



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

HODNOCENÍ TEPELNÉ POHODY PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH

ASSESSMENT OF THERMAL COMFORT IN BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEŠ PROCHÁZKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL CHARVÁT, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Aleš Procházka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách

v anglickém jazyce:

Assessment of thermal comfort in buildings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelná pohoda prostředí je stav spokojenosti člověka s tepelným stavem prostředí. Tepelný stav prostředí ovlivňuje řada veličin (teplota vzduchu, rychlost proudění vzduchu, střední radiální teplota, vlhkost vzduchu). Pro měření těchto veličin a jejich výsledného účinku se používá řadu přístrojů a měřicích metod.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši způsobů a metod hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách.

Seznam odborné literatury:

P.O. Fanger: THERMAL COMFORT, McGraw-Hill, New York, 1970.

ČSN EN ISO 7730 Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody.

ČSN ISO 7726 TEPELNÉ PROSTŘEDÍ Přístroje a metody měření fyzikálních veličin.

Články v časopisech a sbornících konferencí zabývají se problematikou hodnocení tepelného stavu prostředí v budovách.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 1.11.2010

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce shrnuje poznatky o metodách a způsobech hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách. V úvodní části práce je tepelná pohoda, která vyjadřuje spokojenost s teplotním stavem prostředí, uvedena jako důležitá součást celkové spokojenosti člověka s vnitřním prostředím budov, jsou zde popsány fyziologické základy a mechanismy termoregulace člověka a složky rovnice tepelné rovnováhy organismu. Následující část práce je zaměřena na jednotlivé teplotně-vlhkostní faktory vnitřního prostředí. Tepelnou pohodu prostředí utváří kombinace těchto faktorů. Hlavní část práce popisuje metody hodnocení tepelné pohody pomocí parametrů PMV a PPD. Pro praktické využití jsou uvedeny příklady diagramů tepelného komfortu, které jsou na těchto parametrech založeny, měřič tepelného komfortu, a tepelný manekýn. Závěrečná část práce obsahuje popis některých měřicích přístrojů pro měření jednotlivých fyzikální veličin.

ABSTRACT

This bachelor thesis summarises knowleges about methods used for assessments of thermal comfort in buldings. In opening part of thesis is thermal comfort introduces as important part of overall satisfaction with indoor environment. There are also described fyziological basics and ways of thermoregulation and individual elements of thermal balance. Next part of thesis is focused on thermal and humidity factors of indoor environment. Some combinations of these factors form thermal comfort. Main part of thesis describes methods of assesments of thermal comfort using PMV and PPD indices. For practical uses there are examples of comfort diagrams, which are based on PMV index, Thermal Comfort Meter and Thermal Manikin. Last part contains description of some instruments for measurement of used physical values.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hodnocení tepelné pohody, tepelná pohoda, teplota, vlhkost, kvalita vnitřního prostředí, teplotní stav, měření teploty, měření vlhkosti

KEYWORDS

Assesment of thermal comfort, Thermal comfort, temperature, humidity, Indoor environment quality, Thermal status, Temperature measurement, Humidity measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, A. Hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26. května 2011

.....
Aleš Procházka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji v první řadě Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D. za rady a podněty k vypracování této bakalářské práce.

Dále děkuji své rodině, přátelům a v neposlední řadě své milé za podporu

Obsah

Úvod	12
1 Vnitřní prostředí budov.....	13
1.1 Hygienická pohoda.....	13
1.2 Akustická pohoda	13
1.3 Vizuální pohoda	13
1.4 Elektromagnetická kompatibilita	13
1.5 Vliv barev	14
1.6 Tepelná pohoda	14
1.6.1 Fyziologické základy termoregulace člověka.....	14
1.6.2 Tepelná rovnováha.....	15
1.6.3 Ochlazování těla vypařováním potu.....	16
1.6.4 Ochlazování těla dýcháním.....	17
1.6.5 Ochlazování těla sáláním	17
1.6.6 Ochlazování těla konvekcí.....	17
1.6.7 Izolace oděvu	18
1.6.8 Způsoby termoregulace.....	20
2 Parametry vnitřního prostředí ovlivňující tepelnou pohodu	22
2.1 Teplota vzduchu t_a	22
2.2 Střední teplota sálání (radiační teplota) t_r	22
2.3 Operativní teplota t_o	23
2.3.1 Stanovení operativní teploty měřením.....	23
2.3.2 Hodnocení tepelného stavu prostředí z hlediska operativní teploty.....	25
2.4 Vlhkost vzduchu.....	25
2.4.1 Obecně o vlhkosti vzduchu	25
2.4.2 Vlhkost vzduchu v interiérech budov	26
2.5 Rychlost proudění vzduchu a vliv turbulencí	27
3 Metody hodnocení tepelného stavu prostředí	29
3.1 Metoda WBGT (Wet Bulb Globe Temperature).....	29
3.2 Hodnocení pomocí parametrů PMV, PPD.....	31
3.2.1 Výpočet PMV	31
3.2.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených - PPD.....	32
3.2.3 Lokální tepelný diskomfort	33
3.2.4 Komfortní diagramy.....	35
3.4 Tepelný manekýn	40
3.5 Měřič tepelného komfortu	41
4 Měření jednotlivých veličin	41
4.1 Měření teploty.....	41
4.1.1 Dilatační teploměry.....	42
4.1.2 Odporové teploměry	42
4.1.3 Termoelektrické teploměry.....	42
4.1.4 Radiační teploměry	42
4.2 Měření vlhkosti	42
4.2.1 Deformační hygrometry.....	42
4.2.2 Psychrometr	43
4.2.3 Kondenzační (rosný) vlhkoměr	44
4.2.4 Elektrické hygrometry.....	44

4.3 Měření střední radiační teploty	44
4.3.1 Černý kulový teploměr	44
4.3.2 Dvoukulový teploměr	45
4.3.3 Stereoteploměr Jokl - Jirák	45
Závěr	46
Seznam použitých zdrojů.....	47
Seznam použitých veličin a symbolů.....	49

Úvod

Již od počátku své historie člověk staví a obývá budovy. Od prvních primitivních příbytků až k dnešním stavbám prošly stavební materiály a postupy, jakožto i vybavení budov velkým vývojem, avšak jedna ze základních funkcí, kterou je ochrana před nepříznivými vlivy okolního prostředí (horko, zima, déšť či sníh), zůstala zachována. Vzrostly ovšem nároky kladené na budovy, u obytných staveb zejména na množství prostoru a také na kvalitu vnitřního prostředí.

Kvalita vnitřního prostředí, která má vliv na psychické a fyzické zdraví obyvatel, a také na výkonnost při práci, je utvářena mnoha parametry z nichž jeden z nejvýznamnějších je bezesporu tepelný stav prostředí.

K dosažení optimálního tepelného stavu - stavu tepelné pohody - je dnes možno využít vedle samotné stavební konstrukce budovy i mnoho prvků technického zařízení budov, kupříkladu různých způsobů vytápění, klimatizace, nebo systémů nuceného větrání, avšak také je tepelný stav vyhodnocovat a měřit.

A právě způsoby a metody hodnocení tepelného stavu prostředí jsou tématem této práce.

1 Vnitřní prostředí budov

Vzhledem k tomu, že člověk stráví v budovách velkou část svého života (70 až 80% [1]), má stav vnitřního prostředí budov podstatný vliv na jeho zdraví.

Celkovou fyzickou i psychickou pohodu člověka uvnitř budovy ovlivňuje celá řada faktorů, které je možné rozdělit do několika skupin:

1.1 Hygienická pohoda

Popisuje vliv látek; jako jsou například prach, oxid uhličitý, pach vydávaný lidmi, výpary z nábytku, stavebních materiálů a dalšího zařízení místností, cigaretový kouř a další; obsažených ve vzduchu. Koncentraci těchto látek ve vzduchu je možné snižovat větráním, či v případě výrobních prostor je třeba obsah prachu snižovat odsáváním.

1.2 Akustická pohoda

Na rozdíl od akustické nepohody, kterou je možno v některých případech poměrně přesně definovat, je akustickou pohodu těžké vymezit. Akusticky nepříjemná jsou například nízká letadla, extrémně hlučné koncerty apod. ale i bezzvучné prostory, i prostory, v nichž je zvuk zcela odrážen.

K hodnocení prostor se používá fyzikální veličina hladina akustického tlaku (dB), která je udávána pro jednotlivé kategorie prostor a obvykle se pohybuje od 25 dB do 65 dB.

1.3 Vizuální pohoda

Závisí na rozložení jasů, oslňování, intenzitě osvětlení, uspořádání místnosti.

Při stavu vizuální pohody může v mozku nerušeně probíhat proces zrakového vnímání.

1.4 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita je definována evropskou normou o funkčnosti elektrických přístrojů. *Zabezpečuje*, aby se více přístrojů navzájem nerušilo nebo aby vzájemně neovlivňovaly své funkce.

V případě lidí se jedná o možné zdravotní obtíže, které mohou vzniknout působením elektrických, magnetických, či elektromagnetických polí (elektrosmog).

1.5 Vliv barev

Barva a tvar společně určují vzhled objektu a tudíž mají výrazný vliv na pohodu uživatelů prostoru.

V souvislosti s tepelnou pohodou prostředí je třeba zmínit především *Hypotézu o tepelném působení barevných odstínů*.

Odstíny červené či žluté barvy jsou považovány za teplé, oproti tomu zelené či modré za studené.

Ovlivňují tedy barvy tepelnou pohodu v místnosti? Experimentální výzkumy dle Küllera a Mikelidese nepotvrzují souvislost mezi barvami místnosti a tepelnou pohodou.[2].

1.6 Tepelná pohoda

Sice již Sokrates (okolo 400 př. n.l.) se zabýval mimo jiné tím, jak stavět domy, aby se v nich dobře žilo, ale možnosti, jak dosahovat tepelné pohody prostředí byly dlouho omezené na topení v otevřených krbech a ohništích (14. stol.), či v kachlových kamnech (15. stol.). Teprve s rozvojem techniky v 18. století se způsoby vytápění zdokonalily a na počátku 20. století již bylo možné budovy nejen vytápět, ale i pomocí strojního chlazení chladit.

Dle definice ČSN EN 7730 je tepelná pohoda „stav mysli vyjadřující uspokojení s tepelným prostředím“.

1.6.1 Fyziologické základy termoregulace člověka

V lidském těle vzniká nepřetržitě teplo. To, že tomu tak je, člověk věděl odedávna, pouze se vedly spory, kde. Podle Aristotela (384 až 322 př. n. l.) vzniká v levé srdeční komoře, naproti tomu římský lékař Galénos (přibližně 129 až 200 n. l.) tvrdil, že v pravé.

Další teorie předpokládaly tvorbu tepla například slučováním síry s krevní solí - Van Helmont (1577-1644), či třením krve o stěny cév. Později se ukázalo, že při metabolických procesech v organismu se uvolňuje z potravy, především z cukrů a tuků, energie. [3]

Produkcí tepla v organismu je možno rozdělit do těchto skupin:

Bazální metabolismus – i za naprostého klidu např. při spánku produkují játra určité množství tepla. Toto množství závisí na pohlaví a věku člověka.

Svalový metabolismus – energie se ve svalectech mění jednak na mechanickou práci a také na teplo.

Mechanická účinnost je přitom velmi malá – přibližně 0,1[4], většina energie se tedy přemění na teplo.

Jednotkou metabolismu je 1 met, což představuje metabolické teplo produkované člověkem při lehké práci (v sedě) vztahované na plochu lidského těla (1,9 m²), tedy 58,2 W.m⁻². [5]

Některé hodnoty metabolismu a mechanické účinnosti při různých činnostech jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1.1 Hodnoty metabolismu a mechanické účinnosti pro různou činnost člověka (Převzato z [5])

Činnost	Metabolismu		Mechanická účinnost (-)
	s (W.m ⁻²)	(met)	
Bazální metabolismus	45	0,8	0
Sezení, odpočívání	58	1,0	0
Stání, odpočívání	65	1,1	0
Běžná kancelářská práce	75	1,3	0
Lehká práce na strojích	150	2,6	0,1
Těžká manuální práce	250	4,3	0,1
Chůze po rovině (4 km.h ⁻¹)	140	2,4	0
Chůze po rovině (6 km.h ⁻¹)	200	3,5	0
Chůze se stoupáním 5% (4 km.h ⁻¹)	200	3,5	0,1

Metabolický tepelný tok q_m (W/m^2) je množství vnitřní produkce tepla, člověk toto teplo sdílí povrchem těla s okolním prostředím prouděním (konvekcí) q_k , sáláním q_s , vypařováním q_w , dýcháním q_d a vedením q_v .

