

Vliv modelu turbulence na CFD simulaci vnitřního zdroje tepla

Citation for published version (APA):

Zelensky, P., Bartak, M., & Hensen, J. L. M. (2012). Vliv modelu turbulence na CFD simulaci vnitřního zdroje tepla. In *Proceedings of the 7th Conference IBPSA-CZ, Simulace budov a techniky prostředí, 8-9 November 2012, Brno, Czech Republic* (pp. 1-6). IBPSA-CZ.

Document status and date:

Published: 01/01/2012

Document Version:

Accepted manuscript including changes made at the peer-review stage

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

VLIV MODELU TURBULENCE NA CFD SIMULACI VNITŘNÍHO ZDROJE TEPLA

Petr Zelenský¹, Martin Barták¹, Jan L.M. Hensen^{1,2}

¹ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí

²Eindhoven University of Technology, Building Physics and Services

e-mail: petr.zelensky@fs.cvut.cz

ABSTRAKT

CFD modelování a simulace konvekčních proudů ve větraných a klimatizovaných místnostech jsou poměrně náročné na čas a výkon počítače. Aby se tato simulační metoda mohla efektivně využívat při navrhování systémů techniky prostředí, je nutné dobu přípravy numerického modelu a samotného výpočtu co nejvíce zkrátit. Jednou z cest, jak toho dosáhnout, je zjednodušit model zdroje tepla, aniž by došlo k výrazné ztrátě přesnosti výsledků. Příspěvek je zaměřen na zjednodušené modelování zdrojů tepla v interiéru a na posouzení toho, jak použitý model turbulence ovlivňuje výsledek simulace. Byly zpracovány a porovnány výsledky pro různé typy modelů turbulence v úloze se zjednodušeným modelem sedící osoby působícím jako zdroj tepla v uzavřené místnosti.

Klíčová slova: CFD Simulace, zjednodušené modelování, vnitřní zdroj tepla, model turbulence

INFLUENCE OF A TURBULENCE MODEL ON THE CFD SIMULATION OF INDOOR HEAT SOURCE

CFD modeling and simulation of convective flow in ventilated and air-conditioned spaces are relatively demanding on computational time and power. For effective use of this simulation method in HVAC design it is vital to reduce the time needed for preparation of the computational model and also for the computations. One of the possible ways to achieve this is to simplify the models of heat sources providing that the results accuracy is not significantly lowered. The paper deals with simplified modeling of heat sources in the indoor environment and with the influence of turbulence models on the results of simulation. Results of simulations with simplified model of seated occupant acting as a heat source in the enclosed room with various turbulence models were evaluated and compared.

Keywords: CFD simulation, simplified modeling, indoor heat source, turbulence model

ÚVOD

Se zvyšujícími se možnostmi výpočetní techniky se postupně mění přístup a nástroje projekční činnosti v oboru techniky prostředí. Standardní výpočetní metody jsou doplňovány dalšími alternativami, mezi něž patří i počítačová mechanika tekutin – CFD (Computational Fluid Dynamics). Tyto alternativní metody napomáhají ke zlepšování kvality vnitřního prostředí při současném dosažení energetických úspor.

Efektivní využití CFD simulací v praxi je stále ještě omezeno možnostmi dostupné výpočetní techniky. I když tato oblast v posledních desetiletích prošla výrazným rozvojem, přetrvávají zde značná omezení vzhledem k dostupné výpočetní kapacitě. Proto je při tvorbě modelů a při samotných simulacích často nutné přistoupit k výraznému zjednodušení skutečnosti.

Častým prvkem vnitřního prostředí jsou zdroje tepla. Mohou mít výrazný vliv na proudění vzduchu ve vnitřních prostorech, na šíření škodlivin a tepelnou pohodu. Při tvorbě modelů pro CFD simulace musí být zdroje tepla brány v úvahu. To však může být problematické například při simulacích geometricky složitých zdrojů tepla, či velkého množství zdrojů umístěných v jednom

