

VPLYV TEPELNO-VLHKOSTNEJ MIKROKLÍMY PROSTREDIA NA ZDRAVIE ZAMESTNANCOV

Ing. Milan Drahoš,
Ing. Richard Drahoš,
D2R engineering, s. r. o., Poprad

Teplno-vlhkostná mikroklima je dôležitým fyzikálnym faktorom pracovného prostredia, ktorý výrazne ovplyvňuje pracovné podmienky na pracoviskách. Z toho dôvodu sú v § 37 zákona č. 355/2007 Z. z. [1] ustanovené základné povinnosti zamestnávateľov na ochranu zdravia zamestnancov pred záťažou teplom a chladom pri práci a vo vyhláske MZ SR č. 544/2007 Z. z. [2] sú ustanovené podrobnosti súvisiace s ochranou zdravia zamestnancov pred záťažou teplom a chladom.

Požiadavky na teplno-vlhkостnú mikroklimu v pracovnom prostredí (ďalej len "mikroklima") sa stanovujú v závislosti od tepelnej produkcie organizmu zamestnanca, tzn. *energetického výdaja*, ktorý je daný spôsobom a intenzitou vykonávanej práce. Podľa celkového priemerného energetického výdaja sú vo vyhláske **MZ SR č. 544/2007 Z. z.** stanovené triedy prác (1a, 1b, 1c, 2, 3 a 4), pričom pre triedy prác (1a, 1b, 1c a 2) sú stanovené optimálne a prípustné hodnoty mikroklimatických veličín.

Základnou mikroklimatickou veličinou, ktorá je schopná pri určitom odevu a aktivite zamestnancov zabezpečiť tepelnú rovnováhu bez zjavného potenia je operatívna teplota s prihliadnutím na ďalšie súvisiace mikroklimatické veličiny, ako relatívna vlhkosť vzduchu a rýchlosť prúdenia vzduchu. Ak z technologických dôvodov je nutné trvalé vetranie priestorov pracovísk (pracovných zón) a rýchlosť prúdenia vzduchu v miestach dlhodobej práce zamestnancov prekračuje prípustné hodnoty rýchlosti prúdenia pre danú triedu prác, vzniká jav obťažovania prievanom.

Ak sa v uzavretých pracoviskách (pracovných zónach) prekračujú prípustné hodnoty operatívnej teploty v dôsledku záťaže teplom z technologických zariadení (zdrojov sálavého tepla), musí sa stanoviť dlhodobá a krátkodobá únosná záťaž teplom.

V prípade, ak sa z technologických dôvodov musia v uzavretých pracoviskách udržiavať nízke teploty vzduchu a tieto teploty sú nižšie ako sú ustanovené najnižšie prípustné hodnoty operatívnej teploty pre jednotlivé triedy prác (okrem triedy 3 a 4), zamestnávateľ na ochranu zdravia zamestnancov má zabezpečiť ochranné opatrenia.

Fyziologická reakcia človeka na okolité prostredie

S telesnou aktivitou vzrastá tepelná produkcia človeka, ktorej zdrojom sú prevažne svalové skupiny produkujúce tzv. *metabolické teplo netto*, ku ktorému sa pripočíta *metabolické teplo bazálne*, produkované na základe biologických procesov v ľudskom organizme. Metabolické teplo q_m podľa publikácie [3] je dané vzťahom:

$$q_m = M - W = q_{m,b} + q_{m,net}$$

kde:

M je celková metabolická produkcia tepla vo $W.m^{-2}$,

W je pracovný výkon (mechanická práca) vo $W.m^{-2}$,

$q_{m,b}$ je metabolické teplo bazálne vo $W.m^{-2}$,

$q_{m,net}$ je metabolické teplo netto vo $W.m^{-2}$.

Európsky štandard zavádza pre metabolické teplo jednotku met, pričom jeden met je tepelná produkcia sediaceho človeka (1 met = 58,2 $W.m^{-2}$).

Energetický výdaj sa zisťuje meraním spotreby kyslíka, odhadom podľa referenčných tabuliek alebo výpočtom.

