

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

Využití počítačové simulace CFD pro stanovení součinitelů místních ztrát



Ústav techniky prostředí

Utilization of Computational Simulation CFD for Determination of Local Loss Coefficients

Recenzent
Ing. Václav Šimánek

Pro přesný výpočet tlakových ztrát vzduchotechnické potrubní sítě je nutné znát hodnoty součinitele místních odporů použitých tvarovek. V praxi se tlaková ztráta vzduchotechnického potrubí často odhaduje, což může vést k nesprávnému návrhu ventilátoru. Existuje celá řada podkladů, kde je možné nalézt informace o součiniteli místních ztrát tvarových částí vzduchovodů, avšak publikované hodnoty se mezi sebou často liší. Součinitel místní ztráty je možné určit experimentálně měřením, nebo s využitím počítačové simulace. Článek prezentuje možnost využití simulace na bázi CFD pro stanovení součinitele místní tlakové ztráty a výsledky simulačních výpočtů konkrétních tvarovek porovnává s publikovanými hodnotami.

Klíčová slova: tlakové ztráty, potrubní síť, potrubní tvarovky, počítačová simulace, CFD

It is necessary to know values of the local resistance coefficient of used fittings for the precise calculation of pressure losses in the HVAC duct distribution network. The pressure loss is often being estimated in the practice, which mostly leads to the wrong design of the fan. There exist many data, which include information concerning the local loss coefficient of fittings of the air ducts; however published values often differ with one another. The local loss coefficient can be determined experimentally through the calculation or with the computer simulation utilization. Authors present possibilities of the simulation used on the basis of CFD for the determination of the local pressure loss coefficient and results of the simulation calculations for specific fittings compare to published values, in their article.

Key words: pressure losses, duct distribution network, duct fittings, CFD computational simulation

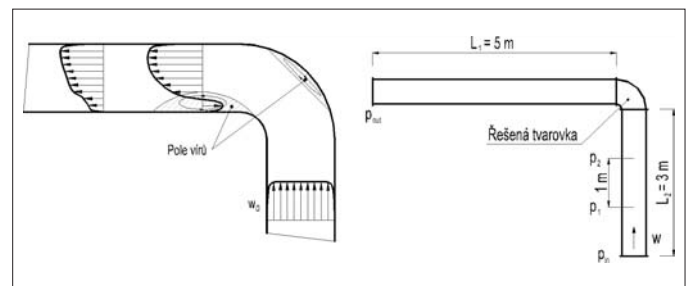
ÚVOD

Tlakové ztráty místními (vřazenými) odpory jsou způsobeny průtokem tekutiny částmi potrubí, které buď mění směr proudění (kolena, oblouky, rozbočky, apod.), nebo přímo narušují proudění v úseku přímého potrubí stálého průřezu (ventily, kohouty, filtry, atd.). Součinitele místních odporů ζ pro konkrétní uspořádání potrubních tvarovek je možné stanovit výhradně experimentálně (jedinou výjimku tvoří Bordova ztráta náhlým rozšířením) a jejich hodnoty lze nalézt v odborné literatuře.

Vzhledem k tomu, že experimentální stanovení součinitelů místních ztrát na reálném díle je nákladné a časově náročné, je možné s výhodou využít počítačové simulační modelování v programu CFD (Computational Fluid Dynamics).

Výsledky simulačních výpočtů jsou v článku porovnány s údaji publikovanými v odborné literatuře. Mezi obecně nejspornější se považují údaje, které publikoval Idelchik již v roce 1960, jehož rozsáhlá práce vyšla i v USA (Idelchik 1993). Rovněž Handbook of ASHRAE (2001) ve výčtu potrubních tvarovek používá Idelchikova data. Dalším zdrojem literatury je pak německý průvodce vytápění a klimatizace (Recknagel 1996), kde jsou publikovány poněkud odlišné hodnoty. Hodnoty součinitelů místních ztrát lze najít i v české a slovenské literatuře. Zatímco česká literatura čerpá většinou z Idelchika (Chyský a Hemzal 1993), naproti tomu literatura slovenská (Ferštl 2006) používá data převážně z německého průvodce (Recknagel 1996). Snahou realizovaných analýz bylo popsat součinitele místních tlakových ztrát analyticky tak, aby bylo možné využít výsledky pro výpočetní programy.

