

doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Produkce tepla osob jako podklad pro energetické simulační výpočty



Heat Gains from the People as a Basis of Energy Simulation

Recenzenti:

prof. Ing. Karel Kabele, CSc.
 prof. Ing. Jozef Hraška, Ph.D.

Důležitým údajem pro energetické simulační výpočty budov je znalost vnitřních tepelných zisků od osob vykonávajících určitou činnost. Nejčastěji používaným podkladem u nás je česká norma pro výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů, která vychází z hodnot uvedených v ASHRAE a značně zjednodušuje např. výpočet produkce tepla od dětí. Výpočet na základě tepelné bilance prezentuje produkci citelného a vázaného tepla od osob v závislosti na věku, fyzických proporcích, druhu činnosti a tepelně-vlhkostních podmínkách v prostoru. Výsledky výpočtů jsou porovnány s údaji prezentovanými v dostupné literatuře včetně uvedení poměru mezi konvektivní a sálavou složkou tepelného toku. Konečným cílem analýz je stanovit tepelný tok od dětí jako vstupní údaj pro energetické simulační výpočty školských budov.

Klíčová slova: metabolismus, citelné teplo, vázané teplo, produkce vodní páry, růstové grafy

The knowledge of internal heat gains from people performing certain activities is important for energy simulation calculations. The most commonly used data are present in Czech standard for heat load calculation, based on the values specified in ASHRAE. The standard greatly simplifies heat production from children. A calculation based on the heat balance presents a production of sensible and latent heat from people, depending on age, physical proportions, type of activity and thermal conditions in space. The results are compared with the data presented in the literature including the ratio between convection and radiation heat flow. The main goal of the analysis is to determine the heat flow from the children as an input for energy simulation calculations of school buildings.

Keywords: metabolism, sensible heat, latent heat, water vapour production, growth charts

ÚVOD

Údaje o produkci tepla osob jsou důležité pro výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů. V našich podmínkách se používají údaje z ČSN 730548 [9], kde je uvedena v tabulkové formě produkce citelného tepla a vodní páry mužů pro různé druhy činnosti v závislosti na teplotě vzduchu. Produkce tepla u žen se bere 85 %, u dětí pak 75 %. V zahraniční literatuře [1], [5] je možné nalézt údaje o produkci tepla a vodní páry ve výrazně skromnější podobě. Porovnání údajů jednotlivých literárních zdrojů je předmětem další části textu.

Produkci tepla od osob lze stanovit na základě rovnice tepelné rovnováhy, která bilancuje lidské tělo jako celek. Nejedná se o rovnici tepelného komfortu, nicméně většina výpočetních vztahů uvedených v [3], resp. [7], byla použita i pro prezentovaný výpočetní model. Rozdíly v obou výpočtech jsou popsány níže. Prezentované analýzy platí pro mírné tepelné prostředí.

VÝPOČTOVÝ MODEL

Při výpočtu tepelné zátěže od osob zanedbáváme mechanickou práci a předpokládáme tedy, že se veškerý energetický výdej (metabolický tok) přemění na teplo. Tento tepelný tok obsahuje citelnou a vázanou složku

$$\dot{q}_m = \dot{q}_{cit} + \dot{q}_{váz} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

kde měrný citelný tepelný tok je

$$\dot{q}_{cit} = \dot{q}_s + \dot{q}_k + \dot{q}_{d,cit} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

a měrný vázaný tepelný tok je

$$\dot{q}_{váz} = \dot{q}_w + \dot{q}_{d,váz} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Celkový citelný tepelný tok sdílený do prostoru (citelná tepelná zátěž od osob) pak bude

$$\dot{Q}_{cit} = A_{Dw} \dot{q}_{cit} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Obdobným způsobem se určí celkový tepelný tok vázaný ve vodní páře, kde A_{Dw} je povrch člověka.

Pro konkrétní lidskou činnost je znám měrný metabolický tok [10] a pro zadané parametry člověka a tepelný stav prostředí je možné stanovit produkci citelného a vázaného tepla. Teorie výpočtu jednotlivých tepelných toků uvedených v rovnicích (1) až (3) je podrobně popsána v odborné literatuře (např. [3] nebo [2]).

Tepelný tok sdílený konvekcí a sáláním

Tepelný tok sáláním a konvekcí závisí na povrchové teplotě oděvu t_{od} , která se stanoví z rovnice toku tepla oděvem [2]

$$t_{od} = \frac{\alpha_k f_{od} t_a + \alpha_s f_{od} t_r + \frac{1}{R_{od}} t_p}{\alpha_k f_{od} + \alpha_s f_{od} + \frac{1}{R_{od}}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (5)$$

Vzhledem k tomu, že součinitel přestupu tepla konvekcí při přirozeném proudění je rovněž závislý na t_{od} , je v tomto kroku využit iterační výpočet. Povrchový faktor oděvu f_{od} pro $I_{od} > 0,5$ [clo] je

$$f_{od} = 1,05 + 0,1 I_{od} \quad [-] \quad (6)$$

Pro přirozenou konvekcí (prakticky pro $v \leq 0,1$ m/s) se používá vztah [7]

$$\alpha_k = 2,38 (t_{od} - t_a)^{0,25} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (7)$$

pro nucenou konvekci ($0,1 < v < 2,5$ m/s) [7]

$$\alpha_k = 12,1\sqrt{v} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (8)$$

Ve standardním (Fangerově) modelu tepelného komfortu podle [7] se pracuje s větší z obou hodnot α_k .

