

Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Měření tepelného prostředí se sálavým chladicím stropem



Ústav techniky prostředí

Measurement of Indoor Thermal Environment with Radiating Cooling Ceiling

Recenzent
 prof. Ing. František Drkal, CSc.

Sálavý přenos tepla mezi člověkem a okolím v porovnání s konvekčním přenosem se jeví výhodným jak z hlediska vytvoření tepelné pohody tak z hlediska spotřeby energie. Na tepelnou pohodu má totiž výrazný vliv povrchová teplota okolních ploch. V prostoru s chladicím stropem lze udržovat poněkud vyšší teplotu vzduchu, než je tomu u klimatizačních systémů s konvekčním přenosem tepla, při zachování stejné úrovně tepelného komfortu. Zmíněný fakt má za následek úsporu energie pro chlazení venkovního vzduchu. Sálavý způsob chlazení je výhodný i z dalších hygienických hledisek, neboť ho neprovázejí nežádoucí účinky, jakými jsou hluk, nebo případný průvan.

Klíčová slova: sálavé chlazení, chladicí strop, tepelný komfort, tepelné prostředí

Radiant heat transfer between human being and the environment, in comparison to the convection heat transfer appears to be advantageous both from the point of view of creating the thermal comfort and the energy consumption. It is because the thermal comfort is markedly influenced by the surface temperature of other surfaces. In a space with cooling ceiling it is possible to maintain a slightly higher air temperature than at air conditioning systems with convection heat transfer, and achieve the same level of thermal comfort. The mentioned attribute results in energy saving for indoor air cooling. The radiant way of cooling is advantageous even from the point of view of further hygienic aspects because it is not accompanied by undesirable impacts as noise, or possible draught.

Key words: radiant cooling, cooling ceiling, thermal comfort, thermal environment

Pro experimentální stanovení parametrů tepelného prostředí v prostoru klimatizovaném chladicím stropem bylo navrženo a sestaveno měřicí zařízení. Cílem měření bylo vyhodnocení podmínek tepelného komfortu osob v takto klimatizovaném prostoru, vč. proměření vertikálních teplotních profilů. Výsledky byly využity i pro stanovení součinitele přestupu tepla konvekcí podél chladicího stropu.

1. TEPELNÝ KOMFORT V PROSTORU S CHLADICÍM STROPEM

Hodnotícím kritériem pro tepelnou pohodu v prostoru je operativní teplota t_o , která respektuje kromě teploty vzduchu t_a i střední radiační teplotu t_r a rychlost proudění vzduchu w_a . Operativní teplota je jednotná teplota uzavřeného černého prostoru, ve kterém by tělo sdílelo radiaci a konvekci stejně tepla, jako ve skutečném nehomogenním prostředí a vypočítá se podle vzorce

$$t_o = At_a + (1 - A)t_r \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

kde A je hodnota závislá na relativní rychlosti proudění vzduchu (viz [5]). Při rychlostech proudění vzduchu w_a pod 0,2 m/s lze nahradit operativní teplotu výslednou teplotou t_g , měřenou kulovým teploměrem

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \cong t_g \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Z uvedeného vyplývá, že na tepelnou pohodu má výrazný vliv střední radiační teplota t_r . V prostoru s chladicím stropem lze tedy udržovat poněkud vyšší teplotu vzduchu, než je tomu u klimatizačních systémů s konvekčním přenosem tepla, při zachování stejné úrovně tepelného komfortu.

Zmíněný fakt má za následek výraznou úsporu energie související s chlazením venkovního vzduchu.

Podle ISO Standard 7730 [5] se pro hodnocení tepelného komfortu používá ukazatele tepelného pocitu lidí PMV (Predicted Mean Vote). Ukazatel PMV se vyhodnocuje pro aktuální parametry prostředí (t_a , t_r , w_a , ϕ), pro různé druhy lidské činnosti (energetický výdej) M (W/m^2) a pro různé druhy tepelného odporu oděvu I_{cl} ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$). Subjektivní pocity (zima – horko) byly číselným hodnotám ukazatele PMV přiřazeny na základě statistických šetření, které spočívají v dotazování většího počtu osob.

Pro dodržení tepelné pohody člověka v daném prostoru se doporučuje jako přijatelné, aby procentuální podíl nespokojených osob s daným tepelným stavem PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) byl menší než 10 %, což odpovídá následujícím hodnotám PMV

$$-0,5 \leq PMV \leq +0,5 \quad (3)$$

1.1 Operativní teplota vs. hodnocení tepelného pocitu PMV

V klimatizovaném prostoru s chladicím stropem a zdrojovým větráním lze předpokládat rychlost proudění vzduchu w_a v pásmu pobytu osob do 0,2 m/s. Tuto hodnotu prakticky nelze, při distribuci vzduchu zdrojovým větráním, překročit [7].

Jak bylo výše popsáno, pro hodnocení tepelného komfortu s použitím operativní teploty t_o se vliv rychlosti proudění, pro $w_a \leq 0,2$ m/s, zanedbává. V případě hodnocení ukazatelem tepelného pocitu osob PMV [4, 5] vstupuje do výpočtu součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu těla, který je ovlivněn právě rychlostí proudění vzduchu w_a .

Na obr. 1 je znázorněna vzájemná závislost obou zmiňovaných veličin $PMV = f(t_o)$ pro dané okrajové podmínky (I , M , ϕ) a pro rychlosti proudění vzduchu $w_a = 0$ a 0,2 m/s.

