

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 393

ISSN 1213-418X

Ondřej Šikula

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

**POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ TEPELNĚ
AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ**

COMPUTER MODELING OF THERMALLY
ACTIVATED STRUCTURES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2011

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelně aktivované konstrukce, aktivace betonového jádra, numerické modelování, CFD simulace, software CalA, tepelný komfort.

KEY WORDS

Thermo active building structures, numerical modeling, CFD simulations, software CalA, thermal comfort.

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE

Archiv děkanátu Fakulty stavební VUT v Brně

© Ondřej Šíkula, 2011
ISBN 978-80-214-4308-2
ISSN 1213-4198

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
0. ÚVOD	6
0.1. Klasifikace tepelně aktivovaných konstrukcí	6
0.2. Zhodnocení.....	7
1. SOUČASNÝ STAV	8
1.2. Normativní model tepelně aktivovaných konstrukcí	13
1.3. Analytické modely tepelně aktivovaných konstrukcí	13
2. IDENTIFIKACE A MODELOVÁNÍ TEPELNÉHO PŮSOBENÍ TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ.....	15
2.1. 1D metody modelování.....	17
2.2. 2D metody modelování.....	18
2.3. 3D metody modelování.....	28
3. PŘEDPOKLÁDANÝ VÝZNAM PRÁCE	33
3.1. Význam pro rozvoj vědního oboru	33
3.2. Význam pro praxi.....	33
3.3. Význam pro výuku a vzdělávání.....	34
4. ZÁVĚR.....	35
5. ABSTRACT	35
6. POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA	36

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

Narozen: 22. 1. 1979 v Brně

Pracoviště: VUT v Brně, Fakulta stavební
Ústav technických zařízení budov



Dosažené vzdělání:

- 1997 – maturita na Střední průmyslové škole stavební v Brně;
- 2002 – Ing. v oboru Pozemní stavby, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav TZB;
- 2007 – Ph.D. v oboru 3608V001 Pozemní stavby, VUT v Brně, Fakulta stavební.

Vědecké stáže:

- 2004 – VUT v Brně Fakulta strojní, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí;
- 2005 – TU Wien, Institut für Thermodynamik und Energiewandlung, Rakousko.

Odborná praxe a zaměstnání:

- 2002 – 2003 projektový a inženýrský atelier Domia art, s. r. o., Brno;
- 2003 – 2004 projekční kancelář LUFT PROJEKT, s.r.o., Brno;
- 2004 – 2006 osoba samostatně výdělečně činná;
- 2006 – dosud VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov.

Pedagogická činnost:

- 2004 – dosud VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov;
- Vedení bakalářských, magisterských a doktorských předmětů se zaměřením na ochlazování budov, vzduchotechniku, vytápění, mechaniku tekutin, počítačové modelování a aplikovanou fyziku.

Členství v komisích pro SZZ, SDZ a obhajoby doktorských prací (ČR, SR).

Vedení doktorandů:

- 2008 – dosud VUT v Brně, Fakulta stavební, obor: 3687V001 Pozemní stavby;
- 2008 – dosud TU Košice, Fakulta stavební, obor: Pozemné stavby, studijní program: Teória tvorby budov a prostredia;
- 2010 – dosud TU Bratislava, Fakulta stavebná, obor: 5.1.4 Pozemné stavby, studijní program: Teória a technika prostredia budov.

Vedení absolventů studia bakalářského (21), magisterského (13), doktorského (1).

Řešené výzkumné projekty:

- 11 úspěšně oponovaných výzkumných projektů (z toho 4x hlavní řešitel a 6x spoluřešitel);
- Nejvýznamnější projekty:
 - IEA (International Energy Agency) – ANNEX 50 – Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings. – spoluřešitel.
 - Rozvojový projekt GRAFO VUT v Brně – Výzkum tepelného chování střešních nadstaveb metodou CFD simulace – hlavní řešitel.
 - Specifický výzkum na VUT v Brně, FAST – Vývoj softwaru pro dynamickou simulaci přenosu tepla konstrukčních detailech staveb – hlavní řešitel.

Publikace:

- 80 odborných a vědeckých publikací (z toho 51 v ČR a 29 v zahraničí);
- 1 článek v časopise a 1 příspěvek na konferenci hodnocených v ISI Web of KnowledgeSM;
- 6 citací vlastních prací externími autory;
- 26 recenzních posudků článků, příspěvků, výzkumných projektů a vědeckých prací;
- 12 odborných posudků.

Výsledky vývoje:

- Autorizovaný software Calculation Area (CalA) pro numerickou simulaci 2D časově neustálených difúzních jevů;
- Funkční vzorek SMEP 1 sloužící k měření zpracování a vyhodnocení elektrických výkonových charakteristik využitelných k vyhodnocování chladicího faktoru zdrojů chladu.

Ostatní:

- ocenění medailí "SIGNUM PROSPERITATIS" děkanem FAST (2006);
- člen Společnosti pro techniku prostředí (STP) – člen výboru územního centra Brno;
- člen odborné společnosti The International Building Performance Simulation Association - Czech Republic (IBPSA – CZ).

0. ÚVOD

Habilitační práce spadá do oblasti matematicko-fyzikálního modelování přenosu tepla a látky v aplikaci na tepelně aktivované konstrukce sloužící k vytápění a ochlazování budov. Práce vychází ze souhrnu stávajícího stavu, z analýzy doposud publikovaných poznatků k problematice navrhování a provozování velkoplošných systémů vytápění a chlazení. Habilitační práce je zaměřena na počítačové modelování tepelného chování tepelně aktivovaných konstrukcí – zejména velkoplošných otopných a chladicích systémů budov. Obecným cílem práce je odstranit nedostatky stávajících výpočetních modelů, zpřesnit je a také prezentovat nové přístupy k modelování, které budou schopny řešit danou problematiku na vyšší úrovni. Konkrétnějším cílem je odvodit a ověřit numerické modely schopné postihnout komplexně vazbu proudění v potrubí a v místnosti se současným přenosem tepla v místnosti a stavebních konstrukcích, a to ve vztahu k tepelnému komfortu a úspoře energií.

0.1. KLASIFIKACE TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Tepelně aktivované (dále jen TA) stavební konstrukce slouží k vytápění a chlazení budov. Tepelný výkon je realizován převážně sáláním povrchu tepelně aktivovaných konstrukcí, které mají větší plochu povrchu, a proto je lze též označit jako velkoplošné sálavé systémy. TA konstrukce lze rozčlenit podle různých hledisek, například na otopné, chladicí, či kombinované. TA konstrukce působí výhradně na citelnou složku tepelného komfortu. Z fyzikálních parametrů tedy stačí sledovat jejich měrný výkon, schopnost akumulace tepla, rozložení povrchových teplot a podmínky pro přestup tepla do interiéru.

Tepelná aktivace betonového jádra pak znamená řízenou akumulaci tepla nebo chladu v masivních stavebních konstrukcích. Používá se především u chladicích systémů umístěných ve stropních konstrukcích. U těchto systémů lze očekávat zvyšující se měrný výkon s klesající tloušťkou konstrukce stropu. Vyšší tloušťky stropu však umožňují akumulovat větší množství energie takzvaným nočním chlazením – využíváním chladu venkovního prostředí, nebo efektivněji získanému chladu strojním způsobem (typicky parním kompresorovým chlazením). Vysoká tepelná setrvačnost si vynucuje doplnění tohoto systému o jiný, který je schopen rychleji reagovat na měnící se potřeby tepelného nebo chladicího výkonu. Takovým doplňkovým zařízením může být systém vzduchové klimatizace nebo panel pro špičkovou zátěž umístěný například nad pracovním místem, či místem nejčastějšího pobytu osob. Typické měrné topné výkony jsou přibližně od 60 do 180 W.m⁻². Chladicí systémy oproti tomu vykazují znatelně nižší výkony, což je způsobeno především omezením nejnižší povrchové teploty TA konstrukce z důvodu rizika kondenzace vzdušné vlhkosti. Uzavřené chladicí stropy působí výkonem 35 až 80 W.m⁻².

Otevřené pak dosahují výkonu až 100 dle [25]. Maximální teploty povrchu TA konstrukce podlahy dle [32] jsou 29 °C pro obytné prostory a 35 °C pro okrajové zóny. Maximální teploty povrchu TA konstrukce stropu a stěn mohou být obecně vyšší, až do nejvýše 40 °C. Nutnost stanovit a hlídat minimální povrchové teploty TA konstrukcí plyne z existence rizika kondenzace vzdušné vlhkosti. Teplota přívodní vody do chladicího stropu se volí tak, aby nedocházelo k orosování povrchu TA konstrukce (povrchová teplota musí být vyšší než teplota rosného bodu vzduchu proudícího kolem).

0.2. ZHODNOCENÍ

Výhody:

- optimální tepelně-vlhkostní mikroklima, ideální k eliminaci tepelného vlivu fasády, díky převážně sálavému působení je minimalizován pohyb vzduchu a tím i riziko vzniku průvanu;
- využití zdrojů tepla a chladu, které jsou obecně na teplotních úrovních blízkých teplotě venkovního prostředí, jako je volné chlazení, geotermální energie apod. (Tyto zdroje lze charakterizovat jako vysokoteplotní zdroje chladu a nízkoteplotní zdroje tepla);
- díky předchozímu vykazují nižší provozní náklady a nižší spotřebu primární energie;
- prakticky bezhlučný provoz;
- nevyžaduje údržbu uvnitř prostoru, nesnižují užitečnou plochu místností a neznečišťují interiér.

Nevýhody:

- vysoké pořizovací investiční náklady;
- u chlazení nebezpečí kondenzace vzdušné vlhkosti;
- TA konstrukce nedokáže řídit vlhkost v interiéru;
- vykazují nižší měrné výkony.

Použití TA konstrukcí je výhodné obecně v místnostech, kde jsou malé tepelné ztráty a tepelné a vlhkostní zisky, a kde je malá obsazenost místnosti a z ní plynoucí nízká potřeba na přívod větracího vzduchu. Přívod větracího vzduchu je pak VZT zařízením pracujícím s externím vzduchem o konstantním průtoku, jemuž je upravována teplota a vlhkost, což musí zajistit odvod vlhkostních zisků v případě chlazení TA konstrukcí. K typickým budovám, kde lze TA konstrukce využít patří administrativní budovy, nemocnice, tělocvičny, muzea.

1. SOUČASNÝ STAV

Ze širokého spektra možných pohledů na TA stavební konstrukce se tato práce zaměřuje na predikci jejich tepelného chování a tepelného působení na vnitřní klima (tepelný komfort) a s ním svázaný způsob regulace a energetickou náročnost. Z tohoto důvodu je dále nastíněn současný stav poznání v oblasti teorie tvorby vnitřního klimatu budov, v oblasti fyzikální teorie přenosu tepla a látky a také jsou popsány současné způsoby počítačového modelování tepelného chování TA konstrukcí.

Vedení tepla

V obecném 3D tělese se může tepelný tok šířit obecně všemi směry x , y , z . Rozložení teplot v neizotropní látce v kartézském souřadném systému popisuje Fourierova diferenciální rovnice tepelné difúze (1-1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1-1)$$

kde	T	-	teplota [K]
	λ	-	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ρ	-	objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	τ	-	čas [s]
	c	-	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	S	-	vnitřní zdroj tepla $S = f(x, y, \tau)$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]
	x, y, z	-	indexy označující směry souřadného systému

Sdílení tepla konvekcí

Konvekce představuje současné sdílení tepla vedením (kondukcí) a prouděním tekutiny (advekcí) při přestupu z pevné látky na tekutinu. Podíly kondukce a advekce jsou na celkovém transportu tepla různé a záleží především na druhu proudění a termokinetických a hydrodynamických vlastnostech tekutiny. V technické praxi se problematika přenosu tepla řeší matematicko-experimentálním postupem využívající teorii geometrické a termomechanické podobnosti. Cílem je zjednodušení řešení přestupu tepla využitím Newtonova ochlazovacího zákona (1-2).

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (t_w - t_l) \quad (1-2)$$

kde	α	–	lokální součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
	S	–	plocha [m^2]
	t_w, t_l	–	teploty stěny a tekutiny [K]

Výpočet součinitele přestupu tepla vychází z teorie mezních vrstev a lze jej vyčíslit následovně.

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_L}{l} \quad (1-3)$$

kde λ_L – součinitel tepelné vodivosti tekutiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

l – charakteristický rozměr [m]

Při sdílení tepla v TA konstrukcích se nucené konvekce uplatní především při přestupu tepla z teplotonosné látky na konstrukci. Vliv způsobu proudění je charakterizován Reynoldsovým číslem Re , které specifikuje jednotlivé režimy proudění v trubkách jako laminární, přechodové a turbulentní. Vliv látkových vlastností na přestup tepla pak udává Prandtlovo číslo Pr , které vyjadřuje podobnost rychlostních a teplotních polí v proudě. Jestliže je tekutina zahřívána a její hustota se mění v závislosti na teplotě, může v důsledku rozdílu hustot a působení tíhového zrychlení dojít k proudění, které je označováno jako přirozená konvekce. Význam vztakových sil při smíšené konvekci lze určit pomocí poměru Grashofova Gr a Reynoldsova čísla. V případě přirozené konvekce je pak možné režim proudění určit pomocí tzv. Rayleighova čísla Ra .

Dle charakteru přirozené konvekce je pak Nuseltovo číslo obecně definováno vztahem (1-11).

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}, \text{Re}) \quad (1-4)$$

Aplikace teorie sdílení tepla konvekcí směřuje ke stanovení součinitele přestupu tepla a byla provedena a experimentálně ověřena například v pracích [25] a [32], ze kterých bylo dále čerpáno.

Proudění tepla a látek

Obecné proudění se současným přenosem tepla respektuje následující základní fyzikální zákony:

- Zákon zachování hmotnosti;
- Zákon zachování hybnosti;
- Zákon zachování energie.

