

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 203*

*ISSN 1213-418X*

**Miloš Kalousek**

**VYUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍCH  
A SIMULAČNÍCH METOD  
V TEPELNÉ OCHRANĚ BUDOV**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

**Ing. Miloš Kalousek, Ph.D.**

**Využití experimentálních a simulačních metod  
v tepelné ochraně budov**

**Experimental and Simulation Methods of Thermal  
Protection of Buildings**

Zkrácená verze habilitační práce



BRNO 2006

Klíčová slova: tepelná pohoda, vnitřní prostředí, úspory energie, simulace budov

Keywords: thermal comfort, indoor environment, energy saving, building simulation

Místo uložení habilitační práce: Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně

© Miloš Kalousek, 2006

ISBN 80-214-3165-2

ISSN 1213-418X

# OBSAH

OBSAH .....	3
1 ÚVOD .....	6
2 VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH .....	6
2.1 TEPELNĚ VLHKOSTNÍ POHODA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ.....	6
2.1.1 Letní přehřívání staveb .....	7
METODY MĚŘENÍ.....	8
3 TERMOGRAFIKÁ NEKONTAKTNÍ DIAGNOSTIKA.....	8
3.1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ.....	8
3.1.1 Planckův vyzařovací zákon absolutně černého tělesa (AČT).....	9
3.1.2 Stefan – Boltzmannův zákon .....	9
3.1.3 Wienův zákon posuvu.....	9
3.2 KOREKTNÍ HODNOCENÍ TERMOGRAMŮ .....	10
3.2.1 Koeficient emisivity.....	10
3.2.2 Další důležité parametry .....	11
3.2.3 Celkové záření vstupující do infrakamery .....	11
3.3 ZPRACOVÁNÍ POŘÍZENÝCH TERMOGRAMŮ .....	11
3.3.1 Hodnocení tepelných jevů v konstrukcích.....	12
3.3.2 Vybrané tepelné požadavky dle ČSN 730540-2:2002 a změny 1:2005 .....	12
3.3.3 Hodnocení výplní otvorů .....	12
3.3.4 Hodnocení obvodových stěn a střeš .....	13
4 KOMPLEXNÍ MONITORING VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ .....	13
4.1 MĚŘENÍ TEPLOT .....	13
4.1.1 Termočlánek .....	13
4.1.2 Dataloger – záznam měření .....	14
4.2 MĚŘENÍ DALŠÍCH VELIČIN .....	14
4.2.1 Vlhkostní čidla.....	14
4.2.2 Čidlo na měření hustoty teplotního toku.....	15
4.2.3 Čidlo tepelné vodivosti materiálů .....	15
4.2.4 Přesnost měření.....	15
4.2.5 Měřicí sondy pro další veličiny ve stavební fyzice.....	15
4.3 APLIKACE METOD V PROJEKTECH .....	15
SIMULAČNÍ METODY .....	16
5 NUMERICKÉ SIMULAČNÍ METODY .....	16
5.1 MODELOVÁNÍ VÍCE ROZMĚRNÉHO VEDENÍ TEPLA.....	17
5.1.1 Dvojměrné šíření tepla.....	21
5.1.2 Trojměrné šíření tepla.....	22
5.1.3 Nestacionární teplotní děje .....	22
5.2 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU A SDÍLENÍ TEPLA (CFD, FVM=MKO).....	22
5.2.1 Rychlostní poměry větru kolem budovy.....	22
6 PEDAGOGICKÉ, VĚDECKÉ A ZNALECKÉ AKTIVITY .....	23

6.1	PEDAGOGICKÉ AKTIVITY.....	23
6.1.1	Celoživotní vzdělávání inženýrů a univerzita třetího věku.....	24
6.2	VĚDECKÉ AKTIVITY .....	24
6.3	PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA.....	26
	Článek na konferenci .....	26
	Článek v časopise .....	26
6.4	SOUDNÍ A ZNALECKÁ ČINNOST .....	27
6.5	DALŠÍ AKTIVITY AUTORA NA PRACOVIŠTI .....	27
7	Závěry .....	27
7.1	ZÁVĚRY A PŘÍNOSY PRO PRAXI A DALŠÍ ROZVOJ VĚDY .....	27
7.2	PŘÍNOS V PEDAGOGICE .....	28
8	Abstract in English .....	29
9	Použité informační zdroje.....	29



