



Ing. David ŠPONIAR,
Ing. Martin BARTÁK
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Hodnocení tepelné pohody z výsledků CFD simulace a jejich aplikace v interiéru vozidla

Thermal Comfort Evaluations Based on CFD Simulation Results and their Applications at Car Interior

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Tepelná pohoda člověka v interiéru vozu je jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících pozornost řidiče. Příspěvek využívá standardní postupy pro stanovení ukazatelů tepelné pohody v homogenním mikroklimatu a zvláštní přístup pro hodnocení tepelně nestejnorodého prostředí – diagram komfortních zón podle Nilssona. CFD simulací a uživatelskými funkcemi pro program Fluent jsou predikovány ukazatele tepelné pohody v interiéru automobilu.

Klíčová slova: diagram komfortních zón, mikroklima automobilu, termální figurína, ukazatele tepelné pohody

Thermal comfort in a vehicle interior is one of the most important factors influencing driver's concentration. The article deals with standard procedures of thermal comfort evaluation in homogenous microenvironment and with a special approach to non-uniform thermal environments (Nilsson's thermal comfort chart). Thermal comfort indices for the car interior were predicted using CFD simulations and User Defined Functions programmed for the solver Fluent.

Key words: comfort zone diagram, thermal manikin, thermal comfort index (CFD)

ÚVOD

Tepelná pohoda člověka v interiéru vozu je jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících pozornost řidiče. S rozvojem automobilové techniky roste zájem výrobců o výzkum a zlepšování podmínek, ve kterých posádky vozidel tráví čas někdy i přesahující běžnou pracovní dobu. Počítačová mechanika tekutin (CFD) je nástrojem, který v této oblasti nachází stále širší uplatnění, protože dokáže uspořít prostředky, které by bylo jinak nutno vynaložit na náročné fyzikální experimenty.

Hodnocení tepelné pohody ve vnitřním prostředí z výsledků CFD simulace je principiálně vyřešenou záležitostí. Pro standardní ukazatele jsou k dispozici rovnice, které v kombinaci s výsledky simulačního výpočtu umožňují předpovědět tepelnou pohodu prakticky v jakémkoliv bodě zkoumaného prostoru. Zároveň je však nutné mít na paměti, pro jaké účely byly standardní ukazatele tepelné pohody definovány, resp. za jakých podmínek byly odvozeny rovnice pro jejich výpočet [1, 2]. Jednalo se o podmínky typické pro kancelářské místnosti, tj. poměrně rozsáhlé prostory, kde je tepelně-vlhkostní prostředí pokud možno homogenní, zóna pobytu osob se uvažuje až v určité vzdálenosti od stěn (kromě podlahy). Přitom dosažení tepelné pohody není při zdánlivě nepříznivých podmínkách vyloučeno, jak ukazují např. experimenty zaměřené na pocity osob při personální ventilaci [3].

Interiér automobilu je velmi specifickým případem vnitřního prostředí: stísněný prostor, stěny s velkým podílem zasklení, vyšší rychlosti proudění vzduchu v přívodních výústkách, větší pracovní rozdíly teplot přiváděného vzduchu a vzduchu v interiéru, klimatizační systém umožňující individuální nastavení pro řidiče či spolujezdce. Aplikace standardních ukazatelů tepelné pohody v takovémto prostoru vede převážně k negativnímu hodnocení, které je však často v rozporu se skutečnými pocity osob v automobilu. Proto jsou rozvíjeny alternativní postupy pro kvantifikaci tepelných pocitů. Použití jednoho z nich je ukázáno v této studii.

HODNOCENÍ TEPELNÉ POHODY

Standardní ukazatele

Norma ČSN ISO 7730 [4] popisuje standardní ukazatele tepelné pohody PMV, PPD a dále hodnocení stupně obtěžování průvanem DR. PMV ukazatel předpovídá střední hodnotu tepelného pocitu, která by byla zvolena

většinou osob. PPD index udává procentuální podíl lidí, kteří s tímto tepelným pocitem nejsou spokojeni. Parametr DR uvažuje nejen teplotu a rychlost proudění vzduchu ale i vliv turbulence.