Proudění reálné tekutiny je obecně turbulentní, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace v prostoru a čase. Vzhledem k tomu, že se jedná o děje obecně trojrozměrné a časově závislé, jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic řešitelných numerickými metodami. Jedná se o rovnici kontinuity (1-5) a Navier–Stokesovy rovnice hybnosti (1-6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1-5)$$

kde $\vec{v}$ – vektor rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ – objemová hmotnost tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1-6)$$

kde p – statický tlak [Pa]
 $\vec{g}$ – vektor gravitačního zrychlení [m.s⁻²]
 $\vec{F}$ – vektor vnějších působících sil [N]
 $\bar{\bar{\tau}}$ – napěťový tensor vzniklý v důsledku tření [Pa]

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (1-7)$$

kde μ – dynamická viskozita [Pa.s]
 I – jednotkový vektor [-]

Přenos tepla proudící tekutinou lze popsat zkráceně diferenciální rovnicí vyjadřující zákon zachování objemové hustoty tepelného výkonu se zohledněním vazké disipace (1-8) dle [12].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (1-8)$$

kde λ_{eff} – součinitel efektivní tepelné vodivosti definované v souladu se zvoleným modelem turbulence [W.m⁻¹.K⁻¹]
 $\vec{J}_j$ – difuzní tok veličiny j
 $\bar{\bar{\tau}}_{eff}$ – tenzor efektivních vazkých napětí [Pa]
 S_h – objemová hustota vnitřního zdroje tepla [W.m⁻³]
 E – měrná energie tekutiny [J.kg⁻¹]
 h – měrná entalpie tekutiny [J.kg⁻¹]

Hustotu tekutiny je možno definovat různě, v této práci byla pro vzduch využita rovnice pro ideální nestlačitelný plyn. Popis turbulentního proudění vyžaduje navíc zohlednění přídavných (polo empirických) rovnic, které jsou nazývány modely turbulence. Při vlastním řešení metodou CFD byl používán model RNG $k - \epsilon$. Tento dvourovnicový model určuje turbulentní viskozitu pomocí dvou transportních rovnic pro k a ϵ . Model je založen na Boussinesqově hypotéze turbulentní viskozity μ_t , Tato hypotéza předpokládá, že podobně jako při laminárním proudění,

kdy platí pro smykové napětí Newtonova závislost $\tau = \mu \frac{du}{dy}$, jsou turbulentní napětí a turbulentní

toky úměrné $\tau_t = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy}$ tentokrát však střední rychlosti $\bar{u}$, apod. Turbulentní viskozita je složitou

funkcí stavu proudící tekutiny a je jen přibližně rovna součinu délkového a rychlostního měřítka charakterizující turbulenci. Turbulentní kinetická energie k vztažená na jednotku hmotnosti a disipační energie ε jsou s ní svázány vztahem (1-9).

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1-9)$$

kde	k	–	turbulentní kinetická energie [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]
	ε	–	rychlost disipace turbulentní kinetická energie [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$]
	ρ	–	objemová hmotnost tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	C_μ	–	empirická konstanta turbulentního modelu 0,09 [-]

Turbulentní kinetická energie vztažená na jednotku hmotnosti k je definována vztahem (1-10). Rychlost disipace turbulentní kinetická energie pak vztahem

$$k = \frac{1}{2} \bar{u}_i'^2 = \frac{1}{2} (u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2) \quad (1-10)$$

kde	$\bar{u}$	–	střední rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
	u'	–	fluktuační složka rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (1-11)$$

kde	l	–	délkové měřítko turbulentního pohybu [m]
	C_D	–	empirická konstanta turbulentního modelu [-]

RNG $k - \varepsilon$ model je odvozen z klasického $k - \varepsilon$ modelu při využití matematického postupu nazvaného metoda renormalizačních grup (RNG). Renormalizační procedura aplikovaná na turbulenci spočívá v postupné eliminaci malých vírů, přitom se přetransformují pohybové rovnice (Navierovy - Stokesovy rovnice) tak, že se modifikuje turbulentní viskozita, síly a nelineární členy. Pro pohyb nestlačitelné turbulentně se pohybující tekutiny platí rovnice (1-12).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) &= \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad}(k) \right] + 2\mu_t S_{i,j} - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) &= \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad}(\varepsilon) \right] + C_{1,\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot 2\mu_t S_{i,j} - C_{2,\varepsilon} \cdot \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (1-12)$$

kde	U	–	vektor rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
	$S_{i,j}$	–	tenzor rychlosti deformace [Pa]

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1,\varepsilon}, C_{2,\varepsilon}$	–	empirické konstanty turbulentního modelu [-]
$S_{i,j}$	–	tenzor rychlosti deformace [Pa]

Kvalita výpočetní sítě při stěně má značný vliv na přesnost řešení celé úlohy. V oblasti mezní vrstvy jsou gradienty rychlostí výrazně větší než v ostatních částech řešeného prostoru. Základním postupem výpočtu rychlostního pole u stěny je využití stěnové funkce (wall function), např. dle [14] a [24].

Sdílení tepla zářením

Každé těleso emituje v závislosti na své teplotě a vlastnostech svého povrchu radiaci, které se v oblasti přenosu tepla označuje jako tepelné záření. Sdílení tepla zářením je popsáno zákony Stefan-Boltzmanovým, Planckovým, Lambertovým a dalšími. Při řešení konkrétních technických úloh metodou kontrolních objemů je třeba postihnout nejen přenos tepla zářením mezi povrchy, ale také přenos tepla zářením mezi tekutinou a jí obklopujícími povrchy. Obecnou diferenciální rovnici pro přenos tepla zářením v emitujícím, rozptylujícím a pohlcujícím prostředí uvádí vztah (1-13), dle [29]. V rovnici se vyskytuje tzv. optická tloušťka d , která je definovaná vztahem (1-14).

$$\frac{d I(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (1-13)$$

kde	$\vec{r}$	–	polohový vektor
	$\vec{s}$	–	směrový vektor
	$\vec{s}'$	–	rozptylový vektor
	s	–	vzdálenost
	a	–	koeficient absorpce
	h	–	refrakce
	$(a + \sigma_s)s$	–	optická tloušťka
	σ_s	–	rozptyl
	σ	–	Stefan-Boltzmanova konstanta ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
	I	–	intenzita záření
	T	–	lokální teplota
	Φ	–	fázová funkce
	Ω'	–	prostorový úhel

$$d = (a + \sigma_s) s \quad (1-14)$$

Model radiace Discrete ordinates Modell (DO) transformuje rovnici (1-13) na transportní rovnici pro radiační intenzitu. Tento model radiace byl využit při provedených CFD simulacích. Jeho přesnost závisí především na velikosti použitých elementů výpočetní sítě a podrobnosti diskretizaci směrů radiační intenzity. DO model radiace tedy umožňuje výpočet střední radiační teploty v libovolném místě prostoru s vlivem stínění odrazů při působení dlouhovlnné i krátkovlnné (sluneční) radiace.

1.2. NORMATIVNÍ MODEL TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Technická norma [32] dává návod na výpočet měrného výkonu q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] dle vztahu (1-15).

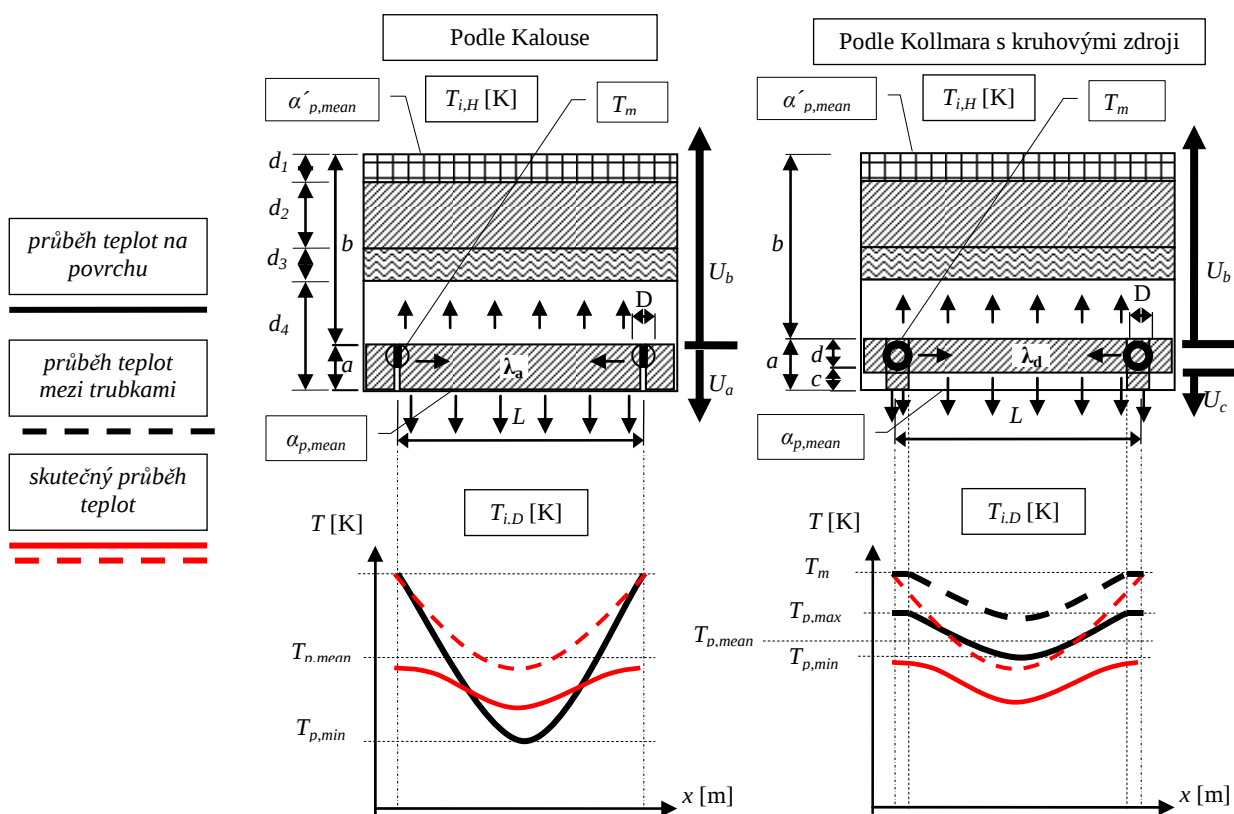
$$q = K_H \cdot \Delta t_H^n \quad (1-15)$$

kde	K_H	–	ekvivalentní součinitel prostupu tepla dle [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
	Δt_H	–	charakteristický logaritmický rozdíl teplot [K]
	n	–	exponent nabývající hodnot 1,0 až 1,05 dle [32] [-]

Normativní výpočetní postupy jsou omezeny jen na 3 základní konstrukční typy TA konstrukcí a neumožňují výpočet konstrukcí jiných, nebo tvarově, či z hlediska nesymetrie okrajových podmínek atypických TA případů. Normový přístup neumožňuje výpočet rozložení povrchových teplot TA konstrukcí.

1.3. ANALYTICKÉ MODEL Y TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Průběh teploty v TA konstrukci řešil K. Kalous, který použil teoretického postupu pro výpočet vedení tepla v tyči vypracovaného H. Groeberem a tento postup upravil pro praktické použití ve vytápěcí technice [3], [20]. Tento postup je velmi dobře využitelný pro návrh tenkých zavěšených sálavých panelů, méně pak v případech masivnějších stropů. Kollmar tuto metodu dále zpřesnil uvažováním kruhových tvarů potrubí – tak jak je to naznačeno na Obr. 1. Tyto modely jsou velmi zjednodušené, a nerespektují plně vícerozměrný charakter zde působících fyzikálních jevů. Z tohoto důvodu jsou povrchové teploty vypočtené těmito modely značně nepřesné a jejich použitím vzniká riziko nesprávného návrhu. Toto riziko se může projevit například vznikem kondenzace vzdušné vlhkosti na povrchu chladicích konstrukcí. Dalším opomenutým jevem je vliv TA konstrukcí na tepelné vazby (případně tepelné mosty) jak obálky budov, tak vnitřních konstrukcí.



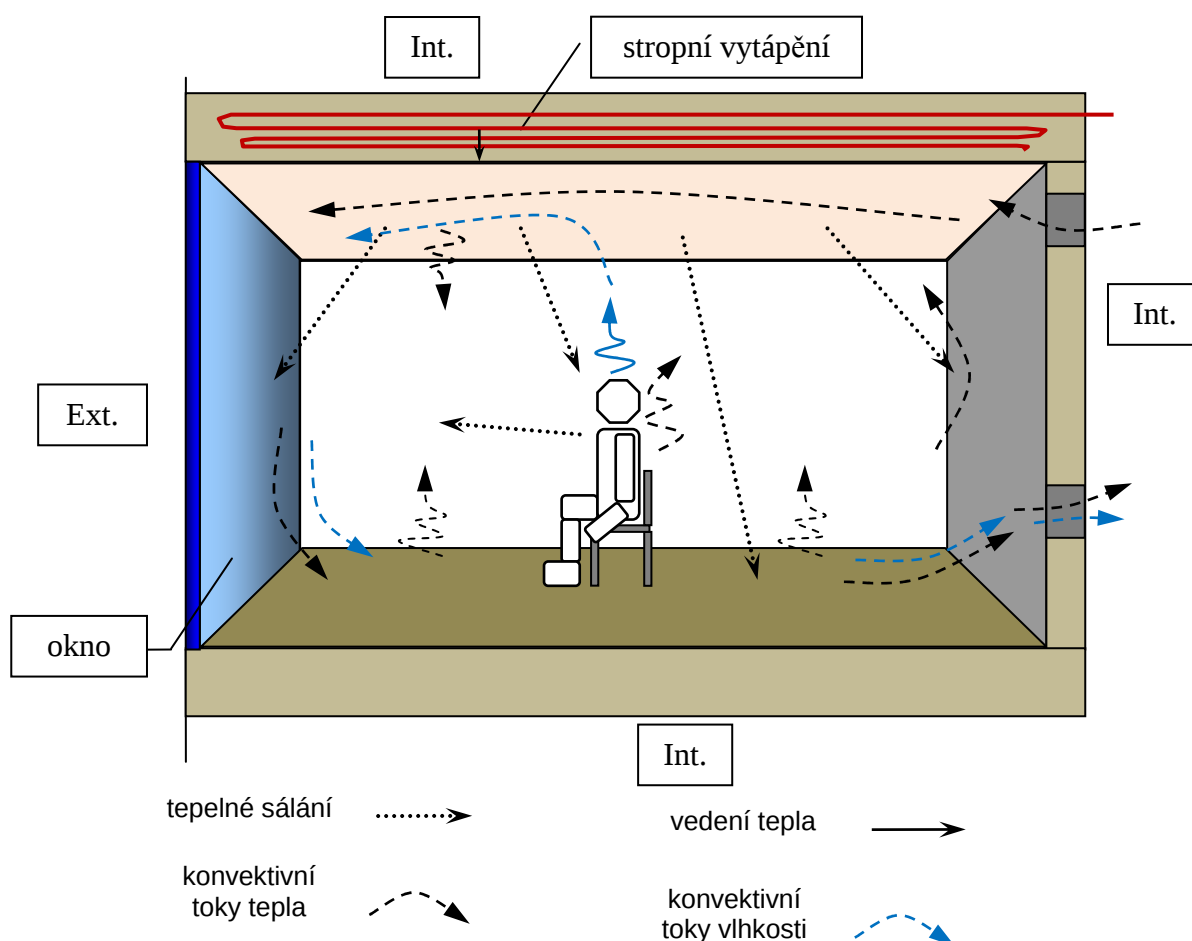
Obr. 1 – Schéma teplotních průběhů jednotlivých modelů, [A11]

Zvláštní kapitolou nedostatků tohoto analytického a výše uvedeného normativního modelu je jejich neschopnost postihnout časově neustálené chování, které je obzvláště významná pro modelování systémů se značnou tepelnou setrvačností, jako jsou systémy využívající aktivace betonového jádra. Tyto modely dále nejsou schopny zahrnout podrobněji vliv TA konstrukce na jednotlivé parametry vnitřního klimatu a posoudit tak rizika vzniku lokálního diskomfortu ve vazbě na celkovou geometrii teplotně upravovaného prostoru.

