doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D. ČVUT v Praze, Fakulta strojní Ústav techniky prostředí

Tlakové ztráty kapilárních rohoží – CFD simulace (část 2)

Pressure Losses of Capillary Mats - CFD simulation (Part 2)

Recenzent Ing. Zdeněk Lerl

Článek se zabývá modelováním tlakových ztrát kapilárních rohoží s použitím CFD simulace. Důraz je kladen na třecí ztráty v kapiláře při laminárním proudění tekutiny a místní ztráty při odbočení a spojení proudů pro měnící se režim proudění. Na základě simulačních výpočtů byly obdrženy závislosti součinitele místní ztráty při odbočení a spojení proudů a vztah pro výpočet součinitele tření v neustálené oblasti laminárního proudění. Klíčová slova: Kapilární rohože, tlaková ztráta, součinitel tření, součinitel místní ztráty

The paper deals with CFD simulation of pressure losses of capillary mats. The emphasis is put on the frictional pressure losses for laminar flow in the capillary tubes and on the dynamic pressure losses in the dividing and merging of the flows, where the regime of the flow is changing. The relations of the local loss coefficient for dividing and merging flows and also of the friction coefficient for unstable laminar flow were obtained using CFD simulations.

Key words: Capillary mats, pressure loss, friction coefficient, local loss coefficient

ÚVOD

V prvním dílu seriálu článků pojednávajících o tlakových ztrátách kapilárních rohoží [6] byly prezentovány výsledky měření tlakových ztrát a jejich porovnání s údaji poskytovanými výrobci těchto systémů. Bylo konstatováno, že naměřené hodnoty se od údajů výrobce značně liší. Vzhledem k tomu, že tlaková ztráta je základním parametrem nutným pro hydraulický návrh soustavy, jeví se jako účelné popsat problém analyticky. Pro sestavení analytického popisu hydraulického chování kapilárních rohoží je nutná znalost tlakových ztrát (místních a třecích) v laminární oblasti proudění. Vzhledem k tomu, že experimentální stanovení dílčích tlakových ztrát na skutečném díle by bylo poměrně náročné zrealizovat, s ohledem na krátké vzdálenosti, malé průměry, materiál rohoží a rozsah průtoků, nabízí se pro řešení využití počítačové mechaniky tekutin CFD.

TLAKOVÁ ZTRÁTA TŘENÍM

Ustálení rychlostního profilu

Pro laminární proudění (v kruhovém potrubí Re < 2320) nemá drsnost potrubí na velikost tření prakticky žádný vliv a součinitel třecích ztrát λ je dán teoretickou závislostí plynoucí z Hagenova – Poissonova zákona

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$
Uvedený vztah platí pou-
ze pro ustálené proudění
v potrubí, kdy se rych-
lostní profil v jednotli-
vých průřezech potrubí
již nemění. K ustálení

ΪŽ rychlostního profilu však dochází v určité vzdálenosti od počátku v tzv. rozběhové vzdálenosti. V odborné literatuře (např. [2]) je možné nalézt vztahy, které popi-



Obr. 1 Model zasíťované kapiláry

sují uvedený děj v závislosti na Reynoldsově čísle a průměru potrubí. Rozběhovou vzdálenost x lze stanovit podle výrazu, který publikoval Bousinesq

$$\frac{X_r}{d} \ge 0,065 \, Re \tag{2}$$

nebo dle Schillera

$$\frac{X_r}{d} \ge 0,025 \, Re \tag{3}$$

Z uvedeného je zřejmé, že výrazy (2) a (3) se poněkud liší. Vzhledem k tomu, že experimentální měření na kapiláře malého průměru je značně problematické, bylo pro predikci rozběhové vzdálenosti použito řešení v podobě simulačního výpočtu v CFD, prostřednictvím kterého lze sledovat chování tekutiny v libovolném kontrolním místě. Podmínkou úspěšného řešení je správné zadání okrajových podmínek výpočtu, kvalita sítě, zvolená výpočetní metoda apod.