Ing. Miloš Kalousek, Ph.D. (1973, Brno)

Autor je absolventem Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně (1996), v oboru Pozemní stavby. Doktorskou disertační práci na téma *Možnosti zvýšení tepelného odporu zdiva z cihelných tvarovek* obhájil v roce 2002. Dále obhájil na dvouletém postgraduálním studiu ústavu soudního inženýrství závěrečnou práci a složil státní závěrečnou zkoušku (1999) na téma oceňování nemovitostí a vady a poruchy. Pracuje na ústavu pozemního stavitelství jako odborný asistent – pedagogicko vědecký pracovník. Na Fakultě stavební přednáší na oboru *Pozemní stavby* předmět *Modelování tepelných jevů stavebních konstrukcí* a *Počítačovou aplikaci tepelné techniky*. Dále cvičí a přednáší předměty na doktorském studium a také ve studijním programu v anglickém jazyce.

Jeho odborné zaměření je tepelná ochrana budov a speciálně tepelná pohoda v budovách a kvalita vnitřního prostředí. Absolvoval studijní a výzkumné pobyty na TU Lyngby (Dánsko), TU Glasgow (Skotsko), TU Weimar (Německo), TU Vídeň (Rakousko), TU Gliwice (Polsko), STU Bratislava (Slovensko). Pravidelně se účastní odborných konferencí v České republice i v zahraničí a je autorem více jak 100 odborných článků a publikací prezentovaných v časopisech, ve sbornících a na konferencích. Byl zapojen v několika výzkumných úkolech jako řešitel nebo spoluřešitel a to i v evropském 5. rámcovém programu.

Je členem Společnosti pro techniku prostředí pro ČR (od 2004) a členem redakční rady časopisu *Ateliér otvorových výplní* (1998). Byl jmenován soudním znalcem v oboru *Stavebnictví* se specializací na *Tepelnou techniku staveb* a působí tak v praxi při objasňování vad a poruch staveb.

Jeho úzká specializace je nekontaktní termodiagnostika staveb a modelování tepelných jevů stavebních konstrukcí, kde Ing. Miloš Kalousek, Ph.D. přispívá svým podílem v rámci odborných, výzkumných a pedagogických aktivit k rozvoji oboru *Teorie a konstrukce staveb*.

# 1 ÚVOD

Téma „*Využití experimentálních a simulačních metod v tepelné ochraně budov*“ je pro mne vysoce aktuální z několika důvodů. Hlavním důvodem je neustálý globální rozvoj a miniaturizace (mobilita) výpočetní techniky a především její využití ve všech oborech lidské činnosti. Na mém pracovišti ve stavební laboratoři se v poslední době velmi rozšířila výpočetní a přístrojová základna a tak se otevřely nové možnosti měření a také výpočtů v oboru tepelné ochrany budov.

Dle mého názoru je nutné provádět mnohem více pozorování a měření stavebních konstrukcí v reálném měřítku a na základě výsledků srovnávat a opravovat metody a postupy numerických simulací tak, aby byla dosažena uspokojivá shoda výpočtu s experimentem. Právě o to jsem se snažil při každém výzkumném, odborném nebo praktickém úkolu.

## 2 VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH

Kvalita vnitřního prostředí (Indoor environment) v budovách je v současné době velmi diskutované téma a je to prvotní úkol „Tepelné ochrany budov“. Jedná se především o kvalitu prostředí z pohledu požadavků uživatele tak, aby mohl nerušeně užívat prostor. Může se jednat jak o obytný, tak pracovní prostor. Požadavky uživatele jsou různé dle činnosti, kterou vyvíjí. Požadavky ze strany normativní základny vymezují parametry prostředí do příslušných mezí.

