

Ing. Petr ZELENSKÝ,
Ing. Martin BARTÁK, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí
Prof. Dr. Ir. Jan HENSEN
Eindhoven University of Technology,
Building Physics and Services



Ústav techniky prostředí

Model sedící osoby jako zdroje tepla ve vnitřním prostředí

Model of a Sitting Person Acting as a Heat Source in the Indoor Environment

Recenzent
prof. Ing. František Drkal, CSc.

Konvekční proudy, které se vyvíjejí na zdrojích tepla, jakými jsou např. lidé, uvnitř větraných a klimatizovaných místností, mohou výrazně ovlivnit proudění, jejich hybnost je srovnatelná s hybností proudů vzduchu přiváděného VZT systémy do pásma pobytu osob. Účinný odvod tepelných zisků od těchto zdrojů tepla může přispět k úspoře energie potřebné na chlazení a pohon ventilátorů. Při navrhování a optimalizaci distribuce vzduchu v místnostech lze využít simulace metodou počítačové mechaniky tekutin (CFD). Předpokladem ovšem je dostatečná spolehlivost výpočtů (tzn. realistické výsledky), zároveň však dostatečná rychlost zpracování, která umožní porovnat variantní řešení. Proto je důležité zabývat se zjednodušenou reprezentací vnitřních zdrojů tepla. Příspěvek je věnován modelování účinků konvekčního proudu nad sedící osobou na obraz proudění v uzavřeném prostoru metodou CFD. Cílem je navrhnout a otestovat nový způsob zjednodušení numerického modelu zdroje tepla tak, aby byla podstatně snížena výpočetní a časová náročnost CFD simulace, a to bez výrazného ovlivnění přesnosti výsledků. Řešení je založeno na náhradě zdroje tepla (termální figuríny) jednoduchou okrajovou podmínkou. Toto zjednodušení je provedeno ve třech variantách a výsledky simulací se všemi použitými modely jsou navzájem porovnány.

Klíčová slova: vnitřní zdroj tepla, sedící osoba, zjednodušené modelování, CFD

Heat plumes generated by heat sources, such as people, in ventilated and air-conditioned rooms may have a significant influence on the indoor air flow pattern; their momentum is comparable with that of air flow supplied by ventilation systems into occupied areas. Effective removal of heat gains can contribute to the reduction of energy need for cooling or mechanical ventilation. Computational fluid dynamics (CFD) simulations can be used in design and optimization of air distribution in rooms, providing that the computations are reliable (i.e. giving realistic results) and at the same time fast enough to enable comparison of alternative system solutions. This is why it is important to pay attention to simplified representation of indoor heat sources. The paper deals with CFD modeling of a heat plume generated by a person sitting in a confined space. The aim is to propose and test a new approach to simplified numerical modeling of heat sources, in order to reduce substantially the requirements for computing power and time without a significant influence on the results accuracy. The solution is based on the replacement of a heat source (thermal manikin in the current case) by a simple boundary condition. This simplification is elaborated in three variants and the results from simulations performed with all models are mutually compared.

Keywords: indoor heat source, sitting person, simplified modeling, CFD

ÚVOD

Každé zlepšení kvality vnitřního prostředí může pozitivně ovlivnit produktivitu práce, snižovat nemocnost, zvyšovat celkovou psychickou pohodu osob apod. Důležitým hlediskem při optimalizaci VZT systémů je také dosažení energetických úspor. Ve vnitřním prostředí však existují složité interakce znesnadňující předpověď účinku různých variant návrhu distribuce vzduchu. Jedním z nástrojů, které pomáhají tento problém řešit, jsou CFD simulace. Ty umožňují uvažovat vnitřní prostředí zároveň detailně i komplexně a díky tomu skryté interakce lépe poznat a pochopit. V současnosti je však jejich širší použití omezeno stále ještě nedostatečnou kapacitou dostupné výpočetní techniky – proto je často nutné přistupovat při simulacích k výraznému zjednodušení skutečnosti.

