

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**NÁSTROJ PRO POSUZOVÁNÍ PROJEKTŮ SÁLAVÉHO  
VYTÁPĚNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Ondřeji Hojerovi Ph.D. za vedení práce, podporu a pomoc. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu a trpělivost, obzvláště pak svojí sestře Ivaně za cenné poznámky, připomínky a pomoc při kontrole formální stránky práce.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Nástroj pro posuzování projektů sálavého vytápění“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Hojera, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 12. 1. 2016

Jan Víša

## SOUHRN

Cílem této práce je vytvořit uživatelsky přívětivou výpočetní pomůcku pro kontrolu či návrh vytápění sálavými panely bilanční metodou. Výpočetní pomůcka je koncipována jako dokument programu MS Excel s podporou maker programovacího jazyku Visual Basic. K bilancování prostoru je užitá upravená metodika od Dr. Cihelky. Podstata upravené metodiky je následující: sestaví se rovnice pro tepelnou rovnováhu jednotlivých stěn ohraničujících prostor a tepelnou rovnováhu vzduchu, vypočítají se povrchové teploty těchto ploch a teplota vzduchu, poté se pro jednotlivé body ve zvolených rovinách vypočtou poměry osálení a určí se střední radiační teplota. Ze střední radiační teploty a teploty vzduchu se následně určí operativní teplota, podle níž se porovnáním s požadovanou hodnotou danou požadavky investora nebo danou legislativou určí, zdali bylo dosaženo tepelné pohody prostředí. Vstupem pro výpočet jsou materiálové a geometrické charakteristiky konstrukcí ohraničujících prostor, charakteristiky sálavých otopných panelů, vlastnosti otopné vody a poměry osálení mezi jednotlivými plochami. Výstupem výpočtu pak jsou povrchové teploty jednotlivých konstrukcí a tepelná mapa prostoru zobrazující rozdíl vypočtené operativní teploty a zvolené tabulkové hodnoty operativní teploty.

Klíčová slova: sálavé vytápění, střední radiační teplota, operativní teplota, tepelná pohoda prostředí

## SUMMARY

The aim of this work is to create user-friendly computing tool to verify or calculate radiant heating using balance sheet method. The computing tool is designed as MS Excel document with support of macros written in programming language Visual Basic. To balance the space modified Dr. Cihelka's method is used. Computing tool balances the space following these principles: to compile the equations of thermal balance of each area surrounding space and the equation of thermal balance of inner air, to calculate surface temperature and inner air temperature then to calculate configuration factors in certain points of space and then to rate mean radiant temperature. At last the operative temperature is calculated. The value of calculated operative temperature is collated with the value of operative temperature given by investor or legislation at which thermal comfort is achieved. The inputs for the calculation are geometrical characteristics of the space, material properties of the areas surrounding space, geometrical characteristics of the radiant heating panels, properties of heating water and configuration factors. The outputs of the computing tool are surface temperatures of areas surrounding space, the inner air temperature and the thermal map which shows where in the selected area thermal comfort is achieved.

Keywords: radiant heating, mean radiant temperature, operative temperature, thermal comfort

**Obsah:**

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ .....	3
1. ÚVOD .....	6
2. SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM.....	6
2.1. Fyzikální zákony popisující sálání .....	6
2.2. Sdílení tepla sáláním mezi dvěma plochami .....	11
3. GEOMETRIE SÁLÁNÍ A POMĚR OSÁLÁNÍ .....	13
3.1. Poměr osálání dvou obecných ploch .....	14
3.2. Sálající bod .....	15
3.3. Osálání obdélníku sálajícím bodem .....	16
3.4. Vzájemné sálání dvou rovnoběžných pravoúhlých ploch .....	18
3.5. Vzájemné sálání dvou kolmých pravoúhlých ploch .....	20
4. STŘEDNÍ RADIAČNÍ TEPLOTA SÁLAJÍCÍCH PLOCH .....	23
4.1. Obecná rovnice střední radiační teploty sálajících ploch .....	24
5. TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA.....	25
5.1. Tepelná rovnováha lidského těla.....	25
5.2. Rovnice tepelné pohody při sálavém vytápění .....	28
5.3. Metody kontrolování a posuzování tepelné pohody při sálavém vytápění .....	30
6. TEPELNÁ ROVNOVÁHA PROSTORU VYTÁPĚNÉHO SÁLAVÝM ZPŮSOBEM .....	32
6.1. Tepelná rovnováha ochlazovaných stěn.....	33
6.2. Rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu .....	34
6.3. Rovnice tepelné pohody .....	36
6.4. Určení součinitelů přestupu tepla konvekcí.....	37
7. ZÁVĚSNÉ SÁLAVÉ PANELY .....	41
8. VYTÁPĚNÍ ZÁVĚSNÝMI SÁLAVÝMI PANELY - METODIKA .....	43
8.1. Počáteční podmínky výpočtu.....	45

8.2.	Určení povrchových teplot ochlazovaných obvodových konstrukcí .....	45
8.3.	Výpočet teploty vnitřního vzduchu .....	46
8.4.	Výpočet povrchové teploty panelů.....	47
8.5.	Kontrola tepelné pohody prostředí.....	48
9.	VÝPOČETNÍ POMŮCKA – PŘEDSTAVENÍ A POPIS FUNKCÍ .....	49
9.1.	Obecně o výpočetní pomůcce .....	50
9.2.	Zadávání vstupů a výpočet .....	50
9.2.1.	Popis jednotlivých listů .....	50
9.2.2.	Zadávání vstupních údajů .....	53
9.2.3.	Výpočet povrchových teplot a operativní teploty.....	57
9.2.4.	Vykreslování výsledků .....	58
9.3.	Možné úpravy a rozšíření výpočetní pomůcky .....	59
9.4.	Případová studie – vzorový výpočet .....	60
9.4.1.	Popis objektu .....	60
9.4.2.	Vstupní hodnoty pro výpočet .....	63
9.4.3.	Výsledky .....	67
10.	DISKUZE.....	70
11.	ZÁVĚR .....	74
	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PRAMENŮ.....	76
	SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH.....	78
	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH .....	78

**SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ**

Označení	Název	Jednotka
a	rozměr obdélníku	[m]
	tloušťka lamely	[m]
b	Wienova konstanta	[m.K]
	rozměr obdélníku	[m]
	poměr součinitele přestupu tepla sáláním k součiniteli přestupu tepla konvekcí	[-]
c	rychlost šíření elektromagnetického vlnění vakuem	[m/s]
	měrná tepelná kapacita	[J/kg.K]
e	emisní schopnost, též emisivita	[-]
g	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Planckova konstanta	[J.s]
	vzdálenost bodu od vrcholu obdélníku	[m]
k	Boltzmannova konstanta	[J/K]
l	rozteč mezi trubkami	[m]
m	součinitel	[-]
n	počet	[-]
	exponent	[-]
q	měrná tepelná ztráta	[W/m <sup>2</sup> ]
r	vzdálenost	[m]
s	tloušťka vrstvy	[m]
t	teplota	[°C]
w	rychlost proudění	[m/s]
x	souřadnice	[m]
y	souřadnice	[m]
A	plocha	[m <sup>2</sup> ]
	součinitel	[-]
C	součinitel sálání	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
G	funkce	[m <sup>2</sup> ]
I	intenzita sálání	[W/m <sup>2</sup> ]
L	rozměr	[m]
	charakteristický rozměr	[m]
K	poměr rozměrů obdélníku	[-]
	součinitel	[-]

Označení	Název	Jednotka
M	intenzita vysálané energie	[W/m <sup>2</sup> ]
	intenzita vysálané energie při vlnové délce $\lambda$	[W/m <sup>3</sup> ]
Q	teplo, tepelný výkon	[W]
R	tepelný odpor	[m <sup>2</sup> .K/W]
T	absolutní teplota	[K]
U	součinitel prostupu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]
V	objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
$\alpha$	pohltivost zářiče	[-]
	součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\beta$	izobarický součinitel objemové roztažnosti tekutiny	[K <sup>-1</sup> ]
$\epsilon$	emisivita, nové značení	[-]
$\eta$	souřadnice	[m]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
	tepelná vodivost vrstvy	[W/m.K]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
$\xi$	teplotní součinitel	[K <sup>3</sup> ]
	souřadnice	[m]
$\rho$	odrazivost zářiče	[-]
	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$\tau$	propustnost zářiče	[-]
$\varphi$	poměr osálení	[-]
$\omega$	úhel	[rad]
	úhel	[°]
$\Delta$	rozdíl operativních teplot	[K]
$\Lambda$	součinitel tepelné propustnosti	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\Phi$	energie	[J]
$\Omega$	prostorový úhel	[sr]
	úhel	[°]



Index	Značí	Index	Značí
0	černé těleso	p	panel
c	značí celek		povrchová teplota
d	vedení	r	střední radiační teplota
e	šedé těleso	s	sálání
	venkovní teplota		spodní část stěny
	vnější strana		teplota stěny
g	výsledná teplota	teor	teoretická hodnota
h	horní část stěny	v	vypařování
i	vnitřní strana	vyp	vypočítaný
	teplota vnitřního vzduchu	vz	dýchání
k	konvekce	z	teplota zeminy
m	metabolické teplo	K	teplota kůže
	střední teplota	L	lamela
n	normála	$\alpha$	pohltivost
	poslední v pořadí	$\lambda$	závislost na vlnové délce
	teplota n-té stěny	$\rho$	odrazivost
o	operativní teplota	$\tau$	propustnost
od	vztaženo k oděvu	$\omega$	závislost na úhlu $\omega$

## 1. ÚVOD

Tato práce vznikla jako volné pokračování k mé bakalářské práci. V bakalářské práci jsem vytvářel výpočetní pomůcku pro návrh vytápění sálavými panely podle metodiky od Dr. Cihelky [1]. Na konci práce jsem uvedl možná vylepšení a rozšíření výpočetního modelu a tím zlepšení použitelnosti v běžné praxi. Cílem této práce je vytvořit výpočetní pomůcku pro kontrolu tepelné pohody v halách již stojících, ať už kvůli kontrole správnosti návrhu, nebo při změně parametrů otopné soustavy či při změně užívání haly a podobně. Celá výpočetní pomůcka je současně koncipována tak, abych v maximální možné míře vyhověl závěrům z mé bakalářské práce.

Výpočetní pomůcka by nyní měla určit tepelnou pohodu v libovolném řezu halou na základě operativní teploty, která je podle nařízení vlády č. 361/2007 Sb. ve znění pozdějších předpisů platným kritériem pro hodnocení tepelné pohody prostředí na pracovišti. Vstupem pro výpočet bude geometrie haly (velikost a prostorové umístění obvodových ploch a otvorů v nich umístěných), umístění a velikost otopných panelů, parametry otopné vody a poměry osálení mezi jednotlivými konstrukcemi. Výsledkem pak budou povrchové teploty jednotlivých konstrukcí a následně rozdíl vypočítané operativní teploty a tabulkové hodnoty operativní teploty. Tento rozdíl bude převeden opět na barevnou teplotní mapu, která bude ukazovat, ve kterých částech haly bylo dosaženo tepelné pohody. Výpočty budou provedeny bilanční metodou uvedenou v [1] a [2].

Na začátek v jednotlivých kapitolách této práce popíši teorii nutnou k pochopení dané problematiky, poté stručně představím výpočetní pomůcku a úskalí, která mohou čekat na uživatele při jejím používání, a nakonec ukáži vzorový výpočet haly včetně grafických výstupů. Závěrem pak shrnu výsledek své práce.

## 2. SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM

### 2.1. Fyzikální zákony popisující sálání

Fyzikální proces, při kterém se do prostoru emituje energie ve formě elektromagnetického vlnění se nazývá záření a dochází k němu u všech těles s termodynamickou teplotou různou od nuly. Vyzařování tepelné energie se nazývá

sálání a probíhá hlavně u tuhých těles, ale také u některých plynů a par. Sálání si je podobné s viditelným zářením, liší se od sebe pouze vlnovou délkou vyzařované elektromagnetické energie. Vlnová délka vyzařované energie viditelného světla se pohybuje od 0,365  $\mu\text{m}$  do 0,750  $\mu\text{m}$ , zatímco vlnová délka tepelného záření je delší a pohybuje se od 0,750  $\mu\text{m}$  až do 1 mm. Pro vyzářenou energii viditelného záření platí tudíž stejné fyzikální zákony, jako pro vysálanou energii tepelnou. Tyto zákony popsali a shrnuli ve svých pracích pánové Stefan, Boltzmann, Planck, Lambert a Wien, a v následujících odstavcích tyto poznatky uvedu.

Prvním důležitým pojmem, se kterým se musíme seznámit, je černé těleso. Pod pojmem černé těleso si podle [3] můžeme představit dokonale černé těleso, které při libovolné teplotě pohltí všechnu energii, která dopadne na jeho povrch. Takovéto těleso ve skutečnosti neexistuje, ale je to pouze teoretický pojem. Většina těles okolo nás se nechová jako černé těleso, ani jako jeho opak, bílé těleso, nýbrž jako šedé těleso, které pohltí pouze část elektromagnetické energie dopadající na jeho povrch.

Vztah (2.1) se nazývá Stefan-Boltzmannův zákon a určuje intenzitu vysálané energie černým tělesem. Jak je ze vztahu (2.1) patrné, je intenzita vyzařované energie černým tělesem závislá pouze na čtvrté mocnině termodynamické teploty.

$$M_0 = \sigma \cdot T^4 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (2.1)$$

kde:

$M_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] – intenzita energie vysálané černým tělesem

$T$  [K] – absolutní teplota

$C_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ] – součinitel sálání absolutně černého tělesa

$\sigma$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ] – Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ .

Úpravou vztahu (2.1) dostaneme hodnotu součinitele sálání černého tělesa  $C_0$ . Po úpravě má součinitel sálání černého tělesa hodnotu  $C_0 = 5,67 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Pro šedá tělesa pak hodnotu součinitele sálání získáme ze vztahu (2.2).

$$C = \alpha \cdot C_0, \quad (2.2)$$

kde:

$\alpha$  [-] – pohltivost zářiče

$C$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ] – součinitel sálání šedého tělesa.

Dosazením vztahu (2.2) do vztahu (2.1) dostaneme vztah (2.3), což je vztah pro výpočet intenzity vysálané energie šedého tělesa.

$$M_e = \alpha \cdot M_0 = C_0 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (2.3)$$

kde:

$M_e$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] – intenzita vysálané energie.

Pro tělesa nepropouštějící tepelné záření, ale pouze pohlcující nebo odrážející tepelné záření, a při platnosti Kirchhoffova zákona lze zaměnit pohltivost zářiče  $\alpha$  za emisivitu  $\varepsilon$ . Obě tyto veličiny pak budou mít stejnou hodnotu.

Jak bylo uvedeno v předchozích odstavcích, šedá tělesa vyzařují a pohlcují jen poměrnou část energie oproti černému tělesu. Z výše zmíněných fyzikálních zákonů vyplývá závislost intenzity vyzařování na teplotě tělesa, ale neříká nic o tom, při jakých vlnových délkách bude docházet k maximálnímu vyzařování energie. K určení intenzity vysálané energie při dané vlnové délce slouží Planckův zákon záření černého tělesa. Planckův zákon záření černého tělesa je vyjádřen vztahem (2.4).

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (2.4)$$

kde:

$M_{0\lambda}$  [ $\text{W}/\text{m}^3$ ] – intenzita vysálané energie při vlnové délce  $\lambda$

$h$  [ $\text{J} \cdot \text{s}$ ] – Planckova konstanta,  $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$  J.s

$c$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] – rychlost šíření elektromagnetického vlnění vakuem,  
 $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  m/s

$k$  [ $\text{J}/\text{K}$ ] – Boltzmannova konstanta,  $k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$  J/K

$\lambda$  [ $\text{m}$ ] – vlnová délka.

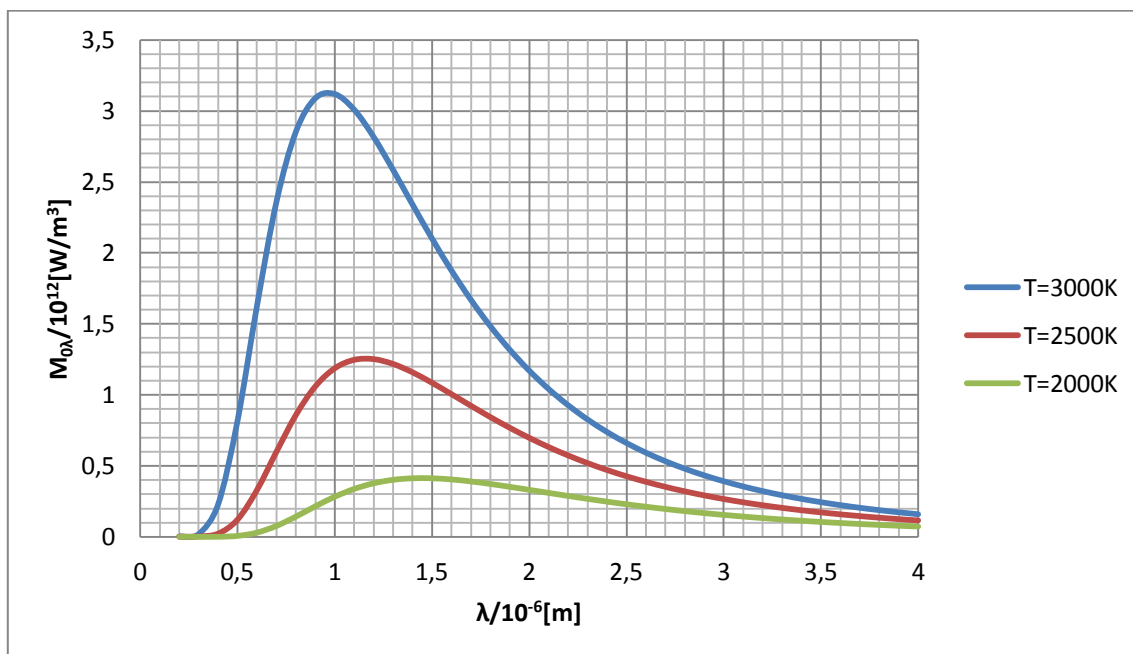
Z obr. 2.1 je zřejmá závislost intenzity vyzařování na teplotě a vlnové délce. Průběh křivek dokazuje platnost Stefan-Boltzmannova zákona, který říká, že s rostoucí teplotou roste intenzita vyzařování se čtvrtou mocninou termodynamické teploty. Dále ukazuje další fyzikální zákon platný pro elektromagnetické záření, a tím je Wienův posunovací zákon, který říká, že každé těleso při určité teplotě má maximální intenzitu vyzařování při jiné teplotě. Z obr. 2.1 patrné, že s rostoucí teplotou se maximální hodnoty intenzity vyzařování posouvají ke kratším vlnovým délkám. Obr. 2.1 byl převzat z [4]. Ze vztahu (2.5) lze vypočítat vlnovou délku, na které při dané teplotě bude docházet k maximální intenzitě vyzařování.

$$\lambda^* \cdot T = b, \quad (2.5)$$

kde:

$\lambda^*$  [m] – vlnová délka, na které dochází k maximálnímu vyzařování

$b$  [m.K] – Wienova konstanta,  $b = 2,8978 \cdot 10^{-3}$  m.K.



Obr. 2.1 Závislost intenzity záření na vlnové délce

V praxi se běžně setkáváme se situací, kdy těleso energii nejen vyzařuje, ale také přijímá. Energie dopadající na zářící těleso se částečně odrazí, částečně pohltí a částečně tělesem prostoupí, je-li těleso propustné. Vztah (2.6) vyjadřuje celkovou energii dopadající na těleso, jak bylo popsáno výše.

$$\Phi_e = \Phi_{e\rho} + \Phi_{e\alpha} + \Phi_{e\tau}, \quad (2.6)$$

kde:

$\Phi_e$  – celková energie dopadající na těleso

$\Phi_{e\rho}$  – odražená energie

$\Phi_{e\alpha}$  – pohlcená energie

$\Phi_{e\tau}$  – propuštěná energie.

Podělíme-li rovnici (2.6) celkovou energií dopadající na těleso, dostaneme rovnici (2.8).

Vztah (2.7) popisuje členy rovnice (2.8) vzniklé úpravou rovnice (2.6).

$$\rho = \frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e}, \alpha = \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e}, \tau = \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e} \quad (2.7)$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (2.8)$$

kde:

$\rho$  [-] – odrazivost

$\alpha$  [-] – pohltivost

$\tau$  [-] - propustnost

Z rovnice (2.8) pro černé těleso z jeho definice plyne, že  $\alpha = 1$  a  $\rho = 0$ ,  $\tau = 0$ , zatímco pro bílé těleso  $\rho = 1$  a  $\alpha = 0$ ,  $\tau = 0$ . Pro šedé těleso platí, že  $0 < \alpha < 1$  a za předpokladu, že šedé těleso není ani částečně propustné ( $\tau = 0$ ) bude  $\rho = 1 - \alpha$ .

Všechny výše zmíněné poznatky ohledně sálání byly převzaty z [3].

Další fyzikální zákony týkající se vyzařování elektromagnetické energie tělesy, které je potřeba zmínit, jsou Lambertův kosinový zákon a zákon ubývání intenzity osálení s druhou mocninou vzdálenosti. Teorie týkající se Lambertova kosinového zákona a zákona ubývání intenzity osálení s druhou mocninou vzdálenosti byla převzata z [1].

Lambertův kosinový zákon říká, že všesměrové vyzařování elementární plošky do okolí má nejvyšší intenzitu ve směru normály plošky. S odklonem od normály

plošky intenzita vyzařování klesá, a to v závislosti na kosinu úhlu odklonu od normály plošky. Lambertův zákon je vyjádřen vztahem (2.9).

$$I_{\omega} = I_n \cdot \cos\omega, \quad (2.9)$$

kde:

$I_n$  [W/m<sup>2</sup>] – intenzita záření ve směru normály

$I_{\omega}$  [W/m<sup>2</sup>] – intenzita záření ve směru odkloněném od normály o úhel  $\omega$ .