Vnitřní prostředí lze rozdělit na oblasti:

- ◆ **Tepelně vlhkostní pohoda prostředí**
- ◆ Akustická pohoda
- ◆ Denní a umělé osvětlení
- ◆ Koncentrace škodlivých plynů, větrání
- ◆ Velikost a tvar prostoru, barvy, atd.

### 2.1 TEPELNĚ VLHKOSTNÍ POHODA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

V oblasti tepelně vlhkostní problematiky jsou dle ČSN posuzovány parametry B.1 až B.9:

**B.1 Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce  $\theta_{si}$**

**B.2 Součinitel prostupu tepla  $U$**

B.3 Pokles dotykové teploty podlahy  $\Delta\theta_{10}$

B.4 Zkondenzované množství vodní páry uvnitř konstrukce za rok  $M_{ev,a}$

B.5 Průvzdušnost obvodového pláště

B.6 Intenzita výměny vzduchu v místnosti  $n$

B.7 Tepelná stabilita místnosti v zimním období

**B.8 Tepelná stabilita místnosti v letním období**

**B.9 Energetická náročnost budov**

Jedním ze základních požadavků vnitřního klimatu je vytvoření optimální tepelné pohody. Tepelná pohoda má zabezpečovat takový stav prostředí, ve kterém bude uživatel spokojen při určeném druhu činnosti. Na tepelně vlhkostní pohodu vnitřního prostředí mají vliv především následující parametry:

- teplota vnitřního vzduchu
- teplota vnitřních povrchů
- optimální vlhkost vzduchu
- rychlost proudění vzduchu
- vnitřní zdroje tepla
- čistota vzduchu

Nepřímo také klimatické podmínky venkovního prostředí jako je teplota, vlhkost, rychlost větru a intenzita slunečního záření a tepelně technické vlastnosti konstrukcí, tvořících místnost.

Na tepelné pohodě se podílí i uživatel zvoleným oděvem, který má vliv na výměnu produkovaného tepla přes povrch těla a oblečení s okolím [27]. Přitom množství vyprodukovaného tepla je závislé na fyzické náročnosti vykonávané činnosti člověka.

Pro zabezpečení požadovaných tepelných poměrů je třeba v našich klimatických podmínkách v zimním období navrhnout účinný otopný systém pro dané tepelně technické vlastnosti obalových konstrukcí. V letním období může být vytváření tepelné pohody bez klimatizace prostoru složitější. Pohodu prostředí bez chlazení je pak třeba zabezpečit především optimálními tepelně technickými vlastnostmi obalových konstrukcí, zvláště jejich transparentních částí a také jejich geometrií.

Dostatečné tepelně akumulční vlastnosti vrstvené konstrukce, při nepřerušovaném vytápění, zajistí vnitřní vrstva z materiálu o plošné hmotnosti větší než  $180 \text{ kg.m}^2$ . Nedostatečné tepelně akumulční vlastnosti konstrukce lze částečně kompenzovat výrazně zvýšeným tepelným odporem této konstrukce. Toto je případ dřevěných staveb a nízkoenergetických staveb, kde bývá velká tloušťka tepelného izolantu (např.  $R = 5,0 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ ). V zimním období je v tomto případě tepelná pohoda velmi dobře zajištěna, samozřejmě za předpokladu kvalitních a těsných oken.

### 2.1.1 Letní přehřívání staveb

Při přímém slunečním záření za jasných letních dní nelze vždy účinně zabránit přehřívání obalových konstrukcí a následně přehřívání vnitřního prostředí.

Z hlediska přehřívání vnitřních prostor jsou v obalových konstrukcích nejslabším článkem okenní konstrukce se svým zasklením. Ohřívání (nebo ochlazování) vnitřního prostředí je převážně přímo úměrné velikosti zasklených ploch. Tyto konstrukce téměř okamžitě propouštějí teplo ze slunečního záření. Kolik tepelné energie se dostává přes zasklení do vnitřního prostředí také závisí na použitém druhu zasklení. Při správném režimu větrání nám ale okna umožní únosný tepelný režim po celých 24 hodin.