2. IDENTIFIKACE A MODELOVÁNÍ TEPELNÉHO PŮSOBNÍ TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Geometrické modely velkoplošných systémů je možné vytvářet na různém stupni podrobnosti a tedy i různé přesnosti a náročnosti. Výchozím pro analýzu fyzikálního chování je znalost toků tepla a látky v budově. Při tvorbě tepelně-vlhkostního mikroklimatu TA konstrukcemi spolu se systémy větrání vystupují do popředí mechanismy sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním spolu s produkcí a přenosem vlhkosti v daném prostoru, jak je to naznačeno na Obr. 2. Je patrné, že tepelný výkon TA konstrukce se do místnosti přenáší konvekcí a tepelným sáláním. Konvekce je zde typicky volná (přirozená), která nastává v důsledku působení vztlakových sil způsobených především nerovnoměrným ohřátím vnitřního vzduchu v místnosti. Dále zde také působí konvekce nucená, která je vyvolána nuceným přívodem a odvodem větracího vzduchu. Význam nucené a přirozené konvekce se mění především v závislosti na tom, jaké množství větracího vzduchu je přiváděno a jak je tento vzduch v prostoru distribuován. Vzhledem ke snaze přivádět pouze minimální množství vzduchu tak, aby bylo upravováno pouze toxické a vlhkostní mikroklima a přenechání tvorby tepelného komfortu na velkoplošných systémech, převládá ve většině případů konvekce přirozená. Zejména u vertikálních TA ploch jako jsou stěnové systémy, nebo také u velkých prosklených ploch v místnosti, dochází vlivem přirozené konvekce k významnému proudění vzduchu, které pak na další povrchy místnosti působí obdobně jako konvekce nucená. Přirozené a nucené konvekční mechanismy jsou tímto propojené a je třeba je takto uvažovat a vhodně matematicko-fyzikálně modelovat. Existence těchto konvekčních proudů vzduchu může být lidmi pocíťovaná jako konvekční diskomfort – průvan.

Většinu tepelného výkonu však předávají TA konstrukce do místnosti tepelným sáláním, které působí jak přímo na osoby v této místnosti, tak nepřímo. Nepřímé působení spočívá v osálení ostatních povrchů TA konstrukcí, čímž dojde k akumulaci tepla a následnému přenosu do místnosti konvekcí. Jelikož tepelný tok sáláním se šíří přímočaře, dochází k přímému přenosu tepla sáláním v drtivé většině jen s těmi konstrukcemi, které mají s povrchem TA konstrukce přímou viditelnost. V důsledku toho pak vznikají v geometricky složitějších místnostech radiační stíny, tedy oblasti s nižší (odcloněnou) sálavou složkou, ve kterých pak lidé pocíťují opět tepelný diskomfort.



Obr. 2 – Toky tepla a látky při podlahovém vytápění a chlazení

Při snaze o co nejvěrnější popis výše uvedených jevů nabývají teoretické modely na rozsahu, složitosti a výpočetní náročnosti. Tyto úrovně modelů jsou typicky řešitelné metodou CFD modelování a simulace a jejich využití je prezentováno v kapitole 2.3.

Obecně je nutné každý jev modelovat adekvátními modely, které musí postihnout nejvýznamnější faktory a zanedbat, či potlačit ty nevýznamné, nebo méně významné. Z toho hlediska mají význam a jsou v některých případech dobře použitelné a dostatečně přesné jednodušší modely – dále označované jako 1D a 2D, které jsou prezentovány v kapitolách 2.1 a 2.2.

Oprávněnost použití těchto zjednodušených modelů lze vysvětlit následovně. Necht' je dána místnost – například tělocvična – která má jednu venkovní stěnu, nemá vnitřní vybavení a je vytápěna podlahovým vytápěním. Těsnost a kvalitní tepelně-technické vlastnosti zde uvažovaných oken výrazně napomáhají eliminaci vzniku chladných konvekčních proudů vzduchu. Taktéž napomáhají udržet vnitřní povrchovou teplotu zasklení na teplotní úrovni blízké ostatním vnitřním povrchům, čímž je dosaženo rovnoměrné sálavé složky. Z důvodů absence vnitřního vybavení, a využití celé podlahové plochy k vytápění místnosti, také odpadá riziko vzniku radiačních stínů. V takovéto místnosti je pak dosaženo příznivého rozložení teplot po výšce místnosti. Z výše

uvedeného vyplývá, že celý prostor je teplotně relativně homogenní a homogenní jsou také parametry vnitřního tepelně-vlhkostního mikroklimatu. V takovémto případě je pak možno zaměřit pozornost především na dosažení potřebného tepelného výkonu pro eliminaci tepelných ztrát a na kontrolu nejvýše přípustné teploty podlahy z důvodů hygienických. Všechny výše zmíněné mechanismy přenosu tepla tak lze zredukovat na 2D vedení tepla s přestupem. V součiniteli přestupu tepla je pak možno zohlednit vliv konvekce i tepelného sálání. Tepelné působení TA konstrukcí je však obecně komplexní fyzikální problém, který je ve své úplnosti nutno řešit metodou CFD simulace tak, jak je to bude prezentováno v kapitole 2.3. Z této analýzy tepelného chování TA konstrukcí však opravňuje zanedbat v některých případech většinu fyzikálních jevů a redukovat výpočetní model na 1D, případně 2D.

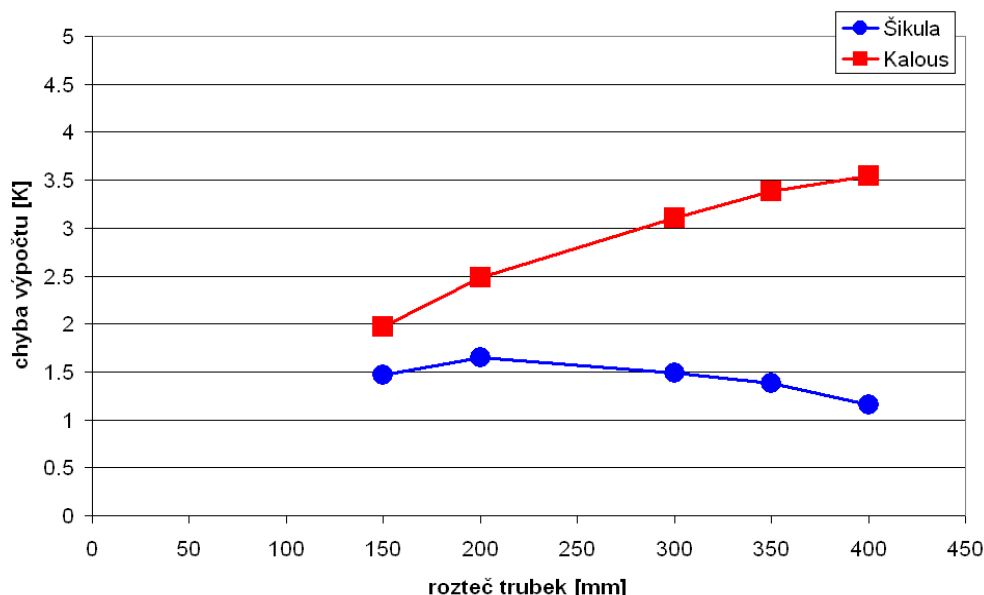
2.1. 1D METODY MODELOVÁNÍ

Tato část vychází z výsledků vlastních prací [A11], [A14], [A15], [A17]. Pro analýzu přesnosti stanovení průběhu teplot 1D analytickým modelem podle Kalouse prezentovaným v kapitole 1.3 bylo použito vlastního softwaru CalA, který je založen na podrobném numerickém řešení dvourozměrného stacionárního pole metodou kontrolních objemů. Konkrétně byly porovnávány průběhy teplot v TA konstrukci stropu a na jejím povrchu pro případ několika geometrických variant stropního vytápění. Byla vypracována sada výpočtů pro různé průměry trubek a jejich osovou vzdálenost analytickým modelem dle Kalouse a 2D numerickými simulacemi v softwaru CalA. Z konfrontací obou uvedených metod lze dojít k závěru, že Kalousův model vykazuje určité nepřesnosti které se týkají v téměř zanedbatelné míře střední povrchové teploty, avšak ve větší míře charakteru průběhu teplot a z něj rezultujících hodnot povrchové teploty minimální a maximální. Tyto mezní hodnoty jsou potřebné pro posouzení rizika kondenzace vodních par na povrchu chladících stropů, zejména v místě pod trubkou, kde je riziko nejvyšší. Rozdílnost výsledků je tím vyšší, čím větší je krytí trubek na sálavou stranu panelu nebo jejich osová vzdálenost. Z Obr. 3 je zřejmé, že odchylka povrchové teploty pod trubkou dle Kalousova postupu od numerického řešení 2D vedení tepla softwarem CalA dosahuje v posuzovaných případech až 3,5 K, což je relativně velmi mnoho. Pro zpřesnění výpočtu povrchových teplot pod trubkou je navržena nová, vlastní metoda upravující vztah pro výpočet rozložení povrchových teplot – vztah (2-1) – vycházející z Kollmarem upraveného Kalousova postupu.

$$T_{p(x)} = T_{p,mean} + (T_{p,max} - T_{p,min}) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{L}\right) \quad (2-1)$$

kde	p	–	index značící povrch
	x	–	vzdálenost ve směru mezi trubkami [m]
	L	–	rozteč trubek [m]

Porovnání výsledků obou výpočetních postupů pro obvyklé rozestupy potrubí je prezentováno na Obr. 3. Je z nich patrné, že nový výpočetní postup vykazuje v uvažovaných případech, především při vyšších roztečích trubek, výrazně menší odchylku od numerického řešení 2D sdílení tepla a tím zpřesňuje výpočet povrchových teplot a zejména v kritickém místě pod trubkou.



Obr. 3 – Porovnání odchylek analytických 1D modelů pro trubky Ø 21,25 mm

Dílčí závěr

V této části byly porovnány dvě metody pro výpočet povrchových teplot – metoda ručního výpočtu dle Kalouse a metoda podrobné numerické simulace 2D prostupu tepla v softwaru CalA. Z porovnání vyplývá, že Kalousův model vykazuje určité nepřesnosti při výpočtu povrchových teplot otopných, či chladicích stropů a podlah. Zejména při větších osových vzdálenostech topných či chladicích trubek dochází k nezanedbatelným chybám. Vzhledem k těmto chybám se ukazuje vhodnější využít navrhované úpravy Kalousova modelu, který zpřesňuje výpočet povrchové teploty pod trubkou, což je využitelné pro posouzení rizika kondenzace vodních par na aktivním povrchu chladicích stropů, nebo ještě lépe využít při návrhu software pro řešení dvourozměrného sdílení tepla.

2.2. 2D METODY MODELOVÁNÍ

V této práci jsou k numerickému modelování sdílení tepla užívány výhradně metody deterministické založené na metodě kontrolních objemů. Tato část vychází z vlastních prací uvedených v závěru. Numerický algoritmus 2D časově neustáleného sdílení tepla jsem nejprve odladil a otestoval v prostředí MS Excel a posléze implementoval za přispění Josefa Pláška do samostatného výpočtového software Calculation Area (dále jen CalA). Software CalA je

autorizovaným softwarem, který je vyvíjen na Ústavu technických zařízení budov Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně od roku 2007 a jehož jsem hlavním autorem. Princip použité metody kontrolních objemů vychází z práce Finlayson (1972) aplikované S. V. Patankarem (1980) [18]. Kontrolní objemy jsou obdélníkového tvaru a v jejich geometrických středech jsou počítány teploty. Řešení diferenciální rovnice (1-1) pro 2D případy metodou kontrolních objemů s danými lineárním průběhem teplot mezi kontrolními objemy, vede na soustavu lineárních algebraických rovnic (LAR), jež je dále řešena následujícími třemi způsoby. Software obsahuje finitní řešič založený na optimalizované variantě metody Gaussovy eliminace (GEM). Z finitních metod řešení LAR dále využívá dosazovací metodu a z iteračních metod je pak k dispozici Gauss-Seidlova iterační metoda. V aktuální verzi je GEM a iterační metody využito pro simulaci časově ustálených úloh vedení tepla a dosazovací metody a Gaussovy super relaxační metody pro úlohy časově neustálené. Z hlediska časového je voleno plně implicitní schéma časové diskretizace. Software využívá okrajové podmínky 3. druhu (Newtonovy) dle (2-2), která zvolením vysoké hodnoty součinitele přestupu tepla může nabýt charakteru okrajové podmínky 1. druhu (Dirichletovy). Okrajovou podmínku tepelného toku lze přibližně zadat vnitřním zdrojem tepla v okrajové vrstvě modelované konstrukce, čímž vznikne kombinovaná podmínka přestupu tepla a tepelného toku. Touto kombinovanou podmínkou pak lze společně simulovat přenos tepla konvekcí a sáláním. Parametry rovnice (1-1) jsou nezávislé na teplotě, avšak mohou být v průběhu nestacionárních výpočtů v každém z časových kroků voleny individuálně. Tyto parametry mají povětšinou význam tepelně-technických vlastností materiálů – c , ρ , λ , avšak mohou být vykládány i jinak v závislosti na tom, jaký fyzikální jev se danou rovnicí právě řeší.