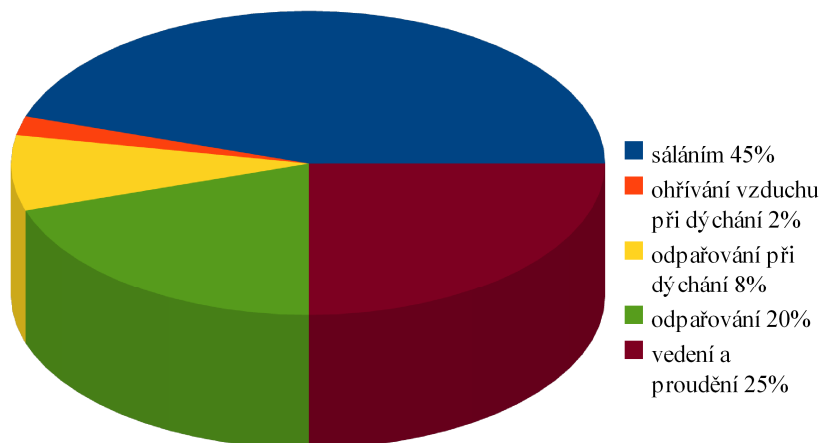
1.6.2 Tepelná rovnováha

Pro dosažení tepelné pohody je jednou z nutných podmínek tepelná rovnováha, tedy aby veškeré produkované teplo bylo odebíráno okolím. Tepelnou rovnováhu lze vyjádřit rovnicí:

$$q_m = \pm q_k \pm q_s \pm q_w \pm q_d \pm q_v \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (1.1)$$

Jelikož je tepelný tok vedením velmi malý – např. u obutého stojícího člověka přibližně 5W, lze jej ve většině případů zanedbat. Dále v rovnici zanedbáváme mechanickou účinnost lidské práce a předpokládáme, že se všechna energie mění na teplo.

Míra, jakou se jednotlivé složky podílí na celkovém odvodu tepla, je zobrazena v grafu (obr. 1.1).



Obr 1.1: Podíl jednotlivých složek na celkovém odvodu tepla z organismu (Hodnoty převzaty z [3])

1.6.3 Ochlazování těla vypařováním potu

Tepelný tok odváděný z těla vypařováním lze rozdělit na tepelný tok difúzním vypařováním a tepelný tok mokrým vypařováním, potom:

$$q_w = q_{w1} + q_{w2} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (1.2)$$

kde

q_{w1} je tepelný tok odváděný z těla difúzním vypařováním [W/m^2]

q_{w2} tepelný tok odváděný z těla mokrým vypařováním [W/m^2]

Pro jednotlivé složky pak dle [4] platí rovnice:
Tepelný tok difúzním vypařováním:

$$q_{w1} = \beta (p_h - p_v) r \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.3)$$

kde

$\beta = 1,28 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$ součinitel difúzní propustnosti pokožky
 $r = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ měrné výparné teplo vody
 p_h parciální tlak vodní páry nad povrchem pokožky [Pa]
 p_v parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu [Pa]

$$p_h = (2,56 t_h - 33,8) 10^2 \quad [\text{Pa}] \quad (1.4)$$

kde

t_h je teplota pokožky [$^{\circ}\text{C}$]

Tepelný tok mokrým vypařováním je jeden z významných prvků termoregulace člověka, dosažení tepelné rovnováhy bez nadměrného pocení je druhou podmínkou tepelné pohody člověka.

Podle FANGERA (Fanger, P.O.: Thermal Comfort. Copenhagen 1970) je při tepelné pohodě až do vnitřní produkce tepla $q_m = 58 \text{ W/m}^2$ tepelný tok mokrým vypařováním roven nule.

Při $q_m > 58 \text{ W/m}^2$ pak platí pro měrný tepelný tok mokrým vypařováním vztah:

$$q_{w2} = 0,42 (q_m - 58) \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.5)$$

1.6.4 Ochlazování těla dýcháním

Vdechovaný vzduch je v plicích ohříván na teplotu 34 až 36 $^{\circ}\text{C}$. S vydechovaným vzduchem se z těla tedy odvádí jednak oxid uhličitý, ale i vlhkost a teplo.

Tepelný tok odváděný z těla dýcháním je dle literatury [4] dán rovnicí:

$$Q_d = c_v M_v (t_{vyd} - t_a) + r M_v (x_{vyd} - x_v) \quad [\text{W}] \quad (1.6)$$

kde

c_v je měrná tepelná kapacita vzduchu [$c_v = 1,01 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$]
 M_v hmotnostní průtok vdechovaného vzduchu [kg/s]
 t_{vyd} teplota vydechovaného vzduchu (lze počítat s hodnotou $t_{vyd} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
 t_a teplota okolního (vdechovaného) vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
 r měrné výparné teplo vody [$r = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$]
 x_{vyd} měrná vlhkost vydechovaného vzduchu [kg/kg s.v.]
 x_v měrná vlhkost okolního vzduchu [kg/kg s.v.]

Podle Fangera je hmotnostní průtok vdechovaného vzduchu závislý na produkci tepla podle vztahu:

$$M_v = 1,44 \cdot 10^{-6} Q_m \quad [\text{kg/s}] \quad (1.7)$$

dále je měrná vlhkost vydechovaného vzduchu při jeho úplném nasycení vodní párou při teplotě 35 $^{\circ}\text{C}$ $x_{vyd} = 37,85 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg s.v.}$ a měrná vlhkost okolního vzduchu v závislosti na parciálním tlaku vodní páry p_v [Pa]

$$x_v = 6,3 \cdot 10^{-6} p_v \quad [\text{kg/kg s.v.}] \quad (1.8)$$

1.6.5 Ochlazování těla sáláním

Tepelný tok sáláním z povrchu oblečeného člověka na okolní povrchy je dán rovnicí:

$$Q_s = 5,7 \cdot 10^{-8} e S' [(273 + t_{cl})^4 - (273 + t_r)^4] \quad [\text{W}] \quad (1.9)$$

kde

- Q_s je tepelný tok sáláním [W]
 e poměrná sálavost oděvních látek
 S' sálající povrch těla [m²]
 t_r střední radiační teplota [°C]
 t_{cl} teplota povrchu oděvu [°C]

1.6.6 Ochlazování těla konvekcí

Tepelný tok sdílený z povrchu oděvu konvekcí okolnímu vzduchu je dán rovnicí

$$Q_k = \alpha_k S (t_{cl} - t_a) \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$

kde

- α_k je součinitel prostupu tepla konvekcí [W/m² · K]
 t_{cl} teplota povrchu oděvu [°C]
 t_a teplota okolního vzduchu [°C]

Při prakticky klidném vzduchu ($v_a < 0,3$ m/s) je součinitel prostupu tepla konvekcí:

$$\alpha_k = 3(t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (1.11)$$

Při rychlosti proudění vzduchu $v_a > 0,3$ m/s platí vztah:

$$\alpha_k = 13 \cdot \sqrt{v_a} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (1.12)$$

1.6.7 Izolace oděvu

Jednou z funkcí oděvu je zabránit úniku tepla z těla člověka do okolního prostředí, oděv významně ovlivňuje tepelnou rovnováhu člověka a tím i tepelnou pohodu.

Pro míru izolace oděvu byla zavedena jednotka clo. 1 clo představuje tepelný odpor typického pánského oděvu v roce 1941, kdy byla tato jednotka zavedena, který byl tvořen oblekem s vestou a košilí s dlouhým rukávem. [6]

Hodnota 1 clo představuje tepelný odpor: $l_{cl} = \frac{1}{0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}}$

Hodnoty tepelných odporů jednotlivých částí oděvů i některých typických kombinací, tak jak je udává norma ČSN EN ISO 7730, jsou uvedeny v tab. 1.2 respektive 1.3. Blíže se hodnocením izolace oděvu, jakožto i výpočtem hodnoty clo zabývá norma ČSN EN ISO 9920.

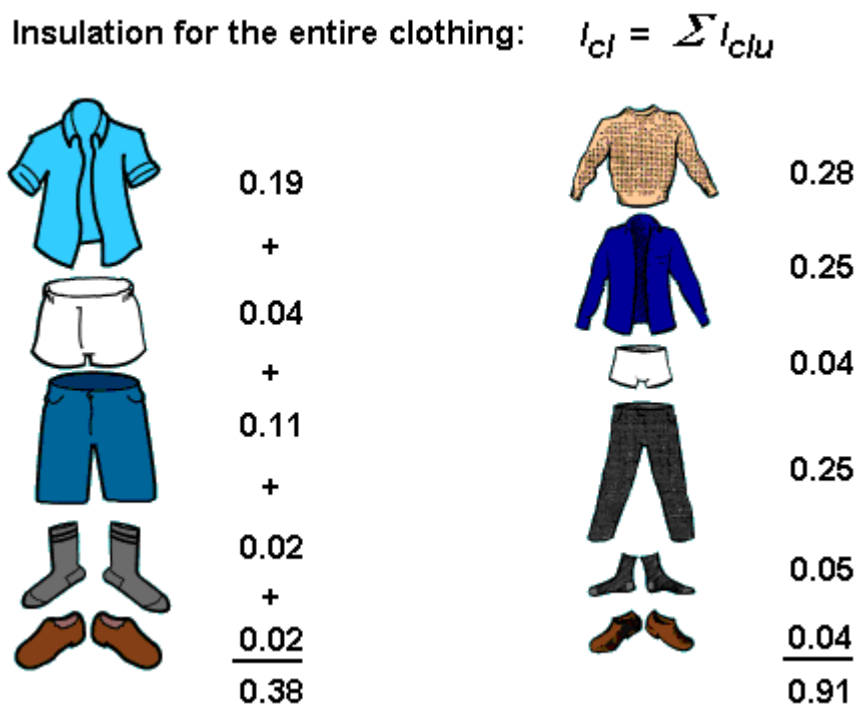
Tab. 1.2 Tepelný odpor jednotlivých částí oblečení (ČSN EN ISO 7730)

Popis ošacení	Tepelný odpor (clo)
Spodní prádlo	
Slipy	0,03
Kalhotky a podprsenka	0,03
Spodky s dlouhými nohavicemi	0,10
Nátělník	0,04
Tričko s krátkým rukávem	0,09
Tričko s dlouhým rukávem	0,12
Košile - halenky	
Krátké rukávy	0,15
Lehké, dlouhé rukávy	0,20
Normální dlouhé rukávy	0,25
Flanelová košile, dlouhé rukávy	0,30
Lehké halenky, dlouhé rukávy	0,15
Kalhoty	
Šortky	0,06
Lehké	0,20
Normální	0,25
Flanelové	0,28
Šaty - sukně	
Lehké sukně (letní)	0,15
Silné sukně (zimní)	0,25
Lehké šaty, krátké rukávy	0,20
Zimní šaty, dlouhé rukávy	0,40
Svetry	
Vesta bez rukávů	0,12
Tenký svetr	0,20
Svetr	0,28
Silný svetr	0,35
Saka	
Lehké, letní sako	0,25
Sako	0,35
Pracovní halena	0,30
Různé	
Ponožky	0,02
Silné ponožky ke kotníkům	0,05
Silonové punčochy	0,03
Boty s tenkou podrážkou	0,02
Boty se silnou podrážkou	0,04
Vysoké boty	0,10

Tab. 1.3 Tepelný odpor typických kombinací ošacení (ČSN EN ISO 7730)

Denní běžné oblečení	I_{cl}	
	clo	$m^2.K.W^{-1}$
Kalhotky, tričko, lehké ponožky, sandály	0,30	0,050
Kalhotky, spodnička, punčochy, lehké šaty s rukávy, sandály	0,45	0,070
Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, ponožky, polobotky	0,50	0,080
Kalhotky, punčochy, košile s krátkými rukávy, sukně, sandály	0,55	0,085
Spodky, košile, lehčí kalhoty, boty	0,60	0,095
Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty	0,70	0,110
Kalhotky, spodnička, košile, sukně, silné podkolenky, boty	0,90	0,140
Spodky, nátělník, košile, kalhoty, svetr s věčkem, ponožky, boty	0,95	0,145
Kalhotky, košile, kalhoty, sako, ponožky, boty	1,00	0,155
Kalhotky, punčochy, blůzka, dlouhá sukně, sako, boty	1,10	0,170

Pro výpočet celkového odporu oděvu se odpory jednotlivých částí oděvu sčítají, jak je naznačeno na obr. 1.2



Obr. 1.2: Výpočet celkového odporu oděvu [7]

Tepelný tok sáláním a konvekcí nejprve prochází jednotlivými vrstvami oděvu, na vnějším povrchu oděvu, jehož teplota je t_{cl} , dochází k přestupu a sálání do okolního prostředí.

