

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ

# OBIECTUL CURSULUI

## o TRANSFERUL DE CĂLDURĂ

- *NOȚIUNI FUNDAMENTALE*
- *TRANSFER DE CĂLDURĂ PRIN CONDUCTIVITATE*
- *TRANSFER DE CĂLDURĂ PRIN RADIAȚIE*
- *TRANSFER DE CĂLDURĂ PRIN CONVECȚIE*
- *TRANSFERUL GLOBAL DE CĂLDURĂ*

# BIBLIOGRAFIE

## o BIBLIOGRAFIE MINIMALA

1. Gavrilă, L. *Fenomene de transfer*, vol. II, ed. Alma Mater, Bacău, 2000;
2. Gavrilă, L. & Zichil, V. *Bazele ingineriei în industria alimentară și biotehnologii - Fenomene de transfer*, ed. Tehnica Info, Chișinău, 2000;
3. Tudose, R.Z. *Ingineria proceselor fizice din industria chimică, vol. I - Fenomene de transfer*, Ed. Academiei Române, București, 2000
4. Pavlov, K.F., Romankov, P.G., Noskov, A.A., *Procese și aparate în ingineria chimică - exerciții și probleme*, Ed. Tehnică, București, 1981;

# TRANSFERUL DE CALDURA

o Transferul de căldură = fenomen complex, reprezentat de schimbul de energie termică între:

- două corpuri solide,
- două regiuni ale aceluiași corp,
- două fluide,

ca rezultat al existenței unei diferențe de temperatură (potențial termic) între acestea.

o Existența unui potențial termic determină transferul spontan de energie de la corpul cu temperatura mai ridicată la corpul cu temperatura mai scăzută.

# TRANSFERUL DE CALDURA

- o Transferul de căldură se ocupă cu *procese dinamice*, în care energia termică la anumiți parametri se transformă tot în energie termică, dar la alți parametri.
- o Legile transferului termic stau la baza conceperii și exploatării unui număr mare de procese, aparate și instalații industriale, caracteristice nu numai industriei alimentare, ci tuturor industriilor de proces.

# TRANSFERUL DE CALDURA

- o Cantitativ, transferul de căldură decurge conform **principiului conservării energiei**, principiu exprimabil pentru sistemele izolate prin următoarea ecuație generală de bilanț termic:

$$Q_{cedat} = Q_{primit} \quad (1)$$

- o Într-un sistem izolat, în regim staționar, cantitatea de căldură cedată de corpul cu temperatura mai ridicată este egală cu cantitatea de căldură primită de corpul cu temperatura mai scăzută. (Valabil în cazul absenței din sistem a unor surse de căldură: reacții chimice, biochimice sau nucleare.)

# TRANSFERUL DE CALDURA

- o În cazul sistemelor neizolate, ecuația (1) capătă forma:

$$Q_{cedat} = Q_{primit} + Q_{pierderi} \quad (2)$$

- o  $Q_{pierderi}$  = cantitatea de căldură schimbată cu mediul înconjurător

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

- o Principiul întâi al termodinamicii (principiul conservării energiei):

$$\sum dE_i = 0 \quad (3)$$

- o În cazul în care energiile transferate sunt energia internă și energia mecanică, ecuația (3) devine:

$$dQ = dU + dL \quad (4)$$

“căldura schimbată de sistem cu mediul exterior este dată de suma variației energiei interne și a lucrului mecanic efectuat în interacțiunea dintre sistem și mediu”



# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

- o **Entalpia** (notată cu  $i$  sau  $H$ ) este un parametru de stare definit de expresia:

$$i = U + PV \quad (5)$$

- o Diferențind (5) și înlocuind în (4), principiul I al TD se poate scrie:

$$dQ = di - VdP \quad (6)$$

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

- o Cu ajutorul relației (6) căldura poate fi definită ca parametru de stare în procesele:
  - izobare ( $P = \text{ct.}$ ) și
  - izobar - izoterme ( $P = \text{ct.}; T = \text{ct.}$ ).
- o Astfel de procese sunt procesele de transformare de fază:
  - topirea,
  - fierberea,
  - sublimarea,
  - cristalizarea,
  - condensarea.

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

o Cantitatea de căldură schimbată în aceste procese poate fi exprimată funcție de entalpia inițială ( $i_1$ ) și cea finală ( $i_2$ ) a sistemului:

$$(Q)_{P,T} = i_2 - i_1 = r \quad (7)$$

$r$  reprezentând **căldura specifică (latentă)** a transformării de fază.

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

- o Principiul al doilea al termodinamicii (principiul creșterii entropiei) stabilește sensul transformărilor spontane.
- o Conform acestui principiu, "orice proces spontan tinde să se petreacă de la o stare mai puțin probabilă la una mai probabilă".
- o Parametrul de stare care determină sensul transformării de energie este **entropia** ( $S$ ).

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

$$dS \geq \frac{1}{T} dQ \quad (8)$$

- o semnul "=" procese reversibile,
- o semnul ">" procese ireversibile.
- o Deoarece  $T > 0$ ,  $dQ$  și  $dS$  au întotdeauna același semn →
- o Acumularea de căldură decurge cu creșterea entropiei, iar cedarea căldurii decurge cu scăderea entropiei sistemului.

# TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI PRINCIPIILE TERMODINAMICII

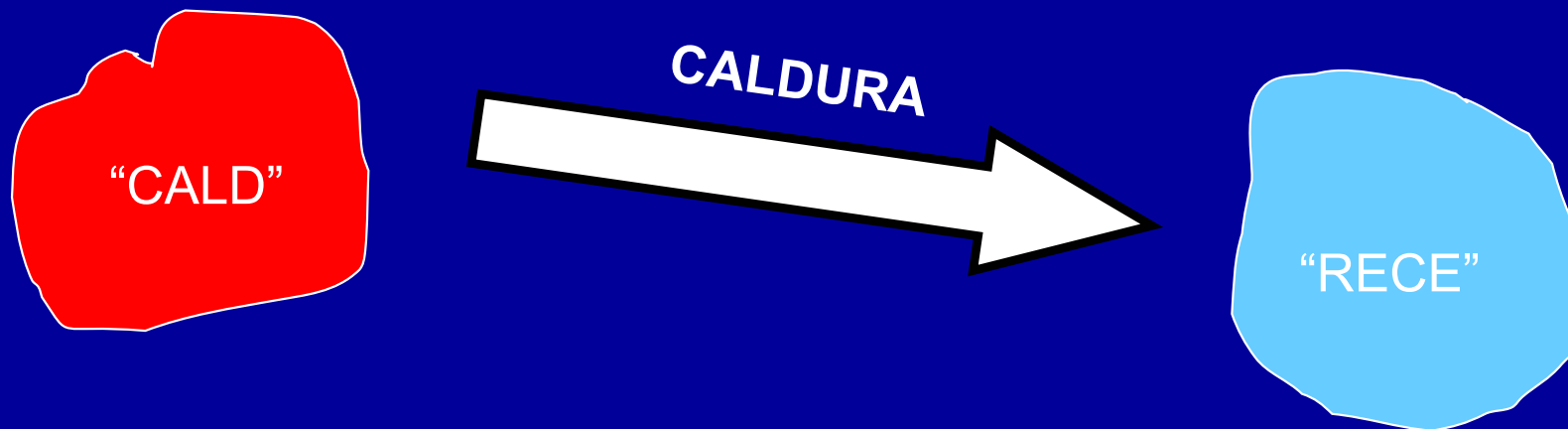
- o Principiul al treilea al termodinamicii (principiul lui Nernst): entropia tinde către o valoare finită când temperatura tinde către zero:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta S = 0 \quad (9)$$

- o Consecință importantă:  
inaccesibilitatea temperaturii de **zero absolut** (0 K).

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o În transferul de căldură nu se urmărește atingerea unui echilibru termic, ci existența în permanență a unei forțe motrice de transfer, determinată de diferența de temperatură dintre două puncte.



# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o **Temperatura** este un parametru scalar de stare, definit de funcția denumită ecuația câmpului de temperatură în regim termic nestaționar:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (10)$$

- o În regim staționar, ecuația câmpului de temperatură are forma:

$$T = f(x, y, z) \quad (11)$$

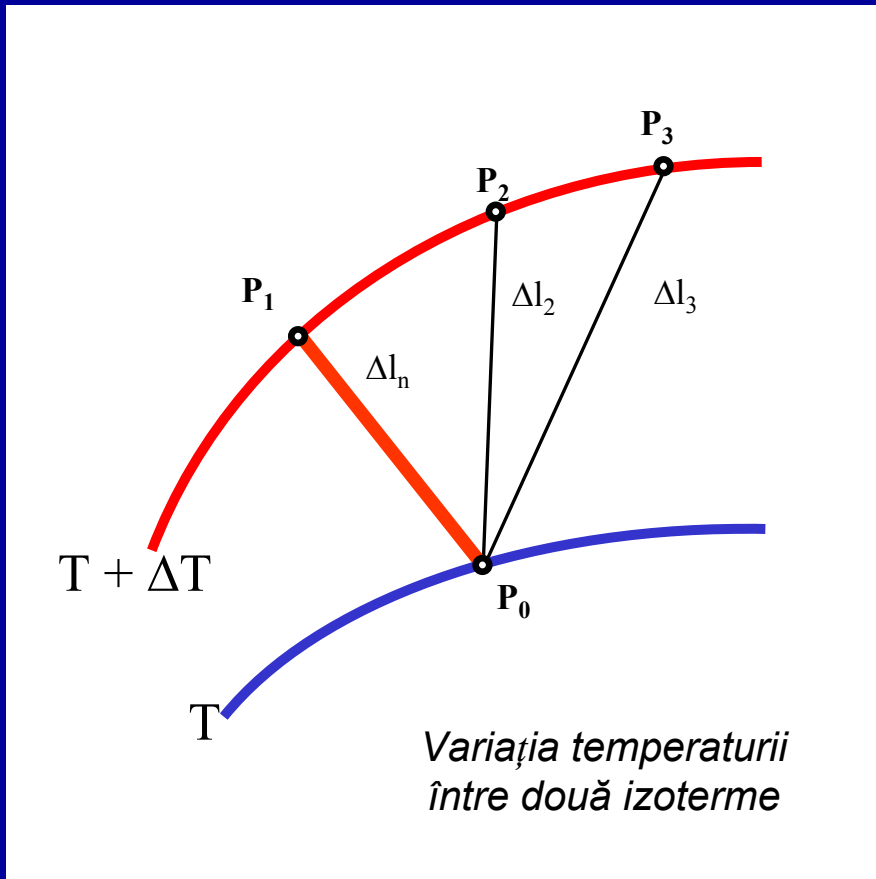


# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o Izoterma reprezintă totalitatea punctelor care la timpul  $t$  au aceeași temperatură.
- o Între două izoterme vecine,  $T$  și  $T + \Delta T$ , la timpul  $t$ , variația temperaturii pe diferite distanțe  $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots$  va fi o mărime variabilă de forma:

$$\frac{\Delta T}{\Delta l_1} ; \frac{\Delta T}{\Delta l_2} ; \dots ; \frac{\Delta T}{\Delta l_n} ; \dots \quad (12)$$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE



