



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VÝZKUM SYSTÉMŮ PRO ZAJIŠTĚNÍ KVALITY
PROSTŘEDÍ V KABINĚ AUTOMOBILU**

RESEARCH OF SYSTEMS FOR PROVIDING THE QUALITY OF THE ENVIRONMENT IN THE CAR
CABIN

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Šíp

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2023

Klíčová slova:

Kabina automobilu, automobilová vyústka, tepelný komfort, kvalita vnitřního prostředí, index stáří vzduchu

Keywords:

Car cabin, automotive vent, thermal comfort, Indoor Environmental Quality, Age of Air

Místo uložení práce:

Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2, 616 69 Brno

OBSAH

ÚVOD	4
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	5
1.1 Proudění vzduchu.....	5
1.2 Tepelný komfort	5
1.3 Kvalita vzduchu	6
2 VĚDECKÉ OTÁZKY A CÍLE PRÁCE	8
2.1 Vědecké otázky.....	8
2.2 Cíle práce	9
3 PROUDĚNÍ ZA AUTOMOBILOVOU VYÚSTKOU	11
3.1 Použité vědecké metody.....	11
3.2 Přehled vybraných výsledků.....	13
3.3 Přehled hlavních zjištění	18
4 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ V KABINĚ AUTOMOBILU.....	20
4.1 Kabina automobilu a koncepty větrání	20
4.2 CFD simulace	21
4.3 Analýzu vlivu konceptů větrání na tepelný komfort	21
4.4 Hodnocení kvality vnitřního prostředí	26
ZÁVĚR.....	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	32
CURRICULUM VITAE.....	36
ABSTRAKT.....	37

ÚVOD

Tepelný diskomfort může negativně působit na kognitivní funkce posádky [1–4], mezi které řadíme např. reakční rychlost, soustředěnost či periferní vidění. To vše jsou okolnosti, které podporují tvrzení, že nesprávná teplota v kabině automobilu je třetím nejnebezpečnějším faktorem způsobujícím dopravní nehody [5]. Nesprávná teplota v kabině dopravních prostředků, zejména pak horko a s tím spojená únava, má podíl na zvýšené nehodovosti řidičů dopravních prostředků.

Z hlediska zachování bezpečnosti cestujících je tedy nutné zajistit optimální tepelné podmínky, které jsou nejčastěji dosahovány v kabinách osobních automobilů pomocí přiváděného vzduchu o požadované teplotě. Jedná se o tzv. HVAC systémy (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Hlavními faktory prostředí, jež mají vliv na tepelný komfort lidského organismu jsou teplota vzduchu, relativní vlhkost, rychlost proudění a střední radiační teplota [6]. Chceme-li se zabývat tepelným komfortem v kabině automobilu, pozornost musí být upřena i na proudové pole, které je ovlivněno tvarem a konstrukčním provedením přívodních kanálů a vyústkou – koncovým prvkem distribuční soustavy.

Pojem kvalita prostředí nezahrnuje pouze tepelnou kvalitu prostředí, ale řadíme sem i kvalitu vzduchu. Tato problematika je v dnešní době aktuální, neboť člověk tráví ve vnitřním prostředí až 90 % času [7], navíc průměrný čas strávený v kabině dopravních prostředků je u některých typů profesí až 12 hodin denně [8].

Předkládaná práce se zabývá kvantitativním zhodnocením proudového pole za automobilovou vyústkou s využitím metody CFD. Pozornost byla věnována i empirickému určení poklesu osově rychlosti.

Podstatná část práce se věnuje CFD zhodnocení tepelného komfortu v kabině automobilu pro různé systémy větrání. Kromě běžně používaného systému směšovacího přívodu vzduchu byla pozornost soustředěna na alternativní systémy větrání, zejména na způsoby vertikální distribuce – stropní a podlahové. Tyto alternativní způsoby přívodu vzduchu mohou mít uplatnění v interiérech dopravních prostředků u automobilů s flexibilním uspořádáním interiéru, u kterého jsou přední sedadla otočena proti směru jízdy.

Část práce se věnuje CFD studii vlivu jednotlivých konceptů větrání na vnitřní kvalitu vzduchu v kabině automobilu. K vyhodnocení vnitřní kvality vzduchu byl použit index stáří vzduchu (AoA¹).

¹ Age of Air

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 Proudění vzduchu

V mnoha publikacích [9–12] zabývajících se problematikou proudění v kabině automobilu je tato problematika řešena ve zmenšeném modelu kabiny automobilu. Ishihara a kol. [9] upozornili na odlišnost Reynoldsových čísel pro jiné velikosti geometrie. Následně v publikaci [13] provedli srovnání rychlostních polí pro tvarově stejné geometrie o jiných velikostech. Při srovnání obou výsledků experimentu byla rychlostní pole na některých místech výrazně odlišná, což mohlo být způsobeno právě rozdílnou velikostí geometrie. To zapříčinilo odlišná Reynoldsova čísla. Na základě výše uvedených poznatků plyne důraz na provádění experimentu a numerických simulací vždy na modelech o skutečné velikosti.

Model turbulence $k-\varepsilon$, ze skupiny Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS), je vhodný pro vyhodnocení časově průměrovaných veličin popisujících rychlostní pole uvnitř kabiny automobilu [10, 12]. Tento model turbulence však nepřinesl shodu při vyhodnocování veličin popisujících turbulentní charakter proudu [10]. Pro přesnější popis turbulentního chování proudu se nabízí aplikace metody modelování turbulence Large Eddy Simulation (LES). Metoda LES má potenciál poskytnout přesnější turbulentní charakteristiky, ovšem za cenu vyšších výpočetních nároků. S ohledem na podstatný vliv turbulence na tepelný komfort [14] stojí použití metody LES za zvážení.

Dalším poznatkem plynoucím z dostupné literatury, konkrétně z publikace [15], je důraz na přítomnost figurín a obecně na co největší detaily interiéru vozidla. Prvky, jako volant, ruční brzda a pedály, způsobují výrazné odlišnosti při vyhodnocování proudových polí.

Proudové pole uvnitř kabiny automobilů je silně ovlivněno i tvarem vzduchovodů, které jsou umístěny před vyústkou [16]. Je tedy žádoucí, při výzkumu proudových polí v interiéru vozidla, věnovat patřičnou pozornost tvaru a konstrukčnímu provedení přívodních kanálů.

1.2 Tepelný komfort

Khatoon a Kim [17] uvádí, že radiace, konkrétně radiační vlastnosti skel, mají zásadní vliv na tepelný komfort. Dle Sevilgena a Kilice [18] je kabina automobilu zásadně ovlivněna

dopadajícím solárním zářením. Největší vliv má dopadající záření na přední část kabiny kvůli přednímu sklu.

Sevilgen a Kilic porovnávali povrchové teploty jednotlivých částí automobilu získané experimentálně a metodou CFD. Teplotní rozdíl 2 K u jednotlivých částí automobilu, s ohledem na komplexnost problematiky, označili za velmi dobrý [18].

Sen a Selokar [19] upozorňují na dopad palubní desky na tepelný komfort. Vzhledem k vysoké povrchové teplotě palubní desky, z důvodu solárního zatížení (příznivý úhlový součinitel), je palubní deska výrazným zdrojem tepla v kabině automobilu.

K ustálení teplot v kabině automobilu při chlazení došlo v řádu nízkých desítek minut (15 minut) [18].

Zhou a kol. [20] zpochybňují přesnost měření tepelného komfortu v laboratorních podmínkách. Své tvrzení zdůvodňují odlišnou metabolickou produkcí u prostého sezení a při řízení automobilu.

Při reálných podmínkách je v kabině automobilu patrná výrazná vertikální teplotní stratifikace [20].

Velmi citlivými částmi těla z hlediska tepelného vjemu jsou odhalené části těla. Zhang a kol. [21] explicitně uvádějí zvýšenou citlivost hlavy a rukou.

1.3 Kvalita vzduchu

Problematika kvality vzduchu v dopravních prostředcích se začala řešit teprve nedávno, nicméně dynamika vývoje této problematiky je velká.

Hlavním požadavkem na čítače částic pro sériovou implementaci do výroby je nízká cena. Proto se nabízí jako první krok vyhodnotit kvalitu vybraných levných čítačů. Již publikace [22, 23] ukázaly, že kvalita vybraných levných čítačů částic je dobrá a dostačovala by těmto potřebám.

Přítomnost malých částic bohatých na síru ukazuje na pronikání částic ze spalovacího prostoru do kabin osobních automobilů [24].

Kabinový filtr má zásadní vliv na kvalitu ovzduší uvnitř kabiny automobilu [24].

Koncentrace CO v kabinách dopravních prostředků je uspokojivá [25]. Nicméně limity koncentrace CO₂ byly častokrát překročeny, a to v některých případech i mnohonásobně kvůli nedostatečnému větrání [25–30]. Chang a kol. [26] stanovili minimální množství přiváděného vzduchu na osobu na 9,2 l·s⁻¹, pro dodržení obecně uznávaného horního limitu koncentrace CO₂ 1000 ppm.

S ohledem na počet částic je výhodnější režim recirkulace [28]. Režim recirkulace ale způsobuje rychlý nárůst CO₂. S řešením přišel Grady a kol. [30], jedná se o frakční recirkulaci, tj. kombinace obou výše uvedených metod se zachováním jejich výhod.

2 VĚDECKÉ OTÁZKY A CÍLE PRÁCE

2.1 Vědecké otázky

Téma 1: Proudění za automobilovou vyústkou

Vědecká otázka 1

Lze s dostatečnou přesností použít empirické vztahy pro popis poklesu osové rychlosti, které se vyskytují v současné literatuře, na reálnou automobilovou vyústku obdélníkového tvaru s usměrňovacími prvky a nerovnoměrným rychlostním profilem?

Hypotéza 1

- *Empirických vztahů popisujících pokles osové rychlosti pro izotermické proudění zatopeného proudu z kruhové vyústky je velké množství – přehledová literatura např. [31]. Chyský uvádí, že pro přesnější určení poklesu axiální složky rychlosti je třeba znát polohu pólu proudu. Je tedy reálné, že existuje empirický vztah, který dostatečně přesně popíše pokles osové rychlosti u reálné vyústky obdélníkového tvaru s usměrňovacími prvky a nerovnoměrným rychlostním profilem, tento vztah bude funkcí polohy pólu proudu.*

Vědecká otázka 2

Jsou metody CTA, kouřová vizualizace, RANS (k- ϵ) a LES (WALE) ekvivalentní z hlediska kvantifikování proudového pole za automobilovou vyústkou?