Model kapiláry v CDF

(1)

S použitím programu Fluent 6.3 resp. Gambit byl vytvořen model kapiláry rohože K.S 15 [6] o vnitřním průměru d = 2,386 mm a délce L = 250.d (Kostečka 2012) [4]. Model byl zasíťován (podstava válce elementy Quad typu Pave, a prostorové zasíťování pak elementy Hex typu Cooper), čímž vzniklo cca 1 600 000 šestistěnných buněk (obr. 1). Jako materiál stěny byl zvolen hliník, který představuje hladké potrubí obdobně jako materiál kapilár - polypropylen. Jako teplonosná látka byla zvolena voda o teplotě 25 °C (hustota ρ = 999,31 kg/m³, dynamická viskozita $\mu = 0,000875$ Pa.s, tlak okolí p = 101325 Pa). Pro posouzení kvality vytvořené sítě nabízí prostředí Gambit kontrolní mechanismy, na základě kterých bylo ověřeno, že vytvořená síť je použitelná pro daný výpočet.

Simulační výpočty byly realizovány pro 4 hodnoty Reynoldsova čísla 500, 1000, 1500 a 2000, na základě kterých byly stanoveny hmotnostní průtoky a nastavena základní okrajová podmínka (Mass flow inlet). Simulace byly provedeny s dvojitou přesností výpočtu a druhým řádem diskretizace. I když model kapiláry není nikterak složitý, bylo pro řešení

v



Obr. 2 Vývoj rychlostního profilu pro Re = 2000

z důvodu konvergence nutno zvolit metodu COUPLED, která počítá tlaky a rychlosti odděleně (oproti přednastavené metodě SIMPLE).

Ustálení rychlostního profilu bylo hodnoceno na základě maximální rychlosti proudění v ose potrubí (obr. 2). Grafické vyjádření teoretických vztahů a výsledků simulace je uvedeno v grafu na obr. 3. Křivky Re500 až Re2000 jsou průběhy maximálních rychlostí $w_{\rm max}$, tedy rychlostí v ose kapiláry. Lineární závislosti znázorňují ustálení rychlostního profilu podle rovnic (2), (3) a podle modelu.

Na vstupu do kapiláry ve vzdálenosti x = 0 je rychlost v ose rovna střední rychlosti proudění. S přibývající vzdáleností od počátku *x* se projevuje vliv viskozity kapaliny a rychlostní profil se začíná vyvíjet, až dosáhne určitého stálého tvaru. Teoretické vztahy pro délku ustálení se počítají ze střední rychlosti w_s , proto pro účely grafu byly přepočteny na rych-



Obr. 3 Rozběhová vzdálenost pro ustálení rychlostního profilu při laminárním proudění - CFD simulace

lost maximální, kdy poměr $w_{max}/w_s = 2$. Odečtením maximální rychlosti v ustálené oblasti a porovnáním se střední rychlostí byl tento teoretický předpoklad potvrzen.

Na základě popsaných simulačních výpočtů byl obdržen vztah popisující rozběhovou vzdálenost v kapiláře malého průměru analogicky ke vztahům (2) a (3)

$$\frac{X_r}{d} \ge 0,08\,\text{Re} \tag{4}$$

Součinitel tření v neustálené oblasti

Na základě popsaného simulačního výpočtu byl vyhodnocen součinitel tření λ v závislosti na Reynoldsově čísle pro neustálenou oblast proudění. Odečet počátečního tlaku byl prováděn ve vzdálenosti 50 mm za vstupem do kapiláry a konečný tlak byl odečítán na konci rozběhové vzdálenosti. Obdobnou simulaci provedl Tureček (2009) [5], který ovšem zkoumal kapiláru o průměru 1,8 mm (rohož typu G 30 viz [6]).

