VÝPOČET SDÍLENÍ TEPLA PŘI NÁVRHU VÝMĚNÍKU

Mechanismy sdílení tepla

- přestup tepla vedením (kondukcí)
  - uplatňuje se
    - v tuhých tělesech
    - v nehybných kapalinách a plynech
  - platí Fourierův zákon

$$q_v = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

λ [W·m^{-1}·K^{-1}] je součinitel tepelné vodivosti materiálu
δ [m] je tloušťka materiálu plochy
Δt [°C] je rozdíl teplot povrchů plochy

Mechanismy sdílení tepla

- přestup tepla konvekcí (prouděním)
  - uplatňuje se v proudících kapalinách a plynech
  - platí Newtonův zákon

$$q_k = \alpha_k \cdot \Delta t \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

α [W·m^{-2}·K^{-1}] je součinitel přestupu tepla
Δt [°C] je rozdíl teplot proudící tekutiny a omývaného povrchu

Mechanismy sdílení tepla

- přestup tepla sáláním (zářením, radiací)
  - uplatňuje se při vzájemném sálání
    - dvou těles
    - plynu (spalin) a výhřevné plochy výměníku
  - platí Stefan-Boltzmannův zákon, který určuje výsledný efektivní tepelný tok mezi sálajícími tělesy

$$E = a \cdot \sigma \cdot \left(T_m^4 - T_{st}^4\right) \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

a [-] je výsledný stupeň černosti (součinitel emisivity) sálajícího prostředí a osálaného povrchu
$\sigma = 5{,}6687 \cdot 10^{-8}$ [W·m^{-2}·K^{-4}] je Stefan-Boltzmannova konstanta
T_m [K] je teplota sálajícího povrchu nebo prostředí
T_{st} [K] je teplota osálaného povrchu

Kombinace mechanismů sdílení tepla

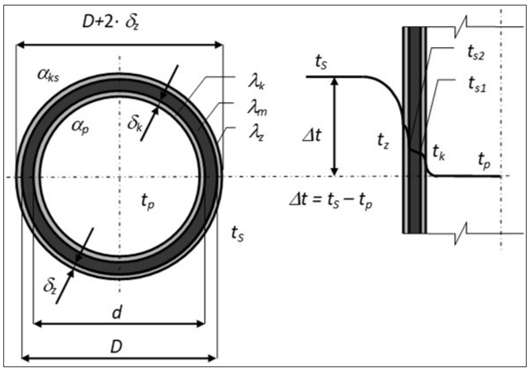
- v praxi se může sílení tepla sáláním kombinovat se sdílením tepla konvekcí či vedením – např. sdílení tepla proudícími spalinami s vysokou teplotou
- odlišný princip výpočtu obou případů komplikuje řešení
- praxi se velmi často uplatňuje analogie ve výpočtu sdílení tepla sáláním s konvekcí zavedením **součinitele přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_{sál} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot a \cdot T_m^3 \cdot \frac{1 - \left(\dfrac{T_{st}}{T_m}\right)^4}{1 - \dfrac{T_{st}}{T_m}} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}]$$

- výsledný součinitel přestupu tepla respektující jak konvekci tak i sálání se určuje jejich součtem

$$\alpha_{ks} = \alpha_k + \alpha_{sál}$$

Výpočet sdílení tepla trubkou



Součinitel prostupu tepla

- kombinovaný prostup válcovou stěnou

$$k = \frac{1/D}{\frac{1}{(D+2\cdot\delta_z)\cdot\alpha_{kz}} + \frac{1}{2\cdot\lambda_z}\ln\frac{D+2\cdot\delta_z}{D} + \frac{1}{2\cdot\lambda_m}\ln\frac{D}{d} + \frac{1}{2\cdot\lambda_k}\ln\frac{d}{d-2\cdot\delta_k} + \frac{1}{(d-2\cdot\delta_k)\cdot\alpha_p}} \quad [\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}]$$

- pro tenkostěnnou trubku lze výpočet provést podle vztahu pro rovinnou plochu

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{kz}} + \frac{\delta_z}{\lambda_z} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_p}} \quad [\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}]$$

