1. Sdílení tepla ve výměnících

1.1. Sdílení tepla při výpočtu spalinových výměníků

Přestup tepla ze spalin do teplosměnné plochy se realizuje konvekcí (prouděním) a radiací (sáláním), přestup z plochy do pracovní látky se předpokládá pouze konvekcí. V materiálu stěny plochy, evt. v nánosech na povrchu se uvažuje přestup tepla kondukcí (vedením). Základní vztahy pro určení tepelných toků jsou :

- pro přestup tepla vedením platí Fourierův zákon

$$q_v = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.1}$$

kde λ [$\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$] je součinitel tepelné vodivosti materiálu, δ [m] je tloušťka materiálu a Δt [°C] je rozdíl teplot povrchů plochy.

- pro přestup tepla konvekcí platí Newtonův zákon

$$q_k = \alpha_k \cdot \Delta t \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.2}$$

kde α_k [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$] je součinitel přestupu tepla a Δt [°C] je rozdíl teploty proudícího média a příslušného povrchu plochy

- pro přestup tepla sáláním platí Stefan-Boltzmannův zákon, který určuje výsledný efektivní tepelný tok mezi sálajícími tělesy

$$E = a \cdot \sigma \cdot \left(T_m^4 - T_{st}^4\right) \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.3}$$

kde a [-] je výsledný stupeň černosti (součinitel emisivity) sálajícího prostředí a osálaného povrchu, σ =5,6687·10^{-8} [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$] je Stefan-Boltzmannova konstanta, T_m [K] je teplota sálajícího prostředí a T_{st} [K] je teplota osálaného povrchu, většinou stěny teplosměnné plochy, resp. povrchu nánosu na ní. Při výpočtu sálání u spalinových výměníků je určení právě této teploty velkým problémem, proto se v praxi velmi často uplatňuje analogie ve výpočtu sdílení tepla sáláním s konvekcí zavedením součinitele přestupu tepla sáláním $\alpha_{sál}$ [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$] a výsledný součinitel přestupu tepla na straně spalin respektující jak konvekci tak i sálání se určuje jejich součtem

$$\alpha_S = \alpha_k + \alpha_{sál} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \tag{1.4}$$

Výsledné poměry při sdílení tepla popisuje součinitel prostupu k [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$], který zahrnuje přestup ze spalin do plochy, vedení ve stěně plochy případně i v nánosech na jejím povrchu a konvekci z plochy do pracovního média. Součinitel prostupu tepla je možné vypočítat ze vztahu

- pro rovinnou stěnu

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_S} + \frac{\delta_z}{\lambda_z} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_p}} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \tag{1.5}$$

kde α_S a α_p [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$]je součinitel přestupu tepla na straně spalin resp. pracovního média, δ_z, δ_m, δ_k [m] je tloušťka nánosu na straně spalin, tloušťka materiálu a tloušťka usazeniny na straně pracovního média (kotelní kámen apod.) a λ_z, λ_m, λ_k [$\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$] je součinitel tepelné vodivosti nánosu, materiálu a usazeniny

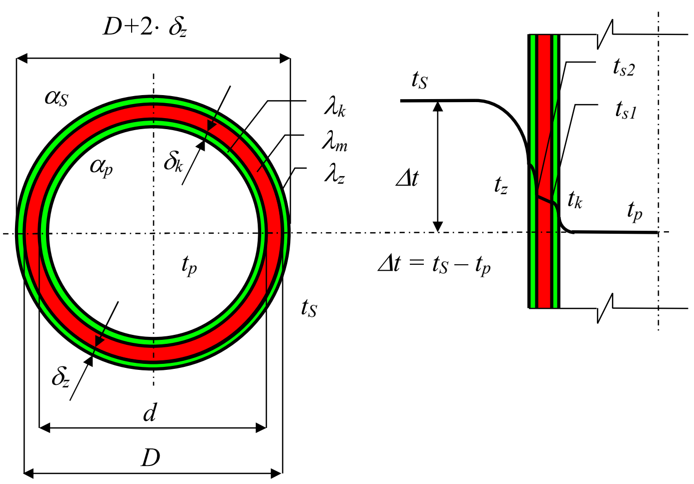
- pro válcovou stěnu (trubku) – viz.
- – výraz se vztahuje k vnějšímu povrchu trubky

