

Využití některých poznatků o proudění v klimatizovaném prostoru

Utilisation of some notion about air flow in air conditioned space

Prof. Ing. Karel HEMZAL, CSc.
 ČVUT v Praze, FSI,
 Ústav techniky prostředí

Příspěvek uvádí některé experimentálně zjištěné údaje o turbulenci v proudech větracího vzduchu z výústek. Poskytuje podklady pro předpověď ochlazovacího účinku proudění vzduchu v klimatizovaném prostoru na člověka. Teze vycházejí z doporučení CEN pro hodnocení vnitřního prostředí ve větraných prostorách.

Klíčová slova: rychlost vzduchu, stupeň turbulence, průvan, mikroklíma

Presented are experimental data about turbulence in jets from ventilation air outlets. Results are useful for prediction of air movement cooling effect on human body in air conditioned space. Tezis are based on CEN recommendation for evaluation of indoor climate in ventilated spaces.

Key words: air velocity, turbulence intensity, draft, microclimate

MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU V PROSTORU

Rychlost proudění vzduchu v klimatizované místnosti je spolu s jeho teplotou hlavním činitelem, ovlivňujícím podmínky pro maximální tvořivou činnost člověka, subjektivně vnímané jako pohoda prostředí. Rychlost má spolu s teplotou dominantní vliv na teplo sdílené člověkem konvekcí, kterým se odvádí cca 40 % jeho tepelné produkce.

Rychlost je dána průměrnou hodnotou a stupněm turbulence. Měření průměrné rychlosti ve větraném a klimatizovaném prostoru patří k nejnáročnějším a nepracnějších úkonům kontroly stavu prostředí. Příčinou je stochasticky se měnící rychlost v důsledku turbulentních fluktuací rychlosti. Odečet údaje digitálního displeje termoanemometru nebo ručkového přístroje hraničí se šarlatánstvím. Zatlučené přístroje zase údaj zkreslují. Určení reprodukovatelných hodnot průměrných rychlostí vyžaduje přístroj s integrační dobou až 3 minuty.

Přístrojové vybavení k měření rychlosti by mělo vyhovovat ČSN ISO 7726 [2]. Kromě vhodného měřicího rozsahu 0,05 až 1 m/s a časové konstanty do 0,2 s je důležitou vlastností přístroje jeho schopnost či možnost průměrovat údaj rychlosti s dostatečnou přesností a směrová necitlivost. Protože je měřené proudění většinou neizotermní, musí být přístroj teplotně kompenzován. Dalším požadavkem je potlačení vlivu vlastní volné konvekce, neboť se většinou měří pod 0,2 m/s. Důležité je také potlačení vlivu sálání okolních ploch malým rozměrem čidla a velkou odrazivostí povrchu.

VYJÁDRĚNÍ VLIVU INTENZITY TURBULENCE NA ČLOVĚKA

Dosavadní poznatky o vlivu turbulence na tepelnou pohodu člověka, prosadily do hygienických norem **stupeň turbulence** Tu jako další činitel pohody [2]. Systematické experimenty P. O. Fanger a jiných autorů na Dánské technické universitě v Kodani [3] ukázaly, že riziko nadměrného ochlazování lidí (průvan) závisí na stupni turbulence proudícího vzduchu Tu , relativní časově průměrné rychlosti pohybu vzduchu a člověka v_{ar} , a na teplotě vzduchu t_a . Pravděpodobné procento nespokojených osob (vykonávajících lehkou práci převážně vsedě) v důsledku průvanu lze určit ze vztahu

$$PD = (34 - t_a) \cdot (v_{ar} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_{ar} \cdot Tu + 3,14) \quad (\%)$$

Ze vztahu vyplývá, že nepříjemné místní konvektivní ochlazování člověka (pocit průvanu) může být způsobeno nepříznivou kombinací tří veličin:

- nízkou teplotou vzduchu,

- velkou rychlostí proudění vzduchu,
- velkým stupněm intenzity turbulence.