Mezi základní potrubní elementy patří tvarovky, které mění směr proudění jako jsou kolena a oblouky. Při průchodu tekutiny takovou tvarovkou dochází k narušení rychlostního profilu, který je v rovném úseku před tvarovkou vyrovnaný. Deformace rychlostního profilu je způsobena geometrickým uspořádáním potrubního elementu. V tvarovce mohou vznikat vírová pole, která mají na tvar rychlostního profilu zásadní vliv (obr. 1). Po prů-



Obr. 1 a) Rychlostní profily při proudění v oblouku, b) Schéma modelování

chodu tekutiny tvarovkou se rychlostní profil snaží opět postupně vyrovnat. Právě uvedená změna (deformace) rychlostního profilu způsobuje místní tlakovou ztrátu.

METODIKA

Pro simulační výpočty byl použit simulační program na bázi CFD – Software Fluent verze 6.2. 3D model a jeho zasíťování bylo vytvořeno v programu Gambit. Počet kontrolních objemů se liší od zkoumaného případu a pohybuje se v rozmezí 500 000 až 2 000 000 buněk.

Na obr. 1b) je znázorněno schéma vlastního experimentu. Zkoumaná tvarovka byla vždy opatřena rovnými úseky potrubí na sání (3 m) a na výtlačku vzduchu (5 m). Model tedy tvoří tři základní objemy: tvarovka, sací potrubí a výtlačné potrubí.

Rychlost proudění v potrubí w byla volena konstantní 5 m/s pro všechny zkoumané případy. Výsledky platí pro turbulentní proudění. Pro řešení byl použit model turbulence k- ϵ RNG a standardní stěnová funkce. Jedná se o dvourovnícový statistický model turbulence, který je založen na metodě časového (Reynoldsova) středování s využitím Boussinesqovy hypotézy.

Stanovení součinitele místní ztráty ζ

Celková tlaková ztráta potrubního úseku zobrazeného na obr. 1b je rovna rozdílu celkových tlaků na vstupu a výstupu a je rovna součtu tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místními odpory.

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} = \Delta p_t + \Delta p_m \quad (1)$$

Měrnou tlakovou ztrátu třením F získáme odečtem na 1 m rovného úseku sací části potrubí

$$F = p_1 - p_2 \quad (2)$$

Tlaková ztráta třením pak bude dána celkovou délkou rovného potrubního úseku

$$\Delta p_t = F(L_1 + L_2) \quad (3)$$

Místní tlakovou ztrátu lze vyjádřit jako součin součinitele ζ a dynamického tlaku

$$\Delta p_m = \zeta \frac{w^2}{2} \rho \quad (4)$$

Dosazením rovnice (1) do (4) bude součinitel místní ztráty

$$\zeta = \frac{2(\Delta p - \Delta p_t)}{w^2 \rho} \quad (5)$$

Celkový součinitel místní ztráty je dán součtem místní ztráty a ztráty třením ve vlastní tvarovce (Idelchik 1993).

$$\zeta = \zeta_t + \zeta_z \quad (6)$$

Zkoumané typy tvarovek

V rámci příspěvku byly zkoumány potrubní tvarovky sloužící ke změně směru proudění o 90°. Výčet zkoumaných tvarovek je uveden v následujícím popise, schémata jsou pak zobrazena na obr. 2.