Častým zdrojem tepla ve vnitřních prostorech jsou osoby – jejich tepelný výkon není možné snižovat a např. v kancelářských budovách jejich podíl na vnitřních tepelných ziscích roste. Konvekční proud nad tělesem je výsledkem přestupu tepla z celého povrchu tohoto tělesa. Povrch lidského těla má poměrně složitou geometrii a jeho 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 byl nejprve vytvořen podrobný výpočetní model termální figuríny s konstantní hustotou tepelného toku uvolňovaného z jejího povrchu. S tímto modelem byla provedena simulace se zaměřením na vyvolané konvekční proudění v uzavřené místnosti. Na základě výsledků detailní úlohy byly určeny profily rychlosti

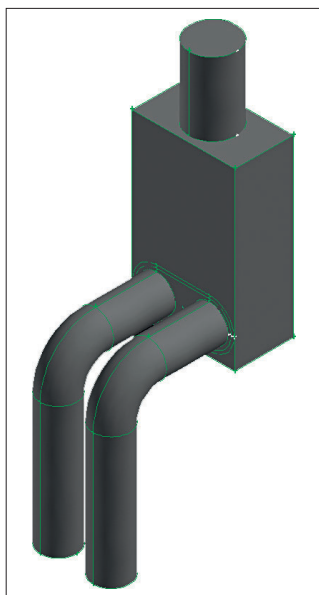
a teploty stoupajícího konvekčního proudu ve třech výškách, které byly následně využity pro umělé vyvolání konvekčního proudu nad náhradním geometricky zjednodušeným tělesem, které již nebylo zdrojem tepla (tj. konvekční proud nevznikal ohřevem vzduchu na povrchu tohoto tělesa).

POUŽITÉ MODELY

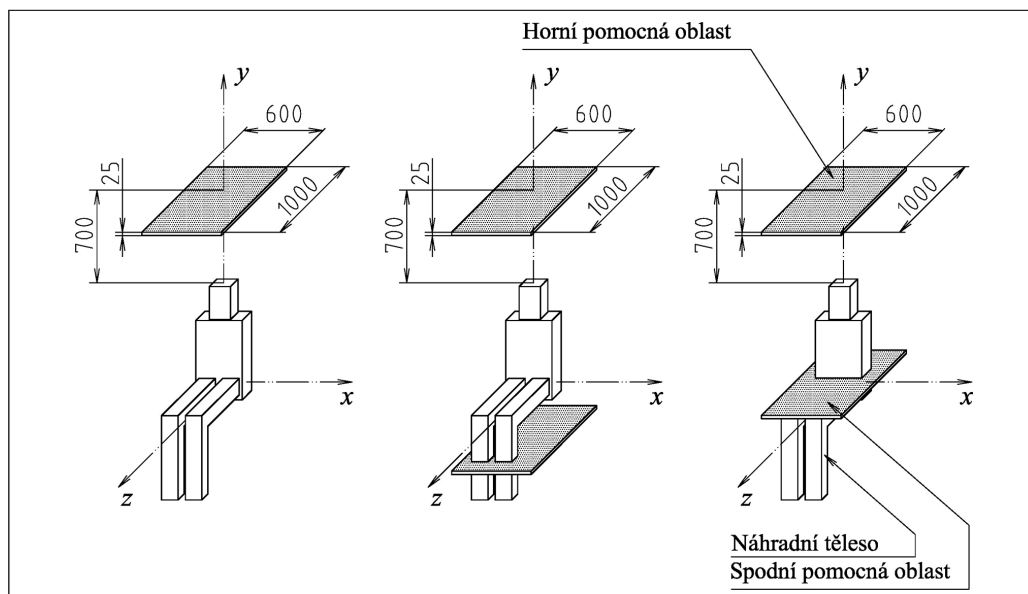
Základní geometrie, která byla zvolena pro tvorbu zjednodušených výpočetních modelů sedící osoby, navazuje na předchozí práci Koiše [1]. Ten na základě podkladů International Centre for Indoor Environment and Energy DTU v Lyngby zhotovil plechovou termální figurínu. Její geometrie se do jisté míry liší od tvaru lidského těla, takto zjednodušené modely osob jsou však při experimentech v technice prostředí využívány poměrně často. Výsledky CFD simulace s modelem figuríny [2] byly využity jako základ pro tvorbu dalších výpočetních modelů 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. Byly vytvořeny čtyři výpočetní modely sedící osoby: model termální figuríny, model s nahrazením zdroje tepla jednoduchou okrajovou podmínkou a dva modely s nahrazením zdroje tepla dvěma jednoduchými okrajovými podmínkami (v různém uspořádání).

Model termální figuríny tvoří prázdnou skořepinu. Jeho vnitřní objem není definován, výpočetní oblastí je pouze objem vzduchu obklopujícího figurínu.



Obr. 1 – Model termální figuríny



Obr. 2 – Umístění pomocných oblastí

nu. Ten je rozdělen na síť buněk se zhuštěnou mezní vrstvou u obvodových stěn místnosti a u povrchu modelu (pouze v případě úlohy s modelem termální figuríny).