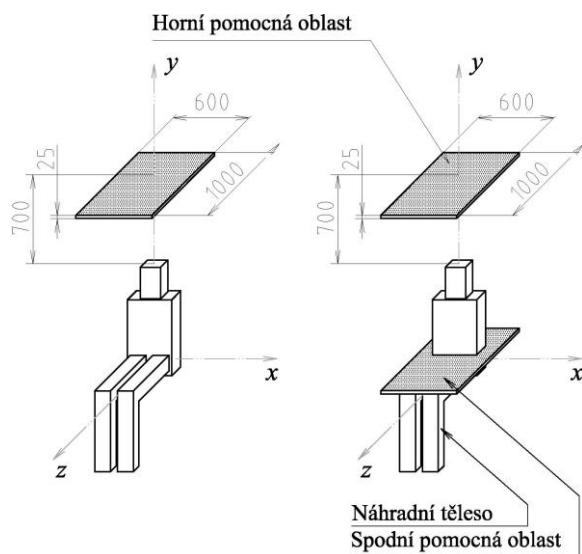
prostoru. V takových případech může být výpočet přestupu tepla metodou zhuštěné numerické sítě u povrchu modelu velmi náročný a metoda stěnových funkcí nepřesná, protože složité geometrie zdrojů tepla vybočují ze základních případů, pro které jsou stěnové funkce definovány [1]. Proto byla navržena nová metoda zjednodušení modelů zdrojů tepla založená na náhradě zdroje jednoduchou okrajovou podmínkou rychlosti, teploty a parametrů turbulence [2].

Příspěvek se zabývá porovnáním výsledků CFD simulací konvekčních proudů nad modelem zdroje tepla (sedící osoby) s využitím vybraných modelů turbulence, které aproximují skutečné vlastnosti turbulentního proudění. Výsledky úloh s různými modely turbulence jsou porovnány vzájemně a také s výsledky měření, které byly publikovány v odborné literatuře. Cílem je potvrdit vliv volby modelu turbulence na rychlostní a teplotní profil konvekčního proudu. Jsou také porovnány výsledky simulace s různými algoritmy řešení rychlostního a tlakového pole. Výsledky provedené studie budou zohledněny při detailních simulacích konvekčních proudů pro navrženou metodu zjednodušení modelů zdrojů tepla nahrazením zjednodušenou okrajovou podmínkou.

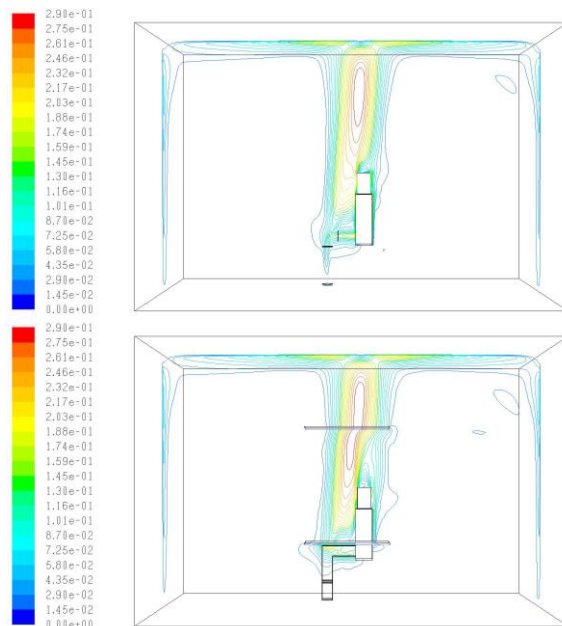
METODA ZJEDNODUŠENÍ VÝPOČETNÍHO MODELU VNITŘNÍHO ZDROJE TEPLA

Nad každým zdrojem tepla vzniká přirozené proudění (tzv. konvekční proud), které může mít významný vliv na okolní prostředí (v závislosti na hybnosti proudu, parametrech okolí apod.). Může ovlivňovat proudy přiváděného vzduchu ze VZT vyústek, a to i negativně [3]. Naopak v případě místností větraných zaplavitím mají pozitivní vliv, jsou důležité pro správnou výměnu vzduchu a zlepšují kvalitu inhalovaného vzduchu [4].

