

Modelování operativní teploty

Modelling of operational temperature

Ing. Karel KABELA, CSc.,
Ing. Zuzana VEVEKOVÁ
ČVUT v Praze Fakulta stavební,
katedra TZB

Recenzent
prof. Ing. František Drkal, CSc.

Článek popisuje základní fyzikální principy stanovení operativní teploty ve vytápěném prostoru a nástroje, kterými lze tento parametr, popisující vnitřní prostředí, matematicky modelovat. Demonstrován je program Hefaiostos určený pro statické modelování a program ESP-r pro dynamické stavy. Na závěr jsou uvedeny české i mezinárodní předpisy, v nichž se používá vyhodnocení vnitřního prostředí operativní teplotou.

Klíčová slova: operativní teplota, výsledná teplota, tepelná pohoda, modelování a simulace

The article describes the basic physical principles of the operational temperature determination in the heated space and the instruments by means of which it is possible to model mathematically this parameter describing the inner environment. The Hefaiostos programme meant for static modelling and the ESP-r programme meant for dynamic modelling are demonstrated. In conclusion the Czech and International Regulations, in which the evaluation of the inner environment by means of operational temperature is used, are indicated.

Key words: operational temperature, resulting temperature, thermal comfort, modelling and simulation

V souvislosti s rozvojem potenciálu výpočetní techniky se objevují nové možnosti využití nového přístupu k řešení inženýrských problémů. Netradiční řešení budov a jejich energetického chování, která bylo dříve nutno otestovat výhradně na skutečných modelech, je v současnosti možné zpracovat již v koncepční fázi do matematického modelu počítačovou simulací proměnlivých okrajových podmínek, sledovat, vyhodnocovat chování modelovaného systému, hledat kritická místa a optimální řešení. Nová technologie zkoumání chování budov simulací na matematickém modelu s sebou přináší i mnohá úskalí. Tak jako u fyzického modelu v měřítku se zanedbávají určité detaily, tak i u modelu matematického je jeden ze základních předpokladů úspěchu správná míra zjednodušení celého problému a nastavení okrajových podmínek. Na rozdíl od fyzického modelu je matematický model daleko citlivější na chybu a není výjimkou, že výsledky při prvních aproximacích matematického modelu se liší od předpokládané skutečnosti. Nutným krokem při matematickém modelování je proto validace modelu, kdy se matematický model ověří na známých skutečně naměřených hodnotách a použitím výsledných parametrů se „naladí“ tak, aby výsledky odpovídaly skutečnosti.

Matematické modely, které se postupně začínají používat nejen na úrovni výzkumných úloh ale i na úrovni inženýrské praxe, se v zásadě dělí na modely statické a dynamické. Modely statické popisují řešený problém v ustáleném stavu a nezohledňují časovou závislost změny parametrů a jsou určeny především pro analýzu prostorových problémů řešících například rozložení povrchových teplot na konstrukcích. Modely dynamické jsou určeny k analýze časově závislých přechodových jevů a popisují tedy i dynamické vlastnosti modelovaných systémů.

Snahy o vytvoření matematického modelu výsledného stavu vnitřního prostředí jsou známy od prvopočátku rozvoje vědních disciplín, které se touto problematikou zabývají. Problém, který až doposud znemožňoval detailní analýzu výsledného stavu vnitřního prostředí byl dán omezenou kapacitou počítačů, které pro modelování tak složitých jevů musí vykonat stovky tisíc matematických operací v relativně krátké době.

1. TEPELNÁ POHODA A OPERATIVNÍ TEPLOTA

Optimální tepelné pohody je dosaženo při rovnováze tepelné bilance člověka [14], kdy produkce metabolického tepla, daného fyzickou aktivitou, je v rovnováze s teplem odváděným z lidského těla do okolního prostředí při dodržení po-

žadovaných rozmezí asymetrie sálavé a konvekční složky sdílení tepla a prostorové asymetrie operativní teploty [12].

Pro hodnocení tepelného stavu prostředí v obecném bodu prostoru podle rovnice tepelné pohody je nutno znát zvlášť teplotu vzduchu t_a a povrchovou teplotu jednotlivých okolních ploch t_p . Povrchové teploty jednotlivých ploch, kterých je ve skutečnosti nekonečný počet, se v praxi nahrazují jednou hodnotou, kterou je střední radiální teplota okolních ploch t_r . Střední radiální teplota okolních ploch je povrchová teplota imaginárního šedého povrchu obklopujícího daný bod, která má stejné sálavé účinky jako skutečné okolí posuzovaného bodu.