- o valoare maximă a acestei marimi se obține pe direcția normală,  $\Delta l_n$
- o Limita raportului dintre variația temperaturii și distanța normală la izotermele considerate poartă denumirea de **gradient de temperatură**

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

$$\lim_{\Delta l_n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta T}{\Delta l_n} \right| = \frac{\partial T}{\partial l_n} \quad (13)$$

o Gradientul de temperatură este o mărime vectorială, care se poate scrie:

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial l_n} (\vec{l}_{n,0}) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial k} \vec{k} = \nabla T \quad (14)$$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o Deoarece gradientul de temperatură este un vector al cărui sens corespunde creșterii de temperatură, gradientul cu semn negativ va reprezenta o cădere de temperatură.
- o Dimensional:

$$[\text{grad } T] = \Theta \cdot L^{-1} = [K \cdot m^{-1}] \quad (15)$$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

o Debit (flux) de căldură:

$$Q_s = \lim_{t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right| = \frac{dQ}{dt} \quad (16)$$

o cantitatea de căldură transferată în unitatea de timp

o Dimensional:

$$\text{Flux termic} = \text{Energie/timp} = [\text{J/s}] = [\text{W}]$$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o În regim termic staționar, fluxul termic este constant în timp, putându-se astfel defini debitul (fluxul) mediu:

$$\overline{Q}_s = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (17)$$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

- o Fluxul termic unitar (solicitarea termică) reprezintă cantitatea de căldură transferată în unitatea de timp prin unitatea de suprafață:

$$q = \frac{dQ_s}{dA} = \frac{d}{dA} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = \frac{d^2 Q}{dA \cdot dt} \quad (18)$$

- o Fluxul termic unitar se va măsura în  $J/(m^2 \cdot s) = W/m^2$

# NOȚIUNI FUNDAMENTALE

o Pentru condiții de staționaritate a procesului de transfer termic se poate defini un flux unitar mediu (solicitare termică medie):

$$\bar{q} = \frac{\Delta Q}{\Delta A \cdot \Delta t} \quad (19)$$



# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

o Există trei modalități de transmitere a căldurii:

- prin conducție,
- prin radiație,
- prin convecție.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o În majoritatea cazurilor întâlnite în practică, transmiterea căldurii se realizează simultan prin **două** sau chiar prin **toate trei** mecanismele amintite mai sus.
- o Întotdeauna transmiterea căldurii prin convecție este însoțită de un transfer conductiv de căldură.
- o Pierderea de căldură a unui corp cald în mediul înconjurător se realizează prin toate cele trei mecanisme de transfer.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o În unele cazuri, deși căldura se transferă prin toate cele trei mecanisme, unul dintre ele deține ponderea cea mai mare în transferul global, acest mecanism fiind **mechanismul determinant** de transfer termic.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

## o Transferul de căldură conductiv (conducție, conductivitate):

- apare în medii imobile (solide) sau fără mișcări aparente (fluide).
- Transferul de căldură se realizează din aproape în aproape în interiorul unui corp sau între două corpuri aflate în contact nemijlocit, fără o deplasare aparentă de substanță.
- Transferul se realizează prin intermediul unor purtători de căldură microscopici: molecule (în fluide), atomi și ioni (în rețele cristaline), electroni liberi (în rețele metalice).

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o Purtătorii de căldură din zona aflată la temperatura mai ridicată sunt caracterizați printr-o energie cinetică mai ridicată.
- o In cazul fluidelor, prin **ciocniri elastice** între molecule, moleculele cu energie cinetică mai ridicată cedează o parte din aceasta moleculelor sărace în energie, ajungându-se în final la egalizarea energiilor cinetice, deci și a temperaturii.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o În cazul solidelor cristaline transmiterea căldurii se realizează ca urmare a **mișcării relative de vibrație** a atomilor sau ionilor în nodurile rețelei.
- o Întrucât această mișcare este mai puțin intensă decât mișcarea moleculelor în fluide, conductivitatea termică a solidelor cristaline nemetalice este mai scăzută în comparație cu conductivitatea termică a lichidelor.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o În cazul metalelor, datorită mării mobilități a **electronilor liberi din banda de conducție**, transferul conductiv este rapid, explicându-se astfel conductivitatea termică net superioară a metalelor în comparație cu alte materiale.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

## o Transferul de căldură radiant (radiația termică)

- este modul de transfer al căldurii sub formă de energie radiantă, datorită naturii electromagnetice a radiației termice.
- Orice corp aflat la  $T > 0$  K emite energie radiantă sub formă de unde electromagnetice. Acestea se pot transforma parțial sau total în căldură în momentul în care întâlnesc un corp în calea lor.
- Datorită caracterului ondulatoriu al radiației termice, transferul de căldură radiant poate avea loc și în absența unor purtători materiali de căldură, de exemplu în vid.



# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

## o Transferul de căldură convectiv (convecția):

- se realizează concomitent cu mișcarea unei mase de fluid.
- Căldura se transmite ca efect al deplasării macroscopice a fluidelor calde în interiorul aceleiași faze, sau între faze diferite aflate în contact.
- În majoritatea cazurilor practice, mișcarea fluidului are loc într-un aparat sau într-o conductă. Se poate deci afirma că transferul convectiv de căldură are loc la deplasarea fluidului de-a lungul unui contur solid mai cald sau mai rece.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

## o Convecție liberă

- modul de transmitere a căldurii în care mișcarea fluidului este determinată numai de diferențele de densitate din masa fluidului, apărute ca urmare a diferențelor de temperatură existente între diferite puncte ale fluidului.
- **De exemplu:** aerul încălzit de la partea inferioară a unei incinte formează curenți ascendenți care transportă căldura la parte superioară a incintei, înlocuind aerul rece, mai greu, care coboară.