Diagram komfortních zón [6]

Stav mikroklimatu je charakterizován mj. teplotou vzduchu, střední radiační teplotou a rychlostí proudění vzduchu. Pro zjednodušení popisu prostředí lze výše uvedené proměnné zahrnout do jedné veličiny. Byla tak definována ekvivalentní teplota t_{eq} zahrnující faktory popisující stav mikroklimatu a zároveň osobní stav člověka, tj. tepelný odpor oděvu a energetický výdej.

Její definice je obdobná jako u operativní teploty, ale v případě ekvivalentní teploty je uvažováno s dalšími faktory a upřesněním závislosti na rychlosti proudění vzduchu w_a . Madsenn [5, 6] nalezl empirický vztah pro ekvivalentní teplotu

$$t_{eq} = \begin{cases} t_o = \frac{1}{2}(t_a + \bar{t}_R) & w_a \leq 0,1 \text{ m/s} \\ 0,55 \cdot t_a + 0,45 \cdot \bar{t}_R + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{w_a}}{1 + R_{cl}}(36,5 - t_a), & w_a > 0,1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

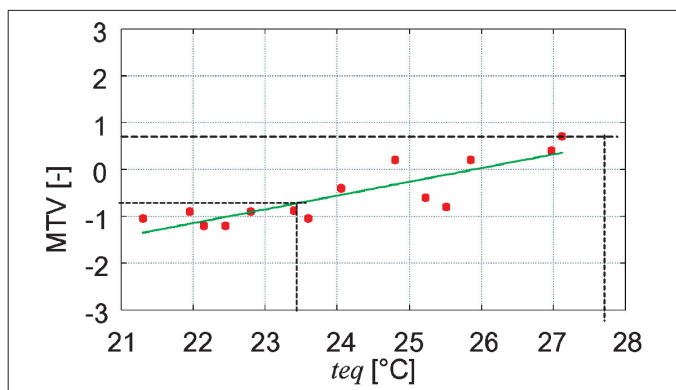
Vztah (1) uvádí korelaci, hodnotící tepelný pocit ekvivalentní teplotou. Tato korelace přistupuje při hodnocení k člověku jako celku. Omezení je tedy obdobné jako při použití standardních ukazatelů tepelné pohody. Oproti Madsennovi je dle Nilssona [6] ekvivalentní teplota dána vztahem:

$$t_{eq} = t_s - 0,155 R_{cl} \cdot q \quad (2)$$

Hustota tepelného toku q v rovnici (2) zahrnuje tepelnou ztrátu konvekcí a radiací, která může být různá pro různé části lidského těla.

Pro nalezení hodnot hustoty tepelného toku byly sestaveny termální figuríny rozdělené do několika částí. Každá tato část byla zahřívána průchodem elektrického proudu, tím bylo možné získat hodnoty unikajících tepelných toků.

Termální figuríny společně s respondenty byly vystaveny různým mikroklimatickým podmínkám. Respondenti slovně hodnotili tepelný pocit (Mean Thermal Vote – MTV) jednotlivých částí těla a zároveň byl zaznamenáván



Obr. 1 Příklad nalezení vztahu mezi ekvivalentní teplotou a MTV;
příklad platí pro stehno, zimní období, zimní oblečení. $MTV = -7,628 + 0,2942 \cdot t_{eq}$

tepelný tok unikající z odpovídajících částí termální figuríny. Z tepelných toků byla dle rovnice (2) vyčíslena ekvivalentní teplota a k ní přiřazen tepelný pocit respondentů (MTV). Na obr. 1 je uvedena nalezená závislost MTV a ekvivalentní teploty.

Obdobné korelace (dle obr.1) byly stanoveny pro jednotlivé části lidského těla a z nich bylo možné sestavit diagram komfortních zón (obr. 2).

Při sestavení diagramu komfortních zón se postupovalo takto [6]:

- ❑ Pro jednotlivé části těla byly stanoveny (z grafu, dle obr. 1) hodnoty t_{eq} pro $MTV=+0,8$ a $MTV=-0,8$ a vyneseny do grafu na obr. 2. Byla tak nalezena neutrální oblast.
- ❑ Obdobně byly nalezeny hranice t_{eq} pro $MTV=1,5$, předpokládající stav příjemně chladno, popřípadě příjemně teplo.

Hodnota MTV 0,8 odpovídá 80 % respondentů, kteří budou s tepelným pocitem v této oblasti spokojeni.

