



Interakce proudů vzduchu v dýchací oblasti a vývoj nových koncových prvků osobního větrání

Airflow Interaction at Breathing Zone and the Development of New Air Terminal Device for Personalized Ventilation

Recenzent
 prof. Ing. František Drkal, CSc.

Osobní větrání umožňuje zlepšit kvalitu ovzduší v bezprostřední blízkosti osob. Prvky pro přívod vzduchu musí zajistit nejen kvalitní ovzduší v dýchací oblasti, ale musí být příznivě hodnoceny i osobami z hlediska tepelného komfortu a ergonomických podmínek. Článek pojednává o proudění vzduchu kolem lidského těla i podmínkách pro návrh účinného způsobu přívodu vzduchu do dýchací oblasti osob. Uvádí výsledky experimentálních prací pro vyvíjené prvky přívodu vzduchu na Dánské technické univerzitě a v závěru předkládá návrh prototypu, který, podle autorů návrhu, splňuje požadavky na kvalitu ovzduší i je přijatelný z ergonomických hledisek

Klíčová slova: osobní větrání, kvalita vdechovaného vzduchu, proudění kolem těla, koncové prvky osobního větrání

Personalized ventilation allows for improving the atmosphere quality at the person's immediate vicinity. The air supply elements have to ensure not only the air quality at the breathing area but also be favorably assessed by the individuals as to their thermal comfort and ergonomic conditions. The article deals with the air flow around the human body and also with conditions for the design of effective air supply to breathing area of persons. The author presents the results of experimental work concerning the development of air supply elements at the Danish Technical University, and in conclusion he presents the prototype design, which, according to authors, of the design, fulfils the air quality requirements and is also acceptable from the point of view of ergonomics

Key words: personalized ventilation, breathed air quality, around body flow, individual ventilation terminal elements

Fyziologické a psychologické schopnosti osob snášet prostředí a reagovat na jeho změny se liší. Každý člověk má jedinečné požadavky na teplotu a rychlost vzduchu, oblečení, aktivitu, atd. V prostorech obývaných více lidmi je tak téměř nemožné vytvořit prostředí, které by uspokojilo každého. Známa studie Prof. Fanger, Thermal Comfort, ukázala, že v průměru 5 až 10 % osob je vždy nespokojených s tepelným prostředím, které je přijatelné pro většinu populace. Podmínky vnitřního prostředí v místnostech akceptovatelné pro každého, mohou být dosaženy jedině možností vytvářet a měnit pro každého uživatele mikroklima ve svém okolí dle vlastního přání [1]. To se snaží naplnit koncepce osobního větrání, jejímž hlavním cílem je přivádět do dýchací zóny každé osoby čistý vzduch s nastavitelným průtokem, směrem a teplotou, při co nejmenších provozních nákladech.

Systémy osobního větrání se používají v praxi již mnoho let. Typickými příklady jsou větrací a klimatizační systémy v kabinách vozidel (automobily, vlaky atd.) a letadel. Trysky a štěrby jsou navrženy tak, aby vytvářely vysoce indukční proudy. Ty podporují intenzivní směšování přiváděného vzduchu s okolním vzduchem a jsou tak účinné hlavně ve zlepšení tepelné pohody pasažérů. V budovách (nejčastěji v hledištích a posluchárnách) se pro přívod vzduchu do blízkosti osob používají výústky zapuštěné do stolů a sedadel. Žádné z těchto koncových prvků však nejsou navrženy tak, aby zajistily osobám vysokou kvalitu vdechovaného vzduchu. První systémy osobního větrání v kancelářích byly kombinací nastavitelných výústek na deskách stolů a přívodu vzduchu podlahou [2].

V nedávné době (2000–2004) bylo vyvinuto několik systémů osobního větrání s hlavním záměrem zajistit vysokou kvalitu vdechovaného vzduchu. Schopnost těchto systémů výrazně zlepšit kvalitu vzduchu ve srovnání s větráním směšováním byla dokumentována v několika studiích [3, 4, 5]. V současné době výzkum stále pokračuje a jeho nejnovější poznatky jsou následovně prezentovány.