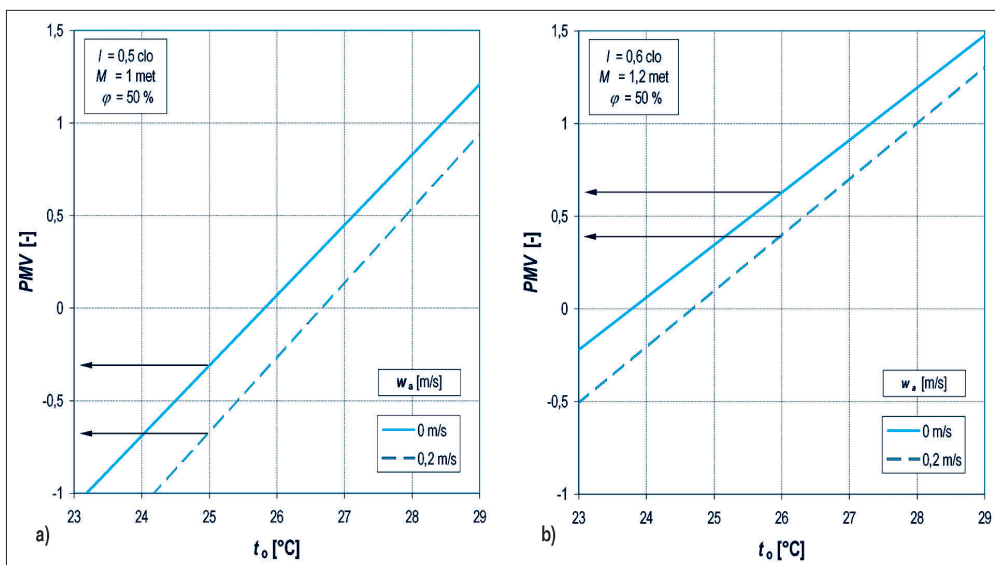
Cílem analýz bylo zjistit, zda v prostoru s chladicím stropem zanedbání rychlosti proudění w_a nezpůsobuje výrazný rozptyl tepelného pocitu PMV .

Z grafu na obr.1 zjistíme, že bude-li t_o určena ze vztahu (2) se zanedbáním rychlosti proudění w_a (do 0,2 m/s), bude ve skutečném prostředí o rychlosti $w_a = 0-0,2$ m/s tepelný pocit PMV rozdílný. Například pro okrajové podmínky dle obrázku 1a (velmi lehký oděv 0,5 clo, uvolněné sezení 1 met)

- pro $t_o = 25^\circ\text{C}$ a $w_a = 0$ m/s bude $PMV = -0,3$ (neutrálně),
- pro $t_o = 25^\circ\text{C}$ a $w_a = 0,2$ m/s bude $PMV = -0,7$ (mírné chladno),

pro okrajové podmínky dle obrázku 1b (lehký oděv 0,6 clo, práce v sedě 1,2 met)

- pro $t_o = 26^\circ\text{C}$ a $w_a = 0$ m/s bude $PMV = +0,63$ (mírné teplo),
- pro $t_o = 26^\circ\text{C}$ a $w_a = 0,2$ m/s bude $PMV = +0,38$ (neutrálně).



Obr. 1 Ukazatel tepelného pocitu osob PMV v závislosti na operativní teplotě t_o

a) tepelný odpor oděvu 0,5 clo a energetický výdej 1 met; b) tepelný odpor oděvu 0,6 clo a energetický výdej 1,2 met

1.2 Riziko vzniku průvanu

Pro hodnocení pocitu obtěžování průvanem se používá ukazatel DR (Draft Risk), který vyjadřuje procentuální podíl lidí, u kterých se předpokládá tento pocit. Pro zachování tepelného komfortu musí být obtěžování průvanem omezeno a doporučuje se, aby stupeň obtěžování průvanem byl

$$DR < 15\% \quad (4)$$

2. PŘIROZENÉ PROUDĚNÍ PODÉL CHLADICÍHO STROPU

V prostoru s chladicím stropem dochází k přenosu tepla radiací a konvekcí. Konvekční tok tepla vznikající podél chladicího stropu je funkcí povrchové teploty panelu a teploty vzduchu proudícího podél stropu. Nejspolehlivější výsledky součinitele přestupu tepla konvekcí h_c lze získat tehdy, když je teplota proudu vzduchu měřena v blízkosti oblastí vzniku vyvinutého proudění pod stropem (obvykle 5 až 10 cm).

Avšak velmi málo literatury zabývající se přestupem tepla popisuje uvedený děj na základě tohoto faktu. Většina literatury vztahuje součinitel přestupu tepla k teplotě v pásmu pobytu osob, tj. asi 1,7 m nad podlahou.

V některých případech může být teplota vzduchu proudícího kolem stropu (tím i přestup tepla) výrazně ovlivněna konvekčními proudy v místnosti vznikajícími podél zahřátých ploch (oken) a není shodná se střední teplotou vzduchu měřenou v pásmu pobytu osob (do výše 1,7 m). Pro zpřesnění podmínek přenosu tepla byl přestupu tepla podél chladicího stropu podroben experimentální analýze a byl stanoven součinitel přestupu tepla konvekcí h_c .

2.1 Výsledky publikovaných experimentů

Volná konvekce na vodorovných stěnách není tak často diskutovaným tématem, jako například konvekce vznikající podél stěn svislých. Nicméně v odborné literatuře zabývající se konvekcí [3] lze najít vztahy pro výpočet Nusseltova kritéria a některé publikace [1] udávají i vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí h_c .