- v tomto vztahu lze členy s malým odporem zanedbat a tím docílit dalšího zjednodušení

Součinitel tepelné vodivosti λ

- patří mezi základní fyzikální parametry látek
- stanovuje se experimentálně
- závisí na teplotě a u stlačitelných látek i na tlaku
- u oceli silně závisí na jejím složení – podílu legur

Thermal Conductivity of Steel at 20° C (W/mK)	
Carbon steel	35 - 55
Nickel steel	12 - 50
Chrome steel	30 - 60
Cr - Ni steel	16
Ni - Cr steel	14
Silicon steel	31
Manganese steel	38
Tungsten steel	62

Respektování zanesení výhřevné plochy

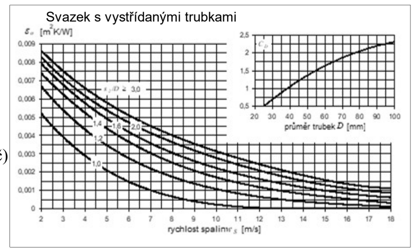
- výhřevná plocha výměníku za provozu nezůstane nikdy zcela čistá
- nánosy jsou tvořeny
  - korozními produkty
  - vrstvou prachu, sazí nebo jiných mechanických částic
  - usazenými nečistotami vyloučenými ze spalin nebo vody
- nánosy mohou být sice tenké, avšak mívají velmi nízký součinitel tepelné vodivosti => fungují jako izolace
- v praxi je velmi těžké definovat
  - tloušťku nánosu – vrstva může být nepravidelná
  - složení a tepelnou vodivost nánosu

  => **ve fázi návrhu výměníku neřešitelný problém**
- v konkrétních úlohách se proto zanesení výhřevné plochy respektuje zavedením empirických korekčních součinitelů

Respektování zanesení výhřevné plochy

- součinitel zanesení na straně spalin
  - závisí na rychlosti proudění spalin a uspořádání svazku trubek (s_2= podélná rozteč)

$$\varepsilon = C_D \cdot C_f \cdot \varepsilon_o + \Delta\varepsilon$$



- součinitel využití

  např. pro spalinový ohřívák vzduchu

Druh paliva	Typ ohříváku			
	trubkové bez mezitrubkovnic		deskové (kapsové)	litinové žebrované
	1. stupeň	2. stupeň		
AŠ, rašelina	0,80	0,75	0,85	0,75
Mazut, dřevo	0,80	0,85	0,70	0,70
Ostatní paliva	0,85	0,85	0,85	0,85

Součinitel přestupu tepla konvekcí α

- určuje se **z kriteriálních rovnic** = ze zobecněných vztahů vytvořených zpracováním experimentálně určených dat **podle teorie podobnosti**
- obecný tvar kriteriální rovnice s využitím nejčastěji používaných bezrozměrných podobnostních čísel

$$f(\mathrm{Nu}, \mathrm{Re}, \mathrm{Gr}, \mathrm{Pr}, \mathrm{Kg}) = 0$$

$$\mathrm{Nu} = C \cdot \mathrm{Re}^a \cdot \mathrm{Gr}^b \cdot \mathrm{Pr}^c \cdot \mathrm{Kg}^d$$

- Nusseltovo kritérium

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

  - vyjadřuje podobnost sdílení tepla konvekcí a vedením v mezní vrstvě tekutiny

Součinitel přestupu tepla konvekcí α

- Reynoldsovo kritérium

$$\mathrm{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

  - vyjadřuje podobnost místních setrvačných sil a třecích sil v nuceně proudící tekutině
  - pro přirozenou konvekci $a = 0$
- Grashofovo kritérium

$$\mathrm{Gr} = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta t$$

  - vyjadřuje podobnost vztlakových a třecích sil při volném proudění, které vznikne pouze v důsledku rozdílu hustot
  - pro nucenou konvekci $b = 0$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α