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha \cdot (T_w - T_f) \quad (2-2)$$

kde	α	–	součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
	w	–	index označující povrch tělesa	
	f	–	index označující okolní tekutinu	

Pro výpočet potřebných veličin je využita proměnná typu „floating point“, která pracuje s pohyblivou desetinnou čárkou a přesností sedmi platných číslic. Software CalA je v současné verzi schopný řešit na běžném osobním počítači s 64bitovým operačním systémem časově neustálené úlohy s více než 20 miliony buněk. Bližší informace k softwaru lze najít v [A13].

Ověření softwaru CalA

Ověření softwaru CalA pro modelování TA konstrukcí bylo provedeno komplexně několika níže popsanými testy a srovnáními.

Software CalA byl nejprve testován pro časově ustálené vedení tepla metodu dle normy [30] přílohy A. Z tohoto srovnání vyplývá, že testovaný algoritmus softwaru počítá správně časově ustálené úlohy a splňuje tak podmínky normy pro velmi přesnou 2D metodu.

Ověření softwaru pro neustálené sdílení tepla bylo provedeno srovnáním s analytickou metodou výpočtu 1D symetrického chladnutí homogenní stěny.

Dalším krokem bylo ověření výpočetního algoritmu pro úlohy časově neustáleného vedení tepla s vnitřním zdrojem. Tento případ je v praxi typický, je-li použit velkoplošný systém vytápění s elektrickými odporovými dráty. I v tomto případě bylo ověřeno respektování zákona zachování energie výpočtovým modelem v případě modelu časově neustáleného vedení tepla s vnitřním zdrojem.

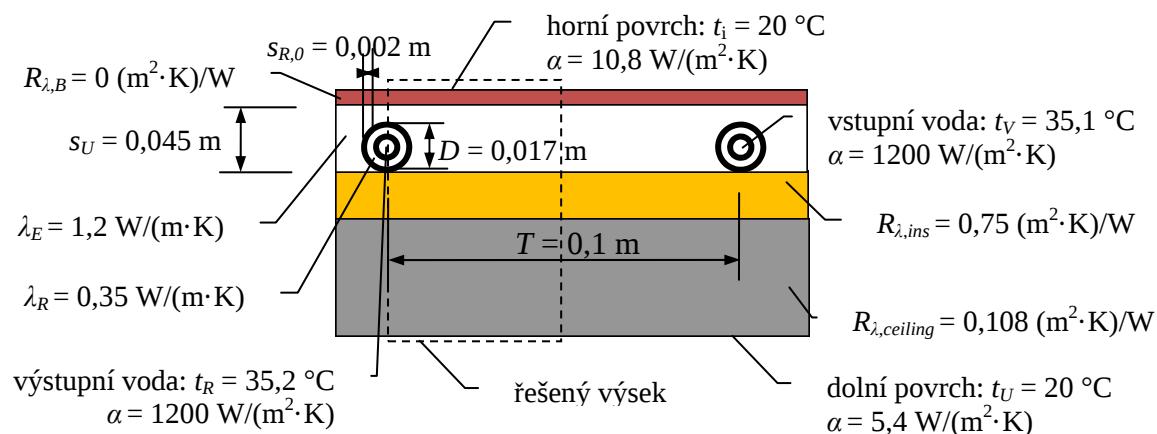
Vliv aproximace kruhového potrubí na obdélníkové výpočetní síti byl zkoumán na typickém případě modelu otopného systému založeném na principu aktivace betonového jádra. Byla uvažována vybraná skladba tepelně aktivované stropní konstrukce bez podlahových vrstev a omítek obsahující otopný had z typického polyethylenového potrubí. Tento testovací případ uvažoval s 2D časově ustáleným vedením tepla a byl srovnáván s výsledky simulace v „ověřeném“ komerčním kódu – softwaru Fluent 6.3. Maximální odchylka v tepelných tocích mezi oběma softwary byla menší než 1 %. Při porovnání povrchových teplot je na horním líci konstrukce menší než 0,02 K a na dolním líci konstrukce je menší než 0,002 K. Dosažené odchylky v povrchových teplotách a tepelných tocích tak lze považovat za velmi malé a tudíž přijatelné.

Dále byl testován vliv zanedbání tepelného odporu stěny potrubí. Provedené simulace ukazují, že tepelný odpor stěny potrubí není možné zanedbat u plastových potrubí a je tedy nutno tento tepelný odpor modelovat přímo, nebo jej započíst do odporu při přestupu tepla.

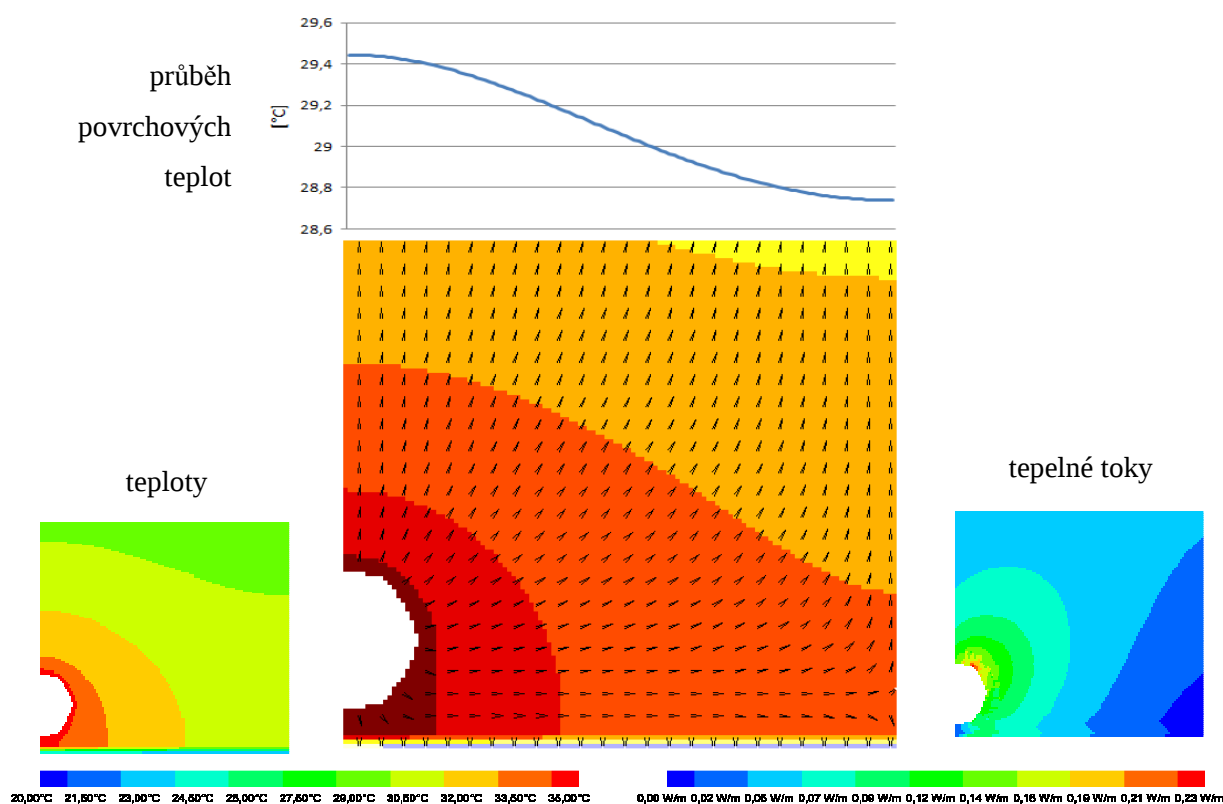
Jako poslední testovací případ bylo provedeno srovnání metod stanovení tepelného výkonu typické TA konstrukce těmito metodami:

- Výpočetním algoritmem dle ČSN EN 1264-2, [32]
- Simulací vlastním softwarem CalA
- Laboratorním experimentálním měřením

Vstupní geometrie a okrajové podmínky a materiálové charakteristiky jsou definovány na Obr. 4.



Obr. 4 – Testovací případ – definice vstupních hodnot



Obr. 5 – Výsledky simulace v softwaru CalA

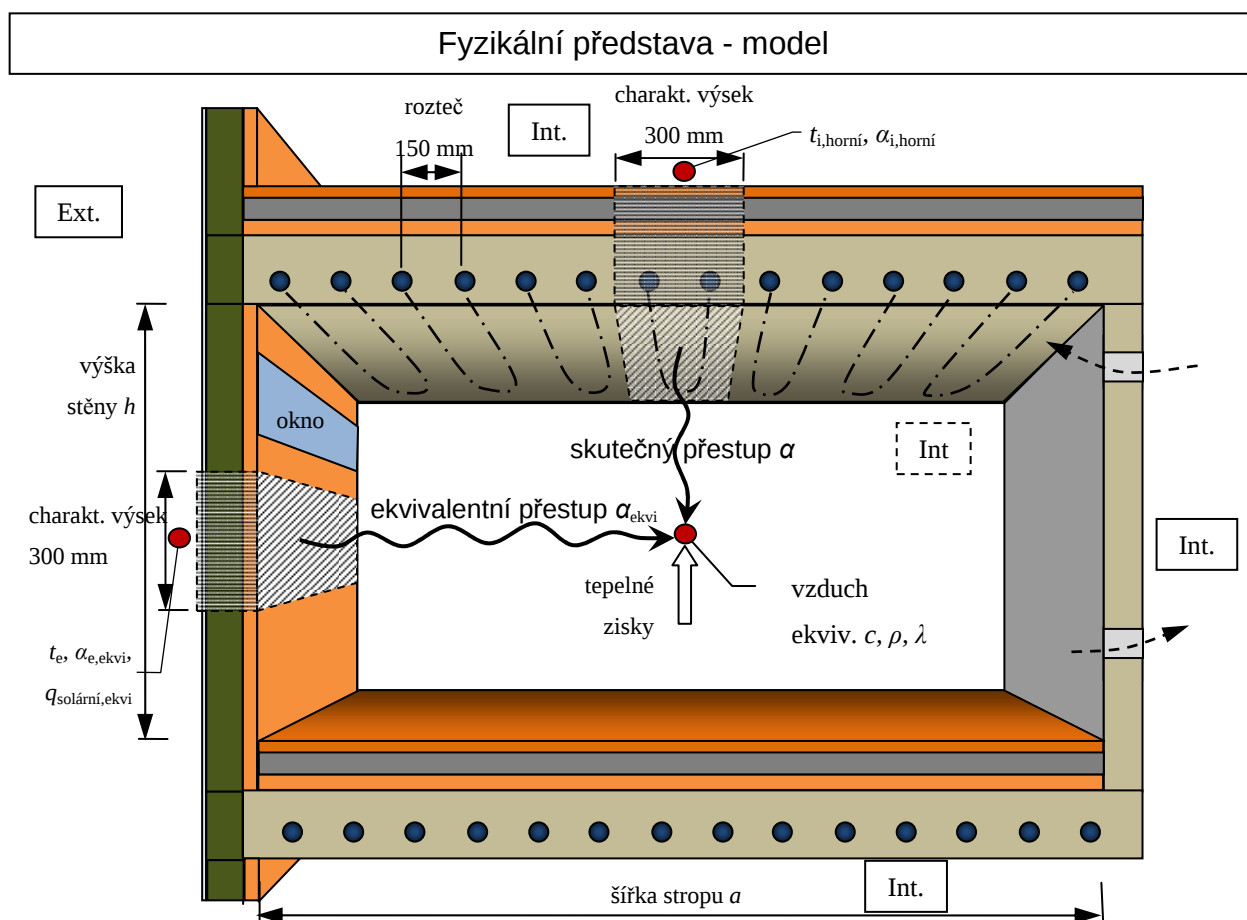
Tepelný výkon vypočtený normovým postupem se od experimentu odchyluje cca o 2,5 %. Výpočet měrného tepelného výkonu a střední povrchové teploty vypočtený vlastní metodou 2D numerického vedení tepla v softwaru CalA se od experimentu odchyluje o přibližně 0,5 %. Tímto lze považovat metodu výpočtu časově ustáleného tepelného chování TA konstrukcí softwarem CalA za validovanou.

Modelování vlivu TA konstrukcí na tepelné mosty

Návrh podlahového vytápění je z podstaty věci úzce spjat s řešením stavebně-konstrukčních detailů. Cílem tohoto řešení je eliminace nejvýraznějších úniků tepla z vytápěného prostoru, které jsou nazývány tepelnými vazbami či mosty. Mezi problematická místa, z hlediska tepelných mostů, bezpochyby patří návaznost podlahy a stropní konstrukce na obvodovou stěnu. Byla provedena sada simulací teplotních polí a sdílení tepla a návazné tepelně-technické výpočty – viz např. [A16]. Z dosažených výsledků vyplývá, že dochází k jistému, i když malému úniku tepla konstrukčními detaily vlivem podlahového vytápění. Je však otázkou diskuse, zda je správné postihovat vliv podlahového vytápění lineárním činitelem tepelných mostů, který má primárně vyjadřovat kvalitu řešení styku stavebních konstrukcí. Podlahové vytápění však je součástí stavební konstrukce podlahy, a proto se obecně jeho posuzování s pomocí lineárního činitele prostupu tepla jeví možné, byť třeba s jistými korekcemi. Tento zkoumaný vliv podlahového vytápění se tak musí projevit nejen na straně návrhu vytápění (při návrhu výkonu podlahového vytápění a posouzení povrchových teplot), ale měl by se i nějak odrazit na straně stavební tepelné techniky při posuzování úniků tepla stavebními konstrukcemi.

Modelování regulace aktivace betonového jádra

V této části je prezentován model časově neustáleného sdílení tepla při aktivaci betonového jádra v režimu chlazení. Model je založen na numerickém řešení 2D časově neustáleného sdílení tepla. Fyzikální představa aktivace betonového jádra a její ztvárnění v softwaru CalA je prezentována na Obr. 6. Model dokáže zohlednit všechny časově neustálené okrajové podmínky a dynamické odezvy nejdůležitějších částí ve vazbě na 2D charakter sdílení tepla ve výseku TA stropní konstrukce. Zohledněn je tedy vlastní strop a venkovní stěny. Geometrický model vychází z charakteristického výseku TA stropu, k němuž je přiřazen stejně široký výsek venkovní stěny.



Obr. 6 – Řešený detail a označení okrajových podmínek

Mezi tyto dvě konstrukce jsou pak vloženy 3 vrstvy, které reprezentují interní vzduch a přestupy tepla konvekcí a radiací ze stropu do interiéru a z interiéru na venkovní stěnu. Vrstva, která reprezentuje interiér, má ekvivalentní tepelnou kapacitu jako kvádr vzduchu (charakteristická šířka $\times$ výška místnosti $\times$ 1 m). Do této vrstvy jsou dále zahrnuty všechny časově neustálené tepelné toky, tedy tepelné zisky a tepelné ztráty. Tepelná vodivost přechodové vrstvy z interiéru na venkovní stěnu je navíc korigována poměrem plochy stěny ku ploše stropu. Tímto je zajištěno korektní sdílení tepla se stěnou o jiné ploše než stěny.