V tab. 1 jsou uvedeny některé empirické vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí h_c podél vodorovné chladné plochy orientované směrem dolů (chladicí strop). Jak dokazuje graf na obr. 6 výsledky publikovaných experimentů se poměrně liší.

Charakteristickým rozměrem L pro výpočet Rayleighova kritéria je poměr plochy A_{str} ku obvodu chladicího stropu O

$$L = \frac{A_{str}}{O} \quad [m]$$

vztažná teplota pro určení fyzikálních parametrů je definována jako střední hodnota teploty chladicího stropu a teploty vzduchu v pásmu těsně pod stropem

$$T = \frac{(T_{a,\infty} + T_{str})}{2} \quad [K]$$

Tab. 1 Hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí h_c podél vodorovné stěny (ohřívána směrována nahoru, ochlazovaná směrována dolů, turbulentní proudění)

Rayleighovo kritérium $Ra = Gr \cdot Pr$

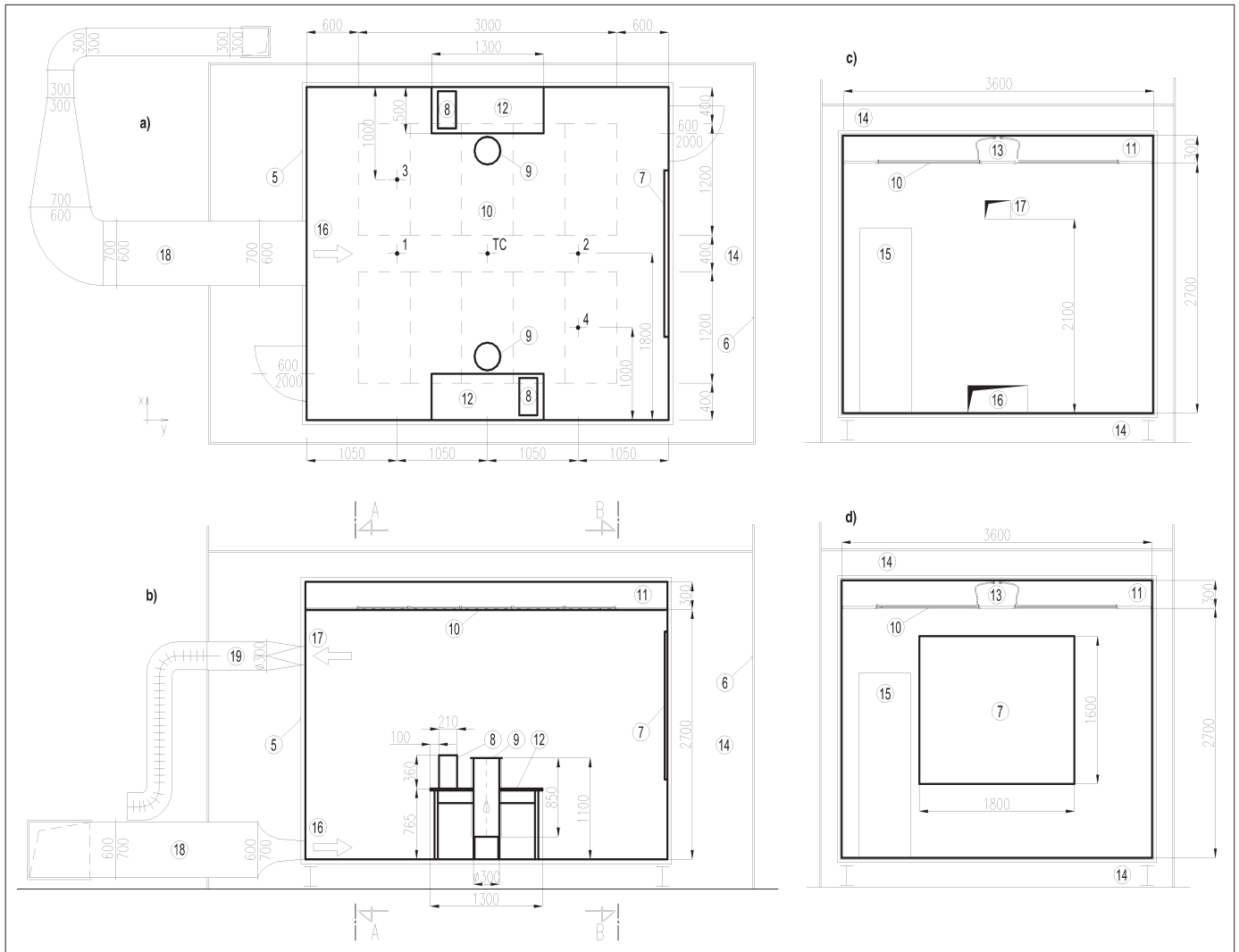
Autor	h_c [W/m ² K]	Platnost	Zdroj
ASHRAE	$1,52 \Delta t^{0,33}$	$10^3 < Ra < 10^{12}$	[1]
Awbi	$2,175 \Delta t^{0,308}$	$7 \cdot 10^3 < Ra < 5 \cdot 10^{10}$	[2]
Khalifa, Marshall	$2,27 \Delta t^{0,24}$	–	[6]
Zweifel	$1,87 \Delta t^{0,33}$	–	[9]
Zmrhal	$1,64 \Delta t^{0,34}$	$2 \cdot 10^3 < Ra < 10^9$	[8]

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimenty související s řešením daného tématu byly prováděny v měřicí komoře umístěné v laboratořích Ústavu techniky prostředí. Měřicí komora umístěná ve zkušební místnosti byla vybudována během předešlých let a slouží k nejrůznějším experimentům, souvisejícím se studiem stavu prostředí v klimatizovaných místnostech.

