

Ing. Miloš LAIN
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Tepelná pohoda pro pasivní a nízkoenergetické chlazení

Thermal Comfort for Passive and Low Energy Cooling

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.,

Tepelná pohoda osob pracujících v budovách je základním požadavkem návrhu budovy a systémů větrání, vytápění a případně klimatizace. Vzhledem k individuálnímu vnímání tepelné pohody je její objektivní posouzení poměrně obtížné. Návrh běžných klimatizačních systémů se opírá o posuzování tepelné pohody vycházející z činnosti člověka. Některé výzkumné práce však poukazují na schopnost člověka adaptovat se podle venkovních podmínek, z tohoto principu vychází adaptivní model tepelné pohody, který je vhodný především pro pasivní a nízkoenergetické stavby.

Klíčová slova: tepelná pohoda, Fangerův model, adaptivní model, klimatizace

Thermal comfort of persons working in buildings is the basic requirement of the building and ventilation, heating and eventually air conditioning systems design. With regard to the individual thermal comfort perceiving its objective assessment is relatively difficult. The design of the common air conditioning systems insists on the thermal comfort assessment resulting from human activity. However some research works advert to human ability to cope with changes of outside conditions. The adaptive thermal comfort model, which is suitable first of all for passive and low energy buildings, results from this principle.

Key words: thermal comfort, Fanger's model, adaptive model, air conditioning

STANDARDNÍ HODNOCENÍ TEPELNÉ POHODY

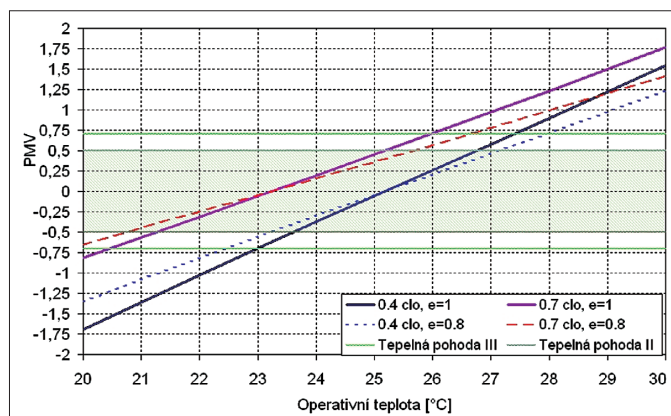
Standardní řešení tepelné pohody osob (Fanger 1970) vychází z rovnice tepelné rovnováhy, ve které je na jedné straně tepelná produkce člověka a na straně druhé teplo odváděné konvekcí, sáláním, odpařováním a dýcháním. Z nerovnováhy levé a pravé strany rovnice je pak odvozen výsledný střední tepelný pocit (PMV), který je ve stupnici -3 pro zimu přes 0 neutrální tepelnou pohodu až po +3 pro horko (ČSN EN ISO 7730).

Toto hodnocení má nespornou výhodu v jednoduchosti a snadné interpretaci výsledného tepelného pocitu jedním číslem.

Nevýhodou je, že pro jeho stanovení je třeba poměrně složitě vypočítat a především potřeba vstupních hodnot, které při běžném projektování nejsou k dispozici (střední radiační teplota). Další nevýhodou je, že tento model téměř nerespektuje venkovní klimatické podmínky.

Práce publikovaná profesorem Fangerem v roce 2002 doporučuje rozšíření standardního modelu tepelné pohody založeném na PMV o doplněk standardizující rozdílné požadavky osob v závislosti na klimatu a zvyklostech regionu. Pro neklimatizované budovy v teplém klimatu doporučuje použití korekčního faktoru e , který může dosahovat hodnot mezi 1 a 0,5. Pro budovy klimatizované se pohybuje hodnota PMV v závislosti na tom, zda je v lokalitě většina budov klimatizována (0,8 až 0,9) nebo většina budov klimatizována není (0,7 až 0,8). Tímto faktorem se potom násobí střední tepelný pocit PMV. V podmínkách České republiky lze doporučit použití faktoru 0,8 až 0,9 (Tab. 1).