Model termální figuríny byl umístěn uprostřed místnosti o půdorysných rozměrech $4,5 \times 4,5$ m a výšce 3 m tak, že se jeho nohy nedotýkaly podlahy (byly 100 mm nad podlahu). Tato poloha modelu v prostoru umožňuje vytvořit rozdílné zhuštěné vrstvy výpočetních buněk na povrchu modelu figuríny a na povrchu stěn místnosti. Zhuštění na stěnách místnosti mohlo být vytvořeno s menším počtem vrstev a byl tak výrazně snížen celkový počet výpočetních buněk.

Model termální figuríny

Geometrie základního modelu je detailní kopií geometrie experimentální termální figuríny vytvořené Koišem [1] – obr. 1. 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 numerické sítě uvádí Zelenský [2]. Okrajové podmínky výpočetního modelu termální figuríny byly uvažovány konstantní po celém povrchu. Byl nastaven jednotný měrný tepelný tok $57,30 \text{ W/m}^2$, tj. citelný tepelný výkon 90 W (shodný s výkonem termální figuríny použité v experimentu Borgese [3] se kterým je tak možné výsledky úloh porovnávat).

Nahrazení zdroje tepla jednoduchými okrajovými podmínkami

Stoupající konvekční proud je v těchto úlohách vyvolán rychlostními a teplotními profily vnesenými na hranice pomocných oblastí vytvořených ve třech výškách v místě původního modelu termální figuríny. Byly řešeny tři výpočetní úlohy s různým uspořádáním pomocných oblastí, viz obr. 2. Kvůli tvarové podobnosti s krabicí na pizzu je v dalším textu použito pro pomocnou oblast označení *pizza-box*. V nejjednodušší úloze byla vytvořena jedna taková oblast ve výšce 700 mm nad modelem. Další dvě úlohy byly řešeny s dvěma *pizza-boxy*, na jejichž hranicích byly vyneseny rychlostní a teplotní profily. Horní *pizza-box* byl stejně jako v předešlé úloze vytvořen

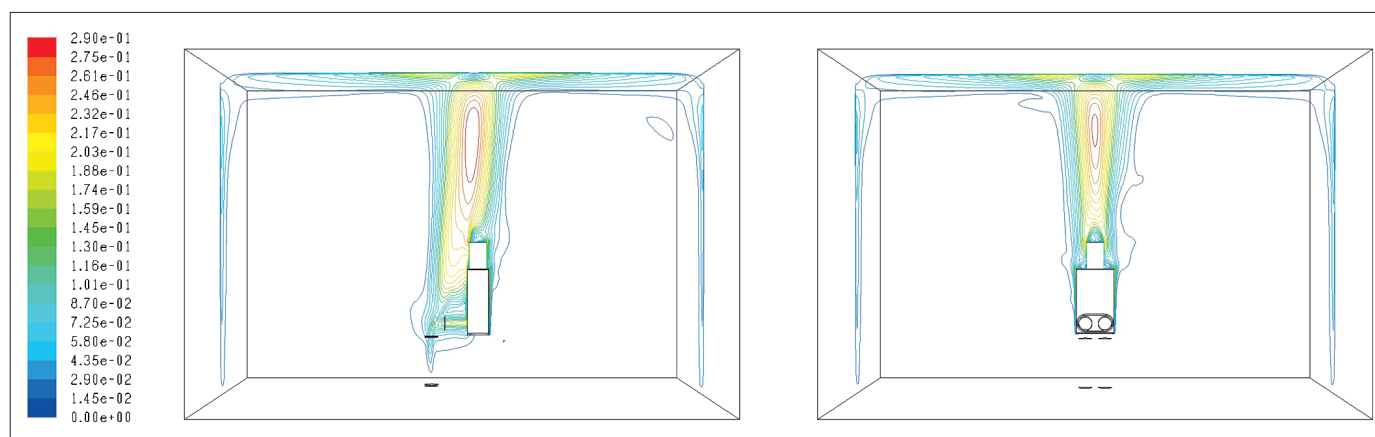
700 mm nad modelem. Spodní byl v první úloze umístěn do úrovně lýtka termální figuríny a ve druhé úloze do úrovně pasu. Proud vystupující z nižších pomocných oblastí obtékal těleso nahrazující termální figurínu a následně vstupoval do pomocných oblastí nad ním.

Původní model zdroje tepla (tj. model termální figuríny) byl nahrazen značně zjednodušeným tělesem, jehož povrch byl adiabatický a válcové plochy nohou a hlavy byly nahrazeny opsanými kvádry. Působí pouze jako překážka proudění vzduchu ve vnitřním prostoru a se svým okolím nesdílí teplo. To přináší řadu výhod především při tvorbě výpočetní sítě – není nutné vytvářet zhuštěnou mezní vrstvu u povrchu modelu tělesa, velikost buněk obklopující objemové sítě může být větší, zanedbání zakřivených ploch zjednodušuje vytvoření hexagonální sítě atd.