Hypotéza 2

- *Výše uvedené metody jsou ekvivalentní při určení úhlů směřování proudu. Z hlediska kvantifikování rychlostního pole a intenzity turbulence jsou ekvivalentní metody CTA, RANS a LES. Metoda LES by měla poskytnout přesnější výsledky zejména u intenzity turbulence, jelikož dochází k přímému výpočtu turbulence u velkých vírů, které jsou nositelem majoritního množství energie obsažené v proudu. U RANS přístupu dochází k modelování turbulence pomocí vybraného modelu turbulence.*

Téma 2: Tepelný komfort v kabině automobilu

Vědecká otázka 3

Jaký systém větrání je vhodný pro zajištění tepelného komfortu pro letní/zimní podmínky v kabině automobilu?

Hypotéza 3

- *Z hlediska tepelného komfortu řidiče pro letní podmínky je nejvhodnější systém se stropními vyústkami (CV). Pro zimní podmínky je z hlediska tepelného komfortu řidiče nejvhodnější použití podlahových vyústek (FV).*

Téma 3: Kvalita vnitřního vzduchu v kabině automobilu

Vědecká otázka 4

Jaký z uvažovaných systémů větrání v kabinách automobilů zajistí nejvyšší kvalitu vzduchu (kvantifikovanou na základě indexu AoA) v dýchací oblasti jednotlivých cestujících?

Hypotéza 4

- *Pro zajištění kvality vzduchu v dýchací oblasti cestujících je nejvhodnější přívod vzduchu velkoplošnými stropními vyústkami (CV).*

2.2 Cíle práce

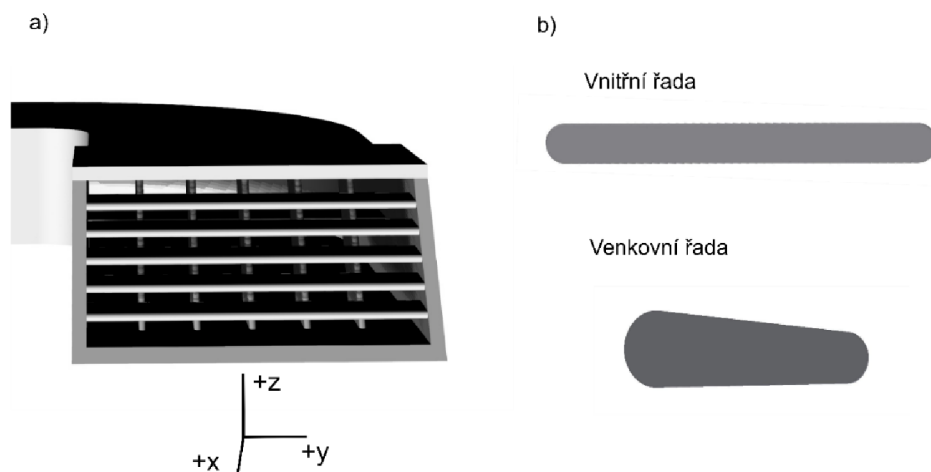
- Nalezení vhodného empirického vztahu pro určení poklesu osově rychlosti pro automobilovou vyústku obecného tvaru s usměrňovacími prvky a nesympetrickým rozložením rychlosti v oblasti před vyústkou.
- Porovnání zvolených experimentálních a výpočetních metod vhodných pro kvantitativní zhodnocení proudového pole na základě porovnání úhlů směřování, rychlostních profilů a srovnání intenzity turbulence.
- Určení vlivu okolních ploch vyústky v kabině automobilu na proudové pole za vyústkou.²

² Tato problematika je řešena pouze v plném textu dizertační práce, a to z důvodu limitovaného rozsahu tezí dizertační práce.

- Stanovení vlivu jednotlivých koncepčních systémů větrání na tepelný komfort cestujících v klasickém a flexibilním interiéru.
- Stanovení vlivu jednotlivých koncepčních systémů větrání na kvalitu vzduchu v klasickém a flexibilním interiéru.

3 PROUDĚNÍ ZA AUTOMOBILOVOU VYÚSTKOU

Předmětem výzkumu bylo proudové pole za automobilovou vyústkou, která obsahovala 5 vertikálních a 5 horizontálních lamel (viz obr. 1). Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány autorem dizertační práce spolu s kolektivem autorů v časopise Building and Environment [32].



Obr. 1 a) detail modelu vyústky, b) příčný průřez vertikálních a horizontálních lamel umístěných ve vyústce. Převzato a upraveno z [32]

Experiment byl proveden pro dvě modifikace – volný a stěnový proud. U varianty stěnového proudu bylo k vyústce přidáno obestavění simulující okolní stěny automobilu (čelní sklo, palubní deska, boční dveře). Okolní plochy mohou vést ke změně proudového pole, např. vlivem Coandova efektu. Níže jsou uvedeny výsledky pouze pro variantu volného proudu.

3.1 Použité vědecké metody

3.1.1 CTA

Při měření rychlostního pole bylo použito zařízení StreamLine Hot-Wire Anemometry. Pro měření rychlostního pole byla použita třídrátková rychlostní sonda 55R91. Jedná se o Fiber-film probe s průměrem 0,5 μm , délka drátku je 3 mm, přičemž aktivní část senzoru je dlouhá 1,25 mm.

Celkem bylo měřeno 36 frontálních (YZ) rovin pro každou variantu. V rámci jedné měřené roviny byla konstantní souřadnice osy x , ve směrech osy y a osy z docházelo k posuvu CTA sondy. Vzdálenost mezi rovinami byla 10 mm, od roviny vzdálené 200 mm od počátku souřadného systému byla tato vzdálenost zdvojnásobena, tj. 20 mm.

3.1.2 CFD

Numerická simulace byla provedena za použití komerčního programu STAR-CCM+ 2019.2. Byly použity metody modelování turbulence RANS a LES. Jako nejvhodnější model turbulence pro tuto aplikaci se dle předchozí publikace [33] ukázal být model Realizable k - ϵ , u metody LES byl použit subgridní model turbulence WALE. Nestacionární rychlostní pole bylo řešeno pomocí segregated řešiče a metody centrálních diferencí druhého řádu při využití SIMPLE algoritmu. Přístěnná mezní vrstva byla řešena pomocí stěnových funkcí – byl použit model All y^+ Wall treatment. Časová diskretizace řešení byla provedena za využití schématu second-order upwind.

Podrobnější informace jsou uvedeny v plném textu dizertační práce [34].

3.1.3 Teorie turbulentního proudu

Analýza výsledků byla doplněna o konfrontaci získaných dat s aktuálním stavem poznání, konkrétně s teorií turbulentního proudu. Z velkého množství analytických vztahů určených pro základní případ – izotermické proudění z kruhové vyústky bez usměrňovacích prvků, byly určeny vztahy, které s dostatečnou přesností určily pokles osově rychlosti pro obě zkoumané varianty proudu. Pro přesnější určení poklesu osově rychlosti je nutné znát polohu pólu proudu, která byla v rámci této práce určena.

Přehled teoretických vztahů, které byly uvažovány v rámci dizertační práce je uveden níže:

V hlavní oblasti proudění vzduchu platí vztah dle Chyského [35]:

$$\frac{u_m}{u_0} = K_S \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{x} \quad (1)$$

Kde u_m je osová rychlost, u_0 je výtoková rychlost, K_S je konstanta vyústky³, S_0 je plocha proudu z vyústky a x je souřadnice osy.

³ Někdy též označováno jako koeficient poklesu rychlosti

Chceme-li určit přesněji osovou rychlost v blízkosti počátku hlavní oblasti, musíme brát v úvahu polohu pólu proudu, který je definován jako průsečík obrysových přímek v hlavní oblasti proudu [31]. Pro určení poklesu osové rychlosti v závislosti na poloze pólu proudu platí vztah dle Abramoviče [36]:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{0,48}{\frac{a \cdot \bar{x}}{D_0} + 0,145} \quad (2)$$

Kde a je součinitel vířivosti a \bar{x} je vzdálenost od pólu proudu.

Dle Albertsona platí vztah [31, 37]:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{6,2}{\frac{\bar{x}}{D_0}} \quad (3)$$

Rajaratnam publikoval upravenou formu Albertsonova vztahu [31]:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{6,3}{\frac{\bar{x}}{D_0}} \quad (4)$$

Hinze uvádí vztah pro popis poklesu osové rychlosti [31, 38]:

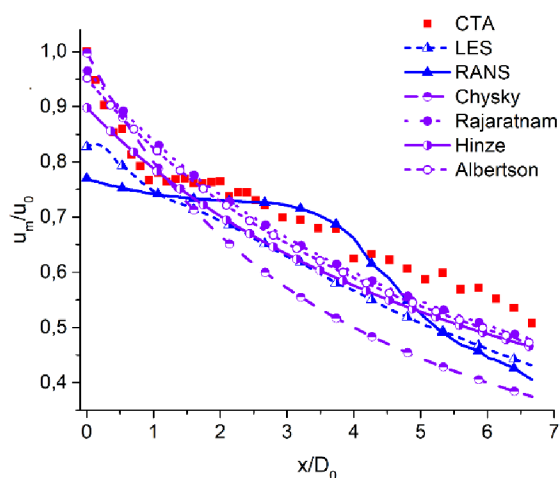
$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{6,39}{\frac{\bar{x}}{D_0} + 0,6} \quad (5)$$

3.2 Přehled vybraných výsledků

Rychlostní pole za automobilní vyústkou bylo hodnoceno na základě několika kritérií: poklesu osové rychlosti, úhlů směřování, rychlostních profilů a intenzity turbulence. Kompletní výsledky týkající se proudového pole za automobilovou vyústkou jsou uvedeny v plném textu dizertační práce [34].

3.2.1 Pokles osové rychlosti

Pokles osové rychlosti v závislosti na vzdálenosti od vyústky v bezrozměrných veličinách pro variantu volného proudu je uveden na obr. 2. Trend poklesu osové rychlosti je bez výrazných změn. LES dokázal předpovědět správný trend poklesu v oblasti bezprostředně za vyústkou, pokles CTA byl mírně strmější. Výpočet metodou RANS se s experimentem příliš neshodoval, a to zejména v oblasti za vyústkou. Predikovaný pokles osové rychlosti byl v rozporu s experimentem. Bezrozměrná výtoková rychlost u CFD metod je mírně nižší, to může být způsobeno nastaveným uniformním rychlostním profilem. Srovnání přesnosti CFD vůči CTA datům pomocí střední kvadratické chyby (RMSE) je uvedeno v tab. 1.