Z výsledků zobrazených na obr. 4 je zřejmé, že pro $Re_d > 700$ se hodnoty součinitele tření λ odchylují od teoretické závislosti $\lambda = 64/Re$, obdobný jev byl zjištěn například u mikrokapilár [1]. Zobrazenou závislost lze popsat následujícím vztahem s platností v rozmezí 100 < Re_d < 2000.

$$\lambda_{neust} = \frac{64}{Re_{d}} + 0,0103 \exp\left(-\frac{1185}{Re_{d}}\right)$$
(5)

TLAKOVÁ ZTRÁTA MÍSTNÍMI ODPORY

Pro stanovení tlakové ztráty místními odpory jsou v odborné literatuře, zabývající se návrhem potrubních sítí, uváděny součinitele místní ztráty ζ různých tvarovek. Problém je, že ve většině případů platí pro plně vyvinuté turbulentní proudění. Vztahy pro součinitele místních tlakových ztrát v laminární oblasti proudění nejsou běžně dostupné. Vzhledem k tomu, že v kapiláře nastává vždy laminární proudění a v hlavním (rozvodném/sběrném) potrubí se charakter proudění mění, bylo nutné problém analyzovat. Pro zjištění místní tlakové ztráty kapilárních rohoží při odbočení a spojení proudů, byla opět s výhodou využita počítačová simulace.



Obr. 4 Závislost $\lambda = f(Re_g)$ na základě CFD simulace pro různé průměry kapilár

Obdobně jako v předchozím případě byl v prostředí Gambit vytvořen model rozvodného resp. sběrného úseku (obr. 5), který tvoří hlavní potrubí o vnitřním průměru D = 16 mm a délce 570 mm. Na rozvodné potrubí je napojeno celkem 18 kapilár (d = 2,386 mm) v roztečích a = 30 mm. Model po adaptaci ($y^{*} < 4$) obsahuje celkem cca 5 000 000 buněk (elementy Tet/Hybrid typ TGrid) viz obr. 4 (Kostečka 2012) [4]. Okrajové podmínky výpočtu byly shodné jako v předchozím případě. Model byl použit pro zkoumání tlakových podmínek při odbočení i spojení proudů - měnily se pouze okrajové podmínky výpočtu.



Obr. 5 Část zasíťovaného modelu rozvodného potrubí po adaptaci

Výpočet byl realizován pro Reynoldsovo číslo v kapiláře $Re_d = 500, 1000, 1500 a 2000 a v hlavním potrubí v rozsahu <math>Re_D = 100 a z 3000.$ Výpočet tlakových ztrát však vyžaduje i hodnoty pro vyšší Reynoldsova čísla Re_D , proto byly simulace rozšířeny i na hodnoty $Re_D = 14\,000 a z 27\,000.$

Výstupem simulačního výpočtu jsou hodnoty celkových tlaků v rovném úseku před kapilárou p_1 , za kapilárou p_2 a v kapiláře p_3 (obr. 6) a dynamické tlaky tamtéž pro každý z celkem 18 potrubních úseků. Na jejich základě byl vyhodnocen součinitel místní ztráty ζ v příslušném úseku.

Odbočení a spojení proudu

Na základě odečtu celkových tlaků lze vyhodnotit součinitel místní ztráty ζ při odbočení proudu z rozvodného potrubí do kapiláry a obdobně i při spojení proudů podle vztahu

$$\zeta_{\rm D} = \frac{2(p_3 - p_1)}{w_{\rm D}^2 \rho_{\rm w}}$$
(6)



Obr. 7a Výsledky závislosti ζ_p na Reynoldsově čísle obdržené na základě simulačního výpočtu při odbočení proudu

Součinitel ζ byl vztažen k rychlosti proudění v rozvodném resp. sběrném potrubí $w_{\rm p}$. Důvodem byla zejména skutečnost, že jsou výrazněji patrné rozdíly mezi obdrženými hodnotami.