Na rozdíl od jednotlivých povrchových teplot zohledňuje střední radiální teplota vzdálenost posuzovaného bodu od jednotlivých povrchů a jejich poměrnou velikost (tzv. view factor – poměr osálení) a je tedy již vázána na daný bod v prostoru. U interiérů s rovnoměrnou povrchovou teplotou okolních ploch je vliv posuzovaného místa v prostoru malý, u interiérů s velkými chladnými resp. horkými povrchy je tento vliv podstatný a nezanedbatelný – střední radiální teplota bude zcela jiná v těsné blízkosti a ve velké vzdálenosti od chladné stěny.

Kritérií pro posuzování tepelné pohody je obecně celá řada. Pro zjednodušení vyhodnocení tepelné pohody se zavádí veličina nazývaná operativní teplota t_o [°C], která jednou hodnotou zahrnuje vliv konvekční výměny tepla a vliv sdílení tepla sáláním.

Z hlediska fyzikálního je operativní teplota veličina, která vyjadřuje sálavou a konvekční složku sdílení tepla mezi člověkem a okolním prostředím.

Operativní teplota je vypočtená hodnota a je definována jako jednotná teplota uzavřeného prostoru (tj. prostoru o stejné teplotě vzduchu i stejné střední radiální teplotě), černého z hlediska radiace, ve kterém by lidské tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí [1].

Rovnice (1.1) popisuje sdílení citelného tepla mezi povrchem lidského těla (oblečení a pokožka) a mezi povrchy okolních ploch v interiéru (včetně zdrojů tepla) a mezi okolním vzduchem v interiéru.

$$R + C = f_{cl} [h_r (t_{cl} - t_r) + h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (1.1)$$

$$A_D = 0,202 m^{0,425} \mu^{0,725} \quad (1.2)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 0,2 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (1.3)$$

- (1.4)
- kde R – tepelný tok sáláním (radiací) [W.m⁻²],
 C – tepelný tok prouděním (konvekci) [W.m⁻²],
 f_{cl} – poměr povrchu těla pokrytého oděvem A_{cl} a povrchu neoblečeného těla A_D [-]; podle Fangera – viz rovnice (1.4),
 h_r – součinitel přestupu tepla sáláním (radiací) [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (1.5),
 t_{cl} – teplota oděvu [°C],
 h_c – součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci) [W.m⁻².K⁻¹]; viz tab. 1,
 t_a – teplota vzduchu [°C],
 A_D – povrch lidského těla [m²]; podle DuBoise (1916) – viz rovnice (1.2),
 m – hmotnost člověka [kg],
 h – výška člověka [m],
 I_{cl} – tepelná izolace oděvu [clo].

Součinitel přestupu tepla sáláním (radiací)

se vypočte z rovnice [8]

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \frac{A_r}{A_D} \left[273,2 + \frac{t_{cl} + t_r}{2} \right]^3 \quad (1.5)$$

- kde h_r – součinitel přestupu tepla sáláním (radiací) [W.m⁻².K⁻¹],
 ε – emisivita oděvu (pro běžný oděv téměř rovna 1; $\varepsilon = 0,95$ – Fanger (1967); $\varepsilon = 0,98$ – Gonzalez (1995)),
 s – součinitel sálání černého tělesa $s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
 A_r – povrch těla účastníci se výměny tepla sáláním [m²],
 A_D – povrch lidského těla [m²]; podle DuBoise (1916) rovnice (1.2); (A_r/A_D je pro sedící osoby = 0,7, pro stojící osoby = 0,73; Fanger (1967)),
 t_{cl} – teplota oděvu [°C],
 t_r – střední radiální teplota [°C].

Rovnici (1.1) není vždy možné explicitně vyřešit, poněvadž t_{cl} je neznámá. Jistá forma iterace je poté nezbytná, je-li požadováno přesné řešení. Naštěstí součinitel přestupu tepla sáláním h_r je pro typické teploty vnitřního prostředí a běžné oděvy téměř konstantní hodnota $h_r = 4,7 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Jestliže je emisivita ε výrazně nižší než 1, hodnota součinitele přestupu tepla sáláním h_r by pak měla být upravena podle vztahu

$$h_r = 4,7\varepsilon \quad (1.6)$$

kde ε vyjadřuje vážený průměr emisivit jednotlivých povrchů lidského těla.

Součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci)

Tepelný tok prouděním je způsobován prouděním vzduchu v místnosti nebo pohybem člověka. Součinitel přestupu tepla prouděním se vypočte pro různé okrajové podmínky různé; viz tab. 1. Všechny součinitele přestupu tepla v tab. 1 jsou stanoveny pro nebo velmi blízko tlaku 101,33 kPa. Tyto součinitele musí být tedy vždy upraveny pro konkrétní atmosférický tlak [8] :

$$h_{cc} = h_c (\rho_t/101,33)^{0,55} \quad (1.7)$$

- kde h_{cc} – opravený součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci) [W.m⁻².K⁻¹],
 ρ_t – lokální atmosférický tlak [kPa].

Rovnici (1.1) lze též vyjádřit s použitím součinitele přestupu tepla konvekci i radiací h a operativní teploty t_o :

$$R + C = f_{cl} h (t_{cl} - t_o) \quad (1.8)$$

Tab. 1 Rovnice pro výpočet součinitele přestupu tepla prouděním

Rovnice	Limity	Podmínky	Poznámka / Zdroj
$h_c = 8,3 v^{0,6}$ $h_c = 3,1$	$0,2 < v < 4,0$ $0 < v < 0,2$	sedící člověk + pohybující se vzduch	v je rychlost vzduchu [m.s ⁻¹] Mitchell (1974)
$h_c = 2,7 + 8,7 v^{0,67}$ $h_c = 5,1$	$0,15 < v < 1,5$ $0 < v < 0,15$	ležící člověk + pohybující se vzduch	v je rychlost vzduchu [m.s ⁻¹] Colin a Houdas (1967)
$h_c = 8,6 v^{0,53}$	$0,5 < v < 2,0$	procházející se člověk + klidný vzduch	v je rychlost chůze [m.s ⁻¹] Nishi a Gagge (1970)
$h_c = 5,7 (M-0,8)^{0,39}$	$1,1 < M < 3,0$	aktivní člověk + klidný vzduch	M je tep. produkce metabolismu [W.m ⁻²] Gagge a kol. (1976)
$h_c = 6,5 v^{0,39}$	$0,5 < v < 2,0$	neustále se pohybující člověk + klidný vzduch	v je rychlost pohybu [m.s ⁻¹] Nishi a Gagge (1970)
$h_c = 14,8 v^{0,61}$ $h_c = 4,0$	$0,15 < v < 1,5$ $0 < v < 0,15$	stojící člověk + pohybující se vzduch	v je rychlost vzduchu [m.s ⁻¹] Seppanen a kol. (1972)

$$h = h_r + h_c \quad (1.9)$$

odkud

$$t_o = \frac{h_c t_a + h_r t_r}{h_c + h_r} \quad (1.10)$$

- kde R – tepelný tok sáláním (radiací) [W.m⁻²],
 C – tepelný tok prouděním (konvekci) [W.m⁻²],
 f_{cl} – poměr povrchu těla pokrytého oděvem A_{cl} a povrchu neoblečeného těla A_D [-]; viz rovnice (1.4),
 h – součinitel přestupu tepla konvekci i radiací [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (1.9),
 h_r – součinitel přestupu tepla sáláním (radiací) [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (1.5),
 h_c – součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci) [W.m⁻².K⁻¹]; viz tab. 1,
 t_o – operativní teplota [°C],
 t_a – teplota vzduchu [°C],
 t_r – střední radiální teplota [°C].

Operativní teplota je tedy váženým průměrem teploty vzduchu a střední radiální teploty podle odpovídajících součinitelů přestupu tepla konvekci a sáláním.

2. STANOVENÍ OPERATIVNÍ TEPLoty MĚŘENÍM

Pokud se operativní teplota stanovuje ve skutečném prostředí na základě měření fyzikálních veličin, jsou výchozími měřeními veličinami teplota kulového teploměru, teplota vzduchu a rychlost proudění vzduchu. Při rychlostech proudění vzduchu menších než 0,2 m.s⁻¹ lze nahradit operativní teplotou výslednou teplotou kulového teploměru t_g (°C). Při vyšších rychlostech existují vztahy pro výpočet operativní teploty z teploty vzduchu, teploty kulového teploměru a rychlosti proudění vzduchu.

2.1 Stanovení operativní teploty z teploty vzduchu t_a , střední radiální teploty t_r a rychlosti vzduchu v_{ar}

Ve většině případů, kde je relativní rychlost proudění vzduchu malá (< 0,2 m.s⁻¹) nebo kde je malý rozdíl mezi střední radiální teplotou a teplotou vzduchu (< 4 °C), je možno operativní teplotu vypočítat s dostatečným přiblížením jako aritmetický průměr teploty vzduchu t_a a střední radiální teploty t_r [1]. Při vyšších rychlostech vzduchu a větším rozdílu teplot t_a a t_r se operativní teplota určí z rovnice

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) t_r \quad (2.1)$$

kde A je funkcí relativní rychlosti proudění vzduchu v_{ar} [m.s⁻¹] podle tab. 2.