Obr. 2 Porovnání bezrozměrného poklesu osové rychlosti – volný proud. Převzato a upraveno z [32]

Tab. 1 Srovnání přesnosti určení poklesu osové rychlosti pro variantu volného proudu

	RMSE [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
LES	0,85
RANS	0,87
Rajaratnam	0,5
Hinze	0,67
Albertson	0,55

3.2.2 Srovnání použitých metod pro vyhodnocení rychlostního pole

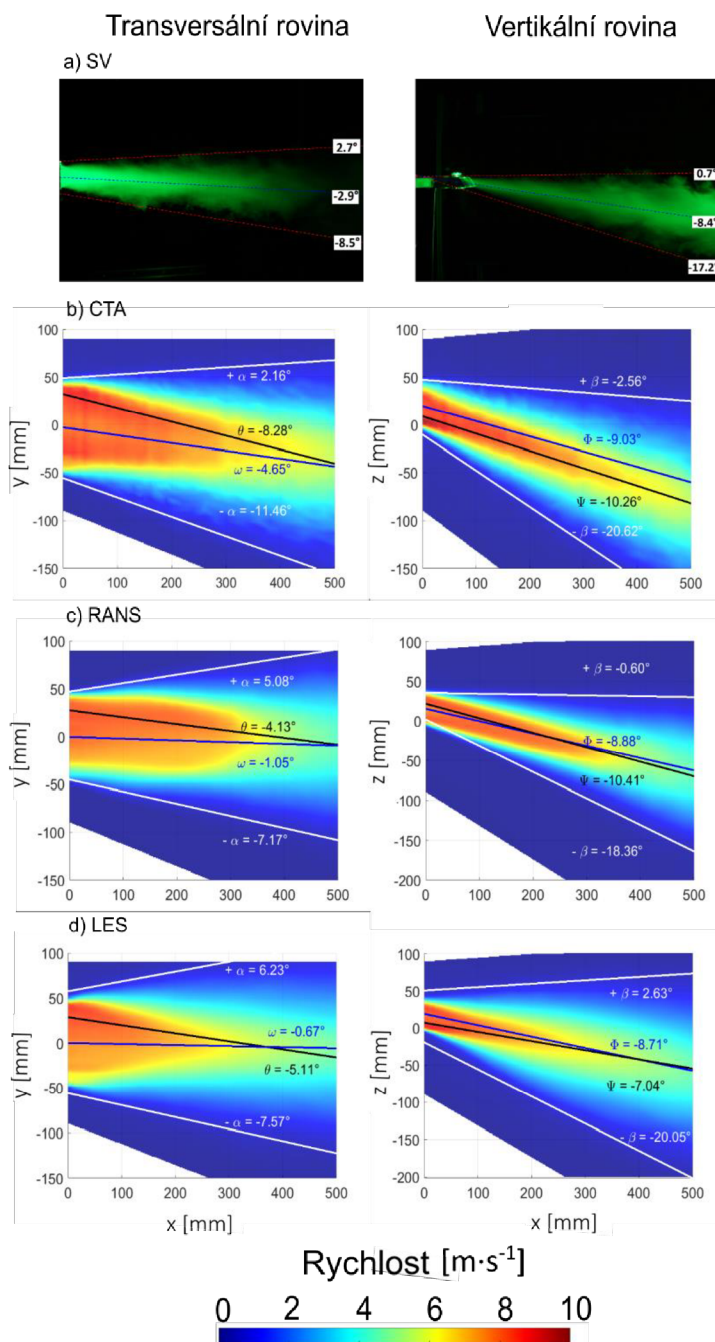
Použité metody byly částečně popsány výše. Ke zmíněným metodám byla přidána i metoda kouřové vizualizace. Experimentální data z kouřové vizualizace byla naměřena a vyhodnocena F. Molčanem v rámci jeho diplomové práce [39].

Úhly směřování

Úhly směřování jsou v transversální rovině označeny jako $+\alpha$ (levý okraj proudu) a úhel $-\alpha$ (pravý okraj proudu). Ve vertikální rovině úhel $+\beta$ (horní okraj proudu) a úhel $-\beta$ (dolní okraj proudu). Rozevření proudu je definováno jako absolutní hodnota ze součtu příslušných okrajových úhlů proudu. Rozevření pro transversální, resp. vertikální rovinu je označeno δ , resp. γ .

Osa proudu určená jako aritmetický průměr z rozevření je označena jako ω pro transversální rovinu. Pro vertikální rovinu je použito symbolu ϕ .

Osa proudu byla dále určena druhým způsobem, a to proložení maximálních rychlostí v jednotlivých měřených frontálních rovinách metodou nejmenších čtverců. Takto získané osy proudu jsou označeny pro transversální, resp. vertikální rovinu jako θ , resp. ψ .



Obr. 3 Úhly směřování. Převzato a upraveno z [103]

Úhly směřování pro variantu volného proudu jsou uvedeny na obr. 3. Rychlostní pole v transversální rovině jasně ukazuje ohyb proudu ke středu kabiny způsobené 90° kolenem umístěným v přívodním potrubí. Tento ohyb lze vyjádřit úhlem osy proudu θ , stanoveným proložením jednotlivých maximálních rychlostí v měřených rovinách metodou nejmenších čtverců. Takto určený úhel osy proudu je považován za skutečný.

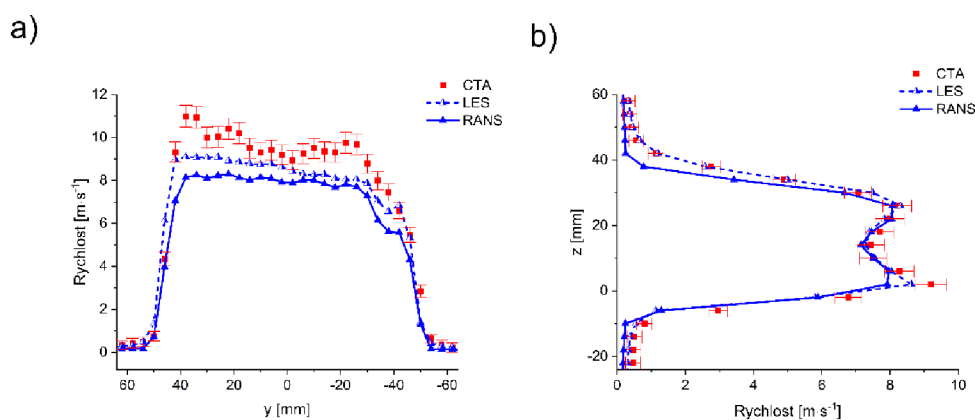
Rozdíly v určení úhlů směřování různými metodami jsou u této varianty menší než 4°.

Rychlostní profily

Transversální rychlostní profil ($x = 0$ mm; $z = 2$ mm) je na obr. 4 a). Globální maximum rychlostního profilu získaného metodou CTA se nachází vpravo, jeho hodnota je 11,0 m·s⁻¹. Obě CFD metody určily globální maximum ve stejné pozici. LES udává maximální hodnotu 9,1 m·s⁻¹ a RANS 8,3 m·s⁻¹. LES v průměru podhodnotila rychlost o 0,7 m·s⁻¹ a RANS o 1,4 m·s⁻¹. Odlišnosti v rychlostních profilech mohou být způsobeny rozdílným sklonem proudu vlivem usměrňovacích prvků. Trend rychlostního profilu je podobný u všech metod.

Vertikální rychlostní profil ($x = 0$ mm; $y = 2$ mm) je na obr. 4 b) a vykazuje dobrou shodu. Globální maximum je zde umístěno totožně, a to ve výšce spodní hrany vyústky ($z = 0$). Metoda CTA určila hodnotu maxima 9,2 m·s⁻¹, metoda LES 8,6 m·s⁻¹ a RANS 8,0 m·s⁻¹. Průměrná měřená rychlost ve vykresleném rychlostním profilu je 3,8 m·s⁻¹. Průměrná rychlost určena metodou LES je 3,6 m·s⁻¹ a 3,2 m·s⁻¹ u metody RANS.

Průměrná relativní odchylka u rychlostních profilů (obr. 4) získaných metodou LES a RANS od experimentální metody CTA byla 6,3 % u volného proudu

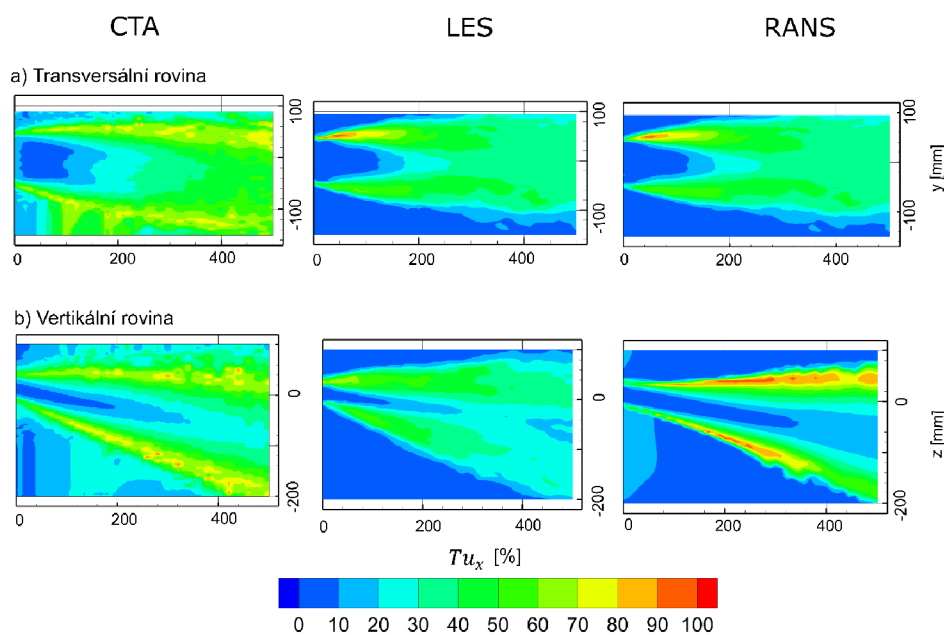


Obr. 4 Rychlostní profily – a) transversální rovina, b) vertikální rovina.