Základní funkcí okna je osvětlování interiéru denním světlem. Plocha okenních otvorů v návaznosti na jejich konstrukci, druh zasklení a provedení musí zajišťovat minimální činitel denní osvětlenosti v interiéru. Z tohoto hlediska je žádoucí co největší plocha okna, chceme-li zajistit nezbytně nutné parametry zrakového mikroklimatu. Ovšem z hlediska tepelně izolačního je požadavek na jeho velikost protikladný, protože se snažíme minimalizovat tepelné ztráty v zimním období i nadměrné tepelné zisky v letním období.

Maximální povolená teplota vnitřního vzduchu z hlediska požadavků na prostory s pobytem lidí dle ČSN 730540-2:2002 je  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  a maximální denní vzestup vnitřní teploty vzduchu je  $5 \text{ K}$ .



# METODY MĚŘENÍ

Metody měření v posledních několika letech také prošly velkým rozvojem. Výpočetní technika se dostává do všech oborů, tj. také do oblasti měření fyzikálních veličin různými senzory na elektrické bázi a především ukládání dat do paměti přístroje (dataloger) pro další vyhodnocení. S hromadným využitím v mnoha oborech roste dostupnost takových zařízení a velmi se snižuje cena. Pro názornost sada 16 kusů čidel pro měření povrchové teploty s ústřednou s odstupem 15 let je 10x levnější a má hodnotnější funkce, např. napojení měřicí ústředny na internetovou nebo bezdrátovou síť, možnost on-line presentace dat na webovém rozhraní nebo zasilání dat z nedostupných míst, např. přes mobilní telefon.

Předpovídá se ještě větší rozšíření než dosud. V oblasti stavebnictví a zařízení budov, ale i elektrických a elektronických přístrojích se předpokládá neustálý monitoring správné funkce zařízení (bezpečnosti) a správných hodnot fyzikálních veličin, např. teplota a vlhkost vzduchu v každé místnosti, kontrola otevřených dveří, narušení objektu popř. zapnutá elektrická zařízení a riziko nebezpečné události. Výše jmenované vlastnosti patří mezi atributy **inteligentní budovy** a jistě budou neustále rozvíjeny, ovšem není možné zapomenou na rizika a zneužitelnost automatických zařízení, kterými se lidé rádi obklopují.

## 3 TERMOGRAFICKÁ NEKONTAKTNÍ DIAGNOSTIKA

Historie objevů a použití infrakamery:

Objev infračerveného tepelného záření	W. Herschel (r. 1801)
Termín termografie začal používat	jeho syn J. Herschel (1792 . 1871).
Termogram	obraz povrchového teplotního reliéfu
Aktivní infrakamera (noktovize)	během 2. světové války
Pasivní skenovací analogová infrakamera	1950-1960
Mozaiková infrakamera detektory FPA	válečný konflikt v Perském zálivu (1990)

Jedna z velmi progresivních současných metod v průmyslu je termografická kontrola objektů (není myšleno jen stavebních). Ve stavebnictví se jedná především o kontrolu tepelných ztrát na obalových konstrukcích budov, ale také o kontrolu nejnižší vnitřní povrchové teploty na obvodové konstrukci a tím zjišťování rizika výskytu plísní uvnitř budovy. Taktéž je možné zjišťovat dostatečně nízkou průvzdušnost obvodových konstrukcí kontrolou deformace teplotních polí na povrchu konstrukce. Vzhledem k tomu, že dostupnost i mobilnost takového zařízení je v současnosti velmi přijatelná, lze provádět tuto kontrolu přímo v terénu tj. v objektu.

