

INTERAKCE RADIÁLNÍHO PROUDU SE SOUBĚŽNOU STĚNOU – VLIV MODELU TURBULENCE

Radial jet interaction with parallel wall -- effects of turbulence model

Vladimír Krejčí, Jan Košner

Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství,
Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

Abstrakt

Příspěvek se zabývá výpočtovým modelováním radiálního proudu v interakci s překážkou, která je umístěna souběžně s proudem a má tvar kruhového disku. Disk ležel v ose nástavce vytvářejícího radiální proud a měl průměr 55 cm. K tvorbě radiálního proudu sloužil nástavec o průměru příruby 200 mm, po jejíž obvodě byla štěrbina o šířce 4 mm. Střední rychlost proudění vzduchu ze štěrbin byla nastavena na 10 m/s. V sériích po sobě jdoucích simulací byla měněna vzdálenost mezi nástavcem a diskem od stavu, kdy proud byl k disku přilnutý do stavu, kdy došlo k odtržení a naopak. Takto bylo možno zmapovat hysteretní chování proudu v závislosti na historii vzájemné konfigurace a proudového pole. Použitými modely turbulence byly standardní k-epsilon model s hybridní stěnovou funkcí, poté kvadratický a kubický model k-epsilon, s přímým modelováním přístěnné oblasti (Low Reynolds varianta) a model k-omega se standardní a hybridní stěnovou funkcí. Stěna byla ve všech případech považována za hydraulicky hladkou. Data získaná modelováním byla porovnána s experimentálními daty.

Úvod

V oblasti průmyslového větrání je velmi častou praxí použití místního odsávání k zajištění hygienických limitů koncentrací škodlivin ve větraném prostoru. Důvodem jejich využití je snížení energetické náročnosti větrání v důsledku nižších objemových toků větracího vzduchu ve srovnání se systémy celkového větrání [1]. Slabinou místního odsávání je však nesrovnatelně menší oblast ovlivněná větracím systémem a z toho pramenící nízká účinnost záchytu škodliviny, pokud je systém nevhodně navržen nebo provozován. Tomuto lze předcházet vhodným návrhem koncových prvků odsávacího systému – digestoř. Zde je ale nutno zohlednit činnost, kterou pracovník, jenž má být větracím systémem chráněn, provádí, a to tak, aby pracovník nebyl omezován v tom, co vykonává. Jednou z variant, jež může zvýšit sací účinek odsávacích nástavců je kombinace přívodu a odvodu vzduchu tak, aby byl tok škodliviny lépe směřován, např. jako je tomu u systému “Push Pull” [2]. Jedním ze systémů, které vycházejí z konceptu, jenž kombinuje současný přívod i odvod, je tzv. Aabergův odsávací nástavec [3], známý též pod názvem REEXS (REinforced EXhaust System). Tento nástavec umožňuje zesílení odsávacího účinku tak, že kromě tradičního odsávání navíc přivádí vzduch štěrbinou, která je umístěna po obvodu příruby připevněné k tradičnímu odsávacímu nástavci. Přívodem vzduchu vzniká radiální proud, který svou přítomností účinkuje jako zdánlivá, nekonečná příruba, čímž omezuje odsávání s prostoru na poloprostor. Současně s tím dochází také k unášení tekutiny z okolí nástavce směrem k proudu, což má za následek vytvoření směrového proudového

pole. Radiální proud však omezuje využitelnost tohoto nástavce, jelikož pro zamýšlenou a správnou funkci nástavce je nutno, aby tento proud nebyl ničím narušen. A právě zde dochází ke komplikacím, které brání zavedení jinak účinného nástavce do praxe.

Pro výpočtové modelování je problematika přilnutí, jakož i odtržení, proudů neustálou výzvou. Tento článek je vyústěním snahy zmapovat použitelnost různých modelů turbulence k popisu zmíněného jevu.

Řešené varianty

Z pohledu výpočtového modelování lze radiální proud uchopit jako rotačně symetrický problém, a tudíž zjednodušit výpočtovou oblast na výseč, čímž dojde ke značné úspoře výpočetního času. Výpočetní oblastí tedy byla válcová výseč o průměru 6 m, a stejné délce, s tangenciálním rozpětím 4° . Oblast byla rozdělena strukturovanou sítí na kontrolní objemy, jejichž počet byl přibližně 15000. Velikost objemů vycházela jednak z rozměrů modelovaného nástavce, a jednak z nutnosti zachytit sledované fyzikální děje a byla v rozsahu od 0.3 mm do 200 mm. Ve středu výpočtové oblasti byl umístěn nástavec vytvářející radiální proud o počátečním průměru 200 mm a šířce 4 mm. V ose nástavce byl umístěn disk průměru 550 mm a nulové tloušťce tak, aby byla plocha disku s proudem rovnoběžná. Vzdálenost disku byla postupně měněna ze 100 mm na 500 mm, nebo lépe, dokud se proud od překážky neodtrhl. Poté byla vzdálenost opět snižována tak dlouho, až došlo k přilnutí proudů k překážce. Pozorovaná hystereze ve vzdálenostech odtržení a přilnutí byla porovnána s dostupnými experimentálními daty. Jak povrch nástavce tak překážky (disku) byl považován za hydraulicky hladký.