Převzato a upraveno z [32]

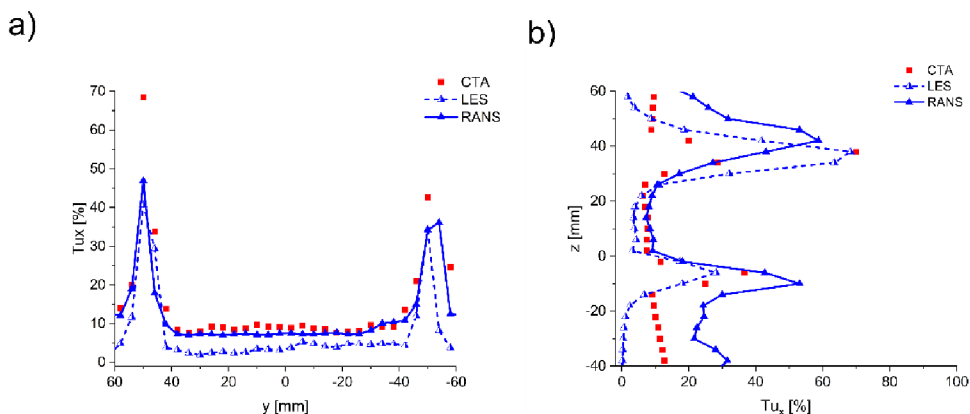
Intenzita turbulence

Intenzita turbulence získaná metodami CTA a CFD je zobrazena na obr. 5. Níže uvedené roviny jsou vertikální a transversální roviny procházející osou symetrie vyústky. Umístění profilů je shodné s těmi rychlostními. Je patrné, že v obou případech jádro proudu má intenzitu turbulence do 25 %, což odpovídá publikaci [40].



Obr. 5 Intenzita turbulence ve směru x. Převzato a upraveno z [32]

Metoda LES predikuje menší hodnoty intenzity turbulence ve srovnání s experimentem na okraji proudu. V této oblasti se mohou vyskytovat malé víry, které jsou řešeny subgridními modely, což vnáší nejistotu do výpočtu intenzity turbulence.



Obr. 6 Porovnání průběhu intenzity turbulence ve směru x – a) transversální rovina, b) vertikální rovina. Převzato a upraveno z [32]

Polohu lokálních maxim intenzity turbulence v transversální rovině metoda CFD určila přesně, nicméně hodnoty těchto maxim jsou mírně podhodnoceny, viz obr. 6. Překvapivě metoda RANS poskytuje lepší hodnoty v jádru proudu než LES. Nicméně LES určila přesněji polohu lokálních maxim ve vertikální rovině.

3.3 Přehled hlavních zjištění

Z dosažených výsledků výzkumu zaměřeného na proudové pole za automobilovou vyústkou lze konstatovat následující:

3.3.1 Hypotéza 1

- Rajaratnamův vztah nejlépe popsal pokles osově rychlosti pro variantu volného proudu i pro variantu stěnového proudu. RMSE je pro volný proud $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro variantu stěnového proudu $0,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Rajaratnamův vztah, ale např. i vztahy dle Hinzeho, Albertsona či Abramoviče, závisí na poloze proudu. Určení polohy proudu je zatíženo nejistotou, která je pak přenesena do určení poklesu osově rychlosti. Pól vyústky je definován jako virtuální počátek proudu, tj. místo, kde se protínají obrysové přímky hlavní oblasti. Metodika určení pólu proudu není jasně definovaná – mnohdy je omezena na konstatování „pól vyústky je konstanta určená experimentálně [36]“. Empirický vztah dle Chyského, nezávislý na poloze pólu proudu, přinesl shodu v oblasti bezprostředně za vyústkou. V další oblasti se průběh poklesu osově rychlosti výrazně lišil od průběhu experimentálního.
- Pól vyústky byl určen pro tento konkrétní případ. Metodika pro určení polohy pólu proudu byla publikovaná v časopise Building and Environment [32].
- Pól vyústky byl experimentálně určen pro obě varianty, u volného proudu byla vzdálenost 0,47 m, pro variantu stěnového proudu 0,49 m. Z hlediska použití Rajaratnamovy rovnice pro určení poklesu osově rychlosti je tato změna polohy pólu proudu zanedbatelná.
- Průběh poklesu osově rychlosti určený experimentálně pro obě varianty neodpovídá teoretickému poklesu osově rychlosti pro ideální případ volného izotermního proudění z kruhové vyústky. Dle teorie v krajní oblasti (v blízkosti za vyústkou) je pokles osově rychlosti pozvolný, a teprve s rostoucí vzdáleností od vyústky klesá i rychlost poklesu osově rychlosti. Zdůvodněním může být přítomnost řady usměrňovacích prvků (uzavírací klapka, pravoúhlé koleno, vertikální a horizontální lamely), což způsobí rozrušení rychlostního profilu za těmito prvky. To má

za následek určitý pokles výstupní rychlosti, zmenšení konstanty vyústky a snížení dosahu proudu [35].

3.3.2 Hypotéza 2

- Úhly směřování určené všemi metodami jsou ve velmi dobré shodě s ohledem na různé fyzikální principy jednotlivých metod a přesnost vyžadovanou v technické praxi.
- CTA a CFD (RANS i LES) metody jsou vhodné pro detailní analýzu proudového pole včetně intenzity turbulence.
- Metoda SV je výrazně rychlejší než CTA, metoda SV má uplatnění v přípravných fázích experimentu (podpůrná metoda pro CTA/PIV⁴). Výhoda spočívá v rychlém určení úhlů směřování, na základě čehož lze efektivně stanovit oblast detailnějšího měření.
- Metoda CFD je efektivní v rané fázi návrhu vzduchotechnických komponent, bez nutnosti jejich fyzické realizace.
- Metoda CFD poskytuje informace z míst, např. v potrubí, kde jsou experimentální metody CTA i PIV těžko aplikovatelné.
- Metoda LES poskytla dobrou přesnost ve všech sledovaných kritériích. Průměrná procentuální chyba u rychlostních profilů je 6,3 %, RMSE pro volný, resp. stěnový proud, je 0,87, resp. 0,30 m·s⁻¹.
- Metoda RANS určila rychlostní profily s průměrnou chybou 17,40 %, RMSE pro volný, resp. stěnový proud je 0,87, resp. 0,65 m·s⁻¹.
- Trend poklesu osové rychlosti u CTA a LES je ve shodě. RANS predikoval odlišný pokles, zejména v krajní oblasti za vyústkou.
- Trend průběhů intenzity turbulence u obou CFD metod byl v dobré shodě s experimentálními daty.

⁴ Particle Image Velocimetry

4 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ V KABINĚ AUTOMOBILU

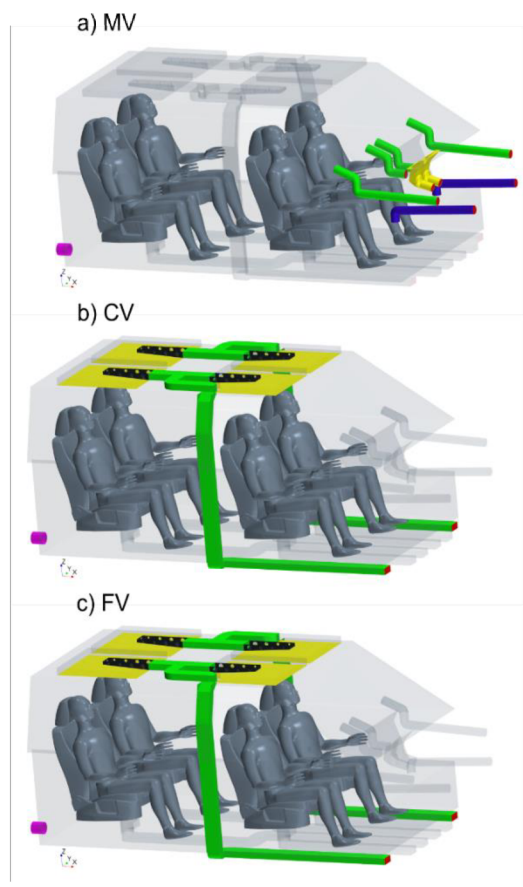
Numerická studie vlivů jednotlivých konceptů větrání vzduchu na tepelný komfort byla provedena pro konstantní průtok do domény o hodnotě $0,119 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ pro letní případ a $0,132 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ pro zimní případ.

4.1 Kabina automobilu a koncepty větrání

Tvorba geometrie makety (CS⁵) byla inspirována reálným vozidlem Volkswagen Caravelle. Hlavní požadavek na interiér spočíval ve velkoprostorové kabině, umožňující otočení předních sedadel proti směru jízdy – tzv. flexibilní interiér. Samotné otočení předních sedadel vyžaduje velké množství prostoru. Budeme-li brát v potaz i nezbytně nutné místo pro nohy pasažérů, s ohledem na zachování cestovního komfortu, byl zvolen jako předloha dodávkový automobil.

Součástí makety jsou tři odlišné systémy větrání (obr. 7), které lze využít nezávisle na sobě, ale i vzájemně kombinovat. Navrhnutými systémy větrání jsou:

- Směšovací větrání (MV⁶)
- Velkoplošné stropní větrání (CV⁷)
- Podlahové větrání (FV⁸)



Obr. 7 Přehled koncepčních řešení přívodu vzduchu

⁵ Cabin Simulator

⁶ Mixing ventilation

⁷ Ceiling ventilation

⁸ Floor ventilation

4.2 CFD simulace

4.2.1 Nastavení fyziky

CFD výpočty v této části jsou provedeny metodou RANS s modelem turbulence Reynolds Stress Turbulence. Rovnice zachování hmoty a pohybu byly řešeny dohromady, zvolen byl sdružený řešič. Pro inicializaci řešení byl použit model turbulence Realizable $k-\epsilon$ a segregated řešič.

U letního případu byl aktivován model solárního zatížení. Dále byl aktivní model Multiband Thermal Radiation (MTR) pro správný výpočet skleníkového efektu. Model obsahoval dvě elektromagnetická spektra:

- Krátkovlnné (0,01 - 2,5 μm)
- Dlouhovlnné (2,5 - 1000 μm)

Ostatní hlavní parametry CFD simulací jsou shodné s předchozí kapitolou, specifikace jednotlivých okrajových podmínek je uvedena v plném textu dizertační práce [34].

4.2.2 Simulované scénáře

CFD analýza vlivu jednotlivých systémů větrání na tepelný komfort řidiče byla provedena pro letní i zimní případ, pro dvě modifikace rozložení interiéru a pro výše popsané tři koncepty větrání.

Letní podmínky

Letními podmínkami se rozumí teplota vzduchu 30 °C, solární zatížení 800 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, přičemž rozdělení přímého a difuzního záření bylo stejně jako u validačních simulací 750 a 50 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Elevační úhel byl nastaven na hodnotu 90°.

Zimní podmínky

Zimní podmínky jsou definovány teplotou okolí -20 °C, bez solárního zatížení.

4.3 Analýzu vlivu konceptů větrání na tepelný komfort

CFD analýza vlivu konceptů větrání na tepelný komfort byla podložena experimentální validací numerického řešení, a to pro letní i zimní podmínky. S ohledem na početnou matici zkoumaných případů jsou zde uvedeny výsledky pouze pro letní případ a pro oba typy

interiéru. Validaci numerického řešení i ostatní výsledky CFD analýzy lze nalézt v plném textu dizertační práce [34].