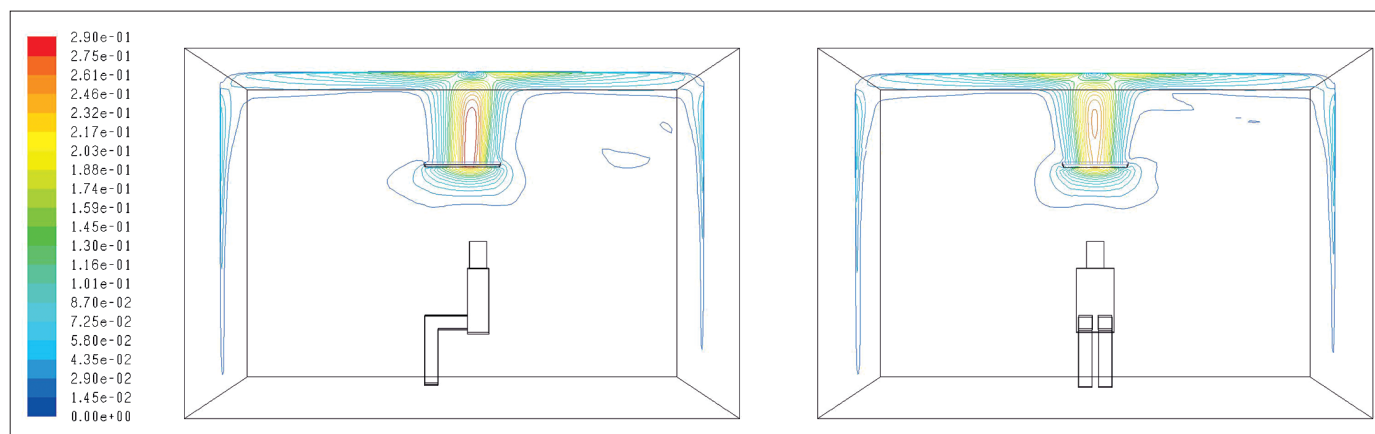
Rychlostní a teplotní profily konvekčního proudění byly stanoveny na základě simulace s termální figurínou. Ve třech výškách (v úrovni lýtka, v úrovni pasu a 700 mm nad hlavou termální figuríny) byl v oblasti 1000×600 mm vytvořen vodorovný čtvercový rastr bodů s roztečí 50 mm (tj. celkem 240 bodů). V těchto bodech byly zaznamenány hodnoty složek rychlosti u_x , u_y , u_z , teploty T a hodnoty parametrů turbulence k a ε jako aritmetický průměr 120 hodnot zjištěných během 120 s výpočetního času, viz níže. Získané profily teploty a rychlosti byly vloženy do výpočetní úlohy a předepsány jako okrajové podmínky horního a spodního povrchu *pizza-boxu*, kdy na jeho spodku proudění směřovalo do pomocné oblasti a na vrchu z ní vystupovalo.

CFD SIMULACE A ZPŮSOB VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

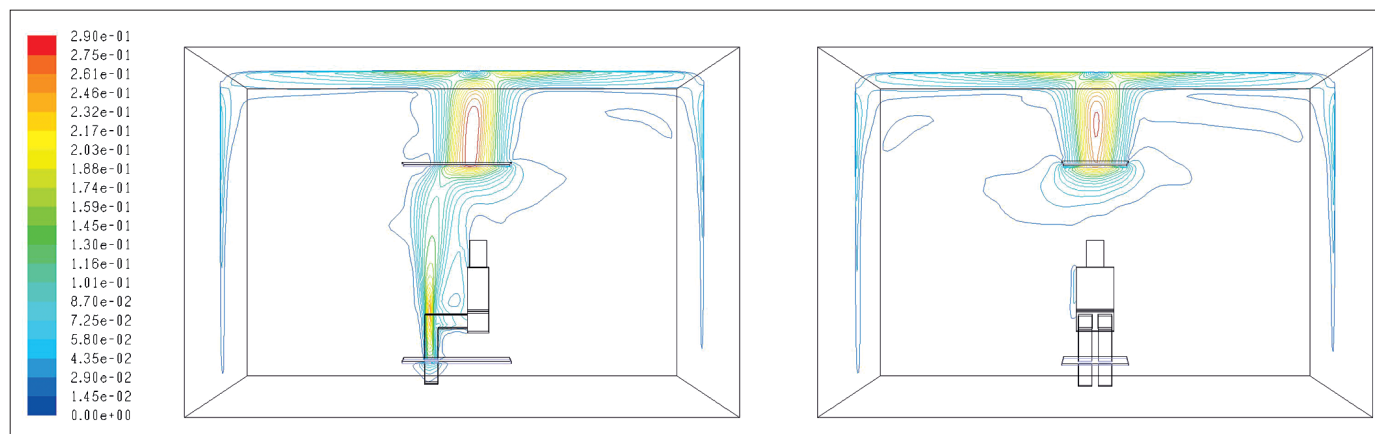
Výpočty metodou CFD byly provedeny v programu Fluent 6.3.26. Úlohy byly řešeny pro neizotermické proudění nestlačitelného vzduchu s vlivem roztažnosti (tzv. Boussinesqova aproximace). Okrajové podmínky byly nastaveny tak, aby bylo možno výsledky všech simulací vzájemně porovnat. Povrchová teplota stěn místnosti byla 19°C , emisivita povrchu modelu termální figuríny byla 0,98 a emisivita povrchu stěn místnosti 0,94. Byl použit dvourovnicový model turbulence typu $k-\varepsilon$ podle Shiha et al. [4]. 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 vztahu na turbulenci. Do řešení byl zahrnut model S2S pro vzájemné sálání povrchů. 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