1.6.8 Způsoby termoregulace

Kvůli zajištění správné funkce organismu je třeba udržovat vnitřní teplotu člověka na úrovni 35 až 37 °C. K tomu slouží mechanismy termoregulace, které vyrovnávají rozdíly mezi produkovaným teplem a teplem odvedeným do okolí.

Mezi způsoby termoregulace patří zejména:

Chemická termoregulace

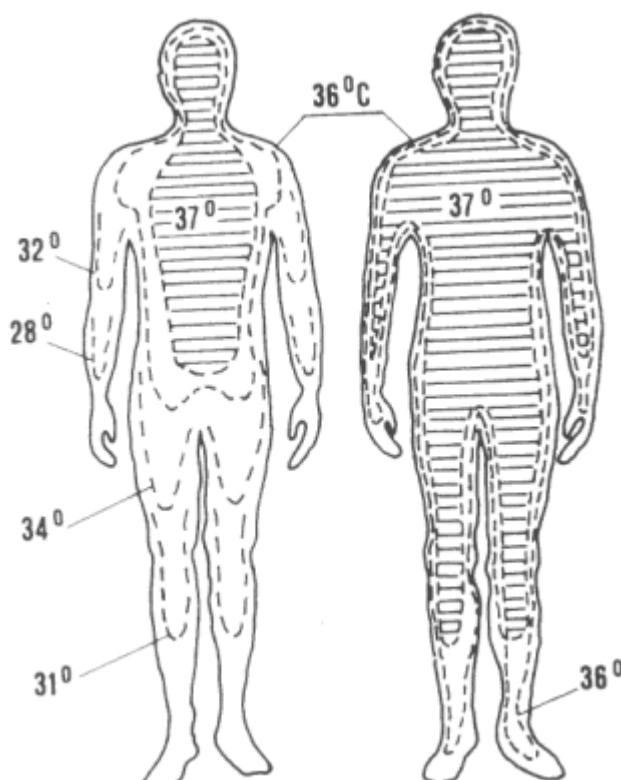
Řídí přímou produkci metabolického tepla uvnitř těla i změnu tvorby tepla ve svalech. V chladném prostředí může dojít až k svalovému třesení, které je schopno zvýšit množství produkovaného tepla až desetinásobně [8].

Fyzikální termoregulace

Ovlivňuje změny toku tepla z povrchu těla vnitřním regulačním systémem, tj. stahováním či rozšiřováním podkožních cév a tím snižováním (v chladném prostředí) respektive zvyšováním (v případě teplého okolí) teploty povrchu těla. Změny teploty povrchu těla v závislosti na teplotě okolí zobrazuje obr. 1.3. Dalšími možnostmi jsou pocení a dýchání.

Vědomá termoregulace

Sem patří reakce člověka na teplotu okolí změnou oděvu, zvýšením či snížením tělesné aktivity, či přesun z chladnějšího prostředí do teplejšího nebo naopak.



Obr. 1.3 - Rozložení povrchové teploty člověka v chladném (vlevo) a teplém prostředí zdroj: [9]

2 Parametry vnitřního prostředí ovlivňující tepelnou pohodu

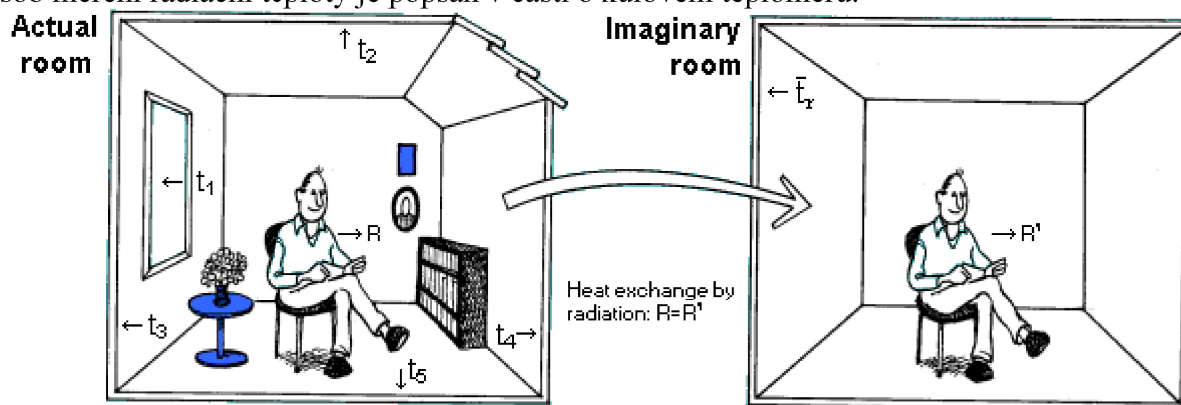
2.1 Teplota vzduchu t_a

je teplota vzduchu v okolí člověka bez vlivu sálání.

2.2 Střední teplota sálání (radiační teplota) t_r

je rovnoměrná pomyslná teplota všech ploch ve vymezeném prostoru, ve kterém je přestup tepla sáláním z lidského těla stejný, jako ve skutečnosti.

Způsob měření radiační teploty je popsán v části o kulovém teploměru.



Obr. 2.1: Znáznornění přepočtu teplot ploch v místnosti na střední radiační teplotu [7]

2.3 Operativní teplota t_o

je vypočtená hodnota, která v sobě zahrnuje vliv výměny tepla prouděním a zářením. Dle definice [10] je to jednotná teplota uzavřeného černého prostoru, ve kterém by lidské tělo sdílelo prouděním i zářením stejné množství tepla jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí. Operativní teplota je tedy vážený průměr teploty vzduchu a střední radiační teploty podle odpovídajících součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním:

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.1)$$

kde

t_o je operativní teplota [$^{\circ}\text{C}$]

t_a teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

t_r střední radiační teplota [$^{\circ}\text{C}$]

h_r součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

h_c součinitel přestupu tepla prouděním [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

[11]

2.3.1 Stanovení operativní teploty měřením

Výchozími měřenými veličinami pro stanovení operativní teploty jsou teplota vzduchu t_a , teplota kulového teploměru t_g a rychlost proudění vzduchu v_a .

Při malých rychlostech vzduchu nebo při malých rozdílech mezi střední teplotou sálání (méně než 4 °C) lze operativní teplotu dostatečně přesně vypočítat jako aritmetický průměr teploty vzduchu t_a a střední radiační teploty t_r . V případech, kdy je rychlost proudění vzduchu a rozdíl uvedených teplot větší, je možno operativní teplotu určit z rovnice:

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) t_r \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.2)$$

kde

A je funkce relativní rychlosti vzduchu v_{ar} (hodnoty A viz tabulku 2.1).

t_o operativní teplota [$^{\circ}\text{C}$]

t_a teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

t_r střední radiační teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Tabulka 2.1 – Hodnoty koeficientu A pro různé rychlosti proudění vzduchu v_a

v_{ar} [m/s]	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
A	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

[11]

Výpočet operativní teploty z teploty vzduchu, teploty kulového teploměru a rychlosti proudění vzduchu

Na základě měření uvedených veličin lze operativní teplotu stanovit pomocí následující rovnice:

$$t_o = K \cdot t_g + (1 - K) t_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.3)$$

kde

K je váhový koeficient vypočtený:

$$K = \epsilon \frac{A_r \cdot h_{rg} + h_{cg}}{A_d \cdot h_r + h_c} \quad [-] \quad (2.4)$$

kde

t_o je operativní teplota [$^{\circ}\text{C}$]

t_a teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

t_g výsledná teplota kulového teploměru [$^{\circ}\text{C}$]

ϵ emisivita kůže (oděvu)

$$\frac{A_r}{A_d} \quad \text{poměr sálajícího povrchu těla ku celkovému povrchu } A_d$$

h_r součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

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

h_{rg} součinitel přestupu tepla sáláním v úrovni kulového teploměru [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

h_{cg} součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni kulového teploměru [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

[11]

Hodnoty součinitelů přestupu tepla sáláním a konvekcí v úrovni kulového teploměru se vypočítají z rovnic:

součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni kulového teploměru [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

$$- \text{ pro přirozené proudění vzduchu } h_{cg} = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0,25} \quad (2.5)$$

$$- \text{ pro nucené proudění vzduchu } h_{cg} = 6,3 \cdot \left(\frac{v_a^{0,5}}{D^{0,4}} \right) \quad (2.6)$$

součinitel přestupu tepla sáláním v úrovni kulového teploměru [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

$$h_{rg} = 6,01 \quad \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

kde v_a je rychlost proudění vzduchu v úrovni koule teploměru [m/s]

D průměr koule teploměru (m)

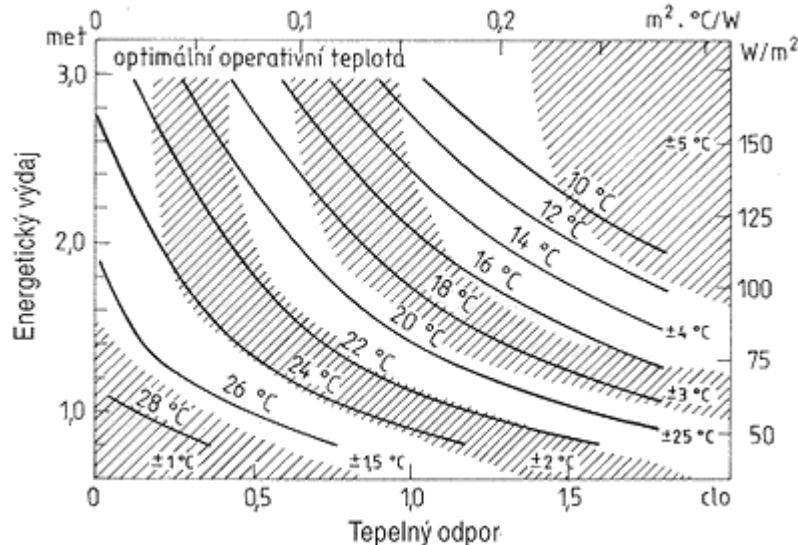
Δt rozdíl teplot $t_a - t_g$ [K]

V případě, že $K = 1$, je operativní teplota t_o přímo rovna výsledné teplotě kulového teploměru [11]

2.3.2 Hodnocení tepelného stavu prostředí z hlediska operativní teploty

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, uvádí operativní teplotu jako jedno z kritérií hodnocení tepelné zátěže na nevenkovním pracovišti. Minimální a maximální hodnoty t_o jsou zde uvedené v závislosti na druhu vykonávané práce.

Optimální hodnoty operativní teploty dle normy ČSN EN ISO 7730 doporučené pro 90% spokojenost lidí v závislosti na energetickém výdeji a izolaci oděvu zobrazuje obr. 2.2.