Přístroj, který se nazývá termografické vyhodnocovací zařízení nebo také „termokamera“, lze tak využít na odhalování tepelně izolačních nehomogenit, zabudovaných tepelných zdrojů tepla, nesprávné kombinování stavebních materiálů s různým součinitelem tepelné vodivosti. Mimo stavebnictví je termokamera využívána ve zdravotnictví, elektro-průmyslu a všude tam, kde rozdíl teplot částí sledovaného objektu má význam při vyhodnocení.

### 3.1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

Infračervené záření je složka neviditelného elektromagnetického záření, která přenáší tepelnou energii bez využití media (např. vzduchu) mezi tělesy, které mají rozdílnou teplotu. Toto záření vychází z povrchu každého tělesa s teplotou vyšší než 0 K tj. z každého, které nás obklopuje. Rozeznáváme infračervené dlouhovlnné a krátkovlnné záření, ovšem v rámci popisu citlivosti infračervené kamery je uváděno jemnější rozdělení infračerveného spektra (např. středovlnné). Infrakamera má spektrální citlivost v oblasti dlouhovlnného záření 7,5 až 13,0  $\mu\text{m}$  a je to z důvodů

propustnosti použité optiky a atmosféry a dostatečné intenzity záření pro celý měřicí rozsah -40 až 500 °C (s filtry i více) v rámci Planckova vyzařovacího zákona.

### 3.1.1 Planckův vyzařovací zákon absolutně černého tělesa (AČT)

Všechna tělesa s teplotou vyšší než absolutní nula vyzařují infračervené záření v celém jeho spektru, ovšem maximum je pouze u specifické vlnové délky. Jakákoli teplota povrchu AČT je tedy charakterizována konkrétní vlnovou délkou, například lidské tělo má teplotu 310 K a příslušná vlnová délka s maximální vyzařovací energií je 9,3 μm. Pro většinu staveních materiálů, které jsou šedými tělesy (ŠT), je tato hodnota dána součinem emisivity, která je většinou proměnná na vlnových délkách. V rovnici (3.1.1-1) je vyjádřen průběh vyzařovacího zákona v energetickém tvaru, kde  $M_{e,\lambda}$  je právě intenzita vyzařování vztažená k hodnotě vlnové délky záření a absolutní teplotě.

$$M_{e,\lambda}(\lambda, T) = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\pi \varepsilon h c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)} [\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (3.1.1-1)$$

kde  $\varepsilon$  - koeficient emisivity povrchu tělesa [-],  
 $\lambda$  - vlnová délka emitovaného záření [m],  
 $T$  - absolutní teplota tělesa [K],  
 $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  [Js] (Planckova konstanta),  
 $c = 2,9979 \cdot 10^8$  [ms<sup>-1</sup>] (rychlost světla ve vakuu),  
 $k = 1,3805 \cdot 10^{-24}$  [JK<sup>-1</sup>] (Boltzmannova konstanta).

### 3.1.2 Stefan – Boltzmannův zákon

Je odvozen z Planckova zákona a vyjadřuje celkový zářivý tok na jednotku plochy pro konkrétní teplotu tělesa, ale již integrálně (součtově) přes celé spektrum vlnových délek, tj. celkovou vyzařovanou energii černým tělesem (3.1.2-1).

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = \sigma_e T^4 [\text{Wm}^{-2}] \quad (3.1.2-1)$$

kde  $T, \lambda, h, c, k$  – uvedeno v rovnici (3.1.1-1),  
 $\sigma_e = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>] (Stefan-Boltzmannova konstanta).

V případě infrakamery, kde je interval pracovní vlnové délky vymezen, je intenzita záření také vymezena na  $M_{e,\lambda_1-\lambda_2}(T)$  viz (3.1.2-2)

$$M_{e,\lambda_1-\lambda_2}(T) = \int_0^{\lambda_2} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda - \int_0^{\lambda_1} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda [\text{Wm}^{-2}] \quad (3.1.2-2)$$

### 3.1.3 Wienův zákon posuvu

Vyjadřuje vztah vlnové délky s maximální intenzitou vyzařování a konkrétní teplotou černého tělesa (3.1.3-1).