Případ 1 – Oblouk kruhový hladký 90°

Případ 2 – Oblouk čtyřhranný 90°

Případ 3 – Koleno ostré – čtyřhranné 90°

Případ 4 – Odbočka 90°

Případ 5 – Z kus – koleno ostré 90°

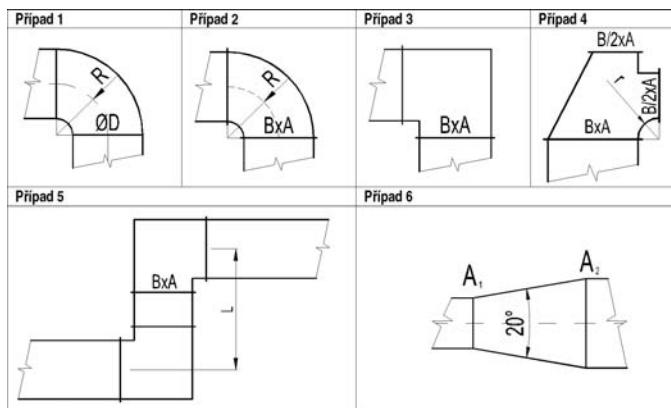
Případ 6 – Difuzor 20°

VÝSLEDKY A DISKUZE

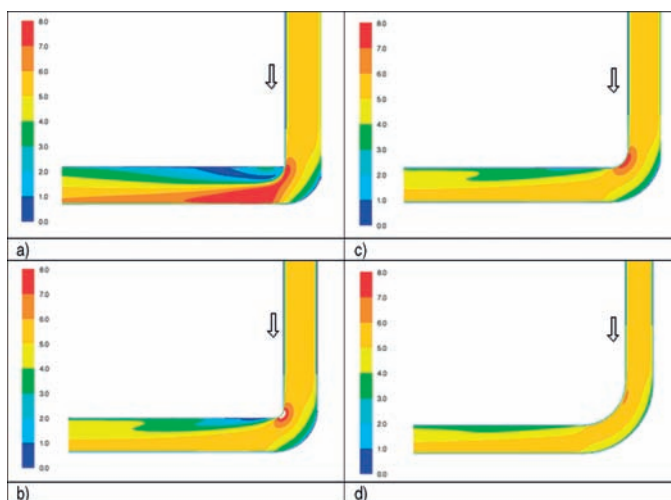
Případ 1 – Oblouk kruhový – hladký

Základním řešeným případem je oblouk (koleno) z kruhového potrubí, jehož geometrické vlastnosti jsou charakterizovány poměrem R/D . Na obr. 3 jsou znázorněny rychlostní pole pro vybrané zkoumané případy. Simulační model tvořil oblouk o průměru 500 mm, rychlost proudění $w = 5$ m/s. Pro zkoumaný případ činí délka potrubního úseku pro ustálení rychlostního profilu 10d.

Z výsledků simulačního výpočtu zobrazených na obr. 8 (Případ 1) je patrné, že místní ztráty obdržené CFD simulací dosahují poněkud nižších hodnot než publikované výsledky. Závislost uvedená v technickém průvodci [4] zobrazená zeleně nezahrnuje tlakovou ztrátu třením ve vlastní tvarovce a platí pro $R/D > 1$. Uvedená závislost je převzata z literatury [5], kde



Obr. 2 Řešené tvarovky



Obr. 3 Rychlostní pole v hladkém kruhovém oblouku – Případ 1 a) $R/D = 0,5$; b) $R/D = 0,75$; c) $R/D = 1,0$; d) $R/D = 2,0$

Lze nalézt i závislost pro stanovení celkového součinitele místní ztráty. Na základě výsledků simulačního výpočtu byla zjištěna analytická závislost s platností $0,5 < R/D < 2$

$$\zeta_1 = \frac{R}{D} \left[9,69 \frac{R}{D} - 4,24 \right]^{-1} \quad (7)$$

Případ 2 – Oblouk čtyřhranný

Dalším případem tvarovky je oblouk obdélníkového průřezu. V rámci simulačního výpočtu byl zkoumán oblouk s rozměrem $B = 500$ mm, rozměr A byl proměnný podle zadaného poměru A/B . Rychlost proudění v potrubí byla 5 m/s. Zaoblení vnitřní a vnější hrany oblouku je charakterizováno poměrem R/B . Na hodnotu místního součinitele má vliv i poměr výšky a šířky potrubí A/B .

Z výsledků zobrazených na obr. 8 je zřejmé, že poměr A/B má na hodnotu místního odporu vliv zejména pro hodnoty $R/B > 1$, proto ho nelze zcela zanedbat. U případu $A/B = 2$ je zřejmé, že s rostoucím poměrem R/B klesá ζ . S vyšším poměrem R/B se totiž zvětšuje délka oblouku a tím i tlaková ztráta třením. Publikované výsledky uvedenou skutečností většinou vůbec nerespektují.

