

PREDICTION OF TURBULENT FLOW IN A CURVED CHANNEL USING VARIOUS TURBULENCE MODELS

J. Příhoda*, M. Sedlář**

Summary: *Turbulent flow in a curved channel of the squared cross-section was numerically simulated using the CFX-TASCflow software. Besides the standard k - ε model and Menter's k - ω / k - ε SST model, the RMS model proposed by Launder, Reece and Rodi (1975) was used. The detailed analysis of complex turbulent flow including the separation region was carried out with the aim to determine losses and their main causes for flows in curved channels.*

1. Úvod

Znalost hlavních parametrů a struktury turbulentního proudění v zakřivených kanálech nekruhového průřezu je stále aktuální nejen z hlediska rozvoje mechaniky tekutin, ale též pro mnoho aplikací ve strojírenství a stavebnictví. Studium sekundárního proudění v zakřivených kanálech je věnována řada prací, které se zabývají experimentálním vyšetřováním a numerickou simulací proudění, viz např. Humphrey a Whitelaw (1981), Iacovides aj. (1993). Fenomenologický popis sekundárního proudění v zakřivených kanálech je uveden ve zprávě Škvora (1997). Pro návrh kanálů a difuzorů s požadovanými zakřivením a rozšířením průřezu existují však zatím pouze empirické vztahy, které umožňují odhadnout energetické ztráty při průtoku kanálem.

Numerická simulace turbulentního proudění v zakřivených kanálech a difuzorech a její ověření pomocí experimentů bude využita jednak k výběru vhodných modelů turbulence a způsobů zadávání okrajových podmínek a jednak k rozboru jevů vznikajících při zakřivení a změně průřezu kanálu s cílem snížit energetické ztráty, vznikající při průtoku zakřiveným difuzorem. První etapa se zabývá simulací turbulentního proudění v uzavřeném kanálu čtvercového průřezu s pravoúhlým kolenem.

2. Popis výpočtu

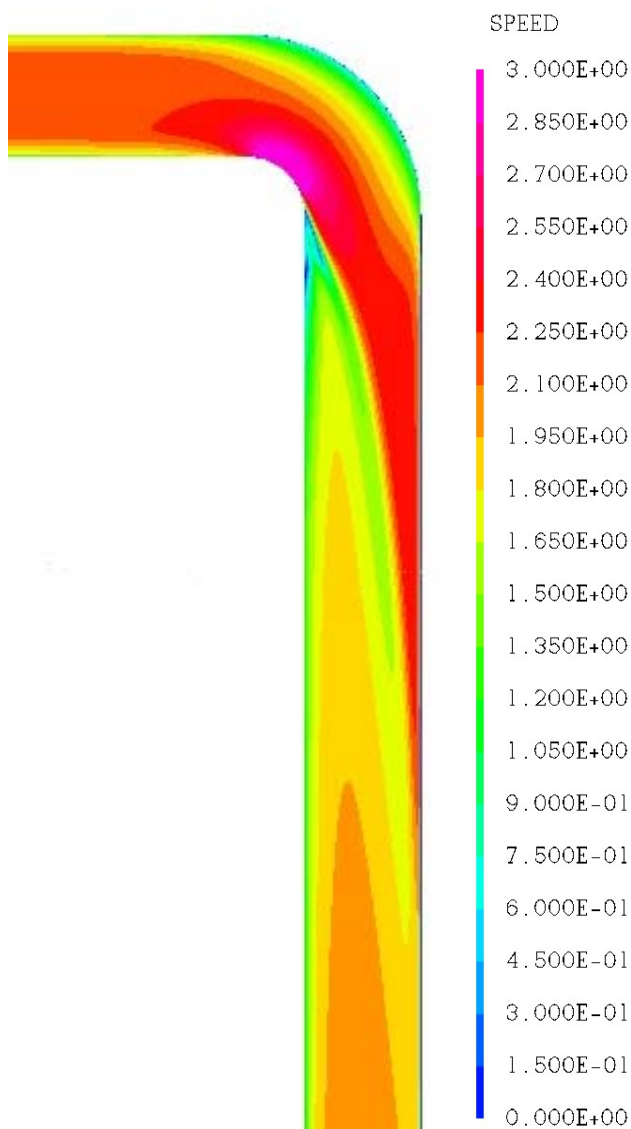
Turbulentní proudění v zakřiveném kanálu čtvercového průřezu bylo numericky simulováno pomocí komerčního software CFX-TASCflow pro řešení středovaných Navier-Stokesových rovnic doplněných modelem turbulence. Výpočetní oblast byla tvořena kanálem čtvercového průřezu $a \times a = 0,2 \times 0,2$ m a sestávala ze vstupního úseku o délce $L_1 = 15a$, kolenového oblouku s úhlem zakřivení 90° s poloměrem zakřivení $R/a = 1$ a z výstupního úseku

