

Prof. Ing. Miloslav V. JOKL, DrSc.  
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební,  
 Katedra TZB  
 RNDr. Stanislav MALÝ, Ph.D.  
 Výzkumný ústav bezpečnosti práce  
 Praha,  
 Prof. MUDr. Zdeněk JIRÁK, CSc.  
 Ostravská universita, Fakulta  
 zdravotně-sociální,  
 Ing. Hana TOMÁŠKOVÁ, Ph.D.  
 Hygienická stanice Ostrava,  
 Ing. Daniel ŠEBESTA,  
 ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Recenzent  
 Ing. Vladimír Poledna

# Kulový stereoteploměr – nový přístroj pro stanovení operativní teploty a radiální teplotní asymetrie

## Globe Stereo Thermometer – New Device for Determination of Operative Temperature and Radiant Temperature Asymmetry

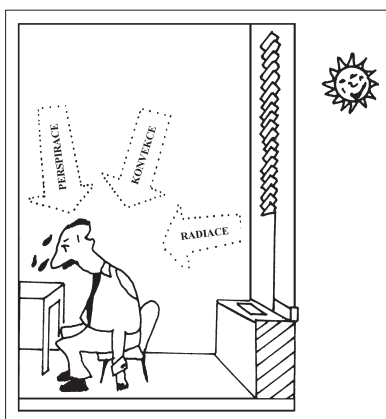
Autoři článku nás informují o úspěšném použití stereoteploměru, přístroje pro měření výsledné teploty a radiální teplotní asymetrie

**Klíčová slova:** tepelný stav prostředí, operativní teplota, stereoteploměr, radiální teplotní asymetrie

The authors report about a successful application of stereo thermometer, which is a device for measurement of globe temperature and radiant temperature asymmetry.

**Keywords:** environment temperature conditions, operative temperature, stereo thermometer, radiant temperature asymmetry

Operativní teplota je dle současných předpisů (vládní nařízení č.361/2007Sb.) a norem (ČSN EN ISO) základem kritériem pro posuzování tepelného stavu prostředí. Je definována jako teplota stejnorodého uzavřeného prostoru, ve kterém člověk sdílí stejné množství tepla sáláním a prouděním jako ve vyšetřovaném skutečném teplotně nesterododém prostoru.



Obr. 1 Jednostranná zátěž člověka od okna

Pro posouzení neuniformní tepelné zátěže lidského organismu, např. od sálajícího okna (obr. 1), vytápěné podlahy, vytápěného nebo naopak chlazeného stropu, ale i sálající pece v hutním nebo sklářském provozu zavádí norma ČSN EN ISO tzv. radiální teplotní asymetrii (Radiant Temperature Asymmetry). Je uvedena pro tři kategorie A, B, C s různým procentem nespokojených osob. Kategorie A je nejnáročnější, pro nejmenší procento, C je nejméně náročná, připouští nejvíce nespokojených. Příklad předepsaných hodnot radiální teplotní asymetrie je v tab. 1 (Tab. A4 ČSN EN ISO 7730) [1], [8], [10].

Tab. 1 Asymetrie radiální teploty dle ČSN EN ISO 7730

Kategorie	Asymetrie radiální teploty			
	Teplý strop	Chladná stěna	Chladný strop	Teplá stěna
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

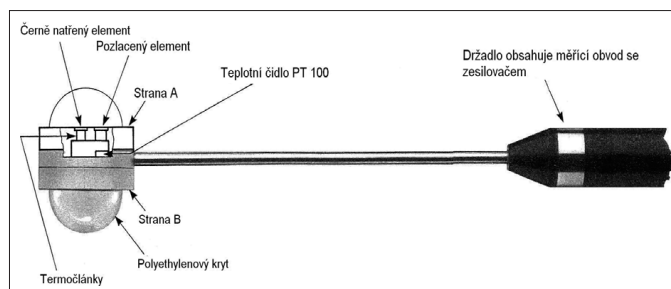


**Prof. Ing. Miloslav Joki, DrSc.**  
 Absolvent ČVUT v Praze, profesor Katedry technických zařízení budov Fakulty stavební.

## 1. DOSAŽADNÍ ZPŮSOB STANOVENÍ OPERATIVNÍ TEPLoty A RADIČNÍ TEPLotNÍ ASYMETRIE

Operativní teplotu lze přímo změřit kulovým teploměrem<sup>1)</sup> jestliže jeho vztah mezi součiniteli sdílení tepla konvekcí a radiací (poměr  $h_c/(h_c + h_r)$  a  $h_r/(h_c + h_r)$ ) je stejný jako pro člověka. Je tomu tak u průměru koule 10 a 15 cm při nízkých rychlostech proudění vzduchu 0,1 až 0,2 m/s. Čím větší je průměr koule tím větší je vliv radiální teploty a čím větší je rychlost vzduchu, tím větší je vliv teploty vzduchu na naměřenou hodnotu globeteploty [8],[2].