Celková energie vyzařená elementární ploškou do prostoru je dána vztahem (2.10).

$$I_c = \pi \cdot I_n. \quad (2.10)$$

Sálá-li plocha  $dA_1$  intenzitou sálání  $I$  na plochu  $dA_2$  ve vzdálenosti  $r$  od plochy  $dA_1$ , bude plocha  $dA_2$  osálána intenzitou sálání vyjádřenou vztahem (2.11). Ze vztahu je patrné, že intenzita sálání ubývá s druhou mocninou vzdálenosti mezi plochami.

$$I' = \frac{I}{r^2}. \quad (2.11)$$

Výše uvedené zákony platí podle [1] pro černé těleso ale lze je s přijatelnou chybou použít i pro šedá tělesa. Zákony v této podobě ovšem neplatí pro lesklé kovy a plyny.

## 2.2. Sdílení tepla sáláním mezi dvěma plochami

Ze zákonů uvedených v kapitole 2.1 lze podle [1] odvodit vztah pro výpočet množství tepla sdíleného mezi dvěma plochami. Výsledkem je vztah (2.12).

$$Q = e \cdot C_0 \cdot A_1 \cdot \varphi_{21} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W}]. \quad (2.12)$$

$$\varphi_{21} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \omega_1 \cdot \cos \omega_2}{r^2} dA_1 \cdot dA_2$$

V rovnici (2.12) je  $\varphi_{21}$  tzv. poměr osálání. Poměr osálání udává, jaká část z vysálaného tepla plochou  $A_1$  dopadne na plochu  $A_2$  (viz [1]). Teorii k poměru osálání a určování poměrů osálání je věnovaná samostatná kapitola. V rovnici (2.12) označuje  $e$  tzv.

vzájemnou emisní schopnost. Podle Nusselta se pro libovolně ležící plochy dá vzájemná emisní schopnost vypočítat podle vztahu (2.13) (viz [1]).

$$e = e_1 \cdot e_2 \quad [-] \quad (2.13)$$

a pro součinitele vzájemného sálání pak platí:

$$C = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_0} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4]. \quad (2.13a)$$

Rovnice (2.13) a (2.13a) se mohou za určitých podmínek zjednodušit. Zdali se rovnice zjednoduší, závisí na poloze či poměru velikostí sálajících ploch. Například je-li poměr ploch  $A_1/A_2$  velmi malý bude  $e \approx e_1$  a  $C \approx C_1$ . Více lze nalézt v [1]. V praxi se kvůli zjednodušení při výpočtech množství tepla sdíleného sáláním mezi stěnami užije vztah (2.14). Ve vztahu vystupuje proměnná  $\xi$ , která se nazývá teplotní součinitel. Vztah (2.15) popisuje závislost teplotního činitele na teplotách. Hodnoty teplotního činitele pro teploty  $t_1$  a  $t_2$  běžně se vyskytující při sálavém vytápění lze odečítat z grafu, který je na obr. 2.2. Obr. 2.2 byl převzat z [4].

$$Q = C \cdot \xi \cdot \varphi_{21} \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W}], \quad (2.14)$$

kde

$$\xi = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{t_1 - t_2} \quad [\text{K}^3] \quad (2.15)$$

Zavedeme-li si součinitel přestupu tepla sáláním jako

$$\alpha_s = C \cdot \xi \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}], \quad (2.16)$$

změní se nám rovnice (2.14) na tvar:

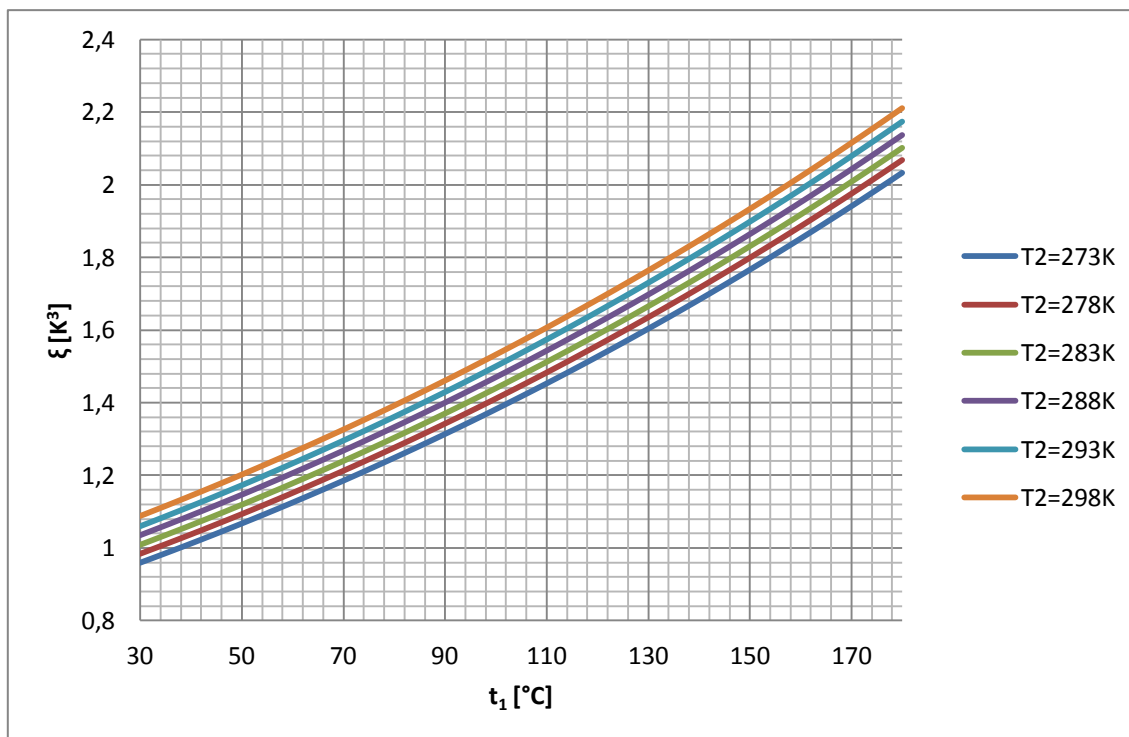
$$Q = \alpha_s \cdot \varphi_{21} \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W}]. \quad (2.17)$$

Jelikož v praxi se často s tepelnými toky sáláním počítají i tepelné toky konvekcí, je výhodné definovat součinitel přestupu tepla sáláním podle vztahu (2.18), čímž dostaneme zjednodušený a dobře známý zápis (2.19):

$$\alpha_s = C \cdot \xi \cdot \varphi_{21} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}], \quad (2.18)$$

$$Q = \alpha_s \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{W}]. \quad (2.19)$$





Obr 2.2 Závislost teplotního součinitele na teplotách povrchů sálajících ploch

„Rovnice uvedené v tomto oddíle platí přesně jen pro první absorpci, tj. nepočítá se již dále s teplem odraženým od sálavé plochy  $A_2$  zpět do prostoru. Výpočet množství tepla sdíleného sáláním mezi dvěma plochami by byl při přihlédnutí k vlivu odraženého tepla značně složitější. Nedbáním vlivu reflexe u těles a ploch, jejichž emisní schopnost  $e \geq 0,9$  (této podmínce vyhovuje převážná většina technických hmot) se dopouštíme však jen nepatrné chyby“, převzato z [1].

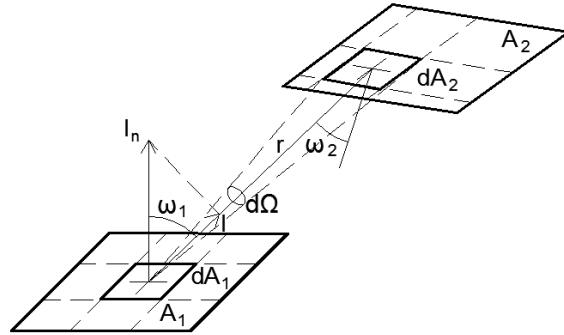
### 3. GEOMETRIE SÁLÁNÍ A POMĚR OSÁLÁNÍ

Jak bylo již zmíněno v předchozí stati, je nutné znát poměr osálení pro výpočet sdíleného tepla mezi dvěma plochami. Poměr osálení udává, jaká část z celkového množství vysávané energie plochou  $A_1$  dopadne na plochu  $A_2$  a je závislý především na geometrických poměrech mezi jednotlivými plochami – na tvaru, vzdálenosti a velikosti sálajících ploch. V následujících kapitolách bude odvozen poměr osálení pro dvě obecné plochy a dále pak ukázán výpočet poměru osálení pro některé základní případy umístění sálajících ploch vůči sobě.

### 3.1. Poměr osálení dvou obecných ploch

Následující podkapitola byla zpracována podle [5]. Grafické zpracování převzato z [4]. Obecný vztah pro poměr osálení mezi dvěma obecnými plochami odvodíme z Lambertova kosinového zákona a zákona ubývání intenzity sálání s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. Na obr. 3.1 je znázorněno schéma pro odvození poměru osálení. Předpokládejme, že

element plochy  $dA_1$  má vyšší povrchovou teplotu než element plochy  $dA_2$  a vyzařuje tepelnou energii všemi směry do poloprostoru. Pro intenzitu záření elementu plochy  $dA_1$  odchýlenou o  $\omega_1$  od normály plochy  $dA_1$  platí



Obr. 3.1 Schéma pro odvození poměru osálení Lambertův kosinový zákon, jenž je dán vztahem (2.9).

$$I = I_n \cdot \cos \omega_1,$$

kde  $I_n$  je intenzita ve směru normály. Celkový zářivý výkon elementu  $dA_1$  do poloprostoru určíme podle vztahu:

$$dE = \pi \cdot I_n \cdot dA_1 \quad [\text{W}]. \quad (3.1)$$

Na chladnější element  $dA_2$  dopadá část zářivého výkonu elementu  $dA_1$  pod prostorovým úhlem  $d\Omega$ , pod kterým se promítá ploška  $dA_2$  do středu elementu  $dA_1$ . Při uplatnění zákona o ubývání intenzity sálání s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje, jež vyjadřuje výraz (3.2), dostaneme vztah (3.3) pro určení poměru osálení  $\varphi_{12}$ , vyjádřený jako poměr zářivého výkonu dopadajícího na element plošky  $dA_2$  k celkovému zářivému výkonu vysálanému elementem plošky  $dA_1$ .

$$d\Omega = \frac{dA_2 \cdot \cos \omega_2}{r^2} \quad [\text{W}]. \quad (3.2)$$

$$\varphi_{12} = \frac{I \cdot d\Omega}{\pi \cdot I_n} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\cos \omega_1 \cdot \cos \omega_2}{r^2} \cdot dA_2 \quad [-]. \quad (3.3)$$

Vztah (3.3) se změní na vztah (3.4), pokud uvažujeme, že na sebe sálají dvě plochy konečných rozměrů.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \omega_1 \cdot \cos \omega_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad [-]. \quad (3.4)$$

Zaměníme-li teploty  $T_1$  a  $T_2$  sálajících elementů  $dA_1$  a  $dA_2$  (element  $dA_1$  je osálán elementem  $dA_2$ ) změní se nám vztah pro určení poměru osálení z (3.4) na (3.5)

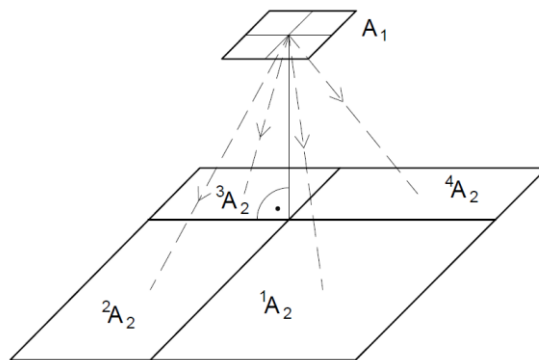
$$\varphi_{21} = \frac{1}{\pi \cdot A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \omega_1 \cdot \cos \omega_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad [-] \quad (3.5)$$

a z toho dále vyplývá vztah (3.6), nazývaný pravidlo reciprocity.

$$\varphi_{12} \cdot A_1 = \varphi_{21} \cdot A_2 \quad (3.6)$$

Pokud je plocha  $A_2$ , složená z dílčích ploch, osálána sálající plochou  $A_1$ , je výsledný poměr osálení roven součtu poměrů osálení jednotlivých dílčích ploch plochy  $A_2$  plochou  $A_1$ . Vztah (3.7) se nazývá adiční pravidlo a je vyjádřením předchozího slovního tvrzení.

$$\varphi_{12} = {}^1\varphi_{12} + {}^2\varphi_{12} + \dots + {}^n\varphi_{12} = \sum_{i=1}^n {}^i\varphi_{12} \quad (3.7)$$



Obr. 3.2 Adiční pravidlo pro určení poměru osálení

Konkrétní řešení poměrů osálení různých ploch lze nalézt například v [1], [6], [7], [8]. V následujících kapitolách bude naznačen výpočet poměru osálení pro některé konkrétní případy umístění ploch v prostoru vůči sobě.

### 3.2. Sálající bod

„Sálající bod je teoretický pojem, neboť ve skutečnosti může tepelné paprsky emitovat jen povrch hmotných těles; sálající bod je tedy nutno si představit jako velmi malou hmotnou kouli (elementární kouli). Příklad sálajícího bodu je velmi důležitý pro

výpočet a kontrolu střední radiační teploty okolních ploch“, viz [1]. Pro poměr osálení sálajícím bodem platí vztah (3.8)

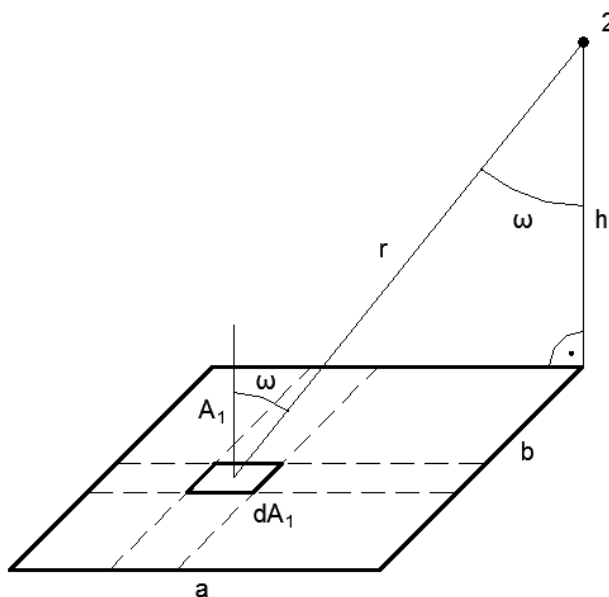
$$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi} \int_{A_1} \frac{\cos \omega}{r^2} dA_1, \quad [-] \quad (3.8)$$

kde  $A_1$  je plocha osálaná sálajícím bodem a úhel  $\omega$  je úhel mezi spojnicí sálajícího bodu a středu plochy  $A_1$  s normálou plochy  $A_1$ . Odvození vzorce (3.8) lze nalézt v [1].

### 3.3. Osálení obdélníku sálajícím bodem

Grafické zpracování této kapitoly převzato z [4]. Podle [1] je řešením rovnice (3.8) pro obdélník  $A_1 = a \cdot b$  osálaný bodovým zdrojem, který leží kolmo nad jedním z vrcholů obdélníku ve vzdálenosti  $h$  rovnice (3.9). Na obr. 3.3 je znázorněna zmíněná situace.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \tan^{-1} \frac{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \cdot b} \quad [-] \quad (3.9)$$

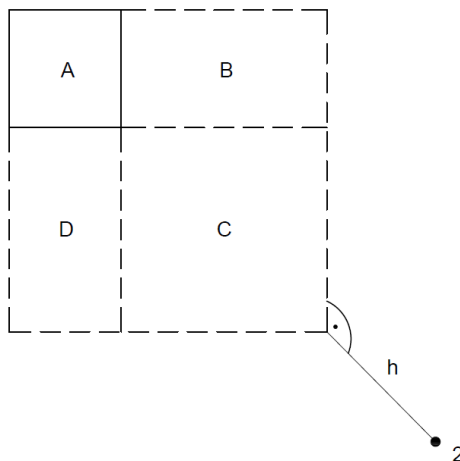


Obr. 3.3 Osálení obdélníku bodovým zdrojem

Jestliže sálající bod neleží nad jedním z vrcholů obdélníka, je nutné plochu obdélníka rozdělit nebo doplnit na dílčí plochy. V případě, že sálající bod leží mimo obdélník, je nutné doplnit plochu na fiktivní obdélníky a výsledný poměr osálení

vypočítat pomocí vzorce (3.9) a adičního pravidla. Na obr. 3.4 je znázorněna zmiňovaná situace. Vztah (3.10) udává výsledný poměr osálení.

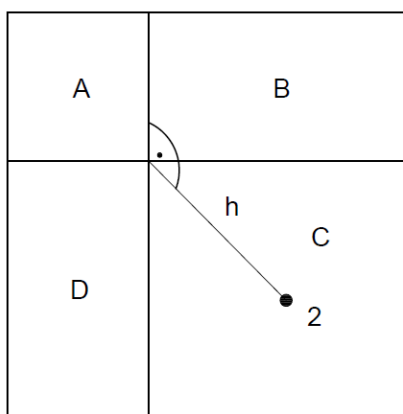
$$\varphi_{A2} = \varphi_{(ABCD)2} - \varphi_{(BC)2} - \varphi_{(CD)2} + \varphi_{C2} \quad (3.10)$$



Obr. 3.4 Osálení obdélníka A bodovým zdrojem ležícím mimo obdélník A

Leží-li sálající bod uvnitř obdélníka, je nutné obdélník rozdělit na dílčí plochy a výsledný poměr osálení vypočítat obdobně jako pro případ, kdy sálající bod leží mimo obdélník. Na obr. 3.5 je znázorněna situace, kdy je sálající bod uvnitř obdélníku. Vztah (3.11) pak udává výsledný poměr osálení.

$$\varphi_{(ABCD)2} = \varphi_{A2} + \varphi_{B2} + \varphi_{C2} + \varphi_{D2} \quad (3.11)$$



Obr. 3.5 Osálení obdélníka bodovým zdrojem

### 3.4. Vzájemné sálání dvou rovnoběžných pravouhlých ploch

Základním případem z této kategorie je sálání dvou stejně velkých obdélníkových rovnoběžných ploch. Poměr osálání plochy  $A_2$  plochou  $A_1$  se podle [8] vypočítá ze vztahu (3.12),

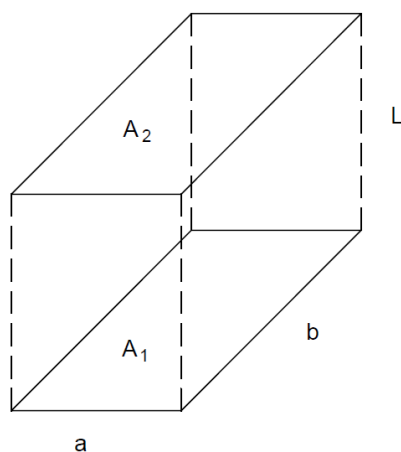
$$\varphi_{2,1} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{(1+K_2^2)^{0,5}}{K_2} \cdot \tan^{-1} \frac{K_1}{(1+K_2^2)^{0,5}} + \frac{(1+K_1^2)^{0,5}}{K_1} \cdot \tan^{-1} \frac{K_2}{(1+K_1^2)^{0,5}} - \frac{1}{K_1} \cdot \tan^{-1} K_2 - \right. \\ \left. 1K2 \tan^{-1} K1 + 12 \cdot K1 \cdot K2 \ln 1 + K12 \cdot 1 + K221 + K12 + K22 \right] \quad [-] \quad (3.12)$$

kde:  $K_1 = \frac{a}{L}$  a  $K_2 = \frac{b}{L}$

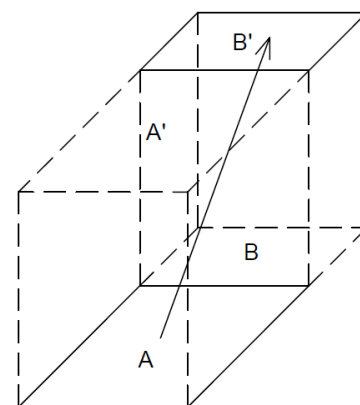
a [m], b [m] - rozměry obdélníků

L [m] - vzdálenost obou obdélníků

Na obr. 3.6 je znázorněna situace, kdy na sebe vzájemně sálají dvě rovnoběžné obdélníkové plochy. Běžně ovšem nevystačíme pouze se sáláním dvou stejně velkých rovnoběžných ploch, které lze použít například při sálání dvou stejně velkých protilehlých stěn. V praxi se setkáváme spíše se sáláním dvou nesterjně velkých a různě vůči sobě umístěných ploch. Taková situace je zobrazena na obr. 3.7 a obr. 3.8 a vyjádřena rovnicemi (3.13) až (3.15).



Obr. 3.6 Osálání stejně velkých rovnoběžných obdélníkových ploch



obr. 3.7 Osálání dvou rovnoběžných obdélníkových ploch

Pro výpočet poměru osálání plochy  $A_{B'}$  plochou  $A_A$  platí výraz (3.13).

Jednotlivé poměry osálání ve výrazu (3.13) se vypočítají podle vztahu (3.12) a

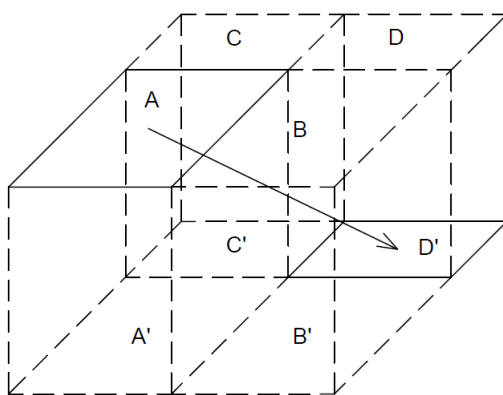
konečný poměr osálení získáme aplikováním pravidla reciprocity a adičního pravidla. Odvození tohoto vztahu můžeme nalézt v [1].

$$\varphi_{B'A} = \frac{1}{2 \cdot A_A} \left( \varphi_{(A'B')(AB)} \cdot A_{AB} - \varphi_{A'A} \cdot A_A - \varphi_{B'B} \cdot A_B \right) \quad [-] \quad (3.13)$$

Obdobně lze vypočítat poměr osálení v případě, že plocha  $A_A$  na obr. 3.7 osálá plochy  $A_{A'}$  a  $A_{B'}$ . Pak platí výraz (3.14),

$$\varphi_{(A'B')A} \cdot A_A = \varphi_{A'A} \cdot A_A + \varphi_{B'A} \cdot A_A \quad [-] \quad (3.14)$$

což není nic jiného, než vyjádření adičního pravidla.