Jelikož počáteční rychlost proudů byla nastavena na 10 m/s (pístový rychlostní profil), což vyústilo v Reynoldsovo číslo větší než 2600 (vztaženo k počátečním parametrům proudů), byly simulace provedeny jako turbulentní s těmito modely turbulence: $k-\varepsilon$, kvadratický $k-\varepsilon$, kubický $k-\varepsilon$ a $k-\omega$. Ve všech případech byly na okrajové podmínce přívodu vzduchu do oblasti kromě rychlosti předepsány také hodnota intenzity turbulence a charakteristického rozměru turbulence (integrálního délkového měřítka). Tyto byly nastaveny jako konstanty – pístový profil – 10 % u intenzity turbulence; u délkového měřítka byla zadána hodnota 10 % z šířky přívodní štěrbiny.

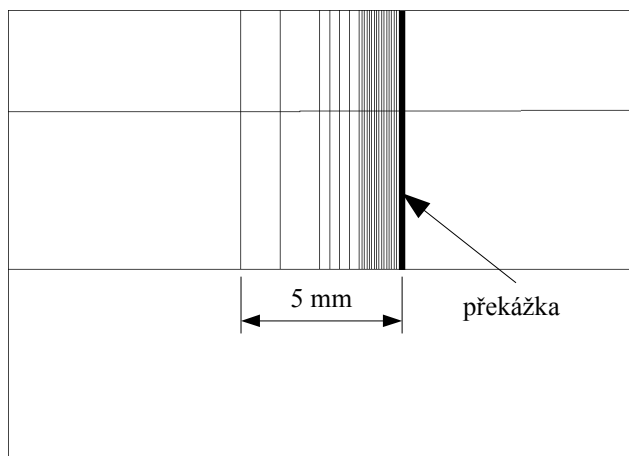
Důležitým parametrem těchto modelů byl způsob vypořádání se s mezní vrstvou. Přehled příslušných stěnových funkcí podává tabulka 1.

Tabulka 1. Použité modely turbulence a aproximace stěn

| Model | Popis stěny |
|-----------------------------|--|
| $k-\varepsilon$ | hybridní stěnová funkce [4], [5] |
| kvadratický $k-\varepsilon$ | hybridní stěnová funkce |
| kubický $k-\varepsilon$ | hybridní stěnová funkce |
| $k-\omega$ | standardní stěnová funkce hybridní stěnová funkce |

Co se týče kvality výpočtové sítě v blízkosti stěny překážky, tu lze posoudit pohledem na obrázek 1. Zobrazená síť odpovídá kvadratickému a kubickému modelu, v

ostatních případech byla síť téměř shodná, lišila se totiž jen ve velikosti (výšce) první vrstvy kontrolních objemů u stěny, která nabývala hodnoty 5 mm.



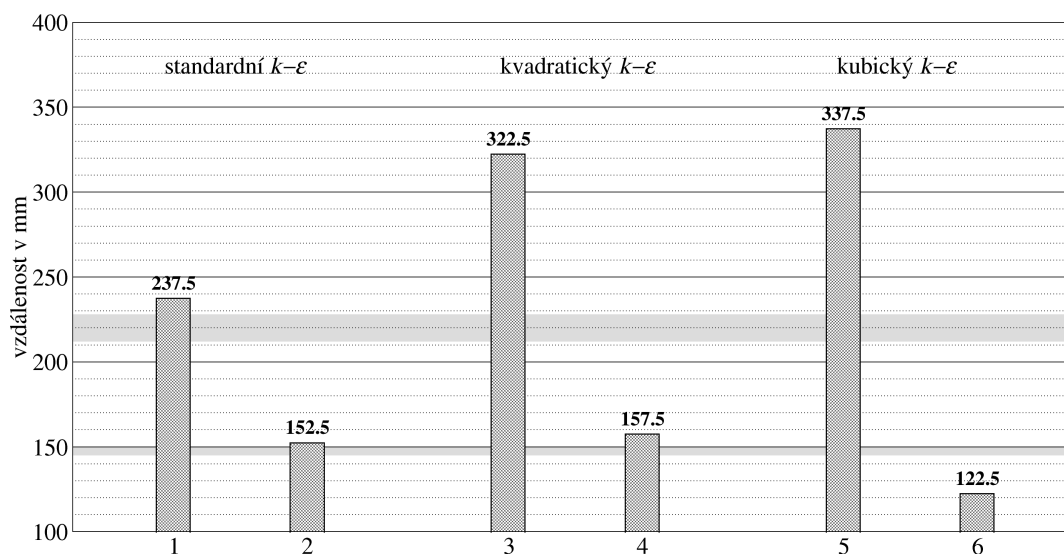
Obr. 1 Detail výpočtové sítě v blízkosti překážky