Stupeň turbulence

$$Tu = 100 \cdot SD / v_{ar} \quad (\%)$$

je dán poměrem **standardní odchylky** SD **pulsací rychlostí** v od její průměrné hodnoty v čase v_{50}

$$SD = v_{84} - v_{50} = v_{50} - v_{16}$$

a relativní rychlosti proudění kolem člověka $v_{ar} = v_{50}$. Indexy označují % doby měření, po kterou je rychlost menší nebo rovna rychlosti dané a odpovídají pravděpodobnosti výskytu rychlostí (nebo rychlostí menších) po 84, 50 a 16 % celkové doby měření. Reprodukovatelné výsledky lze dosáhnout při době měření alespoň 3 minuty.

Charakteristiky fluktuací jsou vzájemně vázané. Vliv kolísání rychlosti na počet nespokojených PD je závislý na průměrné rychlosti a teplotě vzduchu. Intenzita ochlazování těla konvekcí podle výše uvedeného vztahu může být modifikována zavedením pravděpodobné (standardní) odchylky fluktučních rychlostí od rychlosti průměrné

$$SD = v_{ar} \cdot Tu / 100 \quad (\text{m/s})$$

Vyžitím této úpravy vztahu pro vyjádření předpokládaného počtu nespokojených PD k hodnocení rizika průvanu, které může vyvolávat přívod vzduchu různými výústkami se budeme dále zabývat.

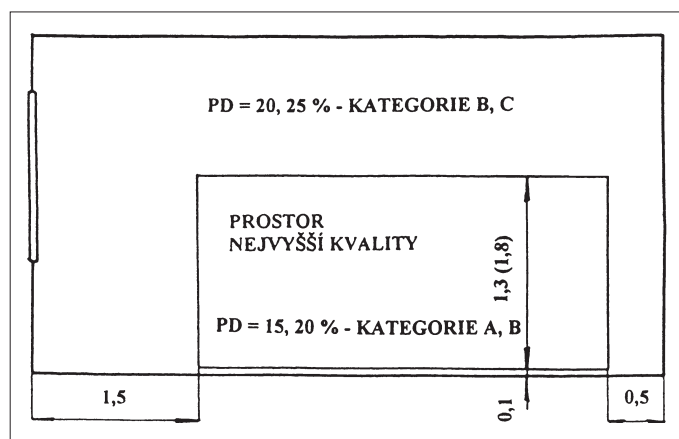
Doporučení CEN [1] definuje pro klimatizovaný prostor **tři kategorie tepelného prostředí s ohledem na průvan** (tab. 1)

- A s předpokládanými 15 % nespokojených, vhodnou pro pobytovou oblast,
- B s $PD = 20$ %,
- C s $PD = 25$ %, přípustné vně pobytové oblasti.

Pobytová oblast (obr. 1) je vymezena vzdálenostmi od oken (vnějších zdí), vnitřních zdí, stropu a podlahy a měla by být dohodnuta projektantem s investorem. Na rozdíl od zobrazeného doporučení CEN [1], které je vhodné pro distribuci vzduchu směřováním, je pobytová oblast *při přívodu vzduchu zaplavováním* podle [4] přitisknuta k podlaze, neboť největší rychlosti proudu přiváděného vzduchu jsou cca 2 cm nad podlahou.

Tab. 1 Tři kategorie tepelného prostředí a jim přiřazené indexy PPD, PMV a PD podle doporučení CEN [1]

| Kategorie tepelného prostředí | Tepelný stav těla | | Místní diskomfort | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| | PPD (%) | ± PMV | PD (%) v důsledku | | | |
| | | | Průvanu | Gradientu teplot | Teploty podlahy | Asymetrie sálání |
| A | 6 | 0,2 | 15 | 3 | 10 | 5 |
| B | 10 | 0,5 | 20 | 5 | 10 | 5 |
| C | 15 | 0,7 | 25 | 10 | 15 | 10 |