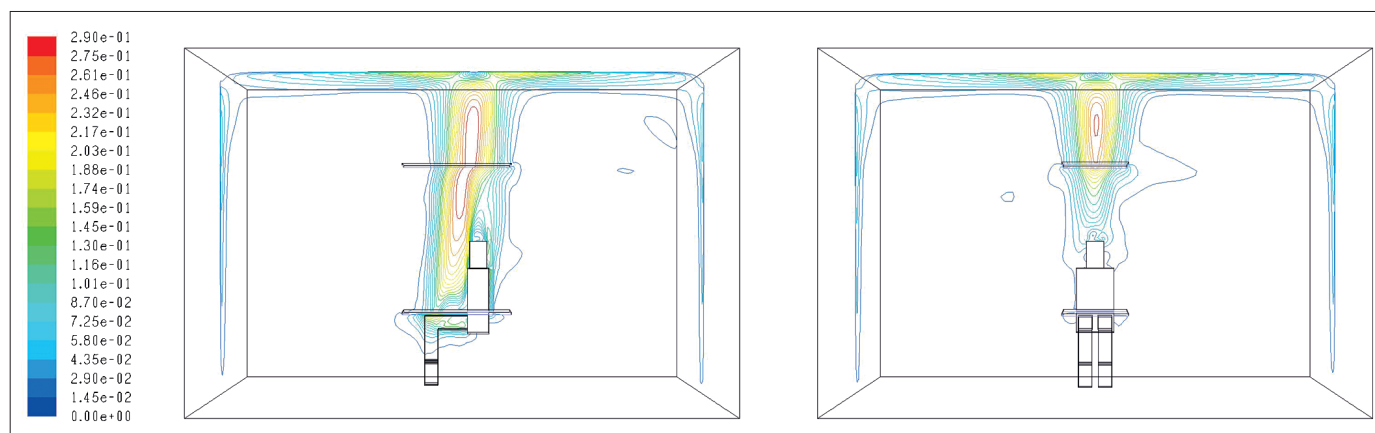
Obr. 3 – Isoplochy rychlosti [m/s], model termální figuríny – referenční úloha