Dalšími okrajovými podmínkami byly: statický tlak, který byl předepsán pro obvod a čela výpočtové oblasti, a cyklické podmínky po stranách výseče, které zajišťují modelování problému jako osově souměrného.

Z pohledu numeriky byla prostorová diskretizace provedena schematem MARS [5], které je založeno na metodě MUSCL [6] a navíc využívá TVD limiterů. Toto schema je druhého řádu přesnosti.

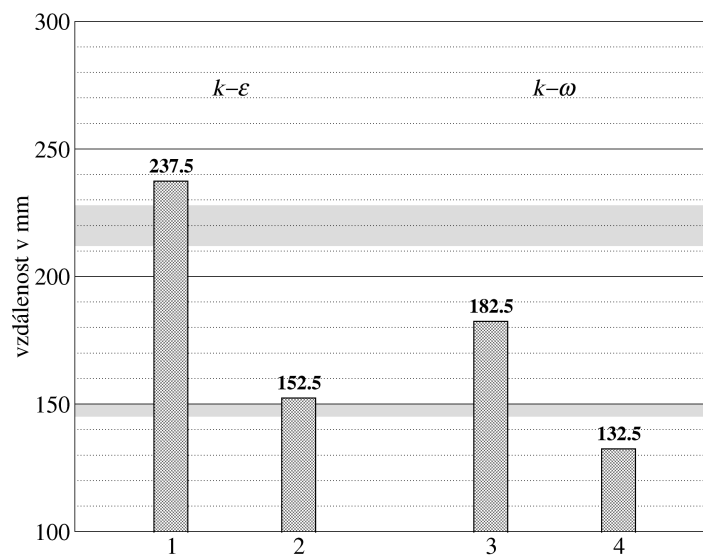
Výsledky

Jak již naznačil předchozí text byly schopnosti modelů turbulence vyhodnocovány vzdáleností, ve které došlo buď k odtržení proudu od disku, nebo naopak přilnutí volného proudu k disku. Prvně tedy porovnejme výkon modelů založených na řešení transportních rovnic pro turbulentní kinetickou energii k a rychlost disipace turbulentní kinetické energie ε (viz obrázek 2).



Obr. 2 Porovnání modelů turbulence $k-\varepsilon$, šedé pásy označují rozsahy naměřených dat

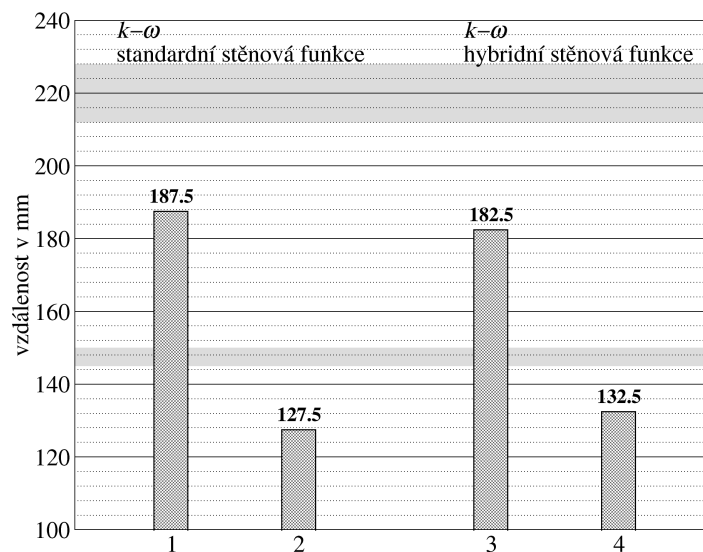
V grafu jsou vidět dva sloupce pro každý model turbulence, kde první sloupec označuje vzdálenost, ve které došlo k odtržení proudu od disku a druhý situaci opačnou, tzn. kdy se proud změnil z volného na přilnutý. Nelineární modely, ač by se mohlo zdát že vhodnější pro přesnější popis proudění v mezní vrstvě poněkud nadhodnocují v situacích kdy proud je přilnutý a je nutno ho od překážky oddělit. Toto nadhodnocení je společné všem modelům, avšak u standardního modelu byla zaznamenána odchylka 5%, zatímco u zbylých dvou v rozmezí 40 až 50 %. Navíc kubický model nesledoval trend ostatních, když pro případ vynuceného přilnutí proudu bylo nutno disk přiblížit umístit do vzdálenosti o 20 % bližší, než jak tomu bylo u naměřených dat. Navíc standardní i kvadratický model tuto vzdálenost opět nadhodnotily o 5 %.