Metabolické teplo sa do výsledného tepelno-vlhkostného stavu prostredia odvádza prúdením, sálaním, vedením a odparovaním pri uplatnení tepelno-izolačných vlastností odevu a jeho prenosového odporu pre vodné pary. Termoregulačný proces výmeny tepla medzi ľudským organizmom a prostredím opisuje rovnica tepelnej bilancie

$$S = Q_{\text{core}} + Q_{\text{sk}}$$

kde:

S je akumulované teplo v organizme vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

$Q_{\text{core}} = (M - W) + (C_{\text{res}} + E_{\text{res}}) + q_{\text{tr}} + q_{\text{a}}$ je tepelný tok z jadra tela cez pokožku vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

$Q_{\text{sk}} = C + R + K + E_{\text{sk}}$ je tepelný tok z povrchu tela do okolitého prostredia vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

pričom:

$(M - W)$ je metabolické teplo vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

$(C_{\text{res}} + E_{\text{res}})$ je respiračné teplo (konvenčné respiračné teplo C_{res} + evaporáčné teplo E_{res} vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

q_{tr} je termoregulačné teplo vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

q_{a} je adaptačné teplo vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

C je teplo odovzdané prúdením vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

R je teplo odovzdané sálaním vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

K je teplo odovzdané vedením (kondukciou) vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,

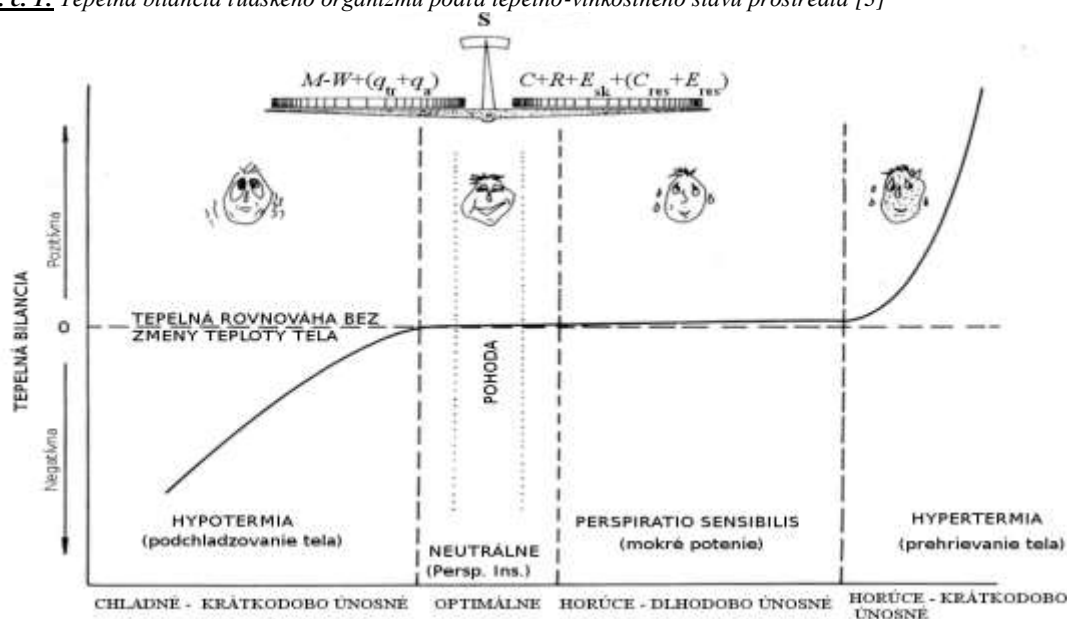
E_{sk} je teplo odovzdané evaporáciou (odparovaním alebo kondenzáciou vodnej pary na povrchu pokožky) vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Pre zachovanie existencie človeka, predstavujúceho homoiothermný organizmus sa musí udržiavať konštantná teplota jadra (vnútorných častí) tela, preto účelom termoregulačného mechanizmu človeka je zmena tepelných tokov medzi ľudským organizmom a okolitým prostredím tak, aby sa dosiahol **optimálny tepelný stav človeka**. Termoregulácia človeka sa dosahuje **chemicky** (zmenou chemickej tvorby tepelných tokov), **fyzikálne** (zmenou fyzikálnych tokov tepla zásahom do vnútra tela) a **mechanicky** (regulácia toku tepla zmenou tepelného odporu odevu).

Na obr. č. 1 je graficky znázornená tepelná bilancia ľudského organizmu v chladnom, optimálnom a teplom prostredí.