Konvekční proudy nad zdroji tepla jsou výsledkem přestupu tepla z celého povrchu zdroje. Geometrie některých zdrojů však může být poměrně složitá a jejich CFD modelování je navíc komplikováno nutným zahuštěním numerické sítě v blízkosti povrchu, aby model dostatečně správně a přesně vystihl přenos tepla v mezní vrstvě vzduchu. To vede k příliš vysokým nárokům na paměť počítače i na čas nutný k provedení simulací. V rámci řešení tohoto problému byla navržena metoda zjednodušení modelů zdrojů tepla založená na jejich nahrazení jednoduchou okrajovou podmínkou teploty a rychlosti [2]. Nejprve je vytvořen výpočetní model s detailní geometrií zdroje tepla. S tímto modelem je provedena simulace se zaměřením na vyvolané konvekční proudění a na základě jejích výsledků jsou určeny profily rychlosti a teploty stoupajícího konvekčního proudu. Ty jsou následně využity pro umělé vyvolání konvekčního proudu nad náhradním geometricky zjednodušeným tělesem, které již není zdrojem tepla – konvekční proud nevzniká ohřevem vzduchu na povrchu tohoto tělesa, nýbrž je vyvolán uměle pomocí jednoduché okrajové podmínky umístěné nad náhradním tělesem, viz obr. 1 a obr. 2.



Obr. 1 – Zjednodušení modelu zdroje tepla náhradou jednou a dvěma okrajovými podmínkami.



Obr. 2 – Porovnání isoploch rychlosti [m/s] (nahore – detailní úloha; dole – úloha s nahrazením zdroje tepla dvěma okrajovými podm.)

Vytvořený zjednodušený model je možné využít opakovaně pro více simulací, nebo také několikanásobně v jedné simulaci (v případě opakovaného výskytu stejného zdroje tepla v úloze). Výpočetní čas simulace s takto zjednodušeným modelem je přitom výrazně nižší, než výpočetní čas simulace s detailním modelem (až o 65 %), pro který je přestup tepla z povrchu zdroje řešen výpočtem [2]. Vliv zdrojů tepla na okolní prostředí je při navrženém zjednodušení zachován, je však nutné co nejlépe vystihnout konvekční proud stoupající nad zdrojem tepla v úloze s detailním modelem, která slouží jako základ pro další zjednodušení.

MODEL TURBULENCE V CFD

Důležitým faktorem při numerických výpočtech CFD simulací a následném stanovení rychlostních a teplotních profilů konvekčních proudů nad zdroji tepla je zvolený způsob řešení turbulence.

V současné době existuje několik ověřených metod, jak přistupovat k výpočtu turbulentního proudění [5]. Výpočetně nejnáročnějším způsobem je přímé numerické řešení turbulentního proudění, tj. přímé numerické řešení Navier-Stokesových rovnic (tzv. metoda DNS – Direct Numerical Simulation), případně přímé numerické řešení větších vírů a aproximace menších vírů (tzv. metoda LES – Large Eddy Simulation). Metody DNS a LES jsou obecně přesné, nicméně velmi výpočetně náročné. V současné době je jejich použitelnost v projekční praxi velmi problematická.

Rozšířeným přístupem k modelování turbulence je Reynoldsův rozklad a průměrování Navier-Stokesových rovnic (RANS – Reynolds-averaged Navier-Stokes). Touto metodou jsou přímo počítány pouze

střední hodnoty parametrů proudění a vliv turbulentních fluktuací je stanoven na základě některého z řady modelů turbulence. Přesnost metody je proto nižší než při přímé numerické simulaci, nicméně výpočetní čas je výrazně kratší. V simulacích v rámci oboru techniky prostředí je přesná předpověď středních parametrů turbulentního proudění většinou dostatečná a metoda RANS je proto často využívaným nástrojem.

Pro metodu RANS byla postupně vyvinuta celá řada modelů turbulence lišících se výpočetní náročností a přesností. V praktických výpočtech v oboru techniky prostředí se nejčastěji uplatňují dvourovnicové modely turbulence.

Dvourovnicové $k-\varepsilon$ modely vycházejí z výpočtu turbulentní viskozity pomocí vztahu:

$$v_t = C \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

kde k je kinetická energie turbulence a ε je rychlost její disipace. Obě veličiny jsou určeny výpočtem parciálních diferenciálních rovnic.

Souhrn běžně využívaných modelů turbulence $k-\varepsilon$ uvádí např. Zhai et al. [5]. Základní $k-\varepsilon$ model (tzv. model $k-\varepsilon$ *Standard*) byl navržen Launderem a Spaldingem [6] a je vhodný pro proudění o vyšších hodnotách turbulentních Reynoldsových čísel. Model turbulence dle Yakhota a Orszaga [7] (tzv. model *RNG $k-\varepsilon$*) poskytuje o něco lepší výsledky při simulaci uzavřených prostor. Model turbulence dle Shiha et al. [8] (tzv. model $k-\varepsilon$ *Realizable*) je pak vhodný pro simulace prostředí s vířivým či konvekčním prouděním a pro simulace odtržení proudu.