Ke stanovení radiální teplotní asymetrie se dosud používá přístroj fy Brüel and Kjaer – Indoor Climate Analyzer type 1213. Přístroj má speciální měřicí sondu (Radiant Temperature Asymmetry transducer MM 0036), jež na bázi PT 100 měří dopadající radiální teplo ze dvou protilehlých stran, označených A a B (obr. 2). Resp. toto teplo stanoví ze změřené povrchové teploty  $t_{rA}$  a  $t_{rB}$  destičky, exponované radiálním teplem ze dvou stran A a B. Rozdíl těchto teplot ( $t_{rA} - t_{rB}$ ) je současně radiální teplotní asymetrií.



Obr. 2 Senzor přístroje Indoor Climate Analyzer fy Brüel and Kjaer

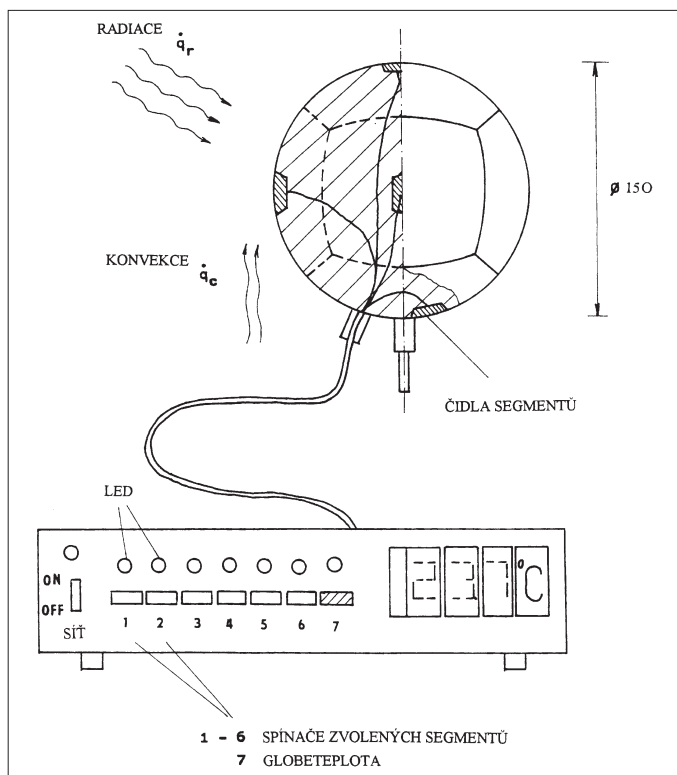
## 2. NOVÝ ZPŮSOB STANOVENÍ RADIČNÍ TEPLotNÍ ASYMETRIE

je založen na použití kulového stereoteploměru.

### 2.1 Princip stereoteploměru

Podívejme se nejprve na obyčejný kulový teploměr (GT). Při hodnocení vnitřního klimatu je již značný rozdíl v úspěšnosti mezi GT a ostatními pří-

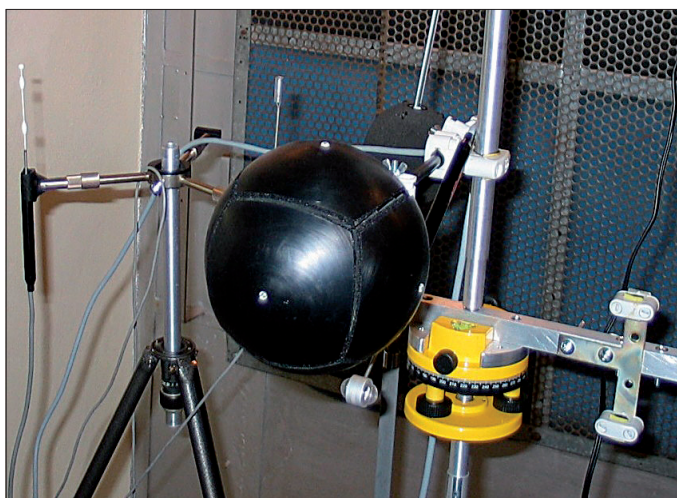
<sup>1)</sup> Pozn. recenzenta. Autoři pokládají změřenou globeteplotu  $t_g$  za teplotu operativní.



