

Energetické simulace tradičního a adaptivního modelu tepelné pohody

Energy simulation of traditional and adaptive thermal comfort

Ing. Lada CENTNEROVÁ
Stavební fakulta ČVUT Praha

Doc. Dr. Ir. J. L. M. HENSEN
Center Building & Systems TNO-TU/e,
Technische Universiteit Eindhoven
a Strojní fakulta ČVUT Praha

Recenzent
prof. Ing. František Drkal, CSCE

Záměrem prezentované studie bylo zjistit a porovnat potřebu energie pro zajištění požadované operativní teploty, resp. teploty interiérového vzduchu podle navrhované normy založené na adaptivním modelu tepelné pohody [7] a podle nyní platných norem. Studie byla provedena pro typickou kancelář v mírném teplotním pásmu jako je Česká republika a Nizozemsko.

Klíčová slova: tepelná pohoda, adaptace, potřeba energie, počítačová simulace

The intent of the presented study was to quantify the implication for energy demand of indoor temperature requirements based on a proposed adaptive thermal comfort standard [7] relative to a more traditional thermal comfort approach. The study focuses on a typical office situation in a moderate climate such as in the Czech Republic and in The Netherlands.

Key words: thermal comfort, adaptation, energy demand, computer simulation

Tepelnou pohodu můžeme definovat jako stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení [1]. Hlavní faktory ovlivňující celkovou tepelnou pohodu člověka se rozdělují na A) parametry prostředí: teplota vzduchu, radiální teplota, relativní vlhkost vzduchu, rychlost vzduchu a B) osobní parametry: oblečení a aktivita člověka. Existují ještě další parametry prostředí, které mohou ovlivnit lokální nepohodu, jako je průvan, velký vertikální rozdíl teplot mezi oblastí hlavy a kotníků nebo vysoká asymetrie sálání okolních povrchů.

TRADIČNÍ A ADAPTIVNÍ MODEL TEPELNÉ POHODY

Pro hodnocení tepelné pohody interiéru je v platnosti mezinárodní norma (používaná převážně v Evropě) ČSN EN ISO 7730 [1] a americká norma ANSI/ASHRAE 55-92 [2]. Obě vycházejí z tradičního (víceméně statického) modelu tepelné pohody, kdy fyziologické a psychologické reakce lidského organismu na okolní prostředí jsou v průběhu roku neměnné (konstantní). Jediná věc, která se mění je oblečení (tepelný odpor oděvu – clo), což má vliv na rozdílné preferované teploty v létě a v zimě. ČSN EN ISO 7730 obsahuje model výpočtu předpokládaného tepelného pocitu člověka podle Fangerova [9], který bude patrně také součástí revidované ANSI/ASHRAE 55. Pro praktické použití obě normy rozdělují doporučené parametry prostředí do dvou období: zima a léto (viz radiální teploty tab. 1 a 2). V obou normách, resp. tabulkách je udávána operativní teplota. Operativní teplota t_o je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru (tj. prostoru o stejné teplotě vzduchu i stejné střední radiální teplotě), ve kterém by tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí. Pro malé rychlosti proudění vzduchu ($w < 0,2 \text{ m.s}^{-1}$) a malé rozdíly t_i a teploty vzduchu t_r ($< 4^\circ\text{C}$), lze stanovit operativní teplotu t_o jako aritmetický průměr t_i a t_r .

Tab. 1 Doporučené operativní teploty s předpokladem 90 % spokojenosti osob, které konají lehkou činnost, převážně vsedě, jestliže ostatní parametry prostředí budou v doporučeném rozmezí podle ČSN EN ISO 7730 [1]

Období	Izolace oblečení (clo)	Činnost (met)	Optimální operativní teplota ($^\circ\text{C}$)	Rozmezí operativní teploty ($^\circ\text{C}$)
Zima	1,0	1,2	22	20 až 24
Léto	0,5	1,2	24,5	23 až 26