* Doc. Ing. Jaromír Příhoda, CSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8; tel. 286890383; fax: 286584695; e-mail: prihoda@it.cas.cz

** RNDr. Milan Sedlář, CSc., SIGMA, Výzkumný a vývojový ústav s.r.o., Jana Sigmunda 79, 783 50 Lutín; tel. 585652423; fax: 585652400; e-mail: milan.sedlar@sigma-vvu.cz

o délce $L_2=23a$. Výpočetní oblast odpovídá geometrickému uspořádání vodního kanálu, ve kterém Zubík a Šulc (2003) provedli experimentální vyšetřování proudění v zakřiveném kanálu pomocí PIV a LDA měřicí techniky.

Pro výpočet byla použita monobloková strukturovaná síť, která byla lokálně zahuštěna u stěn v příčném směru a v oblasti ohybu, kde dochází k odtržení proudu, v podélném směru. Rozměr sítě je $57 \times 57 \times 277$, tj. celkem přibližně 900 000 uzlů. Jako okrajové podmínky na vstupu do výpočetní oblasti byly zadávány konstantní hodnoty střední rychlosti U_m , turbulentní energie k a rychlosti disipace ε . Turbulentní energie byla určena pomocí stupně turbulence Tu a rychlost disipace ze vztahu $\varepsilon=k^{3/2}/L_\varepsilon$. Uvedené výpočty byly provedeny pro $Tu=0,035$ a turbulentní délkové měřítko $L_\varepsilon=0,005$ m. Zvolená hodnota stupně turbulence odpovídá experimentálním výsledkům ve střední části kanálu. Na výstupu z výpočetní oblasti byla zadána hodnota statického tlaku $P=0,1$ MPa resp. $P=0$ MPa pro zmenšení relativní chyby. Výpočty byly provedeny pro proudění vody při teplotě 20°C pro střední rychlosti v rozsahu $U_m=(0,5; 3)$ m/s, tj. při Reynoldsových číslech $Re=U_m d_h/\nu=97000$ až 582000 . Hydraulický průměr d_h je dán šířkou kanálu $a=0,2$ m.