Obr. 3 Schéma kulového stereotermoměru

stroji, vyvinutými k tomuto účelu. GT je v nepřetržitém používání již od roku 1923 a stal se součástí většiny státních norem a hygienických předpisů. Důvod je prostý – GT nepředstavuje model lidského organismu, ale část rovnice jeho tepelné bilance, tzn. lze jej dosadit místo operativní teploty. Globe teplota zahrnuje ovšem pouze vliv teploty vzduchu, radiální teploty a rychlosti proudění, takže jako kritérium tepelného komfortu musí být vyjádřeno v závislosti na ostatních faktorech, obsažených v rovnici tepelné bilance člověka: rychlosti a vlhkosti vzduchu, oděvu, činnosti člověka, adaptaci a době expozice [4], [5], [6], [9].

Co platí pro celou kouli GT, lze napsat přibližně také pro část jeho povrchu, tj. jeho segmentu. Rozdělení celého povrchu koule o  $\phi$  15 cm do 6 segmentů se ukázalo být dostatečné pro praxi. I když je vyšetřován tepelný stres nejcitlivější části lidského těla – hlavy, je třeba pouze pěti segmentů odpovídajících obličejí, temeni, levé, pravé a zadní části hlavy. Původně se pracovalo s 18 segmenty, ale to se ukázalo být zbytečné. Povrchová teplota každého segmentu se nazývá stereoteplota, a střední hodnota ze všech šesti segmentů se rovná globoteplotě.



Obr. 4 Kulový stereotermoměr

Schéma přístroje je na obr. 3, celkový pohled na obr. 4 [7], [11].

Za předpokladu rovnosti součinitelů přestupu tepla konvekcí a radiací pro osálaný i neosálaný segment stereotermoměru a teploty neosálaného segmentu rovné globoteplotě lze odvodit na základě tepelné rovnováhy segmentů jednoduchý vztah [3].

$$t_{rA} - t_{rB} = (t_{\text{stereo}} - t_g) \left( 1 + \frac{h_c}{h_r} \right) [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

popř.

$$t_{\text{stereo}} - t_g = (t_{rA} - t_{rB}) \left( 1 + \frac{h_r}{h_c + h_r} \right) [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

kde

$t_{rA} - t_{rB}$  radiální teplotní asymetrie [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$t_{\text{stereo}}$  stereoteplota, tj. teplota exponovaného segmentu stereotermoměru [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$t_g$  globoteplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$h_c$  součinitel přestupu tepla konvekcí [ $\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ ],

$h_r$  součinitel přestupu tepla radiací [ $\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ ].

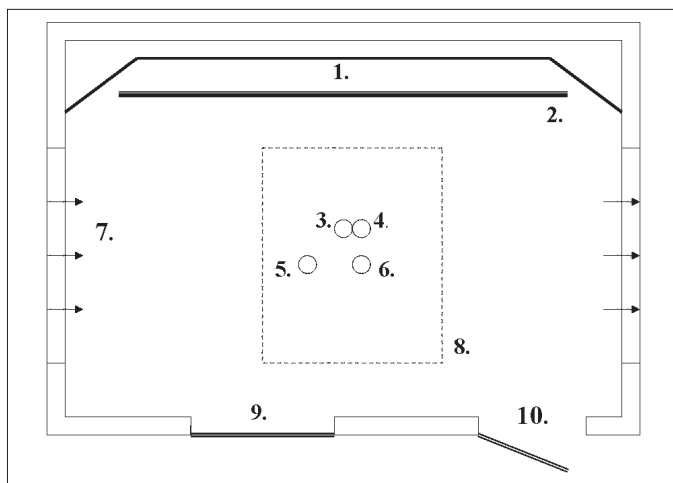
Pro praxi jsou tyto vztahy nepoužitelné, neboť problémem je stanovení součinitelů přestupu tepla radiací a konvekcí, a nezbyvá než tyto vztahy stanovit experimentálně.

## 2.2 Experimentální stanovení závislosti radiální tepelné asymetrie na rozdílu stereoteploty a globoteploty

V klimatické komoře Ústavu pracovního lékařství v Ostravě (obr. 5) byla umístěna jednak vertikální, jednak horizontální sálavá plocha. Při udržované optimální globoteplotě  $24^{\circ}\text{C}$  byly nastaveny teploty vertikální sálavé plochy na  $14, 19, 24, 29, 34$  a  $44^{\circ}\text{C}$  (tab.2), teploty horizontální sálavé plochy na  $45, 53$  a  $58^{\circ}\text{C}$  (tab. 3).