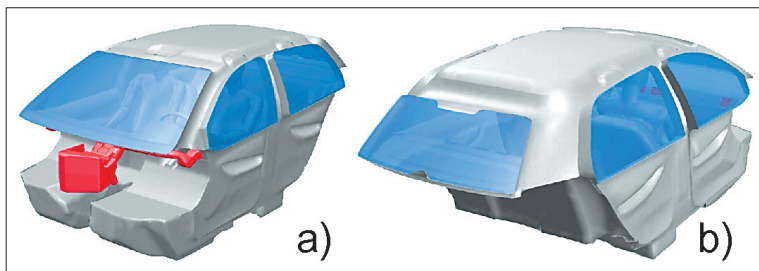
Cílem je technickými prostředky dosáhnout takových mikroklimatických podmínek, aby jednotlivé části těla byly v neutrální oblasti.

Celá metodika sestavování diagramu komfortních zón je uvedena v disertační práci [6].

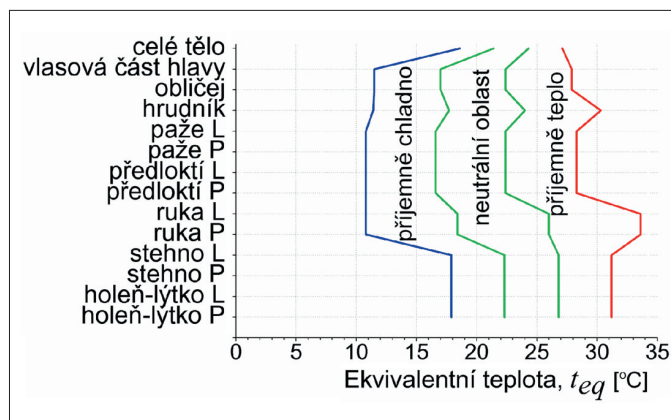
Využití termálních a virtuálních figurín

První termální figuríny (TF) vznikly ve 30. letech 20. století. V 50. až 70. letech se TF používaly primárně pro vývoj a optimalizaci obleků pro armádu. Geometrie figuríny byla stále komplexnější. V 80. letech byly zdokonalovány termofyziologické modely osob. Tyto modely byly vyvinuty na základě pozorování reakce lidského těla na měnící se podmínky.

Sestrojení termálních figurín je materiálně a finančně náročné, proto se přistupuje k vývoji virtuálních figurín (VF), začleněných do CFD simulace. Zájem o použití virtuálních figurín ve výzkumu v posledních letech rostl, o čemž svědčí počet článků pojednávajících o problematice využívání VF a zvýšený počet konferencí konajících se na toto téma [7, 8].



Obr. 3 Geometrie modelu vozu
a) izometrický pohled zepředu, b) izometrický pohled ze zadu



Obr. 2 Diagram komfortních zón

Modelování termofyziologie člověka zpočátku spočívalo v zadání jednotné povrchové teploty kůže, popřípadě konstantního tepelného zdroje. Později byly VF rozděleny do několika segmentů. Dále byly vyvíjeny VF se začleněním složitějších termofyziologických modelů člověka. Přehled vyvinutých termálních figurín, termofyziologických modelů a VF je uveden v [6].

Aplikace na interiér vozidla

Geometrie a model interiéru vozu

Geometrie modelu, který byl použit pro simulace, vychází z prací provedených v různých odděleních společnosti Škoda Auto. V případě této úlohy, která se zabývá simulací procesů v kabině vozu, byly z modelu odstraněny plochy související s vnější aerodynamikou a některé další části (například zavazadlový prostor). V konečné fázi úprav vznikla sestava (obr. 3) omezená hranicemi, které jsou v kontaktu se vzduchem proudícím uvnitř vozu.

Takto upravenou geometrii vozu, obsahující dvoučlennou posádku, bylo možné pokrýt povrchovou sítí. Povrchová síť byla vytvářena v programu Ansa od společnosti Beta CAE. Pro zhotovení objemové sítě byl použit preprocesor T-Grid.

Pro detailnější simulaci v mezní vrstvě byla na posádce vozu zhotovena síť, skládající se ze dvou vrstev po 5 mm. Tato výška byla zvolena s ohledem na hodnotu bezrozměrné odlehlosti y^+ , která v daném případě činila 45 až 57, což splňuje požadavek pro správné použití nerovnovážné stěnové funkce [9]. Volba velikosti první buňky u stěny 5 mm vyplynula ze studie [10], ve které jsou uvedeny výsledky ze CFD simulací a jejich porovnání s naměřenými hodnotami.