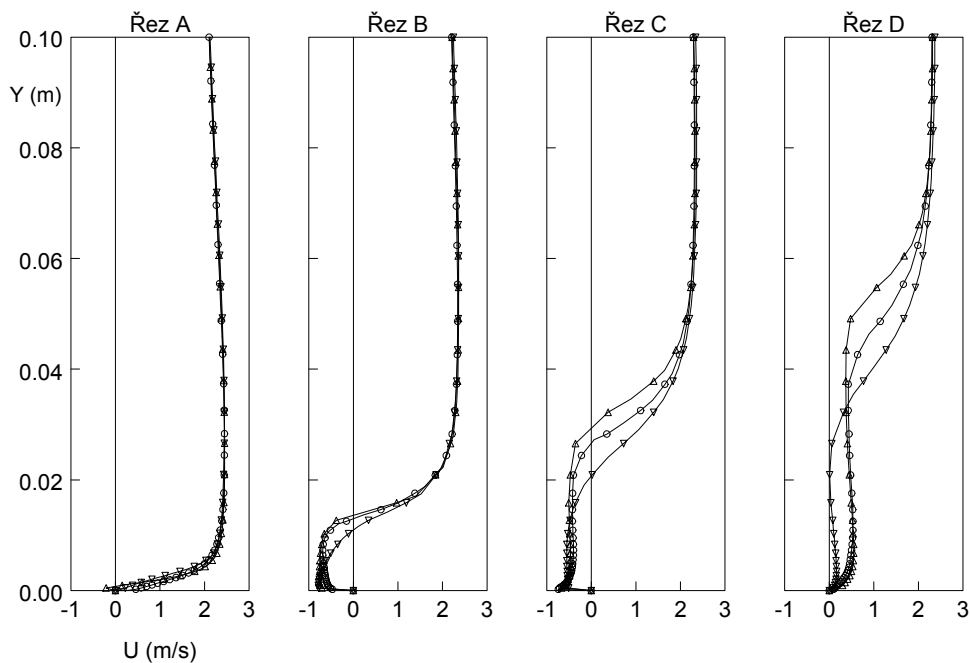
Modelování turbulentního proudění bylo provedeno pomocí tří modelů turbulence. Jako základní byl použit $k-\omega/k-\varepsilon$ SST model turbulence podle Mentera (1994), který uvažuje transport turbulentního smykového napětí. Pro porovnání byly dále použity standardní $k-\varepsilon$ model a RSM model, který navrhli Launder, Reece a Rodi (1975). U SST modelu jsou okrajové podmínky na stěně zadávány podle hustoty sítě u stěny buď pomocí stěnových funkcí nebo přepnutím do úpravy modelu pro nízká turbulentní Reynoldsova čísla. U $k-\varepsilon$ modelu jsou okrajové podmínky na stěně zadávány pomocí stěnových funkcí. RSM model používá modifikované stěnové funkce, při jejichž zavedení se předpokládá, že obtékaný povrch se shoduje s hranicí vazké podvrstvy $y^+=11$, viz Grotjans a Menter (1998).

Výpočet navazuje na práci Příhody a Vláška (2002), kde jsou uvedeny výpočty proudění v zakřiveném kanálu programem CFX-5 pomocí Menterova SST modelu s použitím kombinace strukturované a nestrukturované sítě. Rozbor turbulentního proudění v oblasti odtržení proudu na vnitřní stěně kanálu, získaný pomocí CFX-TASCflow s modelem SST uvádějí Příhoda a Sedlář (2003).

Obr.1 Průběh rychlosti v zakřiveném kanálu

3. Získané výsledky

Průběh střední rychlosti v polovině výšky kanálu $z=0,1$ m získaný pomocí SST modelu pro $U_m=2$ m/s je názorně uveden na obr.1. Z průběhu střední rychlosti je patrný vliv odstředivé síly na proudění tekutiny v kolenu, kde dochází k urychlení proudu u vnitřní stěny kanálu. V kolenu dochází vlivem zakřivení proudnic ke vzniku odstředivé síly a tlakového gradientu napříč kanálem. Současně se sešikmením proudu, které je patrné již na vstupu do ohybu, vzniká v kanále intenzivní sekundární proudění, charakterizované dvojicí vírů. Vypočtený průběh sekundárního proudění v příčném řezu kanálem celkem dobře odpovídá experimentálním výsledkům Zubíka a Šulce (2003). Na výstupu z kolena nastává odtržení proudu, které výrazně ovlivní proudění v celém výstupním úseku kanálu.