Obr. 3.8 Osálení dvou rovnoběžných obdélníkových ploch

Posledním základním případem sálení dvou rovnoběžných obdélníkových ploch je případ zobrazený na obr. 3.8. a poměr osálení vyjádřený vztahem (3.15),

$$\varphi_{D'A} = \frac{1}{4 \cdot A_A} \left[ \varphi_{S'S} \cdot A_S - (\varphi_{A'A} + \varphi_{B'A} + \varphi_{C'A}) \cdot A_A - (\varphi_{A'B} + \varphi_{B'B} + \varphi_{D'B}) \cdot A_B - (\varphi_{A'C} + \varphi_{C'C} + \varphi_{D'C}) \cdot A_C - (\varphi_{B'D} + \varphi_{C'D} + \varphi_{D'D}) \cdot A_D \right] \quad [-] \quad (3.15)$$

kde  $A_S = A_{S'} = A_A + A_B + A_C + A_D$ .

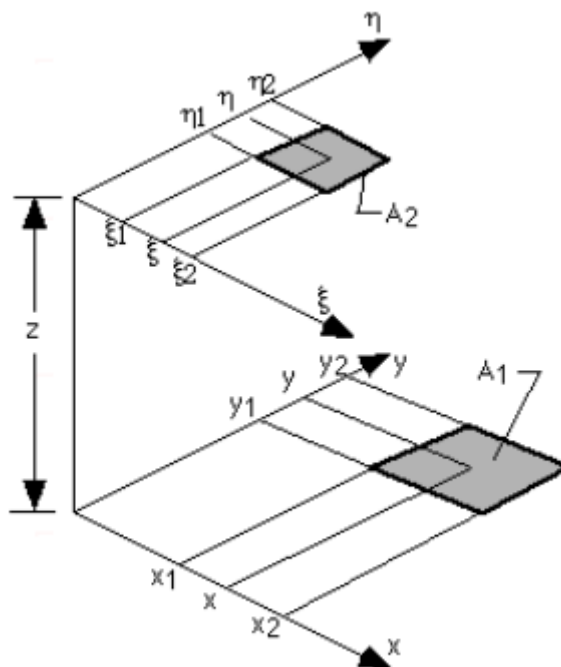
Jak je patrné z porovnání vztahů (3.13) a (3.15), s rostoucím počtem dílčích ploch roste i složitost vztahů, které jsou vcelku pracné na řešení i s použitím výpočetní techniky.

Posledním vztahem uvedeným v této kapitole je vztah pro určení poměrů osálení dvou rovnoběžných obecných ploch. Příklad je znázorněn na obr. 3.9. a dán vztahem (3.16).

$$\varphi_{A_1 A_2} = \frac{1}{(x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \left[ (-1)^{(i+j+k+l)} \cdot G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l) \right] \quad (3.16)$$

kde:

$$G = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \begin{array}{l} (y - \eta) \cdot [(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{[(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ + (x - \xi) \cdot [(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{[(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ - \frac{z^2}{2} \cdot \ln[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2] \end{array} \right\}$$



Obr. 3.9 Sálání dvou obecných rovnoběžných rovin, převzato z [7].

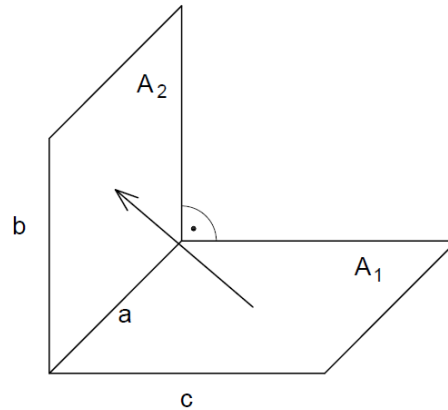
Všechny výše zmíněné vztahy pro výpočet poměrů osálení mimo vztahu (3.12) a (3.16) převzaty z [1], kde lze nalézt i odvození pro některé z nich.

### 3.5. Vzájemné sálání dvou kolmých pravoúhlých ploch

Základním případem v této kategorii je sálání dvou kolmých obdélníkových ploch majících jednu společnou hranu. Obr. 3.10 schematicky naznačuje danou situaci. Podle vztahu (3.17) pak vypočítáme poměr osálení plochy  $A_2$  plochou  $A_1$ .

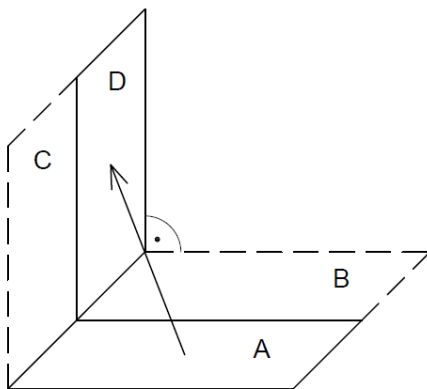


$$\varphi_{21} = \frac{1}{a \cdot b \cdot \pi} \cdot \left[ a \cdot b \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) - a \cdot \sqrt{b^2 + c^2} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}} \right) + a \cdot c \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{c} \right) + \frac{b^2}{4} \cdot \ln a^2 + b^2 + c^2 \cdot b^2 a^2 + b^2 \cdot b^2 + c^2 + c^2 4 \ln a^2 + b^2 + c^2 \cdot c^2 a^2 + c^2 \cdot b^2 + c^2 - a^2 4 \ln a^2 + b^2 + c^2 \cdot a^2 a^2 + b^2 \cdot a^2 + c^2 \right] \quad [-] \quad (3.17)$$

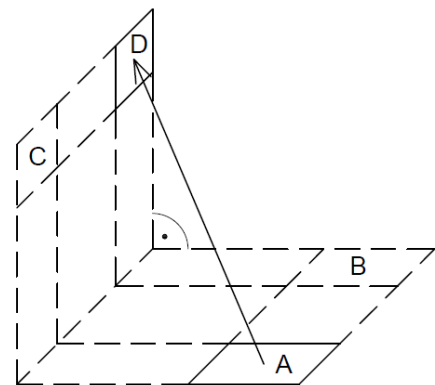


Obr. 3.10 Osálení dvou kolmých obdélníkových ploch se společnou hranou

Obdobně jako v případě rovnoběžných stěn, ani v případě kolmých stěn si nevystačíme pouze s jedním základním případem geometrické konfigurace stěn. Obr. 3.11 až 3.14 zobrazují další ze základních geometrických konfigurací, které se v praxi běžně vyskytují, nebo které používáme k řešení složitějších konfigurací, jako je například výpočet poměru osálení otvoru ve stěně vůči jiné kolmé stěně.



Obr. 3.11 Osálení dvou kolmých obdélníkových ploch



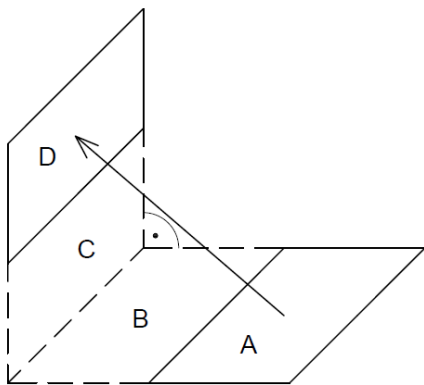
Obr. 3.12 Osálení dvou kolmých obdélníkových ploch

Poměr osálení plochy  $A_D$  plochou  $A_A$  podle obr. 3.11 a obr. 3.12 vypočteme ze vztahu (3.18),

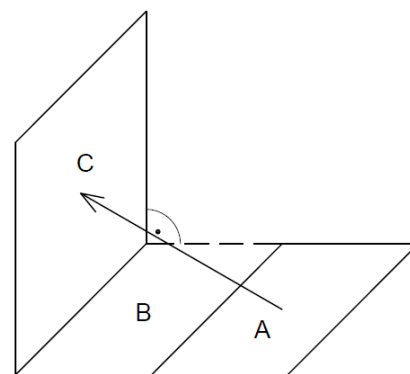
$$\varphi_{DA} = \frac{1}{2 \cdot A_A} \cdot (\varphi_{(CD)(AB)} \cdot A_{AB} - \varphi_{CA} \cdot A_A - \varphi_{DB} \cdot A_B) \quad [-] \quad (3.18)$$

kde  $A_{AB} = A_A + A_B$ .

Formálně je podle [1] zápis vztahu pro výpočet poměru osálení pro případ na obr. 3.11 a obr. 3.12 stejný, ale v prvně zmíněném případě lze dílčí poměry osálení vypočítat přímo ze vztahu (3.17), zatímco v druhém případě je nutné dílčí poměry osálení vypočítat pomocí vztahu (3.17), (3.19) a adičního pravidla.



Obr. 3.13 Osálení dvou kolmých  
obdélníkových ploch



Obr. 3.14 Osálení dvou kolmých  
obdélníkových ploch

Pro situaci na obr. 3.13, kdy sálá plocha  $A_A$  na plochu  $A_D$ , platí vztah (3.19).

$$\varphi_{DA} = \frac{1}{A_A} \cdot (\varphi_{(CD)(AB)} \cdot A_{AB} - \varphi_{(CD)B} \cdot A_B - \varphi_{C(AB)} \cdot A_{AB} + \varphi_{CB} \cdot A_B) \quad [-] \quad (3.19)$$

Poměr osálení pro situaci na obr. 3.14 se vypočte podle vztahu (3.20).

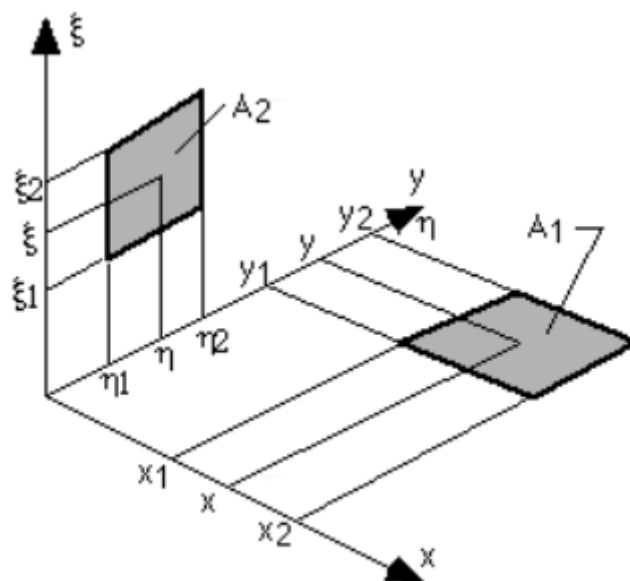
$$\varphi_{CA} = \frac{1}{A_A} \cdot (\varphi_{C(AB)} \cdot A_{AB} - \varphi_{CB} \cdot A_B) \quad [-] \quad (3.20)$$

Pro dvě obecné kolmé roviny z obr. 3.15 platí vztah (3.21). Vztah neplatí pro roviny se společnou hranou. Formálně je vztah (3.21) shodný se vztahem (3.16), ale funkce  $G$  se liší.

$$\varphi_{A_1, A_2} = \frac{1}{(x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 [(-1)^{(i+j+k+1)} \cdot G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)] \quad (3.21),$$

kde:

$$G = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \begin{array}{l} (y - \eta) \cdot (x^2 + \xi^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{(y - \eta)}{(x^2 + \xi^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \\ - \frac{1}{4} \cdot [x^2 + \xi^2 - (y - \eta)^2] \cdot \ln[x^2 + \xi^2 + (y - \eta)^2] \end{array} \right\}.$$



Obr. 3.15 Poměr osálení dvou obecných kolmých rovin, převzato z [7]

Pomocí vztahů zmíněných v kapitolách 3.4 a 3.5 a jejich kombinací lze vypočítat poměry osálení pro většinu běžných geometrických konfigurací v prostorech, pro které se navrhuje sálavé vytápění. Další vztahy pro výpočet poměrů osálení méně běžných geometrických konfigurací lze naléznout např. v [6] nebo [7].

#### **4. STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLOTA SÁLAJÍCÍCH PLOCH**

„Při sálavém vytápění je nezbytně nutno přihlížet k sálavému účinku všech ploch omezujících vytápěný prostor, přitom musí být počítáno nejen s přímým sáláním otopných ploch nebo jiných zdrojů sálavého tepla, ale také s teplem, které po absorpci primárního sálení druhotně emitují ostatní nevytápěné plochy“, viz [1]. Jedním z hodnotících kritérií stavu vnitřního prostředí je i operativní teplota, která mimo teploty vnitřního vzduchu a rychlosti proudění zohledňuje i sálavý účinek okolních ploch. Sálavý účinek okolních ploch závisí nejen na povrchové teplotě okolních ploch, ale i na rozměrech a umístění jednotlivých ploch vůči sobě. Celkový sálavý účinek okolních ploch se rovná součtu sálavých účinků jednotlivých ploch. Jak bylo naznačeno v předchozích kapitolách, zjištění sálavého účinku okolních ploch je dosti pracné. Výpočet si můžeme zjednodušit tak, že zavedeme společnou teplotu všech okolních ploch tak, aby při společné teplotě všech okolních ploch byl celkový sálavý účinek

stejný, jako v reálném stavu, kdy má každá plocha svou vlastní teplotu. Společná teplota všech okolních ploch, při které je celkový sálavý účinek stejný jako v reálném stavu, se nazývá střední radiační teplota.

#### 4.1. Obecná rovnice střední radiační teploty sálajících ploch

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, celkový účinek na osálanou plochu od více sálajících ploch se rovná součtu účinků od jednotlivých ploch. Podle [1] v úplně nejobecnějším případě platí následující vztah.

$$\frac{c_1}{10^8} \varphi_{a1} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_a^4) + \frac{c_2}{10^8} \varphi_{a2} \cdot A_2 \cdot (T_2^4 - T_a^4) + \dots + \frac{c_n}{10^8} \varphi_{an} \cdot A_n \cdot (T_n^4 - T_a^4) = \frac{c_u}{10^8} \varphi_{ar} \cdot A_r \cdot (T_r^4 - T_a^4). \quad (4.1)$$

V běžné praxi se podle [9] používají vztahy (4.2) až (4.4). Vztahy (4.2) a (4.3) platí obecně, kdežto vztah (4.4) platí pouze v případě malých rozdílů teplot  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . Vztah (4.4) ukazuje nižší hodnotu střední radiační teploty než vztahy (4.2) a (4.3), viz [10]. Při určování střední radiační teploty v prostoru se sálavým vytápěním je tudíž vztah (4.4) nevhodný a nebudeme jej tudíž používat.

$$T_r^4 = \varphi_{a1} \cdot T_1^4 + \varphi_{a2} \cdot T_2^4 + \dots + \varphi_{an} \cdot T_n^4 \quad (4.2)$$

$$t_r = \sqrt[4]{\varphi_{a1} \cdot T_1^4 + \varphi_{a2} \cdot T_2^4 + \dots + \varphi_{an} \cdot T_n^4} - 273. \quad (4.3)$$

$$t_r = \varphi_{a1} \cdot t_1 + \varphi_{a2} \cdot t_2 + \dots + \varphi_{an} \cdot t_n. \quad (4.4)$$

Z teorie popsané v kapitole 3 a ze vztahů pro výpočet střední radiační teploty vyplývá zásadní věc. Střední radiační teplota bude i při jinak stejných poměrech (prostor o stejných rozměrech a se stejnými povrchovými teplotami) rozdílná, když bude vztažena k povrchu lidského těla, než když bude vztažena k elementárnímu bodu. Podle [1], [9] a [2] by se při řešení sálavého vytápění měla střední radiační teplota vztahovat k povrchu lidského těla. Určení poměru osálení lidského těla je však velmi náročné a dá se zjistit pouze měřením. Poměr osálení lidského těla navíc závisí na poloze člověka (stojí nebo sedí) a na jeho natočení vůči stěně. V běžné praxi se pak povrch lidského těla pro potřeby výpočtu poměru osálení nahrazuje povrchem válce

nebo kvádru o velikosti lidského těla. Podle [1] je možné nahradit pro výpočet střední radiační teploty lidské tělo elementárním bodem a dopustíme se tím jen zanedbatelné chyby. Toto platí, pokud vzdálenost mezi sálající plochou a elementárním bodem není velmi malá. V případě individuálního vytápění blízkými zářiči je nutné počítat střední radiační teplotu vztaženou k lidskému tělu nebo alespoň k náhradnímu tělesu.

## **5. TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA**

Tepelná pohoda člověka je tepelný stav prostředí, ve kterém se člověk cítí příjemně a necítí teplo ani zimu. Určit tepelnou pohodu člověka je obtížné, protože každý vnímáme pocit chladu nebo tepla jinak. Tepelná pohoda člověka je zkrátka matematicky těžko vyjádřitelná, protože závisí na mnoha faktorech, z nichž jsou mnohé subjektivní. Subjektivními faktory ovlivňujícími tepelnou pohodu člověka jsou například stáří a zdravotní stav člověka, psychický stav člověka nebo aklimatizace na určité tepelné poměry. „Všeobecným a nezbytným předpokladem tepelné pohody však je rovnováha tepelného režimu člověka, nutná k udržení stálé teploty těla. Důležitou složkou tepelného režimu je sdílení tepla z povrchu těla do prostředí (tepelná ztráta člověka), které se řídí přesnými fyzikálními zákony, a lze je proto vyjádřit matematickými rovnicemi“, viz [1].

### **5.1. Tepelná rovnováha lidského těla**

Tepelná rovnováha je stav, kdy do prostředí předáme přesně tolik tepla, kolik ho vyprodukuje nebo přijmeme. Ten samý princip platí pro tepelnou rovnováhu lidského těla. O tepelné rovnováze lidského těla mluvíme tehdy, odebere-li okolí lidskému tělu tolik tepla, kolik tělo vyprodukuje anebo z okolí přijme. Pokud tepelná rovnováha lidského těla není delší dobu docílena, mění tělo svoji teplotu. Přitom nastává pocit diskomfortu, můžeme cítit teplo nebo naopak zimu. Naše tělo se snaží udržet si stálou teplotu, a to v rozmezí 36,5 °C a 37 °C. Již malá změna tělesné teploty o  $\pm 0,5$  °C pro tělo může znamenat zdravotní riziko. V případě dlouhodobé tepelné nerovnováhy reaguje tělo na tuto nerovnováhu dvěma způsoby, v závislosti na tom, jestli převažuje příjem nebo výdej tepelné energie. Pokud převažuje produkce nebo příjem tepla nad teplem odebraným prostředím, začne se tělo, ve snaze docílit tepelné

rovnováhy při dosažení teploty těla mezi 36,5 °C a 37 °C, potit. Při odpařování potu z povrchu pokožky dochází k jejímu intenzivnímu ochlazení. Pocení je tudíž velmi důležitý činitel termoregulace. Pokud je naopak produkce a příjem tepla z okolí menší než teplo odebrané okolím, zareaguje tělo tím, že zvýší produkci tepla pohybem svalů. To se projeví těžko zastavitelným třesem svalů. Je-li odebírané teplo stále vyšší než produkované, začne tělo zpomalovat krevní oběh, aby snížilo povrchovou teplotu těla a snížilo tím množství odevzdaného tepla do okolí. Zpomalování krevního oběhu se projevuje od periférií směrem ke středu těla. Bohužel je naše tělo daleko hůř adaptováno na zvládnání chladu než na zvládnání tepla.

Podle [1] je druhým předpokladem tepelné pohody člověka dosažení suchého ochlazení. Povrch lidského těla je ochlazen vedením, konvekcí, sáláním a také odpařováním vody. Pouze odpařování vody je velmi proměnlivé v závislosti na stavu okolního prostředí a teplotě lidského těla. O suchém ochlazení hovoříme tehdy, není-li při ochlazení na pokožce vidět pot. Odpařováním sice odvádíme teplo vždy, ale při suchém ochlazení je to pouze kolem 20 % až 30 % tepla, viz [1]. Mokré ochlazení bývá doprovázeno pocitem diskomfortu. Na základě předpokladů z předchozích odstavců se tepelná rovnováha lidského těla vyjádří podle vztahu (5.1).

$$Q_m = Q_d + Q_k + Q_s + Q_v + Q_{vz}, \quad (5.1)$$

kde:

$Q_m$  [W] – metabolické teplo (teplo produkované tělem)

$Q_d$  [W] – tepelný výkon odváděný vedením

$Q_k$  [W] – tepelný výkon odváděný konvekcí

$Q_s$  [W] – tepelný výkon odváděný sáláním

$Q_v$  [W] – tepelný výkon odváděný vypařováním

$Q_{vz}$  [W] – tepelný výkon odváděný ve vydechovaném vzduchu.

Metabolické teplo produkované tělem závisí na druhu činnosti a váze člověka. Odvod tepla je zase závislý na povrchu člověka, a mezi povrchem člověka a jeho hmotností

byly zjištěny celkem jednoznačné závislosti, viz [2]. Proto je metabolické teplo  $q_m$  vztaheno na  $1 \text{ m}^2$  plochy těla. Produkce energie se dříve srovnávala s její minimální hodnotou, která se nazývá „bazální metabolismus“. V dnešní době se produkce energie srovnává s energií vyprodukovanou při klidném sezení, viz [2]. Hodnoty pro metabolické teplo  $q_m$  produkované při různých činnostech lze najít např. v [2], rozsahy hodnot  $q_m$  podle třídy práce pak lze nalézt v [11]. Podle [1] a [2] lze v rovnici (5.1) zanedbat vliv tepelné ztráty vedením, protože ve většině běžných případů je plocha styku člověka s okolními plochami velmi malá (běžně bota ve styku s podlahou, navíc bota i podlaha mají velmi podobnou teplotu), poněvadž při běžném výpočtu uvažujeme člověka stojícího. Upravíme-li si rovnici (5.1) na tvar:

$$Q_m - Q_v - Q_{vz} = Q_k + Q_s, \quad (5.2)$$

a dosadíme na pravou stranu rovnice, dostaneme vztah:

$$Q_m - Q_v - Q_{vz} = A \cdot \alpha_k \cdot (t_{od} - t_i) + A \cdot \alpha_s \cdot (t_{od} - t_r), \quad (5.3)$$

kde:

$A \text{ [m}^2\text{]}$  – povrch těla zakrytý oděvem

$\alpha_k \text{ [W/m}^2\text{K]}$  – součinitel přestupu tepla konvekcí z povrchu oděvu a těla

$\alpha_s \text{ [W/m}^2\text{K]}$  – součinitel přestupu tepla sáláním z povrchu oděvu a těla

$t_i \text{ [}^\circ\text{C]}$  – teplota okolního vzduchu

$t_r \text{ [}^\circ\text{C]}$  – střední radiační teplota

$t_{od} \text{ [}^\circ\text{C]}$  – teplota povrchu oděvu

Jak je z rovnice (5.3) patrné, na pravé straně rovnice vystupuje teplota povrchu oděvu, kterou neznáme. Proto se při řešení tepelné rovnováhy lidského těla připojuje ještě rovnice (5.4), ze které můžeme teplotu  $t_{od}$  určit. Rovnice (5.4) vyjadřuje prostup tepla oděvem.

$$Q_k + Q_s = \frac{A \cdot (t_k - t_{od})}{R_{od}}, \quad (5.4)$$

kde:

$t_k$  [°C] – teplota povrchu těla (teplota kůže)

$R_{od}$  [m<sup>2</sup>.K/W] – tepelný odpor oděvu.