Dalším typem dvourovnicových modelů jsou modely $k-\omega$, kde:

$$\omega = \frac{k}{\varepsilon} \quad (2)$$

Tyto modely vykazují větší přesnost pro výpočet turbulentního proudění u stěny s nepříznivým tlakovým spádem, jsou však méně robustní v oblastech úplavů a v případech proudění bez působení smykového napětí na stěně [5].

Je možné také využívat model turbulence dle Mentera [9] (tzv. model $k-\omega$ *SST*), který kombinuje model $k-\omega$ s modelem $k-\varepsilon$. Turbulence v blízkosti stěny je tak aproximována modelem $k-\omega$ a ve větší vzdálenosti (kde je smykové napětí vlivem stěny minimální) je využit pro danou oblast vhodnější model $k-\varepsilon$.

Při simulacích proudění v technice prostředí je vždy nutné uvážit řešenou problematiku, jelikož v současné době neexistuje žádný univerzální model turbulence. Je také nutné vzít v úvahu výpočetní náročnost jednotlivých modelů a požadovanou přesnost simulace.

GEOMETRIE VÝPOČETNÍCH MODELŮ

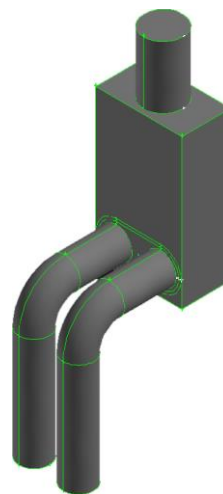
Základní geometrie zvolená pro tvorbu výpočetních modelů zdrojů tepla navazuje na předchozí práci

Koiše [10]. Ten na základě podkladů International Centre for Indoor Environment and Energy DTU v Lyngby zhotovil plechovou termální figurínu ve tvaru sedící osoby. Její geometrie se do jisté míry liší od tvaru lidského těla, takto zjednodušené modely osob jsou však při experimentech v technice prostředí využívány poměrně často [11]. Výsledky CFD simulace s modelem figuríny [12] mohou být využity jako základ pro tvorbu dalšího výpočetního modelu s vyšším stupněm zjednodušení.

Geometrie výpočetních úloh byla vytvořena v preprocesoru Gambit 2.4.6, objemové síťování bylo následně generováno v preprocesoru TGrid 13.0.10.

Model termální figuríny

Geometrie základního modelu je detailní kopií geometrie experimentální termální figuríny vytvořené Koišem [10] – obr. 3. Model figuríny tvoří prázdnou skořepinu. Jeho vnitřní objem není definován, výpočetní oblastí je pouze objem vzduchu obklopujícího figurínu. Úloha byla zasíťována pravidelnou sítí tvořenou šestistěny, pouze v geometricky složitějších místech byly generovány nepravidelné buňky (čtyřstěny, pětistěny). Model termální figuríny byl obklopen buňkami o hraně 12,5 mm, které postupně přecházely v buňky o hraně 25 mm a ve větší vzdálenosti pak v buňky o hraně 50 mm, které vyplňovaly zbývající prostor místnosti. Následně byla vytvořena zhuštěná síť v mezní vrstvě u povrchu modelu termální figuríny a u obvodových stěn místnosti. Podrobný popis tvorby geometrie a numerické sítě úlohy uvádí Zelenský [12]. Okrajové podmínky modelu termální figuríny byly uvažovány konstantní po celém povrchu. Byl nastaven jednotný měrný tepelný tok 57,30 W/m², tj. citelný tepelný výkon 90 W (shodný s výkonem termální figuríny použité v experimentu Borgese et al. [13], se kterým je tak možné výsledky úloh porovnávat). Z předchozích studií Zukowské et al. [14] je patrné, že zjednodušení geometrie termální figuríny by neměla mít na vzniklý konvekční proud významný vliv.



Obr. 3 – Model termální figuríny

CFD SIMULACE A ZPŮSOB VYHODNOCENÍ

S výpočetním modelem termální figuríny (viz obr. 3) byla provedena řada CFD simulací za účelem porovnání vlivu modelu turbulence na konvekční proudy vznikající nad zdrojem tepla. Úloha byla řešena s třemi modely turbulence typu $k-\varepsilon$ (*Standard*, *RNG* a *Realizable*) a s dvěma modely typu $k-\omega$ (*Standard* a *SST*). Výsledky jednotlivých úloh byly porovnány vzájemně a také s výsledky experimentálního měření provedeného Borgese et al. [13].