Termoregulačný mechanizmus organizmu sa snaží ustáliť teplotu jadra v neutrálnej zóne a pri veľkej tepelnej záťaži aspoň v zóne mokrého potenia. V zóne hypertermie (prehriatia) je tepelnú rovnováhu možné dosiahnuť len za cenu zvýšenia telesnej teploty, ktorej prípustný nárast je na $38,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Obr. č. 1: Tepelná bilancia ľudského organizmu podľa tepelno-vlhkostného stavu prostredia [3]



Reakcia ľudského organizmu na teplé prostredie

Na teplé prostredie alebo stúpajúcu produkciu metabolického tepla, telo človeka odpovedá rozšírením podkožných ciev (vazodilatácia), čím sa zvyšuje zásoba podkožnej krvi. Tým nastáva zvýšenie teploty pokožky, ktorá zvýši odvod tepla z tela. Ak zvýšenie teploty pokožky nemôže obnoviť tepelnú rovnováhu, aktivizujú sa potné žľazy a začne prebiehať ochladenie odparovaním. V krátkom časovom intervale môže byť vyprodukované až 4 l potu za hodinu. Udržateľná miera odparovania je však 1 l/h, pričom pri odparovaní 1 l potu je z tela odvedené okolo 2,4 MJ tepla.

Ak tieto dva mechanizmy nemôžu obnoviť tepelnú rovnováhu tela, dochádza k prehrievaniu organizmu – **hypertermii**. Prvé zdravotné príznaky hypertermie sú: *slabosť, bolesť hlavy, nevoľnosť, krátke dýchanie, zrýchlená srdcová frekvencia (až 150/min), apatia a pod.* Pri tepelnom šoku teplota tela rýchlo stúpa cez 41 °C, zastaví sa potenie, začne kóma a nastáva smrť. Aj keď je človek v tejto fáze zachránený, tepelný šok môže spôsobiť nenávratné poškodenie mozgu.

Reakcia ľudského tela na chladné prostredie

Na chladné prostredie reaguje ľudské telo najprv znížením podkožnej cirkulácie krvi, znížením teploty pokožky, čo následne znižuje tepelné straty. Tento proces je sprevádzaný vznikom „*husej kože*“ alebo atavistickým javom „*postavením chlpkov na koži*“, čo spôsobuje lepšiu tepelnú izoláciu kože. Ak je tento mechanizmus neúčinný, nastupuje svalové napätie, trasenie, ktoré zvyšuje tepelnú produkciu tela.

Ak tieto fyziologické reakcie nezabezpečia tepelnú rovnováhu, nastane nevyhnutné podchladenie tela – **hypotermia** a vnútorná teplota tela môže klesnúť pod 35 °C. Aj keď nenastane hypotermia, pokračujúce vystavenie chladným podmienkam spôsobuje vzostup krvného tlaku, srdcovej frekvencie a spotreby kyslíka. Ak začne klesať teplota telesného jadra, klesá srdcová frekvencia a dochádza k prerušeniu krvného obehu, pričom smrť nastáva pri teplote jadra medzi 25 °C až 30 °C.

Faktory ovplyvňujúce tepelnú bilanciu organizmu

Faktory, ktoré ovplyvňujú tepelnú bilanciu organizmu a tým aj tepelnú pohodu sa môžu rozdeliť do troch skupín [4]:

1. skupina – **Vnútorne prostredie** (priamo merateľné mikroklimatické veličiny):

- teplota vzduchu (t_a),
- relatívna vlhkosť vzduchu (rh),
- sálavé účinky okolitých plôch – povrchov stien, konštrukcií a pod. (t_r),
- rýchlosť prúdenia vzduchu a jeho turbulencia (v_a, T_u).

2. skupina – **Osobné faktory**:

- metabolické teplo (M),
- oblečenie (vrstvy odevu), tepelný odpor odevu (R_{cl}).

3. skupina – **Doplňujúce faktory**:

- aklimatizácia (adaptácia na vnútorné prostredie),
- telesná postava a podkožný tuk,
- vek a pohlavie.

Z priamo merateľných mikroklimatických veličín na pracovisku (pracovnej zóne) sa stanoví **operatívna teplota** (t_o), ktorá je definovaná ako jednotná teplota uzavretého čierneho priestoru, v ktorom by medzi človekom a prostredím nastala výmena rovnakého množstva tepla prúdením a sálaním ako v skutočnom nehomogénnom prostredí. Operatívna teplota sa vypočíta napr. podľa vzťahu:

$$t_o = t_{r,m} + A(t_a - t_{r,m})$$

kde:

t_a je priemerná hodnota teploty vzduchu za zmenu alebo zvolený časový úsek (teplota suchého teplomera) v °C,
 $t_{r,m}$ je hodnota strednej teploty sárania v rovnakom čase v °C,

A je koeficient, ktorý je funkciou rýchlosti prúdenia vzduchu (ak $v_a \leq 0,2 \text{ m.s}^{-1}$, potom $A = 0,5$; ak $v_a > 0,2 \text{ m.s}^{-1}$, potom $A = 0,745 \cdot v_a^{0,253}$).