Výsledky získané experimentem popsáním v následujících odstavcích poslouží k vyhodnocení následujících cílů měření

- stanovení podmínek tepelného komfortu osob v prostoru s chladicím stropem,
- vyhodnocení teplotních profilů v místnosti s chladicím stropem,
- stanovení součinitele přestupu tepla konvekcí h_c podél chladicího stropu.



Obr. 2 Schéma měřicí komory a uspořádání experimentu v měřicí komoře – a) půdorys, b) řez komorou, c) řez A-A, d) řez B-B

TC – Indoor flow system

1–4 – Teplotní čidla

5 – Měřicí komora

6 – Zkušební místnost

7 – Model okna 0–500 W

8 – Model počítače 120 W

9 – Model člověka 60 W

10 – Chladicí strop

11 – Podhledová konstrukce

12 – Stůl

13 – Rozvod chladicí vody

14 – Meziprostor

15 – Dveře do komory

16 – Přívodní otvor 700 x 200

17 – Odváděcí otvor 300 x 200

18 – Přívodní potrubí

19 – Odváděcí potrubí

3.1 Měřicí komora

Prezentované experimenty byly uskutečňovány v měřicí komoře o rozměrech 4,2 x 3,6 x 2,7 m vybavené chladicím stropem (obr. 2). Celková plocha chladicího stropu činí 7,2 m², což představuje 48% pokrytí stropu. Měřicí komora byla napojena na přívod větracího vzduchu, jehož parametry jsou upravovány v klimatizační jednotce. Větrání komory je řešeno zaplavovacím systémem jednou výustí 0,7 x 0,2 m umístěnou v ose přední stěny u podlahy. Odváděcí otvor o rozměrech 0,3 x 0,2 m je umístěn pod stropem na stejné stěně jako otvor přívaděcí. Výfuk vzduchu je vyveden do prostoru laboratoří. Měřicí komoru obklopuje uzavřený zkušební prostor, do kterého lze přivádět upravený vzduch z klimatizační jednotky a vytvořit tak požadované okrajové podmínky pro experimenty. Navíc je komora dobře tepelně izolovaná (30 mm polystyren).

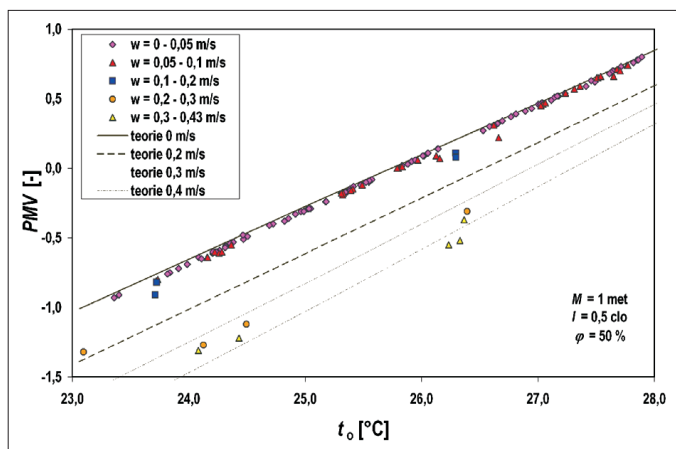
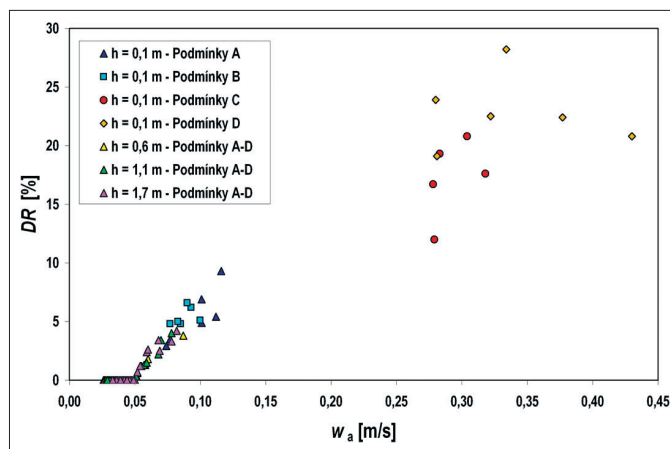
Pro účely experimentu byla měřicí komora vybavena vnitřními zdroji tepla (2 modely člověka, 2 modely počítače a model okna). K modelování vnitřní

zastíněné plochy okna, zahřáté sluneční radiací, byl vytvořen otopný panel. Model okna tvoří elektrické panely, které byly z praktických důvodů překryty tabulí z ocelového pozinkovaného plechu tloušťky 1 mm.

Pro experimenty byla zvolena povrchová teplota okna 40 °C, což odpovídá elektrickému příkonu 160 W.

K modelování citelné tepelné zátěže od osob pobývajících v prostorách byl vyroben zjednodušený model člověka, tvořený ocelovým válcem na podstavci. Válec je vytvořen tak, aby podél něj docházelo k přirozenému proudění vzduchu. Uvnitř válce byla umístěna žárovka o výkonu 60 W. Tepelná zátěž od počítače s monitorem byla modelována plechovou skříní skutečného počítače, uvnitř které byly umístěny dvě žárovky o výkonu 2 x 60 W.