4.3.1 Přehled vybraných výsledků

Léto, klasické uspořádání interiéru

Výsledky pro letní případ s klasickým uspořádáním interiéru jsou pro všechny koncepty větrání uvedeny na obr. 8.

MV

Tepelný pocit celého těla je „Středně“, stejně jako u segmentů temeno hlavy, hrud', ramena, paže, levá ruka, levé stehno a chodidla. Části obličej, dolní záda, pravé stehno a hýždě se nachází v oblasti „Teplo, ale přijatelně“. Segment pravé ruky se nachází v oblasti „Chladno, ale přijatelně“. Zbylé části, mezi které patří předloktí a lýtka, spadají do oblasti „Velmi chladno“. Obě tyto části jsou odhalené, tudíž jsou citlivé na okolní podmínky. Předloktí jsou v přímé interakci s přiváděným vzduchem o nízké teplotě, proto se nacházejí v oblasti „Velmi chladno“. Zatímco část lýtek je ovlivněna reverzními proudy ze zadní části kabiny o relativně nízké teplotě okolo 24 °C.

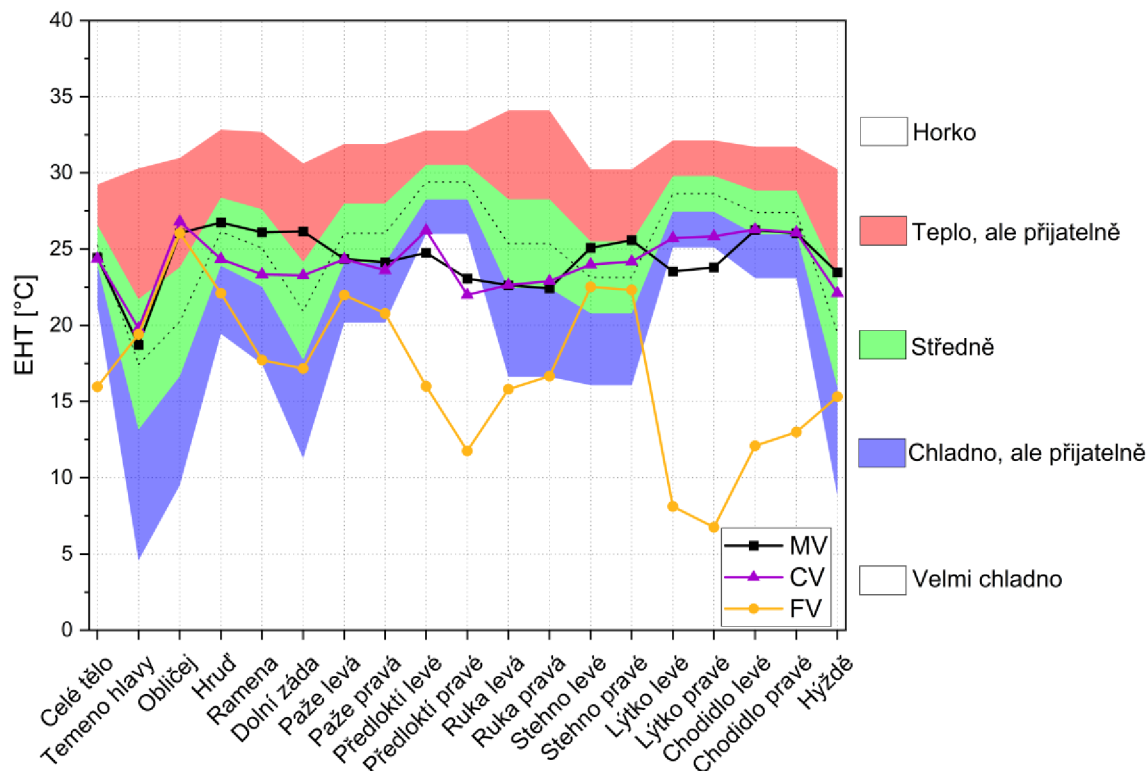
CV

Celé tělo se nachází stejně jako v předchozím případě v oblasti „Středně“, a to spolu s částmi temeno hlavy, hrud', ramena, dolní záda, levá paže, ruce, stehna, chodidla a hýždě. Obličej se nachází v oblasti „Teplo, ale přijatelně“, přiváděný proud stropní vyústkou přímo nezasahuje obličej, proud má velkou setrvačnost a projevuje se tendence přilnutí k čelnímu sklu. Pravá paže, levé předloktí a lýtka se nachází v oblasti „Chladno, ale přijatelně“. Pouze část pravého předloktí spadá do zóny „Velmi chladno“.

FV

Na první pohled je patrné, že tento způsob není zcela vhodný pro větrání klasického interiéru v letních podmínkách. Celkový tepelný pocit je u tohoto typu větrání „Velmi chladno“. Chladný vzduch je přiváděn malými výstupními vyústkami, což má za následek vysokou výstupní rychlost. Vyústky se navíc nachází v bezprostřední blízkosti lýtek, které jsou odhalené, tedy náchylné na obtěžování průvanem. Celá spodní část manekýna, tj. chodidla, a lýtka se z výše uvedeného důvodu nacházejí v oblasti „Velmi chladno“. Přiváděný studený vzduch o velké hybnosti (dochází ke spojení proudů z přední a zadní vyústky) se odráží od dělicí stěny motoru a stoupá vertikálně nahoru, v důsledku čehož se část předloktí a levá ruka nacházejí taktéž v oblasti „Velmi chladno“. Střední tepelný pocit je pouze u částí temeno hlavy a stehen. Hrud', ramena, dolní záda, paže, pravá ruka a hýždě spadají do zóny „Chladno, ale přijatelně“. Obličej je jediná část manekýna vykazující pocit tepla, konkrétně

se nachází v oblasti „Teplø, ale přijatelnø“. To je dáno nízkou rychlostí proudění v blízkosti obličeje v kombinaci s vyšší teplotou vzduchu, než je v dolní a střední části těla. Teplotní stratifikace je zde patrná.



Obr. 8 Letní pøípad, klasické uspoøádání interiéru

Løto, flexibilní uspoøádání interiéru

Výsledky pro letní pøípad s flexibilním uspoøádáním interiéru jsou pro všechny koncepty vøetrání na obr. 9.

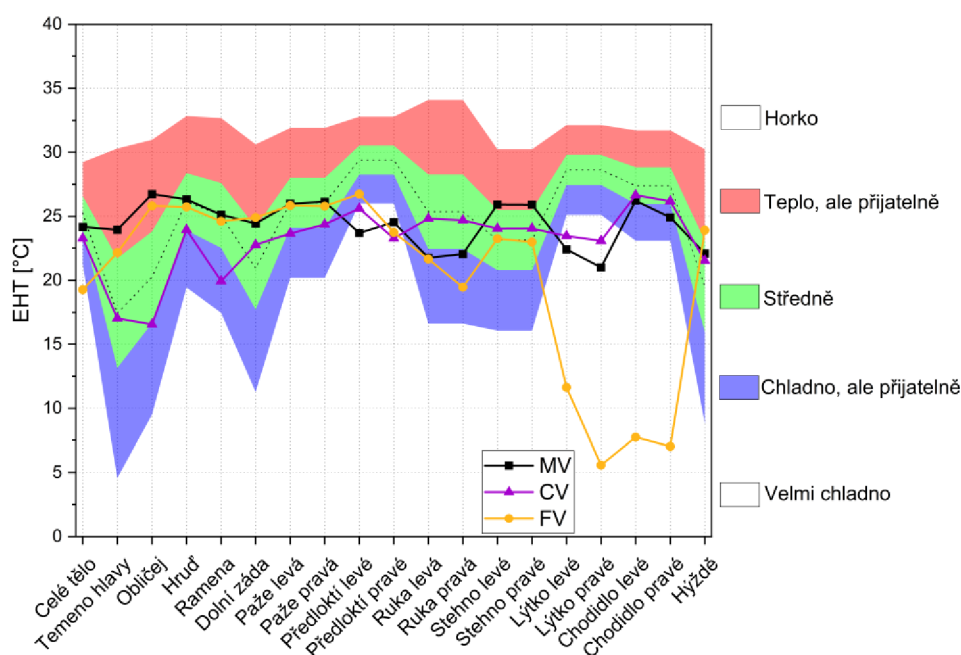
MV

Smøšovací vøetrání je založeno na pøímé interakci pøiváděného vzduchu z vyústek na palubní desce s jednotlivými částmi lidského těla. U flexibilního interiéru je pøímá interakce do vysoké míry znemožněna pøávø otočením sedaček proti smøru jízdy. Pøesto tepelný pocit celého těla u této varianty je v oblasti „Střednø“, stejně jako části hrud', ramena, paže, levé chodidlo a hýždě. V oblasti „Horko“ se nenachází žádná část, v oblasti „Teplø, ale přijatelnø“ jsou části temeno hlavy, obličeje, dolní záda a stehna. Zejména pøvnø jmenované segmenty by byly u klasického interiéru chlazeny dostatečně pøímou interakcí s pøiváděným vzduchem. Mírný pocit chladu, tj. oblast „Chladno, ale přijatelnø“ obsahuje

obě ruce a pravé chodidlo. Zbylé části těla jsou chlazeny příliš, jde o obě předloktí a lýtka, tyto části se nachází v oblasti „Velmi chladno“.

CV

U tohoto typu větrání se tepelný pocit celého těla nachází v oblasti „Chladno, ale přijatelně“, a to spolu se segmenty ramen, obličeje a levé paže. Přílišné ochlazování je patrné u částí předloktí a lýtek, které se nacházejí v oblasti „Velmi chladno“. Neutrální pocit, tj. oblast „Středně“, zahrnuje segmenty temeno hlavy, hrud', dolní záda, pravá paže, ruce, stehna, chodidla a hýždě. Ochlazování je efektivní, neboť žádná část se nenachází v oblasti „Tepló, ale přijatelně“ ani „Horko“.



Obr. 9 Letní případ, flexibilní uspořádání interiéru

FV

Větrání podlahovými vyústkami se ukazuje v letních podmínkách jako ne zcela optimální, a to zejména kvůli přílišnému ochlazování neoblečených částí obou lýtek a chodidel, které se nacházejí hluboko v oblasti „Velmi chladno“. Do této oblasti spadá i pravé předloktí. U flexibilního interiéru dochází spolu s otočením předních sedadel i k otočení předních vyústek, což má za následek impakt obou chladných proudů v oblasti nohou všech cestujících. To je hlavní důvod, že tepelný pocit celého těla je „Velmi chladno“. V zóně „Chladno, ale přijatelně“ se nachází části levé předloktí a ruce. Hrud', ramena paže a stehna

náleží do oblasti „Středně“. Temeno hlavy, obličej, dolní záda, a hýždě se nachází v oblasti „Tepló, ale přijatelně“.