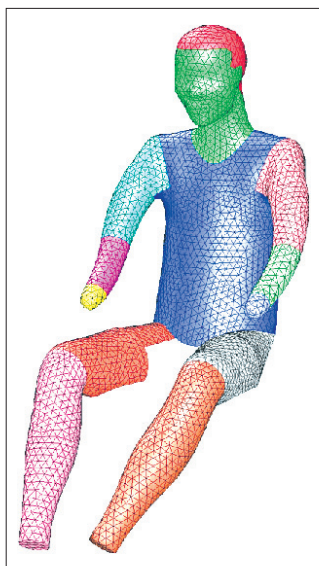
Numerická síť interiéru v konečné podobě obsahovala přibližně 2,5 miliónu buněk. Vytvořená numerická síť byla načtena do simulačního programu Fluent, ve kterém pokračovala práce s definováním okrajových podmínek.

U částí vozu, kde nebyl znám charakter chování materiálu v závislosti na teplotě a čase (sedadla, palubní deska, volant apod.), byla zadána adiabatická okrajová podmínka.

Pro popis děje, odehrávajícího se na vnějším povrchu stěn, byla použita podmínka 3. druhu. V této podmínce je zadán součinitel přestupu tepla konvekcí a teplota venkovního vzduchu. Pro výpočet tepelné bilance mezi vzduchem v interiéru vozu a venkovním vzduchem bylo nutné zadat materiálové vlastnosti jednotlivých stěn (okna, střecha, dveře atd.).

Geometrie a model posádky

Původní model vozu – který byl převzat od společnosti Škoda Auto – zahrnoval geometrii posádky, která nebyla vhodná pro budoucí práci (složitost geometrie rukou svírajících volant, části těla



Obr. 4 Geometrie spolujezdce rozdělená do 13 částí

tepelných pocitů použitím diagramu komfortních zón [6]. Každý segment byl definován povrchovou teplotou kůže, tepelným odporem oděvu a součinitelem přestupu tepla radiací α_R . Hodnoty součinitelů přestupu tepla radiací α_R byly pevně zadány.

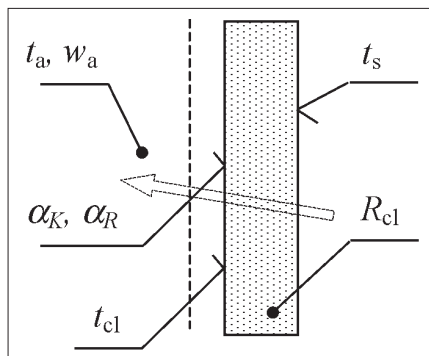
Součinitel α_R pro jednotlivé části těla zjišťoval de Dear [11, 6] vyhodnocením měření s termálními figurínami. Testy zahrnovaly působení mikroklimatických podmínek s rychlostí proudění vzduchu až do 5 m/s. Nalezené hodnoty součinitelů přestupu tepla radiací byly v intervalu od 3,9 do 5,4 W·m⁻²·K⁻¹.

Povrchová teplota každého segmentu posádky vozu byla ovládána uživatelem definované funkce (UDF) [9]. UDF je program psaný v jazyce C. Jeho úkolem bylo vyčíslení bilance tepelných toků mezi povrchem kůže a proudícím vzduchem mimo mezní vrstvu (obr. 5). Řešení bilance je prováděno po skončení každé iterace. UDF převezme hodnoty teplot vzduchu mimo mezní vrstvu t_a , teploty kůže t_s a součinitelů přestupu tepla konvekcí α_K a radiací α_R .

Pro alokaci těchto veličin má UDF k dispozici hodnoty povrchové teploty oděvu, vypočtené dle vztahu:

$$t_{cl} = \frac{t_s + R_{cl} f_{cl} \alpha_K t_a + R_{cl} f_{cl} \alpha_R \bar{t}_R}{R_{cl} f_{cl} (\alpha_K + \alpha_R + 1)} \quad (3)$$

Protože v simulacích nebyl začleněn model sálání, je střední radiační teplota v rovnici (3) nahrazena teplotou vzduchu, získanou průměrem hodnot ze všech buněk výpočetní oblasti váženým přes jejich objem. Vypočtená



Obr. 5 Schematické znázornění řezu, vedeného oděvem

nebyly rozděleny do segmentů a další). Proto byl zhotoven zcela nový model řidiče a spolujezdce (obr. 4).