Tab. 2 Závislost koeficientu A pro výpočet operativní teploty t_o na rychlosti proudění vzduchu v_{ar} [m.s⁻¹]

v_{ar} [m.s ⁻¹]	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
A [-]	0,50	0,53	0,60	0,65	0,70	0,75

2.2 Stanovení operativní teploty z teploty vzduchu t_a , teploty kulového teploměru t_g a rychlosti vzduchu v_a

Operativní teplotu lze též stanovit na základě znalosti výsledné teploty kulového teploměru t_g , teploty vzduchu t_a a rychlosti proudění vzduchu v_a z rovnice [7]

$$t_o = K \cdot t_g + (1 - K) t_a \quad (2.2)$$

$$\text{kde } K = \varepsilon \frac{A_r}{A_d} \cdot \frac{h_{rg} + h_{cg}}{h_r + h_c} \quad (2.3)$$

t_o – operativní teplota [°C],

t_a – teplota vzduchu [°C],

t_g – výsledná teplota kulového teploměru [°C],

K – váhový koeficient [-],

ε – emisivita kůže (oděvu) [-],

$\frac{A_r}{A_d}$ – poměr sálajícího povrchu těla ku celkovému povrchu A_D podle DuBois (1916) rovnice (1.2) [-],

h_r – součinitel přestupu tepla sáláním (radiací) [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (1.5),

h_c – součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci) [W.m⁻².K⁻¹]; viz tab. 1,

h_{rg} – součinitel přestupu tepla sáláním v úrovni kulového teploměru [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (2.6),

h_{cg} – součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni kulového teploměru [W.m⁻².K⁻¹]; viz rovnice (2.4 a 2.5).

Hodnoty součinitelů přestupu tepla sáláním a konvekci v úrovni kulového teploměru se vypočítají z těchto rovnic [7]:

□ součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni kulového teploměru [W.m⁻².K⁻¹]

$$\text{– pro přirozené proudění vzduchu} \quad h_{cg} = 1,4 \cdot (\Delta t / D)^{1/4} \quad (2.4),$$

$$\text{– pro nucené proudění vzduchu} \quad h_{cg} = 6,3 \cdot (v_a^{0,5} / D^{0,4}) \quad (2.5).$$

□ součinitel přestupu tepla sáláním v úrovni kulového teploměru [W.m⁻².K⁻¹]

$$h_{rg} = 6,01 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2.6),$$

kde v_a – rychlost proudění vzduchu v úrovni koule [m.s⁻¹],

D – průměr koule [m],

Δt – rozdíl teplot $t_a - t_g$ [K].

V ideálním případě, kdy je $K = 1$, je operativní teplota t_o rovna výsledné teplotě kulového teploměru t_g .

3. STANOVENÍ OPERATIVNÍ TEPLoty MATEMATICKÝM MODELEM

Matematický model popisující operativní teplotu vychází z výše uvedeného základního vztahu (1.10).

Model je možné vytvořit buď statický, který popisuje prostorové rozložení operativní teploty v jednom časovém okamžiku, nebo dynamický, který je schopen postihnout i časovou proměnu této hodnoty. Statický model je postačující pro řešení úloh typu „optimalizace rozmístění otopných ploch“ nebo „stanovení extrémních podmínek v interiéru“, zatímco dynamického modelu je vhodné použít na řešení úloh souvisejících s výpočty energetických ukazatelů a tepelné pohody objektů s přerušovaným vytápěním. Dynamický model je též vhodný pro simulaci chování inteligentních budov, kde operativní teplota v daném okamžiku a místě může být poruchovou veličinou pro zahájení činnosti automatické regulace.

Pro rychlosti do 0,2 m.s⁻¹ je k výpočtu operativní teploty t_o postačující stanovení pouze teploty vzduchu t_a a střední radiální teploty t_r . Pro vyšší rychlosti proudění vzduchu je nutné již vzít v úvahu proudění a sestavování dynamického modelu operativní teploty vyžaduje již využití prvků CFD (Computational Fluid Dynamics) [5], [9].