Pro zjištění teploty povrchu těla lze použít např. empirický vzorec uvedený v [5], ze kterého se určí povrchová teplota těla v závislosti na měrném metabolickém teple. Tepelné odpory základních typů oděvů jsou přehledně zobrazeny v tabulkách v [2] a [5].

## 5.2. Rovnice tepelné pohody při sálavém vytápění

Dosazením a úpravou vztahu (5.3) lze získat rovnici tepelné pohody při sálavém vytápění (viz [1]).

$$t_i + \frac{\alpha_s}{\alpha_k} t_r = \left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_k}\right) t_{od} - \frac{q_k + q_s}{\alpha_k}, \quad (5.5)$$

kde:

$\alpha_s$  [W/m<sup>2</sup>.K] – součinitel přestupu tepla sáláním

$\alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>.K] – součinitel přestupu tepla konvekcí

$q_s$  [W/m<sup>2</sup>] – měrná tepelná ztráta sáláním

$q_k$  [W/m<sup>2</sup>] – měrná tepelná ztráta konvekcí

$t_i$  [°C] – teplota vzduchu

$t_r$  [°C] – střední radiační teplota.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je závislý na rozdílu teplot pokud je vzduch naprosto klidný a jedná se o přirozenou konvekci, nebo na rychlosti proudění vzduchu, jedná-li se o nucenou konvekci. Pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí lze podle [2] v případě nucené konvekce pro rychlosti proudění od  $w = 0,15$  m/s do  $w = 5$  m/s použít vztah (5.6).

$$\alpha_k = 13 \cdot \sqrt{w} \quad (5.6)$$



Pro přirozenou konvekci uvádí [2] hodnotu součinitele přestupu tepla konvekcí  $\alpha_k \approx 5,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . V [1] je pak uvedeno, že součinitel přestupu tepla konvekcí se pro proudění vzduchu o rychlosti  $w \leq 0,15 \text{ m/s}$  a při rozdílu teplot  $t_{od} - t_i = 5$  až  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  pohybuje v rozmezí  $\alpha_k = 4,7$  až  $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Hodnoty byly zjištěny experimentálně na modelu lidského těla.

„Součinitel přestupu tepla sáláním byl odvozen ze Stefan-Boltzmanova zákona jako uměle vykonstruovaný pojem, umožňující vyčíslit teplo sdělené sáláním formálně stejně jako u konvekce“, viz [2]. Podle vztahu (5.7) můžeme vypočítat součinitel přestupu tepla sáláním. Ve vztahu vystupuje podíl  $\frac{A'}{A}$ , který udává zmenšení součinitele přestupu tepla sáláním vlivem zastínění. K zastínění dochází v závislosti na poloze člověka (stojící člověk bude mít jinou sálavou plochu než člověk sedící). Podle [1] a [2] se sálající plocha zmenší vlivem zastínění o 5 % až 15 %.

$$\alpha_s = C \frac{A'}{A} \frac{T_{od}^4 - T_r^4}{10^8(t_{od} - t_r)} = C \cdot \xi \cdot \frac{A'}{A}, \quad (5.7)$$

kde:

$C$  [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ] – součinitel sálání oděvních látek

$\xi$  [ $\text{K}^3$ ] – teplotní součinitel.

Součinitel sálání oděvních látek vyjádříme v souladu s (2.2) jako  $C = C_0 \cdot e = 5,67 \cdot e$  [ $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ], kde  $e$  [-] je poměrná emisivita povrchu oděvu. Podle [1] je emisivita oděvních látek, bez ohledu na druh látky či její barvu, pro dlouhovlnné vlnění přibližně stejná. Její hodnota je  $e = 0,85$  až  $0,95$  [-].

Obvykle se pak hodnoty součinitele sálání oděvních látek pohybují mezi hodnotami  $C = 4,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  a  $C = 5,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Při obvyklých hodnotách střední radiační teploty ( $t_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) je teplotní součinitel roven  $\xi = 1,0$  až  $1,05 \text{ K}^3$  a tudíž hodnota součinitele přestupu tepla sáláním  $\alpha_s = 5,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , viz [1].

Rovnici (5.5) můžeme vyjádřit ve tvaru

$$t_v + b \cdot t_r = a, \quad (5.8)$$

Proměnná  $a$  v rovnici (5.8) obsahuje pravou stranu rovnice (5.5). Hodnoty proměnné  $a$  jsou tabelovány, závisí na druhu objektu, druhu činnosti a druhu oblečení. Tabulky s hodnotami proměnné  $a$  lze nalézt např. v [1] a [2]. V [1] a [5] bylo dále odvozeno, že

$$a = (b + 1)t_g, \quad (5.9)$$

kde:

$t_g$  [°C] – výsledná teplota pro těleso bez vnitřního zdroje tepla

Pro součinitel  $b$  platí, že

$$b = \frac{\alpha_s}{\alpha_k}. \quad (5.10)$$

### 5.3. Metody kontrolování a posuzování tepelné pohody při sálavém vytápění

Pro kontrolu tepelné pohody prostředí, přihlédneme-li k poznatkům z kapitoly 5.2, nevystačíme pouze s teplotou vzduchu v místnosti. K hodnocení tepelné pohody prostředí budeme také potřebovat znát střední radiační teplotu a případně rychlost proudění vzduchu. Abychom změřili výsledný tepelný účinek, musíme užít takových metod a přístrojů, které postihnou vliv nejenom teploty vzduchu, ale i vliv tepelného sálání prostředí. Metodiku měření a popis přístrojů lze nalézt v metodických pokynech Ministerstva zdravotnictví ČR, v [12]. Kontrolu tepelné pohody prostředí lze také provést výpočtem podle vztahu (5.8) nebo (5.11), v závislosti na druhu objektu a třídě vykonávané práce. Pro které případy hodnotíme podle vztahu (5.8) a pro které podle (5.11) a požadované hodnoty udává [11].

$$t_o = A \cdot t_i + (1 - A) \cdot t_r \quad (5.11)$$

kde:

$t_o$  [°C] – operativní teplota

$A$  [-] – hodnota závislá na relativní rychlosti proudění vzduchu

Součinitel  $A$  nabývá hodnot podle Tab. 5.1. Pro rychlost proudění  $w > 1\text{m/s}$  se vypočítá hodnota součinitele  $A$  jako  $A = 0,75 \cdot w^{0,16}$  (viz [12]). Při rychlostech proudění vzduchu  $w \leq 0,2\text{m/s}$  lze naopak nahradit vztah (5.11) vztahem (5.12).

$$t_o = \frac{t_i + t_r}{2} = t_g \quad (5.12)$$

Tab. 5.1 Hodnoty součinitele  $A$  při rychlosti proudění  $w$ 

$w$ [m/s]	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$A$ [-]	0,5	0,53	0,6	0,65	0,7	0,75

Tab. 5.1 převzata z [12].

Hodnotíme-li tepelnou pohodu prostředí měřením, měli bychom se řídit metodickými pokyny uvedenými v [12]. Místa měření vybíráme v závislosti na činnosti a pohybu osob. Měření probíhá podle druhu činnosti a charakteru prostoru ve výšce kotníků, břicha a hlavy. Měření teploty vzduchu a vlhkosti vzduchu stačí pouze ve výšce břicha člověka. Také rychlost proudění stačí měřit ve výšce břicha člověka, pokud nepotřebujeme určit lokální diskomfort nebo nepotřebujeme rychlosti proudění pro další výpočty. Výslednou teplotu je ale nutné měřit ve všech třech výškách, protože je ovlivněna sáláním okolních stěn. Pro měření teploty vzduchu užíváme jakékoliv teplotní čidlo stíněné proti sálání okolních ploch. Výslednou teplotu měříme kulovým teploměrem s přesně definovanými rozměry. Jedná se o měděnou kouli s průměrem 150 nebo 100 mm s černěným plechovým nebo černým polyuretanovým povrchem. Uvnitř měděné koule je umístěn rtuťový teploměr nebo jiné čidlo teploty. Měření výsledné teploty kulovým teploměrem je celkem časově náročné, protože doba ustálení kulového teploměru je až 30 minut. Z výsledné teploty určíme střední radiační teplotu podle vztahu (5.13) pro kulový teploměr s průměrem 150 mm nebo podle vztahu (5.14) pro kulový teploměr s průměrem 100 mm, viz [12].

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot w^{0,6} \cdot (t_g - t_i) \right]^{0,25} - 273 \quad (5.13)$$

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot w^{0,6} \cdot (t_g - t_i) \right]^{0,25} - 273 \quad (5.14)$$

Rychlost proudění vzduchu měříme nejlépe všesměrovými čidly, například anemometrem se zahřívající kuličkou, termistorovým anemometrem, ... Další možnosti včetně doporučených charakteristik přístrojů uvádí [12].

Známe-li teplotu vnitřního vzduchu, střední radiální teplotu a rychlost proudění vzduchu, můžeme vypočítat operativní teplotu  $t_o$  ze vztahu (5.11) a porovnat ji s požadovanými hodnotami uvedenými v [11].

Zjišťujeme-li tepelnou pohodu prostoru výpočtem, musíme výpočtem nejdříve zjistit teplotu vnitřního vzduchu, rychlost proudění vzduchu a střední radiální teplotu. Teplotu vnitřního vzduchu můžeme zjistit například tepelnou bilancí prostoru, které bude věnována samostatná kapitola. Střední radiální teplotu lze určit ze vztahu (4.3), známe-li povrchové teploty okolních stěn. Povrchové teploty okolních stěn však mohou být výstupem tepelné bilance prostoru a tudíž známé. Početní určení rychlosti proudění vzduchu v prostoru je složité a není tématem této práce, proto zde nebude uvedeno.

## **6. TEPELNÁ ROVNOVÁHA PROSTORU VYTÁPĚNÉHO SÁLAVÝM ZPŮSOBEM**

Způsob výpočtu tepelné rovnováhy prostoru vytápěného převážně konvektivně nebo převážně sálavě se v obecném případě neliší. Výsledky výpočtu jsou však naprosto rozdílné. Při konvektivním způsobu vytápění předávají otopná tělesa tepelnou energii do prostoru převážně konvekcí. Na povrchu otopných těles dochází k zahřívání vzduchu konvekcí, vytvoří se konvektivní proudy, které promíchají vzduch v místnosti. Od teplého vzduchu se ohřejí okolní konstrukce. Z toho vyplývá, že při konvektivním způsobu vytápění je teplota vnitřního vzduchu vyšší než střední povrchová teplota okolních stěn. Otopné plochy při převážně konvektivním způsobu vytápění předávají do prostoru 5-55 % (5 % u konvektorů, 55 % pro desková tělesa typu 10) tepla sáláním v závislosti na konstrukci otopné plochy, viz [13]. U převážně sálavého způsobu vytápění je situace přesně opačná. Většina tepelné energie je z otopné plochy předána sáláním. Okolní plochy jsou zahřívány sáláním otopných ploch, zatímco vzduch sáláním zahříván není a ohřívá se až následně o okolní plochy. Z toho vyplývá, že při převážně sálavém způsobu vytápění je teplota vnitřního vzduchu nižší než střední povrchová teplota okolních stěn. Sálavé otopné plochy předávají do prostoru tepelnou energii sáláním až z 80 %, v závislosti na konstrukci otopné plochy, viz [14].

Poměr mezi střední povrchovou teplotou okolních konstrukcí a teplotou vzduchu není libovolný, musí vyhovovat podmínce tepelné rovnováhy prostoru. Při malé

výměně vzduchu větráním a dobrých izolačních vlastnostech obvodových konstrukcí, jaké jsou běžně pro obytné a veřejné budovy, je podle [1] rozdíl mezi teplotou vzduchu a střední povrchovou teplotou obvodových konstrukcí velmi malý. Proto při návrhu příkonu sálavé otopné plochy lze užít stejný postup jako pro návrh příkonu konvektivní otopné plochy. Je-li naopak intenzita výměny vzduchu značná, bude rozdíl mezi střední teplotou okolních ploch a teplotou vzduchu velký. K tomu je pak nutno přihlížet při návrhu a určování tepelné pohody člověka.

Tepelnou rovnováhu prostoru určujeme ze tří rovnic. Prvním typem rovnic je rovnice tepelné rovnováhy ochlazovaných stěn. V obecném případě pak řešíme soustavu  $n$  rovnic tepelné rovnováhy ochlazovaných stěn o  $n$  neznámých. Druhým typem rovnice je rovnice rovnováhy vnitřního vzduchu. V závislosti na charakteru prostoru nám přibude k soustavě  $n$  rovnic o  $n$  neznámých jedna až několik rovnic rovnováhy vnitřního vzduchu. Posledním typem rovnice je rovnice tepelné pohody člověka.

### 6.1. Tepelná rovnováha ochlazovaných stěn

K výpočtu střední radiační teploty a následnému určení tepelné pohody prostředí potřebujeme nejdřív určit střední povrchovou teplotu jednotlivých okolních konstrukcí. Určujeme střední povrchovou teplotu jak ochlazovaných, tak i topných ploch. Povrchové teploty získáme řešením soustavy rovnic (6.1). Počet rovnic i neznámých je závislý na charakteru objektu a počtu konstrukcí. Pro každou uvažovanou plochu pak napíšeme jednu rovnici (6.1). Protože v rovnici (6.1) vystupuje teplota vzduchu  $t_i$ , která bývá zpravidla také neznámou, je nutné připojit k soustavě rovnic ještě rovnici tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu. Rovnice (6.1) převzata z [2].

$$\sum [C_0 \cdot e_1 \cdot e_n \cdot \varphi_{1n} \cdot \xi_{1n} \cdot A_n \cdot (t_n - t_1)] = \Lambda_1 \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_e) + \alpha_{k1} \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_i) \quad (6.1)$$

kde:

$\alpha_{k1}$  [W/m<sup>2</sup>.K] – součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně stěny 1

$\varphi_{1n}$  [-] – poměr osálení stěny 1 stěnou  $n$

$\xi_{1n}$  [K<sup>3</sup>] – teplotní činitel pro teploty  $t_1$  a  $t_n$

$e_1$  [-] – poměrná emisivita stěny 1

$e_n$  [-] – poměrná emisivita stěny  $n$

$t_1$  [°C] – střední povrchová teplota stěny 1

$t_n$  [°C] – střední povrchová teplota  $n$ -té stěny

$t_e$  [°C] – venkovní teplota

$\Lambda_1$  [W/m<sup>2</sup>.K] – součinitel tepelné propustnosti stěny 1.

Pro výpočet teplotního činitele v rovnici (6.1) platí vztah (2.15), výpočet poměru osálení provedeme podle kapitoly 3, součinitel tepelné propustnosti  $\Lambda_1$  je vyjádřen rovnicí (6.2). Rovnice (6.2) zohledňuje vedení tepla ve stěně a přestup tepla na vnější straně zdi.

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}}, \quad (6.2)$$

kde:

$s$  [m] – tloušťka stěny

$\lambda$  [W/m.K] – tepelná vodivost materiálu stěny

$\alpha_e$  [W/m<sup>2</sup>.K] – součinitel přestupu tepla na vnější straně stěny.

Tepelnou propustnost lze určit nejenom ze skladby konstrukce, ale také pokud známe součinitel prostupu tepla  $U$  a součinitel přestupu tepla na vnitřní straně stěny. To udává vztah (6.3)

$$\Lambda = \frac{\alpha_i \cdot U}{\alpha_i - U}. \quad (6.3)$$

## 6.2. Rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu

„V prostoru omezeném stěnami  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , jejichž střední povrchové teploty jsou  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , nastává nejen výměna tepla sáláním mezi jednotlivými stěnami, ale také sdílení tepla konvekcí na povrchu stěn. Teplota vnitřního vzduchu pak vyplývá z tepelné rovnováhy vyjádřené rovnicí (6.4)“, viz [1].

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_e) = \sum[\alpha_{kn} \cdot A_n(t_n - t_i)] + \alpha_{kp} \cdot A_p \cdot (t_p - t_i), \quad (6.4)$$

kde:

$V$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] – průtok vzduchu

$\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] – hustota vzduchu

$c$  [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ] – měrná tepelná kapacita vzduchu

$\alpha_{kp}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] – součinitel přestupu tepla konvekcí na teplé straně sálavého panelu

$A_p$  [ $\text{m}^2$ ] – plocha sálavého panelu

$t_p$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – teplota sálavého panelu.

Jak vyplývá z rovnice (6.4), při malých průtocích vzduchu se bude teplota vnitřního vzduchu přibližovat střední teplotě okolních stěn. Naopak při velkých průtocích se rozdíl mezi teplotou vnitřního vzduchu a středními teplotami okolních stěn bude zvětšovat. Může nastat situace, kdy konvekční teplo od okolních nebude stačit na ohřátí přiváděného vzduchu. Potom je nutné navrhnout ohříváč vzduchu pro větrací zařízení.

Vztah (6.4) platí pro případ, kdy by byl sálavý panel součástí konstrukce stropu. Bude-li zavěšen v prostoru, rozšíří se rovnice (6.4) na tvar:

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_e) = \sum[\alpha_{kn} \cdot A_n(t_n - t_i)] + \alpha_{kp} \cdot A_p \cdot (t_p - t_i) + \alpha_{kp}' \cdot A_p' \cdot (t_p' - t_i), \quad (6.5)$$

kde:

$\alpha_{kp}'$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] – součinitel přestupu tepla konvekcí na studené straně sálavého panelu

$A_p'$  [ $\text{m}^2$ ] – plocha sálavého panelu, studená strana

$t_p'$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – teplota sálavého panelu na studené straně

Rovnici (6.5) použijeme v případě, kdy počítáme tepelnou rovnováhu vzduchu v celém prostoru najednou. U objektů vytápěných závěsnými sálavými otopnými plochami ale často bývá teplota vnitřního vzduchu pod rovinou zavěšení sálavých

otopných ploch rozdílná od teploty vnitřního vzduchu nad rovinou zavěšení. Bude-li teplota v horní části haly vyšší nebo nižší záleží mimo jiné na kvalitě střechy a obvodových konstrukcí. Chceme-li zjistit střední hodnotu vnitřní teploty pod panely i nad panely, musíme sestavit dvě rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu, pro spodní a pro horní část haly. Pro spodní část haly bude platit vztah (6.6):

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_e) = \sum[\alpha_{kns} \cdot A_{ns} (t_{ns} - t_i)]. \quad (6.6)$$

Pro horní část haly bude platit vztah (6.7):

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i' - t_i) = \sum[\alpha_{knh} \cdot A_{nh} (t_{nh} - t_i')] + \alpha_{kp} \cdot A_p \cdot (t_p - t_i') + \alpha_{kp}' \cdot A_p' \cdot (t_p' - t_i'), \quad (6.7)$$

Rovnice převzaty z [2].

Do bilance pro tepelnou rovnováhu vnitřního vzduchu spodní části haly bereme v úvahu pouze teplo předané konvekcí od ochlazovaných konstrukcí spodní části haly (index  $s$  v rovnici (6.6)). Protože teplý vzduch stoupá vzhůru, uvažujeme v bilanci pro tepelnou rovnováhu vnitřního vzduchu horní části haly mimo tepla předaného konvekcí od horních ochlazovaných konstrukcí (index  $h$  v rovnici (6.7)) ještě teplo předané konvekcí od sálavých panelů, a to jak z teplé, tak ze studené strany.

### 6.3. Rovnice tepelné pohody

K soustavě rovnic zmíněných v předchozích kapitolách připojíme ještě rovnici tepelné pohody vytápěného prostoru, např. podle vztahu (5.11)

$$t_o = A \cdot t_i + (1 - A) \cdot t_r,$$

kde hodnota operativní teploty  $t_o$  bude známá a bude rovna požadované hodnotě uvedené v [11]. Za střední radiační teplotu dosadíme vztah (4.3). Poměry osálení ve vztahu (4.3) podle [1] vypočítáme k bodu ve středu místnosti ve výšce 1 m nad povrchem podlahy.



#### 6.4. Určení součinitelů přestupu tepla konvekcí

V kapitole 6.1 a 6.2 byly uvedeny výpočetní vztahy pro řešení tepelné rovnováhy stěn a vnitřního vzduchu. Ve všech těchto vztazích vystupovali součinitelé přestupu tepla konvekcí. Součinitele přestupu tepla konvekcí můžeme určit měřením nebo výpočtem. Typické hodnoty součinitelů přestupu tepla konvekcí v praxi při sálavém vytápění uvádí např. [1] a [2]. Výpočtem se součinitele přestupu tepla konvekcí určují buď z kritériálních rovnic, nebo z empirických rovnic zjištěných měřením. Empirickou rovnicí pro výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí je například vztah (5.6). V dalším textu se budeme zabývat určením součinitelů přestupu tepla konvekcí pomocí kritériálních rovnic, které jsou použity ve výpočetní pomůcce.