Povrch každého člena posádky byl rozdělen do 13 částí. Tento krok vycházel z metodiky vyhodnocení

teplota povrchu oděvu t_{cl} je pro další iteraci výpočtu předávána jako nová hodnota v okrajové podmínce.

Stacionární numerická simulace

V této části práce byla zaměřena pozornost na vybudování modelu interiéru vozu, který bude možné využít pro predikci tepelné pohody.

Simulace modelovala interiér jedoucího vozu, při zimních podmínkách, v noci. Teplota venkovního vzduchu $t_{a,ext}$ je -5 °C a teplota přiváděného vzduchu $t_{a,vstup}$ je 22 °C. Vztahové síly byly řešeny Boussinesqovou aproximací (hustota vzduchu závislá na teplotě, nikoliv však na tlaku).

Při simulaci byl použit $k-\epsilon$ realizovatelný model turbulence [9] společně s nerovnovážnou stěnovou funkcí. Diskretizace rovnic pro hybnost a turbulentní veličiny byla druhého řádu. Pro tlak bylo použito schéma Body Force Weighted. Vazba mezi rychlostním a tlakovým polem byla řešena metodou SIMPLE.

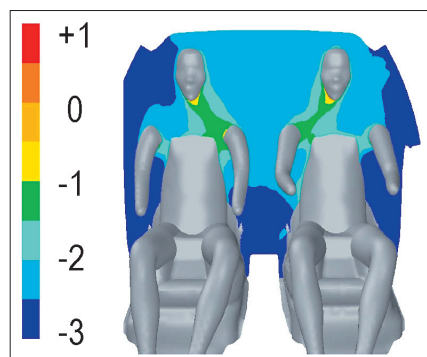
K vyhodnocení tepelné pohody byly použity standardní ukazatele PMV, PPD a dále stupeň obtěžování průvanem DR. Program Fluent neumožňuje ve své základní podobě analyzovat výsledky z těchto ukazatelů, k tomuto účelu tedy byla sestavena uživatelská funkce – v tomto případě se konkrétně jednalo o UDM (User Defined Memory) [9].

Vedle standardních ukazatelů byl pro vyhodnocení tepelné pohody použit diagram komfortních zón. Výsledky v podobě map PMV, PPD a DR jsou uvedeny na obrázcích 6 až 8, diagram komfortních zón je na obr. 9.

VÝSLEDKY A DISKUSE

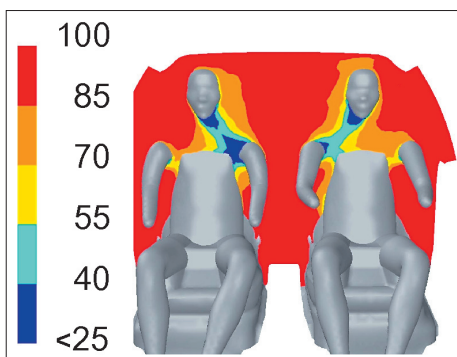
Hodnoty ukazatele tepelné pohody PMV na obr. 6 dosahují stupně -2 až -3 téměř v celém objemu interiéru. Optimálních hodnoty -0,5 až 0 byly jen v bezprostřední blízkosti těla posádky. Toto přiblížení k neutrálním hodnotám PMV je způsobeno vyšší teplotou a nižší rychlostí v mezní vrstvě vzduchu.

Obdobně jako PMV, procentuální podíl nespokojených (PPD) naznačuje, že mikroklimatické podmínky jsou nevyhovující. Hodnoty ukazatele PPD (obr. 7) dosahovaly 55 až 100 % ve velké části interiéru vozu. Ke snížení podílu nespokojených opět dochází v mezní vrstvě vzduchu na posádce. Stupeň obtěžování průvanem (obr. 8) dosahuje až k 45 %. Nejvyšší hodnoty jsou zaznamenány v oblasti obličeje a mezi temenem hlavy a střechou. Tyto vysoké hodnoty jsou primárně způsobené rychlostí proudění vzduchu dosahující v oblasti obličeje 0,75 až 1,20 m/s. Pro dosažení optimální hodnoty DR = 15 % by bylo nutné snížit rychlost přiváděného vzduchu, která ve vyústkách dosahovala až 3 m/s.