Do rovnice (5) se dosadí skutečná střední teplota pokožky oblečeného člověka v ustáleném stavu, bez ohledu na dosažení tepelného komfortu (v tomto kroku je patrný rozdílný přístup oproti modelu tepelného komfortu). Pro tepelný odpor oděvu $I_{od} \geq 0,6$ [clo] je možné použít rovnici [8]

$$\begin{aligned} t_p = & 12,17 + 0,02t_a + 0,044t_r - \\ & - 0,253w + 0,000194p_v + \\ & + 0,005346\dot{Q}_m + 0,51274t_{re} \quad [^\circ\text{C}] \end{aligned} \quad (9)$$

kde t_{re} je rektální teplota. Předpokládáme-li ustálený stav (mírné tepelné prostředí), lze ji stanovit jako [8]

$$t_{re} = \frac{2t_{cr} - 1,31}{1,962} \quad [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

Pokud se nitrotělní teplota t_{cr} v čase příliš nemění, je pouze funkcí metabolismu [8]; přibližně je rovna 37 $^\circ\text{C}$. Stanovit ji lze z upravené rovnice

$$t_{cr} = 0,0036(\dot{q}_m - 55) + 36,8 \quad [^\circ\text{C}] \quad (11)$$

Tepelný tok sdílený dýcháním

Tepelný tok sdílený dýcháním obsahuje citelnou i vázanou složku

$$\dot{q}_d = \frac{\dot{M}_{vyd}}{A_{Du}}(h_{vyd} - h_i) = \dot{q}_{d,cit} + \dot{q}_{d,váz} \quad [\text{W/m}^2] \quad (12)$$

Citelný tepelný tok sdílený dýcháním je

$$\dot{q}_{d,cit} = \frac{\dot{M}_{vyd}}{A_{Du}}c(t_{vyd} - t_a) \quad [\text{W/m}^2] \quad (13)$$

Hmotnostní tok vydechaného vzduchu \dot{M}_{vyd} je funkcí metabolismu [1]

$$\dot{M}_{vyd} = 1,43 \cdot 10^{-6} \dot{q}_m A_{Du} \quad [\text{kg/s}] \quad (14)$$

a teplota vydechaného vzduchu je podle [1]

$$t_{vyd} = 32,6 + 0,066t_a + 32x_a \quad [^\circ\text{C}] \quad (15)$$

Produkce vodní páry

Platí-li rovnice tepelné rovnováhy, lze měrný vázaný tepelný tok sdílený vypařováním dopočítat

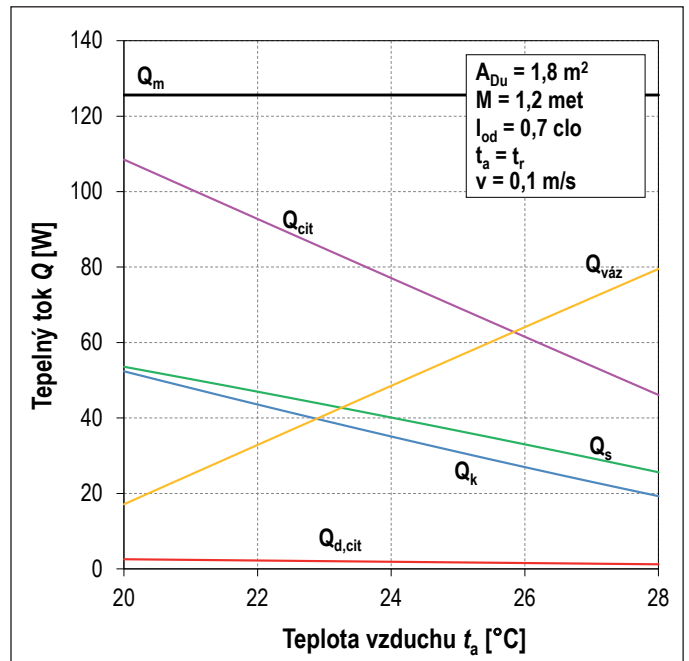
$$\dot{q}_{váz} = \dot{q}_m - \dot{q}_{cit} \quad [\text{W/m}^2] \quad (16)$$

Produkce vodní páry pak bude

$$\dot{M}_w = \frac{\dot{q}_{váz} A_{Du}}{h_{fg}} \quad [\text{kg/s}] \quad (17)$$

kde výparné teplo h_{fg} je funkcí teploty vzduchu a pro účely výpočtu byla navržena následující závislost

$$h_{fg} = 2501 - 2,45t_a \quad [\text{kJ/kg}] \quad (18)$$



Obr. 1 Výsledné hodnoty jednotlivých tepelných toků pro zadané okrajové podmínky
Fig. 1 Resulting values of individual heat flows for specified boundary conditions