Obr. 3 Vzdálenost odtržení a přilnutí v závislosti na použitém modelu turbulence

Obrázek 3 zachycuje podobný test, tentokrát však byly použity modely turbulence $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, přičemž oba využívaly hybridní stěnové funkce k popisu proudění v přístěnné oblasti. Zde je v celku zřejmé, že první z modelů, tedy $k-\varepsilon$, překonává ve schopnosti zachytit sledovaný jev v celku výrazně. V řechi čísel se standardní model $k-\varepsilon$ s hybridní stěnovou funkcí odlišuje od naměřených hodnot maximálně o 5 %. Naproti tomu, model $k-\omega$ vykazuje u vynuceného odtržení odchylku 20% a v případě, kdy bylo účelem volný proud změnit v přilnutý patřičným přiblížením disku, je odchylka okolo 10 %.

Poslední ze sledovaných testů se zaměřoval na vliv použité stěnové funkce u modelu $k-\omega$. Výsledek tohoto testu lze pozorovat na obrázku 4. Zde jsou výsledky poněkud protichůdné. Zatímco standardní stěnové funkci se lépe dařilo zachytit odtržení proudu od překážky, u přilnutí vedlo její použití k opačnému výsledku, tedy proud přilnul ve vzdálenosti ještě menší, než jak tomu bylo u simulace využívající hybridní stěnové funkce, přičemž použití obou vedlo k nutnosti umístit disk do výrazně (10 až 15 %) větší blízkosti než, jak vyplývalo z experimentů. Pokud bychom chtěli podobně vyjádřit odchylku od experimentu u odtržení, pak tato dosahovala asi 18 % u standardní stěnové funkce a 22 % u funkce hybridní.



Obr. 4 Vliv stěnové funkce na vzdálenost odtržení a přilnutí u modelu turbulence $k-\omega$

Závěr

Příspěvek si kládí za cíl poukázat na vliv volby modelu turbulence na sledovaný fyzikální jev, kterým bylo přilnutí nebo odtržení radiálního proudu od překážky umístěné souběžně s proudem. Kromě vhodného modelu turbulence byl na jednom z nich posouzen také vliv modelu přistěnné oblasti. Výsledky naznačují, že z těchto zmíněných parametrů je významnější volba vhodného modelu turbulence, jelikož ta vedla ke značnému rozptylu ve sledovaných vzdálenostech přilnutí/odtržení. Použití různých typů stěnových funkcí vedlo k rozdílům v jednotkách procentních bodů, zatímco turbulentní modely se lišily v desítkách. Jako nejvhodnější se jeví standardní model $k-\varepsilon$ s hybridní stěnovou funkcí.

Poděkování

Práce vznikla za finanční podpory projektu GP101/08/P128 Grantové agentury České republiky.

Literatura

- [1] Chyský J., et al., Ventilation and Air conditioning, Technical guide No.31, Bolit, Brno, 1993, (in Czech)
- [2] Huang R.F. et al., Aerodynamic Characteristic and Design Guidelines of Push-Pull Ventilation Systems, Ann. occup. Hyg., Vol. 49, No. 1, pp. 1-15, 2005
- [3] Aaberg C.P., Plant for Ventilation of Rooms, More Particularly in Stables, United States Patent & Trademark Office, US patent 3401621, 1968
- [4] Rung T., Formulierung universeller Wandrandbedingungen für Transportgleichungsturbulenzmodelle, Institutsbericht Nr. 02/99, Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Berlin., 1999
- [5] STAR-CD Version 4.10 Documentation, 2010
- [6] van Leer B., Towards the ultimate conservative differencing scheme V: A second-order sequel to Godunov's method, J. Comp. Phys., 23, pp. 101-136, 1977