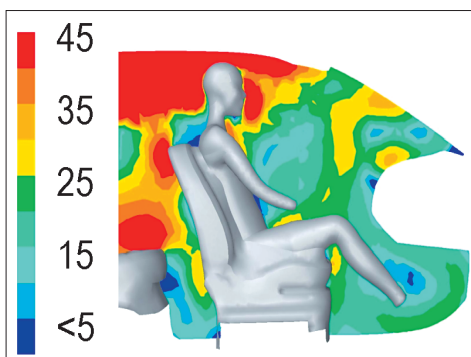
Obr. 6 PMV [-]

Vertikální řez vedený v úrovni spánků posádky vozu



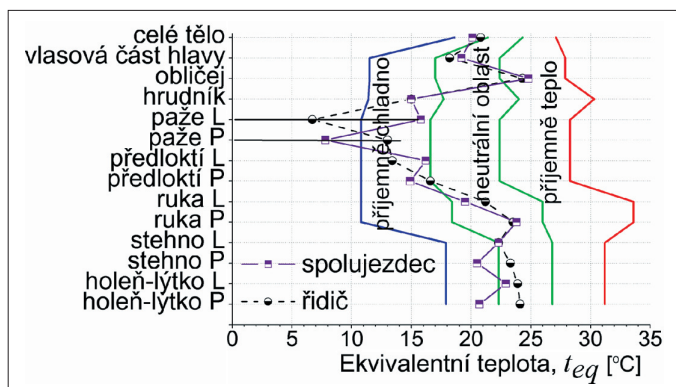
Obr. 7 PPD [%]

Vertikální řez vedený v úrovni spánků posádky vozu



Obr. 8 Stupeň obtěžování průvanem DR [%]

Vertikální řez vedený geometrickým středem spolujezdce



Obr. 9 Diagram komfortních zón

Ukazatelé PMV a PPD byly zjištěny za určitých zjednodušujících předpokladů. V interiéru vozu byla stanovena relativní vlhkost vzduchu $\varphi = 50\%$. Dále střední radiační teplota okolních stěn byla rovna teplotě vzduchu, získané průměrem váženým přes objem všech buněk výpočetní oblasti. Pro každou část těla řidiče a spolujezdce byly stanoveny součinitele přestupu tepla radiací. Střední radiační teplota a součinitel přestupu tepla radiací nejsou řešeny simultánně (jejich hodnoty jsou deklarovány v UDF). Dochází tak k určitému zkreslení výsledků, které by bylo možné ověřit začleněním jednoho z modelů radiace v programu Fluent.

V diagramu komfortních zón na obr. 9 jsou zobrazeny výsledky z numerické simulace pro zimní období. Ze simulace byly vyčísleny ekvivalentní teploty pro jednotlivé části těla a zaneseny do grafu. Z obr. 9 je patrný vliv chladnějších stěn bočních dveří a oken na tepelný pocit posádky. Ta strana řidiče či spolujezdce, která je blíže k oknu, je v diagramu zaznamenána v chladnější oblasti, než části posádky orientované do středu vozu. V případě spolujezdce je jeho pravá paže (paže P) blíže k bočnímu oknu a diagram začleňuje tento segment do oblasti nepříjemně chladno (ekvivalentní teplota $8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Naopak je tomu u řidiče. Jeho levá paže (paže L) je ochlazována chladnějším vzduchem v oblasti bočních dveří a okna. Tento segment se proto v diagramu vynese v oblasti nepříjemně chladno.

Při vyhodnocení diagramu komfortních zón hraje důležitou roli velikost tepelného odporu vrstvy vzduchu v těsné blízkosti osoby. Tepelný odpor vzduchu je nepřímo úměrný součiniteli přestupu tepla konvekcí, který je v numerických simulacích závislý na kvalitě zhotovené sítě. Pro detailní simulaci v mezní vrstvě vzduchu byla na posádce zhotovena síť o výšce první buňky 5 mm . V rámci této práce nebyla hodnocena citlivost na hustotu sítě v mezní vrstvě. Otázka zní, nakolik by byly ovlivněny výsledky a hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí při výšce první buňky například 1 mm .