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

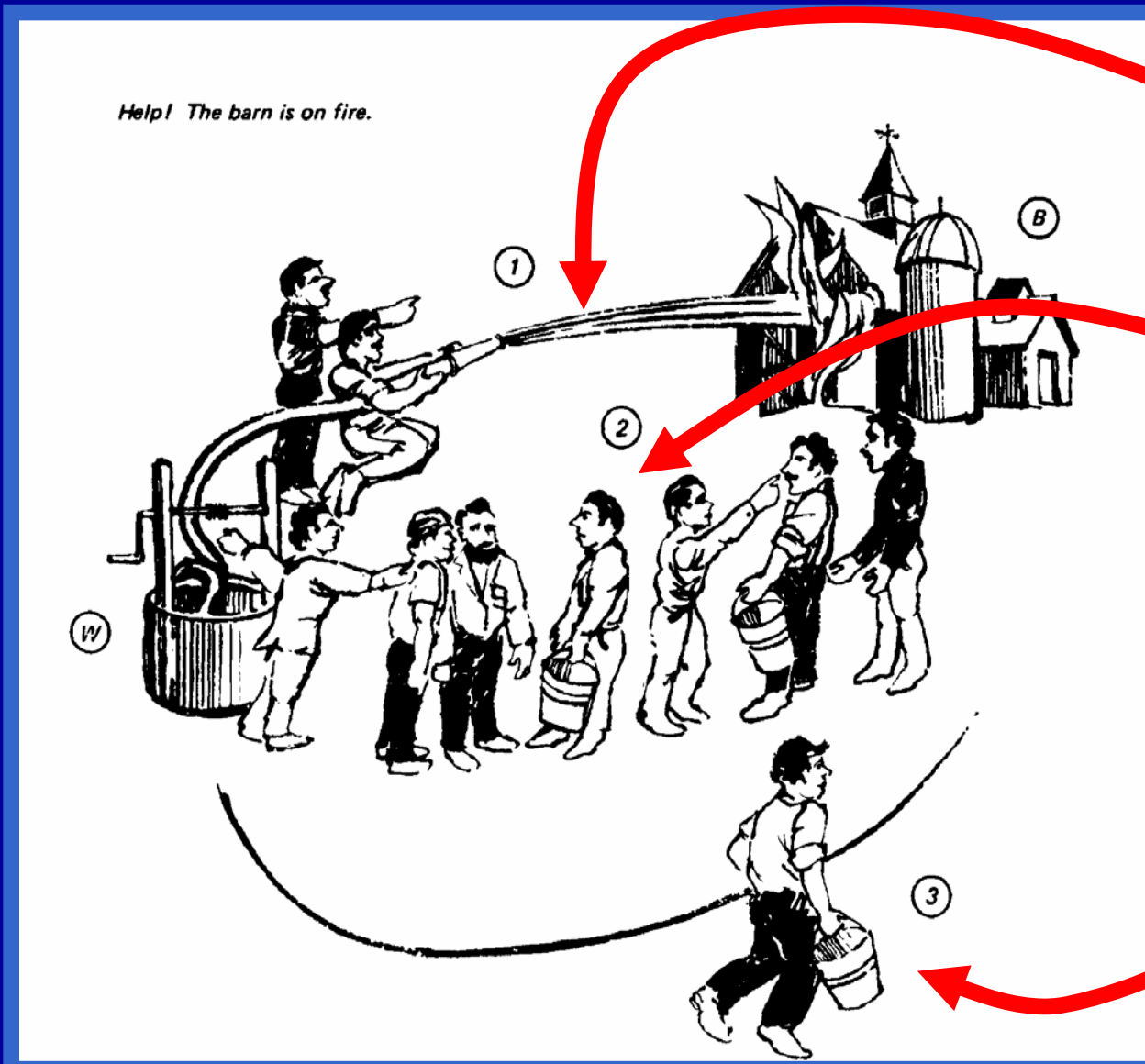
## o Convecție forțată:

- mișcarea fluidului apare sub acțiunea unor gradienti de presiune produși de acțiunea mecanică a unui dispozitiv de transport (pompă, ventilator, compresor, etc.), sau a unui dispozitiv de amestecare (agitator, injector, etc.),

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII

- o Întrucât **convecția** este însoțită întotdeauna de **mișcarea fluidului**, legilor transferului de căldură li se adaugă și legile curgerii, respectiv legile transferului de impuls.
- o Întrucât la limita între fluidul în curgere și conturul solid vitezele sunt mici, tinzând spre zero, în această zonă devine important **transferul termic conductiv** (din aproape în aproape, prin mecanism molecular).

# MECANISME DE TRANSMITERE A CĂLDURII



1. Mecanism radiant;
2. Mecanism molecular;
3. Mecanism convectiv.

# TRANSFER DE CĂLDURĂ PRIN CONDUCTIVITATE

# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

- o Ecuația de bază care determină transferul de căldură conductiv este **legea lui Fourier**, bazată pe principiul al doilea al termodinamicii:
- o "drumul urmat de fluxul termic este cel de minimă rezistență, respectiv cel mai scurt drum între două izoterme învecinate, drum determinat de gradientul de temperatură".

# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

o Pentru un flux termic unidirecțional, legea Fourier se scrie:

$$Q_{s,x} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (21)$$

- Ecuația indică faptul că fluxul termic transmis prin conductivitate în regim staționar este direct proporțional cu aria secțiunii normale pe direcția de propagare a fluxului și cu gradientul de temperatură.
- Semnul minus aplicat gradientului termic arată că transferul decurge în sensul scăderii temperaturii, conform principiului II al TD.



# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

o În termeni de flux unitar, ecuația (21) se scrie:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (22)$$

o Pentru un mediu omogen și izotrop în care temperatura variază spațial, ecuația Fourier se scrie:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} ; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} ; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (23)$$

# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

o sau

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\lambda \nabla T \quad (24)$$

- o  $\lambda$  = **coeficient de conductivitate termică**  
sau, pe scurt, **conductivitate termică**.
- o Dimensional,  $[\lambda] = [W \times m^{-1} \times K^{-1}]$

# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

o Procesele de transfer termic conductiv se pot desfășura într-o mare diversitate de condiții:

- materialul este omogen sau neomogen;
- materialul este izotrop sau anizotrop;
- materialul conține sau nu conține surse interne de căldură;
- regimul termic este staționar sau nestaționar;
- transferul termic are loc uni-, bi- sau tridirecțional.

# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

- o În majoritatea aplicațiilor tehnice, transferul conductiv decurge:
  - prin materiale omogene și izotrope,
  - fără surse interne de căldură,
  - în regim staționar,
  - unidirecțional.

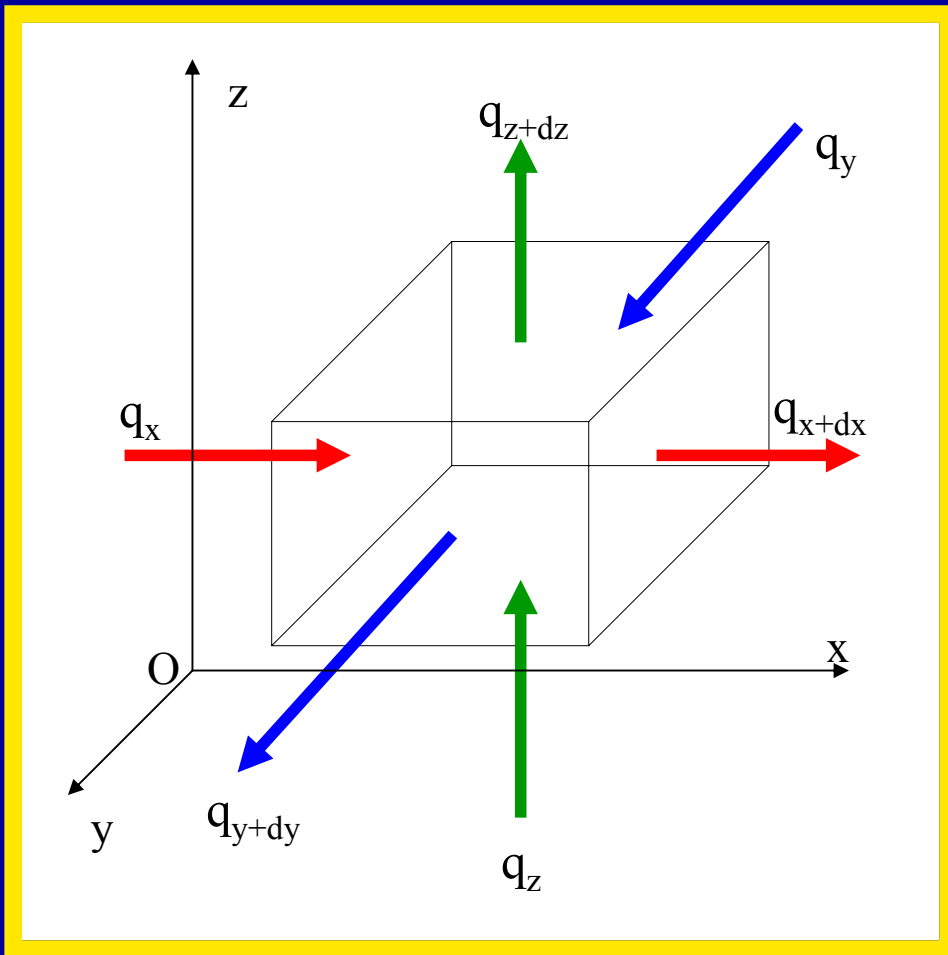
# ECUAȚIILE DIFERENȚIALE ALE CONDUCTIVITĂȚII TERMICE

- o Pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale ale transferului conductiv este necesară stabilirea condițiilor de univocitate pentru proces, și anume:
- **condiții geometrice:** forma și dimensiunile corpului;
  - **condiții fizice:** stabilesc valorile mărimilor  $a$  și  $\lambda$ , precum și legea distribuției și variației spațio-temporale a surselor termice interne;
  - **condiții inițiale:** distribuția  $T$  în interiorul corpului la  $t = 0$ ;
  - **condiții de contur:** distribuția temperaturii sau fluxul termic pe suprafața corpului sau temperatura mediului ambiant și legea schimbului de căldură între corp și mediu.

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

- o Legea Fourier permite determinarea căldurii transferate prin conducție dacă se cunoaște distribuția temperaturilor în corp (expresia câmpului de temperatură).
- o Ecuația diferențială a câmpului de temperatură se obține din bilanțul termic al unui element de volum paralelipipedic (forma nu este restrictivă)  $\Delta V = dx dy dz$  prin care are loc transferul termic:

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL



o Ecuația de bilanț:

$$\begin{aligned} (Q_s)_{\text{acumulat}} &= \\ &= (Q_s)_{\text{intrat}} - (Q_s)_{\text{iesit}} \end{aligned} \quad (25)$$

o Bilanțul se întocmește pentru următoarele condiții:

- corp imobil, omogen și izotrop,
- regim termic nestaționar,
- absența surselor interne de căldură.