VOLNÝ KONVEKTIVNÍ PROUD KOLEM LIDSKÉHO TĚLA A OSOBNÍ VĚTRÁNÍ

Výkon osobního větrání závisí především na interakci proudu z výústky osobního větrání (osobního proudu) s konvektivním proudem z povrchu lidského těla. Tento volný konvektivní proud vzniká ve velmi klidném prostředí účinkem vztakových sil, vyvolaných rozdílem teplot povrchu těla a teploty okolního vzduchu, kdy rychlost okolního vzduchu v místnosti nepřekračuje 0,1 m/s [6]. Tloušťka mezní vrstvy se na nahém lidském těle vytváří stejným způsobem, jako na svislém, nakloněném, či vodorovném válci, (nebo kouli), jenž má podobnost v částech lidského těla (končetiny, trup, hlava). V mnoha experimentech bylo prokázáno, že u nohou je volná konvekce charakterizována tenkou mezní vrstvou, která je pozvolná a laminární (naměřené rychlosti proudění při teplotě vzduchu v místnosti 20 °C odpovídaly rozsahu 0,05 až 0,15 m/s a tloušťka mezní vrstvy 8 až 40 mm) a u hlavy přechází v tlustší turbulentní mezní vrstvu (rychlost proudění 0,05 až 0,25 m/s a tloušťka mezní vrstvy 50 až 200 mm, tab. 1). Částečně se tak přenáší vzduch z nižších partií místnosti, jenž může být znečištěn, směrem do dýchací oblasti. Spolu s ním se přenáší i pachy a výpary produkované lidským tělem. Rychlost proudění volné konvekce v mezní

Tab. 1 Maximální rychlosti a tloušťky mezních vrstev (rychlostní a teplotní) volného konvektivního proudění dle různých studií; t_k , t_a – teplota povrchu těla, vzduchu

Odkaz	$t_k - t_a$ [°C]	Rychlost proudění v mezní vrstvě [m/s]	Tloušťka mezní vrstvy [mm]		Část těla, u kterého bylo měřeno (člověk oblečený/nahý)
			(rychlostní)	(teplotní)	
Fiedorowicz (1977)	8	0,18	150	20 až 60	Hrudník (nahý) Stehno (nahý)
	8	0,15	50	30	
Lewis a kol. (1969)	18 8	0,5 0,23	150		Hlava (nahý) Hlava (nahý)
Hojna a Yakijama (1987)	10 až 14	0,25	90		Hlava (oblečený)
Melikov a Zhou (1966)	10 až 14	0,13		35	Krk (oblečený)

vrstvě může dosáhnout až 0,25 m/s a je tedy porovnatelná s rychlostí proudění vzduchu v místnosti vyvolané nuceným větráním. Pokud je rychlost proudění vzduchu v místnosti vyšší než 0,25 m/s, volná konvekce kolem lidského těla je narušena, či úplně odtrhnuta z povrchu lidského těla a má tak v určitých případech za následek pocit tepelného diskomfortu.

V případě osobního větrání je snahou přivádět při velmi malých vzdálenostech (do 0,5 m) čerstvý vzduch do dýchací oblasti [4]. To, zda-li 100 % čistý vzduch bude vdechován, záleží nejen na proudění vzduchu z koncového prvku osobního větrání, a tím na možném směšování se znečištěným okolním vzduchem v místnosti, ale i na vzájemné interakci volné konvekce kolem lidského těla s tímto proudem. Je tedy žádoucí konvektivní proud kolem dýchací oblasti proudem osobního větrání odstranit (nebo jím proniknout) a zajistit tak čistý vzduch při vdechování.

Během uskutečněných experimentů s lidmi v Kodani a Singapuru bylo otestováno celkem 5 typů koncových prvků osobního větrání za simulování letních a zimních podmínek (teplota vzduchu v místnosti se pohybovala v rozmezí od 20 do 26 °C) [4, 5]. Výsledky ukázaly že chladicí účinek, a tím i pocit tepelného diskomfortu, je vnímán v důsledku proudění vzduchu pouze nepatrně.¹⁾ Vzduch přiváděný o teplotě 20 °C při teplotě v místnosti 23 °C byl hodnocen lidmi na 7 bodové stupnici tepelného vnímání jako mírně pod tepelnou rovnováhu a tepelná pohoda byla hodnocena jako přijatelná. Izotermicky přiváděný vzduch (teplota místnosti 23 °C) pak tepelnou pohodu osob vůbec neovlivnil. Poloha, nasměrování i průtok vzduchu (max. 55 m³/h při teplotě vzduchu v místnosti 26 °C) se ve zmíněných experimentech lišily podle přání a nastavení jednotlivých lidí.