Pri stanovení rozsahu optimálnych a prípustných hodnôt operatívnych teplôt na pracoviskách sa vychádza zo zdravotných a ekonomických hľadísk.

Optimálne a prípustné hodnoty mikroklimatických veličín

Podľa vyhlášky MZ SR č. 544/2007 Z. z., rozsah optimálnych a prípustných hodnôt operatívnej teploty t_o a ďalších mikroklimatických veličín závisí od triedy prác, tzn. celkového energetického výdaja pri práci a je stanovený pre teplé a chladné obdobie roka a pre tepelný odpor odevu $R_{cl} = 0,3$ až $0,5 \text{ clo}$. Rozdiel medzi teplým a chladným ročným obdobím súvisí s vonkajšou teplotou vzduchu.

Pre oblečenie bola zavedená jednotka clo, pričom 1 clo odpovedá izolačnej hmote s tepelným odporom $R_{cl} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (bežný pánsky oblek s bavlneným spodným prádlom).

V tab. č. 1 sú uvedené hodnoty mikroklimatických veličín pre letné obdobie roka a pre triedy prác 1a, 1b, 1c a 2.

Tab. č. 1: Rozsah hodnôt mikroklimatických veličín pre letné obdobie roka

Trieda práce ¹⁾	M $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_o $^{\circ}\text{C}$		v_a $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\frac{rh}{\%}$ %
		optimálna	prípustná		
1a	≤ 80	23 až 27	20 až 28	$\leq 0,25$	30 až 70
1b	81 až 105	22 až 25	19 až 27	$\leq 0,3$	
1c	106 až 130	22 až 24	17 až 26	$\leq 0,3$	
2	131 až 200	17 až 21	12 až 25	0,1 až 0,3	

Pre triedu prác 3 a 4 sa hodnoty uvedených mikroklimatických veličín nestanovujú.

Ak relatívna vlhkosť vzduchu trvale prekračuje 90 %, zamestnávateľ má zabezpečiť účinné náhradné opatrenia.

Obťažovanie prievanom

Pri vyšších rýchlostiach prúdenia vzduchu v miestach dlhodobej práce zamestnancov nad $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ a turbulentnom prúdení vzniká nerovnomerné ochladzovanie povrchu tela, ktoré je vnímané ako prievan. Efekt obťažovania prievanom je vyjadrený indexom obťažovania prievanom DR [5], ktorý charakterizuje lokálnu nepohodu, najčastejšie na nekrytom mieste tela (členok alebo krk) a je udávaný v percentách, pričom vyjadruje percento osôb obťažovaných prievanom zo sledovaného súboru osôb. Index obťažovania prievanom sa vypočíta podľa vzťahu:

$$DR = (34 - t_a)(\bar{v}_a - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{v}_a \cdot T_u + 0,14)$$

kde:

t_a je teplota vzduchu v rozsahu 20 až 26 $^{\circ}\text{C}$,

\bar{v}_a je priemerná hodnota rýchlosti prúdenia v rozsahu do $0,5 \text{ m.s}^{-1}$,

T_u charakterizuje veľkosť turbulencie prúdu vzduchu v % (od 10 % do 60 %).

Únosná záťaž teplom

Tepelná záťaž zamestnancov vzniká v dôsledku energetického výdaja organizmu a tepelného stavu prostredia, ktorý ovplyvňuje odvod tepla z tela do okolitého prostredia.

Dlhodobá únosná záťaž teplom

Dlhodobá únosná záťaž teplom je limitovaná množstvom vody vylúčenej z organizmu potením a dýchaním, pri ktorej je ešte organizmus schopný udržať tepelnú rovnováhu termoreguláciou. Pre aklimatizovaných

zamestnancov maximálna strata tekutín z organizmu predstavuje $2160 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, čo zodpovedá strate 3,9 litrov tekutín za 8-hodinovú pracovnú zmenu pre štandardnú plochu povrchu tela $1,8 \text{ m}^2$.

Dlhodobá únosná záťaž teplom je dodržaná, ak sa neprekročí dlhodobý únosný čas práce za pracovnú zmenu. Nie je prípustné prekročenie dlhodobého únosného času práce za pracovnú zmenu.