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

- o Energia termică acumulată în volumul elementar în unitatea de timp:

$$\rho \cdot dx dy dz \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

- o Fluxul termic intrat în  $dV$  pe direcția  $x$ :

$$q_x \Big|_x \cdot dy dz$$

- o Fluxul termic iese din  $dV$  pe direcția  $x$ :

$$q_x \Big|_{x+dx} \cdot dy dz$$



# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Fluxul termic intrat  
în  $dV$  pe direcția  $y$ :

$$q_y \Big|_y \cdot dx dz$$

o Fluxul termic iese din  
 $dV$  pe direcția  $y$ :

$$q_y \Big|_{y+dy} \cdot dx dz$$

o Fluxul termic intrat  
în  $dV$  pe direcția  $z$ :

$$q_z \Big|_z \cdot dx dy$$

o Fluxul termic iese din  
 $dV$  pe direcția  $z$ :

$$q_z \Big|_{z+dz} \cdot dx dy$$

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Cu aceste înlocuiri, ecuația (25) devine după simplificări și împărțire prin  $dV$ :

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = -\nabla q \quad (26)$$

o Înlocuind expresia fluxului unitar din relațiile (23), ecuația (26) se scrie:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \lambda \nabla^2 T \quad (27)$$

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Sau:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \nabla^2 T = a \nabla^2 T \quad (28)$$

o Coeficientul de difuzivitate termică **a** este o funcție numai de proprietățile fizice ale materialului prin care se propagă căldura ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ) și reprezintă inerția termică a sistemului.

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Dimensional:

$$[a] = \left[ \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \right] = \left[ \frac{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}{(kg \cdot m^{-3})(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})} \right] = \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (29)$$

o Coeficientul de difuzivitate termică are aceeași unitate de măsură ca și:

- viscozitatea cinematică,  $\nu$ ,
- coeficientul de difuziune  $D$ .

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Pentru un element de volum  $dV$  având în interior o sursă termică, ec. (25) se scrie:

$$(Q_s)_{acumulat} = (Q_s)_{intrat} - (Q_s)_{iesit} + (Q_s)_{generat} \quad (30)$$

o Existența unei surse interne de căldură se poate datora uneia sau mai multor cauze:

- transformarea energiei electrice în energie termică,
- reacții de fisiune nucleară,
- degradarea energiei mecanice (disipare viscoasă),
- reacții chimice,
- transformări de fază.

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

o Luând în considerare sursa internă de căldură și ținând cont de faptul că  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  sunt funcții de temperatură, iar corpul nu este omogen, ecuația (27) capătă forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho, c_p, T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (31)$$

cunoscută drept **ecuația Fourier generalizată**.

# DISTRIBUȚIA TEMPERATURILOR ÎNTR-UN MEDIU IMOBIL

În calcule practice, în absența surselor interne de căldură și pe un interval de temperatură nu prea mare, se poate neglija variația mărimilor  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  ca funcții de temperatură, sau se lucrează cu valorii medii ale acestor mărimi, astfel încât se poate utiliza ecuația (27).

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o  $\lambda$  = proprietate fizică specifică fiecărui tip de material,
- o  $\lambda$  = exprimă comportarea materialului la transferul termic conductiv.
- o Dimensiunile conductivității termice rezultă din condiția de omogenitate dimensională a ecuației (21):

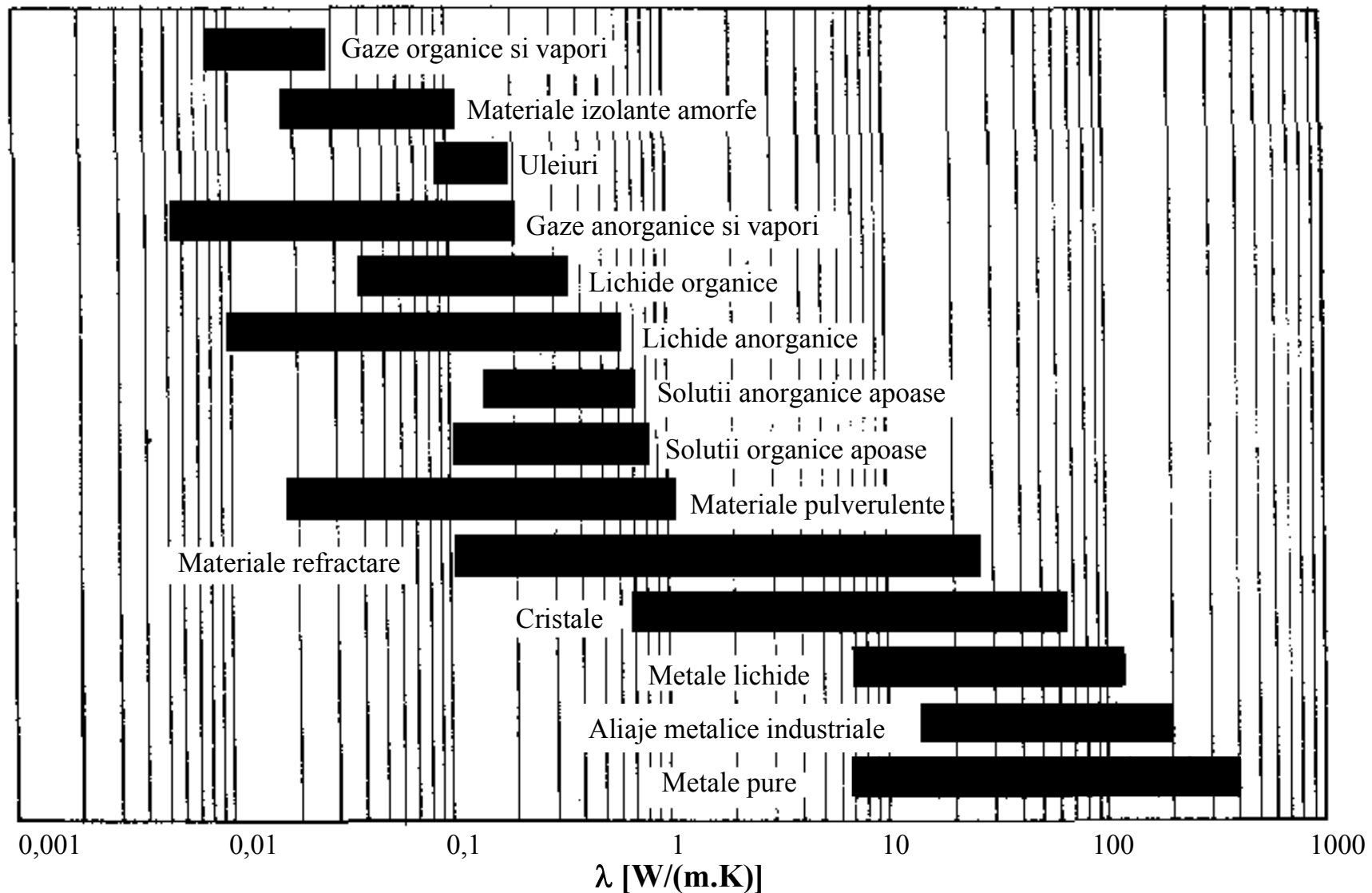
$$[\lambda] = \left[ \frac{(J / s) \cdot m}{m^2 \cdot K} \right] = \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (32)$$



# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o Conductivitatea termică este dependentă de proprietățile fizice ale materialului:
  - temperatură,
  - densitate,
  - porozitate,
  - umiditate.
- o În fig. următoare este prezentat intervalul de variație al conductivității termice pentru diverse materiale.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ



# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o Alegerea materialelor pentru construcția aparatului de transfer de căldură se face și în funcție de  $\lambda$ :
  - pt. accelerarea transferului termic se utilizează materiale cu valori  $\lambda$  ridicate (metale, aliaje),
  - pt. reducerea sau inhibarea transferului se utilizează materiale cu valori  $\lambda$  scăzute (materiale izolante).
  - în procesele de transfer termic este necesară cunoașterea sau determinarea conductivității fluidelor, mărime necesară pentru calculul coeficientului global de transfer termic.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

## o Conductivitatea termică a gazelor:

- Deducere pe baza teoriei cinetico-moleculare;
- Variatia cu  $T$  (legea lui Sutherland):

$$\lambda_T = \lambda_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (35)$$

- în care  $\lambda_T$  este conductivitatea la temperatura  $T$ ,  $\lambda_0$  este conductivitatea la 273 K,  $T$  este temperatura absolută, iar  $C$  este o constantă caracteristică fiecărui gaz.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

Valorile  $\lambda_0$  și  $C$  din ecuația (35)

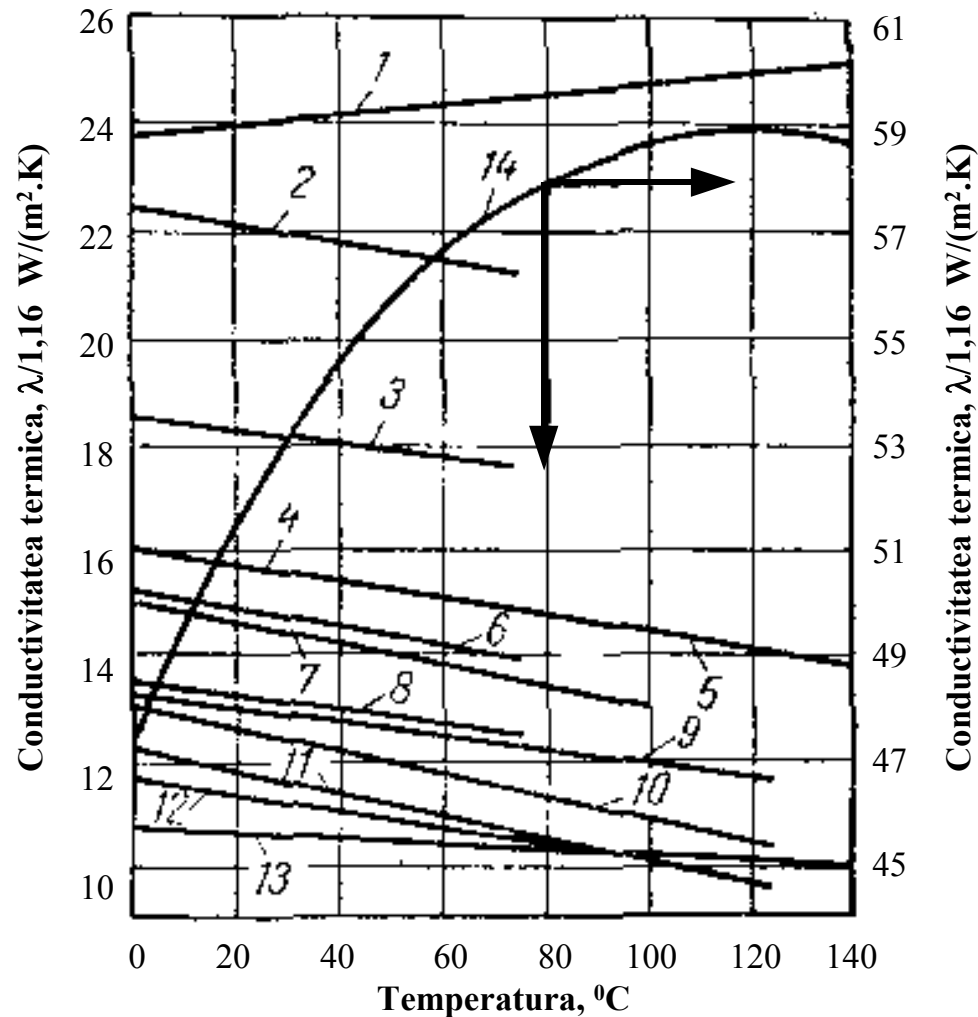
Gazul	$\lambda_0$ [W/(m.K)]	$C$ [K]	Gazul	$\lambda_0$ [W/(m.K)]	$C$ [K]
Hidrogen	0,1594	94	Oxid de carbon	0,0215	156
Azot	0,0243	102	Amoniac	0,0200	626
Aer	0,0234	122	Dioxid de sulf	0,0077	396
Oxigen	0,0234	144	Clor	0,0072	351