Obr. 2.2 Optimální hodnoty operativní teploty jako funkce tělesné aktivity a oděvu [11]

2.4 Vlhkost vzduchu

2.4.1 Obecně o vlhkosti vzduchu

Vlhký vzduch uvažujeme jako směs suchého vzduchu a vodní páry. Za určité teploty a tlaku může vzduch pojmout jen omezené množství vodní páry. Z tohoto hlediska rozlišujeme vzduch nenasyčený - vodní pára je zde ve stavu přehřátém, nasycený vzduch - obsahuje sytou vodní páru a přesycený vzduch, ve kterém jsou kromě vodní páry obsaženy také kapičky vody či krystalky ledu.

Vlhkost vzduchu lze vyjádřit následujícími způsoby:

Absolutní vlhkost vzduchu

Je hmotnost vody ve všech skupenstvích vztahovaná k objemu vzduchu:

$$\Phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2.7)$$

kde

Φ je absolutní vlhkost vzduchu [kg / m^3]

m_p hmotnost vodní páry [kg]

m_k hmotnost vody [kg]

m_t hmotnost tuhé fáze (ledu) [kg]

[12]

Relativní vlhkost vzduchu

Je poměr hmotnosti vodní páry ku hmotnosti vodní páry, kterou by byl schopen vzduch při téže teplotě a tlaku pojmout. Tato jednotka je velmi často používaná pro vyjádření stavu prostředí, v praxi se často udává v procentech:

$$\varphi = \frac{p_p}{p_p''} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

kde

φ je relativní vlhkost vzduchu [-]

p_p parciální tlak páry [Pa]

p_p'' parciální tlak syté páry při dané teplotě [Pa]

Měrná vlhkost vzduchu

udává hmotnost vodní páry (u přesyceného vzduchu i vody v kapalném skupenství a ledu) v poměru k hmotnosti suchého vzduchu:

$$x = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_v} \quad [\text{kg} / \text{kg s.v.}] \quad (2.8)$$

kde

x je měrná vlhkost vzduchu [$\text{kg} / \text{kg s.v.}$]

m_p hmotnost vodní páry [kg]

m_k hmotnost vody [kg]

m_t hmotnost ledu [kg]

m_v hmotnost suchého vzduchu [kg]

2.4.2 Vlhkost vzduchu v interiérech budov

Ve vnitřním prostředí je vlhkost vzduchu ovlivněna vlhkostí vzduchu vnějšího okolí a zdroji vodní páry v interiérech. Jak je patrné z tabulky (2.2), vodní páru produkuje člověk sám o sobě a také při některých činnostech jím provozovaných.

Vlhkost vzduchu má vliv na zdraví a tepelnou pohodu člověka, přičemž doporučené hodnoty se pohybují mezi 30 až 70% relativní vlhkosti. Při nižších hodnotách, které jsou zvláště v zimním období způsobeny vnějším vzduchem s nižší měrnou vlhkostí, který je v interiérech ohříván, dochází u člověka k vysychání sliznic a tím se stává náchylnější k onemocnění horních a dolních cest dýchacích. Oproti tomu vysoká vlhkost (dlouhodobě hodnoty nad 60%) a její kondenzace na chladnějších plochách vnitřních konstrukcí může mít za následek růst plísní na vlhkém zdivu. Také se při této vlhkosti množí počet přežívajících mikroorganismů (Staphylococcus, Streptococcus) [26] Zejména v letním období v kombinaci s vysokou teplotou zapříčiňuje vysoká vlhkost pocit dusna tj. horší ochlazování pocením, v horších případech i dýcháním.

Vlhkost vzduchu je třeba regulovat větráním, při použití nuceného větrání je možno vzduch zvlhčovat i odvlhčovat. Také některé stavební materiály mají schopnost přebytečnou vlhkost akumulovat a při nižší vlhkosti vzduchu ji vydávat zpět a tím vytvářet příznivější mikroklimatické podmínky.

Tabulka (2.2) Hodnoty produkce vodní páry [13]

zdroj vodní páry	produkce vodní páry (g/h)
koupel ve vaně	700
koupel se sprchou	2 600
vaření – teplá jídla	600 – 1 500
vaření – denní průměr	100
sušení prádla – odstředěné pračkou	50 – 200
sušení prádla – mokré, kapající	100 – 500
pračka	300
žehlení prádla	200
pokojové rostliny	5 – 20
provoz plynového sporáku – spalování plynu	1 500 g / 1 m ³ plynu
vytírání podlahy, mokré čištění	1 000
člověk v klidu	30
lehká práce	40 – 200
středně těžká práce	120 – 200
těžká práce	200 - 300

2.5 Rychlost proudění vzduchu a vliv turbulencí

Rychlost proudění vzduchu ovlivňuje přenos tepla prouděním a vypařování potu z pokožky.

V teplém prostředí může proudění zvýšit ochlazování těla a tím i zlepšit tepelný stav, ale může také vést k pocitu průvanu a tím k diskomfortu. V budovách je rychlost a směr proudění vzduchu ovlivněn zejména způsobem větrání.

Dle normy ČSN EN ISO 7730 lze stupeň obtěžování průvanem tj. podíl lidí, kteří jsou průvanem obtěžováni spočítat z rovnice:

$$DR = [(34 - t_a)(v_a - 0,05)^{0,62}] [0,37 \cdot v_a \cdot (Tu + 3,14)] \quad [\%] \quad (2.9)$$

kde

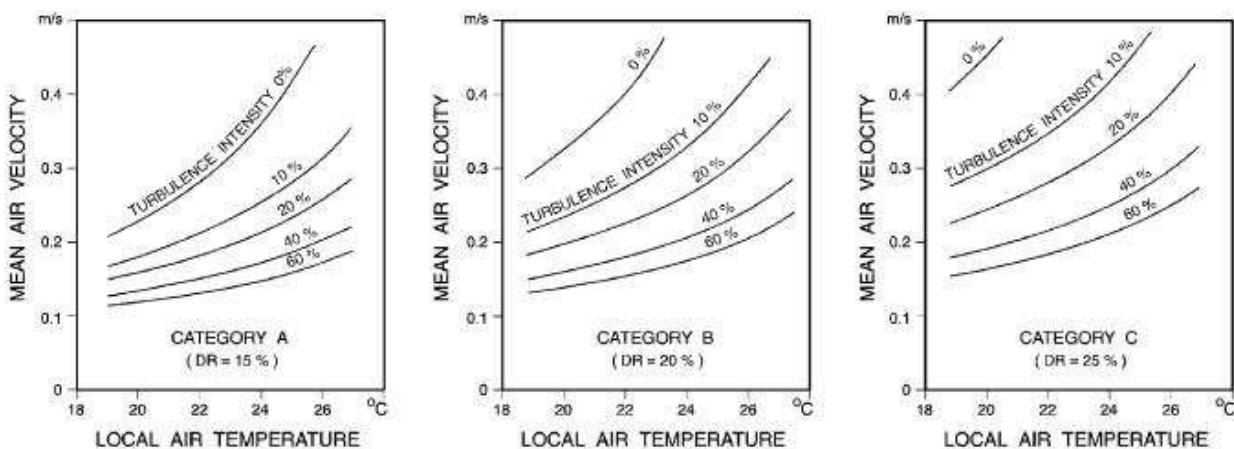
DR je stupeň obtěžování průvanem [%]

t_a teplota vzduchu [°C]

v_a rychlost proudění vzduchu [m/s]

Tu intenzita turbulence [%]

Na základě experimentálních výzkumů se skupinou lidí provádějících lehkou práci vsedě vznikly grafy (číslo) popisující závislost rychlosti proudění vzduchu na teplotě vzduchu a intenzitě turbulence pro různé stupně obtěžování průvanem.



Obr. 2.3 Rychlost proudění vzduchu jako funkce teploty vzduchu a intenzity turbulence pro tři kategorie prostředí [14]

3 Metody hodnocení tepelného stavu prostředí

Kvalitu vnitřního prostředí lze hodnotit dvěma způsoby:

subjektivně – dle vlastních pocitů

objektivně – dle provedených měření

3.1 Metoda WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*)

Tuto metodu definuje norma ČSN EN ISO 7234. Je určena pro použití v horkém průmyslovém prostředí.

Parametr WBGT se určuje z teploty přirozeně větraného mokrého teploměru t_{nw} a výsledné teploty kulového teploměru t_g , popř. teploty vzduchu zjištěné suchým teploměrem t_{ai} .

Pro ukazatel WBGT v závislosti na druhu prostoru potom platí:

Pro vnitřní prostory bez slunečního záření:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nw} + 0,3 \cdot t_g \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.10)$$

Pro vnější prostory se slunečním zářením:

$$WBGT = 0,7 \cdot t_{nw} + 0,2 \cdot t_g + 0,1 \cdot t_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.11)$$

kde

WBGT je parametr prostředí [$^{\circ}\text{C}$]

t_{nw} teplota přirozeně větraného mokrého teploměru [$^{\circ}\text{C}$]

t_a teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

Průměrný ukazatel WBGT se stanoví ze tří měření provedených u stojící osoby ve výšce 100, 1100 a 1700 mm nad podlahou, u osoby sedící ve výškách 100, 600 a 1100 mm nad podlahou, tedy ve výšce hlavy, břicha a kotníků.

$$WBGT = \frac{WBGT_{hlava} + 2 \cdot WBGT_{břicho} + WBGT_{kotníky}}{4} \quad (2.12)$$

kde

WBGT je výsledná hodnota parametru WBGT [$^{\circ}\text{C}$]

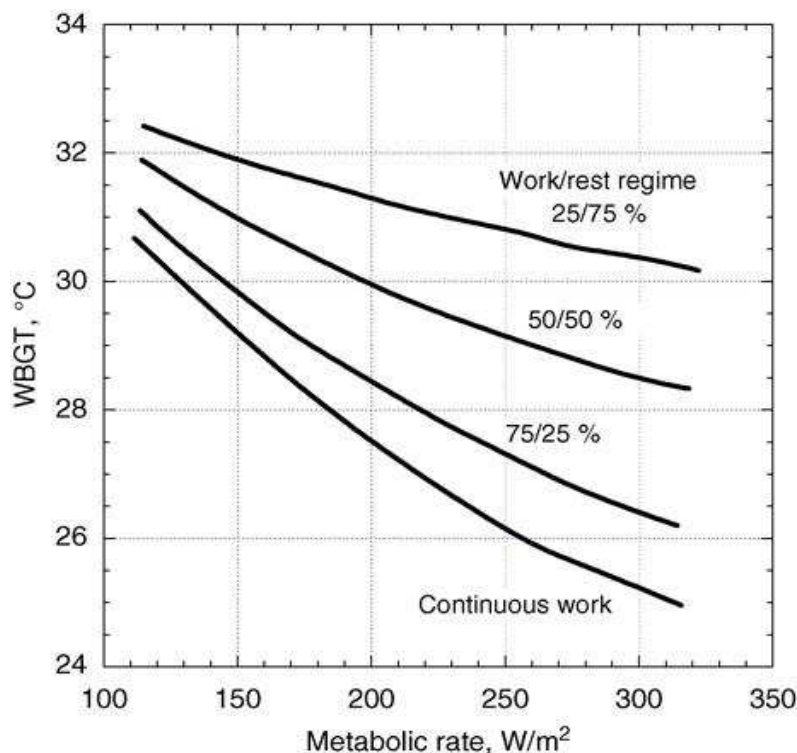
$WBGT_{hlava}$ hodnota ukazatele WBGT v úrovni hlavy [$^{\circ}\text{C}$]

$WBGT_{břicho}$ hodnota ukazatele WBGT v úrovni břicha [$^{\circ}\text{C}$]

$WBGT_{kotníky}$ hodnota ukazatele WBGT v úrovni kotníků [$^{\circ}\text{C}$]

Pokud se jednotlivé úrovně od sebe liší max. o 5%, lze prostředí považovat za homogenní a určit pouze $WBGT_{břicho}$.

Výsledná hodnota ukazatele WBGT se porovnává s referenčními hodnotami, závisujícími na vykonávané činnosti, pro určení přípustné pracovní zátěže - viz obr. 3.1



Obr 3.1: Přípustné pracovní zátěže v závislosti na parametru WBGT a metabolickém toku. [15]

3.2 Hodnocení pomocí parametrů PMV, PPD

Používají se pro hodnocení tepelného stavu v mírném prostředí, platí pro ustálené podmínky, nebo pro malé hodnoty rozkmitu teplot (menší než 1K) a rychlosti změn teplot (do 2,0 K/h).