$$k = \frac{1/D}{\frac{1}{(D + 2\cdot\delta_z)\cdot\alpha_S} + \frac{1}{2\cdot\lambda_z}\ln\frac{D + 2\cdot\delta_z}{D} + \frac{1}{2\cdot\lambda_m}\ln\frac{D}{d} + \frac{1}{2\cdot\lambda_k}\ln\frac{d}{d - 2\cdot\delta_k} + \frac{1}{(d - 2\cdot\delta_k)\cdot\alpha_p}} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \tag{1.6}$$

Výsledný tepelný tok se pak počítá podle vztahu

$$q = k \cdot \Delta t \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.7}$$

kde Δt [°C] vyjadřuje rozdíl teplot spalin a pracovního média.



Prostup tepla trubkou

Tyto obecně platné vztahy mohou být při výpočtu konkrétních typů ploch zjednodušeny zanedbáním těch členů, které představují výrazně menší odpor pro přestup tepla. Jen výjimečně se například uvažuje člen respektující vedení v materiálu stěny, pokud je stěna ocelová či měděná. Pouze u nerezových materiálů, kde bývá součinitel vedení menší, je vhodné jej respektovat. Obvykle se neuvažuje ani vedení v nánosu uvnitř trubek při užití demineralizované vody. Člen popisující konvekci uvnitř trubek může být vynechán, pokud platí, že $\alpha_p >> \alpha_S$, což je případ výparníku a většinou i ekonomizéru.

Tepelný odpor nánosu na straně spalin δ_z / λ_z resp. $\frac{\pi}{2 \cdot \lambda_z} \ln \frac{D + 2 \cdot \delta_z}{D}$ je obtížné vyjádřit s ohledem na nepřesnost při určování skutečné tloušťky a tepelné vodivosti nánosu. Proto se tento problém obvykle řeší zavedením tzv. součinitele zanesení plochy ε [m²·K/W] nebo součinitelem tepelné efektivnosti ψ [-].

U převážné většiny aplikací je možné pro příslušný typ plochy použít následující zjednodušené tvary pro vyjádření součinitele prostupu tepla :

- pro přehříváky páry

$$k = \frac{\alpha_S}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_p} \right) \cdot \alpha_S} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.8)$$

kde ε [m²·K/W] je součinitel zanesení.

- pro ohříváky vody a výparníkové plochy

$$k = \frac{\alpha_S}{1 + \varepsilon \cdot \alpha_S} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.9)$$

- pro trubkové ohříváky vzduchu

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_S \cdot \alpha_V}{\alpha_S + \alpha_V} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.10)$$

kde α_V [W·m⁻²·K⁻¹] je součinitel přestupu tepla na straně vzduchu a ξ [-] je součinitel využití plochy.

1.2. Součinitel přestupu tepla konvekcí

V inženýrské praxi vycházejí rovnice, používané pro výpočet přestupu tepla, z výsledků experimentálních měření, zpracovaných podle teorie podobnosti do kriteriálních rovnic. Součinitel přestup tepla konvekcí se určuje pomocí teorie podobnosti pro analogické případy proudění. Je proto třeba pečlivě volit mezi empiricky získanými kriteriálními vztahy nebo nomogramy a vybrat vždy ten, který odpovídá podmínkám počítaného případu. Při tom je třeba respektovat především uspořádání, geometrii a způsob obtékání plochy a rozsah platnosti používaných vztahů. Příklady kriteriálních rovnic pro nejčastější případy jsou uvedeny dále.