problematiku Uvedenou zpracovávali nezávisle na sobě Tureček (2009) [5] a Kostečka (2012) [4]. První z autorů obdržel výsledky pro $Re_{d} = 235, 468,$ 702 a 936, druhý pak pro *Re*_d = 528, 1033, 1535 a 2037. Výsledky jejich simulačních výpočtů pro odbočení a spojení proudů jsou vyneseny do grafů na obr. 7. Je zřejmé, že vykazují obdobný trend i přes to, že simulace byly prováděny pro různé průměry kapilá-



Obr. 6 Schéma modelu pro vyhodnocení tlakové ztráty místními odpory

ry. Uvedené závislosti platí v rozsahu Reynoldsových čísel 0 < $Re_{\rm D}$ < 27 000 a 235 < $Re_{\rm d}$ < 2050 a lze je popsat rovnicí

$$\zeta_{\rm D} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} \boldsymbol{e}_{\rm D}^{\rm B} \tag{7}$$

pro odbočení nabývají koeficienty A a B hodnot

$$A = 0,0114 \cdot Re_{d}^{3} - 2,16 \cdot Re_{d}^{2} + 45473 \cdot Re_{d} - 7021259$$

B = -1,95

pro spojení proudů pak

 $A = 0,035 \cdot Re_{d}^{3} + 69,25 \cdot Re_{d}^{2} + 28329 \cdot Re_{d} - 3499676$

B = -2,09

kde $Re_{\rm D}$ je Reynoldsovo číslo v hlavním potrubí a $Re_{\rm d}$ Reynoldsovo číslo v kapiláře.

Uvedené závislosti byly podrobeny šetření a bylo zjištěno, že určité zobecnění (zjednodušení) výsledků poskytuje závislost ζ_n na poměru



Obr. 7b Výsledky závislosti ζ_p na Reynoldsově čísle obdržené na základě simulačního výpočtu při spojení proudů

rychlosti proudění $w_{\rm D} / w_{\rm d}$ (obr. 8). Na základě prezentovaných výsledků byl stanoven analytický vztah popisující uvedené závislosti s platností $w_{\rm D} / w_{\rm d} = 0.05$ až 3

$$\zeta_{\rm D,o} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B}^{\frac{\boldsymbol{w}_{\rm d}}{\boldsymbol{w}_{\rm D}}} \left(\frac{\boldsymbol{w}_{\rm D}}{\boldsymbol{w}_{\rm d}}\right)^{\mathcal{C}}$$

Pro odbočení nabývají koeficienty A, B a C hodnot

A = 2; *B* = 1,033 a *C* = -1,62

pro spojení pak

A = 1,24; *B* = 0,986 a *C* = -2,17

Z obr. 7 je zřejmé, že pro $w_{\rm p}/w_{\rm d} = 0.05$ až 0.25 dochází k určité odchylce



Obr. 8a Závislost součinitele místní ztráty $\zeta_{\rm p}$ na poměru rychlostí $w_{\rm p}/w_{\rm d}$ při odbočení proudu



Obr. 9a Závislost součinitele místní ztráty $\zeta_{\rm D}$ v přímém směru při odbočení proudu

(řádově do 10 %) mezi obdrženými hodnotami a analytickým popisem, což z hlediska celkové tlakové ztráty rohoží představuje zanedbatelnou položku (viz 3. díl seriálu).