Parametr PMV (predicted mean vote = předpokládaná průměrná volba) udává průměrnou volbu tepelného pocitu velké skupiny osob, která hodnotí spokojenost s tepelným stavem prostředí na základě sedmibodové stupnice uvedené v tabulce 3.1 [10]

Tabulka 3.1 sedmibodová stupnice tepelných pocitů [10]

+3	Horko
+2	Teplo
+1	Mírné teplo
0	Neutrální
-1	Mírné chladno
-2	Chladno
-3	Zima

3.2.1 Výpočet PMV

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left[\begin{aligned} &(M - V) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - V) - P_a] - 0,42[(M - V) - 58,15] \\ &\quad - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - t_a) \\ &\quad - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(f_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right] \quad (2.13)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - V) - l_{cl} [3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2.14)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \leq 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 l_{cl} & \text{pro } l_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 l_{cl} & \text{pro } l_{cl} \geq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (2.16)$$

kde

M je metabolismus [W/m²]

W užitečný mechanický výkon [W/m²]

l_{cl} tepelný odpor oděvu [m² · K/W]

f_{cl} povrchový faktor oděvu definován jako poměr povrchu oděného člověka k povrchu nahého člověka

t_a teplota vzduchu [°C]

t_r střední radiační teplota [°C]

v_a relativní rychlost proudění vzduchu [m/s]

p_a parciální tlak vodní páry [Pa]

h_c součinitel přestupu tepla konvekcí [W/(m² · K)]

t_{cl} teplota povrchu oděvu [°C]

zdroj : [10]

Tato rovnice slouží k výpočtu PMV pro různé kombinace vstupních parametrů, nebo při položení PMV=0 a dosazení některých proměnných lze dopočítat další hodnoty, které vytvoří tepelně neutrální prostředí.

Dle normy [10] lze ukazatel PMV použít pouze pro hodnoty mezi +2 až -2 a tehdy, jsou-li hlavní parametry v následujícím rozmezí:

M 46 až 232 W/m²

l_{cl} 0 až 0,310 m² · K/W

t_a 10 až 30 °C

t_r 10 až 40 °C

v_{ar} 0 až 1 m/s

p_a 0 až 2700 Pa

3.2.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených - PPD

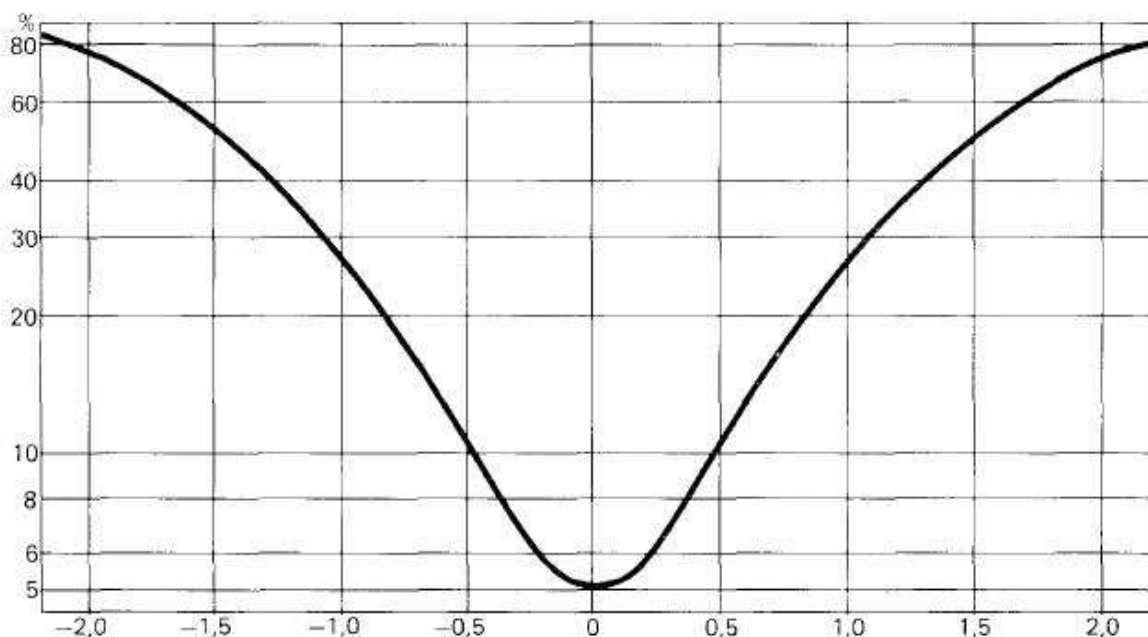
Parametr PPD (predicted percentage of dissatisfied) umožňuje stanovit počet nespokojených s daným teplotním stavem, tj. Těch, kteří by na sedmibodové stupnici (tabulka 3.1) volili *horko*, *teplo*, *chladno*, nebo *zima*.

Obr. 3.2 zobrazuje graf vytvořený P.O. Fangerem na základě experimentálního výzkumu popisující PPD v závislosti na PMV. Z grafu je zřejmé, že i v tepelně neutrálním prostředí se ve velké skupině najde přibližně 5 % nespokojených.

Známe-li hodnotu PMV, lze PPD také vypočítat z rovnice:

$$PPD=100-95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (2.17)$$

[10]



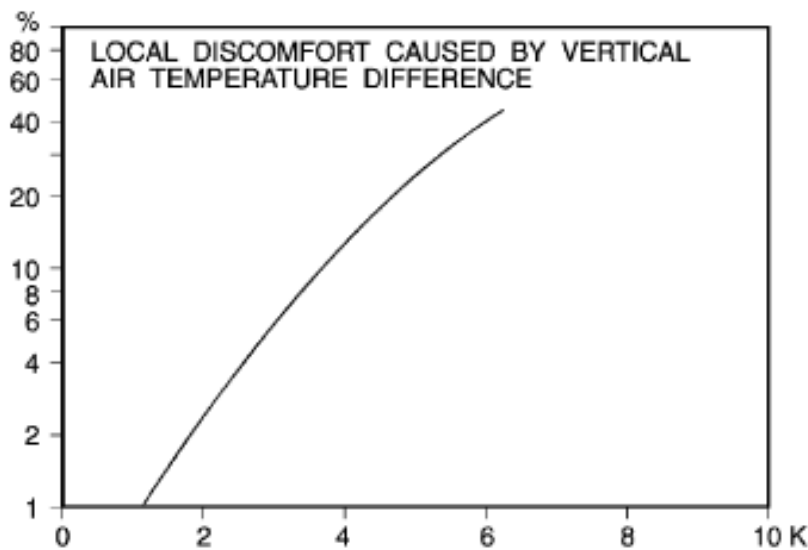
Graf 3.2: Závislost předpovídaného procentuálního podílu nespokojených PPD na předpokádané průměrné volbě PMV [16]

3.2.3 Lokální tepelný diskomfort

Ani tepelně neutrální prostředí (PMV=0) není samo o sobě zárukou tepelné pohody. Člověk se sice může cítit tepelně neutrálně, ale přitom mít část těla v teple a část v chladu. Stav, kdy je některá část těla nadměrně ohřívána či ochlazována, nazýváme lokální tepelný diskomfort. Ukazuje se, že na stavy nepohody takto způsobené jsou lidé citliví zvláště při klidné práci vsedě. Se vzrůstající tělesnou aktivitou se riziko místního tepelného diskomfortu snižuje.

Vertikální rozdíl teplot

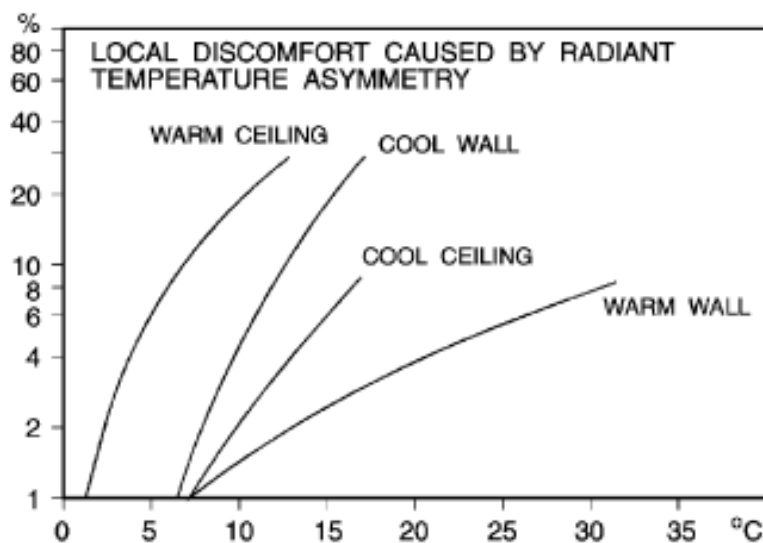
Jednou z možných příčin diskomfortu je vysoký rozdíl teplot mezi kotníky a hlavou. Na teplotu vzrůstající směrem nahoru jsou lidé obecně citlivější, než na teplo od nohou. Graf nespokojenosti (obr. 3.3) s vertikálním rozdílem teplot proto zobrazuje stav, kdy je teplota u kotníků nižší.



Obr. 3.3: Závislost podílu nespokojených na vertikálním rozdílu teplot [14]

Nesymetrie teplot sálání

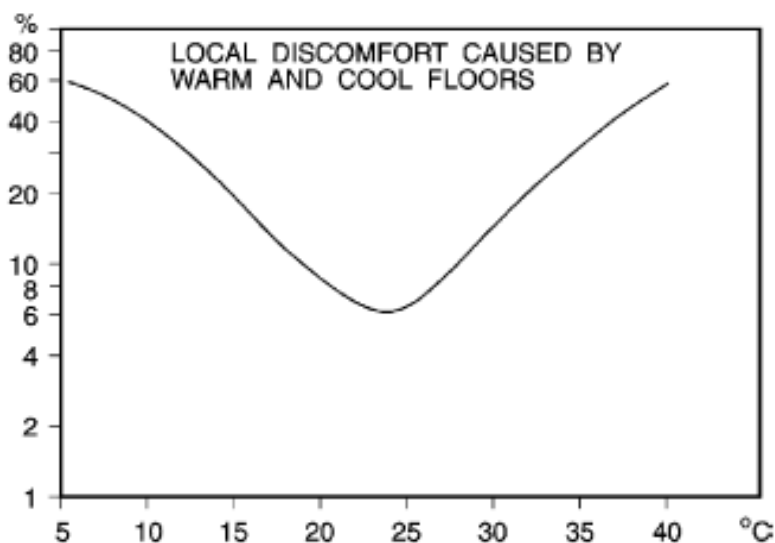
Další z příčin způsobujících místní tepelný diskomfort je nesymetrie radiačních teplot. Velké rozdíly radiačních teplot mohou nastat v průmyslovém prostředí např. při hutní výrobě, v kovárnách apod. V obytných prostorách je to při použití vysokotenciálních zdrojů tepla jako například krbů, kamen a dalších. Jak je patrné z obrázku 3.4, nejméně příznivé jsou případy chladných zdí nebo teplého stropu.



Obr. 3.4: Závislost podílu nespokojených na asymetrii radiačních teplot. Jednotlivé křivky udávají vliv(zleva): teplého stropu, chladných zdí, chladného stropu, teplých zdí [14]

Vliv teplých a studených podlah

Teplé či naopak studené podlahy mohou také u lidí vyvolat nepříjemné pocity. Teplota podlahy je ovlivněna například podlahovým vytápěním, ale také materiálem (studená dlažba x teplý koberec). Na teplotu podlahy jsou lidé citliví zejména v obytných prostorách, při nošení domácí obuvi. Závislost podílu nespokojených na teplotě podlahy zobrazuje následující obrázek.