Dále byl řešen vliv metody propojení tlakového a rychlostního pole na výsledky simulace. Pro úlohu s modelem turbulence $k-\varepsilon$ *RNG* byla použita jak metoda segregovaného řešení tlakového a rychlostního pole (*SIMPLE*), tak metoda nesegregovaného řešení tlakového a rychlostního pole (*Coupled*) a výsledky byly vzájemně porovnány. Ostatní úlohy byly řešeny pouze metodou *SIMPLE*, která je výrazně rychlejší.

Výpočty všech úloh byly provedeny v programu Fluent 6.3.26. Úlohy byly řešeny pro neizotermické proudění nestlačitelného vzduchu s vlivem roztažnosti (tzv. Boussinesqova aproximace). Do řešení byl zahrnut model *S2S* pro vzájemné sálání povrchů. Okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby bylo možno výsledky všech simulací vzájemně porovnat. Povrchová teplota stěn místnosti byla 19°C , emisivita povrchu modelu termální figuríny byla 0,98 a emisivita povrchu stěn místnosti 0,94. Proudění u stěn a povrchů těles bylo řešeno výpočtem přes celou mezní vrstvu (tj. bez stěnových funkcí) a byl brán v úvahu vliv teploty a vzlaku na turbulenci. Pro výpočet gradientů veličin v jednotlivých buňkách byla použita rekonstrukce založená na metodě nejmenších čtverců, která bez vyšších nároků na výkon počítače zajišťuje dostatečnou přesnost výsledků na polyhedrálních numerických sítích. Pro diskretizaci rovnice tlaku bylo zvoleno schéma *Body Force Weighted* zohledňující vliv vzlakových sil a pro konvektivní členy řešených rovnic protiproudě schéma druhého řádu. Konvekční proudění bylo uvažováno jako neustálené.

Pro všechny úlohy s modelem termální figuríny bylo během každého časového kroku 0,1 s provedeno 10 iterací. Všechny úlohy byly spuštěny po dobu 480 s simulovaného času, po jejímž uplynutí bylo konvekční proudění považováno za vyvinuté a bylo přikročeno k záznamu výsledků. Ty byly zapisovány po dobu 120 s simulovaného času s krokem 1 s. Výsledkem simulací tedy bylo 120 datových souborů, z každého z nich byly získány hodnoty teploty a rychlosti ve stanovených bodech. Výsledné teplotní a rychlostní profily jsou aritmetickým průměrem za 120 s.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

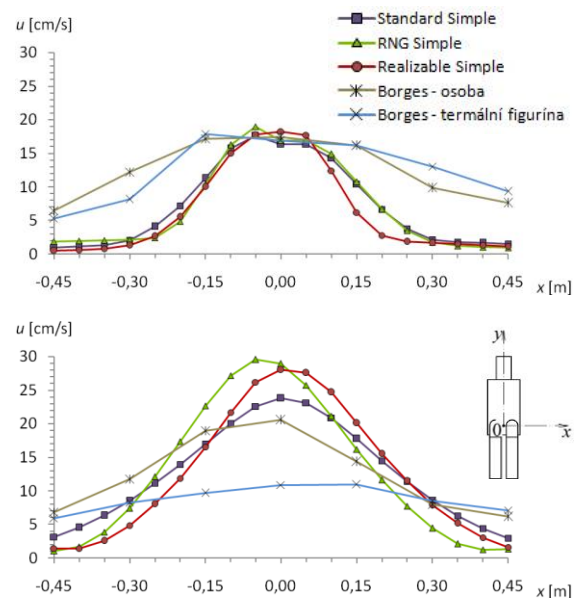
Všechny úlohy byly vyhodnoceny shodným způsobem a jejich výsledky vzájemně porovnány. Vyhodnocení výsledků bylo zaměřeno na vliv zvoleného modelu turbulence na vzniklý konvekční

proud. Byly porovnány profily rychlosti a teploty konvekčního proudu v několika stanovených výškách nad modelem termální figuríny. Dále byl řešen vliv algoritmu řešení tlakového a teplotního pole. Výsledky byly také porovnány s výsledky experimentu Borgese et al. [13], kteří měřili hodnoty rychlosti a teploty konvekčního proudu nad sedící osobou a nad sedící termální figurínou s reálnou geometrií.