Prvně je nutné rozlišovat konvekci přirozenou a nucenou. Přirozená konvekce je vyvozena vztlakovými silami na základě rozdílu teplot vzduchu. Nucená konvekce vzniká na základě rozdílu tlaku vyvozeném vnějšími silami, například větracím zařízením. Pro přirozenou konvekci byl v této práci použit vztah dle Michejeva, viz [15].

$$Nu = K \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (6.8)$$

kde:

Nu [-] – Nusseltovo číslo

Gr [-] – Grashofovo číslo

Pr [-] – Prandtlovo číslo

K [-] – koeficient závislý na hodnotě  $Gr \cdot Pr$

n [-] – exponent závislý na hodnotě  $Gr \cdot Pr$

Jedná se o empirickou kritériální rovnici platící pro přirozenou konvekci na svislé stěně. Charakteristickým rozměrem je výška stěny. Hodnoty koeficientu  $K$  a exponentu  $n$  jsou uvedeny v tab. 6.1, která je převzata z [15].

Tab. 6.1 Hodnoty součinitele  $K$  a exponentu  $n$  pro vztah (6.8)

$Gr \cdot Pr$	$K$	$n$
$< 10^{-3}$	0,45	0
$10^{-3}$ až $5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2$ až $2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7$ až $10^{13}$	0,135	1/3

Prandtlovo číslo lze odečíst v tabulkách fyzikálních vlastností vzduchu, Grashofovo číslo se vypočítá ze vztahu (6.9)

$$Gr = \beta \cdot \Delta T \cdot \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \quad (6.9)$$

kde:

$\beta$  [1/K] – izobarický součinitel objemové roztažnosti tekutiny, pro plyny  $\beta = \frac{1}{T}$

$\Delta T$  [K] – teplotní rozdíl, rozdíl povrchové teploty stěny a střední teploty vnitřního vzduchu

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – tíhové zrychlení

$L$  [m] – charakteristický rozměr

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s] – kinematická viskozita vzduchu

U vodorovné plochy musíme rozlišovat, jedná-li se o přestup tepla konvekcí na spodní nebo horní stěně. Dále pro každý z předchozích dvou případů musíme rozlišovat, jedná-li se o chlazení nebo vytápění. Podle [16] pak pro výpočet Nusseltova čísla pro chladnou desku směrem dolů nebo pro teplou desku směrem nahoru platí vztah (6.10).

$$Nu = K \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (6.10)$$

Formálně je vztah (6.10) stejný se vztahem (6.8), ale koeficienty rovnice se liší. Hodnoty koeficientů rovnic udává tab. 6.2. Rovnice platí v rozsahu  $1 < (Gr \cdot Pr) <$

$1,5 \cdot 10^9$ . Charakteristickým rozměrem rovnice je vztah  $L = \frac{A}{O}$ , kde  $O$  [m] je obvod plochy.

Tab. 6.2 Hodnoty součinitele  $K$  a exponentu  $n$  pro vztah (6.10)

<b>Gr · Pr</b>	<b>K</b>	<b>n</b>
1 až 200	0,96	1/6
200 až $10^4$	0,59	1/4
$2,2 \cdot 10^4$ až $8 \cdot 10^6$	0,54	1/4
$8 \cdot 10^6$ až $1,5 \cdot 10^9$	0,15	1/3

Pro případ přestupu tepla z teplé desky směrem dolů nebo chladné desky směrem nahoru platí vztah (6.11).

$$Nu = 027 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (6.11)$$

Pro charakteristický rozměr rovnice platí to samé jako v případě vztahu (6.10), tudíž  $L = \frac{A}{O}$ . Tato kritériální rovnice má platnost v rozmezí  $10^5 < (Gr \cdot Pr) < 10^{10}$ .

Uvažujeme-li v řešeném prostoru uměle vytvořené proudění vzduchu, například větracím zařízením, budeme zjišťovat součinitele přestupu tepla konvekcí pro nucenou konvekci. Pro podélné laminární proudění okolo desky uvádí [15] vztah (6.12)

$$Nu = 0,664 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{2}} \quad (6.12)$$

kde:

Re [-] – Reynoldsovo číslo

Vztah platí pro  $Re \leq 3 \cdot 10^5$ , charakteristickým rozměrem je délka plochy.

Pro podélné turbulentní proudění okolo desky uvádí [15] vztah (6.13)

$$Nu = 0,057 \cdot Pr^{0,78} \cdot Re^{0,78} \quad (6.13)$$

Uvedený vztah platí pro  $Re > 5 \cdot 10^5$  a pro  $Pr = 0,71$ .

Reynoldsovo číslo vypočteme podle vztahu (6.14).

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (6.14)$$

kde:

$w$  [m/s] – rychlost proudění vzduchu

$L$  [m] – charakteristický rozměr dle kritériální rovnice

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s] – kinematická viskozita vzduchu

Známe-li Nusseltovo číslo, můžeme vypočítat střední hodnotu součinitele přestupu tepla konvekcí ze vztahu (6.15).

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot L}{\lambda} \quad (6.15)$$

kde:

$\alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>·K] – součinitel přestupu tepla konvekcí

$L$  [m] – charakteristický rozměr dle kritériální rovnice

$\lambda$  [W/m·K] – tepelná vodivost vzduchu

Fyzikální vlastnosti vzduchu, které dosazujeme do kritériálních rovnic, uvažujeme při teplotě rovné střední teplotě teplotní mezní vrstvy, která se určí ze vztahu (6.16)

$$t_m = \frac{t_s + t_{i,\infty}}{2} \quad (6.16)$$

kde:

$t_m$  [°C] – střední teplota teplotní mezní vrstvy

$t_s$  [°C] – střední teplota stěny

$t_{i,\infty}$  [°C] – teplota vzduchu mimo teplotní mezní vrstvu

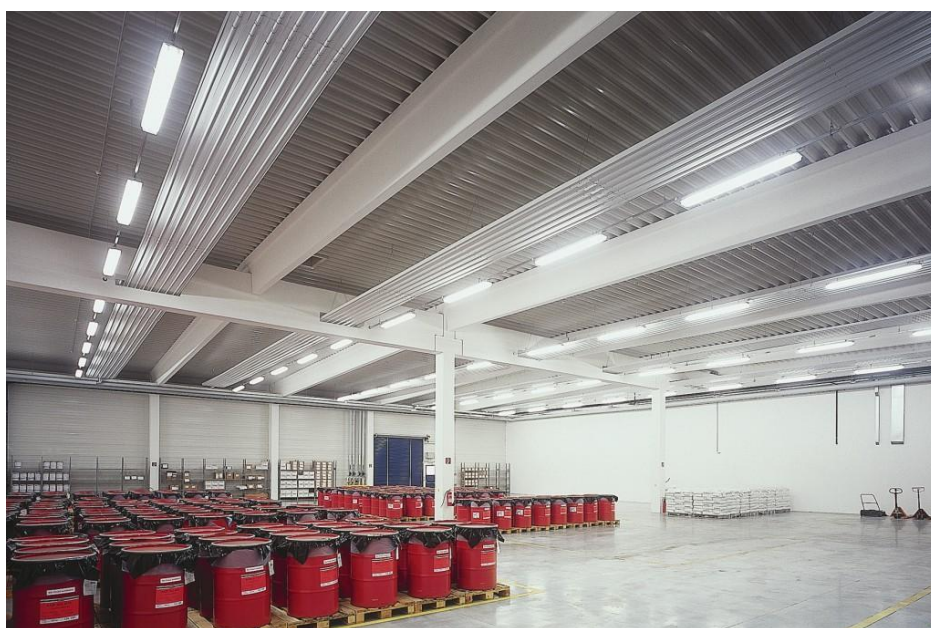
## 7. ZÁVĚSNÉ SÁLAVÉ PANELY

V této kapitole bude stručně popsána konstrukce a použití sálavých panelů.

Nejprve začneme použitím. Sálavé otopné panely se většinou používají pro vytápění rozlehlých objektů. Příkladem takovýchto objektů jsou průmyslové haly nebo třeba tělocvičny. V takovém případě se jedná o teplovodní sálavé panely. Se sálavými panely se ale také můžeme setkat v našich obydlích. V těchto případech se jedná spíše o elektrické sálavé panely, které mají rozdílnou konstrukci i velikost. Také bývají v designovém provedení, aby lépe ladily s interiérem. Tato práce se zaměřuje na první případ, tj. teplovodní sálavé panely sloužící k vytápění rozlehlých objektů.

Konstrukčně si můžeme sálavý panel představit jako potrubí zespona kryté kovovou lamelou a shora kryté tepelnou izolací s hliníkovým plechem. Povrch lamely uvnitř panelu je čistý, nebarvený hliník, který má vysokou odrazivost, aby se minimalizoval přestup tepla sáláním na tepelnou izolaci. Potrubí je kovové, nejčastěji ocelové. Potrubím protéká topná voda o požadovaných parametrech.

Sálavé panely se nejčastěji umísťují pod strop, kde se zavěšují pomocí řetízků nebo lankového systému, ale mohou být i součástí konstrukcí. Někteří výrobci integrují do sálavých panelů i prvky osvětlení. Na obr. 7.1 až 7.3 jsou vyobrazeny sálavé panely. Použity obrázky firmy Kotrbatý s.r.o.



Obr. 7.1 Sálavé panely – montážní hala VW Slovakia, Bratislava



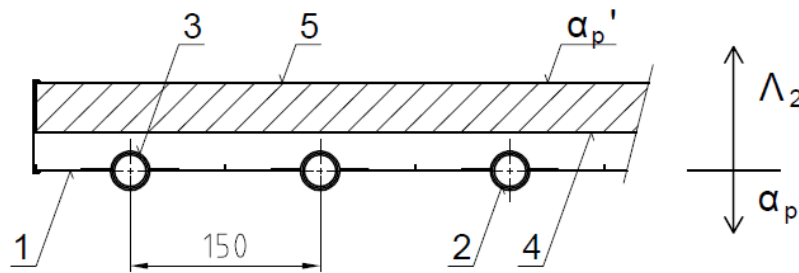
Obr. 7.2 Sálavé panely – montážní hala MEVA, Roudnice nad Labem



Obr. 7.3 Sálavé panely – výrobní hala Richmont-CZ a.s., Týn nad Vltavou

Na obr. 7.3 je vidět integrování osvětlení do sálavých panelů a zavěšení panelů pomocí lankového systému.

Řez panelem je schematicky znázorněn na obr. 7.4.



Obr. 7.4 Příčný řez sálavým panelem - možná konstrukce sálavého panelu

1 – otopná lamela šířky 150 mm, hliníkový plech tl. 0,8 mm

2 – otopná ocelová trubka  $\text{Ø } 28 \times 1,5$  mm

3 – hliníkový pás

4 – tepelná izolace, tl. 40 mm

5 – hliníková fólie

Schematický řez panelem vytvořen podle [16].

## **8. VYTÁPĚNÍ ZÁVĚSNÝMI SÁLAVÝMI PANELE - METODIKA**

Pro kontrolu vytápění závěsnými sálavými panely použijeme metodiku pro návrh vytápění závěsnými sálavými panely a modifikujeme ji tak, aby vyhovovala našim požadavkům. Původní metodika pro návrh vytápění, uvedená v [1], prováděla tepelnou bilanci prostoru podle kapitol 6.1 až 6.3 s tím, že v době, kdy byla tato metodika aktuální, se tepelná pohoda prostředí určovala na základě výsledné teploty, a tudíž rovnice uvedené v 6.3 byly pozměněné. Bilancovaný prostor se rozdělil na dvě části, spodní a horní. Dělicí rovinou byla rovina zavěšení sálavých panelů. Výpočet tepelné rovnováhy stěn a vzduchu se prováděl pro horní i spodní prostor, zatímco tepelná pohoda prostoru se kontrolovala pouze ve spodní části haly. Metodika dále vycházela ze zjednodušujícího předpokladu, že povrchové teploty dolní části haly budou pro všechny obvodové konstrukce téměř stejné, proto je možné je nahradit jedinou společnou konstrukcí, která má zprůměrované tepelné vlastnosti přes plochu a

společnou plochu rovnou součtu jednotlivých ploch. Obdobně byla zjednodušena i bilance horního prostoru. Další zjednodušení vycházelo z předpokladu, že sálavé vytápění se používá hlavně pro průmyslové jednopodlažní objekty, kde jeden rozměr je značně větší než ostatní rozměry. Proto se zanedbávala čela haly a výpočet se prováděl pouze pro pás haly široký 1 m. Výstupem výpočtu podle této metodiky byly povrchové teploty konstrukcí spodní a horní části haly, povrchová teplota panelů a teplota vnitřního vzduchu.

Při výpočtu podle upravené metodiky postupujeme obdobně jako u metodiky podle [1]. Rozdělíme prostor na spodní a horní část. Sestavíme rovnice tepelné rovnováhy stěn a tepelné rovnováhy vzduchu v horní i spodní části. Respektujeme konečnou velikost a tepelně-technické vlastnosti každé stěny. Protože je možné ve výpočetní pomůcce nastavit teplotu na venkovní straně každé konstrukce zvlášť, není výpočet podle této metodiky omezen pouze na jednopodlažní samostatně stojící objekty. V původní metodice byla jednou ze zjišťovaných teplot povrchová teplota sálavých panelů. Jelikož cílem této práce je vytvořit výpočetní pomůcku pro kontrolu vytápění sálavými panely, známe již teplotu topné vody a potažmo i povrchovou teplotu sálavého panelu. Proto do výpočtu povrchových teplot nebude zahrnuta rovnice tepelné pohody, protože se předpokládá, že návrh, který kontrolujeme, byl proveden v souladu s platností rovnice tepelné pohody. Výpočet povrchových teplot bude probíhat iteračně, protože jak povrchová teplota panelů, tak součinitele přestupu tepla konvekcí a další jsou závislé na teplotě vnitřního vzduchu, která je neznámou. Po výpočtu povrchových teplot ochlazovaných konstrukcí a teploty vnitřního vzduchu provedeme výpočet střední radiační teploty. Poměry osálení budeme určovat ve zvolených bodech prostoru, a budou vztaženy k elementárnímu bodu, kvůli možnosti automatizace tohoto výpočtu. Nakonec v každém zvoleném bodě vypočteme operativní teplotu podle rovnice tepelné pohody a porovnáme ji s požadovanými hodnotami dle [11].

Ačkoliv metodika uvedená v [1] je stará více jak padesát let, lze ji s použitím moderních výpočetních technologií použít bez předchozích zjednodušení i nyní, protože metodika vychází z obecně platných fyzikálních zákonů.

V následujících kapitolách budou podrobněji popsány jednotlivé kroky výpočtu a případná další zjednodušení či omezení.



### 8.1. Počáteční podmínky výpočtu

Protože mnoho proměnných ve výpočtech je závislých na neznámých, které výpočtem počítáme, je nutné použít iterační výpočet a mezi každou iterací dopočítávat závislé proměnné z vypočítaných hodnot. Pro nultou iteraci je však nutné hodnoty zvolit. Konkrétně se jedná o teplotu vzduchu, povrchové teploty stěn a panelů. Z těchto hodnot se dopočítávají součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřních stranách konstrukcí. Jak bylo uvedeno v kapitole 6.4, fyzikální vlastnosti vzduchu pro výpočet kritériálních rovnic se určují jako střední teplota z povrchové teploty konstrukce a teploty vzduchu. Proto je nutné tyto teploty volit rozumně, aby výsledné teploty padly do rozmezí hodnot udaných tabulkou vlastností vzduchu a výpočet mohl být proveden.

### 8.2. Určení povrchových teplot ochlazovaných obvodových konstrukcí

Střední povrchovou teplotu obvodových konstrukcí určíme z rovnice (6.1).

$$\Sigma[C_0 \cdot e_1 \cdot e_n \cdot \varphi_{1n} \cdot \xi_{1n} \cdot A_n \cdot (t_n - t_1)] = \Lambda_1 \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_e) + \alpha_{k1} \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_i)$$

Rovnice sestavíme pro každou konstrukci. Uvažujeme, že dělicí rovina (rovina zavěšení panelů) je tvořena panely a zbytek roviny je vyplněn fiktivní stěnou s nulovou tloušťkou, nekonečnou vodivostí a emisivitou rovnou emisivitě černého tělesa. Teplotu této plochy uvažujeme do výpočtů konstantní. Díváme-li se na tuto plochu shora (plocha sálá do horní části haly), bude mít teplotu podlahy. Díváme-li se na plochu zdola (plocha sálá do spodní části prostoru), bude mít teplotu střechy. V případě, že střecha obsahuje světlík, rozdělí se fiktivní plocha na vícero fiktivních ploch a plocha příslušející střeše bude mít teplotu střechy, plocha příslušející světlíku bude mít teplotu světlíku. Fyzikálně správně by se teploty fiktivních ploch měly počítat obdobně, jako střední radiační teplota, viz ukázka výpočtu ve [2], ale díky předpokládané rozlehlosti spodní části haly a nízké výšce horní části haly budou mít nejvyšší poměr osálení právě zmíněné konstrukce, čímž bude vliv jejich teplot na teplotu fiktivní stěny zásadní. Mezi jednotlivými iteracemi bude vždy povrchová teplota fiktivních stěn upravena podle vypočtené povrchové teploty příslušných ochlazovaných konstrukcí.

Při sestavování soustavy rovnic (6.1) pro spodní část prostoru bude na levé straně rovnice součet všech tepelných toků sáláním od spodních stěn prostoru, od teplých částí panelů a fiktivních stěn patřících do spodní části prostoru. Za teplotu

vzduchu se na pravé straně bude dosazovat teplota vnitřního vzduchu ve spodní části prostoru. Teplota  $t_e$  na pravé straně rovnice vyjadřuje teplotu v jednom ze tří následujících případů. Pokud se jedná o stěnu sousedící s venkovním prostředím, vyjadřuje teplota  $t_e$  venkovní výpočtovou teplotu. Jedná-li se o stěnu sousedící s vytápěným nebo temperovaným prostorem, bude teplota  $t_e$  teplotou sousedního prostoru. Bude-li se jednat o podlahu, bude teplota  $t_e$  vyjadřovat teplotu zeminy. Pro panely a fiktivní konstrukce rovnice tepelné rovnováhy nesestavujeme. Obdobným způsobem postupujeme pro konstrukce horní části haly.

### 8.3. Výpočet teploty vnitřního vzduchu

Teplotu vnitřního vzduchu určíme z rovnic (6.6) a (6.7).

Rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu spodní části haly:

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_e) = \sum[\alpha_{kns} \cdot A_{ns} (t_{ns} - t_i)].$$

Rovnice tepelné rovnováhy vnitřního vzduchu horní části haly:

$$V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i' - t_i) = \sum[\alpha_{knh} \cdot A_{nh} (t_{nh} - t_i')] + \alpha_{kp} \cdot A_p \cdot (t_p - t_i') + \alpha_{kp}' \cdot A_p' \cdot (t_p' - t_i').$$

V rovnici (6.6) je na pravé straně součet všech toků konvekce z okolních ochlazovaných stěn spodního prostoru. Do celkové bilance vnitřní teploty vzduchu spodního prostoru nebereme v úvahu sálavé panely ani fiktivní stěny. Teplota  $t_e$  na levé straně rovnice (6.6) vyjadřuje teplotu přiváděného vzduchu. Počítáme-li objekt větraný venkovním vzduchem bez jeho tepelné úpravy, bude teplota  $t_e$  rovna venkovní teplotě. Uvažujeme-li, že v objektu bude instalován větrací systém s ohřevem nebo rekuperací, bude teplota  $t_e$  rovna teplotě za ohřívačem nebo výměníkem zpětného získání tepla.

Obdobně postupujeme u rovnice (6.7) pro horní část prostoru, s tím rozdílem, že na pravé straně přičteme ještě toky konvekce z povrchů sálavých panelů, a to jak z teplé spodní části, tak z chladné horní části. Konvekci z fiktivních stěn neuvažujeme ani v horní části haly.

#### 8.4. Výpočet povrchové teploty panelů

Pro určení tepla sdíleného konvekcí a sáláním je potřeba znát povrchovou teplotu na spodní, ale i horní straně panelu. V [2] byl odvozen vztah pro povrchovou teplotu otopné plochy odpovídající případu na obr. 7.4. Vztah byl odvozen z jednorozměrného vedení tepla v desce s válcovými zdroji tepla. Pro povrchovou teplotu na dolní straně platí vztah (8.1)

$$t_p = t_i + (t_m - t_i) \cdot \frac{\operatorname{tgh}\left(m \cdot \frac{l}{2}\right)}{m \cdot \frac{l}{2}} \quad (8.1)$$

kde:

$t_p$  [°C] – střední povrchová teplota panelu na spodní straně;

$t_m$  [°C] – střední teplota otopné vody;

$t_i$  [°C] – teplota vnitřního vzduchu ve spodní části objektu;

$m$  [m] – součinitel  $m$ ;

$l$  [m] – rozteč mezi trubkami.

Povrchová teplota na horní straně se pak vypočítá ze vztahu (8.2)

$$t_p' = t_i' + \frac{\Lambda_2}{\alpha_p'} \cdot (t_m - t_i') \cdot \frac{\operatorname{tgh}\left(m \cdot \frac{l}{2}\right)}{m \cdot \frac{l}{2}} \quad (8.2)$$

kde:

$t_p'$  [°C] – střední povrchová teplota panelu na horní straně;

$t_i'$  [°C] – teplota vnitřního vzduchu v horní části objektu;

$\Lambda_2$  [W/m<sup>2</sup>·K] – tepelná propustnost části sálavého panelu nad osou trubek;

$\alpha_p'$  [W/m<sup>2</sup>·K] – součinitel přestupu tepla konvekcí na horní straně panelu.

Součinitel  $m$  ze vztahů (8.1) a (8.2) vypočítáme ze vztahu (8.3)

$$m = \sqrt{\frac{(\alpha_p + \Lambda_2)}{\lambda_L \cdot a_L}} \quad (8.3)$$

kde:

$\alpha_p$  [W/m<sup>2</sup>·K] – součinitel přestupu tepla konvekcí na spodní straně panelu;

$\Lambda_2$  [W/m<sup>2</sup>·K] – tepelná propustnost části sálavého panelu nad osou trubek;

$\lambda_L$  [W/m·K] – tepelná vodivost lamely;

$a_L$  [m] – tloušťka lamely.

Jak je patrné ze vztahů (8.1) a (8.2) pro výpočet povrchových teplot sálavých panelů, povrchové teploty sálavých panelů jsou závislé na teplotě vnitřního vzduchu ve spodní nebo horní části objektu. V každé iteraci považujeme teplotu panelu za známou a konstantní. Po každé iteraci vypočítáme teplotu panelu na spodní i horní straně podle rovnic (8.1) a (8.2).