Tab. 2 Doporučené operativní teploty s předpokladem 90 % spokojenosti osob, které konají lehkou činnost, převážně vsedě, při relativní vlhkosti 50 % a střední rychlosti vzduchu $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ podle ANSI/ASHRAE 55-92 [2]

Období	Typické oblečení	Izolace oblečení (clo)	Činnost (met)	Optimální operativní teplota ($^\circ\text{C}$)	Rozmezí operativní teploty ($^\circ\text{C}$)
Zima	silné kalhoty, košile s dlouhým rukávem a svetr	0,9	1,2	22	20 až 23,5
Léto	slabé kalhoty, košile s krátkým rukávem	0,5	1,2	24,5	23 až 26
	minimum	0,05	1,0	27	26 až 29

Praxe ukazuje, že nejdůležitější faktor, který ovlivňuje pocit tepelné pohody člověka, je pocit tepla. „Nejprve je třeba zajistit optimální teplotu a teprve potom zjišťovat případné další faktory nepohody, protože jejich vliv se může ukázat jako zanedbatelný,“ podle McIntyra [11]. Optimální operativní teplota pro dosažení tepelné pohody je funkcí hodnoty metabolismu člověka a izolace jeho oblečení. Většinou je možné s dostatečnou přesností určit činnost lidí v daném prostředí a tomu odpovídající hodnoty metabolismu (produkce tepla). Je však značně obtížné přesně předpovědět oblečení lidí. Lidé si většinou vybírají své oblečení podle venkovní teploty, přičemž ve skutečnosti ženy přizpůsobují své oblečení venkovní teplotě často mnohem více než muži. Navíc lidé se liší nejen výběrem oblečení, ale i reakcí a vlastní adaptací na konkrétní teplotní parametry vnitřního prostředí.

Podle De Dear a Brager [4, 5, 7] související faktory a dřívější teplotní zkušenosti ovlivňují tepelné očekávání a preference lidí v budovách. Jedním z vyplývajících důsledků je, že lidé v teplém podnebí upřednostňují vyšší teploty vnitřního vzduchu než lidé žijící v chladném podnebí, což je v rozporu se statickým modelem tepelné pohody, ze kterého vycházejí současné normy [1, 2].

De Dear a Brager publikovali v [7] návrh nové normy pro hodnocení tepelné pohody, která by na rozdíl od [1] a [2] zohlednila tepelnou adaptaci. Budovy jsou zde rozděleny na dva typy:

- s centrální regulací systémů techniky prostředí (vytápění, větrání, chlazení);
- s přirozeným větráním.

Hlavním důvodem pro členění budov do dvou kategorií je zjištění, že lidé mají rozdílná očekávání v těchto dvou typech budov. Pokud mají lidé možnost regulovat (ovlivňovat) své okolní prostředí (např. otevřít okno), jsou méně nároční a spokojenější s parametry vnitřního vzduchu, než když nemají žádnou možnost regulace. Navíc lidé v přirozeně větraných interiérech tolerují vyšší rychlosti proudění vzduchu v teplém období. Výsledkem je, že lidé v budovách bez centrálně regulovaných systémů techniky prostředí běžně akceptují větší rozmezí operativní teploty v průběhu roku, než lidé v budovách s centrální regulací.

Použité názvosloví

Adaptivní model: lineárně regresní model, který určuje vztah výpočtové teploty vnitřního vzduchu nebo akceptovatelného rozsahu vnitřních teplot k venkovním meteorologickým parametrům vzduchu (na základě výsledků ASHRAE výzkumného projektu RP-884 [7]).

Statický model: model, který určuje vztah předpokládaného středního tepelného pocitu (PMV) a předpokládaného procenta nespokojených (PPD) k faktorům vnitřního prostředí a osobním faktorům (podle [1]).

Tepelný pocit: subjektivní pocit tepla, nejčastěji vyjadřovaný v kategoriích – zima, chladno, chladněji, neutrálně, tepleji, teplo, horko. Tepelný pocit *neutrálně* nemusí odpovídat ideální tepelné pohodě každého jednotlivce.