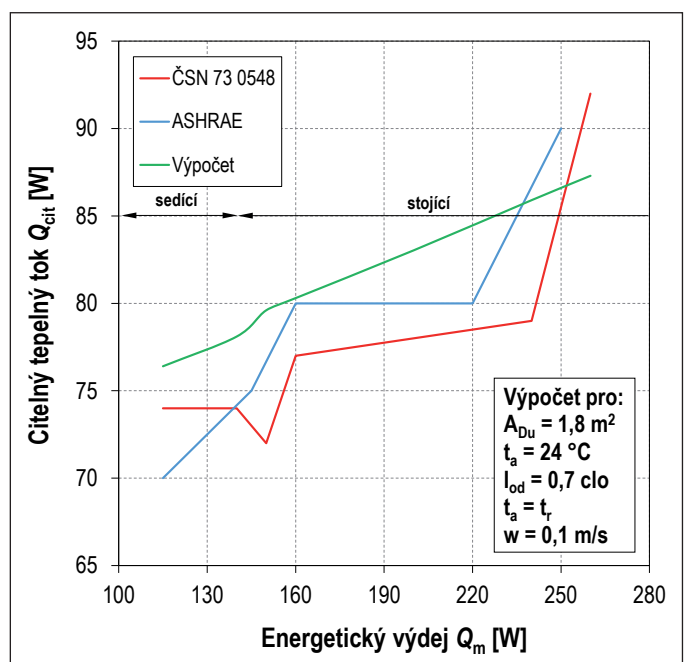
VÝSLEDKY

Na obr. 1 jsou znázorněny výsledky výpočtu jednotlivých tepelných toků v závislosti na teplotě vzduchu t_a pro zadané okrajové podmínky. Základní výpočty byly realizovány pro dospělou osobu pracující vsedě (kancelářská práce) s následujícími údaji: $A_{Du} = 1,8$ m^2 , $M = 1,2$ met, $I_{od} = 0,7$ clo, $v = 0,1$ m/s, $\eta_m = 0$.

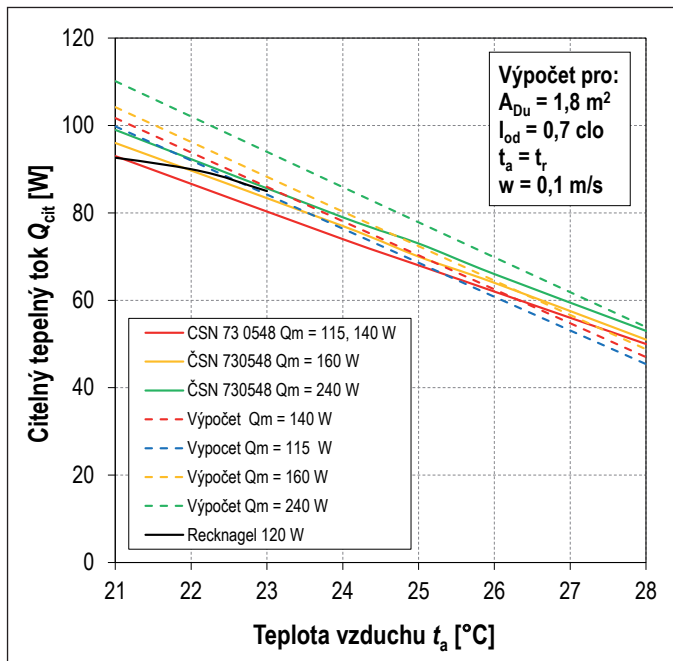
Poznámka: V analýzách jsou použity obě možnosti vyjádření energetického výdeje a tepelného odporu oděvu.

$M = 1$ [met] odpovídá $q_m = 58,15$ [W/m^2]

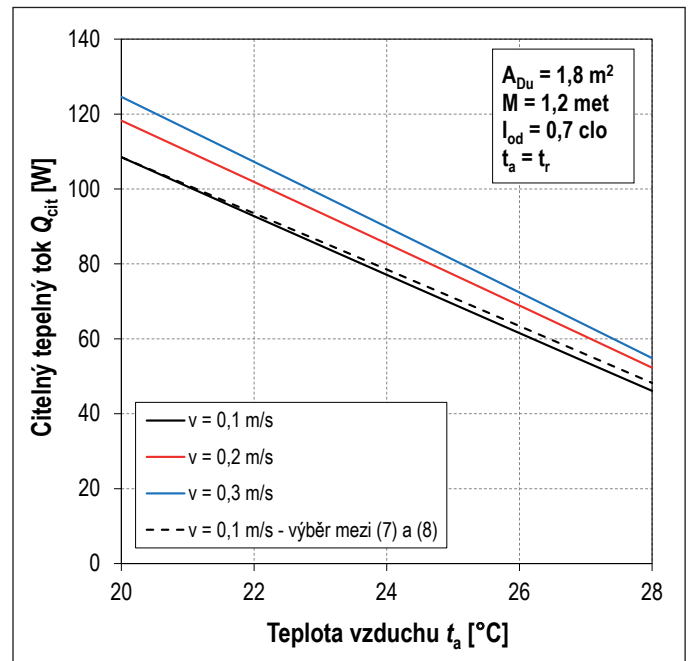
$I_{od} = 1$ [clo] odpovídá $R_{od} = 0,155$ [$\text{m}^2\text{K/W}$]