Na základě analýzy výsledků simulačních výpočtů byla stanovena závislost součinitele místního odporu na geometrických parametrech tvarovky s platností $0,5 < R/B < 2$ a $0,25 < A/B < 2$

$$\zeta_2 = C_1 \left(\frac{R}{B} \right)^{-1} + C_2 \exp \left(C_3 \left(\frac{R}{B} \right)^{-1} \right) \quad (8)$$

kde

$$C_1 = \frac{A}{B} \left(-0,069 - 3,458 \left(\frac{A}{B} \right)^2 \right)^{-1} \quad (9)$$

$$C_2 = 0,092 \left(\frac{A}{B} \right)^{-1} + 0,046 \quad (10)$$

$$C_3 = 1,247 + 0,177 \ln \left(\frac{A}{B} \right) \quad (11)$$

Případ 3 – Koleno čtyřhranné

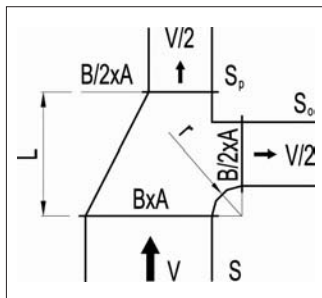
Z porovnání výsledků CFD simulací s publikovanými hodnotami (obr. 8) je zřejmá velmi dobrá shoda s výsledky, které publikoval Idelchik [5]. Naopak údaje uvedené v německém průvodci [6] se výrazně odlišují. Ztěžející vliv na místní tlakovou ztrátu kolena má totiž ostrá vnitřní hrana, která je přítomna ve všech zkoumaných případech a proto je také závislost tak vyrovnaná. Rozměr kolena definovaný poměrem A/B má sice na místní ztrátu vliv, avšak pouze minimální, jak je vidět z obr. 8.

Na základě výsledků simulačního výpočtu byla opět stanovena jednoduchá závislost součinitele místní ztráty na poměru A/B s platností $0,25 < A/B < 3$

$$\zeta_3 = 1,11 \left(\frac{A}{B} \right)^{0,08} \quad (12)$$

Případ 4 – Odbočka 90°

Často používanou tvarovkou ve vzduchotechnice je odbočka 90° se změnou průřezu v odbočujícím i přímém směru. Součinitel místní ztráty ζ závisí jednak na geometrických poměrech tvarovky a rovněž na poměru průtoků v daném směru. S ohledem na rozsah příspěvku byl zkoumán pouze základní případ, kdy poměr průřezů $S_p/S = S_o/S = 1/2$ a poměr průtoků $V_p/V = V_o/V = 1/2$ (obr. 4). Délka tvarovky $L = B = 500$ mm.



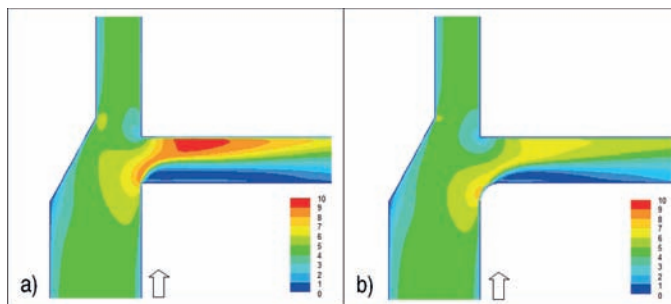
Obr. 4 Okrajové podmínky – Případ 4

Na obr. 7 jsou pro daný případ zobrazeny výsledky výpočtu součinitele ζ ve směru odbočení. Je zřejmé, že při odbočení proudu vzduchu nabývá součinitel místní ztráty značných hodnot a to v případech, kdy tvarovka není opatřena rádiusem.