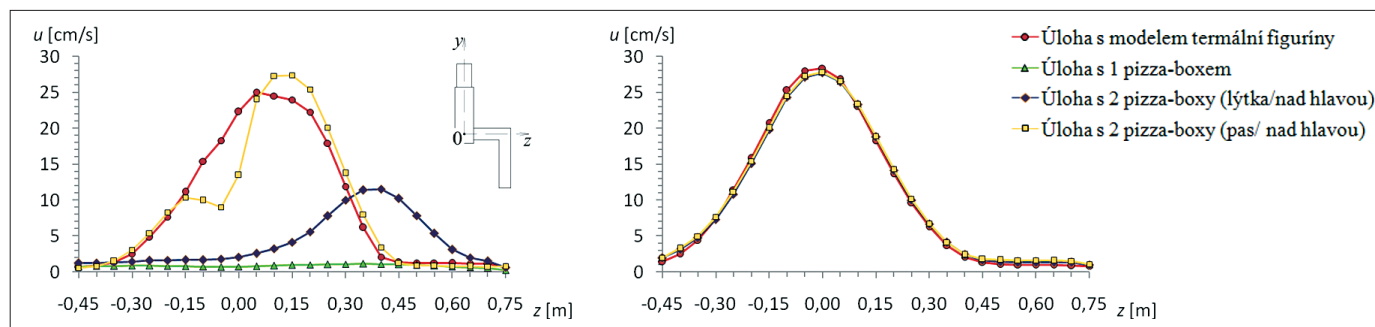
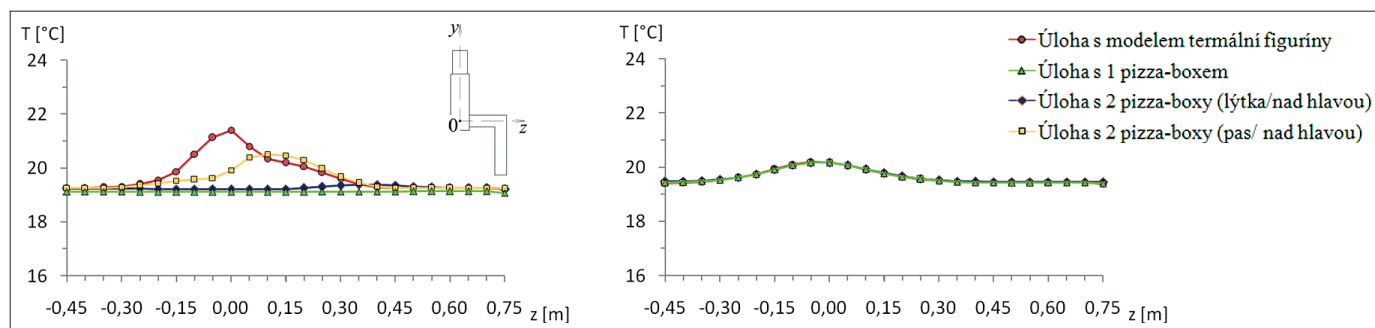
Obr. 4 – Isoplochy rychlosti [m/s], úloha s jedním pizza-boxem



Obr. 5 – Isoplochy rychlosti [m/s], úloha s dvěma pizza-boxy (lýtka/nad hlavou)



Obr. 6 – Isoplochy rychlosti [m/s], úloha s dvěma pizza-boxy (pas/nad hlavou)


Obr. 7 – Rychlostní profily v rovině y-z, výška $y = 0,975$ m (vlevo) a $y = 1,975$ m (vpravo)

Obr. 8 – Teplotní profily v rovině y-z, výška $y = 0,975$ m (vlevo) a $y = 1,975$ m (vpravo)

tlaku bylo zvoleno schéma *Body Force Weighted* zohledňující vliv vztahových sil a pro konvektivní členy řešených rovnic protiproudé schéma druhého řádu. Pro propojení tlakového a rychlostního pole byla použita metoda *SIMPLE*. Konvekční proudění bylo uvažováno jako neustálené. Pro případ úlohy s modelem termální figuríny bylo během každého časového kroku 0,1 s provedeno 7 iterací, pro případ úloh s *pizza-boxy* to bylo 10 iterací na časový krok 0,2 s.

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. Pro každou výpočetní úlohu byly také v čase 600 s (tj. ukončení simulace, kdy můžeme uvažovat proudění za nejvíce vyvinuté) generovány obrazy proudění (isoplochy rychlosti) v rovinách x-y a z-y procházejících středem termální figuríny.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Všechny úlohy byly vyhodnoceny shodným způsobem a jejich výsledky vzájemně porovnány. Hodnocení výsledků bylo zaměřeno na ovlivnění proudění způsobené náhradou zdroje tepla zjednodušenou okrajovou podmínkou a na vliv umístění pomocné oblasti na výsledek simulací (tj. na rozdíly výsledků úloh s různým uspořádáním *pizza-boxů*).

Obrazy rychlostního pole

Z každé úlohy byly získány předpokládané obrazy rychlostního pole ve vnitřním prostoru. Isoplochy rychlosti zaznamenané ve svislých rovinách x-y (čelní pohled) a y-z (boční pohled) procházejících středem modelu termální figuríny jsou zobrazeny na obr. 3 až obr. 6. Obrazy proudění získané z úloh s nahrazením zdroje tepla *pizza-boxy* byly porovnány s úlohou s modelem figuríny, která byla brána jako referenční (na základě této úlohy byly definovány jednoduché okrajové podmínky).

Na obrázcích je zřetelná velmi dobrá podobnost stoupajících konvekčních proudů jednotlivých úloh převážně v úrovni nad horní pomocnou oblastí. Je také patrná dobrá shoda přilnutí konvekčního proudu ke stropu místnosti a jeho dalšího šíření až ke svislým stěnám.