V prípade 12-hodinovej pracovnej zmeny strata tekutín nemá prekročiť limity stanovené technickou normou STN EN ISO 7933:2005 [7] 5 % z telesnej hmotnosti (s pravdepodobnosťou bezpečnosti 95 %).

Krátkodobá únosná záťaž teplom

Krátkodobá únosná záťaž teplom je limitovaná množstvom akumulovaného tepla v organizme, pri ktorom už organizmus nedokáže udržať tepelnú rovnováhu, pričom teplota telesného jadra (mozog, miecha, orgány brušnej a hrudnej dutiny), priemernej teploty kože a vzostup srdcovej frekvencie v stanovenom čase neprekročí limitnú hodnotu.

Krátkodobá únosná záťaž teplom je dodržaná, ak sa neprekročí krátkodobý únosný čas práce. Nie je prípustné prekročenie krátkodobého únosného času práce.

Stanovenie dlhodobého a krátkodobého únosného času práce

Únosný čas práce (dlhodobý a krátkodobý) je závislý od energetického výdaja, od mikroklimatických podmienok pre aklimatizovaných a neaklimatizovaných zamestnancov pri zohľadnení tepelného odporu odevu. Únosný čas práce v minútach za 8-hodinovú pracovnú zmenu osobitne pre mužov a ženy je uvedený v tabuľkách č. 6 až 20 v prílohe k vyhláske MZ SR č. 544/2007 Z. z. alebo sa môže stanoviť výpočtom [8].

Záver

Mikroklima v uzavretých pracoviskách, v rozsahu optimálnych hodnôt operatívnej teploty a hodnôt doplnujúcich mikroklimatických veličín vytvárajú predpoklad pre tepelnú pohodu zamestnancov pri práci. V rozsahu prípustných hodnôt vzniká mierna tepelná nepohoda, ale bez vplyvu na zdravie zamestnancov. Pri vyšších rýchlostiach prúdenia vzduchu v pracovných zónach (nad $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a vzniku turbulentného prúdenia spravidla dochádza k nerovnomernému ochladzovaniu najmä odkrytých častí tela, čo je zamestnancami vnímané ako obťažovanie prievanom.

Pri dlhodobej práci zamestnancov v blízkosti sálavých zdrojov tepla sa ochrana zdravia pred záťažou teplom zabezpečuje úpravou času práce, tzn. **stanovením dlhodobého alebo krátkodobého únosného času práce za pracovnú zmenu**. Na kompenzáciu straty tekutín a minerálnych látok (potením a dýchaním), má zamestnávateľ zabezpečiť nápoje (pitnú vodu) bezprostredne na mieste výkonu práce.

Ochranné opatrenia pri záťaži chladom súvisia s operatívnou teplotou na pracoviskách, kde sa musia z technologických dôvodov udržiavať nízke teploty vzduchu. Pri dlhodobej práci s operatívnou teplotou $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, zamestnávateľ má zabezpečiť ohrievareň a ak operatívna teplota je nižšia ako $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, zamestnávateľ má zabezpečiť ohrievareň rúk, ochranný odev s požadovaným tepelným odporom a teplé nápoje.

Literatúra:

1. Zákon č. 355/2007 Z. z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.
2. Vyhláska MZ SR č. 544/2007 Z. z. o podrobnostiach o ochrane zdravia pred záťažou teplom a chladom.
3. Jokl, M.: *Teorie vnitřního prostředí budov*, ČVTU, Praha 2011.
4. Centnerová, L.: *Tepelná pohoda a nepohoda*. VVI 5/2000.
5. STN ISO 7730:2006 *Ergonómia tepelného prostredia. Analytické určovanie a interpretácia tepelnej pohody pomocou výpočtu ukazovateľov PMV a PPD a kritérií miestneho tepelného prostredia*.
6. Vyhláska MZ SR č. 448/2007 Z.z. o podrobnostiach o faktoroch práce a pracovného prostredia vo vzťahu ku kategorizácii prác z hľadiska zdravotných rizík a o náležitostiach návrhu na zaradenie prác do kategórií
7. STN EN ISO 7933:2005: *Ergonómia tepelného prostredia. Analytické určovanie a interpretácia tepelného zaťaženia predpokladaného tepelného namáhania výpočtom*.
8. *Výpočet tepelné záteže pracovníku v horkém prostředí, verzia 1.2, SZÚ Praha*.

Článok bol uverejnený v časopise Bezpečnosť práce v praxi 3/2015.