Měrná tepelná kapacita vrstev stěny byla korigována na poměr plochy stěny ku stropu.

Pro prezentaci modelu byla vybrána typická místnost v administrativní budově s jednou částečně prosklenou venkovní stěnou orientovanou na jihovýchod. Místnost je obsazena lidmi v pracovní době od 8 do 18 h a opatřena běžným kancelářským vybavením jako jsou počítače, monitory, tiskárny.

Cílem této části je poukázat na značnou tepelnou setrvačnost vybraného systému chlazení využívající TA betonového jádra stropu a problémy s řízením a regulací z toho vyplývajících. K tomuto účelu byly vybrány a simulovány následující 3 scénáře tepelného chování:

I) Teplé dny, řízení pro maximální akumulaci.

Jedná se o standardní provoz za přibližně stejných, periodicky se opakujících podmínek. Předpokládá se tedy několik po sobě následujících teplých letních dnů a plné působení vnitřních zisků. Vnitřní zisky sestávají převážně z tepelných zisků radiací okny orientovanými na jihovýchod, lidmi, počítači, monitory, osvětlením. Zdroj chladu zajišťuje v tomto případě pro pokrytí tepelné zátěže stálou teplotu chladicí vody na úrovni 17 [°C]. Toto řízení umožní v časech mimo obsazení místnosti naakumulovat značné množství chladu a využít je přes den.

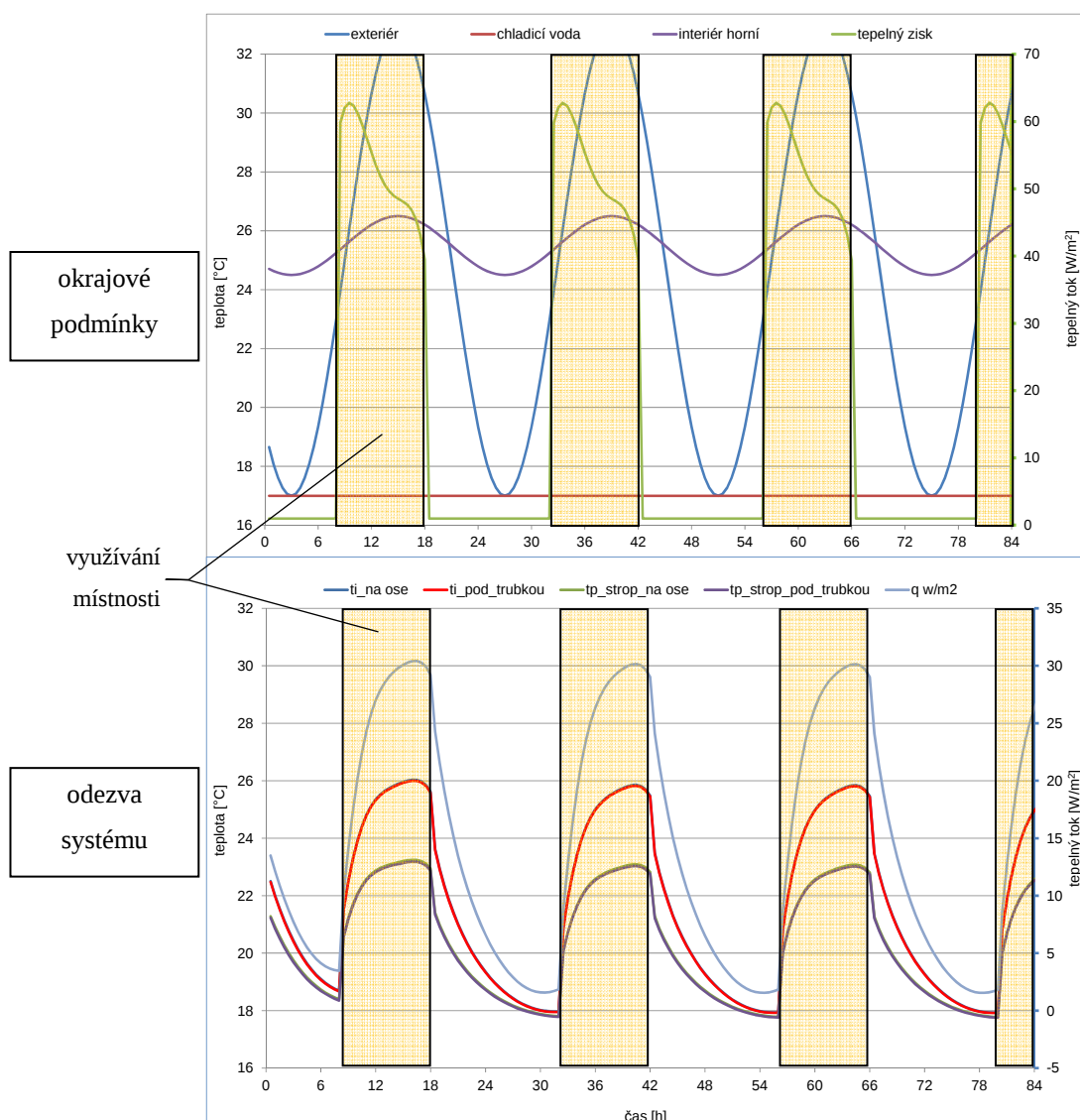
II) Náhlé ochlazení, regulace dle aktuálních teplot.

Zde byl vybrán scénář, kdy po teplých dnech přijde náhlá změna počasí, která je charakterizovaná menšími teplotami venkovního vzduchu a zataženou oblohou což se projeví značným snížením tepelných zisků okny radiací. Ostatní tepelné zisky působí v plné hodnotě. Chlazení je řízeno na základě teploty interiéru.

III) Náhlé ochlazení, regulace dle předpovědi počasí.

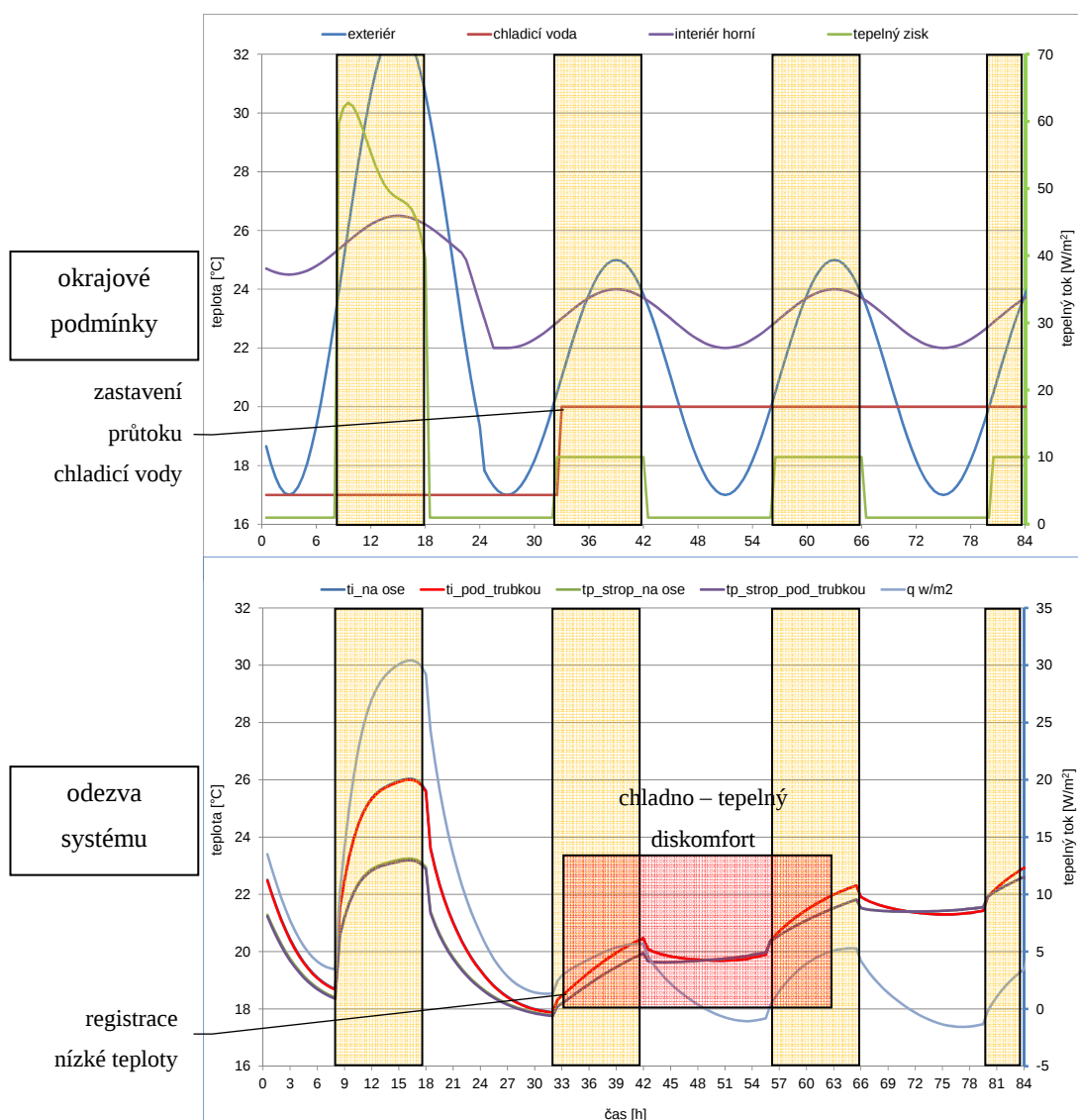
V tomto případě dojde ke stejné náhlé změně počasí, jako v předchozím případě. Regulace je však řízena inteligentně na základě předpovědi počasí a je tak schopna reagovat s předstihem.

Průběh okrajových podmínek a výsledky simulací jsou zobrazeny na níže uvedených obrázcích. Ve scénáři I je v době užívání místnosti zajištěn tepelný komfort. Aby byl dostatečně zajištěn chladicí výkon pro pokrytí tepelných zisků, je třeba v tomto případě provozovat chlazení kontinuálně. Při tomto způsobu řízení je počítáno s tím, že každý následující den nastane takové počasí, které umožní spotřebování naakumulovaného chladu. V době mimo obsazení místnosti (typicky přes noc) tak klesá v důsledku nachlazování stropu jeho povrchová teplota a současně také teplota interiéru k 18 [°C], která je velmi nízká, avšak odůvodněná potřebou maximalizace akumulovaného chladu ve stropní konstrukci. Jelikož teplota interiéru klesá v důsledku tepelných ztrát místnosti rychleji, zmenšuje se také rychle účinný teplotní rozdíl a klesá tak výkon chladicího stropu až téměř na nulu. S nástupem využívání místnosti přichází do místnosti tepelné zisky, které způsobují prudký vzestup teploty v místnosti tak, že během několika minut přesahuje minimálně přípustných 20 [°C]. Během těchto pár minut nastává v místnosti tepelný diskomfort, který je však odůvodněný a dostatečně krátký na to, aby byl akceptovatelný. Blíže viz Obr. 7.



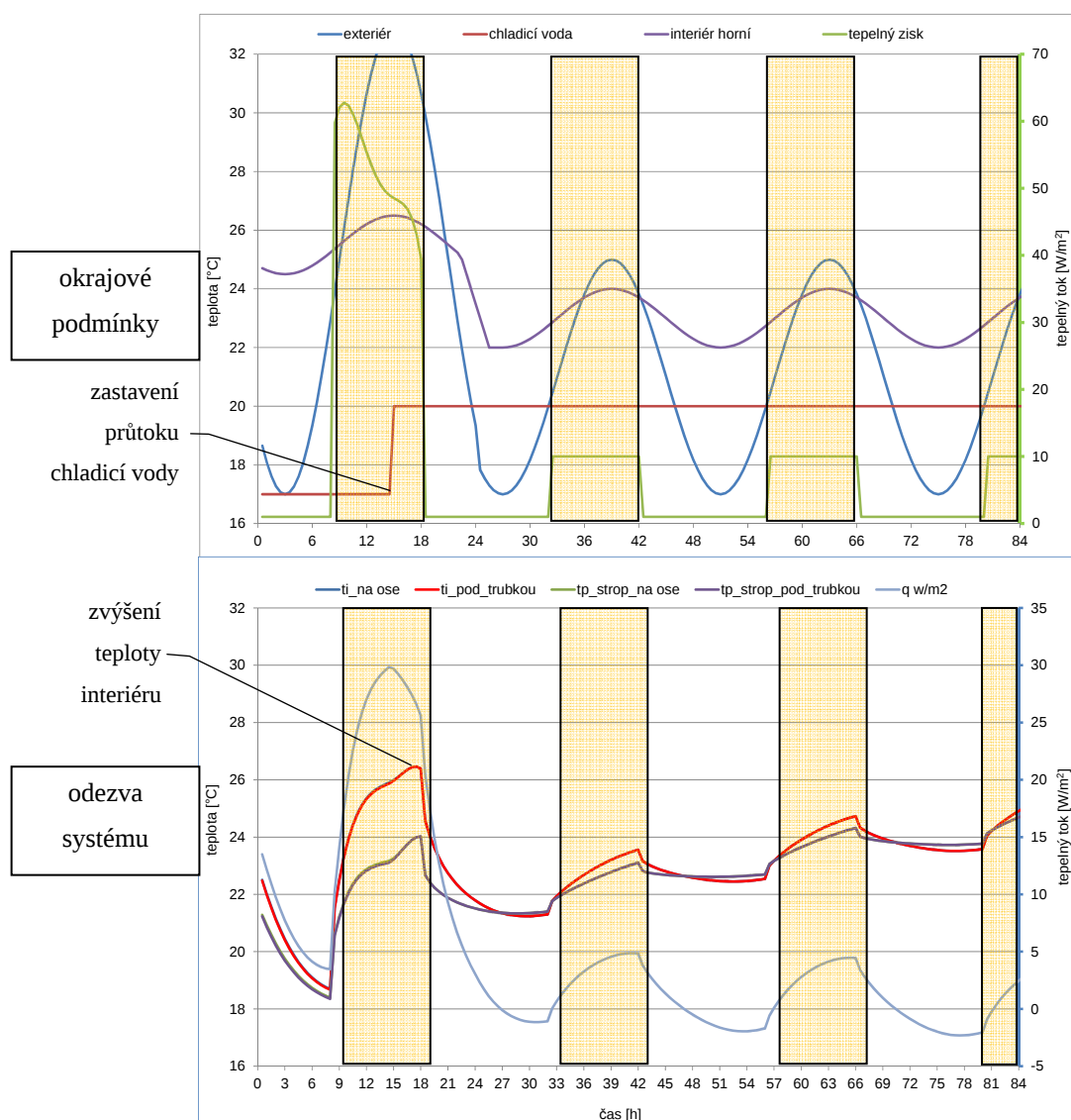
Obr. 7 – Scénář I – teplé dny, řízení pro maximální akumulaci

Výsledky řízení chlazení dle teploty vnitřního vzduchu jsou prezentovány na Obr. 8. V ranních hodinách druhého dne (tedy kolem 31. h od začátku simulace) se pohybuje teplota interiéru opět kolem 18 [°C] a v místnosti začínají působit tepelné zisky. Protože však jsou z důvodu změny počasí výrazně menší, nedochází ke kýžené rychlosti nárůstu vnitřní teploty. Až v tuto chvíli (přibližně v 9 h) tak zareaguje systém regulace vypnutím čerpadla, čímž chladicí voda přestane proudit a dále ochlazovat stropní konstrukci. I když je chladicí výkon stropu způsobený naakumulovaným chladem velmi nízký, narůstá teplota interiéru tak pomalu, že minimálně přípustné hodnoty ~20 [°C] dosáhne až v 18 [h]. Tepelný diskomfort tak trvá po celou dobu pobytu osob v této místnosti a jistě bude pociťován velmi nepříznivě.