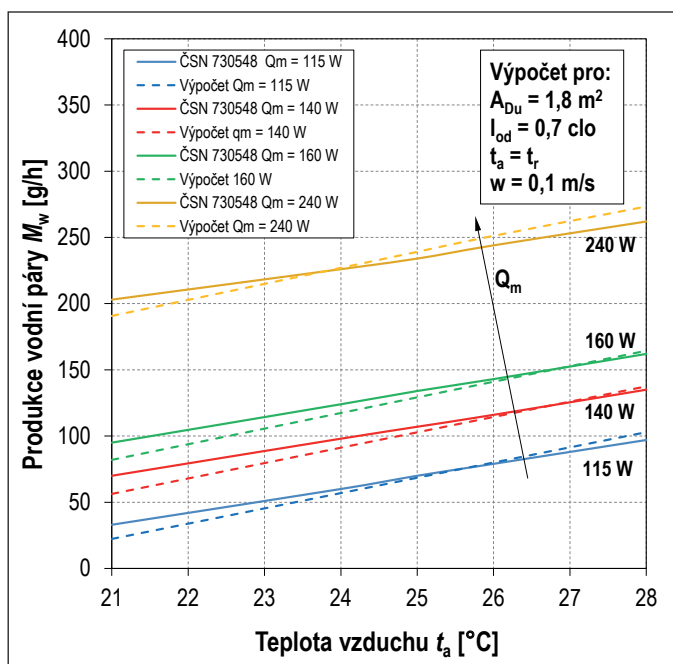
Obr. 2 Porovnání výpočtu citelného tepelného toku s publikovanými hodnotami
Fig. 2 Comparison of calculated sensible heat flow with published values



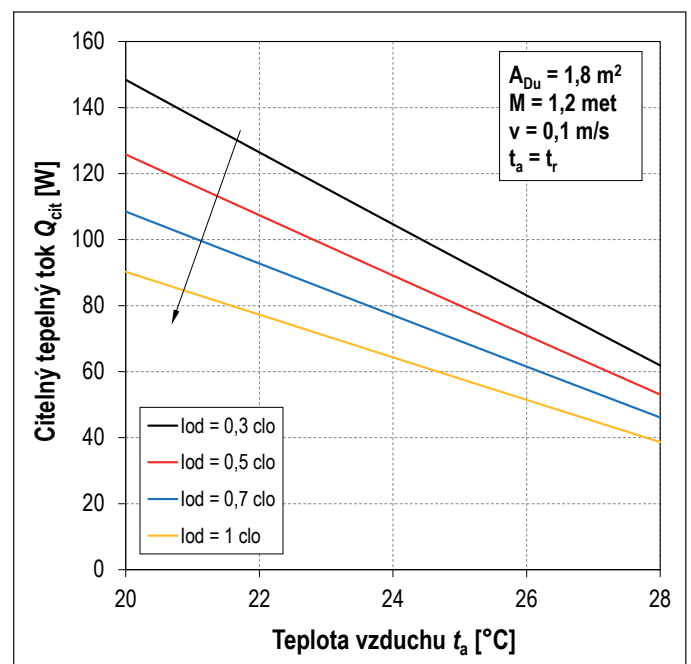
Obr. 3 Porovnání výpočtu citelného tepelného toku s údaji uvedenými v ČSN 730548
Fig. 3 Comparison of calculated sensible heat flow with the data given in ČSN 730548



Obr. 5 Vliv rychlosti proudění na citelný tepelný tok
Fig. 5 Influence of flow velocity on the sensible heat flux



Obr. 4 Porovnání výpočtu produkce vodní páry s údaji uvedenými v ČSN 730548
Fig. 4 Comparison of calculated water vapour production with the data given in ČSN 730548



Obr. 6 Vliv tepelného odporu oděvu na citelný tepelný tok
Fig. 6 Influence of clothing thermal resistance on the sensible heat flux

Pro většinu běžných činností realizovaných v budovách včetně běžné chůze je mechanická účinnost $\eta_m = 0$, pro sportovní činnosti (nikoliv vrcholové) bývá v rozmezí 0 až 0,1 [3]. Konkrétní údaje pro fyzicky náročnější činnosti uvádí literatura [4]. Např. pro fyzickou práci se zapojením paží (házení písku lopatou) se uvádí $\eta_m = 0,03$.

Porovnání s publikovanými hodnotami

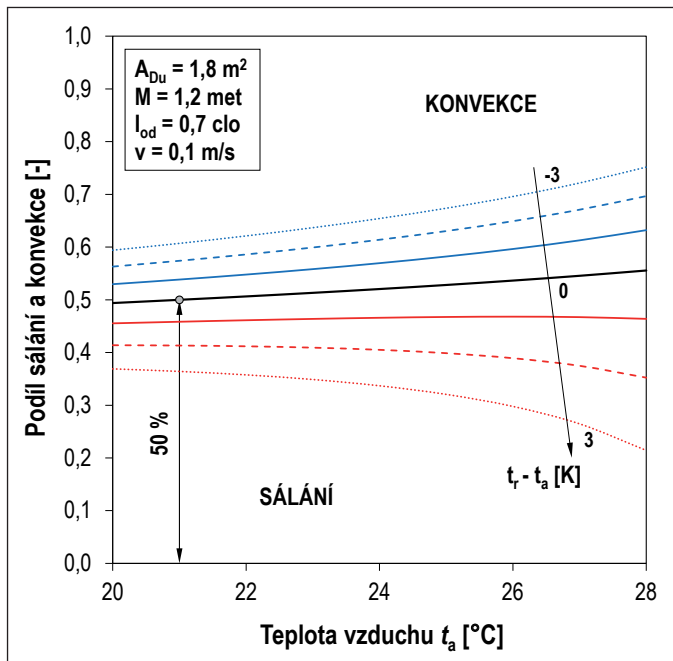
Jak již bylo uvedeno v úvodu článku, základní číselné hodnoty produkce tepla a vodní páry jsou dostupné v základních příručkách pro navrhování větrání a klimatizace [1], [5]. Porovnání dostupných údajů (ASHRAE a ČSN) s výpočtem je uvedeno na obr. 2. Odchyly mezi vypočítanými a

publikovanými údaji jsou od 0 do 8 %. Vzhledem k tomu, že pro publikované údaje nejsou známy okrajové podmínky, za kterých byly zjištěny, nelze z výsledku téměř nic usuzovat, vyjma obdobného trendu.

