

5. Sdílení tepla.

pojmy:

Pojmem **tepelná energie** označujeme energii mikroskopického pohybu částic (translačního, rotačního, vibračního).

Měřitelnou mírou této energie je **teplota**.

Teplu je část vnitřní energie, která samovolně přechází z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Přesnější (avšak nezavedené) označení pro teplo by byl například pojem *tepelná energie*. Teplo je tedy pojem popisující *proces*, který způsobuje *změnu stavu* systému, na rozdíl od *teploty*, která popisuje *stav* systému.

Tepelný tok \dot{Q} je definován jako množství tepla, které projde danou plochou za jednotku času (ve směru kolmém na tuto plochu.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dT}$$

Jednotkou tepla je jednotka energie, tj. 1 Joule (J). Z definice dále plyne, že jednotkou tepelného toku je 1 J/s (neboli 1 W)

V praxi se celkové množství tepla vyjadřuje v J (a v jeho násobcích – kJ, MJ, GJ) nebo v kilowatthodinách (kWh).

Základními mechanismy sdílení tepla jsou tři:

- vedení (kondukce),
- proudění (konvekce)
- sálání (radiace).

Vedením tepla rozumíme přenos tepla v nehybném prostředí prostřednictvím vibrací základních částic hmoty (atomů, molekul). Klasický pokus na prokázání sdílení tepla vedením je ohřev kovové tyče na jednom konci, kdy teplota postupně vzrůstá nejen v místě ohřevu, ale postupně i ve vzdálenějších částech.

O *sdílení tepla prouděním* hovoříme v tekutém prostředí, kde dochází k pohybu větších celků tekutiny buďto samovolně (díky rozdílu hustot: s rostoucí teplotou obvykle hustota tekutiny klesá, ohřátá tekutina tak stoupá vzhůru a na její místo přichází chladnější tekutina, tento jev nazýváme **volná konvekce**), anebo je proudění vynuceno působením vnější síly, např. zařazením čerpadla (**nucená konvekce**).

Ke *sdílení tepla sáláním* může docházet mezi dvěma tělesy o různé teplotě, jestliže teplejší těleso vyzařuje paprsky v infračervené oblasti spektra (a tím se ochlazuje), zatímco chladnější těleso toto záření pohlcuje (a tím se zahřívá). Jedná se tedy o sdílení tepla mezi dvěma systémy (tělesy), které nejsou v přímém kontaktu, musí však mezi nimi být prostředí propustné pro elektromagnetické záření (např. vakuum).

V prostředí chemických technologií, které jsou okruhem zájmu těchto přednášek se mechanismus sdílení tepla sáláním neuplatňuje.

V dalším stručně probereme mechanismy sdílení tepla vedením a prouděním a jejich kombinace ***přestup a prostup tepla***.

Vedení tepla:

Podle nultého zákona termodynamiky (*opakování !!!*) je systém v tepelné rovnováze (tj. nedochází v něm ke sdílení (toku) tepla pokud má všude stejnou teplotu (tj. teplota je konstantní).

Dále je známo, že obecnou hybnou silou procesů je jejich vzdálenost od rovnovážného stavu. V tomto případě je mírou odchylky, vyjádřením vzdálenosti od rovnovážného stavu, *gradient teploty*.

V dalším se omezíme na gradient teploty ve směru osy z . Podle Fourierova zákona pro vedení tepla platí: Tok tepla \dot{Q} ve směru osy z skrz plochu A , kolmou na osu z , je roven součinu velikosti této plochy a záporné hodnotě derivace teploty podle osy z (gradientu teploty ve směru této osy)

$$\dot{Q} = - A \lambda \frac{dT}{dz} .$$

Záporné znamínko vyjadřuje, že tok tepla je kladný ve směru klesající teploty. Konstantou úměrnosti je ***tepelná vodivost λ*** .

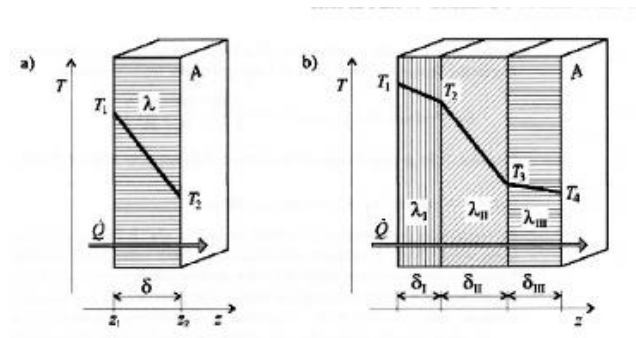
Tepelná vodivost je materiálová vlastnost, závisí na druhu materiálu a teplotě, u plynů i na tlaku.