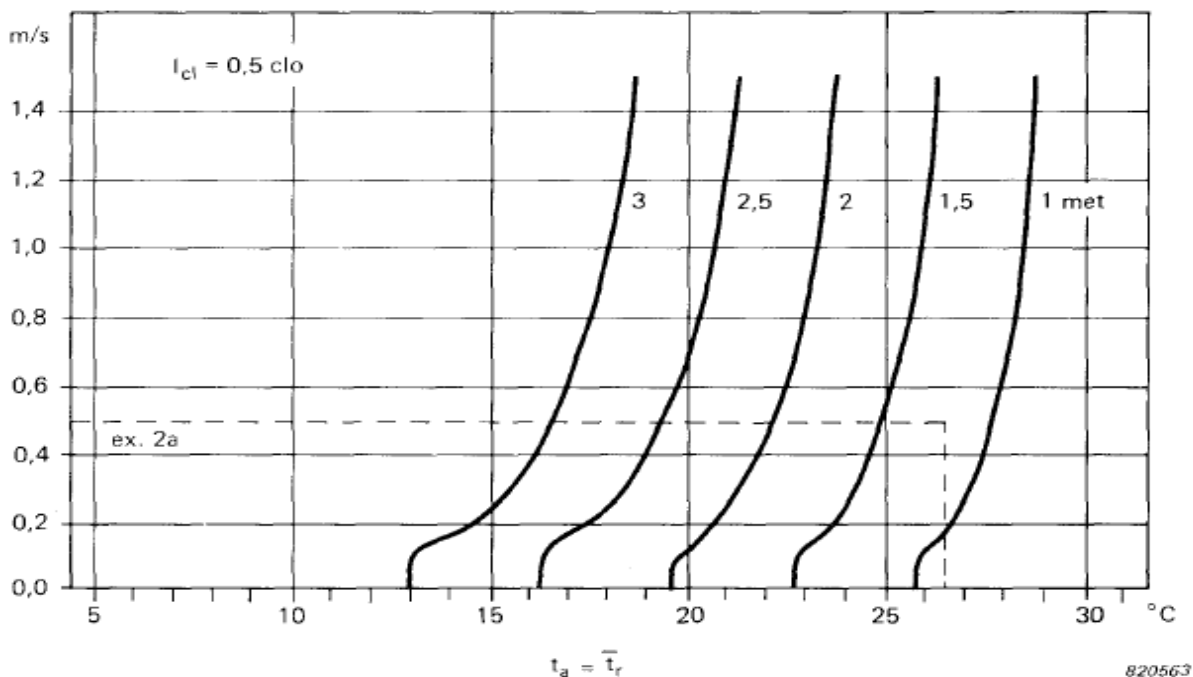


Obr.3.5: Závislost podílu nespokojených na teplotě podlahy [14]

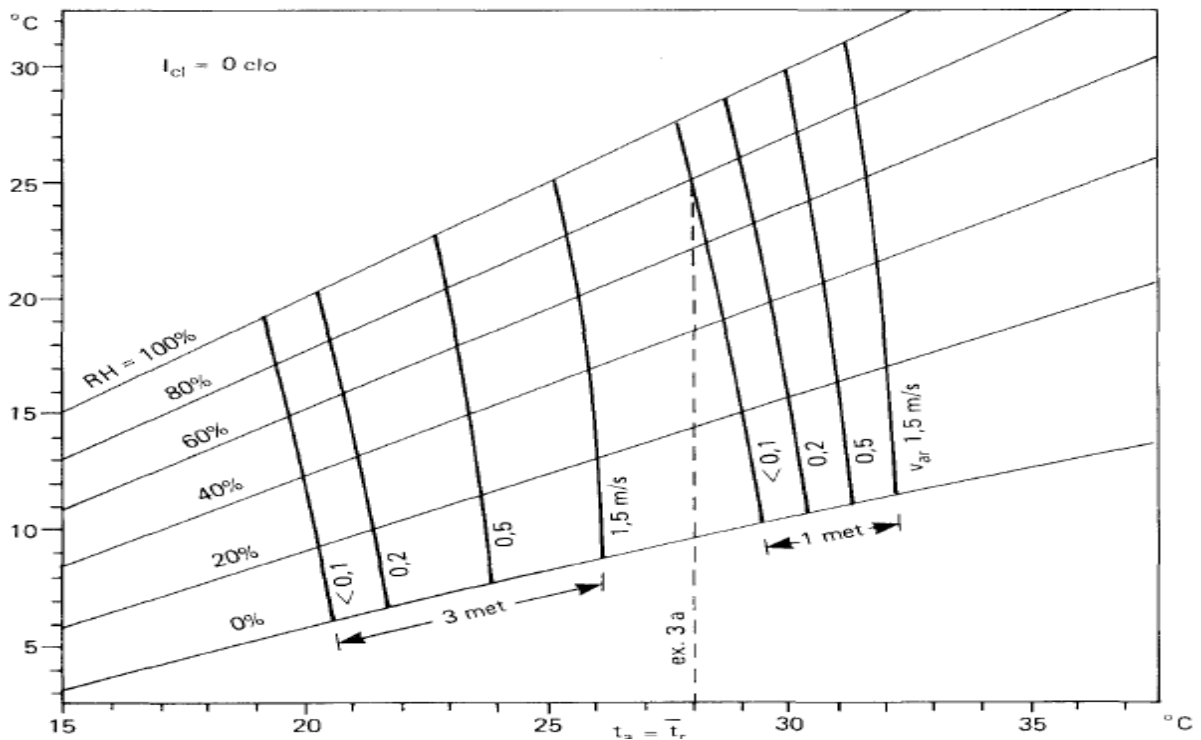
3.2.4 Komfortní diagramy

V době vzniku komfortní rovnice byl výpočet PMV pomocí rovnice (číslo) příliš složitý pro manuální výpočty a proto byly pro praktické využití vytvořeny komfortní diagramy (příklady obr 3.6, 3.7, 3.8).

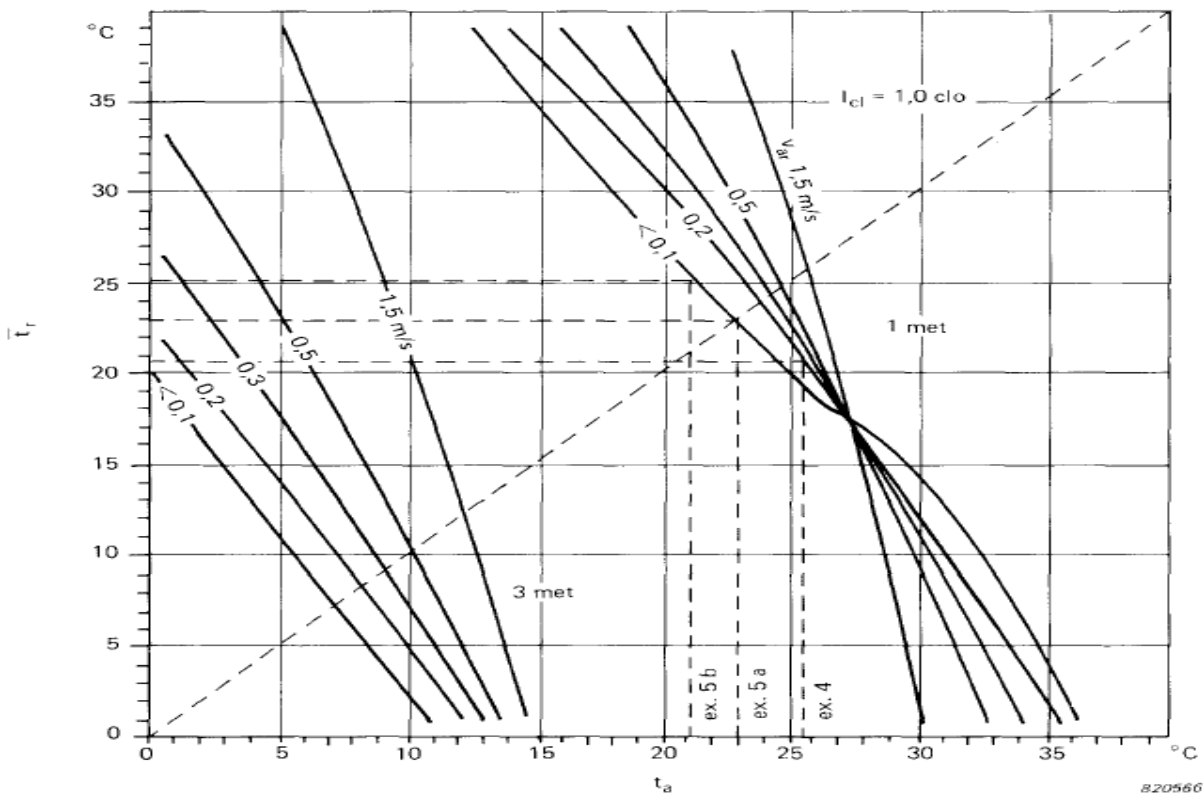
Pomocí těchto diagramů je možno pro zvolené hodnoty tepelného odporu oděvu a metabolismu určovat parametry prostředí, které zaručí tepelnou pohodu.



Obr. 3.6 Komfortní diagram pro tepelný odpor oděvu $I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$ a relativní vlhkost $\varphi = 50\%$ Rychlost proudění vzduchu je zde funkcí teploty vzduchu pro různé hodnoty metabolismu M [16]



Obr. 3.7 Komfortní diagram zobrazující závislost teploty vlhkého teploměru t_w na teplotě vzduchu $t_a = t_r$ při různých hodnotách rychlosti proudění vzduchu v_a a relativní vlhkosti $\phi = RH$ [16]



Obr. 3.8 Komfortní diagram pro tepelný odpor oděvu $I_{cl} = 1$ clo. Střední radiační teplota t_r je zde funkcí teploty vzduchu t_a při různých hodnotách metabolismu M a rychlosti vzduchu v_a [16]

3.4 Tepelný manekýn

První model postavil v r. 1941 Dr. Harwood Belding pro armádu Spojených Států [17]. Byl určen k měření prostupu tepla oděvem. Postupem času byl tepelný manekýn stále zdokonalován, nejnovější verze má až 36 tepelných zón, umožňuje simulovat pocení, měřit vlhkost, rychlost vzduchu a teplotu vzduchu, simulovat pohyby při chůzi [18].

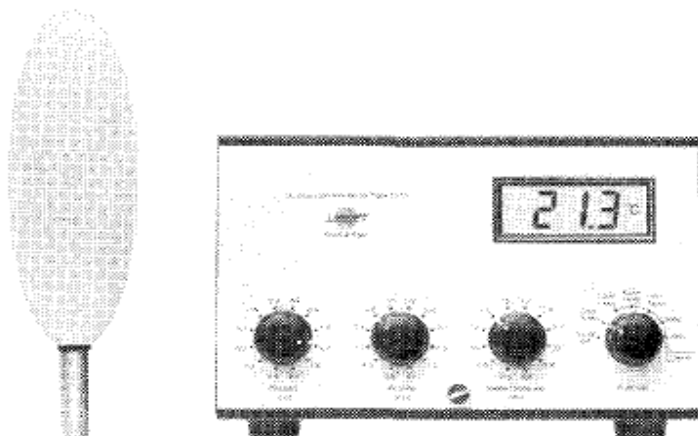
Tepelný manekýn je používán k měření tepelného odporu oděvu, obuvi či spacích pytlů, a zkoumání vlivů okolního prostředí na člověka.



Obr.3.9 Tepelný manekýn Newton firmy Measurement Technology Northwest [18]

3.5 Měřič tepelného komfortu

Tento přístroj typové označení 1212 popsany v [16] umožňuje měřit a přímo vyhodnocovat tepelné parametry prostředí a stanovit teplotu zaručující tepelnou pohodu pro nastavené hodnoty tepelného odporu oděvu, metabolismu a parciálního tlaku vodní páry. Také je schopný počítat příslušné hodnoty PMV a PPD.



Obr.3.10 Měřič tepelné pohody typ 1212

4 Měření jednotlivých veličin

Způsob měření jednotlivých veličin a měřicí přístroje popisuje norma ČSN EN ISO 7726

4.1 Měření teploty

4.1.1 Dilatační teploměry

Pracují na principu teplotní roztažnosti látek, která umožňuje převést měření teploty na měření délky, objemu, nebo tlaku.