Místní ztráta v přímém úseku

Obdobně jako v předchozím případě byl vyhodnocen i součinitel místní ztráty v přímém směru pro odbočení a spojení proudu. Na základě obr. 6 lze součinitel místní ztráty v rovném směru stanovit jako

$$\zeta_{\rm D,r} = \frac{2(p_2 - p_1)}{w_{\rm D}^2 \rho_{\rm w}}$$
(8)

Výsledky simulačních výpočtů [4] součinitele místní ztráty v přímém směru při odbočení a spojení proudů jsou bodově vyneseny do grafů na obr. 9. Na základě analýz obdržených výsledků pro přímý směr při



Obr. 8b Závislost součinitele místní ztráty $\zeta_{\rm p}$ na poměru rychlostí $w_{\rm p}/w_{\rm d}$ při spojení proudů



Obr. 9
b Závislost součinitele místní ztráty $\zeta_{\rm D}$ v přímém směru při spojení proudů

odbočení byl obdržen vztah s platností $Re_{p} = 300$ až 20 000 a $Re_{d} = 500$ až 2000 popisující uvedenou závislost ve tvaru

$$\zeta_{\mathrm{D},\mathrm{o},\mathrm{p}} = \left(\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B} \cdot \ln \boldsymbol{R} \boldsymbol{e}_{\mathrm{D}}\right)^{-1} \tag{10}$$

kde

 $A = -0,000001 \cdot Re_{d}^{2} - 0,0008 \cdot Re_{d} - 12,413$

 $B = 0,00000016 \cdot Re_{d}^{2} - 0,000088 \cdot Re_{d} + 2,68$

Pro spojení proudů byla obdržena analytická závislost ve tvaru

$$\zeta_{\mathrm{D},\mathrm{s},\mathrm{p}} = \frac{A}{Re_\mathrm{D}} + B \tag{11}$$

kde

 $A = 0,00000007 \cdot Re_{d}^{3} - 0,000346 \cdot Re_{d}^{2} + 0,945 \cdot Re_{d} - 55,22$

$$B = -0,000022 \cdot Re_{d} + 0,112$$

Porovnání analytického popisu rovnicemi (9) a (10) s výsledky simulačních výpočtů je patrno z obr. 9a resp. 9b. Zejména je zřejmá dobrá shoda při popisu místní ztráty v přímém směru při odbočení proudů (obr. 9b), což je pro sestavení modelu tlakových ztrát kapilárních rohoží důležitá hodnota (blíže viz 3. díl seriálu).

ZÁVĚR

Proudění teplonosných látek v běžných aplikacích techniky prostředí má zpravidla turbulentní charakter. V určitých částech kapilárních rohoží nastává proudění laminární, které je z hlediska hydraulického chování svým způsobem specifické. Při výpočtu místních ztrát nelze použít běžně publikované hodnoty součinitelů ζ . Z hlediska třecích ztrát je pak nutné zohlednit vývoj rychlostního profilu. Prezentované závislosti pomohou lépe pochopit hydraulické chování kapilárních rohoží a zejména poslouží k sestavení analytického modelu pro výpočet tlakových ztrát. Jeho popis a ověření budou prezentovány v další části tohoto seriálu.

Kontakt na autora: Vladimir.Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Dutkovski, K. Experimental investigation of Poiseuille number laminar flow of water and air in minichanels. In International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 51, pp. 5983 - 5990, 2008.
- [2] Janalík, J. Hydrodynamika a hydrodynamické stroje. 2008. Skriptum VŠB - TU Ostrava.
- [3] Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance. 3rd edition, 1993, Betelu House inc. ISBN 1-56700-074-6.
- [4] Kostečka, L. Tlakové ztráty kapilárních rohoží. Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2012.
- [5] Tureček, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží. Diplomová práce. ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2009.
- [6] Zmrhal, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží Experimentální měření (1. díl). In Vytápění, větrání, instalace. 2012, roč. 21, č. 4, s. 146 - 151. ISSN 1210-1389.
- [7] Zmrhal, V., Matuška, T., Schwarzer, J., Modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží. In Simulace budov a techniky prostředí. Praha: IBPSA-CZ, 2010, s. 73-78. ISBN 978-80-254-8661-0.