Jednotka tepelné vodivosti je **$Wm^{-1}K^{-1}$** . Její hodnoty jsou tabelované.

Intenzitu toku tepla vedením definujeme jako tok tepla ve směru osy z vztažený na jednotku plochy

$$q_{ved,z} = \dot{Q}/A = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

Vedení tepla rovinnou stěnou



Představme si reálnou situaci podle obrázku. Dále vycházíme z předpokladu, že při ustáleném jednosměrném vedení tepla musí být intenzita tepelného toku konstantní, jinak by mezi plochami docházelo k akumulaci tepelné energie a tím i ke změně teploty. To by ale bylo v rozporu s předpokladem ustáleného stavu. Dalším předpokladem je konstantní hodnota tepelné vodivosti λ .

Za těchto předpokladů řešením Fourierovy rovnice dostaneme vztah pro výpočet tepelného toku jednoduchou rovinnou stěnou

$$\dot{Q} = A\lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta}$$

Porovnáním původní rovnice a výsledku po integraci je zřejmé, že derivace teploty ve směru osy z je konstantní, což jinými slovy znamená, že teplotní profil je lineární

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{T_1 - T_2}{\delta} = \text{konstanta}$$

Představme si rovinnou stěnu složenou z více vrstev –viz obrázek. Analogicky jako pro případ jednoduché stěny lze odvodit vztah

$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} \right)}, \text{ který je možné zobecnit pro } n \text{ vrstev}$$

$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}}, \text{ použitelný pro výpočet tepelného toku přes složitou stěnu.}$$

Důležitou (pro praktické aplikace) vlastností tohoto výpočtového vztahu je potřeba znalosti pouze teplot na okrajích systému.

Vedení tepla válcovou stěnou

V praxi se často můžeme setkat s případem vedení tepla přes válcovou plochu – ve směru kolmém na podélnou osu válcové plochy, resp. systému sousedících válcových ploch (viz obr). Při ustáleném vedení tepla musí být tepelný tok každou z ploch stejný. Nezávisí tedy na vzdálenosti od osy ploch – radiální souřadnici r . Platí totéž co bylo uvedeno pro rovinnou stěnu.

Platí pro tok válcovou plochou o poloměru r a délce L

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dr} = -2\lambda\pi r L \frac{dT}{dr}$$

Řešením této rovnice dostaneme vztah pro výpočet ustáleného tepelného toku válcovou plochou

$$\dot{Q} = 2\pi L \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2\pi L \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Obdobně jako pro případ rovinné plochy lze odvodit pro obecný případ n -válcových vrstev

$$\dot{Q} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j}} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}$$

Přestup tepla

V systémech s proudící tekutinou se vedle sdílení tepla vedením uplatí i sdílení tepla prouděním – konvekcí.

Množství tekutiny m s měrnou entalpií h obsahuje takové množství entalpie H , která je rovna součinu

$$H = mh.$$

Pokud množství proudící tekutiny vyjádříme pomocí hmotnostního toku \dot{m} , tok entalpie je pak

$$\dot{H} = \dot{m}h \quad .$$

Pokud v souladu s předcházejícím vztáhneme tok entalpie prouděním na jednotku plochy A kolmou na osu z je intenzita toku entalpie prouděním ($q_{kon,z}$)

$$q_{kon,z} = \frac{\dot{H}}{A} = \frac{\dot{m}h}{A} = \frac{\dot{V}\rho h}{A} = v_z \rho h$$

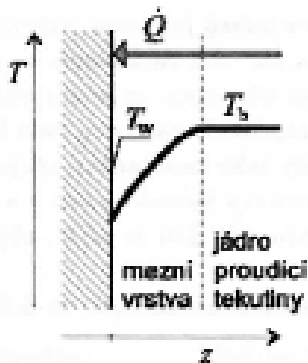
Intenzita toku entalpie je obecně vektorová veličina, entalpie se může sdílet obecně ve všech třech směrech.