Pod horní pomocnou oblastí se tvar konvekčního proudu v jednotlivých úlohách značně liší. V úloze s jedním *pizza-boxem* není v okolí figuríny konvekční proud zformován. Tato nepřesnost navrženého způsobu zjednodušení byla řešena umístěním další pomocné oblasti do menší výšky nad podlahou místnosti.

V úloze s druhým *pizza-boxem* umístěným v úrovni lýtek (viz obr. 5) je proudění pod horní pomocnou oblastí zformováno, značně se však liší od referenčního proudění (úloha s termální figurínou). Konvekční proud vyvolaný zjednodušenou okrajovou podmínkou stoupá pouze nad koleno termální figuríny a nepřilne k povrchu jejího těla. V oblasti nad hlavou je proudění slabé a v oblasti zad k proudění nedochází. Nejvíce se referenčnímu konvekčnímu proudu blíží úloha s druhým *pizza-boxem* umístěným v úrovni pasu (viz obr. 6), kde proud stoupá v oblasti nad stehny a je odpovídajícím způsobem přilnut k povrchu modelu termální figuríny. Nedostatkem v tomto případě je málo intenzivní konvekční proudění podél zad, které by po spojení s prouděním nad stehny zakřivilo výsledný konvekční proud více nad hlavu termální figuríny (směrem k zádům). Ze zobrazených isoploch rychlosti je patrné, že umístění spodní pomocné oblasti má výrazný vliv na výsledek úlohy.

Rychlostní profily

Výše uvedené obrazy rychlostního pole poskytují předběžný náhled na výsledky simulace. Pro přesnější posouzení lze porovnat rychlostní a teplotní profily konvekčních proudů nad modelem tepelného zdroje. Tyto profily byly pro jednotlivé úlohy stanoveny z dat získaných v definovaných bodech v několika výškách, dále jsou zobrazeny výsledky v rovině symetrie figuríny y-z (tj. souřadnice $x = 0$) ve výškách 0,225 m a 1,225 m nad figurínou.

Z porovnání získaných rychlostních profilů konvekčních proudů je patrná jejich dobrá shoda ve vyšších výškách, viz obr. 7. V nižších polohách (pod

horní pomocnou oblastí) se referenčnímu konvekčnímu proudění nejvíce blíží proudění z úlohy s dvěma *pizza-boxy*, z nichž spodní je umístěn v úrovni pasu. Proud je však negativně ovlivněn nedostatečným prouděním podél zad termální figuríny. Nad stehny figuríny tak vzniká konvekční proudění o vyšších rychlostech, nad hlavou je naopak rychlost proudění nižší.

V úloze s dvěma *pizza-boxy*, z nichž spodní je v úrovni lýtek, dochází k výraznému konvekčnímu proudění nad koleno (rychlost proudu je vyšší než v referenční úloze), v oblasti nad tělem je však proudění nedostatečné. V úloze s jedním *pizza-boxem* není konvekční proudění pod pomocnou oblastí vyvinuté – v nižších výškách proudění nevzniká vůbec, v blízkosti spodní hranice pomocné oblasti je pak rychlostní profil širší – vstup do oblasti se chová jako sací otvor.

Teplotní profily

Teplotní profily konvekčních proudů v jednotlivých výpočetních úlohách se v úrovni nad horní pomocnou oblastí ve velké míře shodují, viz obr. 8. V nižších výškách se však opět projevuje nepřesnost uměle vyvolaného proudění. Referenčnímu teplotnímu profilu se nejvíce blíží profil z úlohy s dvěma *pizza-boxy*, z nichž spodní je v úrovni pasu. I ten je však poměrně dost zkreslený.

Náročnost výpočtu

V tab. 1 jsou shrnuty celkové počty buněk výpočetních sítí jednotlivých úloh a výpočetní časy potřebné pro 10 iterací. Všechny úlohy byly při testovacích výpočtech nastaveny shodně. Proudění bylo považováno za neustálé a byl zvolen časový krok 0,1 s simulovaného času, během něhož proběhlo 10 iterací. Testování všech úloh bylo provedeno na počítači s 8 CPU AMD Opteron 8378 (frekvence 2,4 GHz) a 128 GB operační paměti. Ze zjištěných hodnot je patrná výhoda nahrazení zdroje tepla jednoduchou okrajovou podmínkou – „velikost“ úlohy i výpočetní doba jsou v porovnání s úlohou s termální figurínou méně než poloviční.