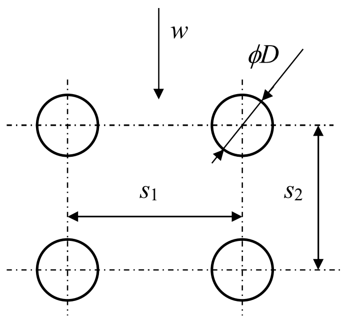
1.2.1. Příčné obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou a vystřídaně

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro uspořádání trubek za sebou a pro deskové plochy je dán vztahem platným pro $1500 \le \mathrm{Re} \le 10^5$

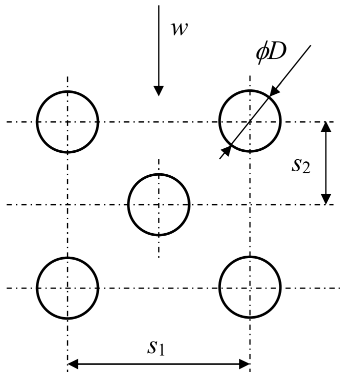
$$\alpha_k = 0{,}2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.11)$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{w \cdot D}{\nu} \right)^{0,6} \cdot \mathrm{Pr}^{0,33} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.12)$$

kde λ [W·m⁻¹·K⁻¹] je součinitel tepelné vodivosti, ν [m²/s] je kinematická viskozita, D [m] je vnější průměr trubek, w [m/s] je rychlost proudu a Pr [-] je Prandtlovo číslo. Všechny parametry se určují pro střední teplotu proudu. C_z [-] je korekční součinitel na počet řad svazku, C_s [-] je korekční součinitel na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči trubek $\sigma_1 = s_1 / D$ a poměrné podélné rozteči $\sigma_2 = s_2 / D$.



Trubky za sebou



Trubky vystřídaně

1.2.2. Podélné obtékání plochy

Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném obtékání plochy závisí na typu proudění. Proudění spalin, vzduchu, vody a páry je zpravidla turbulentní. Odlišný typ proudění se může vyskytovat u některých typů ohříváků vzduchu (regenerační ohříváky typu Ljungstoem), pro které platí jiné výpočtové vztahy.
Součinitel přestupu tepla konvekcí při podélném proudění se určí pomocí vztahu

$$\alpha_k = 0{,}023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left(\frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.13)$$

kde λ [W·m⁻¹·K⁻¹] je součinitel tepelné vodivosti, d_e [m] je ekvivalentní průměr, ν [m²/s] je součinitel kinematické viskozity, w [m/s] je rychlost proudu a Pr [-] je Prandtlovo číslo. Všechny parametry se určují pro střední teplotu proudu.

1.3. Součinitel přestupu tepla sáláním

Přestup tepla sáláním je významný, pokud je teplota spalin dosti vysoká. Jako hranice, pod níž je u konvekčních výměníků podíl sálání na celkovém tepelném toku malý, se uvádí teplota 500°C, což je případ většiny ekonomizérů a ohříváků vzduchu.

Při výpočtu sálání spalin se uvažuje sálání tříatomových plynů a v případě spalování tuhých paliv i sálání tuhých částic v úletu (popílku). Tepelný tok do výhřevné plochy q_{sal} [W/m²] se určí pomocí součinitele přestupu tepla sáláním α_{sal} [W·m⁻²·K⁻¹] definovaným analogicky s přestupem konvekcí vztahem

$$\alpha_{sal} = \frac{q_{sal}}{t_S - t_z} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.14)$$

kde t_S [°C] je teplota spalin a t_z [°C] je teplota vnějšího povrchu zanesené stěny.
Součinitele přestupu tepla sáláním při spalování tuhých paliv (zaprášené spaliny) se určí podle vztahu

$$\alpha_{sal} = 5{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T_S^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T_S} \right)^4}{1 - \frac{T_z}{T_S}} \quad [\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}] \qquad (1.15)$$

kde a_{st} [-] je stupeň černosti povrchu stěn, a [-] je stupeň černosti proudu spalin při teplotě proudu T_S [K] a vypočte se ze vztahu

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad [-] \qquad (1.16)$$

Postup určení exponentu *kps* a absolutní teploty zaneseného povrchu plochy T_z [K] je uveden v příručkách.

2. VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT

Velikost tlakových ztrát je rozhodujícím způsobem ovlivněna rychlostí proudění. Ta by měla být optimalizována tak, aby výsledné výrobní náklady na jednotku výkonu, které zahrnují složku investiční a provozní, byly nejnižší, pokud neexistují další omezující kritéria. Komplexní řešení takové optimalizace je však nesmírně složité. Například zvýšením rychlosti proudění lze intenzifikovat přestup tepla konvekcí a dosáhnout tak zmenšení velikosti výhřevných ploch, avšak za cenu vyšších tlakových ztrát, což vyžaduje výkonnější čerpadla nebo ventilátory a větší spotřebu energie na jejich pohon. Výrazněji se tyto vlivy projevují v případě proudění plynů než kapalin. Kritériem omezujícím volbu optimální rychlosti shora může být např. abrase výhřevných ploch při proudění spalin s popílkem, omezením zdola je např. minimální rychlost páry potřebná pro dostatečné chlazení stěny přehříváku parního kotle. Malé rychlosti v trubkách mohou způsobit velkou nerovnoměrnost v rozdělení průtoku z rozváděcích komor do jednotlivých paralelních trubek a tím i značné rozdíly teplot na výstupu z nich.

Dlouholetými zkušenostmi byly vymezeny intervaly vhodných rychlostí proudění respektující jak provozní tak ekonomická hlediska pro všechny běžné případy. V konstrukční praxi se proto většinou rychlost média volí s ohledem na tato doporučení a výpočet tlakových ztrát má pouze kontrolní charakter. Pouze při vybočení z rozsahu běžných hodnot je nutné přikročit ke konstrukčním úpravám ploch a přepočtu ztrát.

Při výpočtu celkových ztrát je třeba mít na paměti, že tlakové ztráty sériově řazených prvků se sčítají, zatímco tlakové ztráty paralelně zapojených částí (např. trubek ve svazku) jsou stejné.

$$\begin{aligned} \Delta p_{serie} &= \Delta p_1 + \Delta p_2 + \ldots + \Delta p_i \\ \Delta p_{par} &= \Delta p_1 = \Delta p_2 = \ldots = \Delta p_i \end{aligned} \quad \text{[Pa]} \tag{2.1}$$

Tlakové ztráty vznikající při proudění je možné dělit do čtyř skupin :

- ztráty vzniklé třením média o stěny Δp_λ
- ztráty tzv. místní (v ohybech, odbočkách apod.) Δp_ζ
- ztráty v důsledku urychlení resp. zpomalení proudu Δp_d
- ztráty zdvihovou prací (rozdílem potenciálních energií vstupu a výstupu) $\Delta h \cdot \rho \cdot g$

Celkovou tlakovou ztrátu výměníku je pak možné vyjádřit jako součet jednotlivých složek

$$\Delta p = \Delta p_\lambda + \Delta p_\zeta + \Delta p_d + \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad \text{[Pa]} \tag{2.2}$$

Při výpočtu tlakové ztráty svazků jsou třecí odpory zahrnuty do místních ztrát.