Seznam označení

L

d	vnitřní průměr kapiláry [m]	d	kapilára
D	vnitřní průměr rozvodného /	D	hlavní potrubí
	/ sběrného potrubí [m]	0	odbočení
L	délka [m]	р	přímý úsek
Re	Reynoldsovo číslo [-]	S	spojení
W	rychlost proudění [m/s]	W	voda
ρ	hustota [kg/m³]		
ζ	součinitel místní ztráty [-]		
λ	součinitel tření [-]		

Indexy

Ze zahraniční literatury

Kowalska, J., Gierczak, T.: Qualitative and Quantitative Analyses of the Halogenated Volatile Organic Compounds Emitted from the Office Equipment Items (Kvalitativní a kvantitativní analýza halogenovaných těkavých organických látek z vlastního zařízení kanceláří).

Indoor Built Environ, 2013, 22, s. 920 – 931.

Ve studii byly zkoumány vnitřní zdroje těkavých organických látek (VOC) se zvláštním zřetelem na halogenované. Ty bývají pro svou nízkou koncentraci zřídka identifikovány, přitom mohou mít závažné zdravotní působení. Pozornost byla zaměřena na veškeré plastové vybavení a zařízení kanceláří. Vzorky vzduchu byly odebírány 16 speciálními odběrovými soupravami a analyzovány metodami kapilární plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie.

V ovzduší bylo identifikováno 26 těkavých organických látek, 19 z nich bylo halogenovaných. Nejčastěji byl identifikován tetrachloretylen (v 68,7 % odběrů), bromdichlormetan (v 56,2 % případů) a chlorbenzen a dichlorbenzen (43,7 % případů). Z homologů benzenu byla zjištěna nejvyšší koncentrace toluenu a styrenu.

Největším zdrojem halogenovaných těkavých látek byly elektrické nástěnné vypínače (a těch si obyčejně nikdo nevšímá). Druhým největším zdrojem byly lepené koberce s vlasem, až třetím zdrojem byla vlastní plastová těla počítačů.

Chemické polutanty představují při nedostatečném větrání závažnou zátěž ve vnitřním prostředí. Plasty, z kterých jsou emitovány do ovzduší, jsou dnes používány jako základní surovina k výrobě mnoha předmětů denní potřeby. Různé organické látky se užívají do těchto plastů jako aditiva (změkčovadla, stabilizátory, antistatika, barvy aj.). Žádné ze zjištěných chemických látek nepřekročily limitní hodnoty pro pracovní prostředí. Autoři však upozorňují, že i dlouhodobá expozice podlimitní koncentraci halogenovaných organických látek, které jsou většinou klasifikovány jako látky zdraví škodlivé, některé pak jsou zařazeny mezi podezřelé kancerogeny, může představovat, zvláště pokud jsou ve směsi, zdravotní riziko. Mohou být toxické při inhalaci a mohou dráždit sliznici očí a dýchacích cest. Mohou se podílet na vzniku ozónu a tak zvyšovat zdravotní rizika vnitřního prostředí. A mohou mít další, dosud neznámé, důsledky.

Práce je graficky ilustrována a výsledky statisticky vyhodnoceny. (Laj)

Zařízení na přípravu chladicí vody

Společnost GEA Air Treatment, Herne, přepracovala své vzduchem chlazené zařízení na přípravu chladné vody řady GLAC na energeticky účinnou následnou řadu. Řada má 24 velikostí s výkony chlazení od 295 do 1818 kW, které jsou z větší části k dispozici i v provedení Low Noise (LN) se sníženou hlučností a High Efficiency (HE). S nejvýše 4 šroubovými kompresory a chladivem R134a jsou plynule ovladatelná. Provedení HE jsou na přání upravena i pro teploty nasávaného vzduchu od -18 do 30 °C. Další provedení na přání zahrnují otáčkově variabilní EC ventilátory, mřížky na vnější straně zkapalňovače a jeho různé povrchové úpravy proti vzduchu s obsahem agresivních látek nebo vysokým obsahem soli.

Pramen: CCI 09/13

(AB)