Při měření bylo použito dvou takových modelů. Uspořádání měření je znázorněno na obr. 2a.

Obr. 3 Ukazatel tepelného pocitu $PMV = f(t_o)$ Obr. 4 Naměřené hodnoty stupně obtěžování průvanem $DR = f(w_a)$

3.2 Vertikální rozložení teplot v prostoru, měření tepelného stavu prostředí

Vertikální teplotní profily byly měřeny ve čtyřech osách měřicí komory (obr. 2a – umístění 1, 2, 3 a 4). Pro tento účel byly vyrobeny speciální vícenásobné teplotní sondy s teplotními čidly Pt100 o malých rozměrech (1,6 x 3,2 x 1,0 mm) umístěnými na drátových stojanech. Na každém stojanu bylo umístěno celkem 10 čidel pro měření teploty vzduchu. Pro shromažďování dat byla použita měřicí ústředna typu Ahlborn ALMEMO 5590-3.

K měření parametrů tepelného stavu prostředí byl uprostřed místnosti instalován měřicí systém pro měření v interiérech „Indoor Flow System“ firmy Dantec (všesměrový snímač 54T21 pro měření malých rychlostí proudění vzduchu) v kombinaci s kulovým teploměrem (obr. 2a – umístění TC). Parametry tepelného komfortu v poloze TC (teplota vzduchu t_a , výsledná teplota t_g , rychlost vzduchu w_a a intenzita turbulence Tu) byly měřeny ve čtyřech výškách místnosti – 0,1; 0,6; 1,1 m; a 1,7 m nad podlahou a to vždy během ustálených podmínek v měřicí komoře, které byly během měření průběžně monitorovány.

Okrajové podmínky měření jsou uvedeny v tab. 2.

Pro měření výkonových parametrů potřebných k vyhodnocení experimentu byla měřena teplota přiváděného vzduchu (tab. 2). Teplota vnitřního vzduchu byla stanovena z naměřených vertikálních profilů (obr. 5), navíc byla měřena teplota vzduchu na odvodu. V okolí komory bylo rozmístěno několik čidel pro měření teploty vzduchu v meziprostoru a rovněž byla kontrolována teplota vzduchu v podhledové konstrukci. Pro měření výkonu chladicího stropu byla do potrubního systému chladicí vody instalována čidla Pt100 pro měření teploty přiváděné a vratné vody a průtokoměr.

Tab. 2 Podmínky měření

Podmínky	Tepelná zátěž					Větrání		Teplota přiváděného vzduchu			Podíl chladicího stropu na odvodu tepelné zátěže		
	Okno	Osoby	PC	Celková tepelná zátěž		I	Průtok	1	2	3	1	2	3
				[W]	[W/m ²]								
A	0	120	240	360	23,81	2,45	115	23,3	26,1	27,9	89	94	98
B	160	120	240	520	34,39	2,45	115	22,2	23,4	25,3	72	90	99
C	160	120	240	520	34,39	4,90	210	22,7	23,5	26,0	63	72	78
D	160	120	240	520	34,39	7,35	310	21,7	23,8	25,9	50	68	79

4. VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

4.1 Tepelný komfort

Zjištěné veličiny tepelného stavu prostředí při měřeních jsou zaznamenány v grafu na obrázku 3 formou prezentace závislosti $PMV = f(t_o)$. Měření probíhala převážně při rychlostech w_a blízkých nule, pouze při zvýšeném průtoku vzduchu byly v blízkosti přiváděcí výstky vyhodnoceny stavy o vyšších hodnotách w_a .

Pro přehlednost byly do grafu na obr. 3 zakresleny i teoretické funkční závislosti PMV popsané v odstavci 1.1.

Riziko vzniku průvanu

Z měření tepelného stavu prostředí byl vyhodnocen stupeň obtěžování průvanem DR (ISO Standard 7730 [5]), který vyjadřuje procentuální podíl lidí, u kterých se předpokládá vznik tohoto nežádoucího pocitu. Na obr. 4 jsou zobrazeny hodnoty stupně obtěžování průvanem DR v závislosti na rychlosti proudění vzduchu w_a , zjištěné pro všechny zkoumané případy.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že v prostoru s chladicím stropem kombinovaném se zdrojovým větráním vznik průvanu prakticky nehrozí ($DR < 5\%$) ve výškách 0,6; 1,1; 1,7 m nad podlahou. Zvyšováním průtoku vzduchu může dojít ke vzniku lokálního diskomfortu vlivem pocitu průvanu zejména v oblasti kotníků ($h = 0,1$ m nad podlahou).