### 8.5. Kontrola tepelné pohody prostředí

Jakmile vypočítáme povrchové teploty ochlazovaných konstrukcí a teploty vnitřního vzduchu, můžeme přejít ke kontrole tepelné pohody prostředí. Tepelnou pohodu prostředí budeme kontrolovat podle vzorce (5.11)

$$t_o = A \cdot t_i + (1 - A) \cdot t_r.$$

Součinitel A ve vzorci je závislý na rychlosti proudění vzduchu. Rychlost proudění vzduchu bude zadána uživatelem na základě jím provedených výpočtů mimo tuto výpočetní pomůcku nebo na základě jeho kvalifikovaného odhadu.

Pro výpočet operativní teploty, podle které budeme posuzovat tepelnou pohodu prostředí, potřebujeme znát střední radiální teplotu. Tu vypočteme ze vztahu (4.3).

$$t_r = \sqrt[4]{\varphi_{a1} \cdot T_1^4 + \varphi_{a2} \cdot T_2^4 + \dots + \varphi_{an} \cdot T_n^4} - 273,$$

Výpočet podle (4.4) není možný, protože se předpokládá, minimálně u sálavých panelů, že bude jejich povrchová teplota výrazně odlišná od povrchové teploty ochlazovaných konstrukcí, a tudíž bychom se použitím vztahu (4.4) mohli dopustit velké chyby v určení střední radiální teploty.

Pro výpočet střední radiační teploty potřebujeme znát poměry osálení. Předpokládáme, že konstrukce účastníci se přenosu tepla sáláním ve spodní části objektu jsou obdélníkového tvaru. A protože výpočet potřebujeme zautomatizovat, je výhodné určovat poměr osálení podle vztahu (3.9).

$$\varphi_{12} = \frac{1}{8} - \frac{1}{4\pi} \tan^{-1} \frac{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}{a \cdot b}.$$

Poměr osálení podle (3.9) je vztažen k elementárnímu bodu, ačkoliv střední radiační teplota pro kontrolu tepelné pohody prostředí by se měla určovat vzhledem k povrchu lidského těla. Avšak podle [1] je rozdíl v poměru osálení elementárního bodu stěnami k poměru osálení povrchu lidského těla stěnami velmi malý, neleží-li stěny velmi blízko, což předpokládáme.

Střední radiační teplotu budeme určovat pouze ve spodní části prostoru v rovinách definovaných uživatelem. Výpočet bude probíhat v krocích definovaných uživatelem. V každé rovině se postupuje ve dvou směrech, krok je v každém směru stejný. V každém bodě roviny, ve které se kontroluje tepelná pohoda prostředí, bude vypočítána střední radiační teplota, která bude společně s koeficientem  $A$  a teplotou vnitřního vzduchu dosazena do rovnice (8.4).

$$t_{o,vyp} = A \cdot t_i + (1 - A) \cdot t_r. \quad (8.4)$$

Takto vypočtená hodnota se porovná s požadovanou hodnotou dle [11].

$$\Delta = t_{o,vyp} - t_{o,teor} \quad (8.5)$$

Podle hodnoty  $\Delta$  z rovnice (8.5) bude zvolena barva bodu v teplotní mapě náležejícímu řešenému bodu. Pokud se hodnota  $\Delta$  pohybuje v mezích udávaných [11], je dosaženo tepelné pohody prostředí. Optimální, maximální a minimální hodnoty operativní teploty to jsou uvedeny v [11], ale uživatel má možnost nastavit si intervaly hodnot  $\Delta$  sám, takže může posuzovat i případy, které nejsou v [11] postihnuty.

## **9. VÝPOČETNÍ POMŮCKA – PŘEDSTAVENÍ A POPIS FUNKCÍ**

V této kapitole se budu snažit srozumitelně popsat výpočetní pomůcku, její funkce a způsob fungování, omezení použití, omezení při užívání a její klady a zápory.

Jedna kapitola bude také věnována možným úpravám a budoucím rozšířením. V poslední kapitole pak uvedu vzorový výpočet haly, včetně grafických výstupů.

### **9.1. Obecně o výpočetní pomůcce**

Výpočetní pomůcka pro kontrolu vytápění sálavými panely byla navržena tak, aby její používání bylo v rámci možností co nejjednodušší, a aby se dala v budoucnu jednoduše rozšířit o případná další vylepšení. Na rozdíl od předchozí pomůcky pro návrh vytápění sálavými panely, která byla napsána jako samostatný program v programovacím jazyce Visual Basic 2008, byla tato výpočetní pomůcka navržena jako dokument programu MS Excel. Pro tento krok jsem se rozhodl poté, co se u předchozí výpočetní pomůcky objevily problémy s kompatibilitou, které byly zapříčiněny nutností užívání knihoven Microsoft .NET Framework 3.5 nebo vyšší a chod programu závisel na softwarovém vybavení jednotlivých počítačů, na kterých byl spouštěn. Nyní podobné problémy nepředpokládám, protože výpočetní pomůcka byla napsána bez použití speciálních systémových komponent a kompatibilita a stabilita jsou řešeny v rámci fungování programu MS Excel, který je vyvíjen firmou Microsoft. Tato výpočetní pomůcka byla vytvořena jako dokument v MS Excel 2007 a měla by být kompatibilní se všemi novějšími verzemi programu MS Excel.

### **9.2. Zadávání vstupů a výpočet**

V této kapitole stručně popíšu jednotlivé listy výpočetní pomůcky a způsob, jakým zadávat hodnoty, a čeho se vyvarovat, abychom z výpočetní pomůcky dostali hodnotná data. Dále stručně popíšu postup výpočtu, protože jeho pochopení pomůže omezit možné chyby při zadávání vstupních hodnot a celkově při manipulaci s výpočetní pomůckou.

#### **9.2.1. Popis jednotlivých listů**

Celá výpočetní pomůcka obsahuje několik listů. Některé z nich jsou určeny k tomu, aby v nich uživatel měnil údaje a tím nastavoval chování programu, jiné jsou určeny k výpočtům a je doporučeno do těchto listů pokud možno vůbec nezasahovat.

Pole, která by měl uživatel vyplnit, jsou vyznačena barevně. Pokud není uvedeno jinak, tak bílá pole se neupravují. Více o jednotlivých výjimkách v kapitole 8.2.2.

### **List – Skladby konstrukcí**

Tento list slouží k nadefinování jednotlivých obvodových konstrukcí. Počet konstrukcí, se kterými umí výpočetní pomůcka pracovat je omezený pouze maximálním možným počtem řádku listu programu MS Excel. Kopírovat lze celé konstrukce. Pokud má konstrukce více vrstev než 4 (počet vrstev uvažovaný ve výpočetní pomůcce), stačí vložit řádek a roztáhnout vzorce do vložených buněk. Jméno každé konstrukce musí být unikátní, jinak hrozí, že funkce programu MS Excel SVYHLEDAT nevrátí správný výsledek. Značení konstrukcí se předpokládá takto: obvodová stěna má zkratku OS + číslo, otvory do stěn mají zkratku OOOZ + číslo, podlaha má zkratku NPDL + číslo a střecha OSTRECH + číslo. Pojmenování všech obvodových konstrukcí mimo oken je volitelné uživatelem, označení otvorů musí zůstat v uvedeném formátu, jinak by výpočetní pomůcka nedokázala rozeznat otvory.

### **List – Konstrukce**

V listu Konstrukce uživatel nadefinuje geometrii obvodových konstrukcí a také zde zadává údaje týkající se výměny vzduchu. Tabulku lze rozšířit na libovolný počet řádků, je však zakázané přidávat, přesouvat či mazat sloupce. Při rozšiřování tabulky je dále nutné změnit oblast pojmenovanou „tabulka\_kce\_def“ na oblast odpovídající nové velikosti tabulky. Z listu Konstrukce se pak také spouští výpočet.

### **List – Panely**

V listu Panely uživatel nadefinuje velikost a typ panelů, teplotní spád na panelu a další vlastnosti. Obdobně jako u listu Konstrukce, platí i zde možnost libovolného přidávání řádků, ale zákaz manipulování se sloupci. Pro novou tabulku je nutné změnit velikosti oblasti s názvem „tabulka\_panely\_def“.

### **List – Data\_ksi**

Pokud celkový počet konstrukcí nepřesáhne 40 (konstrukce i panely dohromady), nebude uživatel v tomto listu nic měnit, vše se vyplní automaticky. Pokud

nastane případ, že uživatel bude potřebovat více jak 40 konstrukcí, lze tuto tabulku rozšířit, vzorce se ale musí upravit ručně.

### **List – Data\_fi**

V listu Data\_fi uživatel vyplňuje pouze barevně vyznačená pole. Bílá pole se dopočítají automaticky na základě pravidla reciprocity. Plochy konstrukcí se ale bohužel vkládají až při spuštění výpočtu, proto se uživatel musí řídit indexy na levé a horní straně. Indexy odpovídají číslu indexů v listu Konstrukce a Panely. Řádky v listu Data\_fi znamenají osálanou plochu, sloupce pak plochu sálající. Pokud je celkový počet konstrukcí větší jak 40, musí uživatel manuálně rozšířit tabulku s respektováním všech vzorců.

### **List – Data**

List Data obsahuje tabulky potřebné pro výpočet. Obsah tabulek se vyplňuje automaticky. Na listu Data v pravé části je tabulka s barevným označením. Barevně vyznačená pole, udávající intervaly může uživatel měnit a ovlivnit tak hodnocení tepelné pohody prostředí.

### **List – Výpočet**

List Výpočet obsahuje hodnoty potřebné k výpočtu povrchových teplot. Uživatel tento list nijak neupravuje.

### **List – Výpočetní pomůcky\_fi**

List Výpočetní pomůcky\_fi obsahuje zpracované vztahy pro výpočet poměrů osálení podle kapitoly 3. Schémata i vzorce jsou zde pro přehlednost uvedeny. Obsah listu slouží uživateli jako pomůcka při určování poměrů osálení do listu Data\_fi. Uživatel vyplňuje pouze barevně označená pole.

### **List – Tabulky**

List Tabulky obsahuje například tabulku fyzikálních vlastností vzduchu, nebo tabulku s jednotlivými typy sálavých panelů a jejich vlastnostmi. Tyto tabulky může uživatel měnit a libovolně přesouvat za předpokladu, že změní velikost příslušné oblasti a nebude jakkoliv měnit počet a umístění sloupců v rámci tabulky.



## List – Výsledek

Posledním listem je list Výsledek. V tomto listu se nedoporučuje nic měnit ani s ním jinak manipulovat. Obsah listu je měněn skriptem a po ukončení výpočtu je výsledek uložen jako nový soubor obsahující list výpočtu. S tímto souborem je pak možné libovolně manipulovat.

Nakonec je nutné zmínit jeden důležitý fakt. Výpočetní pomůcka byla vytvořena tak, aby nebyla omezena počtem konstrukcí, se kterými umí pracovat, což ovšem znamená, že délka jednotlivých cyklů výpočtu není předem dána, je proměnná. Proto je nutné při rozšiřování nebo naopak zmenšování rozměrů jednotlivých tabulek umístit na konec rozšiřované tabulky znak „=“, který byl zvolen jako prvek určující konec dané tabulky. Jedná se o tabulku konstrukcí na listu Konstrukce („=“ vkládáme do sloupce „index“), tabulku panelů na listu Panely („=“ vkládáme do sloupce „index“) a tabulky na listech Data\_ksi („=“ vkládáme do sloupce „t<sub>p</sub>“) a Data\_fi („=“ vkládáme do sloupce „S<sub>p</sub>“). Zapomenutím znaku „=“ se dostane program do nekonečné smyčky, která v lepším případě skončí chybou přetečení některé proměnné, v horším případě pádu programu MS Excel a ztrátě neuložených dat.

### 9.2.2. Zadávání vstupních údajů

Tato výpočetní pomůcka byla koncipována pouze jako pomůcka, nikoliv plnohodnotný program určený pro laickou veřejnost. Pro její obsluhování se předpokládá alespoň průměrná znalost ovládání programu MS Excel, obecná znalost fyzikální podstaty problematiky a určitá míra znalosti problematiky sálavého vytápění. Pomůcka není ve většině případů chráněna proti špatnému typu vstupních hodnot (např. číslo zaměněné za text) ani proti zadání nesmyslně velké, či malé hodnoty. To platí hlavně v případě teplot, ze kterých se vypočítávají součinitele přestupu tepla konvekcí. V následujících odstavcích popíši úskalí zadávání hodnot do výpočetní pomůcky. Nedodržení následujících doporučení bude mít za následek nevěrohodné výsledky nebo přímo poškození výpočetní pomůcky.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, uživatel zadává pouze hodnoty do polí označených barvou a ohraničených tenkou čarou. Pokud je vstup složitější, bývá v názvu sloupce vložena poznámka s vysvětlením, které by mělo navést uživatele

k správnému zadání. Výjimkou neoznačenou barvou jsou pole pro teplotu vzduchu  $t_i$  a  $t_i'$  na listu Konstrukce a povrchové teploty  $t_p$  na listu Konstrukce a Panely. Tyto hodnoty je nutné rozumě zvolit před začátkem iteračního výpočtu. Poslední výjimkou je hodnota na listu Konstrukce ve sloupci nazvaném „obdélník“. Standardně je nastavena na hodnotu 1. Uživatel změní na hodnotu 0 pouze u jedné jediné konstrukce, a tou je doplňková fiktivní stěna spodního prostoru, která společně s panely a případnými otvory pro světlíky tvoří dělicí rovinu mezi spodním a horním prostorem objektu.

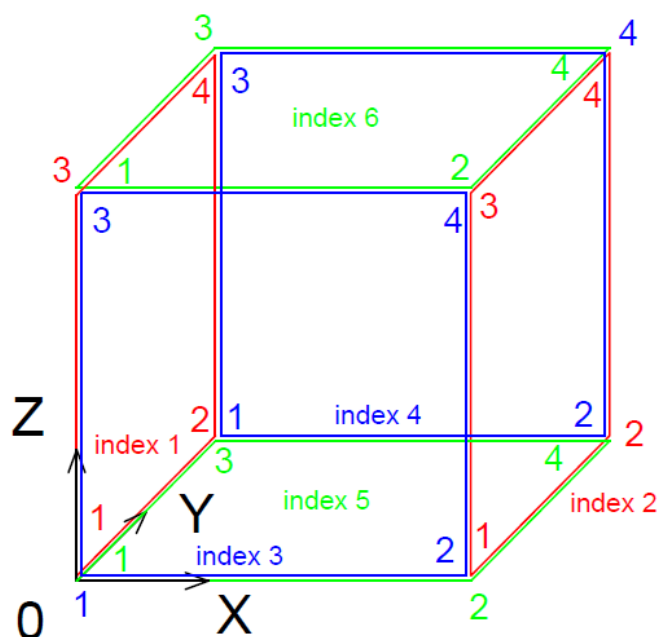
Aby výpočetní pomůcka byla co nejuniverzálnější, je uživatelům umožněno pro každou konstrukci zvolit teplotu z venkovní strany konstrukce. Mohou nastat tři případy. Z venkovní strany konstrukce bude venkovní prostředí, pak uživatel nechá pole prázdné, nebo z druhé strany bude vytápěný nebo temperovaný prostor, pak uživatel zadá číselně teplotu druhého prostoru. Poslední možností je, že se jedná o konstrukci sousedící se zeminou. Pak uživatel vyplní „z“ a ve výpočtu se bude počítat s teplotou zeminy, kterou uživatel již dříve definoval.

Posledními, a bezesporu nejsložitějšími a také nejdůležitějšími údaji, které uživatel zadává je kolonka orientace a rozměry ploch. Oboje spolu úzce souvisí. Kolonka orientace bude obsahovat textový řetězec písmen a čísel v přesně stanoveném pořadí. Tento údaj je asi nejdůležitějším údajem, který uživatel vyplňuje, protože podle něho probíhá veškeré rozhodování, jak se s daným řádkem naložit, ať už pro potřeby výpočtu povrchových teplot, nebo pro výpočet poměrů osálení a střední radiační teploty. Řetězec se píše ve tvaru AXBCC, kde význam jednotlivých písmen je shrnut v tab. 8.1. Konstrukce je vhodné zadávat tak, aby po sobě následovaly nejdříve konstrukce spodní části prostoru, poté fiktivní plochy spodní části, poté fiktivní plochy horní části a nakonec plochy horní části. Panely budou vždy na konci, protože jsou skriptem řešeny až po konstrukcích. Nutno ještě podotknout, že textový řetězec v poli „orientace“ se zadává malými písmeny. Protože hodnota znaku „s“ (malé s) není stejná jako hodnota znaku „S“ (velké s), nevyhodnotila by výpočetní pomůcka správně značení ploch a výpočet by neproběhl správně.

Tab. 9.1 Význam jednotlivých členů „orientace“

Označení	Význam
A	
s	Písmenem „s“ značíme všechny plochy patřící do spodní části prostoru, včetně sálavých panelů
h	Písmenem „h“ značíme všechny plochy patřící do horní části prostoru, neplatí pro sálavé panely
X	
1-2	Platí pro plochy, mající konstantní souřadnici X, indexy 1 a 2 může uživatel od sebe odlišit rovnoběžné stěny, pro výpočet nemá hodnota indexu žádný význam
3-4	Platí pro plochy, mající konstantní souřadnici Y, indexy 3 a 4 může uživatel od sebe odlišit rovnoběžné stěny, pro výpočet nemá hodnota indexu žádný význam
5-6	Platí pro plochy, mající konstantní souřadnici Z, indexy 5 a 6 může uživatel od sebe odlišit rovnoběžné stěny, indexem 6 se značí stropní konstrukce
B	
p	Písmenem „p“ se značí sálavé panely, uvažuje se, že sálavé panely jsou součástí pouze spodní části prostoru (alespoň označením)
f	Písmenem „f“ se značí fiktivní stěny dělící horní a spodní prostor, fiktivní stěny definujeme vždy v párech, jednou s indexem „s“ a jednou s indexem „h“, aby bylo možné nastavit jinou teplotu sáláním dolů a jinou teplotu sáláním nahoru
CC	
1-99	Udává číslo indexu konstrukce, po které daná plocha přebírá mezi iteracemi teplotu, vyplňuje se pouze pro fiktivní plochy, jinak se nechává prázdné, čísla menší než 10 se vyplňují bez 0

Rozměry ploch se zadávají čtyřmi body se souřadnicemi X, Y a Z. Z toho vyplývá omezení výpočetní pomůcky na výpočet pouze s pravoúhlými plochami (čtverce, obdélníky). Při zadávání souřadnic bodů si uživatel musí dát pozor, aby rozměry plochy ležely v rovinách definovaných „orientací“. Výpočetní pomůcka není proti tomuto typu chyb nijak chráněná. Na obr. 9.1 je znázorněno označení souřadnicových os a označení ploch v souladu s tab. 9.1.



Obr. 9.1 Značení ploch a bodů

Na obr. 9.1 jsou černou barvou naznačeny souřadnicové osy a počátek souřadnice. Červenou barvou jsou značeny plochy podle kategorie X hodnoty 1 a 2 z tab. 9.1. Červená čísla 1-4 znamenají označení bodu, pro který uživatel zadává souřadnice. Necht' zobrazuje obr. 9.1 plochy spodní části prostoru, pak pro plochu s orientací s1 bude mít bod 1 souřadnice [0,0,0].

Po zadání všech bodů konstrukce dojde k vypočítání plochy konstrukce. V případě, že za konstrukcí následuje konstrukce označená „oov“, dojde k odečtení plochy této konstrukce, od konstrukce předchozí (odečte se plocha otvoru). Pomůcka umí od jedné konstrukce odečíst až dva otvory. V případě, že má daná konstrukce více jak dva otvory, je nutné konstrukci rozdělit na více menších konstrukcí a od nich otvory odečíst.

Když uživatel zadá všechny potřebné hodnoty, může začít výpočet. Toho docílí tlačítkem v listu Konstrukce. Po kliknutí na tlačítko začít výpočet se objeví formulář, na kterém lze zadat poslední hodnoty před začátkem výpočtu. Volí se zde počet iterací, roviny vykreslování a kroky vykreslování a v neposlední řadě i požadovaná operativní teplota. Při zadávání je nutné vzít v úvahu, že skripty dělají rozdíl mezi desetinnou tečkou a čárkou, a že záleží na tom, jakou má uživatel nastavenou lokalizaci v programu MS Excel potažmo v operačním systému. Důležité je mít správnou hodnotu nastavenou

předtím, než opustíte políčko, které zadáváte, jinak se objeví chybová hláška, která přeruší výpočet. Pro českou lokalizaci se používá desetinná čárka.

### 9.2.3. Výpočet povrchových teplot a operativní teploty

Poté co uživatel úspěšně zadá i poslední údaje na formuláři je tázán, zdali chce spustit výpočet. Po odsouhlasení začne výpočetní pomůcka kopírovat data z listu Konstrukce a Panely do listu Data. Na základě roznásobení a následné analýzy vzorců (6.1), (6.6) a (6.7) byl sestaven algoritmus, který vytvoří matici koeficientů  $A$  z rovnic pro každou plochu a pro tepelnou rovnováhu vzduchu. Dále vytvoří vektor pravé strany rovnic  $b$ . Pro matici  $A$  a vektor  $b$  platí:

$$A \cdot \vec{x} = \vec{b} \quad (9.1)$$

Pokud je matice  $A$  čtvercová a její determinant  $\det A \neq 0$ , pak je soustava řešitelná a má jedno řešení. Vytvoříme inverzní matici  $A^{-1}$ , kterou vynásobíme vztah (9.1) zleva. Získáme vztah (9.2)

$$\vec{x} = A^{-1} \cdot \vec{b} \quad (9.2)$$

kde:

$\vec{x}$  vektor povrchových teplot a teplot vnitřního vzduchu.