URČUJÍCÍ KRITÉRIA PRO NÁVRH NOVÝCH KONCOVÝCH PRVKŮ OSOBNÍHO VĚTRÁNÍ

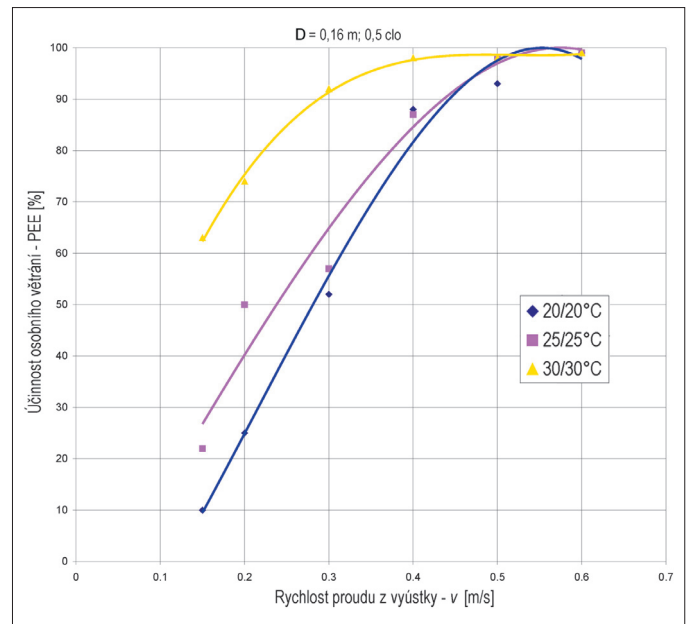
Schopnost proniknutí proudu z osobního větrání přes volný konvektivní proud zajišťující tak čistý vzduch do dýchací oblasti, aniž by bylo vyvoláno nežádoucí obtěžování průvanem (v případě nižších teplot vzduchu v místnosti – zimní podmínky), je podmíněna jeho průtokem, teplotou, směrem, a v neposlední řadě konstrukcí a umístěním koncového prvku.

Porovnáním výkonnosti různých koncepčních řešení koncových prvků se zabývala studie Melikova a dalších [5]. Čistý vzduch byl do oblasti dýchání přiváděn z různých směrů výústky o různých velikostech. Výsledky ukázaly, že výkonnost jednotlivých prvků se lišila podle jejich provedení a závisela na průtoku. Jejich charakteristiky však byly podobné. Zvýšení průtoku vzduchu od nulové hodnoty nemělo bezprostřední vliv na kvalitu nadechovaného vzduchu. Kvalita nadechovaného vzduchu začala u většiny prvků strmě narůstat teprve až po dosažení určitého průtoku, tj. až proud vzduchu z výústky osobního větrání pronikl mezní vrstvou volné konvekce kolem lidského těla a dýchací oblasti. Dále bylo ukázáno, že čím kratší je vzdálenost mezi koncovým prvkem a obličejem uživatele, tím vyšší je zpravidla kvalita nadechovaného vzduchu. Roli hraje také délka a šířka koncentračního jádra proudu vzduchu, které narůstají s velikostí (průřezem) koncového prvku. Prvky s větším průřezem na druhé straně vyžadují vyšší průtoky vzduchu pro zajištění stabilního proudění, a tím dražší provoz. Problémem slabého proudu vzduchu je, že se snáze naruší, např. vztlakovými silami, prouděním kolem těla, atd. Dalším kritickým faktorem je stupeň přisávání okolního znečištěného vzduchu do proudu čistého vzduchu z výústky osobního větrání. Čím více je proud turbulentní, tím intenzivnější je směšování a nižší kvalita nadechovaného vzduchu.