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (3.1.3-1)$$

## 3.2 KOREKTNÍ HODNOCENÍ TERMOGRAMŮ

Při interpretaci pořízených termogramů je třeba vzít v úvahu vliv okolních podmínek a vstupních parametrů na správné určení teplotního reliéfu a reálnou povrchovou teplotu zkoumaného místa. Jedná se především o problematiku odražených (zdánlivých) tepelných toků od okolních objektů s tím souvisí emisivita, reflexivita a také transmisivita a jejich správné určení při jiných úhlech osy snímání od kolmice k povrchu. Také je to vzdálenost, teplota okolí, vzduchu a popř. objektivu.

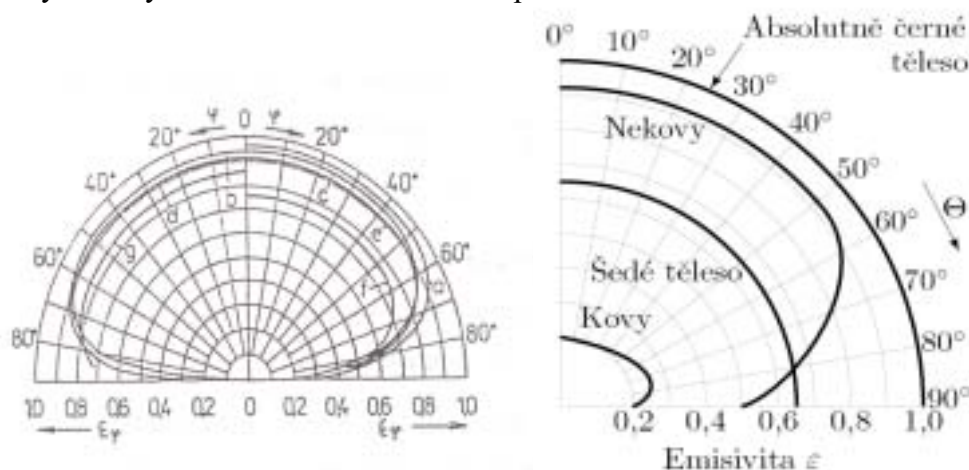
### 3.2.1 Koeficient emisivity

Určení koeficientu emisivity  $\varepsilon$  [-] pro šedá tělesa je velmi složité a závisí především na

- ♦ typu stavebního materiálu (kámen, omítka, kov, sklo),
- ♦ vlastnostech povrchu (hladký, leštěný, hrubý, matnost a zašpinění),
- ♦ vlnové délce (selektivní zářič),
- ♦ teplotě materiálu (teplotní závislost),
- ♦ směru vyzařování (úhel snímání).

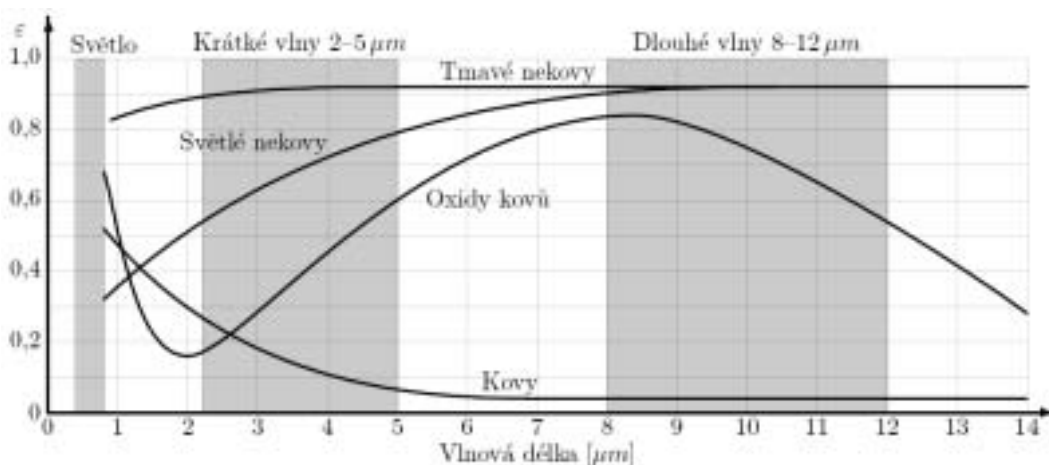
Emisivita (nabývá hodnot 0 až 1) je definována jako poměr intenzity vyzařování daného tělesa k intenzitě vyzařování tělesa absolutně černého při stejné teplotě, které má vždy  $\varepsilon = 1$ . Reflexivita  $\rho$  [-] je hodnota doplňující emisivitu do jedné celé tzn.  $\rho = 1 - \varepsilon$ . Transmisivita  $\tau$  [-] u pevných látek (většina stavebních látek) je  $\tau = 0$ . Ovšem při měření pevných látek je přítomna transmise záření přes atmosféru, což je látka plynná a zde je třeba stanovit vzdálenost objektu a vlhkost vzduchu, kterým záření prochází.