Na obr. 1 je znázorněn průběh ukazatele tepelné pohody v závislosti na operativní teplotě pro standardní kancelářskou práci (1,2 met) a běžné rychlosti proudění 0,1 m/s. Z obrázku lze odečíst, že dle standardního modelu při zachování standardního oblečení 0,7 clo (spodní prádlo, kalhoty, košile nebo spodnička, šaty) maximální teplota pro tepelnou pohodu odpovídající kategorii budov II (viz následující kapitola) 25,2 °C a pro kategorii III je to 26 °C, to odpovídá i legislativě a projekčním zvyklostem. Použijeme-li korekční faktor dle tab. 1 (podmínkách České republiky odpoví-



Obr. 1 Závislost ukazatele PMV na operativní teplotě podle tradičního modelu tepelné pohody, pro různé hodnoty oblečení a korekční faktory

Tab. 1 Korekční faktory pro PMV dle očekávání osob (Fanger, Toftum, 2002)

Očekávání tepelné pohody	Charakteristika neklimatizované budovy		Korekční faktor [e]
	Umístění v oblasti kde je	Teplé období	
vysoké	většina budov klimatizována	nastává občas během léta	0,9 až 1
střední	část budov klimatizována	je většinu léta	0,7 až 0,9
nízké	Naprostá většina budov neklimatizována	je celoročně	0,5 až 0,7

dá $e = 0,8$) je max. operativní teplota 25,6 °C pro kategorii II a 26,8 °C pro kategorií III.

V případě, že norma oblečení v prostoru umožní adaptaci a oblečení bude v letních extrémech odpovídat 0,4 clo (šortky, sandály, tričko nebo košile s krátkým rukávem) jsou max. teploty výrazně vyšší, a to 26,7 °C pro kategorií II bez korekce a 27,1 °C s korekcí ($e = 0,8$) a pro kategorií III 27,5 °C bez korekce a 28,1 °C s korekcí.

ADAPTIVNÍ MODEL TEPELNÉ POHODY

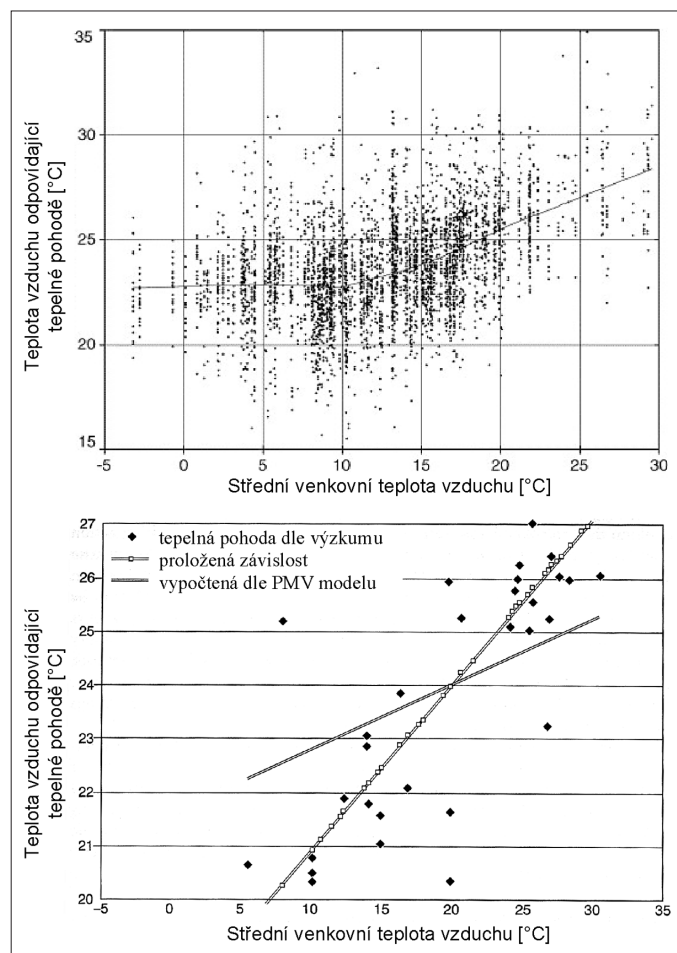
Je prokázáno (Nicol a Humpreys, 1973, 1998), že lidské tělo se adaptuje podle venkovních klimatických podmínek. Adaptace probíhá jak změnami osobními, což je především změna oblečení, tak i změnami postoje (Raja a Nicol, 1997), nebo změnou chování. Člověk rovněž upravuje podmínky prostředí, například otevíráním oken, stíněním, měněním pozice případně individuálním nastavením otopných, chladicích, či jiných prvků.