3.1 Statické modelování

Statické modely slouží k základní orientaci v problému a používají se tam, kde je třeba „zmapovat“ stav při určitém konkrétním navrhovaném řešení (např. rozmístění otopných ploch ve vytápěné místnosti) a na základě takto získané informace optimalizovat řešení problém.

Neobsahují většinou žádné mechanismy pro popis chování budovy v čase za proměnných podmínek a pro popis interakce jednotlivých subsystemů budov.

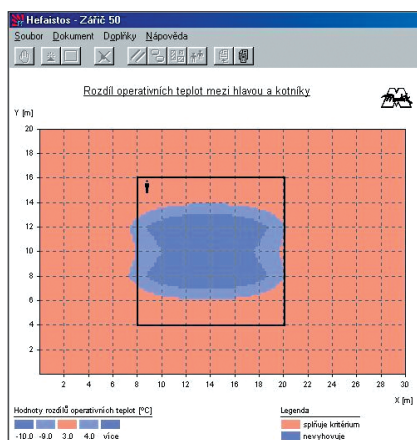
Statické modely jsou v principu jednodušší než komplexní dynamické modely a jejich velkou výhodou je rychlost zpracování a relativně malé nároky na HW vybavení. Předpoklady obecně platné při vytváření statických modelů jsou:

- Fourierova rovnice vedení tepla se redukuje na jednorozměrný problém v ustáleném stavu, neuvažuje se tepelná jímavost materiálů.
- Tepelná vodivost materiálů je konstantní, pro popis tepelně technických vlastností konstrukcí se používá součinitele prostupu tepla k .
- Součinitele přestupu tepla při konvekci jsou konstantní a stejné po celém povrchu konstrukce.
- Dlouhovlnná radiace je zjednodušena na linearizovaný součinitel osálení, který je v čase neměnný a platný pro celý povrch.
- Modelování proudění vzduchu vychází z ustáleného stavu a z předpokladu ideálního promísení vzduchu v jednotlivých zónách.
- Náhodné tepelné zisky jsou většinou dány konstantní hodnotou bez časových průběhů a extrémů.
- Klimatické podmínky jsou redukovány na výpočtové teploty bez časového průběhu (pro navrhování systémů), nebo denostupně (pro odhady spotřeby energie).
- Energetické systémy jsou idealizovány a vliv regulace a technického řešení se vyjadřuje konstantní účinností, která je ve skutečnosti proměnná v závislosti na podmínkách.
- Průběh využití budovy je zjednodušen na konstantní vnitřní teplotu.

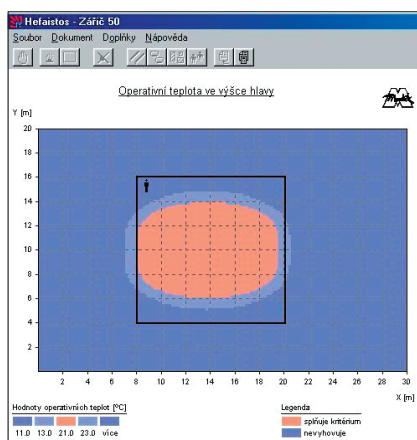
Příkladem statického modelu pro výpočet operativní teploty je program Hefais-tos – Release 6. Fyzikální model, použitý v programu Hefais-tos (Release 6), je uzpůsoben k popisu ustáleného stavu v uzavřených halách vytápěných především tmavými infrazářiči [10].

Pro účely výpočtu teploty vzduchu je hala horizontálně rozdělena na dolní a horní část ve výšce dané podle výkonu váženým průměrem výšek zavěšení všech infrazářičů. Teplota vzduchu je pak počítána vždy z energetického toku přes povrch haly na základě rovnováhy vnitřních tepelných zisků a tepelných ztrát haly. Výpočet neuvažuje zisky ze solárního záření.

Nejprve je teplota vzduchu vypočítána zvlášť pro dolní a horní část haly. Do dolní části je započtena dodávka energie zářením z infrazářičů, trvalý zisk



Obr. 1 Grafický výstup z programu Hefaios znázorňuje rozložení sálavého toku a operativní teploty při podlaze haly. Patrný je vliv negativního sálání vratových otvorů



