

Capitolul 1

NOȚIUNI INTRODUCTIVE

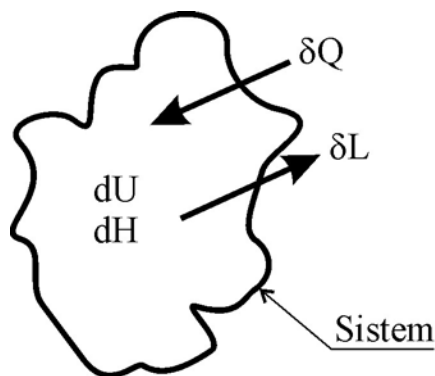
1.1. Generalități

Transferul de căldură este o formă de schimb de energie datorat diferențelor de temperatură în absența lucrului mecanic.

Alături de termodinamică, transferul de căldură face parte din ramura inginerescă numită termotehnică.

Transferul de căldură are la bază principiile I și II ale termodinamicii:

- Principiul I, care exprimă legea conservării energiei și care, pentru sisteme închise, se scrie sub forma:



$$\delta Q = dU + p \cdot dV = dH - V \cdot dp$$

$$\delta Q = dU + \delta L = dH + \delta L_t$$

$$dU = m \cdot c_v \cdot dT = m \cdot c_v \cdot dt$$

$$dH = m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_p \cdot dt$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta L = 0 \\ \delta L_t = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \delta Q = dU = dH = m \cdot c_p \cdot dt$$

Fig. 1.1: Sistem termodinamic închis

- Principiul II, care stabilește sensul natural de transmitere a căldurii și anume, de la sursa mai caldă la sursa mai rece.

În cadrul transferului de căldură, analiza termodinamică (care consideră toate sistemele în echilibru) este completată cu legi noi care țin seama de caracterul cinetic al proceselor și care introduc noțiunea de viteză de transfer.

Temperatura este parametrul termodinamic care caracterizează starea de cald sau de rece a unui sistem. Atunci când este exprimată într-o scară absolută (Kelvin, Rankine), se simbolizează cu T , iar când este exprimată într-o scară relativă (Celsius, Fahrenheit), cu t .

Câmpul de temperaturi reprezintă mulțimea valorilor temperaturii dintr-un spațiu la un moment dat. Dacă valorile temperaturii rămân constante în timp, câmpul de temperaturi se află în regim staționar, iar dacă acestea variază în timp, regimul este nestaționar. În funcție de numărul de coordonate spațiale, câmpul de temperaturi poate fi: uni-, bi- sau tri-direcțional.

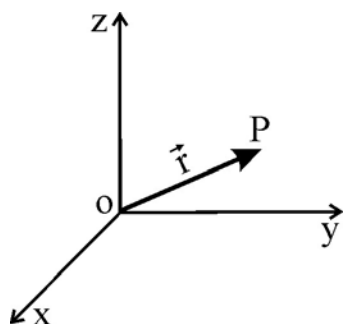


Fig. 1.2: Câmp de temperaturi

Ecuția câmpului de temperaturi tri-direcțional în regim nestaționar are forma:

$$t = t(x, y, z, \tau) \text{ sau } t = t(\vec{r}, \tau)$$

Cea mai simplă formă a ecuației câmpului de temperaturi este cea uni-direcțională în regim staționar:

$$t = t(x) \quad \left(\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \right)$$

Suprafața izotermă reprezintă mulțimea punctelor din spațiu care la un moment dat au aceeași temperatură. Suprafețele izoterme nu se intersectează între ele.

Linie izotermă reprezintă intersecția dintre o suprafață izotermă și un plan. Prin urmare, liniile izoterme nu se intersectează între ele.

Gradientul de temperatură reprezintă un vector normal la suprafața izotermă având sensul în direcția creșterii temperaturii și mărimea egală cu derivata temperaturii în raport cu normala la suprafață.