Obr. 8 – Scénář II – náhlé ochlazení, regulace dle aktuálních teplot

Scénář III se odvíjí zpočátku stejně jako předchozí ovšem s tím rozdílem, že zde inteligentní systém měření a regulace dopředu rozpozná z předpovědi počasí riziko podchlazení místnosti a přeruší dodávku chladicí vody do stropu již v 15 h předchozího dne, tedy v tomto případě o 18 hodin dříve než systém reagující až na teplotu interiéru – varianta II. V důsledku tohoto regulačního zásahu se ještě týž den v době obsazení místnosti mírně zvedne teplota interiéru – viz Obr. 9. Avšak následný pokles teploty vlivem teplotní setrvačnosti nachlazené stropní konstrukce je výrazně pomalejší než v předchozím případě a v ranních hodinách dalšího dne nepoklesnou tak hluboko a tepelný komfort v dané místnosti nenaruší vůbec.



Obr. 9 – Scénář III – náhlé ochlazení, regulace dle předpovědi počasí

Dílčí závěr

V této kapitole byl prezentován termodynamický model schopný modelovat dopad různých strategií regulace na vnitřní klima a spotřebu energií. Dále také umožňuje optimalizaci návrhu stropní konstrukce a to především z hlediska její schopnosti akumulovat potřebné množství chladu a také schopnosti tento chlad v čase distribuovat do chlazené místnosti.

Využití matematicko-fyzikálních modelů pro kybernetické modely

Využití modelu prezentovaného v předcházející kapitole je především v oblasti testování strategií řízení akumulace tepla a chladu a řízení výkonu TA konstrukcí. K moderní a inteligentní regulaci výkonu TA konstrukcí se dnes začínají užívat kybernetické modely – viz např. [22]. Aby tyto modely mohly optimálně řídit, musejí se nejprve naučit na základě sledování odezvy na vstupy postihnout dynamiku TA konstrukcí a jejich dopad na základní parametry tepelně-vlhkostního mikroklimatu. Data pro tuto činnost jsou pochopitelně k dispozici až po uvedení budovy do

provozu, což je již pozdě. Získat tato potřebná data ve fázi návrhu budovy – projekční fázi – je však možné využitím modelů prezentovaných v kapitole 2704192 a 2.3.

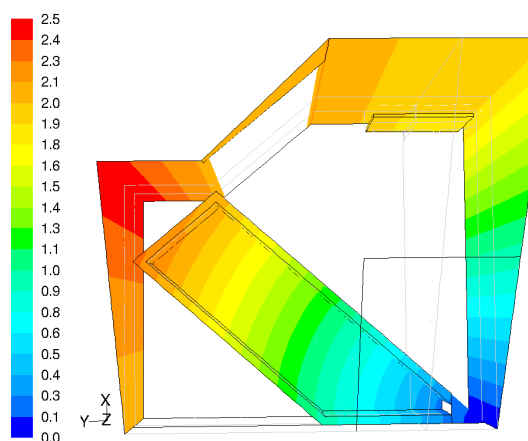
2.3. 3D METODY MODELOVÁNÍ

Hlavní přínos CFD metody tkví v její schopnosti postihnout komplexně a podrobně všechny toky tepla a látky v budově a vyčíslit tak fyzikální parametry, které jsou potřebné pro vyhodnocení tepelného komfortu indexy PMV, PPD a dalšími dle [33]. Potřebnost posuzovat komplexně celou místnost se všemi konstrukcemi, systémy větrání uživateli a podobně vyplývá z výše provedené analýzy přenosu tepla a látky. V této části budou prezentovány 3D CFD modely časově ustáleného sdílení tepla a látky v místnostech vytápěných, nebo chlazených TA konstrukcemi. Cílem je prezentovat komplexnější a pokročilejší možnosti CFD simulací a také s jejich pomocí poukázat na rizika, které vznikají použitím TA konstrukcí.

Vliv podlahového vytápění na povrchovou kondenzaci

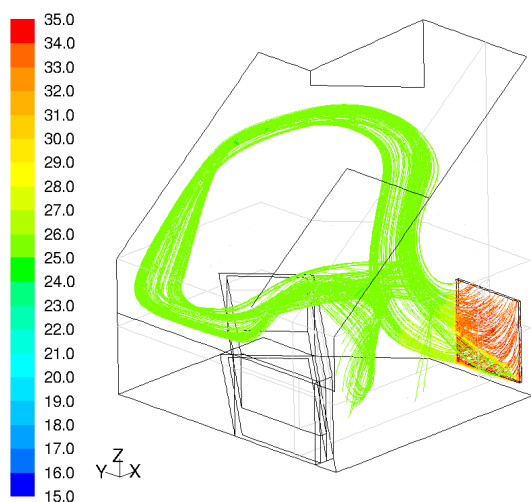
Pro demonstraci využití CFD simulace pro podlahové vytápění byla zvolena dispozičně „minimalisticky“ řešená koupelna podkrovního bytu dle [A8]. Pro výpočet byl uvažován stav, kdy je koupelna užívána, jsou zavřeny dveře do předsíně i střešní okno do exteriéru a nedochází tedy k žádné výměně vzduchu koupelny s okolím. Geometrický model místnosti a výpočetní síť – viz Obr. 10 – byly vytvořeny v programu Gambit 2.2. Vlastní simulace byla provedena v programu Fluent 6.3. Simulace proudění byla provedena jako neizotermická pro časově ustálené fyzikální děje. V simulaci bylo modelováno sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním. Vzduch byl modelován jako zcela průteplivý a nestlačitelný chovající se dle stavové rovnice pro ideální plyn. Byl použit RNG k - ϵ model turbulence se standardními stěnovými funkcemi. Vlhkostní poměry byly definovány na smáčeném vnitřním povrchu vany hmotnostním zlomkem vodní páry. Součinitele prostupu tepla venkovních konstrukcí odpovídaly požadavkům normy. Všechny stavební konstrukce byly modelovány jako difúzně nepropustné, tepelné mosty nebyly pro zjednodušení geometrického modelu uvažovány. Sdílení tepla sáláním jednotlivých povrchů bylo uvažováno modelem radiace DO s využitím běžných součinitelů integrální emisivity.

Pro porovnání byly provedeny dvě simulace. V první simulaci bylo uvažováno s vytápěním deskovým otopným tělesem s jednou deskou o jednotné povrchové teplotě – varianta A. Ve druhé simulaci pak s podlahovým vytápěním o jednotné povrchové teplotě – varianta B. Jednotícím kritériem pro srovnání obou variant byla zvolena stejná průměrná teplota vzduchu v koupelně, a to z toho důvodu, že právě na základě teploty vzduchu bývá otopný systém v praxi regulován. Průměrná teplota byla zvolena proto, že nebyla určena přesná poloha teplotního čidla.

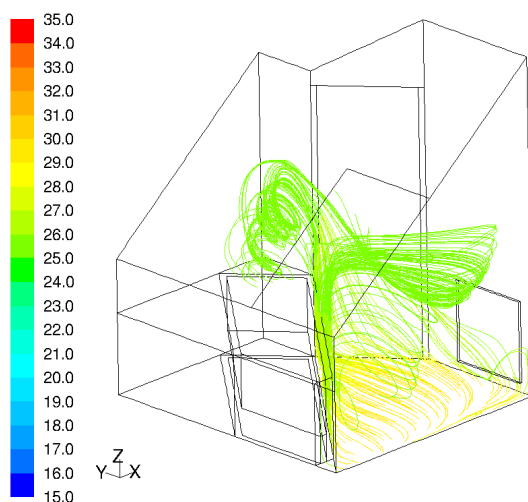


Obr. 10 – Geometrie řešené podkrovní koupelny

Velkou výhodou podlahového vytápění je komfortní dotyková teplota podlahy. Vytápění OT vykazuje v hlavní pobytové oblasti menší průměrnou hodnotu a menší rozptyl středních radiačních teplot než vytápění podlahové.

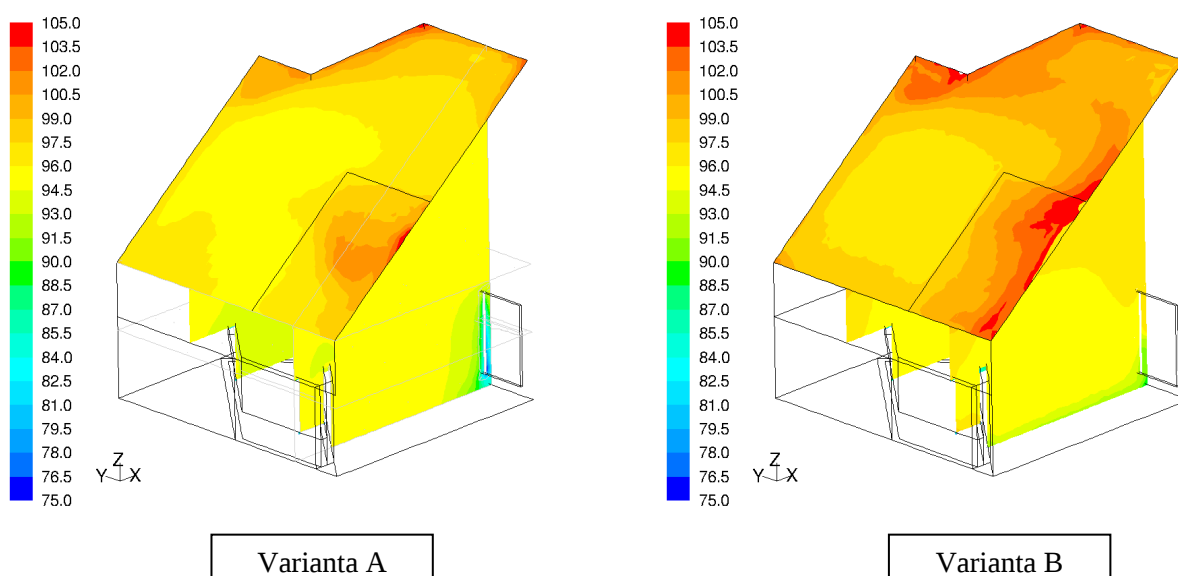


Varianta A



Varianta B

Obr. 11 – Teplotně zbarvené trajektorie proudícího vzduchu ve [°C]



Obr. 12 – Relativní vlhkosti vzduchu v [%]

Podlahové vytápění však vykazuje v daném případě dvě nepříznivé vlastnosti. Jednak vytváří méně intenzivní proudění vzduchu, ke kterému navíc dochází převážně jen v oblasti nad podlahou – viz Obr. 11, a také méně předává teplo sáláním venkovní stěně. Menší osálení venkovních konstrukcí, zejména však kritického koutu nad vanou a střešního okna, je způsobeno nižší povrchovou teplotou podlahy, ale především méně příznivými geometrickými podmínkami pro sálání způsobenými stíněním vany. Naopak při vytápění OT je relativně rychleji proudícím vzduchem celá oblast výrazně lépe „promývána“ a lépe jsou osálávány kritické kouty u venkovních konstrukcí. Tyto faktory pak způsobují to, že při podlahovém vytápění jsou povrchové teploty na venkovních konstrukcích relativně nižší a vzrůstá tak zde riziko kondenzace vzdušné vlhkosti. Kondenzace tak nastává na plochách s větší relativní vlhkostí než 100 % – viz Obr. 12.