Tab.1 – Počet výpočetních buněk a výpočetní čas pro jednotlivé varianty

Úloha	Počet výpočetních buněk	Výpočetní čas pro 10 iterací
s 1 <i>pizza-boxem</i>	1 469 837	45 s
s 2 <i>pizza-boxy</i> (nohy/nad hlavou)	1 548 459	51 s
s 2 <i>pizza-boxy</i> (pas/nad hlavou)	1 538 362	51 s
model termální figuríny	3 569 984	130 s

ZÁVĚR

Byly vytvořeny čtyři výpočetní modely sedící osoby ve třech stupních zjednodušení. Prvním stupněm bylo vytvoření modelu termální figuríny, druhým bylo nahrazení zdroje tepla jednoduchou okrajovou podmínkou v podobě teplotního a rychlostního profilu nad figurínou, a třetím stupněm bylo doplnění další okrajové podmínky do nižší výšky (tj. nahrazení zdroje tepla dvěma jednoduchými okrajovými podmínkami). Se všemi modely byla provedena řada CFD simulací, jejichž výsledky byly vzájemně porovnány. Zvláštní důraz byl kladen na vyhodnocení konvekčních proudů a jejich teplotní a rychlostní profily.

Navržený způsob náhrady zdroje tepla jednoduchými okrajovými podmínkami vyneseny na pomocných oblastech v místech původního konvekčního proudu (náhrada *pizza-boxy*) by v popsáních uspořádáních bylo možné využít při zkoumání vlivu vnitřních zdrojů tepla zejména na proudě-

ní ve větších výškách místnosti, kde konvekční proudy ve zjednodušených úlohách odpovídají referenčnímu proudu. Zjednodušení by tak mohlo být aplikováno například při studiích vlivu vnitřních zdrojů tepla na proudy ze vzduchotechnických výustek umístěných u stropu, vířivých anemostatů apod.

V nižších výškách (pod horní pomocnou oblastí, kolem tělesa nahrazujícího zdroj tepla) se konvekční proudy v jednotlivých úlohách značně liší. Referenčnímu proudu se nejvíce blíží konvekční proudění v úloze se spodní pomocnou oblastí umístěnou v úrovni pasu, nicméně i zde je patrná jistá nepřesnost. Po dalších úpravách by však navržený způsob zjednodušení mohl umožnit efektivnější simulaci prostor s výskytem vnitřních zdrojů tepla a to s omezeným vlivem zjednodušení na přesnost výsledků.

Z porovnání výpočetních časů jednotlivých simulací je patrný rychlejší průběh iteračních výpočtů zjednodušených úloh (úloh s *pizza-boxy*). Navržené řešení by tak mohlo být velkým přínosem v CFD simulacích prostor s velkým množstvím tepelných zdrojů. Pro případ osob můžeme zmínit prostory divadelních sálů, přednáškových a zasedacích místností, sportovních hal apod. Vzhledem k dostupným výpočetním kapacitám není zatím možné v takových simulacích detailně modelovat všechny zdroje tepla, je však nutné uvažovat interakce konvekčních proudů, které nad nimi vznikají, což navržená metoda zjednodušení umožňuje.

Pro efektivní využití popsaného zjednodušení modelů vnitřních zdrojů tepla je nutné celou metodologii dále vylepšit. Dalším krokem je studie optimálního umístění pomocných oblastí a studie vlivu zvoleného modelu turbulence na výsledek simulací konvekčních proudů nad přirozenými zdroji tepla. Je také potřeba porovnat výsledky získané simulací s navrženým zjednodušením zdrojů tepla s experimenty vlastními i publikovanými jinými autory, např. Borgesem [3], Hylgaardem [5] nebo Zukowskou [6].

Kontakt na autora: petr.zelensky@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Koiš, G., *Analýza proudů v klimatizovaném prostoru*. Diplomová práce 9–TŽP–2009. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí. 2009
- [2] Zelenský, P., *Modelování zdrojů tepla ve vnitřním prostředí*. Diplomová práce 16–TŽP–2011. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí. 2011
- [3] Borges, C. M., 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*. Copenhagen, Dánsko, sv. 1, s. 253–256
- [4] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabir, A., Yang, Z., Zhu, J., A New eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation. *Computers & Fluids*, 1995, č. 24, s. 227–238
- [5] Hylgaard, C. A., Thermal plume above a person. *Proceedings of the 6th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 1998*. Stockholm, Švédsko, č. 1, s. 407–413
- [6] Zukowska, D., Melikov, A., Popielok, Z., Thermal plume above a simulated sitting person with different complexity of body geometry. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007*. Helsinki, Finsko, č. 3, s. 191–198.

Seznam označení

u_x, u_y, u_z	složky rychlosti	[m/s]
T	teplota	[K]
k	kinetická energie turbulence	[m ² /s ²]
ε	rychlost disipace kinetické energie	[m ² /s ³]

Poděkování

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