Rozsáhlé analýzy měření a testů (Humpreys 1981, Dear a Brager 2002,) ukazují, že lidé se mnohem více adaptují venkovním podmínkám v budovách bez klimatizace než v budovách klimatizovaných.

Tepelná pohoda by neměla být zbožím, které je dodáváno uživateli budovy, ale měla by být cílem, který uživatelé dosáhnou díky schopnosti ovlivňovat podmínky. Ovlivňování parametrů vnitřního prostředí směřuje k cíli dosažení tepelné pohody, přičemž bezesporu existují určitá omezení, v rámci kterých je schopna se skupina osob adaptovat podle svých tepelných zkušeností a svých klimatických, sociálních, ekonomických a kulturních podmínek (Nicol a Roaf, 1996). Takovýto adaptivní model vyžaduje jiné nástroje pro dosažení tepelné pohody než model založený na předpokladu ideální operativní teploty v prostoru.

Budova musí lidem umožnit nastavení a změny. Mezi základní požadavky patří:

- Možnost individuálního nastavení (pro léto například cirkulační ventily, otevíratelná okna).
- Předpoklad dodržení základních parametrů prostředí odpovídající aktivitě a klimatu. Tyto parametry se mění jak během delších období, tak během dne.



Obr. 2 Teploty odpovídající tepelné pohodě (dle McCartney a Nicol 2002) nahoře a porovnání se standardním PMV modelem (podle Dear a Brager 2002) dole

Uživatelé by měli mít možnost adaptovat své oblečení. Požadavek řady společností na standardní oblečení je v přímém protikladu s principem adaptivní tepelné pohody. V některých případech je velmi obtížné zasahovat do těchto konzervativních požadavků.

V podmínkách české republiky se situace spíše zhoršuje. V řadě firem je těžký tmavý oblek s košilí a kravatou považován celoročně za standard. Zajímavý je například přístup Japonské vlády, která ve snaze o snížení spotřeby energie pro klimatizaci vyzvala v roce 2005 k uvolnění oblečení pro letní podmínky.

Pro správné vyhodnocení adaptivního komfortu by se měla používat klouzavá střední teplota venkovního vzduchu t_{rm} (running mean temperature) vyhodnocená dle vztahu:

$$t_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \{t_{od-1} + \alpha \cdot t_{od-2} + \alpha^2 t_{od-3} + \dots\} \quad (1)$$

kde

t_{od-1} je teplota jeden den před vyhodnocovaným dnem,

t_{od-X} – teplota dne X dní před vyhodnocovaným dnem,

α – koeficient mezi 0 a 1, který definuje rychlost, s jakou se klouzavá střední teplota blíží teplotě venkovní.

Analýzujeme-li vztah (1), zjistíme, že počet dní, které je pro výpočet třeba vzít do úvahy, závisí na součiniteli α . Pro Evropské klima se doporučuje použít hodnotu součinitele $\alpha = 0,8$ (McCartney a Nicol 2002) a výpočet dle vztahu (1) by měl zahrnovat teploty z přibližně čtyřiceti předcházejících dní.

Použití rovnice (1) je poměrně nepraktické, proto se rovnice upravuje na tvar:

$${}_n t_{rm} = (1 - \alpha) \cdot t_{od-1} + \alpha \cdot {}_{n-1} t_{rm} \quad (2)$$

kde

${}_n t_{rm}$ je klouzavá střední teplota venkovního vzduchu pro den n,

${}_{n-1} t_{rm}$ je klouzavá střední teplota venkovního vzduchu pro den předešlý.