4.3.2 Přehled hlavních zjištění

Léto, klasické uspořádání interiéru

Dle umístění EHT jednotlivých segmentů tepelného manekýna v DKZ lze konstatovat, že nejvhodnějším způsobem větrání pro letní podmínky s klasickým uspořádáním interiéru je CV (před MV a FV). K cirkulaci vzduchu u konceptu CV v letních podmínkách, kdy je do kabiny přiváděn studenější vzduch, napomáhají gravitační síly. Vertikální skalární pole středem kabiny a středem sedadla řidiče ukazují velkou míru promísení vzduchu v kabině u varianty CV. Naopak u varianty FV, kdy vzduch je přiváděn v blízkosti podlahy, přirozené gravitační síly mají směr vnější normály, tj. gravitační síly působí proti přirozenému stoupání vzduchu vlivem vztlakových sil. U varianty MV je promíchání vzduchu relativně vysoké, vertikální teplotní stratifikace zde není patrná. Teplotní skalární pole ukazují, že více je ochlazována zadní část kabiny, a to vlivem velké hybnosti přiváděných proudů, které je umocněné spojením obou středových proudů. Proudů na úrovni podélné osy makety se odráží od zadní stěny. Reverzní proudy poté cirkulují v kabině na úrovni podlahy, což se odráží na tepelném pocitu lýtek, nacházejících se v oblasti „Velmi chladno“, přestože nožní vyústky jsou neaktivní.

Léto, flexibilní uspořádání interiéru

Stejně jako u klasického uspořádání interiéru, v letních podmínkách nejlepší tepelné podmínky pro řidiče poskytl koncept větrání CV. Všechny části jsou dostatečně ochlazovány, žádné segmenty se nenachází v oblastech „Horko“ či „Tepló, ale přijatelně“. Většina částí (11) z celkového počtu (19) segmentů se nachází ve „Střední oblasti“. K výraznějšímu přenosu tepla dochází na částech předloktí a lýtek, nacházejících se v zóně „Chladno, ale přijatelně“, tyto části jsou zasažené cirkulačními proudy. Rozložení teplot a rychlostí v rovině jdoucí středem sedadla řidiče naznačují, že dva separátní proudy ze stropní vyústky přilnou k zadní stěně, resp. k čelnímu sklu. Ke spojení těchto proudů došlo ve výšce podlahy na úrovni nohou. Střed kabiny proto vykazuje oproti krajním oblastem vyšší teplotu. Oblast předloktí je zasažena proudem vzduchu o rychlosti větší než $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což v kombinaci s nulovým tepelným odporem oděvu způsobuje pocit chladu. Teplota proudu vzduchu v blízkosti předloktí řidiče má teplotu okolo $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

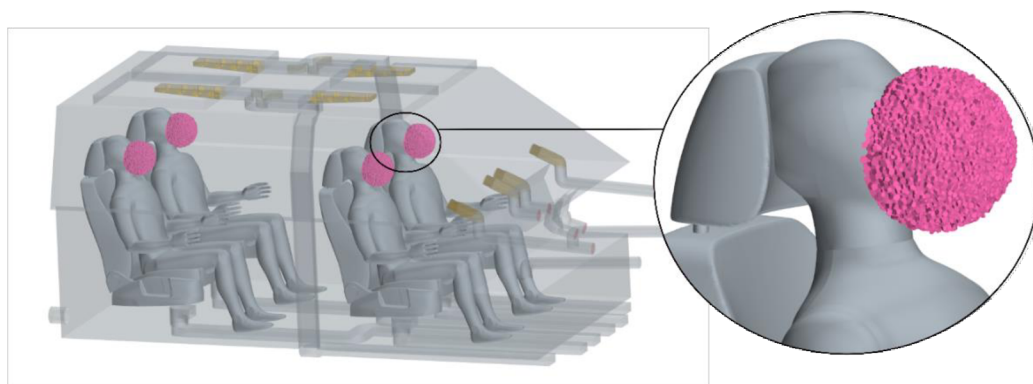
Přestože u systému větrání MV celé tělo spadá do oblasti „Středně“, jsou zde segmenty, zejména obličej a temeno hlavy spolu se stehny, kde je vliv ochlazování malý, části se nachází v oblasti „Tepló, ale přijatelně“. Zejména temeno hlavy a obličej se nachází v úplavu, který je způsoben impaktem proudu do zádové a hlavové opěrky vlivem otočení

sedadla proti směru jízdy. Naopak lýtky a předloktí se nacházejí v oblasti „Chladno, ale přijatelně“. Část lýtek i předloktí je zasažena vracejícím se zpětným proudem od zadní stěny automobilu.

Koncept větrání FV není vhodný pro letní podmínky vlivem přímé interakce přiváděného studeného vzduchu v blízkosti odhalených lýtek. Ačkoliv průběh EHT pro ostatní segmenty tepelného manekýna vypadá více než slibně, distální část dolních končetin se kompletně nachází hluboko v zóně „Velmi chladno“. Převážně kvůli těmto částem a částí pravého předloktí se celkový tepelný pocit nachází v oblasti „Velmi chladno“.

4.4 Hodnocení kvality vnitřního prostředí

Pro naplnění cílů dizertační práce v problematice IAQ byl zvolen ukazatel AoA, který byl vyhodnocen v dechové oblasti každého manekýna. Prostor, kde byl vyhodnocován AoA, je definován jako koule o průměru 100 mm se středem na horním rtu. Ukázka oblastí pro vyhodnocení AoA je na obr. 10. Celkový objem této oblasti je $1,7 \text{ dm}^3$ a nachází se v bezprostřední blízkosti vstupu do dýchacího ústrojí a části úst, které mohou být také využity pro proces dýchání. AoA je pro každou variantu stanovena jako průměrná objemová hodnota, a to pro všechny 4 manekýny.



Obr. 10 Oblast vyhodnocení AoA

4.4.1 Přehled vybraných výsledků

Léto, klasické uspořádání interiéru

Číselné hodnoty AoA pro letní případ s klasickým uspořádáním interiéru jsou uvedeny v tab. 4.1. Skalární pole AoA ve vertikální rovině středem sedadla řidiče a horizontální rovině ve výšce nosu, pro lepší demonstraci dosažených výsledků, jsou uvedeny na obr. 11.

Z výsledků jsou patrné oblasti, kde dochází k velice rychlé výměně vzduchu, a naopak místa, kde výměna původního vzduchu za čerstvý vzduch trvá déle.

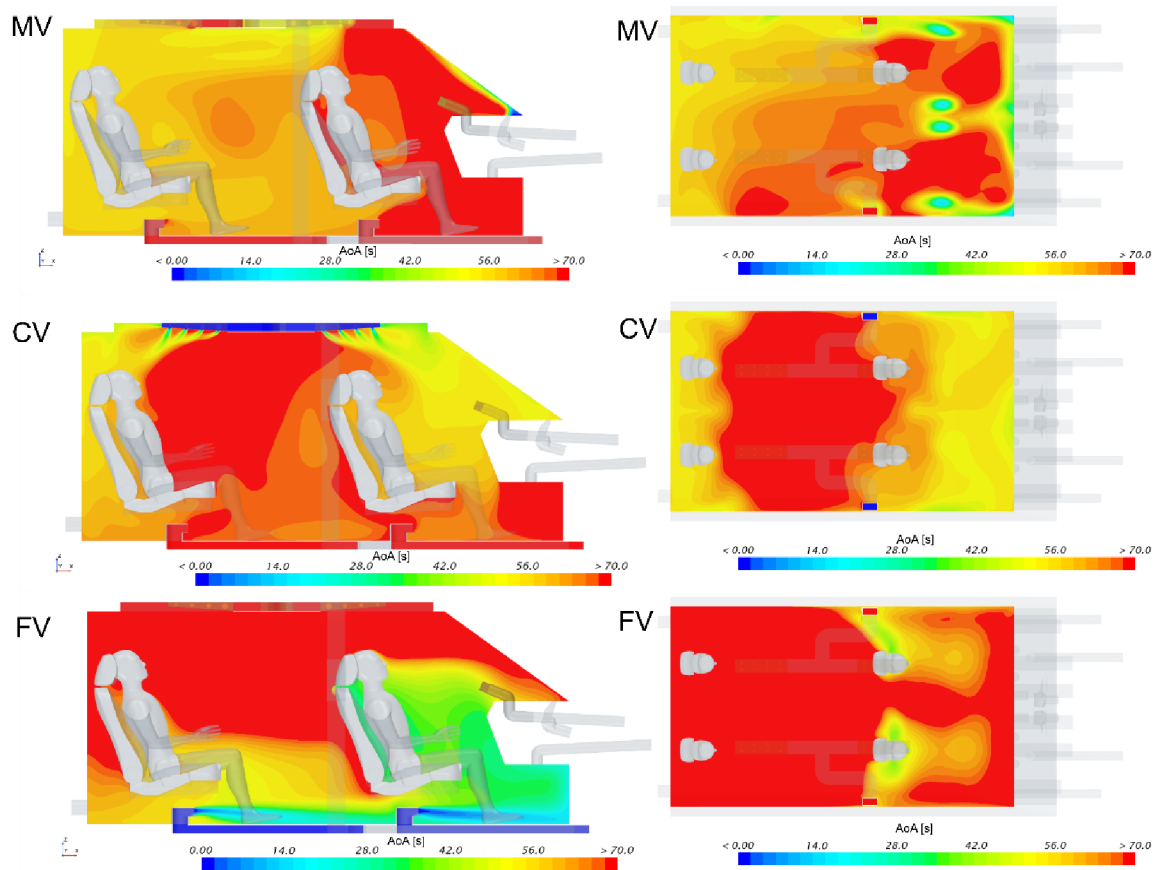
Tab. 4.1 AoA pro letní případ, klasické uspořádání interiéru, výsledky v sekundách

Popis	MV	CV	FV
LF	66,6	64,2	49,1
LR	56,9	65,8	71,3
RF	71,2	61,2	46,9
RR	60,8	70,5	74,2
Průměr	63,9	65,4	60,4

Srovnáme-li hodnoty AoA pro jednotlivé koncepty větrání, je patrné, že nejrychlejší výměna vzduchu v dechové oblasti řidiče je u systému FV. Hodnota AoA u řidiče je 49,1 s. Průměrná doba výměny vzduchu pro jednotlivé dechové oblasti je 60,4 s. Výše zmíněná skalární pole, mimo jiné i ta rychlostní, ukazují na spojení obou proudů přiváděných z vyústek na levé straně. Proud o vysoké hybnosti naráží do dělicí stěny pod palubní deskou a dále stoupá podél palubní desky, a to až k dechové oblasti řidiče. Situace je podobná na pravém předním sedadle, viz AoA rovina ve výšce nosu. Naopak na zadních sedadlech je situace s ohledem na index AoA nejvyšší ze všech scénářů. Vzduch je přiváděn primárně do přední části makety a zadní část je větraná nedostatečně.