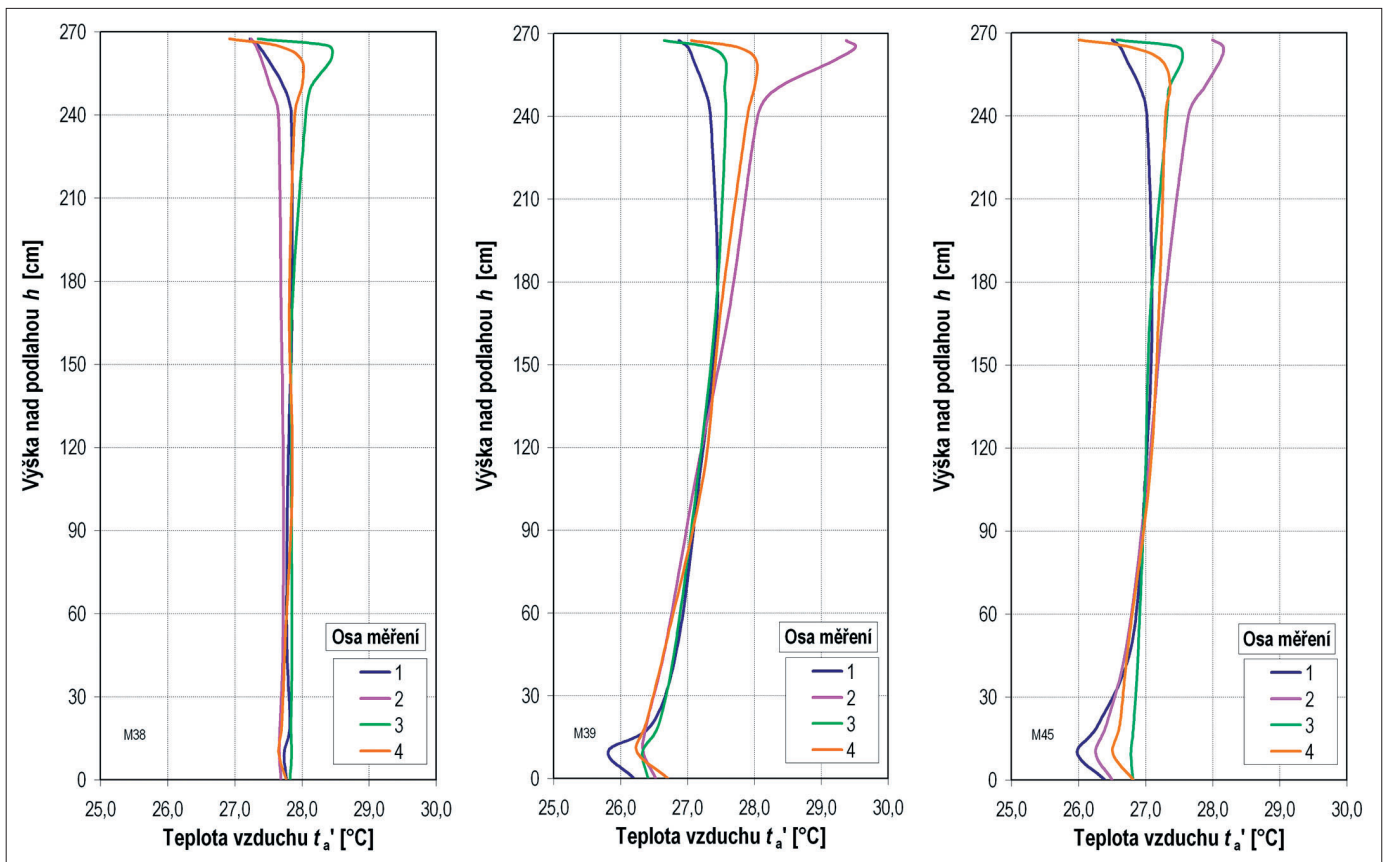
4.2 Vertikální rozložení teplot

Na obr. 5 jsou zobrazeny typické vertikální teplotní profily ve zkoumané místnosti s chladicím stropem. Teplotní profily reprezentují průměrné hodnoty naměřených teplot vzduchu v ustáleném stavu. Informace o zkoumaných případech 1, 2, 3 a podmínkách měření A,B,C,D jsou součástí tab. 2 (např. „A3“ – podmínky „A“, teplota „3“). Osy 1, 2, 3 a 4 na grafech (obr. 5) odpovídají umístění teplotních čidel podle obr. 2a.

Z naměřených teplotních profilů je jednoznačně patrný vyrovnaný teplotní profil v pásmu pobytu osob pro všechny případy (A1 až A3). Jedná se o profily vyhodnocené pro nejnižší uvažovanou tepelnou zátěž prostoru a prakticky izotermní přívod vzduchu.

Typický průběh takového rozložení teploty vzduchu v prostoru je zobrazen na obr. 5a).

Typický průběh takového rozložení teploty vzduchu v prostoru je zobrazen na obr. 5a).



Obr. 5 Typické vertikální teplotní profily ve zkoumané místnosti s chladicím stropem

a) izotermní přívod vzduchu – podmínky měření A3; b) neizotermní přívod vzduchu – podmínky měření B3; c) neizotermní přívod vzduchu, zvýšený průtok vzduchu – podmínky měření D3

Ve všech zkoumaných případech je patrná deformace teplotních profilů v oblasti pod stropem vlivem konvekčního toku vznikajícího od vnitřních zdrojů tepla.

Ve zkoumaném případě A dochází k nárůstu teploty vzduchu pod stropem u osy 3 a 4 (obr. 5a). Pro případy B, C a D je patrný vliv konvekčního tepelného toku vznikajícího podél zahřáté plochy okna – osa 2 – obr. 5b), c).

Prakticky ve všech zkoumaných případech je patrný vliv přiváděného vzduchu na profily umístěné v ose místnosti poblíž přiváděcího otvoru (osa 1). Ve výšce asi 10 cm nad podlahou se projevuje pokles teplotního profilu způsobený nižší teplotou přiváděného vzduchu. Pouze v případech, kdy je chladicí výkon stropu dostatečný a přívod vzduchu je izotermní, teplotní profily v místnosti jsou vyrovnané a pokles teplotního profilu se neobjevuje, což je patrné například v případě A3 (obr. 5a).