Tepelná neutralita (t_n): tepelný index vnitřního vzduchu (nejčastěji operativní teplota t_o) odpovídající střednímu tepelnému pocitu *neutrálně* na pocitovém měřítku tepelné pohody. Za předpokladu stejné teploty vnitřního vzduchu a střední radiační teploty můžeme operativní teplotu t_o nahradit teplotou vnitřního vzduchu t_a .

Efektivní teplota (t_{ef}): je definována jako teplota vnitřního vzduchu s relativní vlhkostí 50 %, jenž vyvolá stejné celkové tepelné ztráty z pokožky člověka jako skutečné prostředí [3]. Pokud se místo teploty vzduchu použije operativní teplota, je v t_{ef} zahrnut i sálavý účinek okolí [6].

Adaptivní model

Při použití adaptivního modelu tepelné pohody pro **budovy s centrální regulací** systémů techniky prostředí se optimální operativní teploty resp. teploty vnitřního vzduchu vypočítají v závislosti na venkovní efektivní teplotě t_{ef} resp. teplotě venkovního vzduchu t_e podle rovnice (1). Autoři studie [7] zavedli pojem venkovní efektivní teploty t_{ef} analogicky vnitřní efektivní teplotě, zahrnující jednu veličinou vliv vlhkosti vzduchu na tepelnou pohodu. Z praktických důvodů byla tato veličina později nahrazena teplotou venkovního vzduchu t_e .

$$t_n = 22,6 + 0,04 t_{ef} \text{ pro } -5 < t_{ef} < 33^\circ\text{C} \quad (1)$$

Rozmezí teplot pro 90 % spokojenost je $t_n \pm 1,2^\circ\text{C}$.

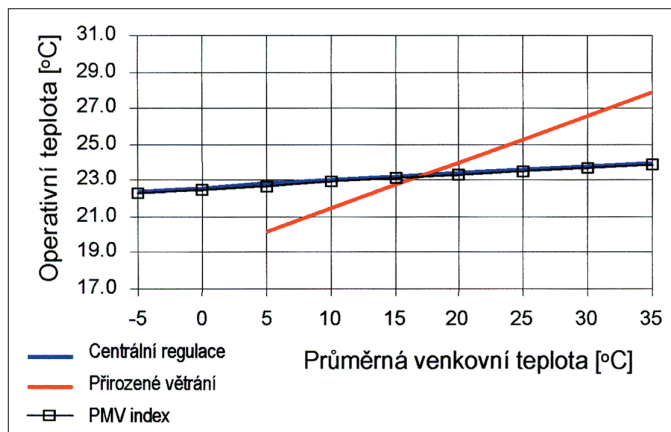
Pro **budovy s přirozeným větráním** se při použití adaptivního modelu tepelné pohody optimální teploty vypočítají podle rovnice (2).

$$t_n = 18,9 + 0,255 t_{ef} \text{ pro } -5 < t_{ef} < 33^\circ\text{C} \quad (2)$$

Rozmezí teplot pro 90 % spokojenost je $t_n \pm 2,5^\circ\text{C}$.

Na obr. 1 jsou zakresleny rovnice (1) a (2) společně s optimální operativní teplotou vypočítanou podle tradičního PMV modelu. Rovnice adaptivního modelu jsou formulovány na základě experimentálních zjištění, která se uskutečnila ve velkém počtu budov (cca 160) v rozdílných klimatických pásmech [4, 5, 7]. Z obr. 1 je patrné, že lidé pobývající v interiérech s přirozeným větráním, jsou ochotni v průběhu roku (v závislosti na teplotě venkovního vzduchu) tolerovat větší rozsah teplot vnitřního vzduchu než vyplývá z tradičního modelu (PMV index). Toto je vysvětlováno velkou schopností adaptace a nižšími nároky (oče-

káváním) na dané prostředí. V klimatizovaných budovách, kde lidé nemají kontrolu nad parametry vnitřního prostředí, jejich pocit tepelné pohody závisí na tepelné rovnováze těla s okolním prostředím. Preferované teploty se shodují s optimálními teplotami vypočítanými podle tradičního modelu.