U systému větrání CV, ačkoli na základě jeho umístění se daly očekávat příznivé výsledky AoA, v porovnání se systémem FV si vedl zejména pro přední část hůře. Systém větrání CV poskytuje o 15 s pomalejší výměnu vzduchu v dechové oblasti řidiče než systém FV. V průměru všech sledovaných oblastí je AoA vyšší o 5 s u CV konceptu větrání. Přiváděný proud ze stropní vyústky nejde primárně na horní část manekýnů umístěných na předních sedadlech, ale v důsledku setrvačných sil dochází k přímočarému pohybu vzduchu do prostoru čelního skla. AoA pro zadní sedadla je v porovnání se sedadly předními vyšší. Střední část makety má velmi vysoké hodnoty indexu AoA, a to více než 70 s.

Systém větrání MV je zásadním způsobem závislý na směřování proudu pomocí lamel umístěných ve vyústce. Nastavení lamel v CFD modelu odpovídalo pozici vertikálních lamel „Střed“. Pro tuto variantu, kdy přiváděný proud není v přímé interakci s obličejem manekýnů na předních sedadlech, lze pozorovat vyšší hodnoty AoA v celé přední oblasti. Strana řidiče má nižší hodnotu AoA, což je dáno nerovnoměrným rozdělením hmotnostních toků jednotlivými vyústkami. Střední a zadní oblast makety je u tohoto systému dobře větraná. Ačkoli tento systém větrání poskytl nejvyšší hodnotu AoA pro oblast řidiče, průměrná hodnota je srovnatelná s hodnotou systému CV.



Obr. 11 AoA pro letní případ, klasické uspořádání interiéru, rovina středem sedadla řidiče vlevo, rovina ve výšce nosu vpravo

4.4.2 Přehled hlavních zjištění

Kvalita vnitřního vzduchu byla vyhodnocována pomocí indexu AoA, který byl stanoven v dechových oblastech pro pasažéry na jednotlivých sedadlech. V letních podmínkách jsou malé časové rozdíly indexu AoA stanoveného jako průměrná hodnota pro všechny čtyři dechové oblasti. Toto tvrzení platí pro oba typy interiérů. Lze říci, že u klasického interiéru z hlediska rychlosti výměny vzduchu v dechové oblasti pasažérů na předním sedadle lze doporučit systém FV. Průměrná doba výměny vzduchu pro přední sedadla je 48 s. Doba potřebná k výměně vzduchu pro dechovou oblast zadních sedadel je vyšší o více jak 20 s. Systém CV poskytuje naopak nejrychlejší výměnu vzduchu pro sedadlo řidiče u flexibilního interiéru. Průměrná hodnota AoA pro všechny sledované oblasti je u flexibilního interiéru pro letní podmínky nejnižší u konceptu větrání MV, nicméně ostatní systémy poskytují srovnatelný čas potřebný k výměně vzduchu.

Nejnižších hodnot indexu AoA u zimních podmínek pro oba typy interiérů bylo dosaženo systémem CV, před MV a FV systémem v uvedeném pořadí. Hodnota AoA pro CV systém

je pro oba interiéry přibližně 35 s. Hodnota AoA u konceptu větrání MV je pro oba interiéry velice podobná, 51,9 s pro klasický interiér a 54,7 s pro flexibilní interiér. U systému FV jsou rozdíly podstatné, kdy pro klasický interiér je průměrný index AoA 75,0 s a pro flexibilní interiér 64,4 s.

ZÁVĚR

Z pohledu kvality vnitřního prostředí v kabině automobilu byly řešeny tyto dílčí faktory:

- Proudové pole za automobilovou vyústkou
- Tepelný komfort v kabině automobilu
- Kvalita vzduchu v kabině automobilu

Problematika proudového pole za automobilovou vyústkou byla řešena experimentální metodou CTA a CFD přístupem za využití metody modelování turbulence RANS s modelem turbulence Realizable $k-\varepsilon$ a LES s modelem turbulence WALE. Porovnávanými kritérii byly úhly směřování, pokles osově rychlosti, rychlostní profily a intenzita turbulence. Obě výše uvedené CFD metody poskytly velice dobré výsledky ve všech sledovaných kritériích. Metoda LES se ukázala přesnější v mnoha kritériích, nicméně časová náročnost byla řádově vyšší, konkrétně 27krát. Uvážíme-li míru přesnosti potřebnou v technické praxi, zejména v rané fázi návrhu, lze konstatovat, že metoda RANS byla dostatečně přesná za cenu přiměřených výpočetních nákladů.

Úhly směřování byly určeny i metodou kouřové vizualizace, jedná se o rychlou experimentální metodu poskytující základní informace o směřování proudu s dostačující přesností. Obě experimentální metody, CTA i kouřová vizualizace, jsou komplementární a vhodné pro hodnocení rychlostního pole za automobilovou vyústkou.

Proudové pole za automobilovou vyústkou bylo řešeno pro volný a stěnový proud, kdy u varianty stěnového proudu byla vyústka obklopena obestavěním, které simulovalo vliv okolních ploch. Z výsledků je patrný vliv těchto stěn v transversální rovině, z čehož plyne doporučení na zachování okolních stěn při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou.

Byla použita teorie turbulentního proudění na určení poklesu osově rychlosti. Platnost některých empirických vztahů, která byla původně omezena pouze na ideální kruhovou vyústku bez usměrňovacích prvků s rovnoměrným rychlostním profilem na výstupu, byla rozšířena i na reálné pravouhlé vyústky s usměrňovacími prvky a nerovnoměrným rychlostním profilem. Část těchto vztahů je funkcí pólu proudu, který byl u měřené vyústky určen a byla popsána metodika jeho určení. Validace empirických vztahů může být o to přínosnější, jelikož CFD metody zůstaly v predikci poklesu osově rychlosti za očekáváním, a to zejména u varianty volného proudu. Použití empirických vztahů pro určení poklesu osově rychlosti je omezeno na izotermní a mírně neizotermní proud.

Byla provedena CFD analýza vlivu jednotlivých, nově vytvořených, konceptů větrání na tepelný komfort řidiče automobilu, a to i pro variantu flexibilního interiéru. Byla použita metoda modelování turbulence RANS s modelem turbulence RST. Analýza byla provedena

pro letní a zimní podmínky. Systém CV se ukázal být nejvhodnější z hlediska tepelného komfortu pro letní podmínky. Naopak v zimních podmínkách se jeví jako nejvýhodnější použití systému FV. Oba závěry se vztahují na klasický i flexibilní interiér. Výsledky CFD analýzy jsou podloženy validacemi pro letní i zimní podmínky. Validace i CFD analýzy byly doplněny o test nezávislosti sítě.

CFD analýza vlivu jednotlivých konceptů větrání na kvalitu vnitřního vzduchu byla řešena ukazatelem AoA. V letním období bylo dosaženo velmi podobných hodnot AoA pro jednotlivé systémy větrání i pro obě varianty uspořádání interiéru. Tyto hodnoty byly stanoveny jako průměr pro jednotlivé dechové oblasti každého ze čtyř sedadel. Při porovnání dechových oblastí pro jednotlivá sedadla jsou k vidění určité rozdíly. Zejména u klasického uspořádání a systému větrání FV, kde je rozdíl v rychlosti výměny vzduchu více jak 20 s. Právě tento systém (FV) je z hlediska kvality vzduchu v dechové oblasti řidiče nejvhodnější. U flexibilního interiéru je to naopak systém CV, nicméně u tohoto typu interiéru jsou rozdíly v AoA nepatrné.

Systém větrání CV lze doporučit pro zimní podmínky, neboť poskytl výrazně nejnižší hodnoty AoA pro oba typy interiéru.

Studie kvality vnitřního vzduchu v kabinách automobilů je v rané fázi a toto téma disponuje velkým potenciálem. Pro řešení prostorové distribuce částic se jeví jako vhodná metoda CFD s využitím dvoufázového proudění s následnou validací experimentálním měřením koncentrace částic pro jednotlivá velikostní spektra.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HANCOCK, P. A. a I. VASMATZIDIS. Effects of heat stress on cognitive performance: The current state of knowledge. *International Journal of Hyperthermia* [online]. 2003, **19**(3), 355–372. ISSN 02656736. Dostupné z: doi:10.1080/0265673021000054630
- [2] HOCKING, C., R. B. SILBERSTEIN, W. M. LAU, C. STOUGH a W. ROBERTS. Evaluation of cognitive performance in the heat by functional brain imaging and psychometric testing. *COMPARATIVE BIOCHEMISTRY AND PHYSIOLOGY A-MOLECULAR & INTEGRATIVE PHYSIOLOGY* [online]. 2001, **128**(4), 719–734. ISSN 1095-6433. Dostupné z: doi:10.1016/S1095-6433(01)00278-1
- [3] CIAN, C., P. A. BARRAUD, B. MELIN a C. RAPHEL. Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PSYCHOPHYSIOLOGY* [online]. 2001, **42**(3), 243–251. ISSN 0167-8760. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8760(01)00142-8
- [4] ERNWEIN, V. a D. KELLER. Effects of muscular calibrated exercise in a heated environment on a pointing task by football players. *SCIENCE & SPORTS* [online]. 1998, **13**(2), 93–96. ISSN 0765-1597. Dostupné z: doi:10.1016/S0765-1597(97)86908-0
- [5] ZLATOPER, T. Determinants of Motor Vehicle Deaths in the United States: *Accident Analysis & Prevention*. 1991, **23**(1), 431–436.
- [6] PARSONS, K. C. *Human Thermal Comfort*. nedatováno.
- [7] KLEPEIS, N. E., W. C. NELSON, W. R. OTT, J. P. ROBINSON, A. M. TSANG, P. SWITZER, J. V. BEHAR, S. C. HERN a W. H. ENGELMANN. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* [online]. 2001, **11**, 231–252. Dostupné z: www.nature.com/jea
- [8] NIELSEN, I. a R. SMYTH. Subjective Well-Being Of Beijing Taxi Drivers. *Journal of Happiness Studies*. 2009, **11**(6), 721–733. ISSN 13894978.
- [9] ISHIHARA, Y., J. HARA, H. SAKAMOTO, K. KYOJI a H. OKAMOTO. Determination of Flow Velocity Distribution in a Vehicle Interior Using a Visualization and Computation Techniques. *SAE Technical Paper*. 1991. ISSN 0148-7191.