Za účelem zjistit kritéria pro návrh nových koncových prvků osobního větrání, byl na základě experimentů vykonaných ve speciální klimatizované komoře za izotermických podmínek (teplota proudu z výústky osobního

větrání byla rovna teplotě vzduchu v komoře) systematicky prozkoumána interakce těchto dvou proudů, beroucí v úvahu vliv výše zmíněných faktorů (rychlost a šířka jádra proudu vzduchu osobního větrání, vzdálenost mezi obličejem a koncovým prvkem osobního větrání, teplota v místnosti a tepelná izolace oděvu) [7]. Pro simulaci přirozené konvekce kolem lidského těla byla použita termální figurína v životní velikosti a proud vzduchu osobního větrání byl simulován kruhovými výústkami dvou různých průměrů, 80 a 160 mm. Jako ukazatel byla stanovena účinnost osobního větrání.

Účinnost osobního větrání (PEE – Personal Exposure Effectiveness) je definována jako poměr rozdílu koncentrací znečišťujících látek v odváděném vzduchu (z větraného prostoru) a ve vzduchu nadechovaném osobami k rozdílu koncentrací znečišťujících látek ve vzduchu odváděném a v přívodu vzduchu pro osobní větrání. Určuje tedy podíl vdechovaného čistého vzduchu z osobního větrání – účinnost osobního větrání může být maximálně 1.



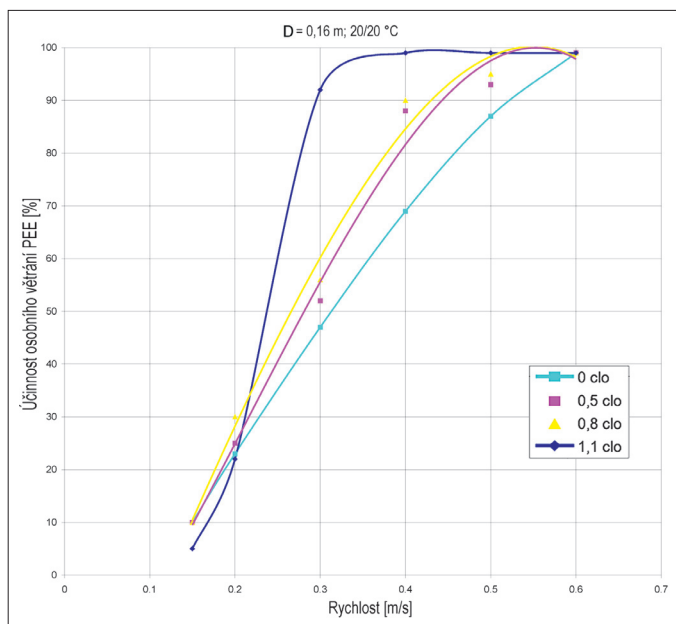
Obr. 1 Vliv teploty vzduchu v místnosti (20 až 30 °C) a rychlosti proudění vzduchu z výústky osobního větrání (0,15 až 0,6 m/s) na účinnost osobního větrání při konstantní tepelné izolaci oděvu 0,5 clo

Na obr. 1 je znázorněn vliv teploty vzduchu v místnosti a rychlosti proudění vzduchu z výústky osobního větrání o průměru 160 mm na účinnost osobního větrání při konstantní tepelné izolaci oděvu 0,5 clo. Jak si můžeme z grafu povšimnout, pro nižší teploty vzduchu v komoře je potřeba vyšších rychlostí ($v_m > 0,45$ m/s) k proniknutí čistého vzduchu do dýchací oblasti a zajištění tak vysoké účinnosti větrání (min. 95%). Čím vyšší je teplota vzduchu v komoře, tím nižší je rozdíl teplot, mezi teplotou povrchu figuríny a teplotou vzduchu v komoře, a tedy tím slabší je volný konvektivní proud kolem figuríny. K zajištění vysoké účinnosti je tedy potřeba menších rychlostí ($v_m > 0,3$ m/s). Pokud je však rychlost rovna či vyšší než 0,5 m/s, pak je účinnost osobního větrání nezávislá na teplotě vzduchu v komoře.