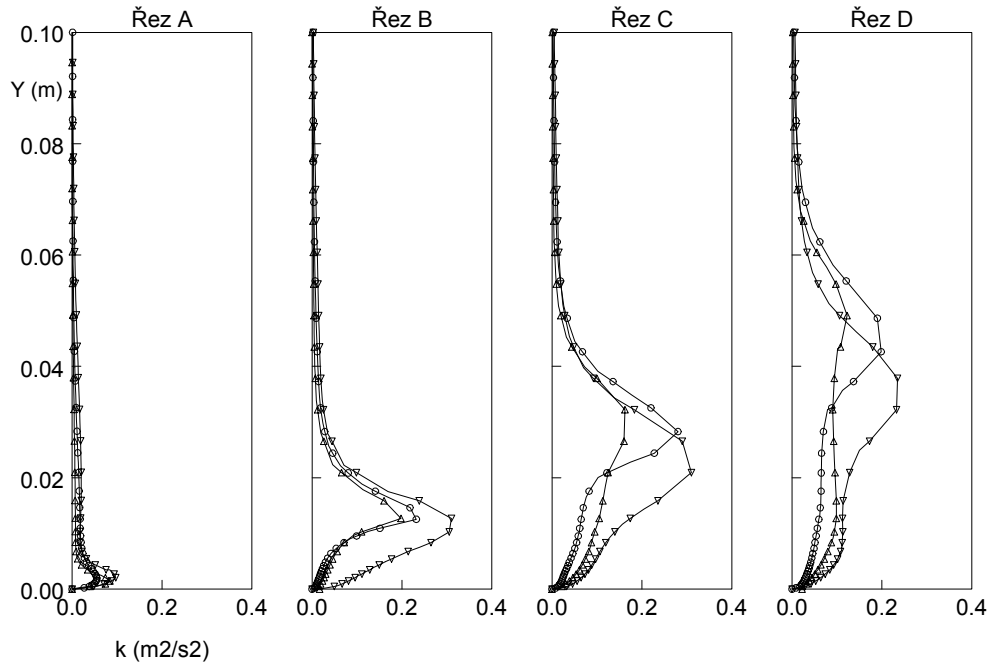


Obr.2 Profily podélné rychlosti v oblasti odtržení proudu
(\circ - SST model; \triangle - RSM model; ∇ - KE model)

Na obr.2 jsou porovnány profily podélné rychlosti v oblasti odtržení proudu od stěny, získané pro rychlost $U_m=2$ m/s ve vzdálenosti $z=0,1$ m od dna kanálu pomocí různých modelů turbulence. Odtržení proudu začíná v řezu A, který odpovídá úhlu $\varphi=82,5^\circ$ resp. vzdálenosti $0,0654a$ před koncem ohybu. Další řezy B, C a D odpovídají vzdálenostem $X=0,1a$; $0,3a$ a $0,5a$ od konce ohybu. V rovině $z=0,1$ m končí oblast odtržení ve vzdálenosti $X=0,482a$ za ohybem, tj. délka oblasti odtržení je $0,548a$. Rychlostní profily, určené pomocí různých modelů turbulence, se začínají odlišovat až v oblasti odtržení proudu. Modely SST a RSM dávají velmi podobné výsledky. Vypočtený začátek odtržení proudu na vnitřní stěně kanálu se shoduje s experimentem Zubíka a Šulce (2003), kde však nelze bezpečně určit polohu přilnutí proudu ke stěně vzhledem k odplouvajícím vírům, které vznikají v této oblasti.

Na obr.3 jsou uvedeny profily turbulentní kinetické energie ve stejných řezech kanálu. V oblasti odtržení nastává prudký růst turbulentní energie s maximem v místech hranice

zpětného proudění. Po přilnutí proudu ke stěně následuje pomalý útlum turbulentní energie na hodnoty v přilehlém proudu.