Obr. 1 Optimální operativní teploty pro budovy s centrální regulací systémů techniky prostředí a pro budovy s přirozeným větráním podle rovnic (1) a (2)

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Cílem naší studie bylo porovnat předpokládanou potřebu energie (na vytápění a chlazení) „typické kanceláře“ pro oba modely tepelné pohody (tradiční a adaptivní). Pro analýzu a návrh komplexních systémů (jako je budova a její vnitřní prostředí) se v současnosti používá počítačové modelování a simulace. V tomto případě bylo použito prostředí ESP-r (Environmental Systems Performance – research) [8].

Model kanceláře

Pro simulaci byl vytvořen model kanceláře (obr. 2). „Typická kancelář“ [10] pro 2 osoby o rozměrech 3,5 x 5,4 x 2,7 m.

Simulace pro orientaci oken na 4 světové strany, ale nakonec byla uvažována varianta orientace na západ.

Obvodové konstrukce:

- stěna: $k = 0,39 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- okno: $k = 2,75 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Vnitřní tepelná zátěž:

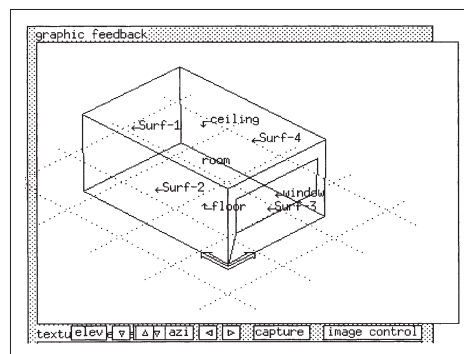
2 osoby (celkem: citelné teplo = 140 W, vázané teplo = 140 W)
zařízení (300 W)

Provozní doba

8.00 až 18.00 h

Větrání:

přívod venkovního vzduchu přirozeně nebo nuceně



Obr. 2 Model kanceláře použitý pro simulaci

v provozní době:

intenzita větrání = $1,2 \text{ h}^{-1}$, tj. $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ os}^{-1}$

mimo provozní dobu:

intenzita větrání = $0,2 \text{ h}^{-1}$

Venkovní klimatické podmínky:

- Česká republika (Praha) – roční průměrná teplota venkovního vzduchu = $8,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Nizozemsko (Eindhoven) – roční průměrná teplota venkovního vzduchu = $10,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Požadované rozmezí operativních teplot

Požadované operativní teploty vnitřního vzduchu jsou založeny na výše zmiňovaných modelech tepelné pohody. Střední hodnoty optimálních teplot jsou uvedeny v tab. 3. Na obr. 3 jsou graficky vyznačena rozmezí optimálních teplot pro 90 % spokojenost. Z obrázku je na první pohled patrný značný rozdíl mezi jednotlivými modely tepelné pohody.

Tab. 3 Střední hodnoty optimálních teplot pro jednotlivé měsíce

Měsíc	ISO	Nizozemsko		Česká republika			
		t_e	t_o [B]	t_o [C]	t_e	t_o [B]	t_o [C]
1	22,0	0,7	20,2	22,6	-1,5	20,2	22,5
2	22,0	3,4	20,2	22,7	2,5	20,2	22,7
3	22,0	2,8	20,2	22,7	4,3	20,2	22,8
4	22,0	8,5	21,1	22,9	9,3	21,3	23,0
5	22,0	13,9	22,4	23,2	13,9	22,4	23,2
6	24,5	15,3	22,8	23,2	17,1	23,3	23,3
7	24,5	16,4	23,1	23,3	17,5	23,4	23,3
8	24,5	16,0	23,0	23,2	17,1	23,3	23,3
9	22,0	14,0	22,5	23,2	15,4	22,8	23,2
10	22,0	8,1	21,0	22,9	9,5	21,3	23,0
11	22,0	6,6	20,6	22,9	4,5	20,2	22,8
12	22,0	2,2	20,2	22,7	-0,2	20,2	22,6

t_e průměrná měsíční teplota venkovního vzduchu ($^{\circ}\text{C}$)