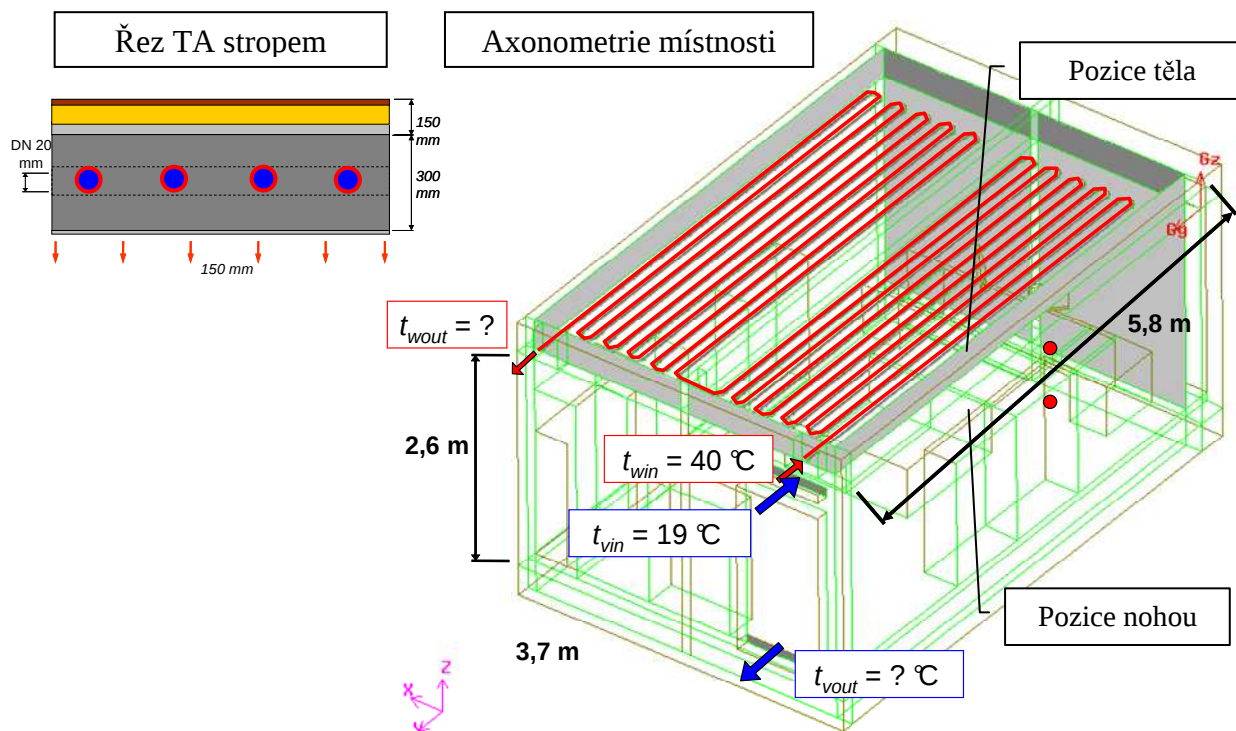
Dílčí závěr

Cílem této části bylo prezentovat možnosti využití CFD simulace, jako moderní metody k identifikaci faktorů ovlivňujících tvorbu optimálního vnitřního klimatu budov i s dopadem na stavební konstrukce. Zde byla konkrétně dokumentována nižší schopnost podlahového vytápění zamezit kondenzaci vlhkosti na jiných konstrukcích oproti vytápění otopným tělesem.

Teoretické posouzení tepelného komfortu v místnosti se stropním vytápěním

Cílem této části je poukázat na možnosti vzniku oblastí s tepelným diskomfortem při vytápění a chlazení stropním vytápěním a také prezentovat možnosti a přínosy podrobného modelování potrubí s teplonosnou látkou v TA konstrukci. Tato část vychází z vlastních publikací [A17] a [A18]. Řešeným případem je vybraná místnost – kancelář v administrativní budově. Rozměr místnosti a rozestavění vnitřního nábytku je voleno pro dvě osoby. Jedná se o místnost s jednou

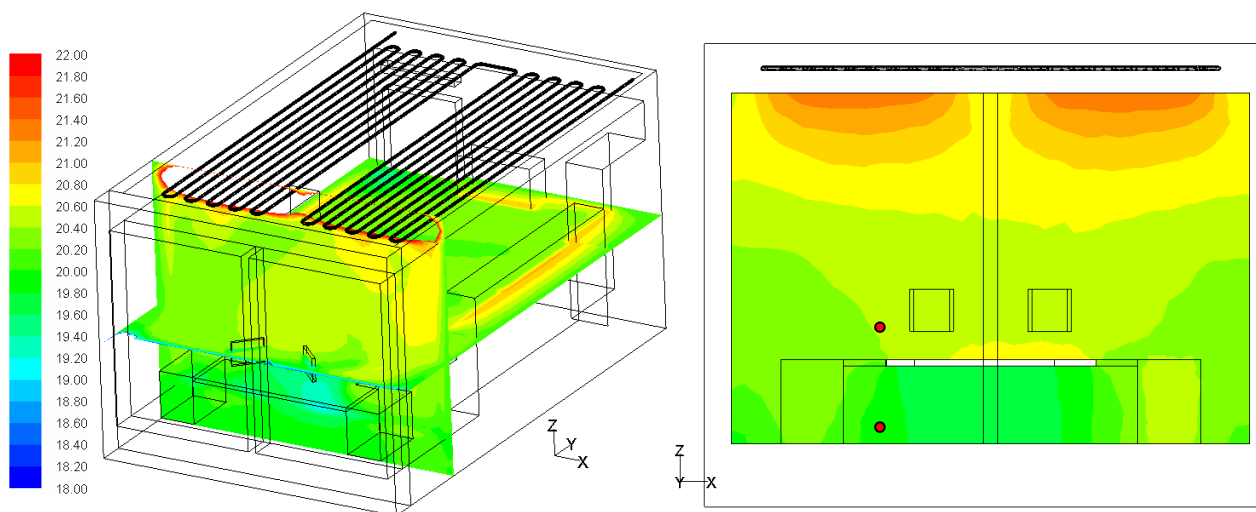
převážně prosklenou venkovní stěnou situovanou mezi místnostmi se stejným teplotním režimem. Tepelně-technické vlastnosti stavebních konstrukcí jsou přibližně na úrovni doporučených hodnot daných v současnosti platnými tepelně-technickými normami. CFD simulace byla provedena pro časově ustálené děje v zimním výpočtovém stavu bez přítomnosti osob. Byla uvažována noční doba výpočtu, kdy místnost není ovlivněna slunečním zářením. Tato místnost byla vytápěna stropním vytápěním.



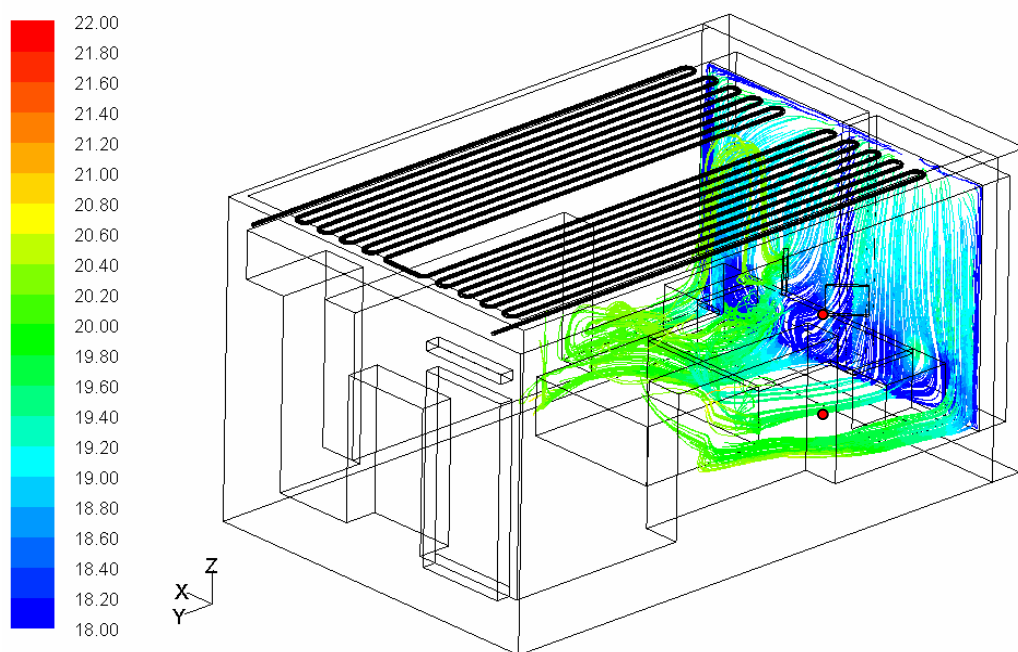
Obr. 13 – Geometrie řešené místnosti

Stropní vytápěním bylo provedeno ve formě podrobně simulovaného otopného hadu s trubkami meandrovitě vinutého v ose nosné železobetonové desky. Do místnosti byl nade dveřmi přiváděn venkovní větrací vzduch o teplotě 19 °C pro zabezpečení minimální požadované dávky venkovního vzduchu pro dvě osoby. Větrací vzduch byl z místnosti odváděn šterbinou pode dveřmi. Geometrický model je trojrozměrný a výpočetní síť sestává z kvádrů a čtyřtěsnů. Simulace byly provedeny pro časově ustálené děje. Model turbulence byl zvolen RNG k-ε. Vzduch byl uvažován jako průteplivý s hustotou měnící se dle zákona pro nestlačitelný ideální plyn. Jako model radiace byl využit DO (Discrete Ordinates). Úhlová diskretizace se ukázala jako dostatečná v počtu 4 v obou směrech. Vnitřní povrchy byly z hlediska tepelného sálání definovány jako šedé a matové se součiniteli integrální emisivity dle příslušných materiálů. Vzhledem ke skutečnosti že v dané výpočetní síti se nachází 2 různé typy proudění – proudění vzduchu v interiéru a proudění vody v otopném hadu, které jsou vzájemně propojené skrze rovnici energie – bylo nutno zvolit

vhodnou vazbu tlakového a rychlostního pole v hybnostních rovnicích. Toho bylo dosaženo použitím spřaženým řešením rychlostního a tlakového pole algoritmem „Coupled“.



Obr. 14 – Teploty konstrukcí a vzduchu (vlevo) a střední radiační teploty (vpravo), [°C]



Obr. 15 – Teplotně zbarvené trajektorie chladného padajícího vzduchu u okna, [°C]

Z dosažených výsledků vyplývá, že v prostoru pod stolem – tedy v místě nohou člověka je tepelný komfort nižší a to v důsledku radiačních stínů a chladného klesajícího vzduchu od oken. Při použití tohoto otopného systému je třeba věnovat pozornost tzv. radiačním stínům – tedy místům s odcloněnou radiační složkou. Tato místa se v posuzovaném případě nacházejí pod stolem v místě nohou sedících osob, kde navíc dochází k proudění chladného vzduchu klesajícího podél venkovní prosklené stěny. Společné působení těchto vlivů pak zvyšuje především ochlazování chodidel

a kotníků. Právě k identifikaci těchto kritických míst se metoda CFD simulace ukazuje jako velmi efektivní prostředek. Dalším velmi cenným přínosem této metody je možnost detailně vyčíslit tepelný výkon stropního vytápění, povrchové teploty stropu a také rozlišit jeho výkon konvekční a sálavý. To umožní zaměřit se na intenzifikaci těchto mechanismů přenosu tepla a tím přispět ke zvýšení tepelného výkonu. Tyto parametry lze vypočítat přímo ve vazbě na geometrii uložení topného hadu, rychlost proudění vody v něm, ale také na použitou skladbu stropní konstrukce, tvaru místnosti a její vybavení a obsazení osobami. Presentovaný model dále dokáže poskytnout informaci teplotním spádu teplotnosné látky.

3. PŘEDPOKLÁDANÝ VÝZNAM PRÁCE

Práce má význam pro rozvoj vědního oboru, praxi i výuku jak je to podrobněji uvedeno dále.

3.1. VÝZNAM PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU

Práce rozšiřuje poznání v oblasti tepelného chování, návrhu a teoretického posouzení tepelně aktivovaných konstrukcí ve vazbě na vnitřní klima budov. V práci byla prezentována:

- analýza tepelného působení TA konstrukcí na vnitřní prostředí budov;
- úprava zpřesňující výsledky stávajících 1D analytických modelů;
- metoda 2D časově neustáleného sdílení tepla s vnitřními zdroji implementovaná v novém softwaru CalA využitelná pro řešení řady problémů TA konstrukcí;
- možnost využití termodynamických modelů pro účely regulace výkonů TA konstrukcí;
- možnost využití metody počítačového modelování dynamiky tekutin (CFD) umožňující detailní posouzení mikroklimatu místností vytápěných, či chlazených TA konstrukcemi a s rozšířením o podrobné modelování otopného či chladicího hadu.

3.2. VÝZNAM PRO PRAXI

Výsledky předložená práce mají přímý a nepřímý dopad na stavební praxi spočívající v poskytnutí dokonalejších modelů a softwaru umožňujících přesnější a úplnější popis tepelného chování TA konstrukcí. Dosud se v praxi vychází v drtivé většině z firemních návrhových softwarů, které jsou založeny na normativních metodách výpočtu tepelného výkonu a neposkytují příliš přesné a podrobné informace o rozložení povrchových teplot. Zpřesněné 1D analytické a zejména nové 2D stacionární modely umožní v praxi přesnější výpočet tepelného výkonu a povrchové teploty TA konstrukcí, což je velmi důležité především pro návrh chladicích TA konstrukcí z hlediska zamezení rizika kondenzace vzdušné vlhkosti na jejich površích. 2D modely dále umožní výrazně přesnější návrh okrajových zón a především atypických tvarů TA konstrukcí, jako jsou otopné

sokly, trámové stropy, temperované schodiště a různé zakřivené konstrukce. Tyto modely jsou dále schopny zohlednit materiálovou nehomogenost, nesymetričnost a podobně, která je 1D modely a normativními modely nepostižitelná. Dále umožní posoudit vliv TA konstrukcí na tepelné vazby a tepelné mosty ve stavebních konstrukcích. Umožní detailně posoudit tepelné ztráty užitečného výkonu TA konstrukcí do okolních konstrukcí a místností. V předložené práci prezentované modely 2D časově neustáleného sdílení tepla jsou v praxi využitelné k návrhu rozměrů a materiálové skladby TA konstrukcí s ohledem na jejich schopnost akumulovat a sdílet teplo s interiérem. Použití těchto modelů je typické v oblasti měření a regulace. Aby inteligentní regulační systémy mohly optimálně řídit výkon zejména masivních TA konstrukcí, musejí se nejprve „naučit“ postihnout dynamiku těchto konstrukcí na základě sledování odezvy na vstupy. Potřebná data je pak možno získat ve fázi návrhu budovy (projekční fázi), využitím právě těchto matematicko-fyzikálních 2D modelů časově neustálených dějů prezentovaných v této práci.

Vyvinutý software CalA je díky intuitivnímu a uživatelsky přívětivému prostředí široce použitelným nástrojem také v tepelně-technické praxi pro simulaci tepelných ztrát a tepelných mostů, například ve formě lineárního činitele prostupu tepla. Dále je software CalA použitelný k simulaci zemních rýhových kolektorů pro stanovení jejich tepelného výkonu a posouzení tepelné kapacity zeminy při dlouhodobém provozu, temperace fotbalových trávníků pro zajištění jeho celoročního růstu, temperace podzákladí mrazíren pro zamezení promrzání základové spáry, temperace chodníků pro odtávání sněhu, temperace parapetů oken pro zamezení vzniku kondenzace a mnoho dalších. Zvláštní skupinou použití softwaru jsou všechny fyzikální jevy, řídící se podobnou diferenciální rovnicí té, na které je software založen. Lze jím tak řešit difuzní přenos látek, proudění podzemní vody, potenciální proudění apod.