Porovnání modelů turbulence

V obr. 4 jsou porovnány rychlostní profily konvekčních proudů nad modelem tepelného zdroje (termální figuríny) v úlohách s různými modely turbulence typu $k-\varepsilon$ (*Standard*, *RNG* a *Realizable*). Tyto profily byly pro jednotlivé úlohy stanoveny z dat získaných v definovaných bodech v několika výškách. Dále jsou zobrazeny výsledky v rovině symetrie figuríny $x-y$ (tj. souřadnice $z = 0$) ve výškách 0,225 m a 1,225 m nad hlavou modelu figuríny (tj. souřadnice $y = 0,975$ m a $y = 1,975$ m).

Z grafů rychlosti je patrná jistá odlišnost konvekčních proudů v jednotlivých úlohách. Výrazně se liší především konvekční proud v úloze s modelem turbulence *Standard* $k-\varepsilon$ a to hlavně ve vyšších výškách. V bezprostřední blízkosti modelu zdroje tepla se konvekční proud v této úloze blíží konvekčním proudům v úlohách s modely turbulence *RNG* $k-\varepsilon$ a *Realizable* $k-\varepsilon$, s rostoucí výškou se však rychleji rozšiřuje a jeho osová rychlost je nižší.



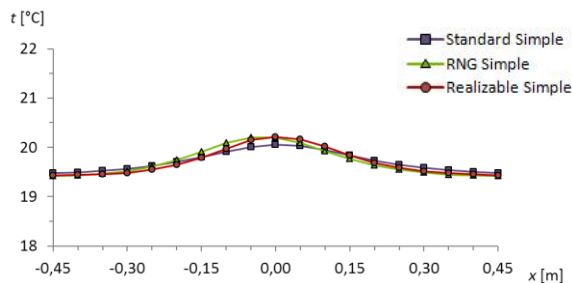
Obr. 4 – Rychlostní profily v rovině $x-y$, výška $y = 0,975$ m (horní) a $y = 1,975$ m (spodní)

Rychlosti konvekčních proudů v úlohách s modelem turbulence *RNG* $k-\varepsilon$ a *Realizable* $k-\varepsilon$ se poměrně dobře shodují, rychlostní profily jsou nicméně osově posunuty, viz obr. 4, $y = 1,975$ m. Rychlostní profil získaný s modelem *RNG* $k-\varepsilon$ vykazuje překvapivě asymetrii, jejíž důvody jsou zatím nejasné. Jedním z nich by mohla být pomalejší

oscilace nebo větší amplituda kolísání konvekčního proudu v simulaci s *RNG k-ε* modelem. Další možností může být tendence konvekčního proudu k vychýlení na jednu stranu. Podobné asymetrie proudění byly zaznamenány i v experimentech [14].

Rychlostní profily v rovině ramen (tj. rovině *x-y*) byly porovnány s experimentem Borgese et al. [13]. Autoři měřili hodnoty rychlosti a teploty konvekčního proudu nad sedící osobou a nad sedící termální figurínou. Je patrné, že při experimentálním měření byly konvekční proudy vzniklé nad osobou a nad detailní termální figurínou širší, než konvekční proudy vznikající v simulacích se všemi použitými modely turbulence. Ve vyšších výškách (v oblasti vyvinutého proudění) měly navíc nižší rychlost v ose proudu. To mohlo být způsobeno odlišnými vlastnostmi povrchu výpočetního modelu termální figuríny. Borges et al. měřili konvekční proudy nad oblečenou osobou a oblečenou termální figurínou. Složitější geometrie, záhyby šatů a jejich hrubý povrch mohou mít za následek větší intenzitu turbulence v konvekčním proudu, čímž je způsobeno intenzivnější směšování s okolním vzduchem. Vzniklý konvekční proud je tedy ve stejné výšce širší a má menší osovou rychlost. Vhodným řešením by mohlo být přesnější předepsání drsnosti povrchu modelu termální figuríny.