t_o [A] tradiční model tepelné pohody (ČSN EN ISO 7730) – viz. tab. 1 a 2

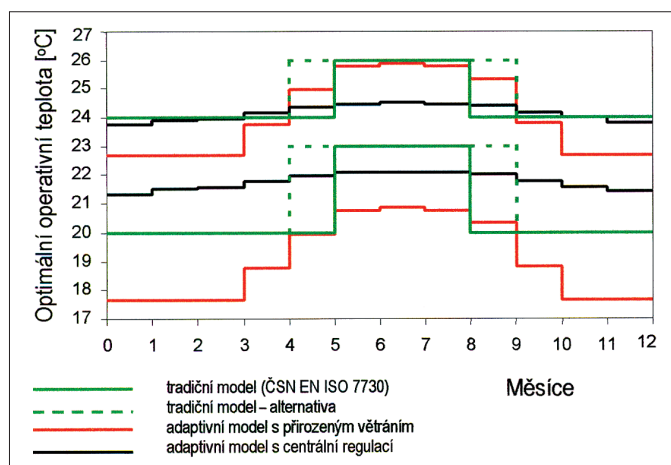
t_o [B] adaptivní model tepelné pohody pro budovy s přirozeným větráním – podle rovnice 2 a obr. 1

t_o [C] adaptivní model tepelné pohody pro budovy s centrální regulací – podle rovnice 1 a obr. 1

Při použití adaptivního modelu tepelné pohody pro budovy s centrální regulací je požadovaná minimální operativní teplota pro 90 % spokojenost v zimním období o $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší a naopak v letním období o $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší než jsou požadované teploty podle současně platných norem.

Při použití adaptivního modelu tepelné pohody pro budovy s přirozeným větráním je požadovaná minimální operativní teplota pro 90 % spokojenost v zimním období o zhruba $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší než je požadovaná teplota podle současně platných norem.

Z obr. 3 je patrné, že v přechodném období se situace může obrátit, což znamená, že max. operativní teplota může být vyšší než podle současných norem. Ve skutečnosti tato situace závisí na tom, jestli měsíce květen a září budou spadat do letního nebo zimního období, protože současné normy nehovoří o přechodném období.



Obr. 3 Požadované rozmezí operativních teplot pro 90 % spokojenost pro Českou republiku podle tab. 3

VÝSLEDKY SIMULACÍ

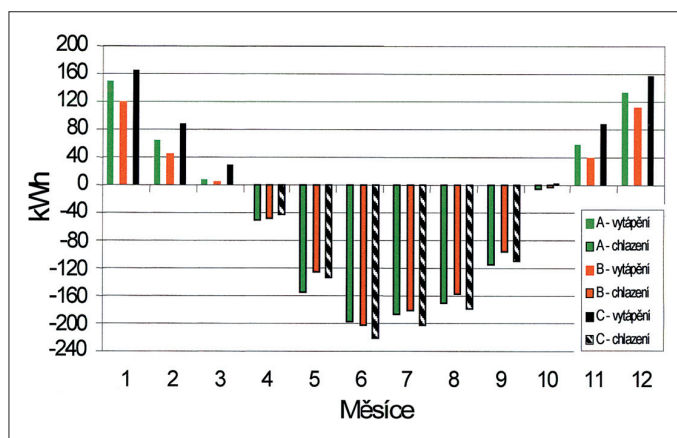
Následující část prezentuje naše výsledky z pohledu potřeby energie pro vytápění a chlazení typické kanceláře pro dosažení požadovaných parametrů vnitřního vzduchu.

Požadované operativní teploty, resp. teploty vnitřního vzduchu v zimním období jsou podle adaptivního modelu pro budovy s přirozeným větráním nižší než podle ČSN EN ISO 7730, a proto je nižší i potřeba energie na vytápění. U budov s centrální regulací se jedná o opak (požadované teploty jsou vyšší a potřeba energie je také vyšší než podle ČSN EN ISO 7730) (tab. 4).