Na obr. 3 a 4 je pak podrobnější porovnání hodnot vypočítaných a podle ČSN 730548. Opět se jedná pouze o informativní porovnání.

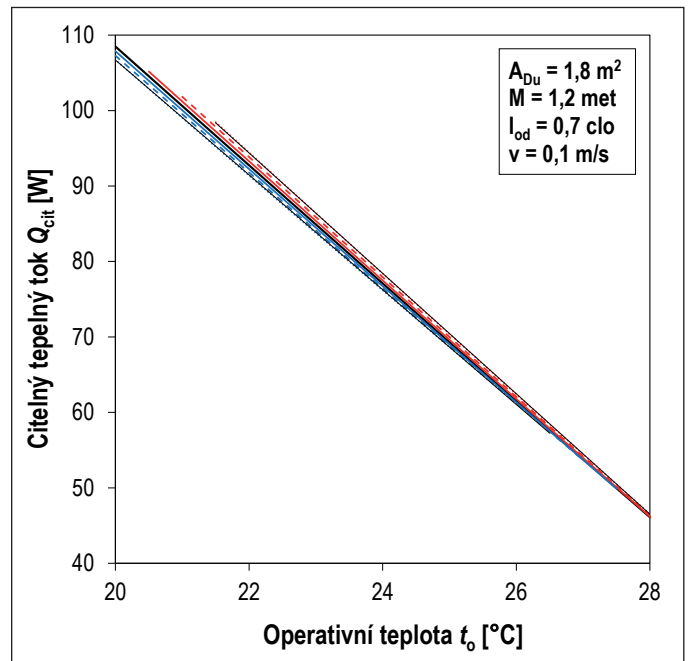
Vliv rychlosti proudění

Všechny základní analýzy byly realizovány pro rychlost proudění $v = 0,1$ m/s, kdy součinitel přestupu tepla konvekcí je stanoven podle rovnice (7). V případě vyšší rychlosti proudění je přestup tepla z povrchu těla intenzivnější a použije se rovnice (8). Vliv rychlosti proudě-



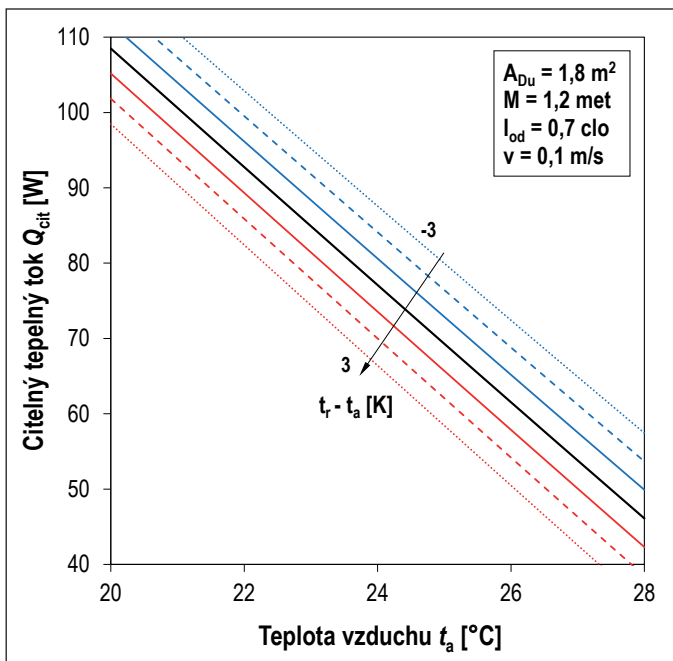
Obr. 7 Podíl konvekční a sálavé složky

Fig. 7 Proportion of convective and radiant components



Obr. 9 Citelný tepelný tok jako funkce operativní teploty

Fig. 9 Sensible heat flux as a function of the operative temperature



Obr. 8 Citelný tepelný tok a vliv střední radiační teploty

Fig. 8 Sensible heat flux and influence of the mean radiant temperature

ni na výsledný citelný tepelný tok je znázorněn na obr. 4. Čárkovaná přímka představuje přístup, kdy se volí vyšší z obou hodnot h_k dle rovnice (7) a (8).

Vliv tepelného odporu oděvu

Analýzy byly realizovány pro tepelný odpor oděvu 0,7 clo, jakožto nejběžnější oděv v obytných prostorách. Hodnota odporu oděvu má samozřejmě na citelný tepelný tok zásadní vliv (obr. 6).