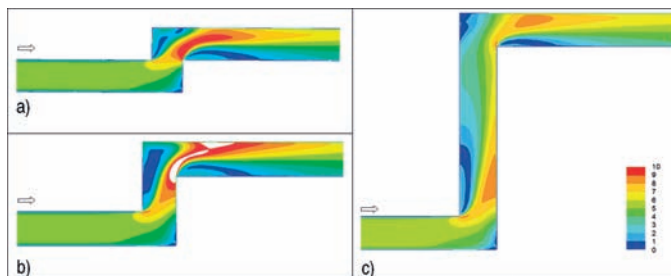
I když se jedná o poměrně často používanou tvarovku, v odborné literatuře nejsou hodnoty součinitele místní ztráty publikovány a obdržené výsledky tak není možné porovnat. Důvodem je zřejmě značná složitost tvarovky, jejíž místní tlaková ztráta závisí na mnoha okrajových parametrech (poměr průtoků, poměr průřezů, délka a úhel zkosení, poloměr zaoblení).

Případ 5 – Z kus

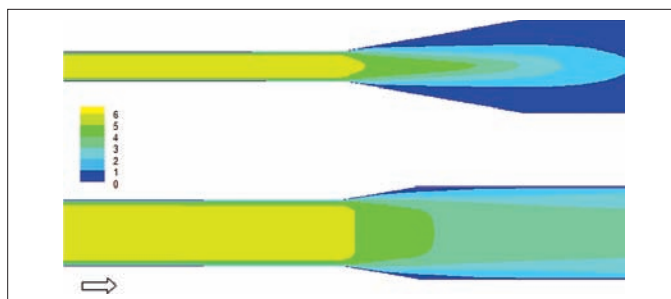
Dalším zkoumaným případem jsou dvě ostrá kolena řazená za sebou – Z kus. Účelem simulačního výpočtu bylo mimo jiné zjistit mezní vzdálenost L , při které je možné pro výpočet uvažovat hodnotu $\zeta_5 = 2\zeta_3$. Jak je vidět z výsledků na obr. 8, závislost $\zeta_3 = f(A/B)$ je poměrně plochá, proto byl analyzován pouze základní případ ($A/B = 1$). Na obr. 6 jsou znázorněna rychlostní pole pro vybrané zkoumané případy.



Obr. 5 Rychlostní pole odbočka 90° – Případ 4 a) $r = 0$ mm; b) $r = 100$ mm



Obr. 6 Rychlostní pole ve tvarovce Z kus – Případ 5 a) $L = 0,5$ m; b) $L = 1$ m; c) $L = 2,5$ m



Obr. 7 Rychlostní pole v difuzoru 20° – Případ 6 a) $A_1/A_2 = 0,1$; b) $A_1/A_2 = 0,5$