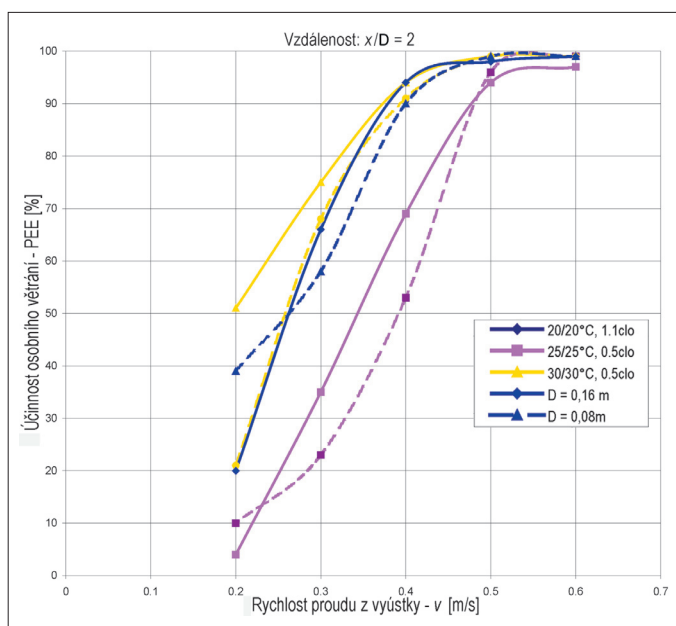
Na dalším grafu (obr. 2) je znázorněn vliv oblečení na účinnost větrání. Teplota v komoře je konstantní a proměnným parametrem je tepelná izolace oděvu. Opět zde můžeme vidět, že pokud se sníží rozdíl teplot mezi teplotou povrchu figuríny a teplotou vzduchu v komoře (tedy zvýší se tepelná izolace oděvu), tak je potřeba nižších rychlostí k zajištění vysokého stupně provětrání. Jmenovitě 0,3 m/s pro tepelnou izolaci oděvu 1,1 clo, a 0,4 m/s pro 0,8 clo. Jako v předchozím případě, i zde je patrná nezávislost účinnosti větrání na tepelné izolaci oděvu pro rychlosti vyšší než 0,5 m/s.

Závěrečný graf (obr. 3) zohledňuje vliv průměru výústky. Parametrem je jak teplota vzduchu v komoře a jemu odpovídající tepelná izolace oděvu,

¹⁾ Rychlost proudění vzduchu při experimentech byla nastavována v rozmezí 0,5 až 1,0 m/s, tak, aby odpovídala teplotě vzduchu v místnosti.



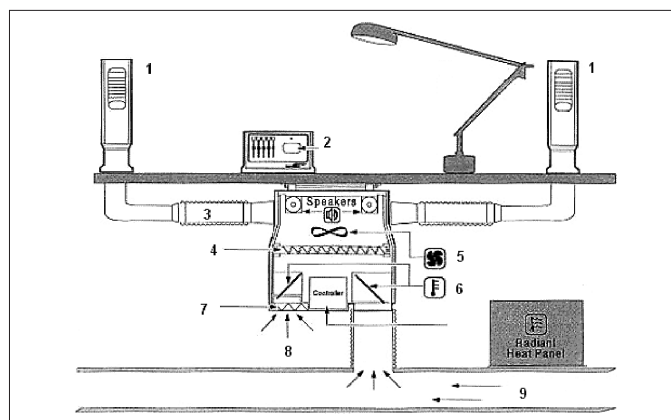
Obr. 2 Vliv tepelné izolace oděvu (0 až 1,1 clo) a rychlosti proudění vzduchu z vyústky osobního větrání (0,15 až 0,6 m/s) na účinnost osobního větrání při konstantní teplotě vzduchu v místnosti 20 °C



Obr. 3 Vliv průměru vyústky (šířka potenciálního jádra proudu) $D = 160$ a 80 mm), teploty vzduchu v místnosti (20 až 30 °C) a rychlosti proudění vzduchu z vyústky osobního větrání (0,15 až 0,6 m/s) na účinnost osobního větrání při konstantní vzdálenosti mezi vyústkou a obličejem figuríny ($x/D = 2$)

tak i průměr vyústky, a tedy šířka potenciálního jádra proudu (plné čáry představují výsledky účinnosti pro průměr vyústky 160 mm a přerušované pro 80 mm). Je zřejmé, že lepších výsledků je dosaženo v případě většího průměru, tedy 160 mm. A opět, nezávisle na průměru vyústky, je zajištěna vysoká účinnost větrání pro rychlosti větší než 0,5 m/s.