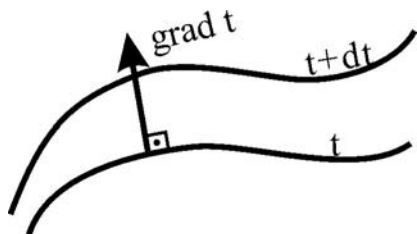


Fig. 1.3: Gradientul temperaturii

$$\text{grad } t = \nabla t = \frac{\partial t}{\partial n} \cdot \vec{n}$$

unde ∇ este operatorul nabla (Hamilton) și \vec{n} versorul normalei la suprafața izotermă.

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \cdot \vec{k}$$

$$|\text{grad } t| = \frac{\partial t}{\partial n} = \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2} \quad [\text{K/m}]$$

Fluxul termic, \dot{Q} , este cantitatea de căldură care străbate o suprafață izotermă în unitatea de timp.

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{d\tau} \quad [\text{W}]$$

Denumiri echivalente pentru fluxul termic: flux termic total, flux de căldură, debit de căldură, putere termică.

Fluxul termic unitar, \dot{q} , este fluxul termic care trece prin unitatea de suprafață.

$$\dot{q} = \frac{\delta \dot{Q}}{dS} = \frac{\delta^2 Q}{dS \cdot d\tau} \quad [\text{W/m}^2]$$

Denumiri echivalente pentru fluxul termic unitar: densitate de flux termic, flux de căldură unitar, densitate de flux de căldură.

1.2. Mecanismele transferului de căldură

Căldura poate fi transmisă prin trei mecanisme (moduri) fundamentale: conducție, convecție și radiație. Acestea se pot manifesta separat sau combinat.

Conducția este modul (procesul) fundamental de transfer de căldură care are loc în interiorul corpului prin difuzia particulelor elementare ale acestuia (atomi, molecule). Transmiterea căldurii prin conducție este caracteristică solidelor și fluidelor aflate aparent în repaus (între particulele macroscopice nu există mișcare relativă).

Legea lui Fourier (1822) este legea fundamentală a conducției și se enunță astfel: fluxul termic unitar este direct proporțional cu gradientul de temperatură.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot \vec{n}$$

Valoarea fluxului termic unitar va fi:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \quad [\text{W/m}^2]$$

Semnul minus este impus de Principiul II al termodinamicii. Factorul de proporționalitate λ , este o proprietate fizică a materialului și se numește **conductivitate termică**. Ea se determină experimental și indică capacitatea materialului de a transmite căldură.

Convecția este modul (procesul) fundamental de transfer de căldură care are loc între o suprafață și un fluid aflat în mișcare relativă față de aceasta. Transmiterea căldurii prin convecție se realizează prin amestec sau difuzie molară și este întotdeauna însoțită și de conducție.

Legea lui Newton (1701) este legea fundamentală a convecției și se enunță astfel: fluxul termic unitar este direct proporțional cu diferența dintre temperatura suprafeței și cea a fluidului.

$$\dot{q} = \alpha_{cv} \cdot (t_p - t_f) \quad [\text{W/m}^2]$$

Notă: În relația de mai sus, temperatura suprafeței se consideră mai mare decât cea a fluidului:

$$t_p > t_f$$

Factorul de proporționalitate α_{cv} , se numește **coeficient de convecție** și reprezintă fluxul termic unitar transmis de suprafață către fluid atunci când diferența dintre temperaturile acestora este de 1 K:

$$\alpha_{cv} = \frac{\dot{q}}{t_p - t_f} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K}]$$

Radiația este modul (procesul) fundamental de transfer de căldură care are loc între suprafețele a două corpuri separate de un mediu transparent sau între un gaz tri- sau poli-atomic și suprafața altui corp. Schimbul de căldură radiant se realizează prin unde electromagnetice. Radiația termică este caracteristică corpurilor având temperaturi ridicate.