Plynové teploměry

Jako jejich náplň se nejčastěji používá hélium, vodík nebo dusík, protože jejich chování lze nad 0°C popsat s velkou přesností jednoduchou rovnicí.[20]

Indikace se provádí buď měřením tlaku při stálém objemu nebo měřením objemu při stálém tlaku.

Ačkoli jsou tyto teploměry velmi přesné, jejich nevýhodou je rozměrnost, choulostivost a obtížná manipulace. Proto je jejich využití omezeno jen na přesná laboratorní měření.

Kapalinové teploměry

jsou plněny rtutí (měřitelný rozsah teplot -35 až 800 °C), toluolem (do -70 °C), etylalkoholem (do -100 °C), nebo pentanem (do -200 °C)[20]

Indikace je buď délková nebo tlaková.

Jsou tvořeny zásobníkem náplně, válcovou, nebo řídčeji profilovanou kapilárou, a stupnicí teploty.

Teploměry založené na roztažnosti pevných látek

Sem patří především teploměry bimetalové, které jsou složeny ze dvou svařených kovových pásků s různou teplotní roztažností. Při změně teploty se tento pásek ohýbá, deformace je nejčastěji pomocí mechanického převodu přenášena na ukazatel.

4.1.2 Odporové teploměry

Využívají změny elektrického odporu s teplotou. Ten u vodičů s teplotou roste, u polovodičů obvykle klesá.

Jejich hlavní výhodou je velká přesnost a dobrá časová stabilita údaje, možnost přenosu údaje na dálku i jeho zpracování.

4.1.3 Termoelektrické teploměry

Mezi spojenými konci drátů nebo desek ze dvou různých materiálů o různých teplotách vzniká elektromotorická síla. Při měření se tedy jeden spoj udržuje na známé teplotě a druhý – měrný – konec je v prostředí o měřené teplotě. Vzniklá elektromotorická síla je potom funkcí těchto dvou teplot.

4.1.4 Radiační teploměry

Měří teplotu na základě záření, které těleso vysílá do okolí. Měření těmito teploměry je bezdotykové, jsou tak použitelné pro měření nepřístupných objektů. Dále lze těmito teploměry měřit téměř libovolně vysoké teploty.

4.2 Měření vlhkosti

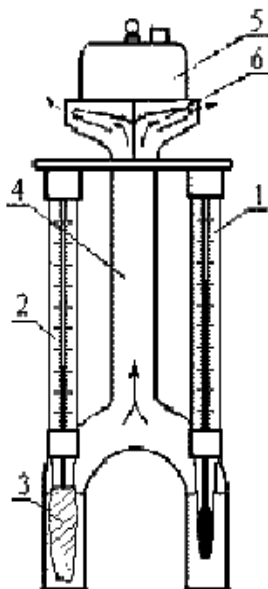
4.2.1 Deformační hygrometry

Obsahují čidlo, jehož rozměry se působením vlhkosti mění. Jako materiál čidel se používají lidské vlasy, živočišné blány nebo syntetické organické látky. Jsou použitelné pro rozsah relativní vlhkosti od 20 do 90 % při teplotách do 40 °C. Nevýhodou těchto přístrojů je kromě vysoké nelinearity i nutnost časté regenerace, tj. vystavení čidla po několik hodin vysoké vlhkosti.

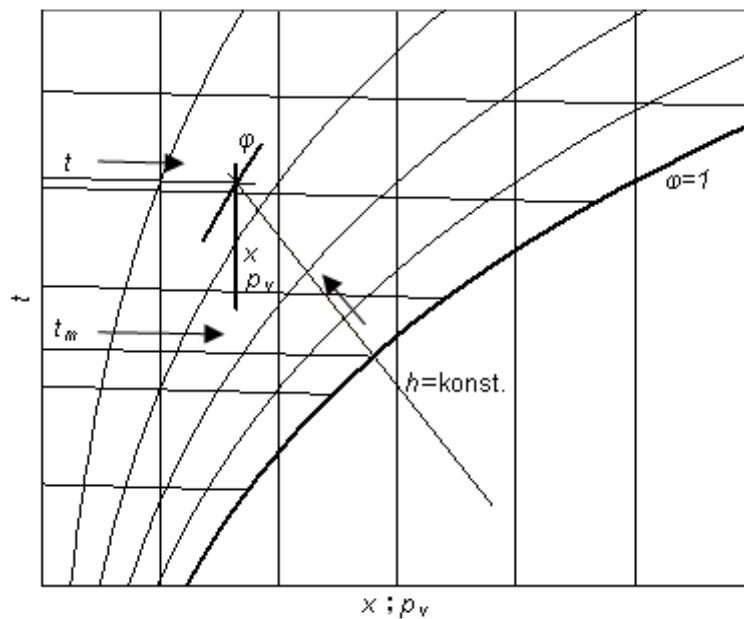
4.2.2 Psychrometr

Při měření využívají rozdílu teplot mezi suchým a ovlhčeným teploměrem, který vzniká odebráním tepla z vlhkého teploměru při vypařování vody.

Aspirační psychrometry – proudění vzduchu kolem teploměrů je zde nucené pomocí ventilátorku poháněného buď hodinovým strojkem (Assmanův psychrometr) nebo elektromotorkem. Jsou použitelné pro rozsah teplot – 40 až 95 °C s přesností až ± 1 % relativní vlhkosti. [21]



Obr. 4.1 Assmanův aspirační psychrometr legenda: 1 - suchý teploměr 2 - vlhký teploměr 3 - zvlhčování teploměru 4 - proudění vzduchu 5 - ventilátorek 6 - pohon ventilátorku [22]



Obr. 4.2 Určení vlhkosti vzduchu z naměřených hodnot suchého a mokrého teploměru pomocí i - x diagramu vlhkého vzduchu, kde t je teplota suchého teploměru, t_m teplota vlhkého teploměru, φ relativní vlhkost vzduchu [23]

4.2.3 Kondenzační (rosný) vlhkoměr

Pracuje na principu kondenzace vodní páry na ochlazované měřicí plošce. Z teploty měřicí plošky lze vypočítat tlak vodní páry a při znalosti okolní teploty i relativní vlhkost.

4.2.4 Elektrické hygrometry

Využívají změny elektrického odporu hygroskopického materiálu – většinou chloridu lithného při absorpci vody.

4.3 Měření střední radiační teploty

4.3.1 Černý kulový teploměr

Kulový teploměr je tvořen černou koulí (z důvodu nejlepší pohltivosti radiačního záření) vyrobenou z tenkého měděného plechu, v jejímž středu je umístěn rtuťový teploměr či jiné vhodné teplotní čidlo. Průměr koule bývá 10 nebo 15 cm, přičemž čím je průměr menší, tím je měření méně přesné z důvodu ovlivnění teplotou a prouděním vzduchu. V ČR používaná modifikace teploměru dle Jokla má kouli obalenou vrstvou pěnového polystyrenu, který snižuje odraz tepelných paprsků od povrchu koule [24]

Po ustálení a změření vnitřní teploty koule lze střední radiační teplotu stanovit dle následujících vztahů:

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot v_{ak}^{0,6} (t_g - t_{ak})]^{0,25} - 273 \quad \text{pro kulový teploměr o průměru 10 cm (4.2)}$$

nebo

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_{ak}^{0,6} (t_g - t_{ak})]^{0,25} - 273 \quad \text{pro kulový teploměr o průměru 15 cm (4.2)}$$

kde

t_r je střední radiační teplota [°C]

t_g teplota kulového teploměru [°C]

v_{ak} rychlost proudění vzduchu na úrovni koule [m.s⁻¹]

t_{ak} teplota vzduchu v okolí kulového teploměru [°C]

[24]

4.3.2 Dvoukulový teploměr

K měření se zde využívá dvou koulí s různou pohltivostí (jedna černá, druhá leštěná), obě koule jsou přitom zahřívány na stejnou teplotu. Střední radiační teplota se potom vypočítá ze vztahu:

$$T_r = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{P_p + P_b}{\sigma(\epsilon_b - \epsilon_p)}} \quad [\text{K}] \quad (4.3)$$

kde

T_s je teplota čidla [K]

P_p dodávka tepla leštěnému tělesu [W.m⁻²]

P_b dodávka tepla černému tělesu [W.m⁻²]

σ Stefanova - Boltzmanova konstanta [W/m².K⁴]

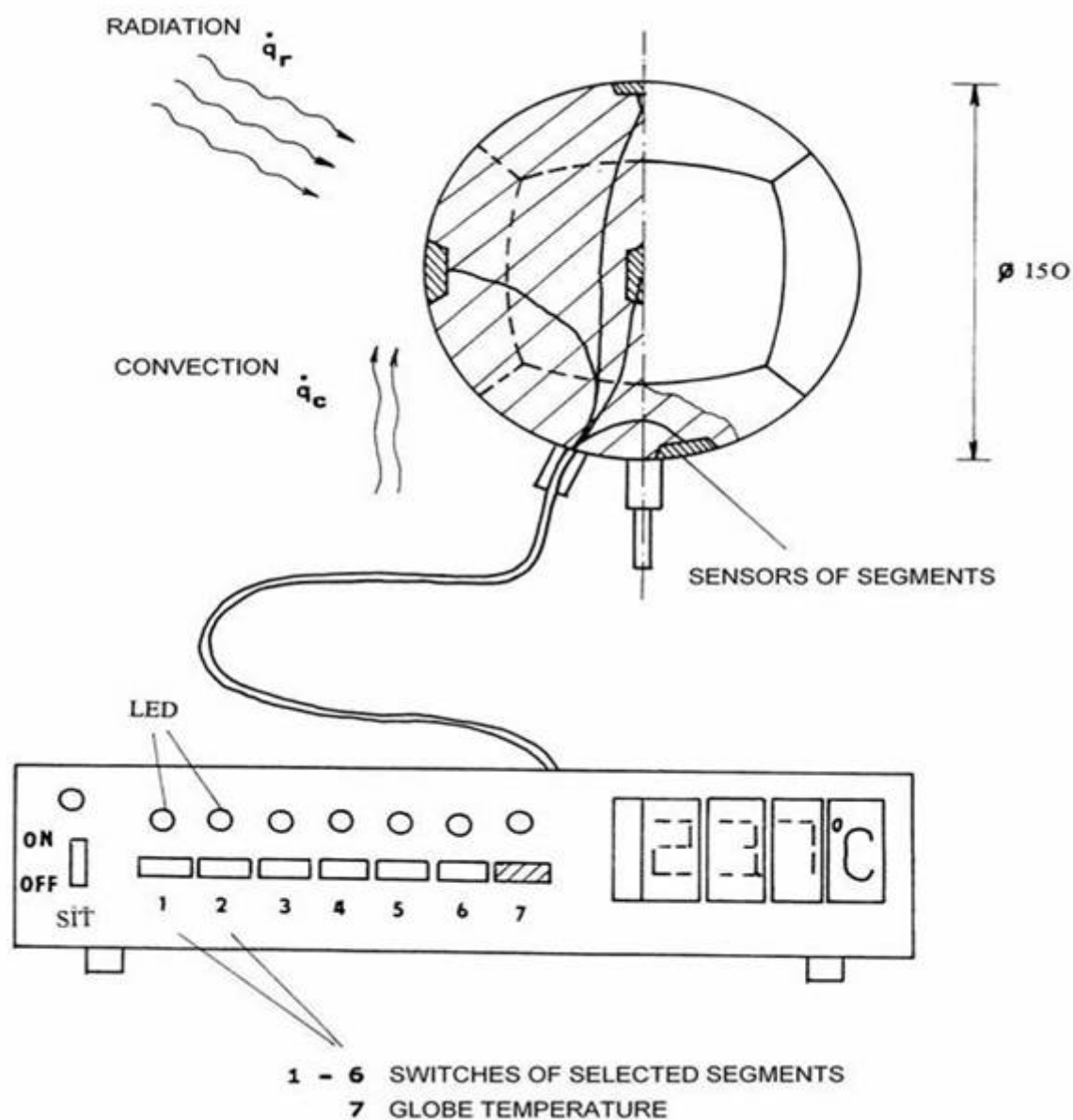
ϵ_p emisivita leštěného tělesa

ϵ_b emisivita černého tělesa

[19]

