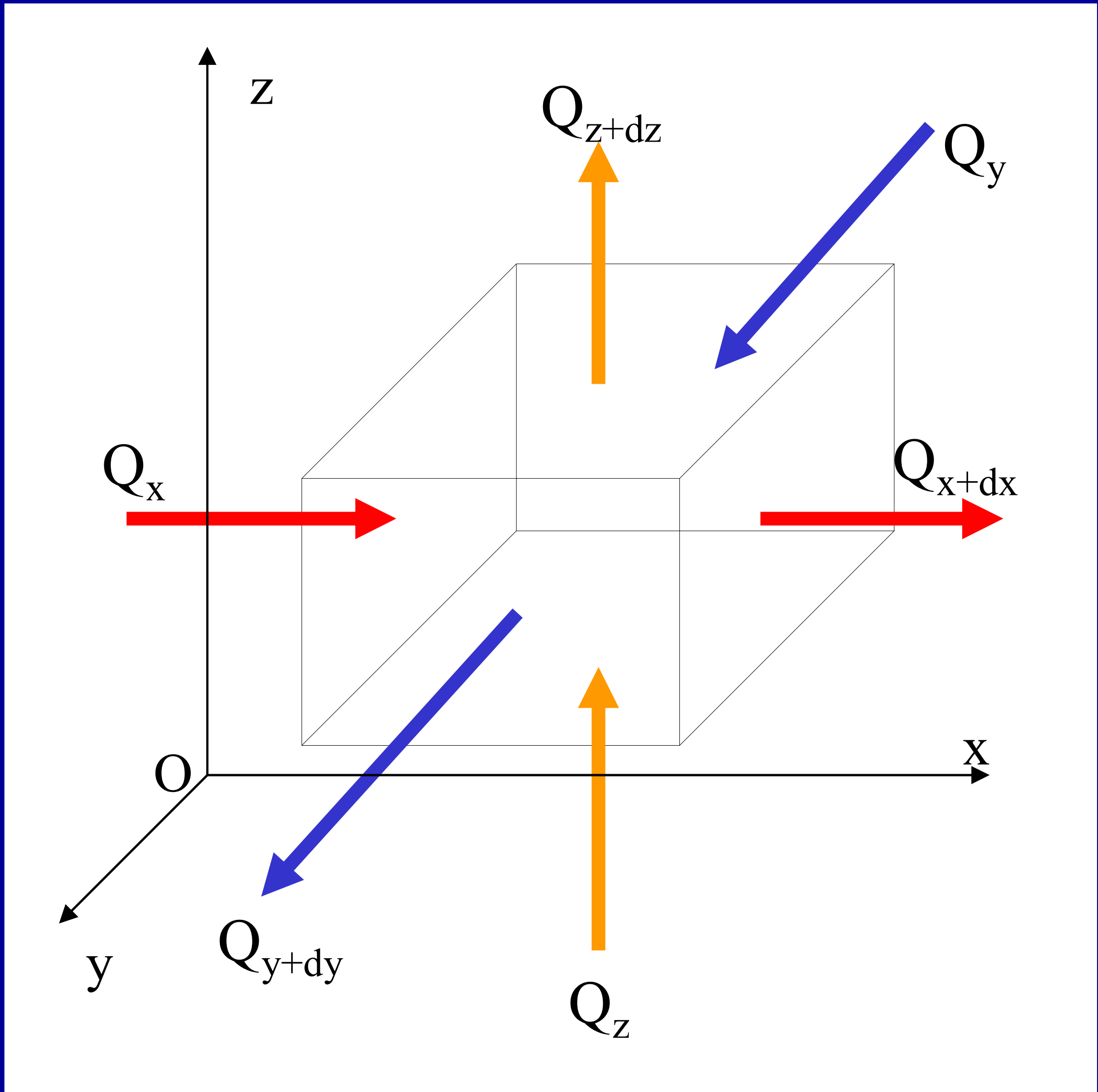
- Asupra α influențează o multitudine de factori (de natură hidrodinamică, termică, geometrică etc.), astfel încât:

$$\alpha = f\left(\rho, c_p, \mathrm{Re}, T, t, l, \ldots\right) \qquad (110)$$

Coeficientul individual de transfer termic

- α ar putea fi determinat experimental, cunoscand Q schimbata între fluid şi perete şi T fluid şi T perete.
- Det. exp. posibila doar în cazul aparatelor aflate în exploatare.
- Pt. proiectare este necesară estimarea lui α pt. anumite condiții de transfer termic impuse de procesul tehnologic.
- Studiul transferului termic convectiv:
  - prin utilizarea unor modele matematice (bazate pe ecuații diferențiale),
  - pe baza unor teorii statistice,
  - folosind ecuațiile criteriale, dacă rezolvarea analitică a ec. diferențiale care descriu transferul convectiv de căldură este imposibilă

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv



Cantitatea de căldură transmisă prin convecție = căldura transportată de un fluid aflat în mişcare. Se consideră într-un curent de fluid un paralelipiped elementar de laturi dx, dy, dz, cu volumul dV.