Význam prezentované metody CFD pro praxi spočívá ve schopnosti komplexně postihnout 3D přenos tepla a látky. Tímto lze pro atypické, náročné, či vysoce významné případy TA konstrukcí získat potřebné fyzikální veličiny pro detailní posouzení tepelného komfortu v místnosti, posouzení vlivu TA konstrukcí na další stavební konstrukce a užívání budovy.

3.3. VÝZNAM PRO VÝUKU A VZDĚLÁVÁNÍ

Na výše uvedené výsledky práce již navazují studenti magisterského a doktorského studijního programu. Jedná se zejména o výuku a využívání vlastního, nového softwaru CalA a softwaru Fluent založeného na metodě CFD. Tyto výsledky jsou již nyní aplikovány v předmětech CT09 – Základy modelování soustav technických zařízení budov, CT07 Termomechanika, DT61 – Vybrané stati z technických zařízení budov, CT51 – Mechanika tekutin, CH03 – Počítačová aplikace stavební fyziky.

4. ZÁVĚR

Habilitační práce se zabývala teoretickou analýzou tepelného chování tepelně aktivovaných konstrukcí. Stávající teoretické přístupy k řešení této problematiky byly podrobeny zkoumání a kritické analýze. Odtud pak vycházela jejich modifikace či vývoj nových modelů, které jsou schopny danou problematiku řešit komplexněji a přesněji. Hlavním výsledkem práce je numerická metoda časově neustáleného 2D sdílení tepla implementovaná v prostředí MS Office a v samostatném softwaru CalA a také implementace metody počítačového modelování dynamiky tekutin (CFD) v oblasti modelování tepelného chování tepelně aktivovaných konstrukcí.

Tyto metody přináší zdokonalení stávajících metod návrhu a posouzení tepelně aktivovaných konstrukcí v oblasti:

- geometrie, konstrukčního řešení, dimenzování a stanovení tepelného výkonu;
- regulace a řízení výkonu při řešení časově neustálených dějů;
- detailní posouzení tepelně-vlhkostního mikroklimatu.

5. ABSTRACT

Habilitation thesis deals with the theoretical analysis of thermal behavior of thermally activated constructions, especially Thermo Active Building Structures (TABS). This work can be incorporated into the mathematical and physical modeling of heat and mass transfer in the application of heat activated structures used for heating and cooling of buildings. The work is based on critical analysis of the current state of knowledge in the design and operation of large systems, heating and cooling. The main results of the work are to develop and verify numerical models of transient heat transfer in time implemented in MS Office and in new software Calculation Area (CalA). Another result is the presentation of the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) to obtain physical quantities to enable detailed assessment of thermal comfort in the room. These methods accurate and extend existing methods of design of TABS in the calculation of the thermal performance and surface temperatures. The models are also useful to simulate the impact of regulation and performance management and enable a detailed assessment of the heat-humidity microclimate.

6. POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals : Si Edition. 2009, ASHRAE, Atlanta. ISBN – 1933742550
- [2] Cihelka J., Vytápění, větrání a klimatizace, SNTL Praha 1985
- [3] Cihelka J., Sálavé otopné panely, SNTL Praha 1961
- [4] Fanger, P.O. 1972. Thermal comfort. McGraw-Hill, New York.
- [5] FLUENT: Fluent 6.3.26 - User's guide Fluent Inc. 2007.
- [6] Hottel H. C., Saform A. F., Přenos tepla zářením (přeloženo z anglického originálu „Radiative Transfer“, vydaného McGraw-Hill Book Company, New York 1967), Typové číslo: L13-B3-IV-41/22517, SNTL Praha 1979.
- [7] Incropera F.P., D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2007.
- [8] Jícha M., Počítačové modelování úloh vedení tepla a proudění. Nakladatelství VUT v Brně. Brno.
- [9] Jokl M., Teorie vnitřního prostředí budov, 2. vyd. Skripta ČVUT v Praze. Praha, 1993. 261s. ISBN 80-01-00481-3
- [10] Kabele K., Dvořáková P., Multicriterion evaluation of an integrated sustainable heating/cooling system in climate conditions of central Europe. Proceedings: Building Simulation 2007.
- [11] Kabele K., Veverková Z., Modelování operativní teploty. *Vytápění, větrání, instalace*, ISSN 1210-1389, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2003
- [12] Kozubková, M. Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. 1. vyd. Ostrava, Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2008. 153 s.
- [13] Kuneš, Josef. Modelování tepelných procesů. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. 424 s. ISBN 80-03-00134-X.
- [14] Launder B. E., Spalding D. B., The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3:, 1974.
- [15] Novoselac A., Srebric J., A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems, Energy and Buildings, Volume 34, Issue 5, June 2002, Pages 497-509, ISSN 0378-7788
- [16] Nguyen A. T., Reiter S., The effect of ceiling configurations on indoor air motion and ventilation flow rates, Building and Environment, Volume 46, Issue 5, May 2011, Pages 1211-1222, ISSN 0360-1323.

- [17] Patankar S. V., *Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer*, A course textbook for engineers and scientist, Brno, 1989.6
- [18] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Tailor & Francis Group, New York 1980.
- [19] Petráš, D., Koudelková D., Kabele, K.: *Teplovodní a elektrické podlahové vytápění*. Bratislava: Jaga group, 2004. - 216 s. ISBN 80-88905-97-4.
- [20] Petráš, D.: *Podlahové teplovodné vykurovanie*. Bratislava: Jaga group v.o.s, 1998. - 143 s. ISBN 80-967676-6-6.
- [21] Petráš, D. a kolektív: *Nízkoteplotné vykurovanie a obnoviteľné zdroje energie*. Jaga group. ISBN 80-88905-12-5
- [22] Přívara S., Šíroký J., Ferkl L. Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings* 43 (2011) 564–572.
- [23] Rohdin P., Moshfegh B., Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different k-[epsilon] models supported by field measurements, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 11, November 2007, Pages 3872-3882, ISSN 0360-1323.
- [24] Schlichting H., *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill, New York, 1979.
- [25] Schramek E. R., *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. Oldenburg Industrieverlag. München. 2007. ISBN 3-8356-3104-7
- [26] Sparrow E. M., Patankar S. V., *Relationships among Boundary Conditions*
- [27] Steidl H., Neužil L., Fořt I., Vlček J., *Úvod do proudění tekutin a sdílení tepla*. Československá akademie věd, Academia, Praha, 1975.
- [28] Šíroký J.; Ferkl L.; Lain M., Identifikace otopného systému Crittall pro funkci chlazení místností fakulty strojní ČVUT v Praze, článek v *Vytápění, větrání, instalace*, ISSN 1210-1389, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2009
- [29] Versteeg H.K., W. Malalasekera *Computational fluid dynamics – The finite volume method (second edition)*, 2007 London.

Normy

- [30] ČSN EN ISO 10211-1 – Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Výpočet tepelných toků a povrchových teplot - Část 1: Základní výpočtové metody
- [31] ČSN EN ISO 10211-2 – Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích – Výpočet tepelných toků a povrchových teplot - Část 2: Lineární tepelné mosty
- [32] ČSN EN 1264 *Zabudované vodní velkoplošné otopné a chladicí soustavy*. 2009.

- [33] ČSN EN ISO 7730 Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu. 2006.

VÝBĚR Z VLASTNÍCH PUBLIKACÍ TÝKAJÍCÍCH SE ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- [A1] ŠIKULA, O. Simulace stěnového vytápění. In *Sborník anotací*. Brno, VUT v Brně, Fakulta stavební. 2007. p. 86 - 86. ISBN 978-80-214-3337-3.
- [A2] ŠIKULA, O. Modelování tepelného mikroklimatu při podlahovém a stěnovém vytápění. In *Zborník príspevkov z VIII. vedeckej konferencie Stavebnej fakulty Technickej univerzity v Košiciach*. Košice, Technická univerzita v Košiciach - Stavebná fakulta. 2007. p. 245 - 250. ISBN 978-80-8073-789-4.
- [A3] ŠIKULA, O.; POČINKOVÁ, M.; RUBINOVÁ, O.; HIRŠ, J. Vytápěcí systémy ve střešních nadstavbách. In *Vykurovanie 2008 - 16. medzinárodná konferencia na tému: energetická efektívnosť zásobovania teplom*. 0815. Bratislava, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia. 2008. p. 305 - 317. ISBN 978-80-89216-19-2.
- [A4] ŠIKULA, O. Vybrané aspekty tvorby vnútorného prostredia otopnými systémami. 16. medzinárodná konferencia VYKUROVANIE 2008 v Tatranských Matliaroch, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia. 2008.
- [A5] ŠIKULA, O. Vybrané aspekty tvorby mikroklima v púdnych vestavbách v zimnom období. In *Sborník přednášek konference Renovace technických zařízení budov (TZB) bytového fondu z hlediska uživatele*. Brno, Společnost pro techniku prostředí, Novotného lávka 5, Praha 1. 2008. p. 39 - 45. ISBN 978-80-02-02042-4.
- [A6] ŠIKULA, O. Vybrané aspekty tvorby mikroklima v púdnych vestavbách v zimnom období. *TZB-info*. 2008. 8(23.6.2008). p. 1 - 4. ISSN 1801-4399.
- [A7] ŠIKULA, O. Dynamika tepelných reakcií vykurovania integrovaného v stene. *TZB Haustechnik*. 2008. 2008(5). p. 50 - 51. ISSN 1210-356X.
- [A8] ŠIKULA, O. Počítačové simulace a jejich aplikace pro tvorbu prostředí bytových domů. *Stavebnictví*. 2008. 08(11 - 12). p. 56 - 59. ISSN 1802-2030.
- [A9] ŠIKULA, O. Model dynamického tepelného chování konstrukčních detailů. In *Simulace budov a techniky prostředí Sborník 5. konference IBPSA-CZ*. Brno, IBPSA-CZ, ČVUT. 2008. p. 133 - 137. ISBN 978-80-254-3373-7.
- [A10] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, J. Simulation of energy demands for the internal microclimate formation in BSimsoftware and its verification. In *Simulace budov a techniky prostředí Sborník 5. konference IBPSA-CZ*. Brno, IBPSA-CZ, ČVUT. 2008. p. 85 - 90. ISBN 978-80-254-3373-7.
- [A11] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, J. Konfrontace vybraných metod tepelně-technického návrhu velkoplošných sálavých systémů. Brno, Brno University of Technology. 2009. p. 13 - 16. ISBN 978-80-7204-629-4.
- [A12] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, J. Vliv podlahového vytápění na tepelné mosty. In *20. konference Vytápění Třeboň 2009*. Praha, Společnost pro techniku prostředí. 2009. p. 82 - 85. ISBN 978-80-02-02136-0.
- [A13] ŠIKULA, O. *Manuál k softwaru CalA*. Manuál k softwaru CalA. Brno, Tribun EU s.r.o. 2009. p. 1 - 44. ISBN 978-80-7399-879-0.
- [A14] PLÁŠEK, J.; ŠIKULA, O.; PETRŮJOVÁ, H. Modelovanie povrchových teplot sálavých prvkov. In *Zborník prednášok z 20. konferencie Vnútna klíma budov 2009*. 0931. Bratislava, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS Bratislava. 2009. p. 35 - 40. ISBN 978-80-89216-31-4.

- [A15] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, J. Srovnání metod výpočtu sálavé složky interního mikroklimatu. In *Zborník prednášok z 20. konferencie Vnútrotná klíma budov 2009*. 0931. Bratislava, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS Bratislava. 2009. p. 23 - 27. ISBN 978-80-89216-31-4.
- [A16] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, J. Podlahové vytápění versus tepelné mosty. *Topenářství*. 2009. 2009(8). p. 38 - 40. ISSN 1211-0906.
- [A17] ŠIKULA, O. Teoretické posouzení tepelného komfortu místnosti se stropním vytápěním. In *Zborník prednášok z 18. medzinárodnej konferencie VYKUROVANIE 2010 na tému Energetická efektívnosť systémov výroby, distribúcie a odovzdávania tepla pri príležitosti roku Aurela Stodolu na STU*. 1014. Bratislava, SSTP Bratislava. 2010. p. 565 - 569. ISBN 978-80-89216-32-1.
- [A18] ŠIKULA, O. Podrobný CFD model stropního sálavého vytápění. In *Simulace budov a techniky prostředí. Sborník 6. konference IBPSA-CZ*. Praha, IBPSA-CZ. 2010. p. 165 - 168. ISBN 978-80-254-8661-0.
- [A19] ŠIKULA, O.; PLÁŠEK, D. Dynamika náběhu a chladnutí podlahového vytápění. In *Zborník prednášok z 19. medzinárodnej konferencie VYKUROVANIE 2011*. Bratislava, Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS. 2011. p. 443 - 448. ISBN 978-80-89216-38-3.
- [A20] ŠIKULA, O., Zjednodušené a pokročilé metody návrhu velkoplošných otopných systémů, příspěvek na konferenci *Konference Vytápění Třeboň 2011*, ISBN 978-80-02-02291-6, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2011.
- [A21] ŠIKULA, O., Simulace provozních režimů otopných systémů s velkou akumulací, příspěvek na konferenci *Konference Vytápění Třeboň 2011*, ISBN 978-80-02-02291-6, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2011.
- [A22] ŠIKULA, O.; HIRŠ, J., ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE COOLING CEILING IN AN OFFICE ROOM WITH A VIEW OF THERMAL COMFORT, příspěvek na konferenci *The 23rd IIR International Congress of Refrigeration*, ISBN 978-2-913-149-89-2, International Institute of Refrigeration IIR/IIF, Prague, 2011.
- [A23] ŠIKULA, O., Zjednodušené a pokročilé metody návrhu velkoplošných otopných systémů, článek v *Vytápění, větrání, instalace*, ISSN 1210-1389, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2011. (v tisku)
- [A24] ŠIKULA, O., Simulace provozních režimů otopných systémů s velkou akumulací, článek v *Vytápění, větrání, instalace*, ISSN 1210-1389, Společnost pro techniku prostředí, Praha, 2011. (v tisku)

POUŽITÉ ZKRATKY

Zkratka	Popis
CFD	Computational Fluid Dynamics
CalA	Calculation Area
DO	Discrete Ordinates modell – model diskrétních souřadnic
PMV	Predicted Mean Vote – predikovaná střední volba
PPD	Predicted Percent of Dissatisfied – predikovaný procentuální podíl nespokojených
RNG	matematického postup nazvaný metoda renormalizačních grup
TABS	Thermo Active Building Structures – tepelně aktivní stavební konstrukce
TA	tepelně aktivované