Na základě těchto výsledků byly vyvozeny následující závěry: vysoká účinnost osobního větrání (> 95 %) může být dosažena nezávisle na teplotě vzduchu v místnosti a tepelné izolaci oděvu, pokud rychlost proudu z vyústky je rovna alespoň 0,5 m/s a vzdálenost mezi figurínou a vyústkou není větší než 2 průměry vyústky. Mimo tyto podmínky byl prokázán pokles účinnosti osobního větrání, a to se zvyšující se vzdáleností a snižující se rychlostí osobního proudu, tepelnou izolací oděvu a teplotou vzduchu v místnosti.



Obr. 4 Schéma prvního typu osobního větrání v kancelářských prostorách, tzv. Personal Environmental Module (PEM), vyrobený firmou Johnson Controls
1 – koncové prvky, 2 – ovládání průtoku a teploty, 3 – flexibilní potrubí, 4 – elektrostatický filtr, 5 – ventilátor, 6 – směšovací klapky, 7 – hrubý filtr, 8 – oběhový vzduch, 9 – přívod čerstvého vzduchu

VÝVOJ NOVÉHO KONCOVÉHO PRVKU PRO OSOBNÍ VĚTRÁNÍ

První koncový prvek pro osobní větrání, vyrobený firmou Johnson Controls, byl navržen a otestován v roce 1997 Baumanem a spol. (obr. 4) pod označením „Personal Environmental Module (PEM)“ [8]. Jedná se o stolní vyústky instalované na zadních rozích stolu, připojené ze spodu flexibilním potrubím k systému osobního větrání. Pod stolem se nacházela směšovací komora, obsahující malý ventilátor, elektrostatický filtr a dvě směšovací klapky – jedna pro „oběhový vzduch“ nasávaný přes filtr z místnosti, druhá pak pro chladný čerstvý vzduch dodávaný venkovní větrací jednotkou podlahovými kanály. Účinnost osobního větrání, díky malým průřezům výustek a velké vzdálenosti od dýchací oblasti uživatele, a z toho vyplývající potřeba vyšších rychlostí proudění vzduchu (způsobující vysokou turbulenci proudu, přisávajícího okolní znečištěný vzduch v místnosti), byla velmi nízká (kolem 20 %).

Další vývoj a studie se zaměřily především na konstrukci koncových prvků z hlediska nejideálnějšího obrazu proudění v dýchací oblasti. V letech 2001 a 2002 Melikov a kol. vyvinul a otestoval hned několik nových koncových prvků: pohyblivé rameno (Movable Panel (MP)) (obr. 5), koncový prvek umístěný na přední hraně stolu (Desk Grill (DG)) (obr. 6) a koncový prvek umístěný na horní hraně monitoru (Computer Monitor Panel (CMP)) [5]. Nejlepší účinnost, až 70 %, z těchto testovaných prvků dosáhl koncový prvek umístěný na horní hraně monitoru počítače (CMP). Za neizotermických podmínek však účinnost klesá na pouhých 20 %.



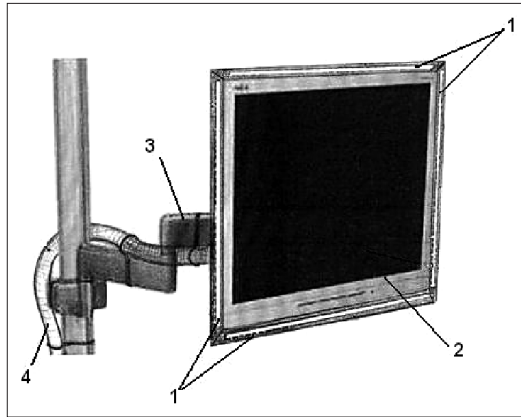
Obr. 5 Koncový prvek umístěný na pohyblivém ramenu (Movable Panel) umožňuje libovolné nasměrování proudu čerstvého vzduchu
Ovládací panel pro nastavení průtoku přiváděného vzduchu je pod deskou stolu (Melikov a kol., 2001)