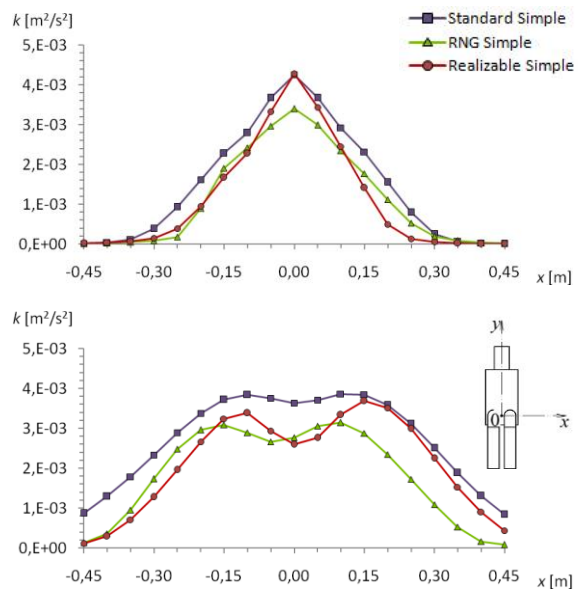
Zaznamenané profily teploty (viz např. obr. 5) se velmi dobře shodovaly ve všech vyhodnocených výškách (až na mírnou asymetrii profilu získaného s modelem *RNG k-ε*). Je tedy patrné, že model turbulence výrazně neovlivňuje teplotní profil konvekčního proudu.



Obr. 5 – Teplotní profily v rovině *x-y*, $y = 1,975$ m

Dále byly porovnány profily kinetické energie turbulence v úlohách s modely turbulence typu *k-ε* (*Standard*, *RNG* a *Realizable*), viz obr. 6. Z výsledků je patrné, že model turbulence *Standard k-ε* vykazuje nejintenzivnější strhávání okolního vzduchu do konvekčního proudu, protože vyšší hodnota kinetické energie turbulence naznačuje větší flukтуаční rychlosti. V souladu s tím je turbulentní proud v této úloze širší, než v ostatních případech, což je patrné i z obr. 4. Naopak nejmenší strhávání okolního vzduchu predikuje model *k-ε RNG*.

V rámci přípravy tohoto příspěvku byly spuštěny také simulace s modely turbulence *k-ω*. Nicméně řešení úlohy s využitím těchto modelů turbulence bylo velmi nestabilní a nepodařilo se dosáhnout konvergence.

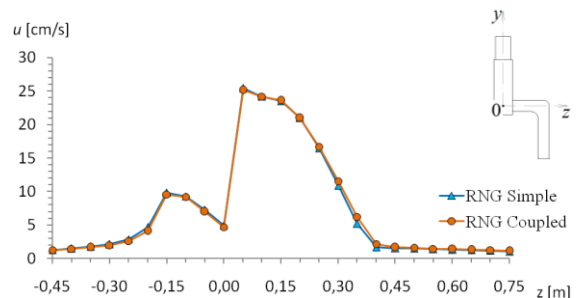


Obr. 6 – Profily kinetické energie turbulence v rovině *x-y*, výška $y = 0,975$ m (horní) a $y = 1,975$ m (spodní)

Porovnání metod *SIMPLE* a *Coupled*

V obr. 7 jsou porovnány rychlostní profily konvekčních proudů úloh s modelem turbulence *k-ε RNG* a dvěma přístupy k řešení tlakových a rychlostních polí – *SIMPLE* a *Coupled*. Pro názornost jsou uvedeny rychlostní profily v rovině symetrie figuríny *y-z* (tj. souřadnice $x = 0$) ve výšce 0,025 m nad hlavou modelu figuríny (tj. souřadnice $y = 0,775$ m), které měly nejsložitější průběh ze všech zaznamenaných profilů.

Z porovnání všech zaznamenaných rychlostních profilů konvekčních proudů byla patrná velmi dobrá shoda výsledků úlohy řešené metodou *SIMPLE* s výsledky úlohy řešené metodou *Coupled* (stejně jako v obr. 7). To samé platí i pro teplotní profily konvekčního proudu, které se shodovaly ve všech vyhodnocených výškách.



Obr. 7 – Rychlostní profily v rovině *y-z*, $y = 0,775$ m

ZÁVĚR

Prezentované výsledky jsou součástí probíhajícího výzkumu, a budou proto využity jako východisko pro další zpřesňující studie.

Byly porovnány profily rychlosti, teploty a kinetické energie turbulence v konvekčních proudech nad modelem zdroje tepla (sedící osoby)

s využitím vybraných modelů turbulence. Z výsledků porovnání je patrné, že zvolený model turbulence má vliv především na rozšiřování proudu a pokles jeho osových rychlostí. Teplotní profil konvekčního proudu není volbou modelu turbulence výrazně ovlivněn.