Obr. 2 Grafický výstup z programu Hefaios znázorňuje vyhodnocení splnění hygienických požadavků podle 178/2001 Sb. na operativní teplotu ve výšce hlavy. Patrné je nedosažení požadované operativní teploty u vrat

livých obalových konstrukcí haly. Lze tak stanovit energii (dle záření absolutně černého tělesa), kterou povrch (jako plošný zdroj záření) vyzařuje zpět do haly. Operativní teplota v daném bodě uvnitř haly je tedy určena teplotou vzduchu a příspěvkem záření od všech infrazářičů i od celého povrchu haly. Pro výpočet operativní teploty se předpokládá rychlost proudění vzduchu menší než $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vstupními údaji jsou požadovaná operativní teplota, geometrie haly, tepelné technické vlastnosti obvodových konstrukcí, provozní režim haly, teplotní oblast objektu, ve které se objekt nachází, požadavek na větrání, určení zóny pobytu lidí v hale a popis činnosti osob pobývajících v hale. Výstupem je grafické znázornění intenzity osálení a operativní teploty t_e v rovině zadané výšky nad podlahou (viz obr. 1) včetně hygienického posouzení, zda dané řešení vyhoví či nevyhoví hygienickým požadavkům. Jedním z požadavků je rozložení operativní teploty ve výšce hlavy (odpovídající poloze člověka – sedící/stojící) (obr. 2) a dalším pak rozdíl operativních teplot mezi hlavou a kotníky, podrobněji viz dále.

Toto hygienické vyhodnocení je znázorněno v půdorysném průmětu haly v zadané výšce. Tříbarevné mapy zobrazují oblasti, ve kterých jsou hygienické podmínky splněny (oranžová) nebo naopak nesplněny (tmavší odstín modré) a též tzv. toleranční pásmo, kde může být v určitých případech nesplnění kritéria ješ-

tepla z technologií, ztráty odpovídající částí povrchu haly a infiltrace venkovního vzduchu. Do horní části je započten pouze přísun energie konvekci z infrazářičů a ztráty odpovídající částí povrchu haly.

Pokud v horní části je teplota vzduchu vyšší, tak se zde trvale udržuje „polštář“ teplého vzduchu a horizontální rozdělení haly je oprávněné. V dýchací zóně (1,5 m nad podlahou) je pak teplota vzduchu určena podle dolní části přepočtem na potřebnou výšku dle předpokládaného vertikálního rozvrstvení vzduchu s gradientem $0,3 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$. Pokud však v horní části haly vyjde teplota vzduchu nižší, než teplota vzduchu ve spodní části haly (např. při špatné tepelné izolaci střechy), dochází ve skutečnosti k cirkulaci vzduchu mezi dolní a horní částí haly. Ve výpočtu je tato skutečnost zohledněna celým novým výpočtem bez uvažování horizontálního rozdělení haly.

Na základě znalosti teploty vzduchu jsou určeny i povrchové teploty jednot-

tě tolerováno (světlejší odstín modré). Pod každým průmětem je vždy legenda s hodnotami popisujícími jednotlivé barevné odstíny (viz obr. 2).

3.2 Dynamické modelování

Zjednodušené dynamické modely vycházejí především z regresní analýzy výsledků vícenásobného běhu statických modelů za různých okrajových podmínek. Tyto modely nejsou schopny postihnout charakteristiku přechodových dějů, jsou však schopny zohlednit chování budovy (systému) za různých podmínek.

Pro jednodušší systémy lze stanovit na základě okrajových podmínek matematickou funkci, popisující dynamickou odezvu systému. Existují dvě hlavní větve této metody – časová a frekvenční odezva.

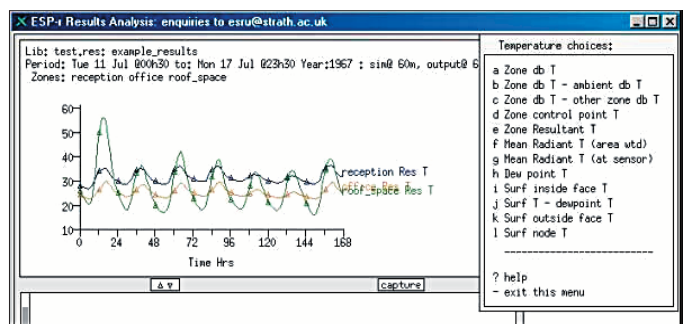
Analogie mezi tepelnými a elektrickými obvody vede k aplikaci metod používaných v elektrických systémech na tepelné systémy. Tato metoda je výhodná především pro oblast základního výzkumu, neboť umožňuje poměrně v krátkém čase simulovat dlouhá období, zatím je však málo praktických aplikací.

Se zvyšujícími se výkony výpočetní techniky se stále více aplikují numerické metody. Pro modelování aktivních systémů se jako vhodná jeví metoda konečných diferencí a metoda konečných prvků. Metoda sítí je jedna z nejčastěji používaných v oboru modelování budov.