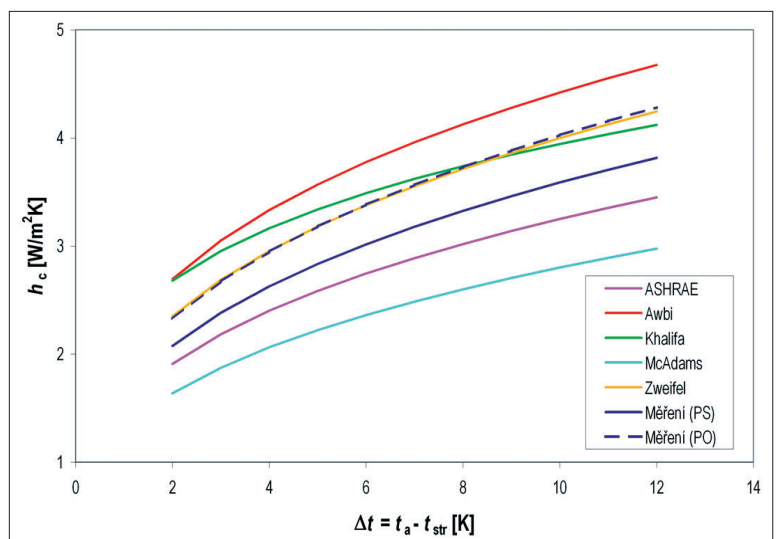
Případ B odpovídá maximální tepelné zátěži s minimálním průtokem přiváděného vzduchu. Část tepelné zátěže je odváděna vzduchem (neizotermní přívod), což má za následek deformaci teplotních profilů u podlahy „B“ – obr. 5b). Podmínky měření C a D přinášejí informaci o tom, jakým způsobem se změní teplotní profily v místnosti, zvýší-li se průtok přiváděného vzduchu (na obr. 5c jsou zobrazeny výsledky „D3“). Z praktického hlediska je takové zvýšení průtoku vzduchu poněkud nevhodné, neboť to představuje vyšší nároky na úpravu přiváděného vzduchu.

Na základě doporučených požadavků tepelné pohody (ISO Standard 7730) musí být pro sedící osobu rozdíl teploty vzduchu mezi úrovní hlavy (1,1 m nad podlahou) a kotníků (0,1 m

nad podlahou) menší než 3 K. Z naměřených teplotních profilů (pro podmínky uvedené v tab. 2) bylo zjištěno, že ve všech zkoumaných případech je zmíněný požadavek dodržen. Pokud bychom chtěli aplikovat podobný požadavek i pro stojící osoby, pak v nejhroších zkoumaných případech bude maximální rozdíl teploty vzduchu mezi 0,1 a 1,7 m nad podlahou přibližně 2,9 K.

Diskuse vlivu sálání

I když byl při přípravě měření brán zřetel na případný vliv sálání na teplotní čidla (volbou minimálních rozměrů čidel), byla věnována v průběhu měření této otázce pozornost.



Obr. 6 Porovnání naměřených hodnot součinitele přestupu tepla konvekcí h_c podél chladicího stropu s publikovanými hodnotami

U experimentu, jehož účelem bylo stanovit rozložení teploty v prostoru s chladicím stropem, lze předpokládat, že vliv sálání bude rozdílný pro každé čidlo. Je jisté, že čidlo umístěné těsně pod chladicím stropem bude sáláním ovlivněno nejvíce, naopak čidla u podlahy nejméně. U zkoušek bylo prakticky nemožné chránit všechna čidla stíněním proti účinku sálání.

Před experimenty probíhalo opakované kontrolní měření v měřicí komoře, které spočívalo v porovnání dvou vertikálních profilů (měřených čidly bez stínění a stíněnými čidly).

Porovnáním měření teplot bez stínění a se stíněním bylo zjištěno, že naměřené hodnoty se výrazně neliší. Odchytky měření se nacházejí v rozsahu přesnosti použitých čidel (Pt 100 třída A – 0,1 °C). Naměřené teploty t_a' vyjadřují velmi dobře teplotu vzduchu t_a .

4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí podél chladicího stropu

Na obr. 6 jsou vyneseny experimentálně zjištěné závislosti součinitele přestupu konvekcí h_c podél chladicího stropu v závislosti na rozdílu teploty vzduchu a teploty stropu, společně s údaji publikovanými v odborné literatuře různými autory (tab. 1).

Experimenty prokázaly, že teplota vzduchu proudícího kolem stropu (tím i přestup tepla) je výrazně ovlivněna konvekčními proudy v místnosti vznikajícími podél zahřátých ploch (oken) a není shodná se střední teplotou vzduchu měřenou v pásnu pobytu osob (do výše 1,7 m). Pro porovnání výše uvedeného tvrzení jsou na obr. 6 zobrazeny zjištěné hodnoty součinitele přestupu tepla h_c podél chladicího stropu z teploty vzduchu měřené:

- a) v pásnu 10 až 20 cm pod chladicím stropem (PS),
- b) v pásnu pobytu osob (PO).