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

## o Conductivitatea termică a lichidelor

- Conductivitatea termică a lichidelor este funcție de temperatură și de presiune.
- Cu excepția apei și glicerinei, conductivitatea termică a lichidelor scade cu creșterea temperaturii.
- Conductivitatea termică a soluțiilor apoase este mai redusă decât a apei și scade cu creșterea concentrației solutului.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ



- 1 - glicerina anhidra;
- 2 - acid formic;
- 3 - metanol;
- 4 - etanol;
- 5 - anilina;
- 6 - acid acetic;
- 7 - acetona;
- 8 - butanol;
- 9 - nitrobenzen;
- 10 - benzen;
- 11 - toluen
- 12 - xilen;
- 13 - ulei de vaselina;
- 14 - apa (pe ordonata din dreapta).

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o Conductivitatea termică a materialelor solide
  - $\lambda$  pentru solide are valori foarte diferite, funcție de natura și proprietățile mat.
  - Funcție de valoarea  $\lambda$ , solidele se împart în:
    - materiale izolante  $\lambda = 0,02 - 0,12 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
    - materiale refractare  $\lambda = 0,60 - 3,50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
    - materiale metalice  $\lambda = 8,70 - 458 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$



# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o **Umiditatea** mărește mult conductivitatea termică a materialelor; conductivitatea termică a materialului umed este mai mare decât suma conductivităților apei și materialului uscat.
- o Pentru **materialele poroase**, conductivitatea termică scade cu creșterea porozității (a densității aparente), tinzând către conductivitatea termică a aerului ( $0,023 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  la  $20^\circ\text{C}$ ).

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

o Conductivitatea acestor materiale se poate calcula cu relația:

$$\lambda \cong \lambda_m \frac{1 - \left(1 - \frac{3\lambda_p}{2\lambda_m + \lambda_p}\right) \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{3\lambda_m}{2\lambda_m + \lambda_p} - 1\right) \cdot \varepsilon} \quad (39)$$

- $\lambda_m$  = conductivitatea materialului propriu zis,
- $\lambda_p$  = conductivitatea fluidului din pori,
- $\varepsilon$  = porozitatea (fracția de goluri) materialului.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

o  $\lambda$  crește aproximativ liniar cu creșterea temperaturii după o funcție de forma:

$$\lambda_T = \lambda_0 + b \cdot T \quad (40)$$

$$\lambda_T = \lambda_0 (1 + \beta \cdot T) \quad (41)$$

în care coeficienții  $b$  și  $\beta$  sunt caracteristici fiecărui material în parte

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

- o Materialele metalice au cea mai ridicată conductivitate termică.
- o Conductivitatea termică a metalelor pure este aproximativ proporțională cu conductivitatea electrică.
- o Aliajele metalice au o conductivitate termică mai scăzută decât metalele componente aflate în stare pură.

# COEFICIENTUL DE CONDUCTIVITATE TERMICĂ

o Cu excepția Cu și Al,  $\lambda$  pt. metale scade cu creșterea temp. după o relație de forma:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - k_1 T - k_2 T^2) \quad (43)$$

o Pentru calcule aproximative, se poate considera o dependență liniară a  $\lambda$  de T:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - k_1 T) \quad (44)$$

# Conductivitatea termică a unor materiale solide

Materiale nemetalice	$\lambda$ [W/(m.K)]	Materiale metalice	T [K]	$\lambda$ [W/(m.K)]
azbest	0,15 - 0,21	alamă	303	113
azbociment	0,35	aluminiu	373	207
beton	1,28	argint	373	416
cărămidă	0,69 – 0,81	bronz	303	189
lemn de fag	0,23 – 0,41	cadmiu	291	94
lemn de brad	0,17 – 0,35	cupru	373	378
nisip uscat	0,35 – 0,81	fontă	373	49
plută	0,04 – 0,05	grafit	373	151
polistiren	0,04	nichel	373	59
poliuretan	0,04	oțel (1%C)	291	45
rumeguș	0,07 – 0,09	oțel inox	293	16
sticlă	0,70 - 0,81	plumb	373	33
vată minerală	0,07	staniu	373	59
vată de sticlă	0,03 - 0,07	tantal	291	55
zgură	0,22 - 0,29	zinc	373	110