Výsledky naznačují, že použití standardních ukazatelů ve výrazně nestejnorodém prostředí je diskutabilní. Kde ukazatele tepelné pohody PMV společně s PPD předpovídaly vysokou míru tepelné nepohody, tam diagram komfortních zón začlenil části těla do příjemné (příjemně) chladné nebo neutrální oblasti.

ZÁVĚR

Podařilo se vypracovat CFD model, na jehož základě je možné vyhodnocovat tepelnou pohodu osob v interiéru vozidla.

Uživatelská funkce (User Define Memory, UDM) naprogramovaná pro účely této studie přidává do simulačního softwaru Fluent další analytický nástroj, který umožňuje vyhodnocovat standardní ukazatele PMV, PPD, DR v celém objemu výpočetní oblasti. Tuto UDM je obecně možné použít v jakémkoliv úloze, řešící v uvedeném programu tepelný komfort metodou CFD.

Bylo ukázáno, že použití standardních ukazatelů tepelné pohody v nehomogenním prostředí a stísněném prostoru – což jsou typické atributy interiéru vozidla – je sporné. Jako vhodná alternativní metoda hodnocení se jeví tzv. diagram komfortních zón.

Model interiéru vozidla lze do budoucna dále zpřesnit zahrnutím výpočtu přenosu tepla sáláním (příp. sluneční radiací), který významně ovlivňuje tepelnou pohodu. Dalším důležitým rozšířením modelu může být možnost simulace automatické regulace klimatizace vozidla.

Poděkování

Tato studie byla vypracována jako součást výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí. Simulační výpočet byl proveden na systému SGI Altix 3700, který provozuje Centrum intenzivních výpočtů ČVUT v Praze.

POUŽITÉ SYMBOLY

DR	stupeň obtěžování průvanem	[%]
f_{cl}	poměr povrchu oblečeného k povrchu nahého člověka	[-]
PMV	předpověď středního tepelného pocitu osob	[-]
PPD	procentuální podíl nespokojených osob	[%]
q	hustota tepelného toku	$[\text{Wm}^{-2}]$
R_{cl}	tepelný odpor oděvu	$[\text{m}^2\text{KW}^{-1}]$
$t_{a,ext}$	teplota venkovního vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
$t_{a,instup}$	teplota přiváděného vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
t_{cl}	povrchová teplota oděvu	$^{\circ}\text{C}$
t_{eq}	ekvivalentní teplota	$^{\circ}\text{C}$
t_o	operativní teplota	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{t}_R$	střední radiační teplota	$^{\circ}\text{C}$
t_s	povrchová teplota kůže	$^{\circ}\text{C}$
w_a	rychlost proudění vzduchu	$[\text{ms}^{-1}]$
y^*	bezrozměrná odlehlost od stěny	[-]
α_K	součinitel přestupu tepla konvekcí	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
α_R	součinitel přestupu tepla radiací	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$

Použité zdroje:

- [1] Fanger, P. O.: *Thermal comfort*. New York (USA): McGraw-Hill, 1970.
- [2] Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H., Ring, J.: Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12(1): 21–39, 1988.
- [3] Melikov, A. K.: Personalized ventilation. *Indoor Air*, 14(7):157–167, 2004.
- [4] ČSN EN ISO 7730. *Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Praha: ČNI, 1997.
- [5] Madsen, O., Olesen, B., Kristensen, N.: Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions. *ASHRAE Transactions*, 90(1): 1077–1090, 1984.
- [6] Nilsson O. H.: *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. Doctoral thesis. University of Gävle, 2004.
- [7] Björn, E.: Simulation of human respiration with breathing thermal manikin. *Proc. 3rd International Meeting on Thermal Manikin Testing, 3IMM*, Arbete & Hälso, 78–82, 2000.
- [8] Buxon A., Zhubrin S.: The QinetiQ virtual manikin – Incorporation of a thermophysiological model. *Proc. 5th International Meeting on Thermal Manikins and Modelling, 5IMM*, Strasbourg, 2003.
- [9] FLUENT 6.2 UDF Manual. Lebanon (USA) : Fluent Inc., 2005. Dostupné na WWW: http://man.fsid.cvut.cz/html/udf/main_pre.htm
- [10] Brohus, H.: *Personal exposure to contaminant sources in ventilated rooms*. Doctoral thesis. Aalborg University, 1997.
- [11] de Dear, R., Arens, E., Hui, Z.: Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *International Journal of Biometeorology*, 40: 141–156, 1997.