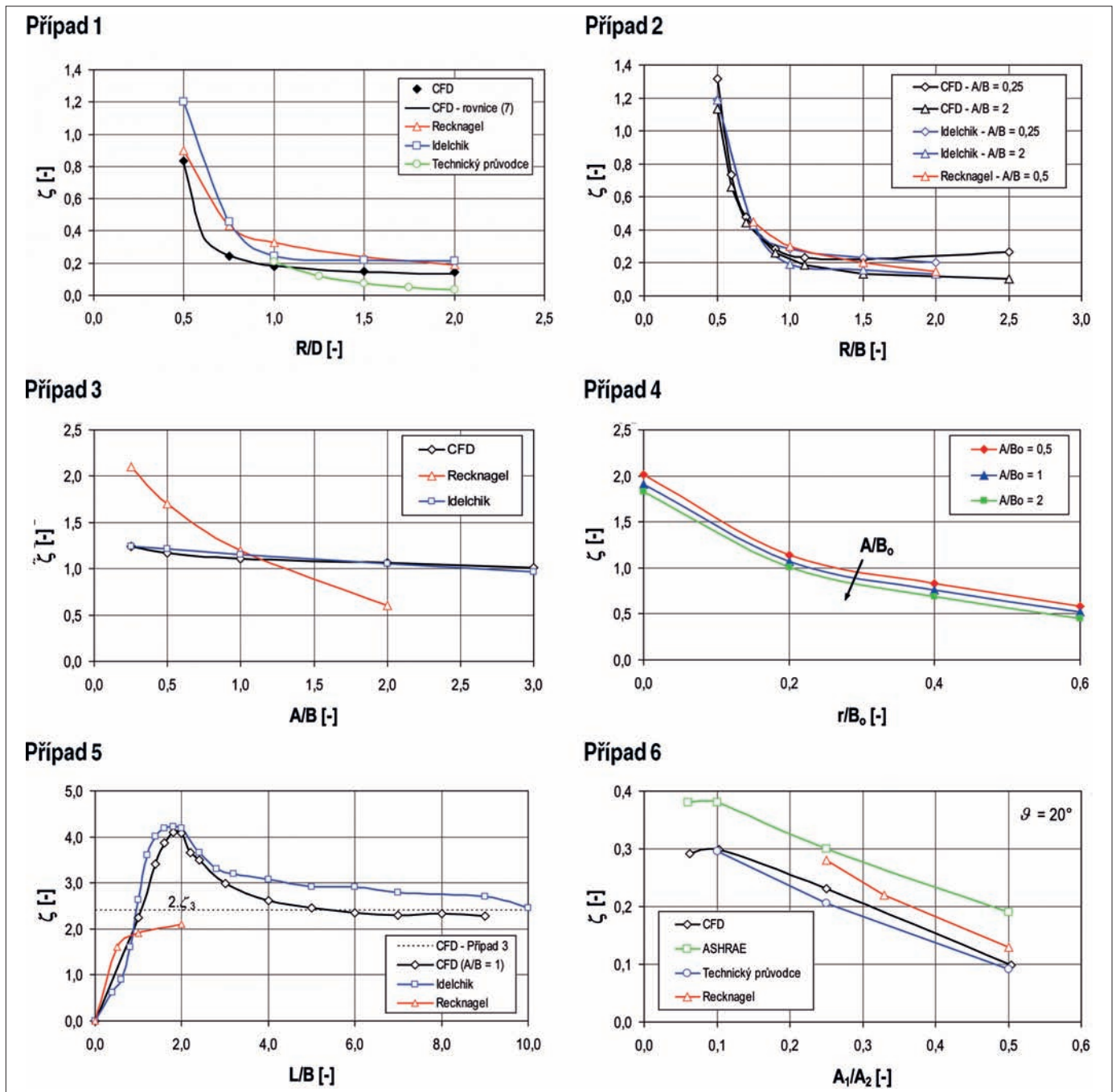
Na obr. 8 jsou znázorněny výsledky simulačního výpočtu pro Z kus. Tečkovně je zobrazena závislost, která představuje výpočet $\zeta_5 = 2\zeta_3$. Je zřejmé, že tento zjednodušený výpočet lze přibližně použít pro případy, kdy délka rovného úseku potrubí mezi koleny $L > 5 \cdot B$. Na obr. 8 je rovněž uvedeno porovnání výsledků CFD simulace s publikovanými hodnotami. V oblastech nižších poměrů L/B vykazují výsledky určitou shodu s hodnotami publikovanými Idelchikem [5], pro $L/B > 3$ se výsledky poněkud rozcházejí. Naproti tomu údaje publikované Recknaglem [6] se jeví jako neúplné a pro poměr $L/B > 1$ vykazují zcela odlišný trend. Jejich použití pro praktické výpočty proto nelze doporučit.

Případ 6 – Difuzor 20°

Posledním příkladem řešení místní tlakové ztráty simulačním výpočtem je difuzor s různými poměry průřezů A_1/A_2 , který svírá úhel $\vartheta = 20^\circ$. Rozměr $D_2 = 500$ mm byl zachován a v rámci modelování byl proměnný průměr D_1 . Rychlostní pole vybraných zkoumaných případů je znázorněno na obr. 7. Součinitel místní ztráty ζ byl vztažen ke vstupní rychlosti w_1 . Z porovnání výsledků simulačního výpočtu s publikovanými hodnotami (obr. 8) je zřejmá poměrně dobrá shoda zejména s údaji uvedenými v technickém průvodci [4].