Pro řešení tohoto problému je potřeba znát rychlost proudění tekutiny v každém místě a čase. Z hydrodynamiky se využije poznatek o vyvinutém rychlostním profilu tekutiny – mezní vrstva, jádro proudící tekutiny. Pro praktické účely se tento problém transformuje na sdílení tepla mezi jádrem proudící tekutiny a povrchem stěny. Hnací silou je rozdíl teploty v jádru proudící tekutiny (nemění se a dá se změřit) a teplotou stěny. V praxi tento proces sdílení tepla mezi jádrem proudící tekutiny a povrchem stěny (resp. fázovým rozhraním, např. voda – vzduch) nazýváme **přestup tepla**.

Newtonův ochlazovací zákon:

popisuje jaké množství tepla se vymění mezi proudící tekutinou a pevnou stěnou (fázovým rozhraním), tj. **přestup tepla**

$$\dot{Q} = \alpha A (T_b - T_w), \quad \text{kde } \alpha \text{ je součinitel přestupu tepla.}$$



Tímto se úloha popisu *přestupu tepla* převádí na úlohu na nalezení hodnoty *součinitele přestupu tepla*.

Výpočet *součinitele přestupu tepla* je složitý problém. Hodnota *součinitele přestupu tepla* závisí na

- typu proudění (konvekce) tekutiny,
- geometrických vlastnostech obtékaných těles,
- fyzikálně chemických vlastnostech tekutin.

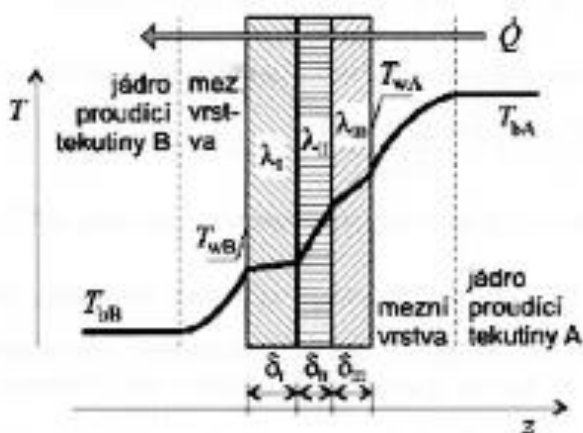
Tato problematika přesahuje rámec tohoto kurzu. V případě potřeby lze postupy nalézt v odborné literatuře.

Prostup tepla – složené sdílení tepla.

V technické praxi se často vyskytují problémy typu: určit množství tepla, které se vyměňuje mezi dvěma proudícími tekutinami, vzájemně oddělenými stěnou nepropustnou pro hmotu, ale propustnou pro teplo (jednoduchou nebo složenou).

Prostup tepla se tedy skládá z následujících procesů (sériových, řazených za sebou):

- *přestup tepla* z jádra proudící teplejší tekutiny **A** na povrch stěny, kolem které tekutina **A** protéká,
- *vedení tepla* stěnou (jednoduchou nebo složenou)
- *přestup tepla* z povrchu stěny, kolem které protéká tekutina **B** do jádra této tekutiny.



Pokud uvažujeme ustálený stav, můžeme odvodit výpočtové vztahy:

Prostup tepla rovinnou stěnou:

$$\dot{Q} = KA\Delta T, \text{ kde}$$

$$\Delta T = T_{bA} - T_{bB}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B}, \text{ } K \text{ je součinitel prostupu tepla}$$

Prostup tepla válcovou stěnou:

$$\dot{Q} = K_L L \Delta T, \text{ kde}$$

L délka válcové plochy,

$$\Delta T = T_{bA} - T_{bB}$$

$$\frac{2\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A r_A} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} + \frac{1}{\alpha_B r_B}, \text{ resp. } \frac{\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B}$$

K_L je součinitel prostupu tepla, vztažený na jednotkovou délku (trubky).

Poznámka:

Jak bylo vzpomenuto, určení součinitele přestupu tepla α není jednoduché. Výhodou však je, že někteří výrobci aparátů uvádějí pro svoje výrobky orientační hodnoty součinitele prostupu tepla, které jsou pro technické výpočty dostatečné.

Např. fa KAVALIER uvádí:

Orientační hodnoty celkového součinitele prostupu tepla stěnami ze skla SIMAX:

Při použití jako kondenzátoru (kolem trubek kondenzuje vodní pára, trubkami chladící voda) $k = 290\text{--}580 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($250\text{--}500 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)

Při použití jako odparky (kolem trubek odpařování vody, v trubkách kondenzace vodní páry) $k = 465\text{--}814 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($400\text{--}700 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)

Při použití jako výměníku tepla (kolem trubek ohřívána kapalina, trubkami ohřívající kapalina) $k = 250\text{--}400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($200\text{--}350 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)