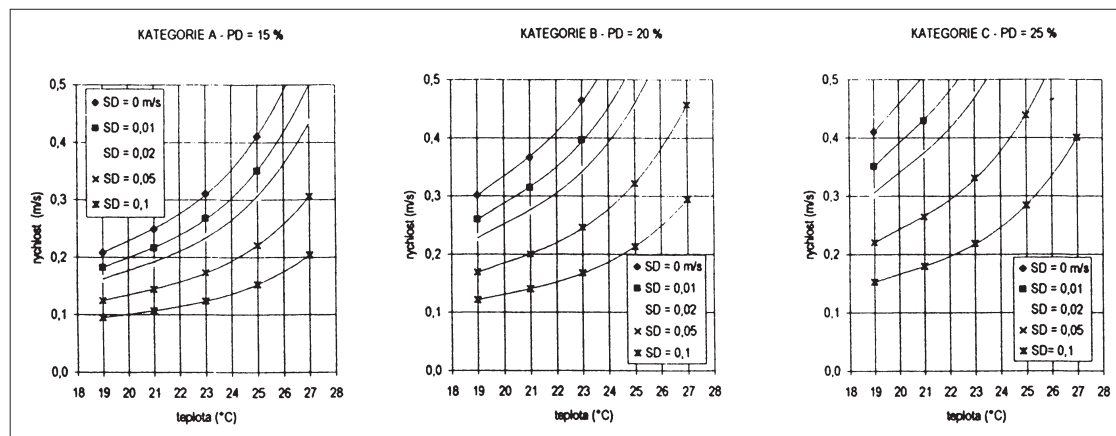


Obr. 1 Definice pobytové oblasti a přiřazené kategorie tepelného prostředí s ohledem na průvan. Výška 1,8 m pro stojící a 1,3 m pro sedící osoby

Pravděpodobnou příčinou nepříjemného pocítování turbulence je stochastický charakter fluktuací (pulsací) rychlosti. Pulsace proudícího vzduchu dráždí nervové kožní buňky, citlivé na teplotu a zvětšují pocit chladu. Studium mezní vrstvy na povrchu těla potvrzuje známý jev, že při rostoucí turbulenci se její tloušťka zmenšuje a gradient rychlosti v ní roste, i když je rychlost vnějšího proudění stejná. Tenká mezní vrstva nebrání pronikání vířících částic chladného vzduchu až blízko k pokožce, což způsobuje zvýšení přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_K \sim -\lambda_a \left(\frac{dv}{dy} \right)_{y=0}$$

K hygienickému posouzení proudového pole je třeba ještě vzít v úvahu, že poměry v místnosti jsou ve výši hlavy důležitější, než u podlahy. Vliv má i směr proudění. Je např. lépe, když v divadle nebo v jiném shromažďovacím sále proudí vzduch směrem k obličeji než na týl.



Obr. 2 Přípustné průměrné rychlosti vzduchu v závislosti na místní teplotě vzduchu a standardní odchylce pro tři kategorie tepelného prostředí

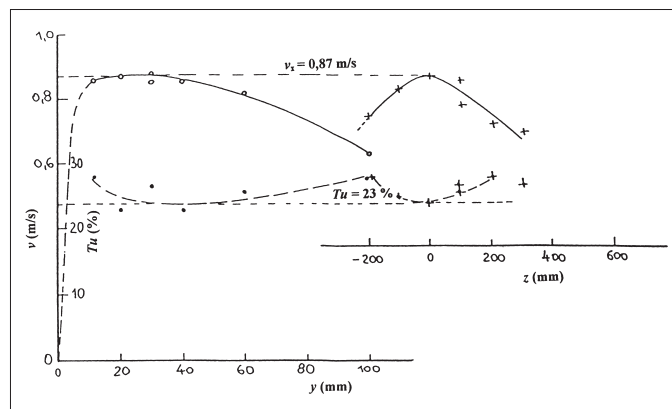
V obr. 2 jsou uvedeny závislosti mezi střední rychlostí a teplotou vzduchu při proměnné standardní odchylce, která vyvolá (statisticky) nespokojenost u uvedených 15, 20 resp. 25 % přítomných sedících osob (s produkcí citelného tepla asi 70 W/m²) při teplotě stěn shodné s teplotou vzduchu $t_r = t_a$.

Z průběhu křivek je zřejmé, že pro stejnou rychlost proudění při intenzivnější turbulenci je nutno zvýšit teplotu vzduchu.

MĚŘENÍ PROUDOVÝCH POLÍ

Od měření proudových polí v laboratoři se očekávají podklady pro projektanty k dimenzování výustek, sloužících k nucenému přívodu vzduchu do klimatizovaných místností. Dodavatelé výustek dosud poskytují převážně jen údaje o maximálních (časově průměrných) rychlostech v ose proudů.

Příkladem výsledku zjišťování maximální rychlosti je rychlostní profil v obr. 3. Jde o proud z vířivé podstropní výústky, kde vrchol rychlostního profilu určuje osovou rychlost. Současně je vynesena průběh změn stupně turbulence.