Obr. 6 Vizualizace proudění z koncového prvku umístěného na přední hraně stolu (Desk Grill) kouřem a termální figurínou (Melikov a kol., 2002)



Obr. 7 Zdokonalený koncový prvek na otočném rameni (Round Movable Panel) představující nejvyšší dosaženou účinnost osobního větrání (až 95 % ve vzdálenosti 0,4 m od obličeje uživatele) (Bolashikov, Nikolaev, 2003)



Obr. 8 Návrh nového koncového prvku využitelného pro kancelářské prostory (ATD - Frame)
1 – výústky, 2 – LCD monitor, 3 – otočné rameno, 4 – přívod čerstvého vzduchu

Pro koncový prvek DG je charakteristické, že relativně malé průtoky vzduchu v rozsahu 10 až 20 m³/h postačují, aby osobní větrání začalo vylepšovat kvalitu vzduchu. Bylo ukázáno, že až 50 % nadechovaného vzduchu může tvořit čistý vzduch přiváděný osobním větráním a to již při průtoku 30 m³/h; zbývající 50% podíl má vzduch z místnosti. Tato výkonnost byla nezávislá na teplotě vzduchu v místnosti, která byla 20 a 26 °C, při teplotě vzduchu přiváděného osobním větráním 20 °C. Vyústka umístěná na konci pohyblivého ramene (MP), které zároveň slouží pro přívod vzduchu, byla označena Melikovem [5] jako koncový prvek s druhým nejvyšším potenciálem pro zlepšení kvality vzduchu. Jeho konstrukce, připomínající pracovní lampu, umožňuje nastavit směr proudu vzduchu v širokém rozsahu. Testy ukázaly, že výkonnost tohoto koncového prvku může být stejná nebo i vyšší ve srovnání s vyústkou na hraně stolu. Toho dosáhl v roce 2003 Bolashikov a kol., který navrhl a otestoval pohyblivé rameno s kruhovou vyústkou (Round Movable Panel (RMP)) (obr. 7), jejíž konstrukce umožňuje vyvinutí dlouhého jádra potenciálního proudění. Byl tak dosažen hlavní cíl osobního větrání – přivádět 100 % čerstvý vzduch do dýchací oblasti, vzdálené alespoň 0,4 m od koncového prvku. Při relativně malém průtoku, 36 m³/h, byla dosažená účinnost až 95 %.

Experimenty s lidmi na Dánské technické univerzitě však navzdory těmto optimistickým výsledkům fyzikálních měření ukazují, že mnoho lidí nemusí upřednostňovat některé koncové prvky (CMP, RMP) z ergonomického důvodu. Koncový prvek DG dokonce hodně lidí odmítlo z důvodu nepříjemného proudění vzduchu v oblasti břicha a omezení pracovního prostoru.

Na základě těchto poznatků byl v současné době navržen vzhledově přijatelnější koncový prvek osobního větrání využitelný v kancelářích s ohledem na co nejmenší narušení pracovního prostoru [7]. Návrh využil LCD monitoru s otočným ramenem. Vyústky osobního větrání tak byly začleněny kolem monitoru (obr. 8). Na základě tohoto návrhu a analýzy distribuce vzduchu byly vyrobeny a testovány tři prototypy.

První prototyp koncového prvku, ATD-Frame, byl navržen za účelem distribuovat vzduch z osobního větrání kolem celé obrazovky osobního počítače. Další dva koncové prvky, ATD-Side a ATD-Turned Sides, jsou variantami ATD-Frame, kde vyústky jsou buď pouze na dvou stranách obrazovky (vlevo a vpravo), přičemž přiváděný vzduch je ve směru kolmém k rovině obrazovky (ATD-Side), nebo jsou mírně pootočené kolem svislých os za účelem nasměrování proudů vzduchu z vyústek přímo do tváře uživatele.