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Regimul se consideră a fi staționar:
  - în orice punct al sistemului considerat, toți parametrii care definesc starea şi dinamica sistemului nu variază în timp (derivatele acestor parametri în raport cu timpul sunt nule),
  - nu există acumulare de substanță sau de energie.

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Debitul de fluid care intră pe direcția *x* în paralelipiped este:

$$\rho v_x \cdot dy \cdot dz \qquad (110)$$

- Acesta introduce în paralelipiped cantitatea de căldură:

$$Q_x = c_p \cdot \rho v_x \cdot T \cdot dy \cdot dz \qquad (111)$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- La ieşirea din paralelipipedul elementar, pe direcția x, fluxul elementar de fluid ($v_x\rho$) devine:

$$v_x \cdot \rho + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} \cdot dx \qquad (112)$$

- iar temperatura T devine:

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \qquad (113)$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Fluxul termic ieşit din paralelipiped pe direcția x va fi: (114)

$$Q_{x+dx} = c_p \cdot \left[\rho v_x + \frac{\partial (v_x \cdot \rho)}{\partial x} \cdot dx \right] \cdot \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dy \cdot dz$$

- Efectuând calculele în (114) şi neglijând diferențialele de ordin doi şi superior, ecuația (114) se scrie: (115)

$$Q_{x+dx} = c_p \cdot (\rho v_x) \cdot T \cdot dydz + c_p \left[T \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + (\rho v_x) \frac{\partial T}{\partial x} \right] dV$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- În mod analog cu ecuațiile (111) şi (115) se pot scrie ecuațiile fluxurilor termice intrate şi ieşite din paralelipiped pe direcțiile y şi z.

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Excesul de căldură pe care fluidul îl lasă în timpul trecerii prin paralelipipedul elementar este:

$$dQ = \left(dQ_x + dQ_y + dQ_z\right) =$$
$$= \left(Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz}\right) - \left(Q_x + Q_y + Q_z\right)$$

(116)

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

o sau:

$$dQ = c_p T\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial z}\right]dV +$$

$$+ c_p\left[(\rho v_x)\frac{\partial T}{\partial x} + (\rho v_x)\frac{\partial T}{\partial y} + (\rho v_x)\frac{\partial T}{\partial z}\right]dV$$

(117)

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Caracterul de regim staționar al curgerii se introduce prin următoarele două condiții:
  - Lipsa acumulării de substanță, exprimată prin ecuația continuității:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}=0 \qquad (118)$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Lipsa acumulării de căldură, care cere ca excesul de căldură dQ luat de curentul de fluid din paralelipipedul elementar să fie adus, prin conductivitate, din exteriorul paralelipipedului.
- Încălzirea conductivă a paralelipipedului este dată de ecuația:

$$dQ = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)dV \qquad (119)$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- Introducând aceste două condiții în ecuația (117) se obține:

$$c_p\left[\left(\rho v_x\right)\frac{\partial T}{\partial x}+\left(\rho v_y\right)\frac{\partial T}{\partial y}+\left(\rho v_z\right)\frac{\partial T}{\partial z}\right]=$$

$$=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (120)$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- sau:

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a\nabla^2 T \qquad (121)$$

- unde $a = \lambda/(\rho . c_p)$ - difuzivitatea termică a mediului prin care are loc transferul.
- (120) sau (121) = **ecuația diferențială Fourier – Kirchhoff**, ec. care redă distribuția câmpului de temperatură pentru un fluid aflat în mişcare staționară.

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- În regim nestaționar, ecuația (121) devine:

$$\rho \cdot c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \tag{122}$$
$$= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

- sau:

Derivata substantiala a temperaturii

$$\frac{DT}{dt} = a \nabla^2 T \tag{123}$$

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- În aceste forme complete ecuația Fourier - Kirchhoff este imposibil de rezolvat analitic;
- Pentru calculul profilului temperaturii, respectiv al coeficienților individuali de transfer termic, se face apel la ecuații criteriale.

Ecuația diferențială a transferului termic convectiv

- În anumite condiții, ecuația (123) poate căpăta forme mai simple.
- Astfel, în regim staționar şi fluide imobile,

$$(v_x = v_y = v_z = 0)$$

(123) se reduce la forma:

$$\nabla^2 T = 0$$

formă care corespunde transferului termic conductiv în regim staționar [vezi ec. (47)].