Všechny závislosti vykazují očekávaný trend, kdy s rostoucím poměrem průřezů A_1/A_2 , tlaková ztráta klesá. Na základě výsledků simulačních výpočtů byla stanovena závislost součinitele místní ztráty na poměru A_1/A_2

$$\zeta_6 = 0,157 \exp \left(-6,86 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) + 4,206 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0,5} \right) \quad (13)$$



Obr. 8 Výsledky simulací a porovnání s publikovanými hodnotami

kteřá platí pro úhel $\vartheta = 20^\circ$ a $A_1/A_2 = 0,06$ až $0,5$. Další obdobná zkoumání pak umožní sestavit závislost na úhlu rozevření difuzoru ϑ .

ZÁVĚR

Počítačovou simulační metodu CFD lze s výhodou využít pro stanovení součinitelů místních tlakových ztrát (odporů) potrubních tvarovek pro libovolné aplikace. V porovnání s měřením na reálném díle odpadá, při počítačových experimentech, nutnost zhotovovat složité a nákladné měřicí trati. Simulační výpočty jsou, s ohledem na co nejkratší dobu výpočtu, náročně především na hardware. Výhodou simulačního výpočtu je možnost vyhodnocovat součinitel místní ztráty na základě rozdílů celkových tlaků, což je u reálných experimentů velmi pracné a obtížné. Naměřené hodnoty součinitele místní ztráty jsou nejčastěji vyhodnocovány na základě rozdílů tlaků statických [2].

V příspěvku byly analyzovány potrubní tvarovky vzduchotechnických sítí sloužící ke změně směru proudění, jako jsou kolena a oblouky. Výsledky simulačních výpočtů realizované v rámci analýzy byly porovnány s obecně uznávanými publikovanými hodnotami.

Z tohoto pohledu byly obdrženy velmi zajímavé výsledky. Zatímco výsledky, které publikoval Idelchik (1993) ve své poměrně rozsáhlé práci, vykazují obdobný trend jako hodnoty získané simulačním výpočtem v CFD, některé hodnoty publikované v německé literatuře (Recknagel 1995) nelze pro praktické výpočty doporučit. Nutno však připomenout, že simulační modely jsou většinou zidealizované. Naproti tomu u publikovaných výsledků zjištěných na základě měření na reálném díle nejsou známy přesné okrajové podmínky (přesnost provedení experimentu atd.).

Kontakt na autory: Vladimír.Zmrhal@fs.cvut.cz, Jan.Schwarzer@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

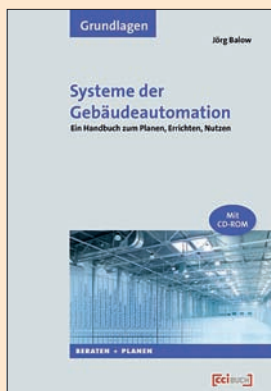
- [1] ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001, ASHRAE, Atlanta. ISBN – 1-883413-87-7
- [2] Brooks P. J., New ASHRAE Local Loss Coefficients for HVAC fittings. In ASHRAE Transactions: 1993, Vol.99, Part.2, paper number 3709 (RP-551)
- [3] Ferstl, K., Větrání a klimatizace. 2006. Bratislava: Jaga group, ISBN 80-8076-037-3.
- [4] Chyský J., Hemzal, K. a kol., Větrání a klimatizace. Technický průvodce č. 31, 1993, Praha: Bolit Brno. ISBN 80-901574-8
- [5] Idelchik I. E., Handbook of Hydraulic Resistance. 3. vydání, 1993, Betelu House Inc. ISBN 1-56700-074-6
- [6] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 94/95, 1995. ISBN 3-486-26213-0;
- [7] Zmrhal V., Schwarzer J., Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings. Glasgow. In. Proc. of Building Simulation, IBPSA, 2009
- [8] Kunc, T., Místní tlakové ztráty vzduchotechnické potrubní sítě. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní. 2009.