Vypočtené povrchové teploty a teploty vzduchu dosadíme zpět do listu Konstrukce a Panely, přepočítáme obsah listu, čímž dostaneme nové hodnoty součinitelů přestupu tepla konvekcí a povrchové teploty panelů. Postup opakujeme, dokud nedosáhneme požadovaný počet iterací nebo pokud rozdíl teploty vzduchu ve spodní části místnosti mezi jednotlivými iteracemi nebude menší než nastavený rozdíl. Pro představu, na hale z případové studie stačilo 10 iterací pro rozdíl menší než 0,01. Po 20 iteracích byl již rozdíl menší než 0,0001. Při jednotlivých iteracích obrazovka problikává a probíhá označování jednotlivých částí listu Výpočet. Je to dáno způsobem, kterým funguje vkládání vzorců do buněk pomocí skriptů Visual Basic. Během výpočtu i vykreslování výsledků je doporučeno neklikat nikam do oblasti aktivního listu, ani přepínat mezi listy. Může pak dojít k chybě, kdy se pomůcka odkazuje na výběr, který už dávno není kvůli uživateli aktivní. Výpočet by pak byl přerušen a bylo by nutné ho opakovat.

Po vypočítání povrchových teplot a teploty vzduchu se přejde k výpočtu střední radiační teploty a operativní teploty. Výpočet probíhá postupně v jednotlivých rovinách v uživatelem definovaných krocích, kdy se generují souřadnice bodu, vůči kterému se počítá poměr osálení podle vztahu (3.9). Souřadnice bodu odpovídají souřadnicím buňky, do které se následně vloží rozdíl mezi vypočtenou operativní teplotou a požadovanou operativní teplotou podle [11]. Barevné rozlišení probíhá na základě podmíněného formátování buňky. Obsah buněk je porovnáván s hodnotami intervalů, které byly nastaveny v listu Data. Vykreslování výsledků probíhá tolikrát, v kolika rovinách si uživatel přeje výsledky vykreslit, maximálně však ve třech rovinách.

#### 9.2.4. Vykreslování výsledků

Před každým výpočtem se vykreslí hlavička výsledku, měřítko a obrys haly. Během vykreslování se nesmí přepínat do jiného listu. Měřítko jednotlivých os je vypočítáváno na základě velikosti kroku a minimální vzdálenosti pro čitelnost textu. Výpočetní pomůcka je do obrysu haly schopná vykreslit v rovině XY obrys sálavých panelů a otvorů ve stěně a střeše. Při hodnocení výsledků z teplotní mapy může být znalost umístění otvorů výhodou. Otvory svým umístěním a rozměry nemusí přesně odpovídat nastavenému umístění a rozměrům. V každém směru se jejich umístění a rozměr mohou lišit až o dva kroky vlivem zaokrouhlování. Při nižších hodnotách kroku bude odchylka nižší. Doporučená hodnota kroku pro vykreslování je nižší než 0,1 m. Vykreslování otvorů se dá povolit/zakázat před začátkem výpočtu. Před vykreslováním výsledku je doporučeno pro list Výsledek použít funkci Lupa a přiblížit list na maximum. Program Excel je, obzvláště při malém kroku, velmi zpomalen vykreslováním buněk (ne ale vykreslováním buněk s výsledky, nýbrž buněk obecně). Přiblížením lze dosáhnout značného zrychlení vypočítávání výsledku. Protože překreslování probíhá pouze na menším počtu viditelných buněk. Po skončení vykreslování výsledku v každé rovině výpočetní pomůcka uloží výsledek jako nový soubor programu Excel s kopií listu Výsledek do adresáře, ze kterého je spouštěn původní soubor. Je zde také možnost uložit výsledky do PDF, má to ovšem svá omezení. Ukládání do PDF jde pouze v případě, že má uživatel stažené rozšíření pro MS Office pro ukládání do PDF, nebo jeho verze MS Office toto ukládání již podporuje. Ukládání navíc probíhá obdobně jako tisk, ukládá se po listech o velikostech listů papíru. U objektů vytápěných sálavými panely dost často jeden rozměr převyšuje

ostatní, což znamená, že se výsledek nedá umístit na jediný papír běžné velikosti. Naneštěstí MS Excel neumí nastavit fiktivní formát papíru. Abychom předešli nechtěnému kouskování výsledku na jednotlivé stránky, stačí při ukládání výsledku zvolit tiskárnu schopnou nastavit libovolný rozměr papír a nastavit si takový rozměr papíru, při kterém bude výsledek na jednom listu. Poté stačí pouze zrušit výběr tiskárny. Skript zajišťující ukládání si již zjistí nastavení a použije velikost papíru podle posledně nastavené tiskárny a výsledek uloží do PDF do adresáře s původním souborem.

### 9.3. Možné úpravy a rozšíření výpočetní pomůcky

V současném stavu je výpočetní pomůcka napsaná tak, že je na uživateli, aby sám kontroloval vstupy programu a tím zamezil nepravdivým výsledkům nebo ztrátě dat. Nejdůležitější úpravou by proto bylo upravení uživatelského rozhraní tak, aby kontrolovalo vstupy uživatele a upozornilo ho na možné chyby.

Jak jsem již zmínil v předchozí kapitole, bezesporu největší výhodou této výpočetní pomůcky je skutečnost, že je napsaná pro program MS Excel, který je běžnou součástí softwarového vybavení snad každé projekční kanceláře. Již z principu fungování dokumentů MS Excel je tudíž vcelku jednoduché přidávat listy nebo jednotlivé dokumenty mezi sebou propojovat. Výpočetní pomůcku pro kontrolu vytápění sálavými panely by tudíž bylo možné poměrně jednoduše upravit tak, aby mohla stejným způsobem sloužit i pro komplexnější návrh vytápění sálavými panely.

Dalším z možných rozšíření výpočetní pomůcky by bylo zautomatizování výpočtu poměrů osálení jednotlivých ploch vůči sobě, což by značně snížilo časovou náročnost celého výpočtu. Problémem tohoto rozšíření je fakt, že by nejdříve bylo potřeba prokázat obecnou platnost užitých vzorců na výpočet poměrů osálení pro libovolné geometrické konfigurace.

Neposlední úpravou, která by stála za zvážení, je úprava výpočtu povrchových teplot tak, aby bylo možné počítat i projekty s podlahovým, stropní a stěnovým vytápěním, či vytápěním světlymi a tmavými zářiči.

## 9.4. Případová studie – vzorový výpočet

Jak jsem uvedl na začátku této kapitoly, bude zde proveden výpočet jednoho již realizovaného projektu. Jedná se o projekt realizovaný firmou Kotrbatý s.r.o. v nově postavené hale firmy MEVA a.s. v Roudnici nad Labem. Podle dosavadních informací nejsou se systémem vytápění žádné problémy. V následujících podkapitolách bude projekt představen, budou uvedeny vstupní údaje pro výpočet a budou ukázány výsledky.

### 9.4.1. Popis objektu

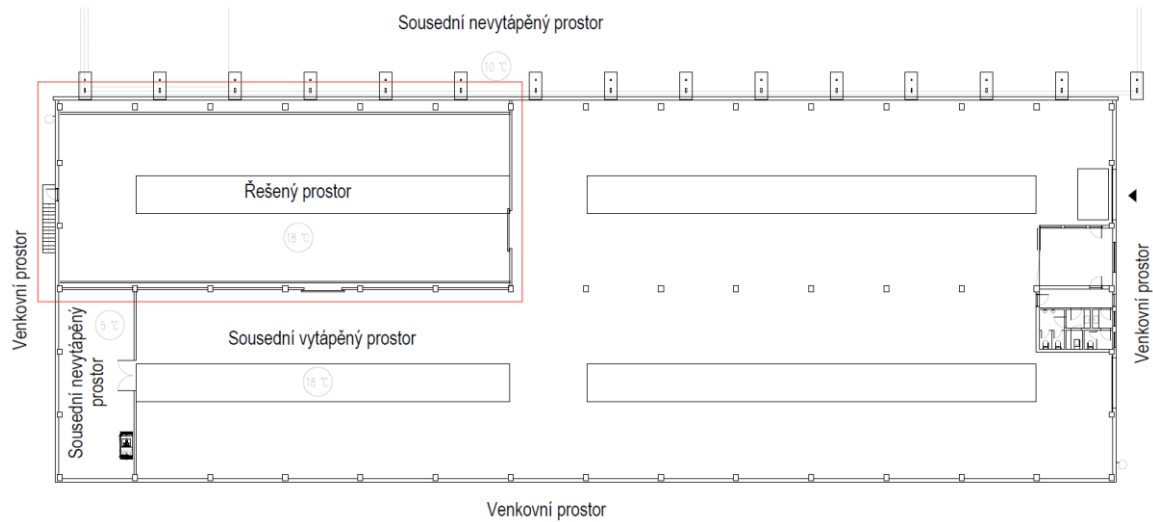
Řešený objekt se nachází v areálu firmy MEVA a.s. v Roudnici nad Labem a slouží jako montážní hala. Jedná se o nepodsklepený jednopodlažní objekt s železobetonovou skeletovou konstrukcí obloženou tepelně-izolačními panely. Objekt byl postaven v roce 2012. Hala na východní straně sousedí s další halou, která má skladovací charakter.

Hala je rozdělena na čtyři části. Na montážní halu, svařovnu, skladovací prostory a technické zázemí vzduchotechnické jednotky. Vytápěné jsou pouze první tři části, montážní hala, svařovna a skladovací prostory. Vytápěné prostory jsou vytápěny teplovodními závěsnými sálavými panely KOTRBATÝ KZ. Zdrojem tepla pro vytápění je areálová kotelna pracující s teplotním spádem 90 / 70 °C. Vytápěný prostor je rozdělen do čtyř samostatně regulovatelných částí: montážní část 1, montážní část 2, skladovací prostory a svařovna. Sálavé panely jsou zavěšeny těsně pod vazníky, mimo světlíky, ve výšce 5.9 m nad podlahu. Mimo vytápění halové části sálavými panely je zde ještě užito vytápění deskovými otopnými tělesy, která jsou instalována v halovém vestavku sloužícím jako zázemí pracovníků haly. Vytápění haly se uvažuje přerušované. Celková tepelná ztráta byla určena na 170 kW při venkovní výpočtové teplotě  $t_e = -12$  °C a vnitřní výpočtové teplotě  $t_i = 18$  °C.

V objektu je také instalovaná vzduchotechnická jednotka, která slouží pro výměnu vzduchu v části svařovny. Uvažuje se mírně podtlakový větrací systém. Větrací zařízení kryje tepelné ztráty větráním. Uvažuje se větrání s užitím oběhového vzduchu. Bude použito 70 % oběhového přefiltrovaného vzduchu a 30 % čerstvého vzduchu. Celkové množství přiváděného vzduchu je 28 000 m<sup>3</sup>/h, což znamená intenzitu výměny vzduchu v hale  $I = 7,9$  h<sup>-1</sup>.



Vzorový výpočet budeme provádět pouze pro část svařovny, protože na této části haly lze demonstrovat vše, co výpočetní pomůcka nabízí. Umístění svařovny vůči ostatním prostorům ukazuje obr. 9.2.



Obr. 9.2 Umístění svařovny v rámci haly



Obr. 9.3 Svařovna – pohled na severní stěnu



Obr. 9.4 Svařovna – pohled na jižní stěnu



Obr. 9.5 Svařovna – pohled na jižní stěnu zvenku

Na obr. 9.3 až obr. 9.5 jsou pohledy na řešený prostor. Z obrázků je patrné, jakým způsobem jsou umístěny sálavé panely, i jak a kudy je vedeno potrubí vzduchotechniky.

#### 9.4.2. Vstupní hodnoty pro výpočet

Než začneme s výpočtem, musíme definovat geometrii haly, materiálové vlastnosti obvodových konstrukcí a počáteční podmínky výpočtu.

Přesné skladby konstrukcí nejsou z projektu, který jsem měl k dispozici, patrné, přesto z výpočtu tepelných ztrát lze zjistit tepelné odpory jednotlivých konstrukcí, což je pro výpočet postačující. Označení jednotlivých typů konstrukcí i užití hodnoty tepelně technických vlastností jsou shrnuty v tab. 9.2.

Tab. 9.2 Tepelně technické vlastnosti obvodových konstrukcí

Popis konstrukce	Označení	R [m <sup>2</sup> K/W]	ε [-]
Venkovní obvodová konstrukce – do výšky 2,4 m nad podlahu	os1	2,50	0,9
Venkovní obvodová konstrukce – od výšky 2,4 m nad podlahu	os2	3,40	0,9
Vnitřní svislá konstrukce	ns1	1,50	0,9
Fiktivní konstrukce dělicí horní a dolní část prostoru	ns2	0,00	1,0
Střešní plášť	ostrech1	4,00	0,9
Podlaha se zeminou	npdl1	1,08	0,9
Okna a světlíky	ooz1	0,40	0,9
Sekční vrata	ooz2	0,80	0,9
Dveře do venkovního prostoru	ooz3	0,40	0,9

Označení a zpracování geometrie bylo provedeno v souladu s kapitolou 9.2.2. Jednotlivé konstrukce, včetně označení a teplot z venkovní strany konstrukce jsou

uvedeny v tab. 9.3. Označení konstrukcí je dále patrné z příložených výkresů č. 4-TŽP-2016-1 až 4-T6P-2016-4.

Tab. 9.3. Seznam konstrukcí

Index	Skladba	Orientace	$t_e$ [°C]	S [m <sup>2</sup> ]
1	os1	s1	-12	34,0
2	ooz3	s1	-12	1,8
3	os2	s1	-12	52,9
4	os1	s4	-12	4,2
5	os2	s4	-12	6,2
6	os1	s4	10	82,2
7	os2	s4	10	121,6
8	ns1	s2	18	32,9
9	ooz1	s2	18	2,0
10	ooz1	s2	18	2,0
11	ns1	s2	18	40,8
12	ooz1	s2	18	2,0
13	ooz2	s2	18	9,0
14	ns1	s3	18	168,9
15	ooz2	s3	18	9,0
16	ns1	s3	5	36,3
17	npdl1	s5	5	536,4
18	ns2	s6f28	-12	446,9
19	ns2	s6f29	-12	89,6
20	ns2	h5f17	-12	536,4
21	ns2	h5f17	-12	89,6
22	os2	h1	-12	14,2

23	os2	h4	-12	1,7
24	os2	h4	10	32,5
25	ns1	h2	18	14,2
26	ns1	h3	18	28,4
27	ns1	h3	5	5,8
28	ostrech1	h6	-12	446,9
29	ooz1	h6	-12	89,6

Ve čtvrtém sloupci je udána teplota z venkovní strany konstrukce. Z toho je patrné, že lze počítat i objekty, které nesousedí pouze s venkovním prostorem. Pátý sloupec pak udává plochu konstrukcí bez otvorů. Ke konstrukcím z tab. 9.3 přibudou ještě dvě další konstrukce, a to sálavé panely, které jsou v tab. 9.4.

Tab. 9.4 Seznam sálavých panelů

Index	Typ panelu	Orientace	$t_{w1}$ [°C]	$t_{w2}$ [°C]	S [m <sup>2</sup> ]
30	KZ / 1050	s6p	90	80	33,6
31	KZ / 1050	s6p	80	70	33,6

Konkrétní hodnoty souřadnic jednotlivých bodů jednotlivých ploch nejsou v této práci uvedeny a lze je nalézt pouze ve vzorovém souboru výpočetní pomůcky.

Dále je třeba definovat hodnoty týkající se výměny vzduchu a hodnoty popisující okolní prostředí. Tyto hodnoty jsou v tab. 9.5.

Tab. 9.5 Ostatní vstupní parametry





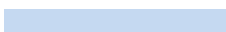


Popis	Značka	Hodnota
Venkovní výpočtová teplota	$t_e$ [°C]	-12
Teplota zeminy pod podlahou	$t_z$ [°C]	5
Teplota přiváděného vzduchu větracím zařízením	$t_{p,vz}$ [°C]	18

Měrná tepelná kapacita vzduchu	$c_v$ [J/kg·K]	1010
Hustota vzduchu	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,2
Objemový průtok vzduchu	$V_v$ [m <sup>3</sup> /h]	28000
Rychlost proudění vzduchu	$w$ [m/s]	0,2

K výpočtu povrchových teplot jsou dále potřeba ještě poměry osálení. Ty v této práci nebudou uvedeny, protože jich je velké množství. Hodnoty poměrů osálení lze nalézt v souboru výpočetní pomůcky.

Pro určení tepelné pohody prostředí byla zvolena operativní teplota  $t_{o,teor} = 18$  °C. Jedná se o hodnotu, která byla vypočítána z rozmezí hodnot operativních teplot udávaných v [11] pro třídu práce IIIb. Požadovaná operativní teplota  $t_{o,teor}$  byla vypočítána ze vztahu  $t_{o,teor} = \frac{t_{o,max} + t_{o,min}}{2} = \frac{26 + 10}{2} = 18$  °C. Pro rozmezí operativních teplot z [11] byly následně zvoleny intervaly rozdílu operativních teplot určující barevné značení výsledků dle tab. 9.6.

Tab. 9.6 Legenda ke grafickým výstupům

Intervaly hodnot $\Delta$	Barevné označení
(12; $\infty$ )	
(8; 12)	
(3; 8)	
$\langle -3; 3 \rangle$	
$\langle -8; -3 \rangle$	
$\langle -12; -8 \rangle$	
$(-\infty; -12)$	

Jako okrajové podmínky pro výpočet byla zvolena teplota vnitřního vzduchu  $t_i = t'_i = 15 \text{ °C}$ , teplota panelů na spodní i horní části panelu  $t_p = t'_p = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2}$  a povrchová teplota stěn  $t_p = 20 \text{ °C}$ .

### 9.4.3. Výsledky

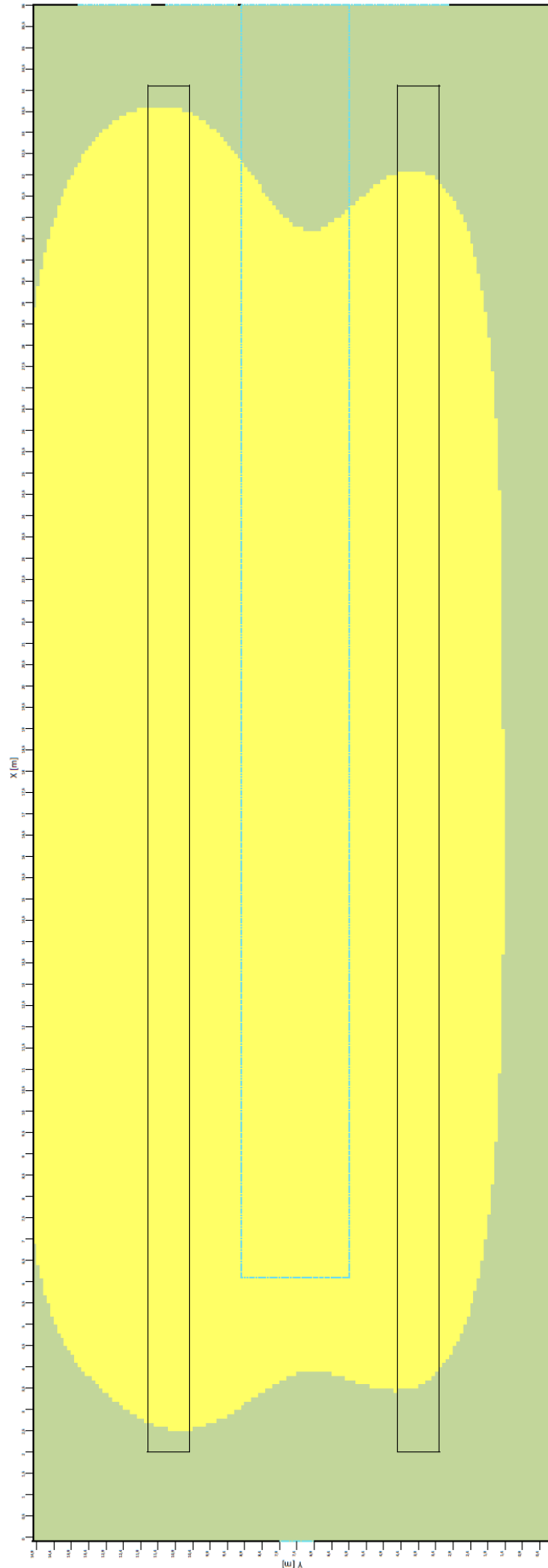
Po zadání veškerých hodnot byl proveden výpočet. Výpočet skončil po 19 iteracích, povrchové teploty získané výpočtem jsou v tab. 9.7.

Tab. 9.7 Vypočtené povrchové teploty konstrukcí

Index	$t_p$ [°C]	Index	$t_p$ [°C]
1	20,89	18	21,14
2	14,30	19	12,23
3	21,38	20	21,59
4	17,48	21	21,59
5	17,74	22	18,09
6	22,08	23	16,28
7	22,45	24	19,25
8	22,05	25	19,64
9	19,68	26	19,85
10	19,78	27	17,06
11	22,48	28	21,14
12	19,54	29	12,23
13	20,21	30	83,12
14	20,71	30'	31,94
15	20,41	31	73,45
16	20,61	31'	30,43
17	21,59		

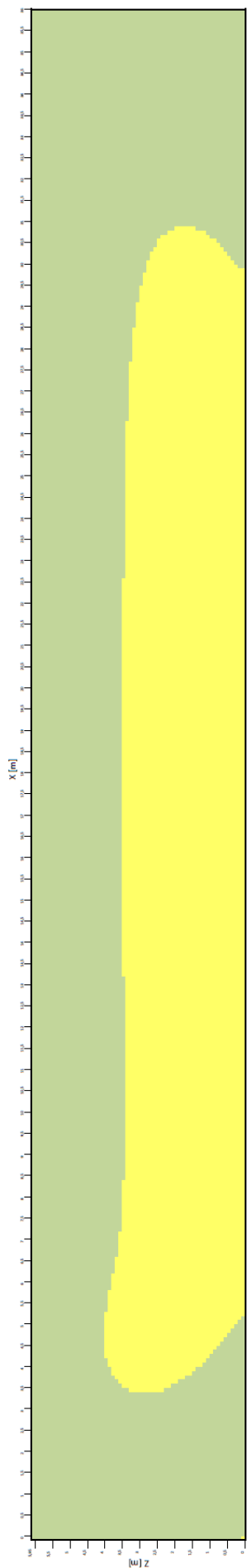
Teplota vzduchu ve spodní části haly je  $t_i = 18,77 \text{ °C}$ , zatímco v horní části haly je  $t'_i = 19,93 \text{ °C}$ . Z teploty vzduchu a povrchových teplot obvodových konstrukcí byla sestavena teplotní mapa, popisující tepelnou pohodu daného prostoru. Teplotní mapa byla sestavována ve 4 rovinách. V rovině XY ve výšce  $Z = 1,5 \text{ m}$  nad podlahou, v rovině YZ na souřadnici  $X = 21,0 \text{ m}$ , řezem jdoucím sekčními vraty a dvěma rovinami

XZ, se souřadnicí  $Y = 7,5 \text{ m}$ , řezem jdoucím světlíkem, a  $Y = 11,0 \text{ m}$ , řezem jdoucím sálavým panelem s indexem 30. Krok výpočtu byl ve všech rovinách  $0,1 \text{ m}$ .