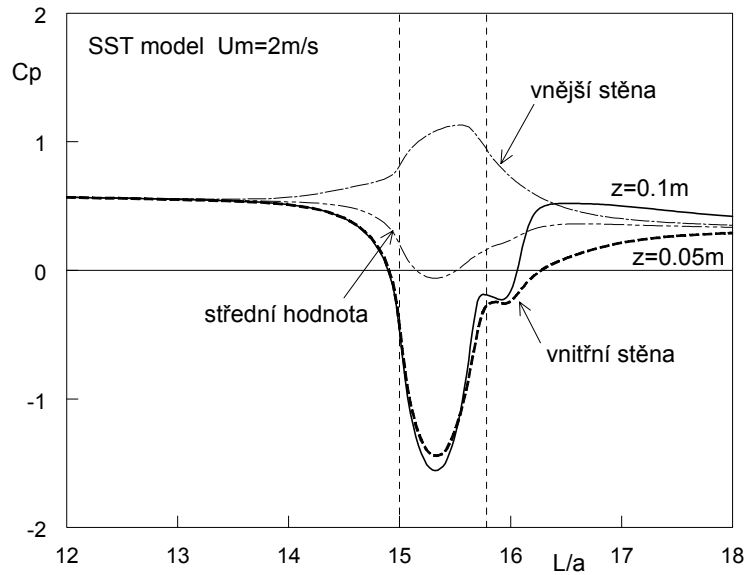


Obr.3 Profily turbulentní energie v oblasti odtržení proudu
(○ - SST model; △ - RSM model; ▽ - KE model)

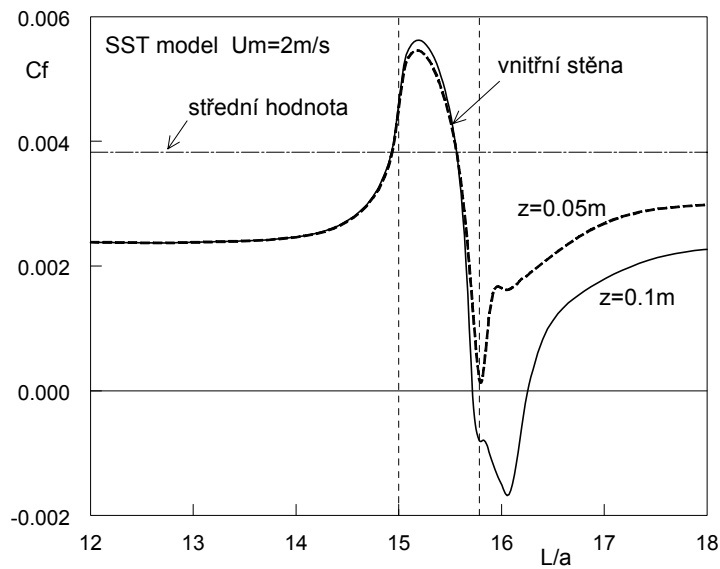
Na obr.4 je uveden průběh tlakového součinitele $C_p = (P - P_0)/P_{dm}$ na vnitřní a vnější stěně zakřiveného kanálu, stanovený SST modelem pro rychlost $U_m = 2$ m/s ve vzdálenosti $z = 0,05$ m a $z = 0,1$ m od dna kanálu. Pro porovnání je uveden též průběh střední hodnoty tlakového součinitele C_p v daném řezu kanálu. Oblast ohybu, která začíná ve vzdálenosti $L/a = 15$ od začátku kanálu, je vyznačena čárkovaně. Průběh součinitele C_p na vnější stěně kanálu je stejný v obou rovinách $z = 0,05$ m a $z = 0,1$ m. Na vnitřní stěně kanálu dochází vlivem zakřivení proudu již před ohybem k poklesu tlaku s minimem C_p v řezu $\varphi = 36,5^\circ$, za kterým následuje prudký růst C_p se sedlem v místě oblasti odtržení proudu. Dále po proudu se rozdíly tlaku napříč kanálem postupně zmenšují a hodnoty C_p na vnitřní a vnější stěně se blíží střední hodnotě v daném řezu.

