

Posudek disertační práce

Numerické modelování turbulentního proudění ve větrané místnosti autor Ing. Martin Barták

Disertační práce v rozsahu celkem 76 stran obsahuje souhrn, přehled označení, 5 kapitol a seznam literatury, který obsahuje 56 položek, z toho 1 publikace autora.

V úvodní kapitole jsou uvedeny jednak možnosti numerické simulace proudění ve vzduchotechnice a technice prostředí a jednak hlavní a dílčí cíle disertační práce. Hlavním cílem práce bylo ověření použitelnosti Wilcoxova a Menterova $k-\omega$ modelu turbulence pro simulaci izotermického proudění ve větraných místnostech. Dílčí cíle pak zahrnují: a) zhodnocení výhod a nevýhod těchto modelů ve srovnání s $k-\epsilon$ modelem; b) jejich ověření pomocí základních případů proudění typických pro větrané místnosti – volný a stěnový proud; c) nalezení konkrétních podmínek pro aplikaci modelů turbulence v mezí vrstvě na stěně; d) doporučení zásad pro návrh výpočetní sítě při použití $k-\omega$ modelů; e) aplikace těchto zásad na případu proudění v omezeném prostoru.

2. kapitola obsahuje rešerši poznatků z literatury, týkající se metod numerické simulace proudění ve větraných místnostech s popisem středovaných Navier-Stokesových rovnic pro izotermické proudění nestlačitelné tekutiny a $k-\omega$ modelů turbulence. Podrobně jsou popsány modely Wilcoxe (1998) a Mentera (1994), zřejmě v úpravě použité v programu FLUENT. Dále jsou uvedeny experimentální a teoretické poznatky o základních typech smykového proudění, používaných při větrání: kruhový volný proud a rovinný stěnový proud.

Ve 3. kapitole jsou popsány metody použité jednak pro numerickou simulaci a jednak pro experimentální vyšetření rychlostního pole v modelové místnosti. Pro numerickou simulaci byl použit komerční program FLUENT 6.3.26 s preprocesorem GAMBIT 2.3.16. Řešení bylo prováděno pomocí implicitního numerického schématu 2. řádu. Konvergence numerického řešení byla sledována pomocí residua hmotnostních toků. Okrajové podmínky byly zadávány podle doporučení z dokumentace FLUENT, kde jsou charakteristiky turbulence určovány z odhadnuté intenzity turbulence a turbulentního délkového měřítka. Pro řešení stěnového proudu byl proveden odhad velikosti první buňky u stěny y_1 odpovídající bezrozměrné hodnotě $y^+=2,5$ pomocí empirických vztahů pro součinitel tření, pokles maximální rychlosti a pro příčné rozšiřování stěnového proudu. Dále je v 3. kapitole popsána metodika měření proudového pole v modelové místnosti. Rychlostní pole bylo měřeno všesměrovými sondami se žhaveným elementem, tvořeným koulí o průměru 2 mm. Současně byla měřena odporovým čidlem teplota vzduchu pro nastavení termoanemometru. Termoanemometr s kulovým čidlem udává absolutní hodnotu vektoru rychlosti v rozsahu 0,05 až 5 m/s při frekvenci vzorkování 5 Hz.

Ve 4. kapitole jsou uvedeny výsledky numerické simulace kruhového volného proudu a rovinného stěnového proudu. Oba případy byly řešeny jako dvourozměrné proudění. Při výpočtu byla ve všech případech volena výpočetní síť tvořená čtvercovými buňkami, které byly zahuštěny v blízkosti pevných stěn. Pro volný proud je kromě vstupní trysky síť tvořena čtvercovými buňkami o hraně 20 mm, 10 mm a 5 mm. Volný proud byl řešen pro počáteční rychlost 3,086 m/s, které odpovídá rychlost v ústí trysky 10 m/s, a intenzitu turbulence 4%. U variant VP-2b a VP-2c byla odstraněna vstupní tryska a uvažována počáteční konstantní rychlost 10 m/s a intenzita turbulence 2%. Výsledky simulace volného proudu pomocí Wilcoxova a Menterova modelu turbulence byly posuzovány pomocí hlavních parametrů proud – poklesu maximální rychlosti, míry rozšiřování a polohy virtuálního počátku. Podobně

byl simulován rovinný stěnový proud, kde na rozdíl od volného proudu nebyla uvažována vstupní tryska, ale konstantní vstupní rychlost 7 m/s a intenzita turbulence 15%. Pro výpočet byla použita základní síť ze čtvercových buněk o hraně 10 mm, která byla u stěn zjemněna. V dalších variantách byla síť zjemněna na buňky o hraně 5 mm a 2,5 mm. Stejně jako u volného proudu byly výsledky simulace testovány pomocí hlavních parametrů proudu – poklesu maximální rychlosti, polohy maxima rychlosti, rozšiřování stěnového proudu a součinitele tření. Pro oba případy byl testován vliv intenzity turbulence na volné hranici, kde byla volena hodnota 1% resp. 0,1%.

Dále jsou ve 4. kapitole uvedeny výsledky experimentálního a numerického modelování vyfukování proudu vzduchu do modelové místnosti z otvoru s výstupním průřezem 200x300 mm umístěným přibližně ve 3/4 výšky místnosti. Stejným otvorem, umístěným v úrovni podlahy pod přívodním otvorem, byl vzduch odváděn. Stěny modelové místnosti byly tvořené dýhovanými laťovkami s drsností 0,6 mm. Provedené experimenty ukázaly, že proudové pole v modelové místnosti je nestacionární. Bylo zjištěno, že proud kmitá v horizontální rovině s periodou cca 120 s. Numerická simulace byla provedena pro výpočetní oblast odpovídající experimentu. Zadaná počáteční rychlost odpovídá průtoku vzduchu při experimentu, počáteční intenzita turbulence 1% a turbulentní délkové měřítko 2 mm byly zvoleny s ohledem na předřazený trubičkový usměrňovač. Vzhledem k experimentálním výsledkům bylo numerické řešení provedeno jako nestacionární, při němž byl sledován průběh rychlosti v oblasti měření. Výpočet byl proveden pro 2 varianty sítě. Při jemnější síti s velikostí buněk 25 mm byly získány pomocí Wilcoxova modelu průběhy rychlosti ve sledovaných bodech, které vykazují časovou periodu změn přibližně odpovídající experimentu.