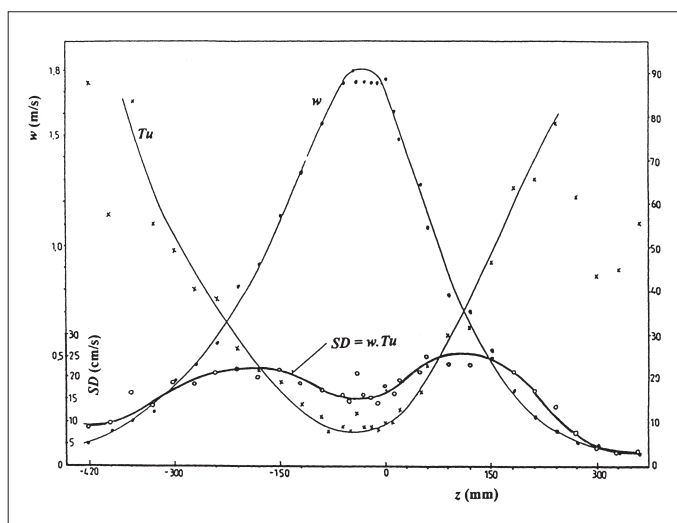


Obr. 3 Příklad rychlostního profilu a profilu Tu v proudě z vířivé výústky, šířícím se podél stropu

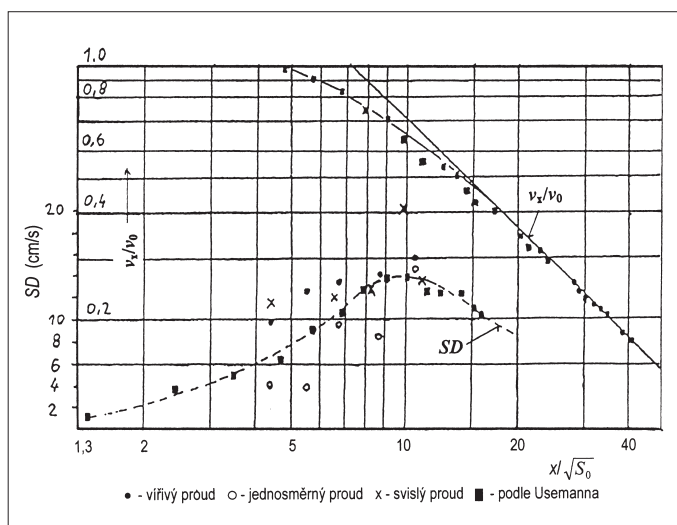
V obr. 4 jsou naměřené charakteristické údaje v proudě z kruhové trysky. Je zřejmá protichůdnost rychlosti a stupně turbulence. Zajímavý je průběh standardní odchylky s maximy v inflexních bodech rychlostního profilu a největší hodnotou $SD = 20$ cm/s.

V obr. 5 je vynesena průběh osové rychlosti ve svislém proudě z vířivé výústky (s lamelami natočenými vodorovně) a standardní odchylky podél proudě, která dosahuje maxima 0,14 m/s a poté se vzdáleností klesá. Zobecnění by vyžadovalo systematické proměření proudového pole do větší vzdálenosti.

Provozní měření při kontrole činnosti distribuce vzduchu instalovaných klimatizačních spočívá ve vyhledání maximální rychlosti v kritickém místě proudového pole z výusti v pobytové oblasti.



Obr. 4 Příklad rychlostního profilu a profilu Tu v proudu z tryskové výústky



Obr. 5 Profil změny osové rychlosti a standardní odchylky podél osy různě směřovaného proudu z vířivé výústky

Po předběžné sondáži lze systematické měření soustředit na zúžený prostor (v ose pod svisle vyfukující stropní výústí nebo podél stěny v proudu k ní přílnutém, nebo u podlahy při zaplávání).

V obr. 6 jsou výsledky měření u podlahy a v prostoru s přívodem vzduchu zapláváním z nízkoimpulsní stěnové výústky fy. Krantz, umístěné pod stropem (rychlost do 0,2 m/s) vzduchem o 6 K chladnějším než je uprostřed místnosti. V tab. 2 je vyhodnoceno měření ve třech místech nad podlahou.