Dále byly porovnány metody pro propojení rychlostního a tlakového pole *SIMPLE* a *Coupled*. Volba metody nemá na vzniklý konvekční proud významný vliv a při výpočtu by tedy vždy měl být zvolen takový postup, aby byla zajištěna konvergence simulace v co nejkratší době.

Z porovnání získaných rychlostních profilů s měřeními Borgese et al. [13] je patrná výrazná odchylka výsledků simulací od naměřených hodnot. To mohlo být způsobeno odlišnými vlastnostmi povrchu výpočetního modelu termální figuríny, u kterého nebyly uvažovány povrchové vlastnosti oblečení.

Získané poznatky budou využity při výpočtech simulací s detailními modely zdrojů tepla, jejichž výsledky poslouží jako základ pro nově navrženou metodu nahrazení zdroje tepla okrajovou podmínkou [2]. Konvekční proudy stoupající nad zdroji tepla v těchto detailních úlohách by měly být co nejlépe vystiženy a volba vhodného modelu turbulence je jedním z faktorů, které je nutné brát v úvahu.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla finančně podpořena grantem ČVUT v Praze č. SGS12/179/OHK2/3T/12.

LITERATURA

- [1] Bradshaw, P.; Huang, P.G. The law of the wall in turbulent flow. *Proceedings of the Royal Society London A*, vol. 451. pp. 165 – 188. London, UK, 1995.
- [2] Zelenský, P.; Barták, M.; Hensen, J. Model sedící osoby jako zdroje tepla ve vnitřním prostředí. *Vytápění, větrání, instalace*, vol. 5, pp. 22–26, 2012.
- [3] Zbořil, V., Melikov, A., Yordanova, B., Bozhkov, L., & Kosonen, R. Airflow Distribution in Rooms with Active Chilled Beams. *Proceedings of the 10th International Conf. on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007*, pp. 1–7, Helsinki, Finland, 2007.
- [4] Xing, H.; Hatton, A.; Awbi, H.B. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation. *Building and Environment*, vol. 36, no. 7, pp. 809–820
- [5] Zhai, Z.J.; Zhang, Z.; Zhang, W.; Yan, Q. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1 — Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*, vol. 13, no. 6, pp. 853–870, 2007.
- [6] Launder, B.E.; Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer*

Methods in Applied Mechanics and Energy, no. 3, pp. 269–289, 1974.

- [7] Yakhot, V.; Orszag, S.A. Renormalization group analysis of turbulence. *Journal of Scientific Computing*, vol. 1, pp. 3–51, 1986.
- [8] Shih, T.; Liou, W.; Shabbir, A.; Yang, Z.; Zhu, J. A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, vol. 24, pp. 227–238.
- [9] Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, vol. 32, pp. 1598–1605, 1994.
- [10] Koiš, G. *Analýza proudů v klimatizovaném prostoru*. ČVUT Praha, Fakulta strojní, 2009.
- [14] Zukowska, D., Melikov, A., Popiolek, Z. Thermal plume above a simulated sitting person with different complexity of body geometry. *Proceedings of the 10th International Conf. on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007*. Helsinki, Finsko, č. 3, s. 191-198.
- [12] Zelenský, P. *Modelování zdrojů tepla ve vnitřním prostředí* [diplomová práce]. ČVUT Praha, Fakulta strojní, 2011.
- [13] Borges, C.P.; Quintela, D.A.; Brites, G.N.; Gaspar, A.R.; Costa, J.J. Analysis of thermal plumes generated by a seated person, a thermal manikin and a dummy. *Proceedings of the 8th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007*, pp. 253–256, Helsinki, Finland, 2007.
- [14] Zukowska, D., Melikov, A., Popiolek, Z. Impact of boundary conditions on the development of the thermal plume above a sitting human body. *Proceedings of the 10th REHVA World Congress „Sustainable Energy Use in Buildings“ – Clima 2010*. Antalya, Turkey. pp. 2–7, 2010.

PŘEHLED OZNAČENÍ

k	kinetická energie turbulence [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]
ε	rychlost disipace kinetické energie turb. [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
ν	kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
x	souřadnice polohy [m]
y	souřadnice polohy [m]
z	souřadnice polohy [m]