Výkon vyvinutých koncových prvků byl testován za izotermických podmínek ve speciální klimatizované komoře s užitím termální figuríny. Figurína byla oblečena tak, aby tepelný odpor jejího oděvu odpovídal 1,1 clo pro teplotu vzduchu v komoře 20 °C a 0,5 clo pro teplotu 25 °C (zimní a letní podmínky). Pouze ATD-Frame byl studován i za neizotermických podmí-

nek, kdy teplota přiváděného vzduchu osobního větrání do vyústek byla o 5 °C vyšší, nebo nižší než teplota v komoře. Experiment byl vykonán pro tři průtoky vzduchu koncovým prvkem (10, 15 a 20 l/s) a tři vzdálenosti (0,3; 0,4 a 0,5 m) mezi koncovým prvkem a tváří figuríny pro každý průtok.

Nejvyšší účinnosti osobního větrání 83 % (účinnost celkového větrání²⁾ v tomto případě byla 5,4 x vyšší než účinnost ideálního větrání směřováním) bylo dosaženo koncovým prvkem ATD-Turned Sides za izotermických podmínek (20/20 °C – teplota vzduchu v místnosti/teplota proudu osobního větrání), průtoku 20 l/s a pro vzdálenost 0,3 m. Přibližně 70 % (účinnost celkového větrání byla 3,5 x vyšší než účinnost ideálního větrání směřováním) bylo dosaženo i pro vzdálenost 0,5 m při stejném průtoku. To je vysvětleno složením počátečních proudů z vyústí koncového prvku v jeden mohutný proud v určené

vzdálenosti. Pro ATD-Frame bylo dosaženo nejvyšší účinnosti 62 %. Nejhorší parametry vykazoval koncový prvek ATD-Side (54 %).

Výsledky z měření tepelných ztrát figuríny ukázaly nejvyšší chladicí účinek v případě ATD-Frame, kde byla nejvíce ochlazována hlava, paže a předloktí. Čím byl vyšší průtok vzduchu, tím větší byl chladicí efekt. Na výsledky testů nových koncových prvků pro osobní větrání navazují další studie založené na experimentech s lidmi. Ty by mohly vést ke zdokonalení celého systému, s lepším uplatněním v praxi.

Příspěvek vznikl za podpory DTU Lyngby, Dánsko a výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí.
Kontakt na autora: stepan.nosek@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Wyon, D. P.: 1996, *Individual microclimate control: required range, probable benefits and current feasibility*, Proc. of Indoor Air, Vol. 1, pp. 1067-1072
- [2] Bauman, F. S., Zhang, H., Arens, E.A., Benton, C.C.: *Localized Comfort Control with a Desktop Task Conditioning System: Laboratory and Field Measurements*, ASHRAE Transactions 1993, V.99, Pt.2, 1993
- [3] Bolashikov, Z., Nikolaev, L.: *Design and Evaluation of Air Terminal Devices for Personalized Ventilation: Physical Measurement and Human Subject Experiments*, M.Sc. Thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, 2003.
- [4] Kaczmarczyk, J.: *Human Response to Personalized Ventilation*, Ph.D. Thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, 2003.
- [5] Melikov, A. K., Cermak, R., Majer, M.: *Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices*, Energy and Buildings 34, pp. 829-836, 2002.
- [6] Homma, H.: *Free Convection Caused by Metabolic Heat Around Human Body*, Yoyohashi University of Technology, Japan, 1987
- [7] Nosek, Š.: *Personalized Ventilation: Airflow Interaction at the Breathing Zone and Development of Air Terminal Device for Office Application*, M.Sc. Thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, 2006.
- [8] Bauman, F., Baughman, A., Carter, G., Arens, E.: *A Field Study of Personal Environmental module Performance in Bank of America's San Francisco Office Buildings*, Center for Environmental Design Research, University of Kalifornia, 1997.
- [9] Čermák, R., Melikov, A.: *Osobní větrání, Vytápění, větrání, instalace*, 3/2005, str.199-202. ■

² Účinnost celkového větrání je definována jako poměr rozdílu koncentrací znečišťujících látek v odváděném vzduchu a přiváděném vzduchu k rozdílu koncentrací ve vzduchu nadechovaném osobami a vzduchu přiváděném. Při ideálním promíšení vzduchu (koncentrace jsou ve všech bodech prostoru stejné) je účinnost celkového větrání rovna 1.