Legea lui Stefan-Boltzmann (stabilită experimental de Stefan în 1879 și teoretic de Boltzmann în 1884) este legea fundamentală a radiației și se enunță astfel: puterea de emisie a corpului negru este direct proporțională cu temperatura sa absolută la puterea a patra.

$$E_o = \sigma_o \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

unde σ_o este constanta lui Stefan-Boltzmann: $\sigma_o = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Pentru corpurile cenușii, puterea de emisie este dată de relația:

$$E = \varepsilon \cdot E_o = \varepsilon \cdot \sigma_o \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

unde ε este **emisivitatea** corpului respectiv.

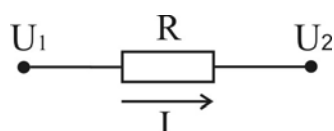
Fluxul termic unitar transmis prin radiație între două corpuri solide separate de un mediu transparent se determină cu relația:

$$\dot{q}_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma_o \cdot \varphi_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (T_1 > T_2)$$

unde ε_{12} este **emisivitatea reciprocă** a celor două corpuri și φ_{12} este **factorul de formă** al suprafeței corpului "1" în raport cu suprafața corpului "2".

1.3. Analogia electrică a transferului de căldură

Legea lui Ohm din electrotehnică se enunță astfel: intensitatea curentului electric ce străbate un circuit este direct proporțională cu forța electromotoare (diferența potențialelor de la capetele circuitului) și invers proporțională cu rezistența totală a circuitului.

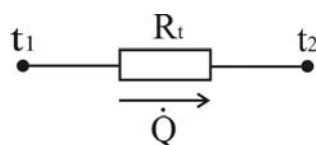


$$I = \frac{\Delta U}{R} = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad [\text{A}]$$

Fig. 1.4: Schema electrică

În studiul proceselor de transfer de căldură în regim staționar se pot realiza scheme electrice analoage (echivalente) cu cele din electrotehnică.

Expresia analogă a fluxului termic total se scrie sub forma:



$$\dot{Q} = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{t_1 - t_2}{R_t} \quad [\text{W}]$$

unde R_t reprezintă rezistența termică totală:

Fig. 1.5: Schema electrică echivalentă

$$R_t = \frac{\Delta t}{\dot{Q}} \quad [\text{K/W}]$$

În cazul în care fluxul termic unitar este constant (nu variază în raport cu direcția de propagare), expresia analogă a acestuia va fi:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad [\text{W/m}^2]$$

unde R reprezintă rezistența termică unitară:

$$R = \frac{\Delta t}{\dot{q}} = \frac{\Delta t \cdot S}{\dot{Q}} = S \cdot R_t \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

Atât procesele simple de transfer de căldură cât și cele combinate pot fi studiate cu ajutorul schemelor electrice analoage în serie sau în paralel.

1.4. Transferul global de căldură

Transferul global de căldură este procesul complex în care propagarea căldurii are loc simultan prin două sau prin toate cele trei moduri (mecanisme) fundamentale.

Fluxul termic total se poate determina cu ajutorul schemelor electrice analoge sistemului analizat:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta t}{R_{tech}} \quad [\text{W}]$$

unde R_{tech} reprezintă rezistența termică totală echivalentă, în K/W.

O altă formă de exprimare a fluxului termic total, utilizată frecvent în practica inginerescă, este următoarea:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta t \quad [\text{W}]$$

în care k este **coeficientul global** de transfer de căldură în $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

1.5. Aplicații tehnice ale transferului de căldură

Există numeroase aplicații tehnice ale transferului de căldură întâlnite în diverse ramuri industriale, cum ar fi: industria chimică, industria nucleară, industria alimentară, industria termoenergetică, industria electronică, și altele.

Procesele de transfer de căldură stau la baza realizării instalațiilor de încălzire, de climatizare, frigorifice, de uscare, de desprăfuire, solare, și multe altele.

Fenomenele de transfer de căldură au un rol determinant în studiul și funcționarea aparatelor termice, ca de exemplu: generatoarele de abur (cazanele), schimbatoarele de căldură, vaporizatoarele, condensatoarele, etc.