- Prandtlovo kritérium

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$$

vyjadřuje fyzikální podobnost tekutin při sdílení tepla

- *Kg* je člen vyjadřující vliv geometrie teplosměnné plochy
- volba kriteriální rovnice pro výpočet se řídí podobností
  - procesu – ohřev, chlazení, fázová změna, způsob proudění, …
  - geometrickou
  - fyzikálních vlastností
  - rozsahu platnosti konkrétní rovnice

Součinitel přestupu tepla konvekcí

Příklad: obtékání svazku trubek spalinami nebo vzduchem

- příčné obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou

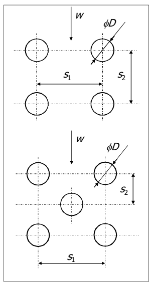
$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}65} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}$$

- příčné obtékání svazku trubek uspořádaných vystřídaně

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu}\right)^{0{,}6} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33}$$

- pro podélné obtékání

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu}\right)^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m$$



Součinitel přestupu tepla konvekcí

- některé kriteriální rovnice byly převedeny do nomogramů
- Př.: vystřídaný svazek trubek obtékaný spalinami

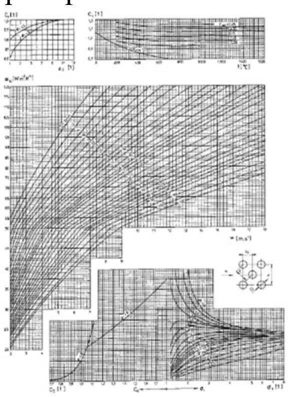
$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot C_f \cdot \alpha_N \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}]$$

- korekce na obsah H_2O

$$r_{H_2O} = \frac{O^S_{H_2O} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}{O_{SV\,\min} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VV\,\min}}$$

- korekce na rozteče

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \qquad \sigma_2 = \frac{s_2}{D}$$



Součinitel prostupu tepla k

- v konkrétních případech lze obecný vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla zjednodušit
  - zanedbáním členů s malým tepelným odporem
  - zjednodušeným respektováním odporu vrstvy nánosů

Př: trubkové spalinové výměníky

- pro přehříváky páry
  - zanedbán odpor vedením trubkou a vnitřním nánosem
  - nános na spalinové straně respektován součinitelem zanesení ε

$$k = \frac{\alpha_{ks}}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_{ks}}$$

- pro ohříváky vody a výparníkové plochy
  - zanedbán odpor vedením trubkou a vnitřním nánosem
  - zanedbán odpor přestupem tepla konvekcí do vody
  - nános na spalinové straně respektován součinitelem zanesení ε

$$k = \frac{\alpha_{ks}}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_{ks}}$$

- pro trubkové ohříváky vzduchu
  - zanedbán odpor vedením trubkou
  - zanesení plochy respektováno součinitelem využití ξ

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_{ks} \cdot \alpha_{vzd}}{\alpha_{ks} + \alpha_{vzd}}$$

Určení potřebné velikosti výhřevné plochy

- potřebná celková výhřevná plocha

$$S = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{\ln}} \quad [m^2]$$

- celková výhřevná plocha je tvořena jednotlivými konstrukčními elementy – např. trubkami
  - délka 1 trubky svazkového výměníku

$$L = \frac{S}{n_{tr} \cdot \pi \cdot D} \quad [m]$$

Hydraulický a aerodynamický výpočet

- Cílem hydraulického a aerodynamického výpočtu je určení tlakových ztrát
- Velikost tlakových ztrát je rozhodujícím způsobem ovlivněna rychlostí proudění
- Při výpočtu celkových ztrát je třeba mít na paměti
  - tlakové ztráty sériově řazených prvků se sčítají
  - tlakové ztráty paralelně zapojených částí (např. trubek ve svazku) jsou stejné

$$\Delta p_{serie} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \ldots + \Delta p_i$$
$$\Delta p_{par} = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \ldots = \Delta p_i$$

Hydraulický a aerodynamický výpočet

- Tlakové ztráty vznikající při proudění je možné dělit do čtyř skupin :
  - ztráty vzniklé třením média o stěny
  - ztráty tzv. místní (v ohybech, odbočkách apod.)
  - ztráty v důsledku urychlení resp. zpomalení proudu
  - ztráty zdvihovou prací (rozdílem potenciálních energií vstupu a výstupu)
- Celkovou tlakovou ztrátu výměníku je pak možné vyjádřit jako součet jednotlivých složek

$$\Delta p = \Delta p_\lambda + \Delta p_\zeta + \Delta p_d + \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad [Pa]$$