Na obr. 3.2.1-1 lze vidět hodnoty emisivity  $\varepsilon$  pro různé materiály a tělesa, kde se emisivita mění s úhlem osy kamery od kolmice ke snímanému povrchu.



Obr. 3.2.1-1 Závislost emisivity materiálů na úhlu  $\Theta$  osy kamery od kolmice k povrchu  
a – vlhký led a námraza, b – dřevo, c – sklo, d – papír, e – zemina, f – oxidy mědi, g – korund (drsňý)

Emisivita materiálu závisí i na vlnové délce vyzařovaného toku. Jak je vidět na obr. 3.2.1-2, je průběh emisivity rozmanitý. Na některých vybraných vlnových délkách může emisivita povrchu dosahovat hodnot 0 a pak se jedná o tzv. selektivní zářiče (vrstvy) a mohou to být tenké vrstvičky kovů a oxidů kovů. Např. tenké vrstvičky oxidů kovů se používají na pokovení okenních skel tak, aby se omezilo šíření tepla zářením v plynové výplni mezi skly zasklení.



Obr. 3.2.1-2 Závislost emisivity materiálů na vlnové délce záření

### 3.2.2 Další důležité parametry

Dalšími parametry, které velmi ovlivní výslednou teplotu jsou:

- typ povrchu zářiče
- prostupnost vzduchu
- zjištění emisivity povrchu

### 3.2.3 Celkové záření vstupující do infракamery

Do infракamery vstupuje několik složek infračerveného záření (celkové  $W_{tot}$ ), které je třeba rozlišit. Jsou to tři složky, kde první a obvykle nejintenzivnější je záření měřeného objektu  $W_{obj}$  o neznámé teplotě, druhá složka je záření odražené od povrchu objektu z okolí  $W_{amb}$  a třetí je záření emitované atmosférou  $W_{atm}$ .

## 3.3 ZPRACOVÁNÍ POŘÍZENÝCH TERMOGRAMŮ

Vstupní parametry, jako jsou teplota a vlhkost okolního vzduchu apod., by měli být známé již před samotným měřením z důvodu vložení do kamery, ovšem dají se doplnit až při zpracování termogramů na počítači ve vyhodnocovacím software ThermaCAM 2000.

Ve vyhodnocovacím software je mnoho pomocných nástrojů. Například funkce „profil“, kde je možné znázornit průběh teploty na zvolené úsečce nebo „area“ kde je možno určovat průměr, minimální nebo maximální teplotu v obdélníku nebo jiném obrysovém tvaru. Dále funkce „trending“ kde je možno ze série po sobě jdoucích časových termogramů (infракamera umožňuje automatické intervalové snímání) vytvořit průběh vývoje teploty v čase, vše je možné automaticky generovat do vytvořených tabulek. Další zajímavou funkcí je „histogram“ – lze jím zobrazit podílové zastoupení vybraných teplotních intervalů (možné použití v kombinaci s „area“, jsou zde také další statistické veličiny). Velké zefektivnění přináší využití šablon („templates“), kde je možné si přednastavit vhodné zpracování sady termografických snímků automaticky, téměř bez nutnosti zásahu uživatele. To je možné pouze pokud mají termogramy stejný charakter, tj. okrajové podmínky, rozsah zobrazených teplot atp.