Seznam označení

- A výška potrubí [m]
- B šířka potrubí [m]
- D průměr potrubí [m]
- F měrná tlaková ztráta třením [Pa/m]
- L délka potrubí [m]
- p_{in} tlak na vstupu do potrubí [Pa]
- p_{out} tlak na výtlaku z potrubí [Pa]
- Δp celková tlaková ztráta potrubního úseku [Pa]
- Δp_f tlaková ztráta třením [Pa]
- Δp_m místní tlaková ztráta [Pa]
- r, R poloměr [m]
- w rychlost proudění [m/s]
- ζ součinitel místní ztráty [-]
- ρ hustota vzduchu = 1,2 [kg/m³]

*** Nová kniha „Systémy automatizace budov“**

Nová kniha „Systémy automatizace budov“ (Systeme der Gebäudeautomation), kterou napsal Jörg Balow, je příručkou pro projektování, stavbu a obecné využití v oblasti automatizace budov. Kniha má 700 stran a obsahuje 600 obrázků. Poprvé předkládá celkový přehled základů automatizace zařízení budov. Tématické spektrum je poято od základů přes požadavky na jednotlivá technická zařízení a jejich řízení až k jejich projektování, zadávání, stavbu zařízení, jím příslušející předpisy, včetně jejich provozování. Součástí knihy je CD s funkcí plnotextového vyhledávání v rámci obsahu. Bližší informace lze nalézt na www.cci-dialog.de/buch.



(CCI 3/12)

(J. B.)

*** Nová kniha „Podpora projektování vzduchotechniky“**

Prof. Achim Trogisch z technické VŠ v Drážďanech napsal 4. zcela přepracované a rozšířené vydání knihy v oboru vzduchotechniky s názvem „Podpora projektování vzduchotechniky“ (Planungshilfen Lüftungstechnik). Inženýři a projektanti v oboru techniky prostředí staveb musí do objektů navrhovat účinná a zároveň hospodárná větrací, klimatizační či chladicí zařízení. Tato odborná kniha jim nabízí cennou pomůcku při rozhodování. Obsahuje základní pojmy a postupy jako je výpočet tepelné zátěže, potřebného chladicího výkonu, teploty vzduchu v klimatizovaném prostoru a výklad problematiky tepelné ochrany. V rámci výkladu různých systémů autor popisuje systémy s přirozeným a nuceným větráním včetně úpravy vzduchu. Zabývá se metodami centrálního, individuálního a hybridního větrání, stejně jako výrobou chladu, akumulací tepla i chladu včetně alternativních procesů chlazení, jako je např. využití tzv. aktivace betonového jádra. Kniha poskytuje fyzikální a technické zákonitosti, základní vědomosti v oblasti vzduchotechnických systémů, náhled do chladicí techniky a dobrou orientaci při volbě hospodárných systémů. Bližší informace lze nalézt na www.cci-dialog.de/buch.



(CCI 3/12)

(J. B.)

*** Stropy pro klimatizaci**

Jedná se o stropy zajišťující vytápění, chlazení i větrání. Takovéto systémy jsou v porovnání s chladicími stropy a konvektivními chladicími stropy velmi ojedinelé.

U stropů pro klimatizaci se vzduch připravuje v centrální klimatizační jednotce (chlazení, ohřev, zvlhčování, ...) a pak přes zavěšené, velkoplošné perforované stropy přivádí do klimatizovaného prostoru. Celá plocha spodní strany stropu se podílí na efektivní tvorbě tepelné pohody díky možnosti vytápění či chlazení a kontrolovaného větrání.

Zde se nabízejí dva efekty:

- Při proudění chladného vzduchu perforacemi stropu dochází k předávání části chladicího výkonu stropu, který se ochlazuje a pracuje jako běžný chladicí strop.
- Jelikož chladný vzduch proudí s velmi nízkou rychlostí ze stropu do místnosti, dosahuje se tak rovněž omezeného konvektivního chlazení.



Vzduchem chlazené stropy nabízí např. MWH Barcol Air. Trochu jiný systém poskytuje Kiefer Klimatechnik. Zde proudí upravený přiváděný vzduch hliníkovou trubicí, která je umístěna v betonovém stropu, který ochlazuje. Poté vzduch proudí průduchy do místnosti.

(CCI 3/12)

(J. B.)