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- În cazul transferului termic convectiv, integrarea analitică a ecuației (122) nu este posibilă.
- Pentru a putea stabili criteriile de similitudine care intervin în transferul termic convectiv, ecuația (122) se pune sub forma:

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

$$\rho c_p\left[v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_y\frac{\partial T}{\partial y}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right]-\lambda\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right]+\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}=0 \qquad (124)$$

- Se poate observa că toți termenii ecuației (124) au dimensiunea unei energii raportate la unitatea de volum [W/m³].

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Trecând la formula dimensională generalizată, (124) se poate scrie:

$$\left[\frac{\rho\cdot c_p\cdot v\cdot T}{l}\right]-\left[\frac{\lambda\cdot T}{l^2}\right]+\left[\frac{\rho\cdot c_p\cdot T}{t}\right]=0 \quad (125)$$

- Cel de-al treilea termen al ecuației (125) reprezintă cantitatea de căldură **Q** acumulată în unitatea de volum de fluid în unitatea de timp:

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

$$\left[\frac{\rho \cdot c_p \cdot T}{t}\right] = \left[\frac{Q}{l^3 \cdot t}\right] = \left[\frac{\alpha \cdot l^2 \cdot T \cdot t}{l^3 \cdot t}\right] = \left[\frac{\alpha \cdot T}{l}\right] \quad (126)$$

- Înlocuind cantitatea de căldură **Q** din legea de răcire a lui Newton (105) în (126), formula dimensională generalizată (125) devine:

$$\left[\frac{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot T}{l}\right] - \left[\frac{\lambda \cdot T}{l^2}\right] + \left[\frac{\alpha \cdot T}{l}\right] = 0 \quad (127)$$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

$$\left[\frac{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot T}{l}\right] - \left[\frac{\lambda \cdot T}{l^2}\right] + \left[\frac{\alpha \cdot T}{l}\right] = 0 \quad (127)$$

primul termen = viteza transferului termic convectiv,
al doilea termen = viteza transferului termic conductiv,
al treilea termen = cantitatea de căldură transferată.

Ecuaţii criteriale ale transferului termic convectiv

- Raportul dintre termenii I şi II reprezintă **criteriul Péclet:**

$$\frac{\dfrac{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot T}{l}}{\dfrac{\lambda \cdot T}{l^2}} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot l}{\lambda} = \mathrm{Pe} \quad (128)$$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Raportul dintre termenii III şi II reprezintă **criteriul Nusselt**:

$$\frac{\dfrac{\alpha \cdot T}{\lambda}}{\dfrac{\lambda \cdot T}{l^2}} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \mathrm{Nu} \qquad (129)$$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Funcția criterială care descrie transferul termic convectiv va fi:

$$f\left(\mathrm{Pe}, \mathrm{Nu}\right) = \mathrm{constant} \qquad (130)$$

- Alaturi de similitudinea termică ($Pe_M = Pe_P$) se adaugă şi similitudinea hidrodinamică ($Re_M = Re_P$; $Fr_M = Fr_P$) şi geometrică, astfel încât funcția criterială completă va fi:

$$f\left(\mathrm{Pe}, \mathrm{Nu}, \mathrm{Re}, \mathrm{Fr}, \frac{l_1}{l_0}, \frac{l_2}{l_0}, \ldots\right) = \mathrm{constant} \qquad (131)$$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Se preferă înlocuirea criteriului Péclet cu un alt criteriu, **criteriul Prandtl**, care se obține raportând criteriul Péclet la criteriul Reynolds:

$$\Pr = \frac{\mathrm{Pe}}{\mathrm{Re}} = \frac{\dfrac{\rho \cdot c_p \cdot v \cdot l}{\lambda}}{\dfrac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu}} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \qquad (132)$$

- Criteriul Pr conține doar constante fizice ale fluidului prin care are loc transferul de căldură şi reprezintă raportul dintre viscozitatea cinematică (ν) şi difuzivitatea termică (a) a fluidului.