Tab. 2 Tepelné podmínky v klimatické komoře – vertikální sálavá plocha

Vertikální sálavá plocha			
Sálající plocha	$(t_r - t_g)$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$t_r$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$t_g$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Chladná stěna	-10	14	24
Chladná stěna	-5	19	24
Optimum	0	24	24
Teplá stěna	+5	29	24
Teplá stěna	+10	34	24
Teplá stěna	+20	44	24



Obr. 5 Uspořádání měření v klimatické komoře v Ostravě

1. vertikální sálavý panel, 2. vertikální chladový panel, 3. radiální teplota, 4. stereotermoměr, 5. rychlost proudění vzduchu, 6. kulový termoměr Vernon-Jokl, 7. směr proudění vzduchu, 8. stropní sálavý panel, 9. okno velínu, 10. vstup do komory.

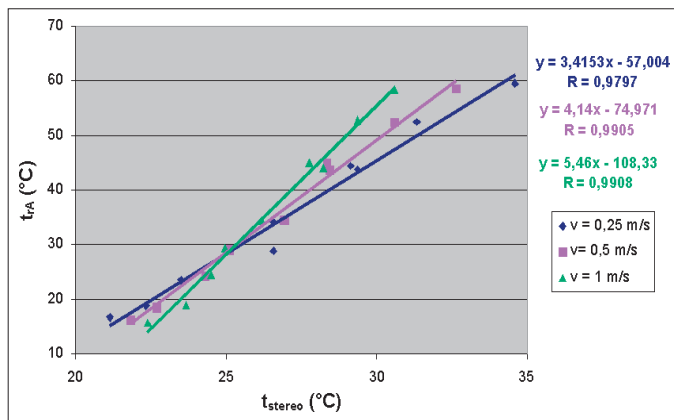
Tab. 3 Tepelné podmínky v klimatické komoře – horizontální sálavá plocha

Horizontální sálavá plocha				
Sálající plocha	W/m <sup>2</sup>	t <sub>r</sub> [°C]	t <sub>g</sub> [°C]	(t <sub>r</sub> - t <sub>g</sub> ) [°C]
Teplý strop	100	45	24	21
Teplý strop	150	53	24	29
Teplý strop	200	58	24	34

Přístrojem Indoor Climate Analyzer byla měřena radiační teplotní asymetrie t<sub>rA</sub> - t<sub>rB</sub>, radiační teploty t<sub>rA</sub> a t<sub>rB</sub> a rychlost vzduchu v nastavená postupně na 0,25 m/s, 0,5 m/s a 1,0 m/s.

Stereotermoměr byl měřena stereoteplota, povrchová teplota exponovaného segmentu t<sub>stereo</sub> a globoteplota jako průměr povrchové teploty všech segmentů.

Výsledky měření jsou na obr. 6 a 7.



Obr. 6 Závislost t<sub>rA</sub> = f(t<sub>stereo</sub>) pro různé rychlosti vzduchu v zjištěná měřením

Na obr. 6 jsou vyneseny hodnoty radiační teploty (teploty destičky senzoru exponované sálající plochou) vůči stereoteplotě (teplotě exponovaného segmentu stereotermoměru) pro různé rychlosti vzduchu (0,25 m/s, 0,5 m/s a 1,0 m/s). Korelace jsou vysoké (R<sup>2</sup> = 0,9797 až 0,9908), takže graf lze již použít pro stanovení radiační teploty t<sub>rA</sub> na základě změřené stereoteploty t<sub>stereo</sub>.

$$t_{rA} = 3,4153 t_{stereo} - 57,004 \text{ [°C]} \text{ pro } v = 0,25 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$t_{rA} = 4,14 t_{stereo} - 74,971 \text{ [°C]} \text{ pro } v = 0,5 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$t_{rA} = 5,46 t_{stereo} - 108,33 \text{ [°C]} \text{ pro } v = 1,0 \text{ m/s} \quad (5)$$

Na obr. 7 jsou vyneseny hodnoty radiační tepelné asymetrie t<sub>rA</sub> - t<sub>rB</sub> vůči rozdílu stereoteploty minus globoteplota t<sub>stereo</sub> - t<sub>g</sub>, čímž byla odstraněna závislost na rychlosti vzduchu.