Podíl sálavé a konvekční složky tepelného toku

Na obr. 7 jsou zobrazeny výsledky podílu sálavé a konvekční složky tepelného toku v závislosti na rozdílu mezi střední radiační teplotou

a teplotou vzduchu $t_r - t_a$. Červené křivky platí pro $t_r > t_a$, modré pro $t_r < t_a$ s krokem 1 až 3 K. Černá křivka je sestrojena pro $t_r = t_a$. Údaj pod křivkou odpovídá sálavé složce, údaj nad křivkou konvekční.

Např. pro teplotu vzduchu 21 °C a $t_r = t_a$ (černá křivka) je podíl sálavé a konvekční složky tepelného toku vyrovnaný 50/50 % (bod na křivce). S rostoucí střední radiační teplotou se podíl sálavé složky snižuje a naopak.

Vliv střední radiační teploty

Střední radiační teplota má vliv na tepelný tok sdílený sáláním, proto je jejímu vlivu nutno věnovat zvláštní pozornost. Na obr. 8 je znázorněna závislost citelného tepelného toku na teplotě vzduchu a střední radiační teplotě, resp. rozdílu mezi nimi. S rostoucí střední radiační teplotou se podíl sálavé složky výkonu snižuje, čímž se snižuje i citelný tepelný tok.

Na obr. 9 je obdobná závislost jako na obr. 8, ovšem jako funkční parametr je použita operativní teplota. Pro rychlost proudění $v < 0,2$ m/s ji lze vyjádřit jako

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (19)$$

Připustíme-li, že odchylky ve výsledcích při běžně se vyskytujících rozdílech mezi teplotou vzduchu a střední radiační teplotou [6] jsou zanedbatelné (viz obr. 8 – pro 20 °C činí rozdíl ve výsledku $\pm 1,6$ %), je možné sestavit závislost citelného tepelného toku na operativní teplotě t_o a energetickém výdeji M (obr. 9) pro zadané okrajové podmínky (pro: $M = 1$ až 1,9 met, $A_{Du} = 1,8$ m², $I_{od} = 0,7$ clo, $v = 0,1$ m/s a $\eta_m = 0$ %).

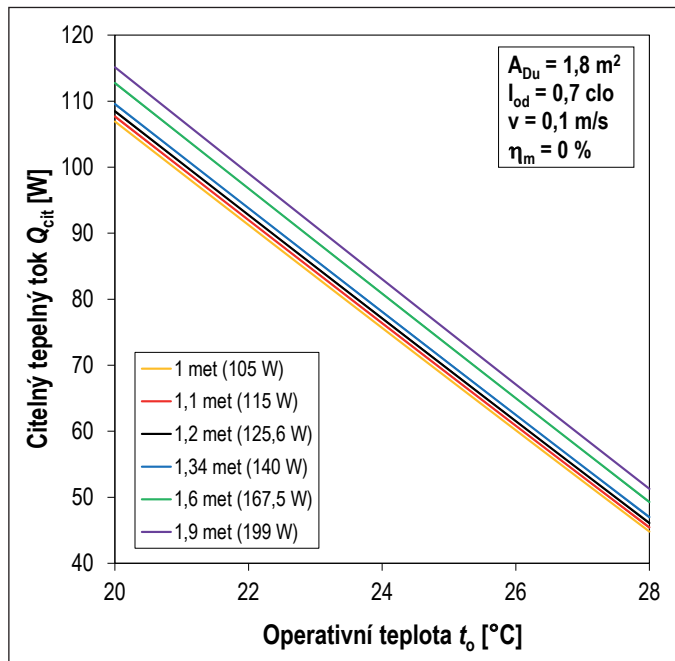
Pro rychlé výpočty lze uvedené závislosti (obr. 10) popsat vztahem

$$\dot{Q}_{cit} = X \cdot t_o + Y \quad [\text{W}] \quad (20)$$

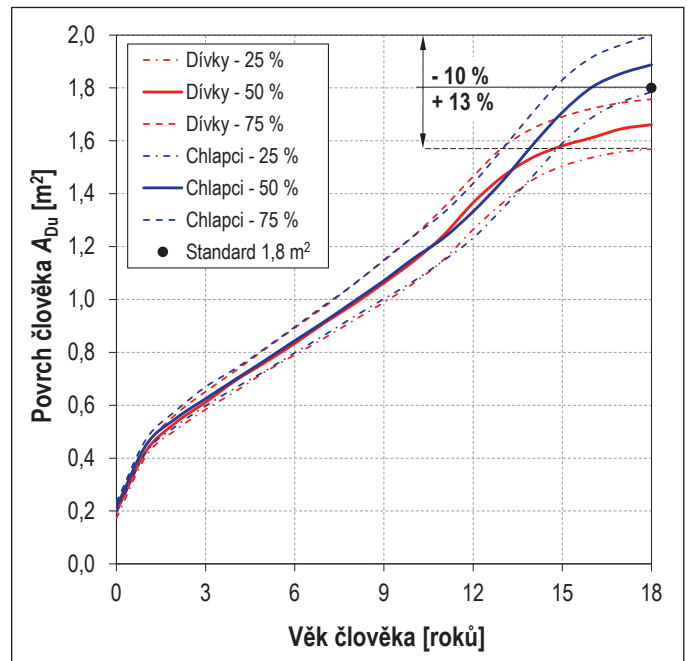
kde parametry X a Y závisí na energetickém výdeji M [met]

$$X = 0,039 \cdot M^2 - 0,39 \cdot M - 7,394$$

$$Y = 0,035 \cdot M^2 + 11,66 \cdot M + 249$$



Obr. 10 Citelný tepelný tok v závislosti na operativní teplotě a energetickém výdeji
 Fig. 10 Sensible heat flux in dependence on operative temperature and energy output



Obr. 11 Povrch člověka stanovený na základě růstových grafů
 Fig. 11 Human surface area determined on the basis of growth charts

TEPELNÉ ZISKY OD DĚTÍ A MLADISTVÝCH

Doposud byly veškeré výpočty realizovány pro dospělého člověka, jehož povrch činí 1,8 m². Hlavním cílem prováděných analýz bylo stanovit produkci tepla od dětí pobývajících ve školských budovách.