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Întrucât criteriul Nusselt conține parametrul care trebuie determinat (α), el este criteriul determinant, iar ecuația criterială (131) capătă forma:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = f\left(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}, \mathrm{Fr}, \frac{l_1}{l_0}, \frac{l_2}{l_0}, \ldots \right) \quad (133)$$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Deoarece criteriul **Fr** provine din raportul dintre energia potențială şi energia cinetică, el poate fi omis în cazul convecției forțate în regim turbulent.
- În cazul convecției naturale, când deplasarea fluidului şi deci şi transferul căldurii se realizează sub influența diferenței de densitate a fluidului la temperaturi diferite, criteriul Fr nu poate fi neglijat. Este de preferat însă substituirea sa cu un alt criteriu, **criteriul Grashof**:

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- **criteriul *Grashof*:**

$$\mathrm{Gr} = \mathrm{Fr} \cdot \mathrm{Re}^2 \cdot \beta \cdot \Delta T =$$

$$= \frac{gl}{v^2}\left(\frac{\rho v l}{\mu}\right)^2 \beta \cdot \Delta T = g l^3 \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^2 \beta \cdot \Delta T \qquad (134)$$

- produsul adimensional $\beta \times \Delta T$, dintre coeficientul de dilatare cubică şi diferența de temperatură, exprimă cauza care produce deplasarea liberă a fluidului.

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Ținând cont de criteriul Grashof, ecuația criterială (133) capătă forma generală:

$$\boxed{\mathrm{Nu} = f\left(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}, \mathrm{Gr}, \mathrm{G}_1, \mathrm{G}_2, \ldots\right)} \quad (135)$$

în care G_1, G_2, ... = criterii de similitudine geometrică

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

Forme particulare ale ecuației criteriale (135)

Transmiterea căldurii prin:	Ecuația criterială
lichide în convecție forțată	$Nu = f(Re, Pr, G_1, G_2, \ldots)$
lichide în convecție liberă	$Nu = f(Pr, Gr, G_1, G_2, \ldots)$
gaze în convecție forțată	$Nu = f(Re, G_1, G_2, \ldots)$
gaze în convecție liberă	$Nu = f(Gr, G_1, G_2, \ldots)$

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- În cazul gazelor, s-a constatat că pentru substanțe având acelaşi număr de atomi în moleculă, criteriul Prandtl este practic constant, având următoarele valori:
  - Pr = 0,67 (gaze monoatomice);
  - Pr = 0,74 (gaze diatomice);
  - Pr = 0,80 (gaze triatomice);
  - Pr = 1,00 (gaze tetraatomice).

Ecuații criteriale ale transferului termic convectiv

- Ecuațiile criteriale pentru descrierea transferului de căldură pot fi deduse şi prin analiză dimensională, utilizând teorema π (a se vedea capitolul SIMILITUDINE SI ANALIZA DIMENSIONALA din FDT vol. I).

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

- Cu foarte puține excepții, coeficienții individuali de transfer de căldură α se determină cu ajutorul ecuațiilor criteriale.
- Ecuațiile criteriale scrise sub forma generală (135) nu pot fi utilizate pentru determinarea coeficienților α.
- Pentru a putea fi utilizate, aceste ecuații se scriu sub forma unor produse de criterii, fiecare ridicat la o putere:

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

$$\mathrm{Nu} = c(\mathrm{Re})^m(\mathrm{Pr})^n(\mathrm{G}_1)^p\ldots \qquad (135)$$

- Utilizată sub această formă, ecuația criterială îşi restrânge aria de valabilitate. Valorile constantei **c** şi ale exponenților **m, n, p,** ... se determină pe cale experimentală.
- Ecuația criterială este valabilă doar în cadrul domeniului în care s-au determinat experimental parametrii **c, m, n, p**.

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

EXTRAPOLAREA FĂRĂ DISCERNĂMÂNT A ECUAȚIILOR CRITERIALE ÎN AFARA DOMENIULUI LOR DE VALABILITATE, POATE DUCE DE MULTE ORI LA ERORI GRAVE ÎN CONCEPEREA ECHIPAMENTELOR DE TRANSFER TERMIC.

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

- **Transfer termic la curgerea prin conducte şi canale:**
  - Curgere turbulentă deplin dezvoltată ($Re > 10^4$)
  - Curgere în regim intermediar ($2300 < Re < 10^4$)
  - Curgere în regim laminar ($Re < 2\,300$)

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

- **Transfer termic la curgerea peste fascicule tubulare:**
  - Curgere transversala peste un fascicul de țevi netede:
    - Decalate
    - Nedecalate
  - Curgerea fluidelor peste fascicule de țevi prevăzute cu aripioare transversale

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

- **Transfer termic la curgerea pe suprafețe plane:**
  - curgerea unui fluid de-a lungul unei suprafețe plane
  - curgerea peliculara a lichidelor pe suprafețe verticale

Determinarea coeficienților individuali de transfer termic

- Transfer termic la amestecarea lichidelor cu agitatoare
- Transfer termic la fierberea lichidelor
- Transfer termic la condensarea vaporilor