Na obr.5 je uveden průběh součinitele tření $C_f = \tau_w/P_{dm}$ na vnitřní stěně kanálu, určený pomocí SST modelu pro rychlost $U_m = 2$ m/s v rovinách, ležících ve vzdálenosti $z = 0,05$ m a $z = 0,1$ m od dna kanálu. Hodnoty smykového napětí byly určeny z Newtonova vztahu $\tau_w = \mu(\partial U/\partial Y)_w$. Pro porovnání je čerchovaně vyznačena hodnota $C_f = \lambda/4$, která odpovídá třecímu faktoru určenému z tlakového spádu ve vstupní resp. výstupní přímé části kanálu. V obou rovinách $z = 0,1$ m a $z = 0,05$ m je průběh C_f prakticky stejný až do začátku oblasti odtržení. V koleně dochází u vnitřní stěny k poklesu tlaku, kterému odpovídá urychlení proudu a tím i zvýšení součinitele tření. Dále po proudu dochází u vnitřní stěny k prudkému růstu tlaku, který vede k odtržení proudu ve střední části kanálu ($z = 0,1$ m). Jak je vidět z obr.5, v rovině $z = 0,05$ m k odtržení proudu nedojde. Vlivem sekundárního proudění, které u vnitřní stěny směřuje k ose kanálu, je oblast odtržení omezena pouze na střední část kanálu o

šířce cca $0,4a$. Oblast zpětného proudění dosahuje do vzdálenosti $0,03$ m od vnitřní stěny a náhle se uzavírá. S klesajícím Reynoldsovým číslem se začátek odtržení posunuje mírně proti proudu a oblast zpětného proudění zasahuje dále od stěny.