Tělesné parametry (výšku H a hmotnost m) dětí a mladistvých do věku 18 let je možné stanovit z růstových percentilových grafů [11], které používají pediatri pro kontrolu růstu dítěte. Standardní (z hlediska růstu správné) tělesné parametry se nacházejí mezi 25. a 75. percentilem. Pro výpočet povrchu těla se používá původní rovnice podle DuBoise

$$A_{Du} = 0,007184m^{0,425}H^{0,725} \quad [\text{m}^2] \quad (21)$$

kde H je výška člověka v [cm]. V odborné literatuře (např. [1]) je možné nalézt upravený vztah, kde H je v základních jednotkách [m].

$$A_{Du} = 0,202m^{0,425}H^{0,725} \quad [\text{m}^2] \quad (22)$$

Na obr. 10 je závislost povrchu člověka podle rovnice (21) na věku dítěte / mladistvého. Tělesné proporce děvčat a chlapců se příliš neliší do základní školy. Rozdíly lze spatřovat cca od 14 let věku. Pro informaci je v grafu zanesena hodnota 1,8 m² (černý bod), která se používá pro analýzy dospělých osob (viz výše). Pro další analýzy byl zvolen 50% percentil.

Na obr. 12 je znázorněn výsledek výpočtu produkce citelného tepla pro konkrétní činnost 1,2 met (učebny) a tepelný odpor oděvu 0,7 clo v závislosti na teplotě vzduchu t_a (předpoklad $t_i = t_a$). Rychlost proudění v pásmu pobytu osob je uvažována $v = 0,1$ m/s. Zobrazené hodnoty představují průměrnou hodnotu citelného tepelného zisku od chlapců a dívek. Na obr. 13 jsou pak závislosti produkce vodní páry.

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky produkce citelného tepla a vodní páry pro typické činnosti ve školách (tab. 1) při teplotě vnitřního vzduchu 22 °C (průměrná hodnota pro chlapce a dívky při uvažování 50% percentilu).

Tab. 1 Typické druhy činnosti ve školách a energetický výdej organismu

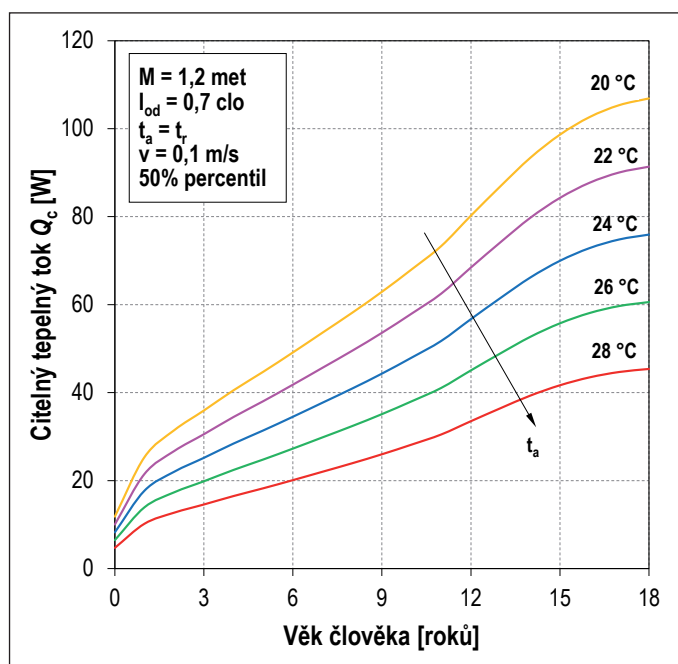
Tab. 1 Typical types of activity in schools and energy output of the organism

Lidská činnost	Prostory	M [met]	q_m [W/m ²]	η_m [-]
Sezení uvolněné	zasedací místnosti	1,0	58	0
Činnost vsedě	učebny, jídelny	1,2	70	0
Lehká činnost vstoje	laboratoře	1,6	93	0
Chůze bez zátěže	chodby	1,9	110	0
Tělocvik	tělocvičny	3,0	174	0,1

Tab. 2 Produkce citelného tepla a vodní páry od dětí pro typické druhy činnosti (pro $t_a = 22$ °C, $I_{od} = 0,7$ clo)