Jedním z dynamických modelů je ESP-r (Environmental Systems Performance; r – research) [5], [9]. ESP-r je simulační nástroj, který obsahuje mechanismy pro popis chování budovy v čase za proměnných podmínek a pro popis interakce jednotlivých subsystémů budov.

Nejprve je třeba sestavit počítačový model simulovaného objektu. Budova se rozdělí na nezbytně nutný počet zón, v závislosti na simulovaném problému. U každé zóny musí být zadána geometrie, skladba jednotlivých konstrukcí (je možné použít databázi konstrukcí, která je součástí programu a nebo vytvořit databázi novou) a činnosti, ke kterým v dané zóně dochází. Dále je možné v každé zóně zadat infiltraci a výměnu vzduchu mezi jednotlivými zónami, náhodné zisky, zastínění, žaluzie a rolety, data pro výpočet součinitelů osálení, přestupu tepla konvencí atd. Rovněž je možné zadat jednotlivé komponenty otopné soustavy a jejich propojení.

Výstupní hodnoty ESP-r jsou číselné a grafické (obr. 3). Není však možné obdržet grafické rozložení jednotlivých teplot v místnosti, lze jen zadat několik bodů, v kterých by tyto teploty měly být vyčísleny. Jde o výpočet na krychli (kvádru), jejíž rozměry jsou volitelné [11]. Chceme-li tedy obdržet hodnotu operativní teploty ve zvoleném místě, je třeba nejprve vypočítat střední radiční teplotu t_r v tomto místě a teplotu vzduchu v místnosti t_a . Operativní teplota je pak aritmetickým průměrem těchto hodnot za předpokladu rychlosti proudění vzduchu do $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 3 Grafický výstup z programu ESP-r – průběh operativní teploty v jednotlivých zónách modelu v čase

4. OPERATIVNÍ TEPLOTA JAKO KRITERIUM HODNOCENÍ TEPELNÉHO STAVU PROSTŘEDÍ

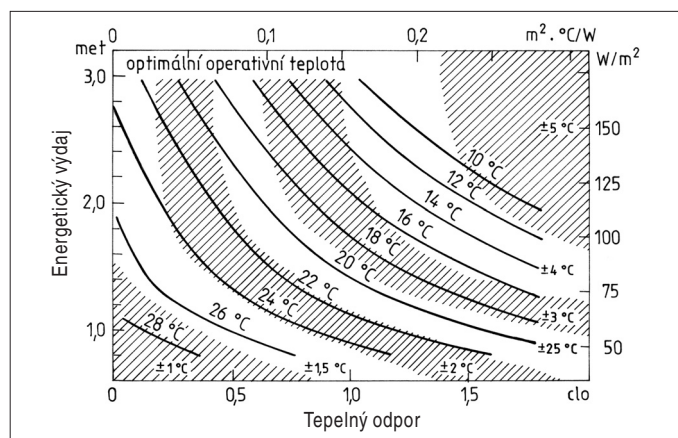
K vyhodnocení tepelného stavu vnitřního prostředí a následnému zajištění optimálního tepelného komfortu pro člověka je třeba stanovit několik parametrů, mezi něž patří i operativní teplota. Operativní teplota je tedy kritériem pro hodnocení tepelné pohody prostředí. Optimální hodnoty operativní teploty jsou uvedeny v několika předpisech.

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

ČSN EN ISO 7730 [1] je norma pro hodnocení tepelné pohody a popisuje, mimo jiné, podmínky tepelného mikroklimatu přijatelného pro tepelnou pohodu člověka. Mezi tyto podmínky patří i doporučené operativní teploty pro 90% spokojenost lidí v daném interiéru, které jsou patrné z tab. 3 a též z obr. 4, kde jsou znázorněny optimální operativní teploty (odpovídající PMV = 0) jako funkce tělesné aktivity a oděvu.

Tab. 3 Doporučené operativní teploty pro 90% spokojenost lidí v daném interiéru

Období	Izolace oblečení [clo]	Stupeň aktivity [met]	Optimální operativní teplota [°C]	Přípustné rozmezí operativní teploty [°C]
Zima	1,0	1,2	22	20 až 24
Léto	0,5	1,2	24,5	23 až 26



Obr. 4 Optimální operativní teploty jako funkce tělesné aktivity a oděvu.

4.2 Vládní nařízení č. 178/2001 Sb.

Tímto nařízením ze dne 18. 4. 2001 se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci a kromě jiného se stanoví i hygienické požadavky na pracovní prostředí a pracoviště [4]. Toto nařízení prochází v současné době (září 2002) revizí.