1.6. Proprietăți fizice ale materialelor

- **Conductivitatea termică**, λ [W/m·K], reprezintă cantitatea de căldură transferată în unitatea de timp prin unitatea de suprafață între două izoterme aflate la distanța de un metru și a căror temperatură diferă cu un grad Celsius (Kelvin), ($1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$).

Din ecuația lui Fourier, $\dot{q} = -\lambda \cdot \partial t / \partial n$, unde conductivitatea termică apare ca factor, rezultă că:

$$\lambda = \left| \frac{\dot{q}}{\partial t / \partial n} \right| \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}]$$

Conductivitatea termică depinde de structura materialului, de temperatură și de presiune. Pentru majoritatea aplicațiilor ingineresti, se poate considera o variație liniară a conductivității termice cu temperatura:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t) \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}]$$

unde λ_0 este conductivitatea termică a materialului la temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ și b este un coeficient pozitiv sau negativ, a cărui valoare depinde de material.

Conductivitatea termică scade cu temperatura pentru metale pure ($b < 0$), crește cu temperatura pentru aliaje ($b > 0$), crește atât cu temperatura cât și cu densitatea aparentă pentru materiale poroase sau granulare, scade cu temperatura în cazul lichidelor, cu excepția apei și glicerinei și crește cu temperatura în cazul gazelor. Dintre lichide, exceptând metalele lichide, apa are conductivitatea termică cea mai ridicată. În schimb, gazele au conductivitatea termică mică (sunt bune izolatoare termice), iar în cazul aburului, conductivitatea termică depinde puternic de presiune.

- **Densitatea**, ρ [kg/m³], se definește ca masa unității de volum. Pentru majoritatea solidelor și lichidelor, densitatea variază foarte puțin cu temperatura și nu este influențată de presiune. În cazul gazelor, densitatea variază puternic atât cu presiunea cât și cu temperatura. Cu toate acestea, în practică densitatea se exprimă la presiunea atmosferică numai în funcție de temperatură. Pentru presiuni diferite de cea atmosferică, se aplică o corecție în baza legii gazelor perfecte:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \quad [\text{kg/m}^3]$$

- **Căldură specifică (capacitate calorică) masică**, c [J/kg·K], este o măsură a variației energiei înmagazinate într-un corp în funcție de temperatura acestuia. În termodinamică se definesc două călduri specifice:

$$\text{la volum constant: } c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad \text{și} \quad \text{la presiune constantă: } c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p$$

unde u este energia internă specifică în J/kg și h entalpia specifică în J/kg.

Pentru solide și lichide, cele două călduri specifice sunt practic egale, în timp ce la gaze, valorile lor diferă considerabil. La solide, căldura specifică este slab dependentă atât de presiune cât și de temperatură, la lichide variază cu temperatura iar la gaze variază puternic cu temperatura și nesemnificativ cu presiunea.

- **Difuzivitatea termică**, a [m²/s], se definește ca raportul dintre conductivitatea termică și capacitatea termică (produsul dintre densitate și căldura specifică la presiune constantă) a unui material.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Difuzivitatea termică caracterizează viteza transferului de căldură printr-un material. La gaze, ea variază puternic atât cu presiunea cât și cu temperatura.

- **Viscozitatea dinamică**, (absolută) μ [N·s/m²], caracterizează forțele de frecare dintre straturile unui fluid în mișcare. Ea apare în expresia legii lui Newton, care spune că tensiunea tangențială τ , este direct proporțională cu gradientul vitezei.

$$\tau = \frac{F}{S} = -\mu \cdot \partial w / \partial n \quad [\text{N}/\text{m}^2]$$

unde factorul de proporționalitate μ este viscozitatea dinamică.

Atât în cazul lichide cât și în cel al gazelor, viscozitatea dinamică depinde de temperatură și este practic constantă în raport cu presiunea.

- **Viscozitatea cinematică**, ν [m²/s], se definește ca raportul dintre viscozitatea dinamică și densitate.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Spre deosebire de viscozitatea dinamică, viscozitatea cinematică este puternic dependentă de presiune (datorită densității).