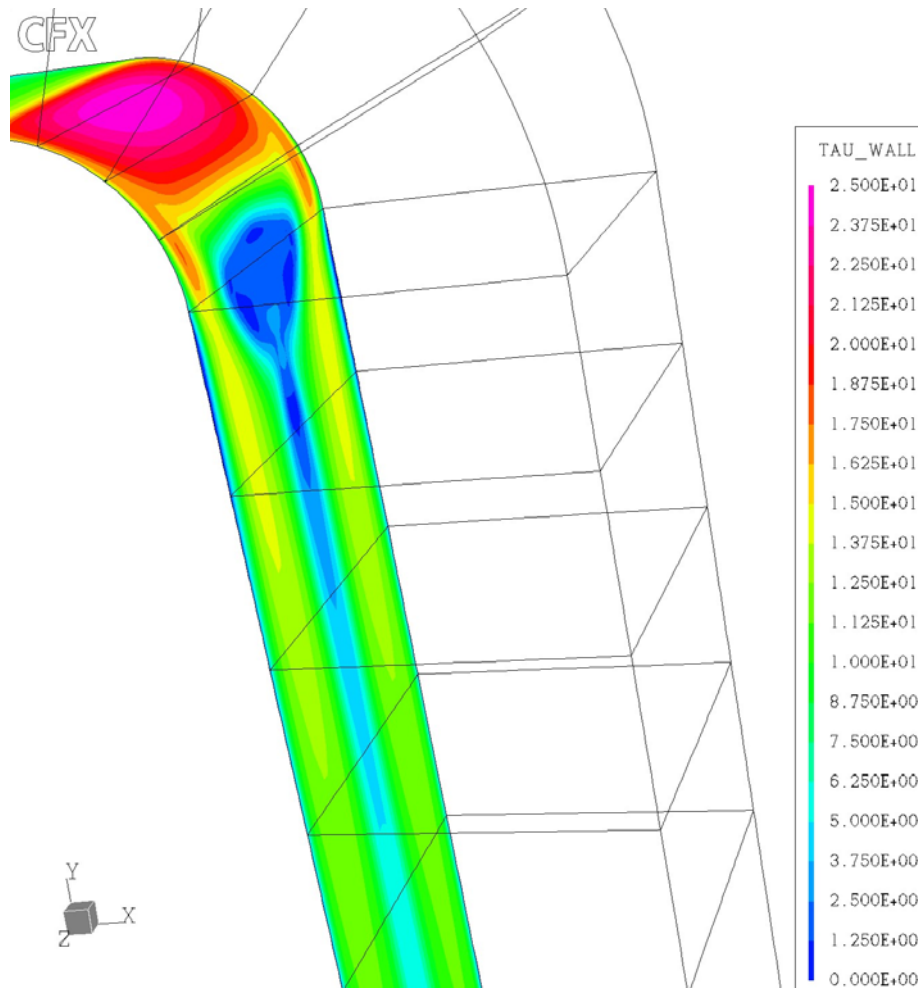


Obr.4 Průběh tlakového součinitele C_p



Obr.5 Průběh součinitele tření C_f

Na obr.6 je přehledně znázorněno rozložení smykového napětí na vnitřní stěně kanálu získané pro SST model a rychlost $U_m=2$ m/s. Oblast odtržení je omezena na střední část kanálu a struktura proudění je podstatně ovlivněna dvojicí podélných vířů, které se udržují poměrně dlouho i v přímém výstupním úseku.



Obr.6 Rozložení smykového napětí na vnitřní stěně kanálu

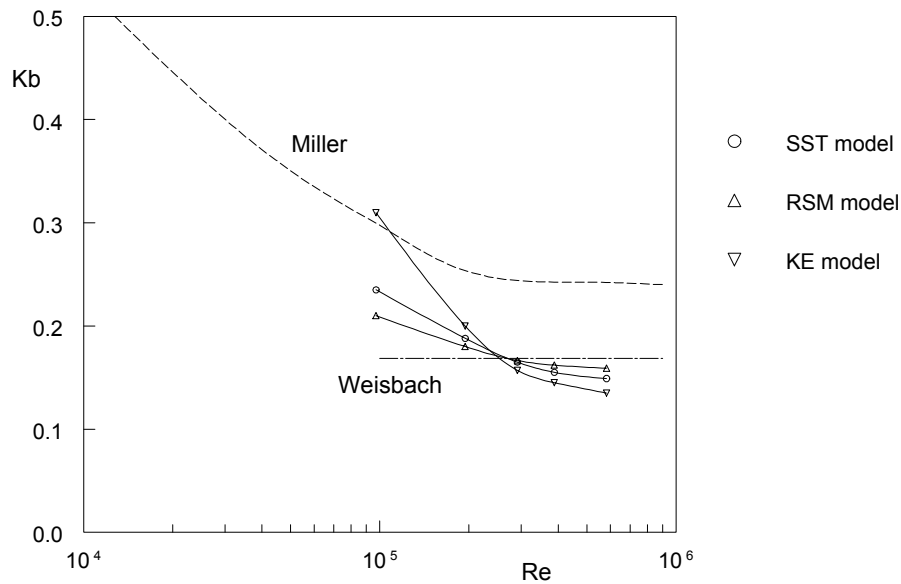
Výsledky numerické simulace proudění v kanálu lze využít ke stanovení energetických ztrát, které se zpravidla vyjadřují ztrátou celkového tlaku resp. pomocí ztrátového součinitele K , který udává ztrátu celkového tlaku vztahenou na dynamický tlak tekutiny

$$\Delta P = K \frac{\rho}{2} U_m^2 \quad (1)$$

Ztráty prouděním v kanálu jsou způsobené jednak třením a jednak místními odpory. Pro zvolený kanál lze ztrátu způsobenou zakřivením kanálu určit z rozdílu tlakového spádu ve vstupním a výstupním úseku kanálu. Většina podkladů v literatuře je uváděna pro potrubí kruhového průřezu. Pro obdélníkový resp. čtvercový průřez lze tyto údaje použít zavedením tzv. hydraulického průměru, pokud poměr obou stran není příliš nízký resp. vysoký. Pro ztráty zakřivením kanálu existuje řada empirických vztahů, které udávají ztrátový součinitel v závislosti na poloměru a úhlu zakřivení kanálu. Pro proudění v zakřiveném kanálu kruhového průřezu při vysokých Reynoldsových číslech se často používá vztah podle Weisbacha

$$K_b = \left[0,13 + 1,8 \left(\frac{d}{2R + d} \right)^{7/2} \right] \frac{\varphi_b}{90} \quad (2)$$