Hodnoty $PD = 9$ až 14 % ukazují, že je splněna podmínka zařazení pobytové oblasti do kategorie A, i když měření těsně nad podlahou (2 cm) by možná ukázalo větší rychlosti.

Tab. 2 Charakteristiky zaplávacího proudu u podlahy ze stěnové výústky (panelu) s malou výstupní rychlostí < 0,2 m/s (podle F. Sodece, fa. Krantz – Aachen) podle údajů v obr. 6

| t_a | °C | 24 | 24 | 24 |
|----------|-----|-------|-------|-------|
| v_{ar} | m/s | 0,13 | 0,18 | 0,2 |
| Tu | % | 26 | 14 | 18 |
| SD | m/s | 0,034 | 0,025 | 0,036 |
| PD | % | 9 | 11 | 14 |

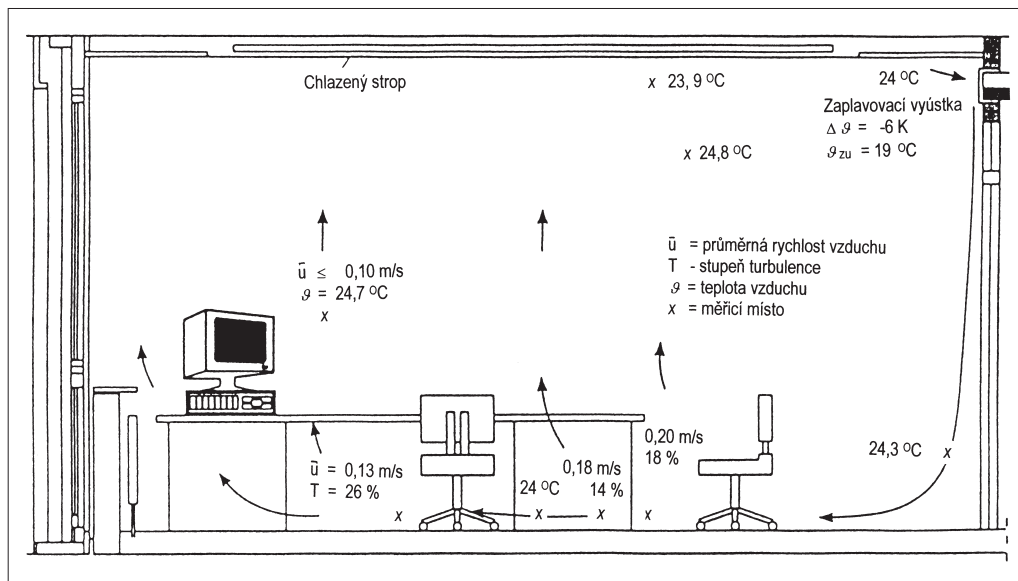
ZÁVĚRY

Dodržení teploty a rychlosti proudů vzduchu z výústek nemusí ještě zajistit bezproblémovou instalaci. V provozu může být příčinou nespokojenosti osob místní zvýšené ochlazování způsobené vyšší turbulencí.

Výrobci výústek by měli uvádět v projekčních podkladech také některou z charakteristik turbulence, stupeň turbulence nebo standardní odchylku.

Při kontrole činnosti komfortní klimatizace by mělo být měření stupně turbulence jedním z úkonů. Vhodné jsou přístroje, které odpovídají ČSN ISO 7726 a jsou „přátelské“ k uživateli tj. udávají zpracované výsledky okamžitě. Příkladem je Thermo-Air 3 fy. Schiltknecht.

Téma bylo předneseno na konferenci Klimatizace a větrání 2002 dne 29. 1. 2002.



Obr. 6 Rychlosti, teploty a stupeň turbulence při zaplávacím přívodu vzduchu stěnovou výústkou (v kombinaci s chladičím stropem – podle fy. Krantz)

Literatura:

- [1] CEN Report CR 1752:1998: **Ventilation for buildings** – Design criteria for the indoor environment
- [2] ČSN ISO 7726 **Teplotné prostředí**. Přístroje a metody měření fyzikálních veličin. 1993
- [3] Fanger P.O. aj.: **Turbulence a průvan**. ZTV 4/1989, Academia Praha
- [4] Skistad H. et al: **Displacement ventilation in non-industrial premises**. REHVA Guidebook No. 1. 2001.