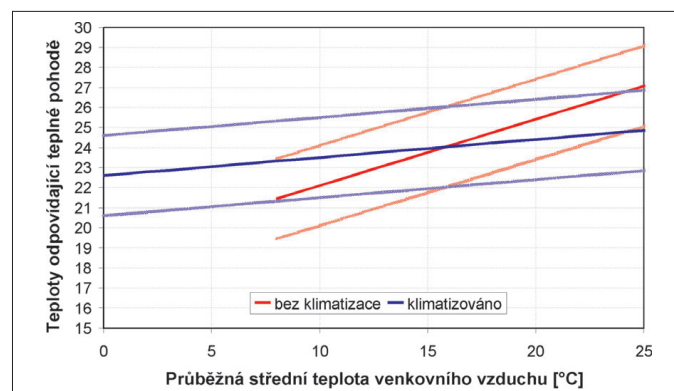
Z vyhodnocených dat byla potom určena v závislosti na klouzavé střední teplotě venkovního vzduchu, optimální vnitřní teplota odpovídající tepelné pohodě při aplikování adaptivního komfortu.

Pro budovy bez klimatizace

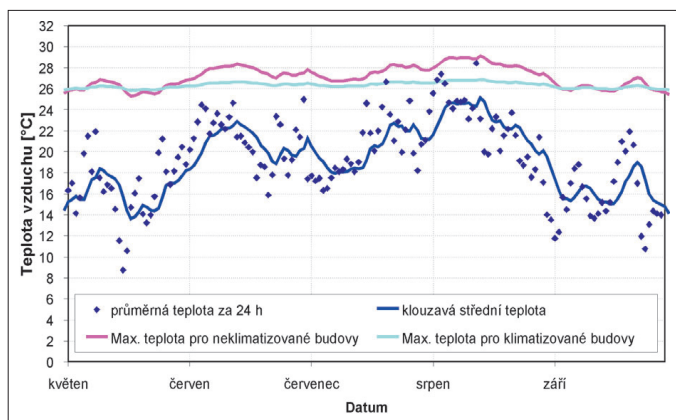
$$t_{com} = 0,33 \cdot t_{rm} + 18,8 \quad (3)$$

a pro budovy s klimatizací

$$t_{com} = 0,09 \cdot t_{rm} + 22,6 \quad (4)$$



Obr. 3 Optimální teploty vnitřního vzduchu a oblast tepelné pohody pro budovy bez klimatizace a klimatizované budovy



Obr. 4 Průběh středních teplot venkovního vzduchu, klouzavého průměru a z něho vypočtených max. teplot odpovídajících tepelné pohodě pro rok TRY.

Uvažovaná oblast tepelné pohody je potom dána odchylkou ± 2 K od optimální teploty (obr. 3).

Nově připravovaná norma EN 15251 (Nicol Pagliano 2007) se zaměřila na určení požadovaných operativních teplot při dodržení parametrů tepelné pohody a zároveň minimalizace spotřeby energie budov v souladu s procesem implementace EPBD.

Cílem normy je zahrnout adaptivní model tepelné pohody a to především u budov bez klimatizace či chlazení (Nicol Pagliano 2007). Norma předpokládá rozdělení budov do čtyř kvalitativních kategorií I až IV podobně jako ČSN EN ISO 7730 má kategorie A, B, C. Nejběžnější kategorii II odpovídá rozsah PMV $-0,5$ až $+0,5$ a kategorii III potom rozsah $-0,7$ až $+0,7$.

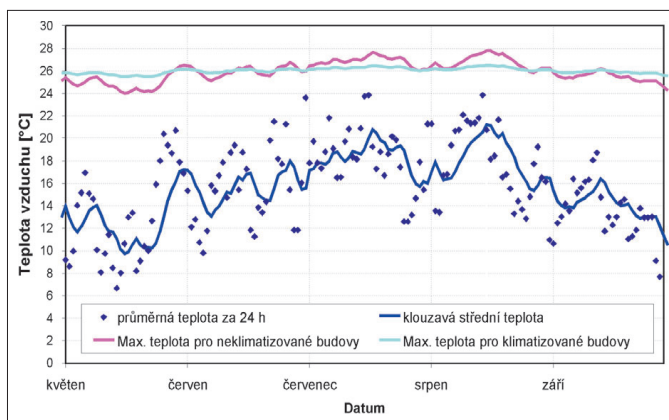
Dále norma EN 15251 doporučuje dvě metody hodnocení tepelné pohody. První je procentuelní vyhodnocení pracovních hodin během období, kdy jsou teploty mimo požadovaný rozsah. Druhou je výpočet hodínostupňů, kdy operativní teplota překročí požadovaný rozsah. Tj. počet hodin je vážen počtem stupňů, o kolik byla teplota mimo rozsah. Obě tyto metody však lze založit jedině na počítačové simulaci nebo měření ve skutečných budovách.