- [10] HERWIG, H., K. KLEMP, A. SCHMÜCKER a J. CURRLE. Ventilation of passenger car cabins: comparison of experimental data and numerical calculations. *Forschung im Ingenieurwesen*. 1996, **62**(6), 161–167.
- [11] YOON, J. H. a S. LEE. Velocity field measurements of ventilation flow in a vehicle interior. *International Journal of Vehicle Design* [online]. 2002, **31**(1), 96–111. ISSN 01433369. Dostupné z: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0037005319&partnerID=40&md5=ab299c14fab26c8086013f80ba3e4633>
- [12] ALHAJERI, M., A. AROUSSI a S. AGHIL. Isothermal study of HVAC air distribution in automotive application. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2009, **16**(4), 379–402. ISSN 1744-232X.
- [13] ISHIHARA, Y., M. SHIBATA a H. HOSHINO. Analysis of Interior Airflow in a Full-Scale Passenger-Compartment Model Using a Laser-Light-Sheet Method. *SAE Technical Paper*. 1992.
- [14] FANGER, P. O., A. K. MELIKOV, H. HANZAWA a J. RING. *Air Turbulence and Sensation of Draught*. 1988.
- [15] LEE, J. P., H. L. KIM a S. J. LEE. Large-scale PIV measurements of ventilation flow inside the passenger compartment of a real car. *Journal of Visualization* [online]. 2011, **14**(4), 321–329. ISSN 13438875. Dostupné z: [doi:10.1007/s12650-011-0095-9](https://doi.org/10.1007/s12650-011-0095-9)
- [16] LIZAL, F., O. PECH, J. JEDELSKY, J. TUHOVCAK a M. JICHA. The automotive ventilation test case: Investigation of the velocity field downstream of a benchmark vent using smoke visualization and hot-wire anemometry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2018. ISSN 09544070.
- [17] KHATOON, S. a M. H. KIM. Human thermal comfort and heat removal efficiency for ventilation variants in passenger cars. *Energies* [online]. 2017, **10**(11). ISSN 19961073. Dostupné z: [doi:10.3390/en10111710](https://doi.org/10.3390/en10111710)
- [18] SEVILGEN, G. a M. KILIÇ. Investigation of transient cooling of an automobile cabin with a virtual manikin under solar radiation. *Thermal Science* [online]. 2013, **17**, 397–406. Dostupné z: [doi:10.2298/TSCI120623150S](https://doi.org/10.2298/TSCI120623150S)
- [19] SEN, S. a M. SELOKAR. Numerical Simulation and Validation of Cabin Aiming and Cool-Down of a Passenger Car. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2016, **9**, 52–61. Dostupné z: [doi:10.4271/2016-01-0251](https://doi.org/10.4271/2016-01-0251)
- [20] ZHOU, X., D. LAI a Q. CHEN. Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions. *Building and Environment* [online]. 2019,

- [21] ZHANG, W., J. CHEN a F. LAN. Experimental study on occupant's thermal responses under the non-uniform conditions in vehicle cabin during the heating period. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2014, **27**(2), 331–339. ISSN 2192-8258. Dostupné z: [doi:10.3901/CJME.2014.02.331](https://doi.org/10.3901/CJME.2014.02.331)
- [22] VANDE HEY, J. Experimental and modeling assessment of a novel automotive cabin PM2.5 removal system. *Aerosol Science and Technology*. 2018, **52**(11), 1249–1265.
- [23] PRABAKAR, J., V. MOHAN a K. RAVISANKAR. Evaluation of Low Cost Particulate Matter Sensor for Indoor Air quality Measurement. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015, **4**(2).
- [24] PTAK, T. Particulate concentration in automobile passenger compartments. *Particulate Science And Technology*. 1994, **12**(4), 313–322.
- [25] BARNES, N. M., T. W. NG, K. K. MA a K. M. LAI. In-Cabin Air Quality during Driving and Engine Idling in Air-Conditioned Private Vehicles in Hong Kong. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, **15**(4).
- [26] CHANG, T. B., J. J. SHEU, J. W. HUANG, Y. S. LIN a Ch. Ch. CHANG. Development of a CFD model for simulating vehicle cabin indoor air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2018, **62**, 433–440. ISSN 1361-9209. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.018](https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.018)
- [27] KATARZYNA, G. Concentrations of carbon dioxide in the cabin of a small passenger car. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2011, **16**(4), 327–331. ISSN 13619209. Dostupné z: [doi:10.1016/j.trd.2011.01.005](https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.01.005)
- [28] CHAUDHRY, S. K. a S. P. ELUMALAI. Exploring the influence of ventilation settings and fan strength on passenger car in-cabin particle number concentration. *Air Quality, Atmosphere & Health* [online]. 2022, **15**(4), 679–690. ISSN 1873-9326. Dostupné z: [doi:10.1007/s11869-022-01167-2](https://doi.org/10.1007/s11869-022-01167-2)
- [29] QI, Ch., N. STANLEY, D. Y. H. PUI a T. H. KUEHN. Laboratory and On-Road Evaluations of Cabin Air Filters Using Number and Surface Area Concentration Monitors. *Environmental Science & Technology* [online]. 2008, **42**(11), 4128–4132. ISSN 0013-936X. Dostupné z: [doi:10.1021/es703216c](https://doi.org/10.1021/es703216c)
- [30] GRADY, M. L., H. S. JUNG, Y. Ch. KIM, J. K. PARK a B. Ch. LEE. Vehicle Cabin Air Quality with Fractional Air Recirculation. In: . 2013.
- [31] RAJARATNAM, N. *Turbulent jets*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd , 1976.

- [32] SIP, J., F. LIZAL, J. POKORNY, J. ELCNER, J. JEDELSKY a M. JICHA. Automotive cabin vent: Comparison of RANS and LES approaches with analytical-empirical equations and their validation with experiments using hot-wire anemometry. *Building and Environment* [online]. 2023, 110072 [vid. 2023-02-10]. ISSN 0360-1323. Dostupné z: doi:10.1016/J.BUILDENV.2023.110072
- [33] ŠÍP, J. *Aplikace rychlostní sondy se žhavenými drátky při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou*. B.m., 2018. b.n.
- [34] SIP. dizertace. nedatováno.
- [35] CIHELKA, J. *Vytápění, větrání a klimatizace*. Třetí, pře. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [36] CHYSKÝ, J. a K. HEMZAL. *Větrání a klimatizace: Technický průvodce*. 3. vyd. Praha: Bolit-B press Brno, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [37] ALBERTSON, M. L., Y. B. DAI, R. A. JENSEN a H. ROUSE. Diffusion of submerged jets. *American Society of Civil Engineers*. 1950, **115**, 639–697.
- [38] HINZE, J. O. a B. G. Van der Hegge ZIJNEN. Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet. *Applied Scientific Research*. 1949, **A1**, 435–461.
- [39] MOLČAN, F. *Vliv omezujících stěn na proudění z ventilační vyústky*. B.m., 2018. b.n.
- [40] POPE, S. B. *Turbulent Flows* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521598866. Dostupné z: doi:DOI: 10.1017/CBO9780511840531

CURRICULUM VITAE

Ing. Jan Šíp

*1992, Znojmo

Vzdělání

2018 – 2023 Konstrukční a procesní inženýrství (Ph.D.), Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

2016 – 2018 Technika prostředí (Ing.), Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

2012 – 2016 Základy strojního inženýrství (Bc.), Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

Pracovní zkušenosti

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

2018 – 2023 Technický pracovník

ŠKODA AUTO a.s.

2016 – 2017 Člen řešitelského týmu k projektu Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka

Absolvované stáže

2/2022 – 4/2022 Technická univerzita v Bukurešti (Technical University of Civil Engineering of Bucharest), Bukurešť, Rumunsko

8/2019 Sobriety s.r.o.

Publikace

Hlavní autor 5 článků, z toho 1 impaktovaný článek (1. decil)

ORCID ID: 0000-0001-5787-6335, RESEARCH ID: AHD-4338-2022

Jazyky:

Anglický jazyk: B2

Práce s počítačem:

Pokročilá znalost: STAR-CCM+, Inventor, Rhinoceros, Origin

Ostatní dovednosti:

Hot-Wire Anemometry, Particle Image Velocimetry, CFD

ABSTRAKT

Udržováním kvality vnitřního prostředí, zejména tepelného komfortu a vnitřní kvality vzduchu v kabinách automobilů, předcházíme dopravním nehodám.

Dizertační práce se zabývá vlivem různých konceptů větrání na vnitřní kvalitu prostředí, tj. tepelný komfort a vnitřní kvalitu vzduchu. Dílčím faktorem tepelného komfortu je rychlost proudění vzduchu, která byla v rámci této práce zkoumaná v prostoru za vyústkou.

Pro měření proudového pole za automobilovou vyústkou byla použita metoda termoanemometrie. Experimentální výsledky byly doplněny o CFD analýzu. Tepelný komfort v kabině automobilu byl stanoven pomocí CFD. Kvalita vzduchu pro jednotlivé systémy větrání byla posuzovaná taktéž na základě CFD, konkrétně byl využit index stáří vzduchu.

Výzkum proudového pole potvrdil platnost využití empirického vztahu dle Rajaratnama pro určení poklesu osově rychlosti na reálnou automobilovou vyústku. Studie tepelného komfortu poukazují na vhodnost použití stropního systému větrání pro letní podmínky, naopak v zimních podmínkách lze doporučit přívod vzduchu podlahovými vyústkami. Z pohledu indexu stáří vzduchu je nejvhodnější stropní větrání pro zimní podmínky. V letních podmínkách jsou hodnoty indexu stáří vzduchu u jednotlivých konceptů větrání velice podobné pro oba typy interiéru.

ABSTRACT

Optimal conditions of indoor environmental quality, especially thermal comfort and indoor air quality, are important because they lead to the active safety of passengers.

This thesis deals with the influence of different ventilation systems on indoor environmental quality, i. e. thermal comfort and indoor air quality. A partial factor of thermal comfort is the flow field which was investigated downstream of a benchmark automotive vent.

CFD was applied to determine the flow field downstream of a vent. The results were validated by experimental data acquired by Constant Temperature Anemometry. CFD has been also used for the evaluation of the thermal comfort. Indoor air quality has been evaluated based on the Age of Air.

The analytical empirical equation by Rajaratnam can be successfully used to determine the throw of the jet. The best performance in terms of the highest level of human comfort was achieved by the ceiling ventilation in the summer conditions and by the floor ventilation in the winter conditions. From the point of view of the Age of Air, the ceiling air ventilation system is the most suitable for the winter conditions.