4.3.3 Stereoteploměr Jokl - Jiráček

Tento patentovaný český měřicí přístroj při měření zohledňuje i přenos tepla konvekcí a umožňuje vyhodnocovat nerovnoměrné působení sálání i proudění v prostoru. Měřicí koule je rozdělena na šest segmentů, které měří radiční teplotu nezávisle. Střední radiční teplota je potom průměrná hodnota z těchto měření. [25]



Obr. 4.3 Schema stereoteploměru Jokl - Jiráček [25]

Závěr

Zadáním této práce bylo utřídit poznatky o metodách a způsobech hodnocení tepelné pohody prostředí v budovách. Následuje shrnutí poznatků obsažených v jednotlivých částech práce:

- První kapitola obsahuje přehled vlivů vnitřního prostředí na člověka, jejichž součástí je i tepelná pohoda. Dále je zde uvedena rovnice tepelné rovnováhy, která je jednou z podmínek tepelné pohody a rozvedeny jednotlivé složky této rovnice.
- V druhé kapitole jsou rozebrány jednotlivé parametry vnitřního prostředí, které souvisí s tepelnou pohodou člověka. Při hodnocení tepelné pohody je jedním z důležitých parametrů operativní teplota, která zahrnuje působení teploty vzduchu a střední teploty sálání. Dalším důležitým parametrem je vlhkost vzduchu. Ukazuje se že přílišná, nebo naopak nedostatečná vlhkost vzduchu mají nezanedbatelný vliv na zdraví člověka.
- Další část uvádí jednotlivé metody posuzování tepelného stavu vnitřního prostředí. Pro hodnocení v teplejších prostředích se používá ukazatel WBGT, jehož použitím lze stanovit přípustnou tepelnou zátěž organismu. V mírných prostředích mají své využití ukazatele PMV a PPD, které udávají hodnoty středního tepelného komfortu pro velkou skupinu lidí, respektive procentní podíl lidí nespokojených s tepelným stavem prostředí. Hodnoty parametru PPD, tj předpokládaného procentního podílu nespokojených ukazují, že v praxi není možné dosáhnout tepelného stavu prostředí, který by vyhovoval všem.
Dále jsou zde zmíněny příčiny vzniku místního diskomfortu, tj. takových stavů, kdy člověk i v prostředí tepelně neutrálním pociťuje nepohodlí. Příčinou těchto stavů je například různé ohřívání či ochlazování jednotlivých částí těla.
Pro praktické posouzení tepelného stavu práce uvádí příklady komfortních diagramů, které vznikly na základě výpočtů PMV. Pro hodnocení tepelné pohody je dále možné využít měřič tepelného komfortu, který umožňuje přímo vyhodnocovat stav tepelného prostředí a vypočítat hodnotu PMV nebo optimální hodnotu teploty pro nastavené hodnoty tepelného odporu oděvu a tělesné aktivity člověka.
Rovněž v práci zmíněný tepelný manekýn je velice užitečný přístroj pro hodnocení nejen tepelného stavu prostředí, ale i tepelného odporu oděvu či například spacích pytlů.
- V poslední kapitole této práce jsou zmíněny měřicí přístroje použitelné pro měření jednotlivých veličin ovlivňujících tepelný stav prostředí. Jsou to zejména různé typy teploměrů, vlhkoměrů apod. Blíže se této problematice věnuje například norma ČSN EN ISO 7726, která obsahuje požadavky na přesnosti měřicích přístrojů i metody měření.

Tož to je asi tak všechno, co jsem chtěl k danému tématu sdělit.

Seznam použitých zdrojů

- [1] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí*. Brno : VUT, 1991. 201 s. ISBN 80-214-0258-X.
- [2] DANIELS Klaus. *Technika budov*. Bratislava : JAGA group, 2003. 519 s. ISBN 80-88905-63-X
- [3] VAVERKA Jiří et al. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno : VUTIUM, 2006. 648 s. ISBN 80-214-2910-0
- [4] CIHELKA, Jaromír et al. *Vytápění, větrání a klimatizace*. 3. vyd. Praha : SNTL, 1984
- [5] CENTNEROVÁ, Lada. Hodnota metabolismu. [online] Poslední aktualizace 7.6.2001 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/569-hodnota-metabolismu#lit>>
- [6] CENTNEROVÁ, Lada. Izolace oblečení. [online] Poslední aktualizace 14.6.2001 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/576-izolace-obleceni#lit>>
- [7] Thermal Comfort. [online] Poslední aktualizace 18.3.1997 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.blowtex-educar.it/DOWNLOADS/Thermal%20Comfort.htm>>
- [8] CENTNEROVÁ, Lada. Tepelná pohoda a nepohoda. [online] Poslední aktualizace 13.12.2000 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>>
- [9] RUBIN Aleš, RUBINOVÁ Olga. Vnitřní prostředí budov a tepelná pohoda člověka. [online] Poslední aktualizace 22.8.2005 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/2650-vnitri-prostredi-budov-a-tepelna-pohoda-cloveka>>
- [10] ČSN EN ISO 7730 Mírné tepelné prostředí - Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody
- [11] KABELE Karel, VEVERKOVÁ, Zuzana. Modelování operativní teploty. [online] Poslední aktualizace 15.11.2004 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/1422-modelovani-operativni-teploty>>
- [12] PAVELEK, Milan et al. *Termomechanika*. 3. vyd Brno : VUT, . 284 s. ISBN 80-214-2409-5
- [13] Význam větrání budov. [online] Poslední aktualizace 05.09.2010 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://stastnedomy.cz/index.asp?section=clanky&cat=123&page=detail&id=264>>
- [14] OLSEN B.W., K.C. Parsons: Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings* 34, 2002. dostupné online na <www.sciencedirect.com>
- [15] Přípustné pracovní zátěže v závislosti na parametru WBGT (obrázek) [online] [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.globalhealthaction.net/index.php/gha/article/viewFile/5719/6396/14706>>
- [16] OLESEN, B.W. *Thermal Comfort*. [online] . 43 s. [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/environmental_engineering/lectures/L10%20Thermal%20Comfort.pdf>
- [17] ENDRUSICK, Thomas L., STROSCHEIN Leander A., GONZALES Richard R. . Thermal manikin history. [online] [cit. 2011-05-21] dostupné na WWW : <http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/mainSubpages/manikin_history.php>
- [18] MEASUREMENT Technology Northwest. Thermal manikin Newton, . Thermal manikin history. [online] [cit. 2011-05-21] dostupné na WWW : <<http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/products/full-body/thermal-manikin-newton.php>>
- [19] ČSN EN ISO 7726 Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin
- [20] BAŠUS, Vladimír. *Příručka měřící techniky pro strojírenství a energetiku*. Praha : SNTL, 1965.
- [21] JENČÍK Josef, KUHN Ludvík et al. *Technická měření ve strojírenství* Praha : SNTL 1982 1 584 s.

- [22] OLCZAK, Włodzimierz. Przyrządy do pomiaru wilgotności. [online] [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW: <<http://wlodzimierz.w.interia.pl/higromet.html>>
- [23] MAREŠ, Luděk. Vlhkost vzduchu a její měření [online] Poslední aktualizace 13.3.2006 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>>
- [24] LEHOČKÁ Jana, JIRÁK, Z. Kulový teploměr a jeho vývoj z hlediska hodnocení tepelné pohody organismu [online] Poslední aktualizace 28.11.2005 [cit. 2011-05-02] dostupné na WWW : <<http://www.tzb-info.cz/2896-kulovy-teplomer-a-jeho-vyvoj-z-hlediska-hodnoceni-tepelne-pohody-organismu>>
- [25] JOKL, Miroslav: Kulový stereo teploměr - nový přístroj vyvinutý ve VÚBP Praha [online] Poslední aktualizace 25.09.2008, [cit. 2011-05-21] dostupné na WWW <http://www.bozpinfo.cz/win/josra/josra-02-2008/stereoteplomer_jokl.html>
- [26] DOLEŽÍLKOVÁ, Hana Modelování vlhkosti programem Contam 2.4 [online] Poslední aktualizace 1.6.2009 [cit. 2011-05-16] dostupné na WWW : <<http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-PROSTREDI/5684-MODELOVANI-VLHKOSTI-PROGRAMEM-CONTAM-2-4>>

Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Symbol	Jednotka
Metabolický tepelný tok	q_m	W/m^2
měrný tepelný tok prouděním	q_k	W/m^2
měrný tepelný tok sáláním	q_s	W/m^2
měrný tepelný tok vypařováním	q_w	W/m^2
měrný tepelný tok dýcháním	q_d	W/m^2
měrný tepelný tok vedením	q_v	W/m^2
měrný tepelný tok mokrým vypařováním	q_{w1}	W/m^2
měrný tepelný tok difuzním vypařováním	q_{w2}	W/m^2
parciální tlak vodní páry nad povrchem pokožky	p_h	Pa
parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu	p_v	Pa
teplota pokožky	t_h	(°C)
hmotnostní průtok vdechovaného vzduchu	M_v	kg/s
teplota vydechovaného vzduchu	t_{vyd}	°C
teplota okolního vzduchu	t_a	°C
měrná vlhkost vydechovaného vzduchu	x_{vyd}	kg/kg s.v.
měrná vlhkost okolního vzduchu	x_v	kg/kg s.v.
tepelný tok sáláním	Q_s	W
poměrná sálavost oděvních látek	e	-
sálající povrch těla	S'	m^2
střední radiační teplota	t_r	°C
teplota povrchu oděvu	t_{cl}	°C
rychlost proudění vzduchu	v_a	m/s
součinitel prostupu tepla konvekcí	α_k	$W/m^2 K$
tepelný odpor oděvu	l_{cl}	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ (clo)
operativní teplota	t_o	°C
součinitel přestupu tepla sáláním	h_r	$W/m^2 \cdot K$
součinitel přestupu tepla prouděním	h_c	$W/m^2 \cdot K$
teplota kulového teploměru	t_g	°C
koeficient pro výpočet operativní teploty	A	
váhový koeficient	K	
součinitel přestupu tepla sáláním v úrovni kulového teploměru	h_{rg}	$W/m^2 \cdot K$

součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni kulového teploměru	h_{cg}	$W/m^2 \cdot K$
emisivita kůže	ε	
průměr koule kulového teploměru	D	m
absolutní vlhkost vzduchu	Φ	kg/m^3
hmotnost vodní páry	m_p	kg
hmotnost vody	m_k	kg
hmotnost tuhé fáze (ledu)	m_t	kg
relativní vlhkost vzduchu	φ	$\%$
měrná vlhkost vzduchu	x	$kg/kg \text{ s.v.}$
hmotnost suchého vzduchu	m_v	kg
stupeň obtěžování průvanem	DR	$\%$
intenzita turbulence	Tu	$\%$
ukazatel WBGT	$WBGT$	$^{\circ}C$
teplota přirozeně větraného mokrého teploměru	t_{nw}	$^{\circ}C$
povrchový faktor oděvu	f_{cl}	
ukazatel PMV	PMV	
metabolismus	M	W/m^2
parametr PPD		
rychlost proudění vzduchu na úrovni koule	v_{ak}	$m \cdot s^{-1}$
teplota vzduchu v okolí kulového teploměru	t_{ak}	$^{\circ}C$
dodávka tepla leštěnému tělesu	P_p	$W \cdot m^{-2}$
dodávka tepla černému tělesu	P_b	$W \cdot m^{-2}$
emisivita leštěného tělesa	ε_p	
emisivita černého tělesa	ε_b	

Fyzikální konstanty

měrná tepelná kapacita vzduchu	c_v	$1,01 \cdot 10^3 J/kg \cdot K$
měrné výparné teplo vody	r	$2,4 \cdot 10^6 J/kg$
součinitel difúzní propustnosti pokožky	β	$1,28 \cdot 10^{-9} kg/(s \cdot m^2 \cdot Pa)$
Stefanova-Boltzmannova konstanta	σ	$5,670400 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$