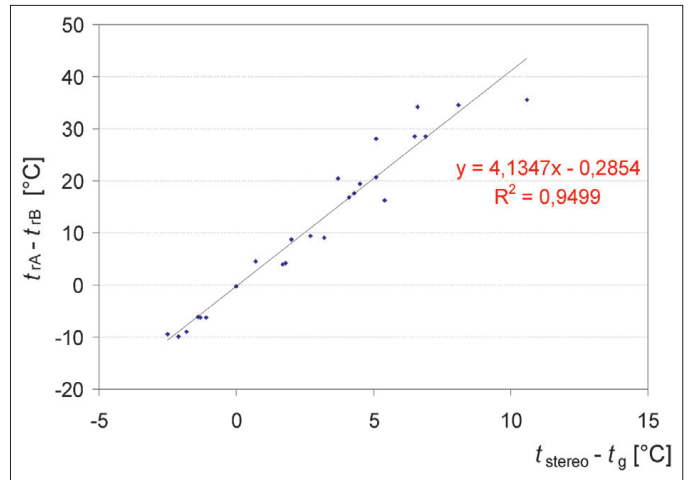
Zjištěná závislost je též použitelná v praxi:

$$RTA = t_{rA} - t_{rB} = 4,1347 \cdot (t_{stereo} - t_g) - 0,2854 \text{ [°C]} \quad (6)$$

## ZÁVĚR

Radiační teplotní asymetrii bylo možno dosud stanovit jen měřením přístrojem fy Brüel and Kjaer Indoor Climate Analyzer. Jedná se o poměrně sofistikovaný a tudíž i velmi nákladný přístroj.

Nyní je možné k tomu účelu použít i podstatně jednodušší a tudíž i výrazně levnější přístroj, kulový stereotermoměr.



Obr. 7 Závislost RTA = t<sub>rA</sub> - t<sub>rB</sub> = f(t<sub>stereo</sub> - t<sub>g</sub>) zjištěná měřením

U tohoto přístroje nebylo snadné stanovit s dostatečnou přesností teplotu jednotlivého segmentu – nakonec byla vhodným způsobem aplikována na čidla Pt100 a zabezpečena i profesionální výroba přístroje.

Na základě měření v klimatické komoře bylo prokázáno, že umožňuje stanovení radiační asymetrie (t<sub>rA</sub> - t<sub>rB</sub>) požadované ČSN EN ISO ze změřené stereoteploty t<sub>stereo</sub> a globoteploty dle vztahu

$$RTA = t_{rA} - t_{rB} = 4,1347 \cdot (t_{stereo} - t_g) - 0,2854 \text{ [°C]}.$$

Kontakt na autora: miloslav.jokl@fsv.cvut.cz

## Použité zdroje:

- [1] ČSN EN ISO 7730:2006 Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu.
- [2] Hemzal, K.: Operativní teplota v hodnocení tepelné rovnováhy člověka. *Vytápění, větrání, instalace*, 2008, roč. 17, č. 1, s. 16–23
- [3] Jiráček, Z., Jokl, M. V., Vajner, L., Tomášková, H., Bernatíková, Š., Rosypal, J., Lehocá, H., Kilián, L.: Využití kulového termoměru pro hodnocení nerovnoměrné tepelné zátěže. In: *Sborník Kongresu pracovního lékařství*, Mladá Boleslav 2007.
- [4] Jokl, M. V.: Způsob stanovení tepelné zátěže jednotlivých částí povrchu těla člověka infračerveným zářením. Čs. Patent č. 117894, Praha 1966
- [5] Jokl, M. V.: The stereothermometer: A new instrument for hygrothermal constituent nonuniformity evaluation. *ASHRAE Transactions: Research*, 1990, vol. 96, no. 3435, p. 13–18
- [6] Jokl, M. V.: Feuchtemessung nach "Kunstkopf"- Prinzip. *Heizung-Luftung-Haustechnik*, 1991, roč. 42, č. 1, s. 27–32
- [7] Jokl, M. V.: Stereotermoměr – nový přístroj pro hodnocení nerovnoměrnosti tepelné-vlhkostní konstituenty prostředí. *Čs. Hygiena*, 1991, roč. 36, č. 1, s. 14–23
- [8] Jokl, M. V.: *Zdravé obytné a pracovní prostředí*. Praha: Academia, 2002, 264 s., 1. vyd. ISBN 80-200-0928-0.
- [9] Jokl, M. V., Tůma, V.: Směrový kulový termoměr. Popis vynálezu k autorskému osvědčení č. 236203, Praha 1988.
- [10] Petráš, D., Koudelková, D., Kabele, K.: *Teplodivná a elektrická podlahová vytápění*. Bratislava: Jaga 2004.
- [11] Jokl, M. V., Vajner, L.: Kulový termoměr. Uživatelský vzor č. 13547. Zapsaný 1. 8. 2003. Majitel VÚBP Praha