Při porovnání potřebné energie na chlazení již není situace tak jednoznačná. Velkou roli zde mají přechodná období a tím i možné zařazení měsíců května a září do otopného nebo chladicího období. Na obr. 4 jsou potřeby energií pro vytápění a chlazení simulované kanceláře v České republice po jednotlivých měsících, při západní orientaci okna. V květnu a září, tedy v měsících, které jsme zařadili pro případ [A] (tradiční model) do otopného období (v souladu s vyhláškou ministerstva průmyslu a obchodu č. 245/95 Sb.), je potřeba značné množství energie na chlazení. Celková roční potřeba energie na chlazení kanceláře s přirozeným větráním pak podle uvažovaného adaptivního modelu [B] vychází nižší než potřeba energie na chlazení kanceláře podle tradičního mo-

Tab. 4 Celkové a poměrné roční potřeby energie na vytápění a chlazení typické kanceláře při různých orientacích prosklení (O) a pro 3 typy požadovaných rozmezí operativních teplot (t_o) podle tab. 3

O	t_o	Nizozemsko				Česká republika			
		Vytápění (kWh)	Chlazení (kWh)	Celkem		Vytápění (kWh)	Chlazení (kWh)	Celkem	
				(kWh)	(%)			(kWh)	(%)
S	A	586	134	720	100	541	232	773	100
	B	468	125	592	82	422	192	614	79
	C	761	164	925	129	704	260	964	125
V	A	547	309	856	100	450	512	962	100
	B	430	280	710	83	342	456	798	83
	C	709	341	1050	123	582	527	1109	115
J	A	389	430	819	100	365	607	972	100
	B	430	287	717	87	270	541	811	83
	C	534	452	986	120	478	609	1087	112
Z	A	464	600	1064	100	415	882	1297	100
	B	355	565	920	87	321	813	1134	88
	C	611	607	1218	115	530	888	1418	109



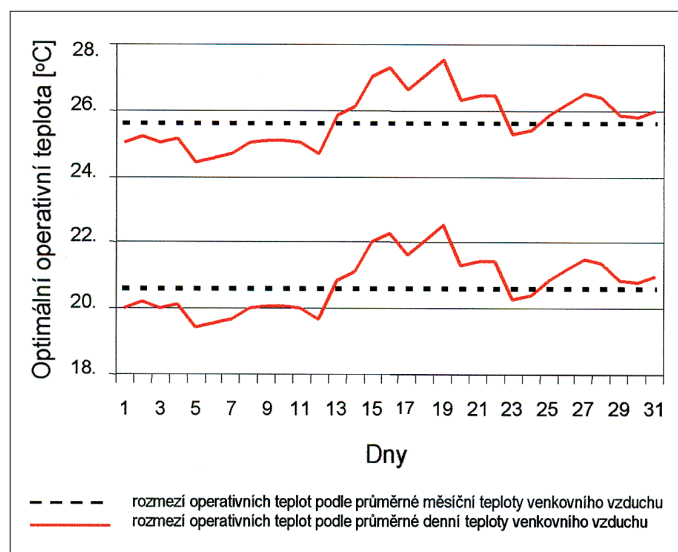
Obr. 4 Měsíční potřeby energie na vytápění a chlazení pro simulovanou kancelář v České republice s orientací okna na západ

delu, i když operativní teplota v letních měsících (6, 7, 8) je podle adaptivního modelu pro tyto budovy nižší než pro případ [A].

ZHODNOCENÍ

Stanovení venkovní efektivní teploty t_{ef} se jeví velmi problematické, protože při použití běžně dostupných meteorologických údajů (teplota a vlhkost vzduchu) nemůže t_{ef} zahrnovat vliv radiace.

Simulace potřeby energií podle adaptivního modelu byly provedeny po měsících pro požadované rozmezí operativních teplot, které byly stanoveny podle průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu pro referenční rok (podle [7]). Pokud bychom však určovali požadované rozmezí operativních, resp. teplot vzduchu podle průměrné denní teploty venkovního vzduchu, požadované rozmezí by se v letním období posunulo ke značně vyšším teplotám (hlavně u budov s přirozeným větráním) (obr. 5).