2.1. Tlakové ztráty při podélném jednofázovém proudění.

Při podélném proudění se obvykle určují samostatně všechny čtyři výše uvedené druhy odporů. Určení jednotlivých složek se provádí následujícím způsobem :

a) tlaková ztráta třením pro jednofázové tekutiny se určuje dle vztahu

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad \text{[Pa]} \tag{2.3}$$

Pokud se silně mění látkové vlastnosti proudícího média, používá se vztahu

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_{st}}{\mathrm{Pr}_{stř}} \right)^{1/3} \quad \text{[Pa]} \tag{2.4}$$

kde L [m] je délka, d_e [m] je ekvivalentní průměr kanálu, w [m/s] je rychlost proudění, ρ [kg/m^3] je hustota a Pr_{st} resp. $\mathrm{Pr}_{stř}$ [-] je Prandtlovo číslo pro teplotu stěny resp. střední teplotu proudu.

Součinitel tření λ [-] závisí na typu proudění, které může být laminární, turbulentní nebo přechodové. Laminární proudění se v technické praxi vyskytuje výjimečně a je omezeno hodnotou Reynoldsova čísla Re < 2300. Tlaková ztráta laminárního proudění je přímo úměrná rychlosti a součinitel tření λ je jednoznačnou funkcí Re čísla. Lze jej určit podle vztahu

$$\mathrm{Re} < 2300 \;\rightarrow\; \lambda_{lam} = \frac{64}{\mathrm{Re}} \quad \text{[-]} \tag{2.5}$$

U většiny technických aplikací se vyskytuje proudění turbulentní nebo přechodové mezi laminárním a turbulentním, kdy tlaková ztráta roste s rychlostí progresivněji. Součinitel tření pak závisí na Re a drsnosti obtékaného povrchu. Od určité mezní hodnoty $\mathrm{Re}_m \approx 445 \cdot \frac{d_e}{\delta}$, kdy proudění je již čistě turbulentní, závisí λ pouze na tzv. relativní drsnosti,což je poměr absolutní velikosti výčnělků δ ku ekvivalentnímu průměru d_e, tedy pro

$$\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_m \rightarrow \lambda \approx f\left(\frac{\delta}{d_e} \right) \tag{2.6}$$

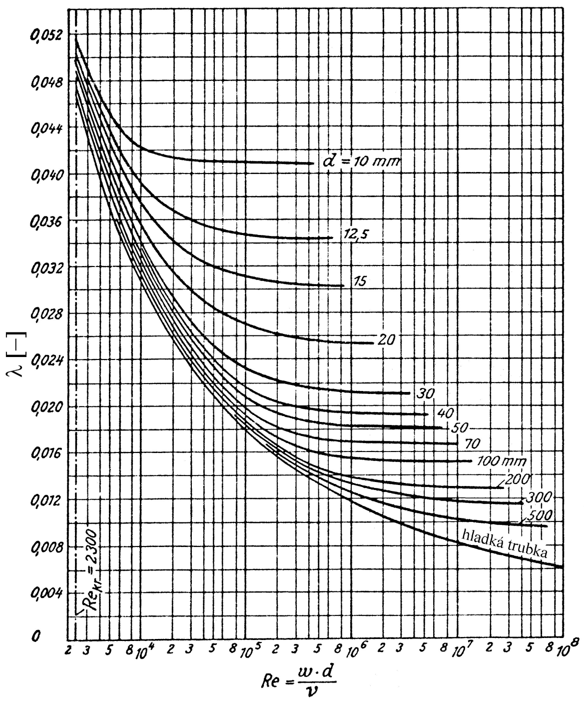
Absolutní drsnost δ [m] záleží nejen na technologickém zpracování povrchu plochy, ale také na provozních vlivech (nánosy, koroze, inkrustace), které nejsou obvykle přesně známy a dají se i obtížně změřit. Místo absolutní drsnosti δ se pak do výpočtu zavádí tzv. ekvivalentní drsnost k, která se zjišťuje experimentálně na základě měření skutečné tlakové ztráty. Pro určení součinitele tření lze pak užít následujících vztahů

$$\text{pro } 2300 < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_m \rightarrow \lambda \doteq \frac{1{,}42}{\log\left(\mathrm{Re}\cdot\frac{d_e}{\delta}\right)^2} = \frac{1{,}42}{\log\left(\mathrm{Re}\cdot\frac{d_e}{k}\right)^2} \quad [-] \tag{2.7}$$

$$\text{pro } \mathrm{Re} > \mathrm{Re}_m \rightarrow \lambda = \frac{1}{\left(1{,}14 + 2\cdot\log\frac{d_e}{k}\right)^2} \quad [-] \tag{2.8}$$