Miller (1978) uvádí ztráty ohybem v kanálu obdélníkového průřezu formou diagramů ve tvaru $K_b = f(\varphi_b, R/a)$ pro Reynoldsovo číslo $Re=10^6$ a s korekcí pro Re menší než 10^6 . Na obr.7 je uveden průběh ztrát ohybem kanálu v závislosti na Reynoldsově čísle. Pro kanál se zakřivením $R/d=1$ a $\varphi_b=90^\circ$ je hodnota koeficientu K_b podle Millera (1978) téměř o 30% vyšší, než odpovídá Weisbachovu vztahu (2).



Obr.7 Závislost ztrát ohybem na Reynoldsově čísle

Podle výpočtů provedených pomocí SST a RSM modelu se ztrátový součinitel s rostoucím Reynoldsovým číslem blíží hodnotě $K_b \approx 0,15$. Tato hodnota je přibližně o 10% nižší než podle Weisbachova vztahu. Závislost K_b na Reynoldsově čísle, získaná pomocí k- ϵ modelu, je mnohem výraznější, zejména při nižších hodnotách Re .

4. Závěr

Na základě výsledků numerické simulace byl proveden rozbor složitého turbulentního proudění a ztrát v zakřiveném kanálu čtvercového průřezu. Z použitých modelů turbulence dávají srovnatelné výsledky SST a RSM modely. Horší výsledky získané pomocí k- ϵ modelu však mohou být způsobeny způsobem zadávání okrajových podmínek na stěně, zejména při odtržení proudu od stěny. Získané výsledky představují první etapu modelování turbulentního proudění v zakřivených kanálech a difuzorech, jehož cílem je využití numerické simulace proudění pro optimalizaci tvaru zakřivených kanálů a difuzorů.

Práce vznikla při řešení projektu č.103/02/0545 podporovaného Grantovou agenturou ČR.

Seznam literatury

- Grotjans H., Menter F. (1998): Wall functions for general application CFD codes, In: *Proc. ECCOMAS 98*, John Wiley & Sons, pp.1112-1117
- Humphrey J.A.C., Whitelaw J.H., Yee C. (1981): Turbulent flow in a square duct with strong curvatures, *Journal of Fluid Mechanics*, 103, pp.443-463
- Iacovides H., Launder B.E., Loizou P.A., Zhao H.H (1993): Turbulent boundary layer development around a square sectioned-bend: Measurements and computation, *TASME Journal of Fluids Engineering*, 102, pp.409-415
- Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. (1975): Progress in the development of a Reynolds stress turbulence closure, *Journal of Fluid Mechanics*, 68, 3, pp.537-566
- Menter F.R. (1994): Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 32, pp.1598-1605
- Miller D.S. (1978): *Internal flow systems*, British Hydromechanics Research Association (BHRA), Fluid Engineering Series, Vol.5, London
- Příhoda J., Sedlář M. (2003): Modelování odtržení proudu v zakřiveném kanálu čtvercového průřezu, In: *Sborník semináře Topical Problems of Fluid Mechanics'03* (Příhoda J., Kozel K. eds), Praha, pp.83-86
- Příhoda J., Vlášek K. (2002): Numerická simulace proudění zakřiveným kanálem čtvercového průřezu, In: *Sborník kolokvia Fluid Dynamics'02* (Jonáš P., Uruba V. eds), Praha, pp.143-146
- Škvor M. (1997): *Proudění v uzavřených kanálech proudových strojů*, Ústav termomechaniky AV ČR, Praha, výzkumná zpráva Z-1228/97
- Zubík P., Šulc J. (2003): The measurement of flow parameters in square cross-section bend, In: *Sborník konference Inženýrská mechanika '03*, CD-ROM, Svratka