V závěrečné 5. kapitole jsou shrnuty dosažené výsledky, týkající se jednak ověření použitelnosti vybraných $k-\omega$ modelů turbulence pro simulaci proudění ve větraných místnostech včetně podmínek pro jejich použití a jednak experimentálního a numerického modelování proudění v modelové místnosti.

Připomínky a dotazy

K práci nemám zásadní připomínky, týkající se přístupu k řešení zadaného problému. Dále uvádím některé připomínky a dotazy:

- 1) Cílem práce je mj. ověření výhod $k-\omega$ modelu (Wilcoxe a Mentera) ve srovnání s $k-\epsilon$ modelem, který je dosud převážně používán. Aby autor čtenáře opravdu přesvědčil, měl by uvést pro porovnání i výsledky získané pomocí $k-\epsilon$ modelu.
- 2) Ověření modelů turbulence pomocí experimentálních dat jiných autorů nebylo prováděno pomocí reálných experimentů, ale pomocí empirických vztahů, i když je v odst.3.2 zmiňován význam databází (např. ERCOFTAC) pro validaci modelů proudění. Přitom jsou v práci zmiňovány např. výsledky experimentálního vyšetřování volného proudu podle Husseina aj. (1994) a stěnového proudu podle Erikssona aj. (1998). V databázi ERCOFTAC je jako testovací případ C55 uvedeno měření Karlssona aj. (1991) a nikoliv měření Erikssona aj. (1998), jak se uvádí na str.13.
- 3) Výpočet hypotetického stěnového proudu byl proveden s okrajovými podmínkami, které odpovídají větrací štěrbině. Zvolená velmi vysoká počáteční intenzita turbulence 15% nutně vede k vyšším hodnotám smykového napětí na stěně. Podobně se dostane pro rovnotlakou turbulentní mezní vrstvu na desce podle Bradshawa (1974) výrazné zvýšení součinitele tření na stěně vlivem turbulence proudu.
- 4) V práci nejsou uvedeny žádné průběhy turbulentních charakteristik, např. turbulentní energie, ze kterých by bylo patrné, jak se ve stěnovém proudu mění hladina turbulence z počáteční velmi vysoké hodnoty, odpovídající intenzitě turbulence 15%. Pro výpočet volného proudu byla pro variantu VP-2 (s tryskou) zvolena počáteční hodnota intenzity turbulence 4%. Jaká je intenzita turbulence v ústí trysky? Proč byla pro variantu VP-2b a

- VP-2c (bez trysky) zvolena počáteční hodnota intenzity turbulence ve vstupním řezu 2%? Při výpočtu byl sice sledován vliv charakteristik turbulence na volné hranici, ale nebyl sledován vliv počáteční hodnoty intenzity turbulence, která ovlivní proudění mnohem víc.
- 5) Při výpočtech volného a stěnového proudu jsou všechny stěny uvažovány jako hladké. Při výpočtu proudění v komoře se uvádí, že byla zadána drsnost stěn 0,6 mm. Byly stěny hydraulicky hladké? Pokud ne, jakým způsobem byly uvažovány okrajové podmínky pro obtékání drsné stěny?
 - 6) Na str.34 se podle Mentera (1994) uvádí, že SST model by měl být méně citlivý na zadání hodnoty hladiny turbulence ve vzdáleném okolí než model WKO. Obecně je původní Wilcoxův $k-\omega$ model (1988) citlivý na zadání hodnoty specifické rychlosti disipace ω a nikoliv turbulentní energie k . Použitý Wilcoxův model (1998) obsahuje v transportní rovnici pro ω člen vyjadřující tzv. příčnou difuzi, který tuto citlivost odstraňuje.
 - 7) Při odvození odhadu velikosti první buňky odpovídající podmínce $y_1^+ = 2,5$ je extrapolace použitých empirických vztahů pro hodnoty $Re_m < 700$ a $x/b < 20$ velmi problematická.
 - 8) U stěnového proudu není uveden způsob určení třecí rychlosti resp. součinitele tření na stěně. Patrně byl určen z rychlostního gradientu v první výpočetní buňce.
 - 9) Dvourozměrný stěnový proud se spíše nazývá "rovinný" než "plochý", jak je uvedeno v práci. V kap.1, 2, 3.2 a 4.1 se používá označení "volný" proud, zatímco v odst. 2.4, 3.3 a 4.3 označení "zatopený" proud. Jaký je mezi nimi rozdíl? V závěru na str.71 je při shrnutí výsledků použit pojem "oblast volného smyku", který není v práci vysvětlen nebo popsán.

Závěry a hodnocení

Předložená disertační práce se zabývá numerickou simulací volného a stěnového proudu a aplikací výsledků na případy proudění ve větrané místnosti. Disertace přináší původní výsledky modelování proudění v modelové místnosti. Autor splnil dané cíle disertační práce a prokázal schopnost samostatné vědecké práce. V předložené práci nejsou uvedeny informace o publikaci dosažených výsledků. Jinak disertace splňuje všechny podmínky podle §47 zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. ve znění pozdějších předpisů a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 4.září 2007