Z obr. 6 je patrné, že hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí h_c podél chladicího stropu zjištěné popsány metodami a) a b) nejsou shodné. Hodnoty zjištěné na základě teploty vzduchu v pracovní oblasti (PO) velmi dobře odpovídají závislosti, kterou publikoval Zweifel (tab. 1). Naproti tomu hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí zjištěné z teploty vzduchu měřené v pásnu těsně pod stropem (PS) se nacházejí v poli mezi hodnotami stanovenými podle ASHRAE a Zweifela (tab. 1).

Z naměřených hodnot (PS) byl stanoven vztah pro určení součinitele přestupu tepla konvekcí podél chladicího stropu

$$h_c = 1,64 \Delta t^{0,34} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5)$$

kteří upřesňuje dosavadní poznatky v oblasti sdílení tepla konvekcí podél chladicích stropů (pro dané okrajové podmínky).

ZÁVĚR

Výkon chladicího stropu je obecně limitován velikostí plochy a povrchovou teplotou. Při vyšších potřebných výkonech lze doplnit chlazení stropem přívodem větracího vzduchu. Z hlediska dosažení rovnoměrného vertikálního rozložení teploty vzduchu v prostoru s chladicím stropem se však jeví ideální udržovat izotermní přívod vzduchu. Při zvyšování chladicího výkonu vzduchu snižováním teploty přiváděného vzduchu se teplotní profily v pásnu pobytu osob budou deformovat. Naopak zvýšením průtoku vzduchu lze dosáhnout vyrovnání vertikálních teplotních profilů.

Z hodnocení vertikálních teplotních profilů vyplývá, že v prostoru s chladicím stropem nedochází k pocitu tepelné nepohody vlivem rozdílných

teplot mezi úrovní kotníků a hlavy. To platí i v případech, kdy dochází vlivem neizotermičnosti přiváděného vzduchu k deformaci teplotních profilů. Podle experimentů to platí pro pracovní rozdíl teplot (zdrojové větrání) $\leq 3\text{K}$.

Z analýz je zřejmé, že tepelný pocit člověka je ovlivněn rychlostí proudění vzduchu w_a výrazněji než stanovuje operativní teplota t_o . V prostoru s chladicím stropem je rychlost proudění vzduchu v pásnu pobytu osob velmi nízká a ve většině zkoumaných případů se blíží nulové hodnotě. Experimenty potvrzují, že při rychlostech proudění vzduchu nepředstavuje $w_a = 0$ až 0,1 m/s zanedbání rychlosti pro výpočet t_o výrazný rozptyl hodnot tepelného pocitu *PMV*. V případě zvýšení rychlosti proudění vzduchu na hodnotu $w_a \geq 0,2$ m/s (při stejné operativní teplotě t_o) bude tepelný pocit *PMV* vykazovat odchýlení do nižších hodnot.

Hodnocení průvanu prokázalo, že v prostoru s chladicím stropem kombinovaném se zdrojovým větráním vznik průvanu prakticky nehrozí. Ve výškách 0,6; 1,1 a 1,7 m nad podlahou byla rychlost proudění velmi nízká pro všechny zkoumané případy. Při zvýšených rychlostech na přiváděcí výusti (nad 0,4 m/s) se vyskytlo nebezpečí vzniku průvanu, a to jen v oblasti kotníků (0,1 m nad podlahou).

Experimenty prokázaly, že teplota vzduchu proudícího kolem stropu (tím i přestup tepla) je výrazně ovlivněna konvekčními proudy v místnosti vznikajícími podél zahřátých ploch (oken) a není shodná se střední teplotou vzduchu měřenou v pásnu pobytu osob (do výše 1,7 m). Nejspolehlivější výsledky součinitele přestupu tepla konvekcí podél chladicího stropu h_c lze získat tehdy, když je teplota proudu vzduchu měřena v pásnu přímo pod chladicím panelem (10 až 20 cm). Pro dané okrajové podmínky byly experimentálně stanoveny hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí podél chladicího stropu h_c v závislosti na rozdílu teploty vzduchu a střední povrchové teploty chladicího stropu.

Zjištěná závislost není totožná s publikovanými výsledky a upřesňuje dosavadní poznatky v této oblasti (pro dané okrajové podmínky).

Výsledky mohou být využity pro další analýzy nejen pro prostory s chladicím stropem, například mohou posloužit jako vstupní parametry energetických výpočtů počítačovou simulací.

Příspěvek byl napsán s podporou výzkumného záměru MSM 6840770011.

Kontakt na autora: Vladimír.Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001, ASHRAE, Atlanta. ISBN – 1-883413-87-7
- [2] Awbi, H.B. Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*, 1998, č. 28, s. 219-227
- [3] Bejan, A.: *Convection heat transfer*. 1995, New York: Wiley. ISBN 0-471-57972-6
- [4] Fanger, P.O.: *Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering*, Kingsport Press, Inc., 1972
- [5] ČSN EN ISO 7730, *Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné*. Český normalizační institut, 1996
- [6] Khalifa, A.J.N., Marshall, R.H.: Validation of Heat Transfer Coefficients on Interior Building Surfaces Using a Real-sized Indoor Test Cell, In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1990, č.33, s. 2219-2236
- [7] Skistad, H.: *Displacement ventilation in non-industrial premises*, 1994, REHVA Guidebook
- [8] Zmrhal, V., Drkal, F.: Hodnocení tepelného komfortu v prostoru s chladicím stropem. Sborník konference Klimatizace a větrání. STP Praha 2004
- [9] Zweifel, G.: Simulation of displacement ventilation and radiation cooling with DOE2. In *ASHRAE Transactions*, 1993, vol. 99 (2), s. 548-555. ■