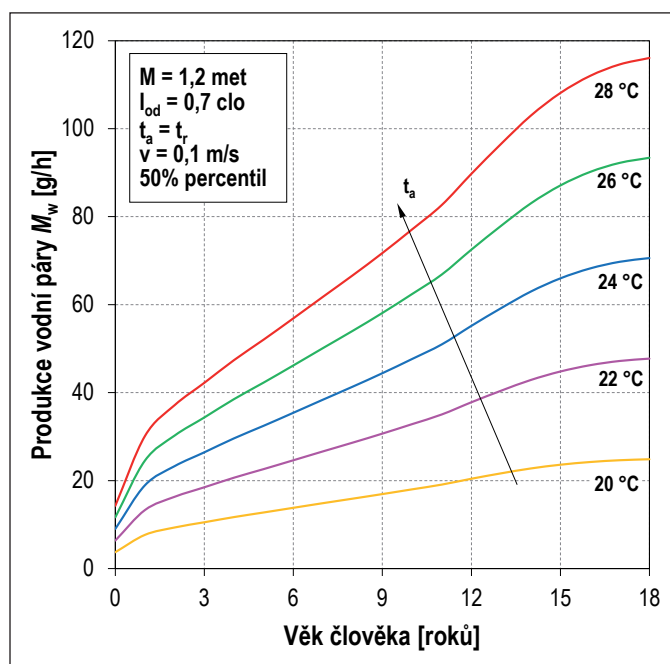
Tab. 2 Production of sensible heat and water vapor by children for typical types of activity (for $t_a = 22$ °C, $I_{od} = 0.7$ clo)

M [met]	Věk dítěte		
	6 let	10 let	15 let
	Citelné teplo Q_{cit} [W]		
1,0	41	57	83
1,2	42	58	84
1,6	43	59	87
1,9	44	61	89
	Produkce vodní páry M_w [g/h]		
1,0	11	14	19
1,2	25	33	45
1,6	52	70	97
1,9	73	98	136



Obr. 12 Cítilná tepelná zátěž od dětí a mladistvých v závislosti na věku a teplotě vzduchu (průměr chlapci a dívky)

Fig. 12 Sensible heat load from children and adolescents depending on age and air temperature (average of boys and girls)



Obr. 13 Produkce vodní páry od dětí a mladistvých v závislosti na věku a teplotě vzduchu (průměr chlapci a dívky)

Fig. 13 Production of water vapour by children and adolescents depending on age and air temperature (average of boys and girls)

ZÁVĚR

Prezentovaný model výpočtu produkce tepla od osob vychází z obecně známých principů. Model byl sestaven za účelem stanovení tepelné produkce od dětí a mladistvých a prezentuje údaje produkce cítilného tepla a vodní páry v závislosti na jejich věku. Výpočetní postup je aplikovatelný na všechny případy.

Tepelná produkce u dospělých osob vychází z hodnoty $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$. S rostoucím věkem (> 18 let) se mění fyzické parametry zejména u mužů, ovšem model s takovou změnou již neuvažuje (fyzické parametry nejsou k dispozici). Při výpočtech tepelné zátěže nemá smysl uvažovat se sníženou produkcí tepla u žen, jak udává ČSN 730548, neboť povrch člověka $1,8 \text{ m}^2$ představuje průměrnou hodnotu obou pohlaví.

Kontakt na autora: vladimir.zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] ASHRAE Handbook 2005 Fundamentals. 2005, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN 1-931862-71-04.
- [2] DRKAL, F., ZMRHAL, V. Větrání. Vysokoškolské skriptum. Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze. 2013. ISBN 978-80-01-05181-8.
- [3] FANGER, P.O. Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering. 1972, Kingsport Press, Inc. ISBN 07-019915-9.
- [4] HERMAN, I., P. Physics of the Human Body: 2nd Edition. Springer. 2016.
- [5] RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., SCHRAMEK, E. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 09/10, 2009. ISBN 978-3-8356-3134-2.
- [6] ZMRHAL, V., DRKAL, F. Operativní teplota v praxi. Směrnice STP-OS01/č.3/2010. Příloha časopisu VVI č. 5/2010.
- [7] ČSN EN ISO 7730: 2005. Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu. Český normalizační institut, Praha 2005.
- [8] ČSN EN ISO 7933: 2005. Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předpokládané tepelné zátěže. ÚNMZ 2005.
- [9] ČSN 73 0548: 1985. Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů. Úřad pro normalizaci a měření. Praha 1985.

[10] ČSN EN ISO 8996: 2005. Ergonomie tepelného prostředí – Určování metabolismu. ÚNMZ 2005.

[11] Růstové grafy [online]. Dostupné z: www.szu.cz

Seznam označení:

A	plocha/povrch [m^2]
c	měrná tepelná kapacita [$\text{J}/(\text{kgK})$]
α	součinitel přestupu tepla [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
H	výška člověka [m]
h	entalpie [kJ/kg]
l	tepelný odpor [clo]
m	hmotnost člověka [kg]
M	energetický výdej [met]
\dot{M}	hmotnostní průtok [kg/s]
\dot{V}	objemový průtok [m^3/h]
p	tlak [Pa]
\dot{q}	měrný tepelný tok [W/m^2]
Q	tepelný tok [W]
R	tepelný odpor [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
v	rychlost proudění [m/s]
w	mechanická práce [W/m^2]
x	měrná vlhkost [g/kg]
ρ	hustota [kg/m^3]

Indexy:

a	vzduchu	r	střední radiační
ci	cítilný	re	rektální
cr	nitrotělní	s	sálání
Du	dle DuBoise	v	par
d	dýchání	váz	vázaný
k	konvekce	vyd	vydechovaného
m	metabolický	w	vypařování
o	operativní		
od	oděvu		
p	pokožky		