4.3 ANSI/ASHRAE 55-92 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Americká norma 55-1992 (Tepelné parametry interiéru obývaného člověkem) se zabývá tepelnou pohodou v interiérech, kde běžně pobývají lidé a uvažuje s 80% spokojeností osob pobývajících v daném interiéru [3]. Doporučené hodnoty operativní teploty pro dosažení celkové tepelné pohody, stanovené tímto předpisem, jsou uvedeny v tab. 4 a na obr. 5.

Metody počítačového modelování energetického chování systémů TZB a vnitřního prostředí jsou nepostradatelné pro optimalizaci systémů. Rozhodujícím prvkem v úspěšnosti aplikace těchto metod nejen v oblasti základního výzkumu ale i v praxi je volba vhodného modelu a detailu řešeného problému, kde musí být v souladu přesnost vstupních dat s požadovaným výstupem.

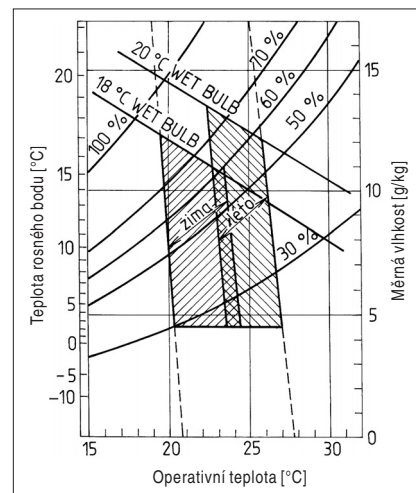
Tab. 4 Optimální a přípustné operativní teploty pro osoby vykonávající lehkou práci, při relativní vlhkosti vzduchu 50% a střední rychlosti vzduchu $\leq 0,15 \text{ m.s}^{-1}$

Období	Typické oblečení	Izolace oblečení [clo]	Stupeň aktivity [met]	Optimální operativní teplota [°C]	Přípustné rozmezí operativní teploty [°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
	Minimální oblečení	0,05	1,0	27	26 až 29

Tento příspěvek je součástí výzkumných záměrů CEZ J04/98: 210000005 a 21000011.

Použitá zdroje:

- [1] ČSN EN ISO 7730, 1997. *Mírné tepelné prostředí. Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody.* Český normalizační institut
- [2] ČSN ISO 7726, 1993. *Tepelné prostředí. Přístrojové metody měření fyzikálních veličin.* Federální úřad pro normalizaci a měření
- [3] ANSI/ASHRAE 55-1992. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.* American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta
- [4] Vládní nařízení č. 178/2001 Sb. ze dne 18. 4. 2001, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci. Sbírka zákonů ČR
- [5] CLARKE, J., 1974-77. *Simulační program ESP-r*, část doktorské práce, University of Strathclyde, Glasgow
- [6] ASHRAE, 2001. *Fundamentals – Thermal Comfort.* ASHRAE Handbook, chapter 8, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta
- [7] ASHRAE, 1999. *Applications – Radiant Heating and Cooling.* ASHRAE Handbook, chapter 52, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta
- [8] Sars G., Pernot C., de Wit M., 1988. *ESPMrt, a new module for the ESP – system.* University of Technology Eindhoven, Institute of Applied Physics TNO-TH, Eindhoven
- [9] HENSEN, J. L. M., 1991. *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system.* Doctoral dissertation Eindhoven University of Technology (FAGO)
- [10] KABELE, K., PINKAS, P., HAKEN, 2000. *Modelování a simulace energetických systémů budov 4.* Topenářství-instalace, 34, č. 5.
- [11] KRŤKOVÁ, Z., KABELE, K., 2000. *Možnosti využití simulačního programu ESP-r pro výpočet střední radiační teploty.* Sborník 1. národní konference Simulace budov 2000, pp. 96-101, Praha, IBPSA CZ, 2000
- [12] KABELE, K., KADLECOVÁ, M., KRŤKOVÁ, Z., 2000. *Application of the computer simulation in warm-air heating system design in low-energy buildings.* Proceedings of the 4th international conference Energy for Buildings, pp 271-287, Vilnius
- [13] CENTNEROVÁ, L., 2001. *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody.* Disertační práce, ČVUT v Praze
- [14] FANGER, P.O., 1972. *Thermal comfort.* McGraw-Hill, New York.



Obr. 5 Přípustné rozmezí operativní teploty a vlhkosti vnitřního vzduchu pro typické letní a zimní oblečení (wet bulb – teplota mokrého teploměru)