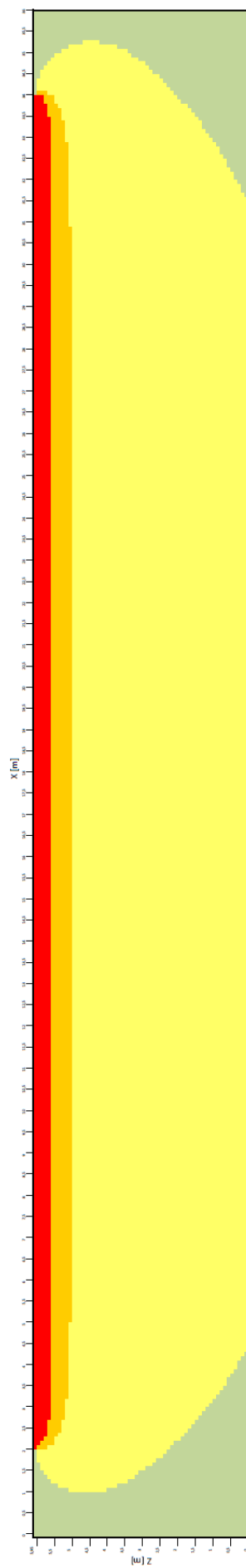


Obr. 9.6 Teplotní mapa v rovině XY se souřadnicí  $Z = 1,5 \text{ m}$  nad podlahou

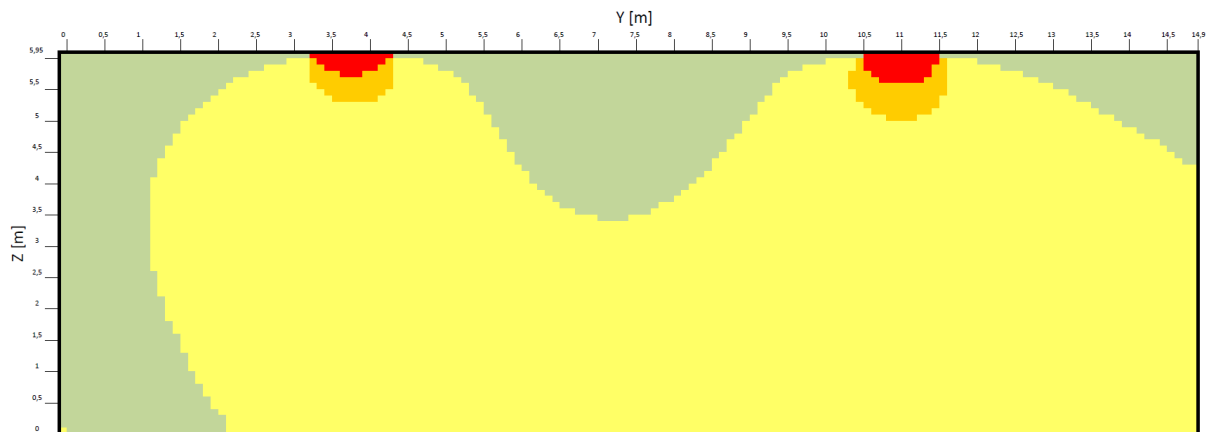




Obr. 9.7 Teplotní mapa v rovině XZ se souřadnicí  $Y = 7,5$  m od počátku souřadnic



Obr. 9.8 Teplotní mapa v rovině XZ se souřadnicí  $Y = 11$  m od počátku souřadnic



Obr. 9.9 Teplotní mapa v rovině YZ se souřadnicí  $X = 21$  m

Na obr. 9.6 jsou tenkou černou čarou znázorněny sálavé panely, azurovou čerchovanou čarou pak otvory v konstrukcích – světlík, okna, vrata a dveře.

Obr. 9.6 až 9.9 jsou pouze výřezy, obrázky v lepším rozlišení, včetně legendy lze najít v elektronické podobě jako přílohu k této práci.

Z výsledků je patrné, že ve většině prostoru haly, kde by se měli pohybovat pracovníci, dochází k mírnému přetápění. Nejvyšší hodnota operativní teploty v pracovním prostoru oproti požadované hodnotě byla vyšší asi o  $3,7$  °C. Teplota vzduchu je oproti vnitřní výpočtové teplotě vyšší zhruba o  $0,8$  °C ve spodní části haly.

Výsledky podporují i předpoklad, že bude docházet k mírnému přetápění, protože instalovaný výkon sálavých panelů je při daných parametrech o 17 % vyšší, než je potřeba k pokrytí tepelné ztráty.

## **10. DISKUZE**

Výsledky v kapitole 9.4.3 jsou sice uvěřitelné a podporují prvotní předpoklad, že bude docházet k mírnému přetápění, ale výpočet i zadané hodnoty mají několik nedostatků, takže skutečná míra přetápění je diskutabilní.

Prvně je třeba zmínit, že na výpočet povrchových teplot má vliv poměr osálení. Ten je definovaný jako poměr toku tepla sáláním z tělesa číslo 1 na těleso číslo 2 k celkovému toku tepla sáláním z tělesa číslo 1 do prostoru. Pak by logicky mělo platit, že sečteme-li poměry osálení mezi jednou konkrétní vnitřní plochou a ostatními vnitřními

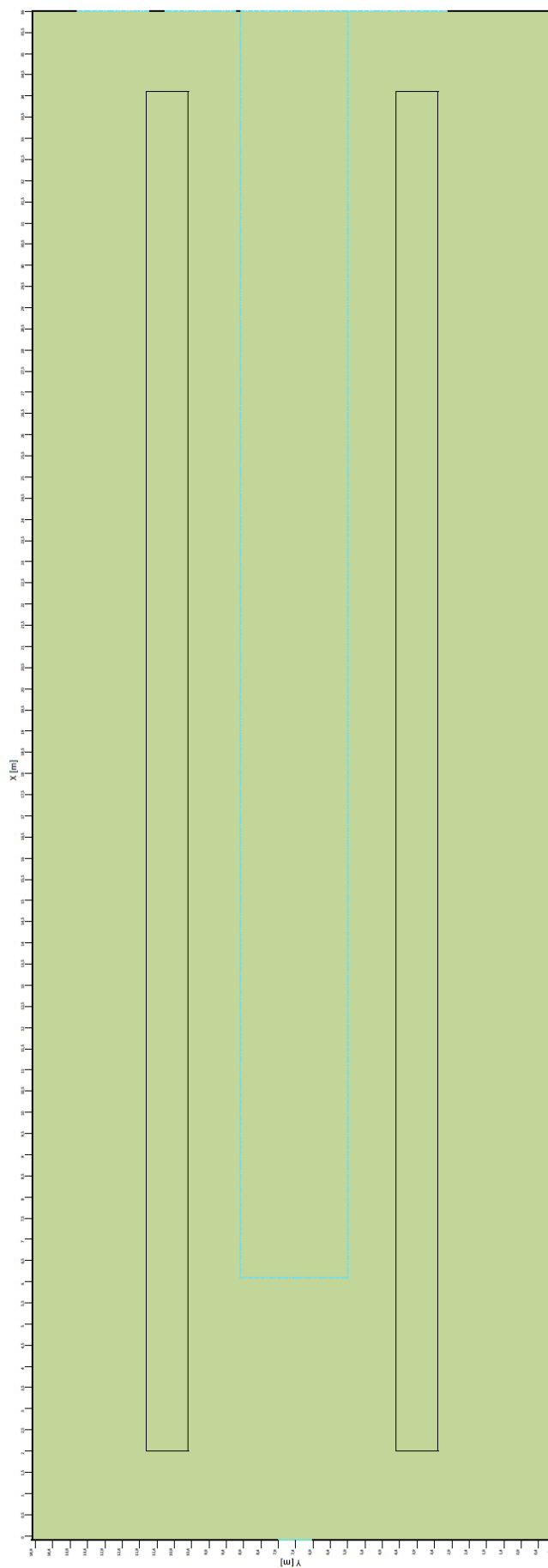
plochamiv prostoru, dostaneme  $\varphi = 1$ . Bohužel ve vzorovém výpočtu se u všech ploch zdaleka nepodařilo dosáhnout součtu  $\varphi = 1$ . U většiny horizontálních ploch, které díky své velikosti a teplotě mají zásadní vliv na teplotní poměry v prostoru, se podařilo vypočítat poměry osálení tak, aby zhruba platilo, že  $\sum \varphi_i = 1$ . U vertikálních stěn však jsou výsledky nevěrohodné. Poměry osálení do vzorového výpočtu byly počítány ze vztahů (3.16) a (3.21). Ačkoliv autor vztahů neuvádí, že by vztahy byly platné jen pro určité geometrické konfigurace, je možné, že tomu tak je, a v některých extrémních případech vztah dává špatné hodnoty. Vztahy (3.16) a (3.21) by bylo dobré prověřit, porovnat s jinými vztahy a určit, jestli jsou platné pro jakoukoliv geometrickou konfiguraci, nebo jestli jejich platnost je omezená. Po ověření obecné platnosti vztahů (3.16) a (3.21) by bylo možné zautomatizovat výpočet poměru osálení.

Při výpočtech dále není uvažován odraz vysálané energie a druhotná absorpce.

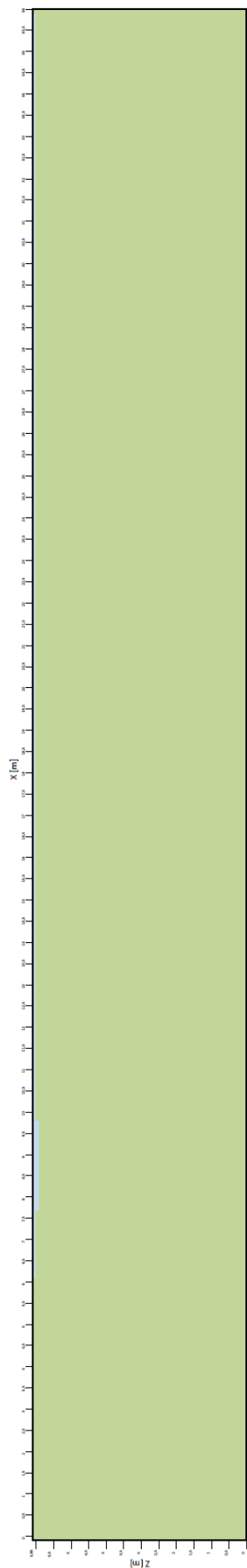
Dalším faktorem, ovlivňujícím výslednou teplotní mapu je stínění. Ve vzorovém výpočtu je uvažováno s prázdnou rozlehlou halou, ale v reálné hale bude docházet ke stínění. Ve vzorovém případě by ke stínění docházelo například v případě, kdy by byly instalovány svařovací kóje, nebo například umístěním jeřábu. Také se neuvažuje, že podél zdi je vedeno vzduchotechnické potrubí, ačkoliv jeho rozměr je nezanedbatelný, takže bude docházet k velkému stínění, a protože je vyrobeno z lesklého kovu, bude docházet i k značnému odrazu sálení, se kterým výpočetní pomůcka nepočítá.

Budeme-li považovat výsledky za dostatečně přesné (vzhledem k hodnotám poměrů osálení je to diskutabilní), pak by bylo nasnadě učinit taková opatření v řešené hale, abychom přetápění zabránili a ušetřili tím nějakou energii. Již při snížení teploty přiváděného vzduchu o 2 °C se snížil rozdíl operativních teplot na polovinu. Vzhledem k tomu, že nemůžeme přivádět moc chladný vzduch, budeme muset snížit výkon sálavých panelů. Každá větev, na kterou jsou sálavé panely napojeny, je osazena trojcestným směšovací ventilem. Na něm lze nastavit teplotu přívodní vody dle požadovaného teplotního spádu.

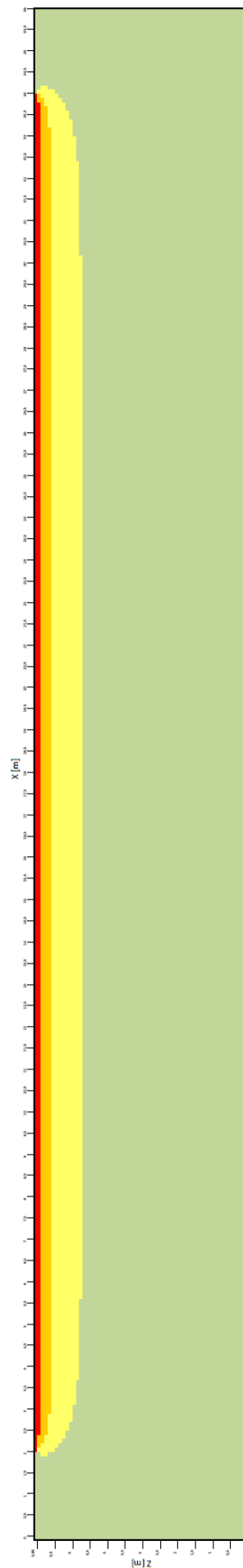
Výpočet byl tedy proveden ještě jednou, tentokrát ale bude teplota přívodního vzduchu větracím systémem pouze  $t_{p,vz} = 15$  °C a sálavé panely budou pracovat na teplotním spádu 80 / 60 °C. Teplota vzduchu ve spodní části prostoru pak vyšla  $t_i = 15,7$  °C a teplota vzduchu v horní části  $t'_i = 16,7$  °C. Teplotní mapy ve stejných řezech jsou na obr. 9.10 až obr. 9.13.



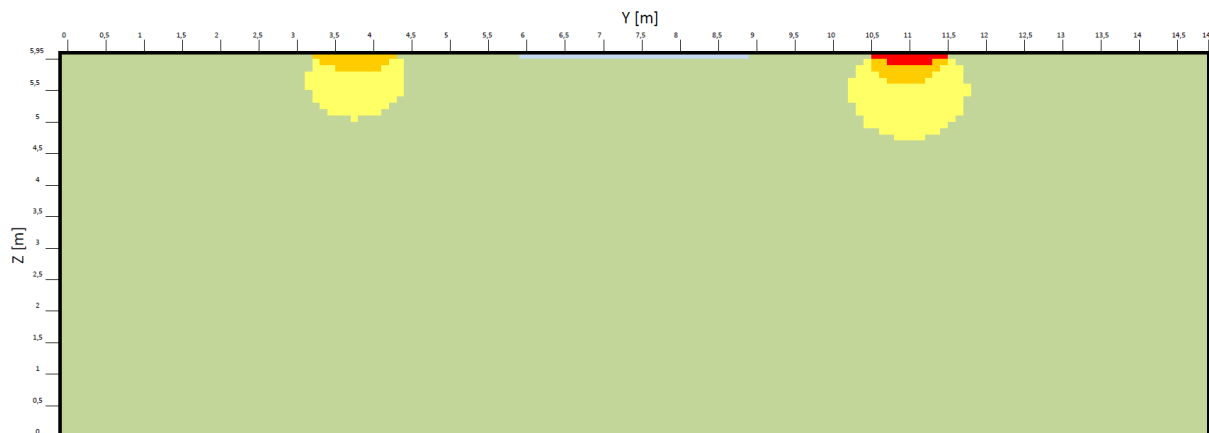
Obr. 9.10 Teplotní mapa v rovině XY se souřadnicí  $Z = 1,5$  m nad podlahou



Obr. 9.11 Teplotní mapa v rovině XZ se souřadnicí  $Y = 7,5$  m od počátku souřadnic



Obr. 9.12 Teplotní mapa v rovině XZ se souřadnicí  $Y = 11$  m od počátku souřadnic



Obr. 9.13 Teplotní mapa v rovině YZ se souřadnicí  $X = 21$  m

Jak je patrné z porovnání teplotních map z jednotlivých výpočtů, došlo při změně parametrů ke snížení operativní teploty. V průměru došlo ke snížení operativní teploty o  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 11. ZÁVĚR

Na závěr bych rád zhodnotil svoji práci. Cílem práce bylo vytvořit nástroj pro posouzení projektu sálavého vytápění. S nástrojem, který jsem v rámci diplomové práce vytvořil lze hodnotit projekty sálavého vytápění z hlediska tepelné pohody prostředí podle současně platné legislativy. Ovládání výpočetní pomůcky je dostatečně jednoduché, avšak předpokládá základní znalosti fyziky a znalosti z oboru vytápění. Pomůcka je omezena pouze na kontrolu objektu s pravoúhlými stěnami obdélníkového a čtvercového tvaru, však této geometrii vyhovuje naprostá většina objektů, do kterých se běžně navrhuje sálavé vytápění.

Výsledky vypočítané výpočetní pomůckou jsou věrohodné, avšak jejich přesnost závisí na vstupních hodnotách zadaných uživatelem. Obzvláště v případě poměrů osálení se může uživatel dopustit zásadních chyb ovlivňujících přesnost a věrohodnost výsledků. Proto hodnoty poměrů osálení vyplňuje uživatel ručně, aby bylo zaručeno, že výsledek bude tak kvalitní, jak jsou kvalitní vstupy výpočtu.

Myslím si, že výpočetní nástroj pro kontrolu projektů sálavého vytápění by se dal použít v praxi poté, co by se provedl rozbor vzorců pro výpočet poměrů osálení a sestavil se takový algoritmus, co by byl schopný počítat poměry osálení automaticky.

Navíc by nebylo těžké rozšířit pomůcku tak, aby byla použitelná i pro podlahové, stěnové a stropní vytápění, či pro vytápění světlými a tmavými zářiči.

**SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PRAMENŮ**

1. **CIHELKA, J.** *Sálavé vytápění*. Praha : STNL, 1961.
2. **BROŽ, K.** *Vytápění*. Dotisk 2. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-02536-5.
3. **SOPKO, B., SAMEK, L. a ČERNÝ, F.** *Fyzika II*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03194-2.
4. **VÍŠA, J.** *Tvorba výpočetní pomůcky pro vytápění*. 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ondřej Hojer..
5. **NOVÝ, R., BROŽ, K., DRKAL, F., HEMERKA, J. a HEMZAL, K.** *Technika prostředí*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03492-5.
6. **HOWELL, J. R., SIEGEL, R. a MENGÜÇ.** *Thermal Radiation Heat Transfer*. 5th ed. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2011. ISBN 978-1-4398-0533-6.
7. **HOWELL, J. R.** *A catalog of radiation heat transfer configuration factor*. [Online] [Citace: 27. 12 2015.] <http://www.engr.uky.edu/rtl/catalog>.
8. **SAZIMA, M. et al.** *Sdílení tepla*. Technický průvodce. Praha : STNL, 1993. ISBN 80-85341-42-5.
9. **ZMRHAL, V.** *Stanovení střední radiační teploty I*. [Online] 2. 20 2006. [Citace: 27. 12 2015.] <http://www.tzb-info.cz/3072-stanoveni-stredni-radiacni-teploty-i>.
10. —. *Stanovení střední radiační teploty II*. [Online] 27. 2 2006. [Citace: 27. 12 2015.] <http://www.tzb-info.cz/3102-stanoveni-stredni-radiacni-teploty-ii>.
11. *Narizení vlády č. 9/2013 sb., kterým se mění narizení vlády č.361/2007 sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci*.
12. **Ministerstvo zdravotnictví České republiky**. *Věstník 2013/08*. [Online] 9. 12 2013. [Citace: 30. 12 2015.] [http://www.szu.cz/uploads/documents/ska/autorizace/Methodika\\_MKL.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/ska/autorizace/Methodika_MKL.pdf).
13. **BASTA, J.** *Otopné plochy - úvod do problematiky*. [Online] 10. 2 2006. [Citace: 31. 12 2015.] <http://www.tzb-info.cz/3052-otopne-plochy-uvod-do-problematiky>.



14. **BASTA, J., HOJER, O.** *Sálavé a průmyslové vytápění pro IB*. Praha : autor neznámý, 2009.
15. **SAZIMA, M.** *Sdílení tepla*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1986.
16. **ASHRAE.** *ASHRAE Handbook: Fundamentals - SI Edition*. Atlanta : ASHRAE, 2005.
17. **KOTRBATÝ, M., HOJER, O. a KOVÁŘOVÁ, Z.** *Hospodaření teplem v průmyslu*. 1. vydání. Praha : České sdružení pro technická zařízení, 2009. ISBN 978-80-86028-41-5.

**SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH**

<b>Příloha</b>	<b>Typ</b>	<b>Označení</b>	<b>Formát</b>
Označení konstrukcí – půdorys 1.NP – spodní část	výkres	4-TŽP-2016-1	A3 (M 1:100)
Označení konstrukcí – půdorys 1.NP – horní část	výkres	4-TŽP-2016-2	A3 (M 1:100)
Označení konstrukcí – řez A-A	výkres	4-TŽP-2016-3	A4 (M 1:100)
Označení konstrukcí – severní pohled	výkres	4-TŽP-2016-4	A4 (M 1:100)

**SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH**

<b>Příloha</b>	<b>Označení</b>	<b>Formát</b>
Nástroj pro posuzování projektů sálavého vytápění - prázdný	4-TŽP-2016-E1	XLSM
Nástroj pro posuzování projektů sálavého vytápění – případová studie	4-TŽP-2016-E2	XLSM
Označení konstrukcí - výkresy	4-TŽP-2016-E3	PDF
Grafické výstupy – případová studie – teplotní pole	4-TŽP-2016-E4	PDF
Grafické výstupy – případová studie – teplotní pole - diskuze	4-TŽP-2016-E5	PDF
Grafické výstupy – případová studie – teplotní pole	4-TŽP-2016-E6	XLSX
Grafické výstupy – případová studie – teplotní pole - diskuze	4-TŽP-2016-E7	XLSX