Obr. 5 Požadované rozmezí interiérových teplot v červenci v Nizozemsku podle adaptivního modelu tepelné pohody pro budovy s přirozeným větráním

Budovy jsou podle původního návrhu [7] rozděleny do dvou typů:

- s centrální regulací systémů techniky prostředí = budovy s centrálním vytápěním, chlazením a nuceným větráním, kde uživatelé nemají žádnou mož-

nost regulace parametrů interiérového vzduchu a nemají možnost otvírat okna;

- s přirozeným větráním = budovy bez centrálního vytápění, chlazení a větrání, kde uživatelé mají možnost otvírat okna. Instalované vytápění je s individuální regulací.

V Evropě jsou však velmi často stavěny budovy s přirozeným větráním a centrální regulací vytápění nebo i chlazení. Do které kategorie patří taková budova? Nebo je možné ji v zimě zařadit do první a v létě do druhé kategorie (pokud nemá chlazení)?

ZÁVĚR

Při použití navrhované normy pro hodnocení tepelné pohody [podle 7] pro budovy s přirozeným větráním by se snížily náklady na vytápění, avšak spodní hranice požadované interiérové teploty pro dosažení tepelné pohody 18 °C je nerealisticky nízká.

Naopak v letním období je horní hranice požadované interiérové teploty pro oba uvažované typy budov [podle 7] nižší než podle současně platných norem, což by představovalo zvýšení nákladů na chlazení. Ale kde je pak uvažovaná adaptace člověka?

Na základě zjištěných poznatků jsme dospěli k závěru, že původně navrhovaná norma pro hodnocení tepelné pohody [podle 7] není vhodná pro aplikaci v oblasti mírného pásma, kde leží jak Česká republika, tak Nizozemsko.

Dodatek

Po dokončení této studie a její prezentace v zahraničí [13], byla zveřejněna nová a pravděpodobně již konečná verze ASHRAE normy na hodnocení tepelné pohody s využitím adaptivního modelu. V této verzi byla venkovní efektivní teplota nahrazena teplotou venkovního vzduchu. Hlavní změnou však je, že adaptivní model je možné aplikovat pouze na hodnocení budov v letním období (když se nevytápí) a pouze tam, kde je přirozené větrání a není instalováno chlazení [12].

Literatura:

- [1] ČSN EN ISO 7730 Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody, Evropská komise pro normalizaci (CEN), 1996
- [2] ANSI/ASHRAE 55-1992 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- [3] ASHRAE: Fundamentals, ASHRAE Handbook, 1997
- [4] BRAGER, G.S., de DEAR, R. J.: Thermal adaptation in the built environment: A literature review, Energy and Buildings. 27, 1998, str. 83–96
- [5] BRAGER, G.S., de DEAR, J. R.: A standard for natural ventilation, ASHRAE Journal, 2000, October, str. 21–28
- [6] CENTNEROVÁ, L.: Je vlhkost interiérového vzduchu důležitá?, Topenářství instalace 2001, 4/2001, str. 38–40
- [7] de DEAR, R. J., G. S. BRAGER.: Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE Transactions, vol.104 (1), 1998, str. 27–49
- [8] ESRU: ESP-r – A Building Energy Simulation Environment. User Guide, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow. 1998
- [9] FANGER, P. O.: Thermal comfort; analysis and applications in environmental engineering. 1972
- [10] HENSEN, J. M. L.: Energy related design decisions deserve simulation approach. International Conference of Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning, Technische Universiteit Eindhoven. 1994
- [11] MCINTYRE, D. A.: Design Requirements for a Comfortable Environment. Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort. 1981, str. 195–220
- [12] Public Review Draft Standard 55 (<http://www.ashrae.org/standards/55-1992r.pdf>)
- [13] HENSEN, J. M. L., CENTNEROVÁ, L.: Energy simulation of traditional vs. adaptive thermal comfort for two moderate climate regions. Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Windsor, UK. 2001, str. 78–91.