Přijatelnost vnitřních podmínek je pak dána požadavkem, aby na minimálně 95 % využitelné podlahové plochy nebyly operativní teploty mimo požadovaný rozsah více než 3 % (nebo 5 % dle rozhodnutí každé členské země EU) z pracovní doby za den, týden, měsíc nebo rok.

Z grafů na obr. 4 a 5 lze odečíst horní hranici tepelné pohody pro adaptivní model založený na venkovní teplotě. Graf na obr. 4 vychází z hodinových teplot vzduchu referenčního roku pro Prahu (TRY), ze kterých jsou vypočteny průměrné teploty vzduchu za 24 hodin a z nich dle vztahu 1 pak klouzavé střední teploty venkovního vzduchu. Horní hranice tepelné pohody pro neklimatizované budovy vychází z rovnice 3, dle které je vypočtena optimální teplota. Ta je zvýšena o přípustnou toleranci 2 K (tab. 2).

Tab. 2 Kategorie budov a odpovídající rozsahy teplot

Kategorie	Popis	Přípustný rozsah teplot
I	Velmi vysoké požadavky vhodné pro osoby velmi citlivé	± 2 K
II	Běžné požadavky vhodné jak pro nové budovy tak pro rekonstrukce	± 3 K
III	Mírné požadavky vhodné především pro stávající budovy	± 4 K
IV	Nevyhovující podmínkám, pouze budovy s omezeným užíváním	



Obr. 5 Průběh středních teplot venkovního vzduchu, klouzavého průměru a z něho vypočtených max. teplot odpovídajících tepelné pohodě pro rok 2003

Obdobně pro klimatizované budovy výpočet vychází z rovnice 4 se stejným posunem 2 K. Pro klimatizované prostory je maximální komfortní teplota během léta $26 \pm 0,5$ °C, pro neklimatizovanou kancelář se mění výrazněji, a to v rozsahu 24 až 27,8 °C.

Vydeme-li při analýze z klimatických dat extrémního léta 2003 (obr. 5), je pro klimatizovanou kancelář max. komfortní teplota 26,5 °C. Pro neklimatizovanou kancelář se komfortní teplota pohybuje v rozsahu 25,3 až 29 °C.

ZÁVĚR

Adaptivní model tepelné pohody je jednoznačně nesmírně důležitý pro vyhodnocování parametrů prostředí především v budovách bez strojního chlazení. Porovnáme-li požadované výsledky dle adaptivního modelu (obr. 5) a výsledky korigovaného standardního modelu se zahrnutím lehkého oblečení (obr. 1), jsou požadované teploty sobě velmi blízké.

Pro letní extrémy lze za maximální operativní teplotu v prostoru, která odpovídá tepelné pohodě, považovat 28 °C.

Kontakt na autora: milos.lain@fs.cvut.cz

Tento výzkum byl vypracován s podporou výzkumného záměru MSM6840770011. Téma bylo předneseno na konferenci Klimatizace a větrání 2008.

Použité zdroje:

- [1] de Dear, R.J., Branger, G.S. (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings*, vol 34, no 6, pp 549-561
- [2] Fanger, P.O., (1970), *Thermal comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen
- [3] Fanger, P.O., Toftum, J., 2002, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, *Energy and Buildings* 34, p. 533-536, www.elsevier.com
- [4] McCartney, K.J., Nicol, J.F., (2002), Developing an adaptive control algorithm for Europe: results of the scats project, *Energy and Buildings* 34 (2002) (6), pp. 623-635
- [5] Nicol, F., Pagliano, L., (2007), *Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN 15251*, Proceedings of 2nd PALEC conference and 28th AIVC Conference, Heliotopos Conferences, Athens, pp708-711, ISBN: 978-960-6746-04-8.