Tlaková ztráta třením při podélném obtékání výhřevné plochy

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa]$$

- pro laminární proudění

$$\mathrm{Re} < 2300 \;\rightarrow\; \lambda_{lam} = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

- pro přechodovou oblast

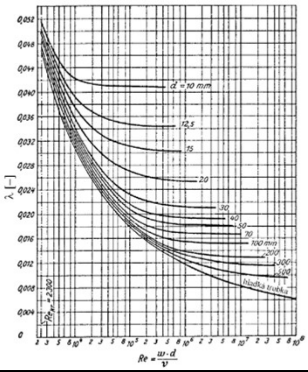
$$2300 < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_m \rightarrow \lambda \doteq \frac{1{,}42}{\log\left(\mathrm{Re} \cdot \dfrac{d_e}{\delta}\right)^2} = \frac{1{,}42}{\log\left(\mathrm{Re} \cdot \dfrac{d_e}{k}\right)^2}$$

- pro turbulentní proudění

$$\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_m \rightarrow \lambda = \frac{1}{\left(1{,}14 + 2 \cdot \log \dfrac{d_e}{k}\right)^2}$$

Tlaková ztráta třením při podélném obtékání výhřevné plochy

- pro proudění v ocelové trubce



Tlaková ztráta místními odpory

$$\Delta p_\zeta = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa]$$

ζ [-] je součinitel místní tlakové ztráty
  - závisí pouze na typu odporu
  - jeho velikost je třeba pro daný odpor hledat v podkladech

Tlaková ztráta urychlením proudu

- vychází odvozením z Bernouliho rovnice

$$p_2 - p_1 = \Delta p_d = \rho \cdot w \cdot (w_2 - w_1)$$

Tlaková ztráta specifických případů

- je nutno řešit individuálními postupy s využitím doporučených podkladů

Př: Příčné omývání svazků trubek
  - jednotlivé druhy odporů se počítají sdruženě

$$\Delta p_{sv} = \zeta_{sv} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad [Pa]$$

  - pro vystřídaný svazek s počtem řad z_2

pro poměrné rozteče $\frac{s_1}{D} < \frac{s_2}{D}$: $\zeta_{sv} = (4 + 6{,}6 \cdot z_2) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}28}$

pro poměrné rozteče $\frac{s_1}{D} > \frac{s_2}{D}$: $\zeta_{sv} = (5{,}4 + 3{,}4 \cdot z_2) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}28}$

  - pro svazek trubek za sebou s počtem řad z_2

$$\zeta_{sv} = (6 + 9 \cdot z_2) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}26} \cdot \left(\frac{s_1}{D}\right)^{-0{,}23}$$

Dokončení návrhu výměníku

- Pokud navržená velikost výměníku a vypočtené tlakové ztráty vyhovují, lze přikročit k detailnímu konstrukčnímu řešení
- Pokud některý s výsledných parametrů výměníku nevyhovuje, je třeba upravit volené návrhové parametry a celý postup zopakovat
- Každá úloha má ∞ řešení => je vhodné provést optimalizaci návrhu

Technicko-ekonomická optimalizace výměníku

Cíl konstruktéra

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t_{ln} \rightarrow \max$$

možnosti: $\boxed{k\uparrow \rightarrow w\uparrow \rightarrow \Delta p_z\uparrow \rightarrow n_{pT}\uparrow}$ $\boxed{S\uparrow \begin{cases} Q_{ztr}\downarrow \rightarrow n_{pT}\downarrow \\ n_i\uparrow \end{cases}}$

n_{pT} … roční provozní náklady n_i … investiční náklady

negativní důsledek: $\boxed{k\uparrow a\ S\uparrow \rightarrow \Delta t\downarrow}$

Úloha je složitá a vyžaduje individuální přístup