Ekvivalentní drsnost bývá pro uhlíkové trubky $k \leq 0{,}1$ mm a pro austenity $k \leq 0{,}05$ mm, vlivem koroze nebo inkrustací však může dosáhnout hodnot řádově až kolem 1 mm.

obr. 2-1 Součinitel tření λ pro trubky



Komplexnější obraz a praktickou pomůcku pro určení součinitele λ v hladkých nových ocelových bezešvých trubkách, vyráběných běžnou technologií, zpracovaný na základě empiricky zjištěných hodnot různých autorů, poskytuje obr. 2-1, který počítá s hodnotami $k \sim 0{,}07$ mm.

b) tlaková ztráty místními odpory – určí se ze vztahu

$$\Delta p_\zeta = \zeta\cdot\frac{w^2}{2}\cdot\rho \quad [\mathrm{Pa}] \tag{2.9}$$

kde ζ [-] je součinitel tlakové ztráty, který závisí pouze na typu odporu. Pro jednotlivé případy je třeba jeho velikost vyhledat v příručkách.

c) Tlaková ztráta urychlením proudu vychází odvozením z Bernouliho rovnice, odkud plyne

$$\frac{p}{\rho} = \frac{w^2}{2} \tag{2.10}$$

následným diferencováním vychází

$$dp = \rho\cdot w\cdot dw \tag{2.11}$$

v souladu s rovnicí kontinuity můžeme prohlásit, že platí $\rho\cdot w$ = konst. a tudíž lze vytknout tento výraz před integrál a po integraci4

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = \rho\cdot w\cdot\int_{w_1}^{w_2} dw = \rho\cdot w\cdot\left(w_2 - w_1\right) \tag{2.12}$$

dostaneme konečný vztah pro určení tlakové ztráty urychlením proudu

$$p_2 - p_1 = \Delta p_d = \rho\cdot w\cdot(w_2 - w_1) \tag{2.13}$$

2.2. Tlakové ztráty při příčném jednofázovém omývání svazků trubek.

Teplosměnná plocha je často řešena jako svazek paralelních trubek, který je omýván příčným proudem teplonosného media. Při příčném proudění se některé z výše uvedených čtyř druhů odporů počítají sdruženě. Pro určení tlakové ztráty svazku se užívá vztah

$$\Delta p_{sv} = \zeta_{sv}\cdot\frac{w^2}{2}\cdot\rho \quad [\mathrm{Pa}] \tag{2.14}$$

který souhrnně vyjadřuje odpory třením a místní. Ztrátový součinitel ζ_{sv} závisí na typu a geometrii svazku a určí se z následujících rovnic :

a) vystřídaný svazek

$$\text{pro } \frac{s_1}{D} < \frac{s_2}{D} \ : \quad \zeta_{sv} = \left(4 + 6{,}6 \cdot z_2\right) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}28} \tag{2.15}$$

$$\text{pro } \frac{s_1}{D} > \frac{s_2}{D} \ : \quad \zeta_{sv} = \left(5{,}4 + 3{,}4 \cdot z_2\right) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}28} \tag{2.16}$$

b) svazek trubek za sebou

$$\zeta_{sv} = \left(6 + 9 \cdot z_2\right) \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}26} \cdot \left(\frac{s_1}{D}\right)^{-0{,}23} \tag{2.17}$$

kde z_2 [-] je počet všech řad trubek ve směru proudění, s_1 [m] je příčná rozteč, s_2 [m] je podélná rozteč trubek ve svazku a D [m] je vnější průměr trubek.