### 3.3.1 Hodnocení tepelných jevů v konstrukcích

Snímkem z infračervené kamery lze získat přehled plošného rozložení teplot na vnitřním i vnějším povrchu sledovaných konstrukcí. Na základě zjištění míst s vyšší teplotou na vnějším povrchu (obvykle červená barva), nebo chladnějších míst na vnitřním povrchu sledované konstrukce (obvykle modrá barva) lze diagnostikovat tepelný most (nebo jiný jev – někdy ovšem bez možnosti zjistit příčinu lokální změny teploty). Je tedy v mnoha případech možné ověřit, zda konstrukce včetně detailů byly správně navrženy a provedeny.

Pomocí termogramů lze dosáhnout rychlého určení problematických míst v obalových konstrukcích budov. Pokud termovizní snímek odhalí teplotní nehomogenitu, lze pomocí dlouhodobějších již kontaktních měření teplot, a dalších veličin na konstrukci, přesněji určit její příčinu. Na základě podrobnější analýzy je potom možné navrhnout způsob odstranění závady, ať již závada vznikla nesprávným návrhem při vypracování projektové dokumentace, nebo nesprávným provedením v období realizace stavby.

V současné době je velmi aktuální otázka spotřeby energie na vytápění budov. Energetická náročnost budovy dle vyhlášky 291/2001 Sb. vyjadřuje základní požadavek na úsporu energie budovy na vytápění již jejím stavebním řešením. Při správném tepelně technickém návrhu konstrukce nestačí jen zvyšovat tloušťku tepelné izolace, ale je třeba eliminovat nebo optimalizovat tepelné mosty a vazby. Čím vyšší požadavky na tepelně izolační vlastnosti stavebních konstrukcí klademe, tím vyšší podíl na tepelných ztrátách budovy mají tepelné mosty. Tepelné mosty samy o sobě mohou zvýšit tepelnou ztrátu objektu, splňující současné požadavky na energetickou úspornost, velmi citelně.

### 3.3.2 Vybrané tepelné požadavky dle ČSN 730540-2:2002 a změny 1:2005

Požadavky na stavební konstrukce dle ČSN se týkají především parametrů:

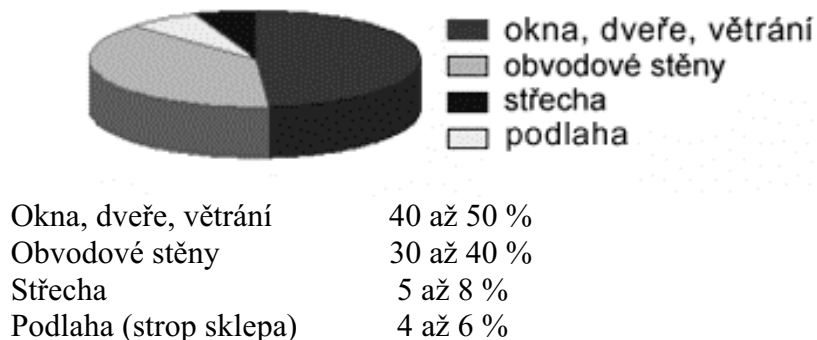
- ◆ Nejnižší povrchová teplota
- ◆ Součinitel prostupu tepla

Pomocí termovizní diagnostiky lze určit zda byla splněna podmínka vnitřní povrchové teploty (nejlépe za normových okrajových podmínek) a také v některých případech, zda do konstrukce vůbec byla vložena tepelná izolace nebo v případě oken izolační plynová výplň. V ČSN 730540-3:2005 [1] jsou stanoveny normové okrajové podmínky, za jakých se konstrukce navrhuje a ověřuje (podmínky pro výpočty). Např. pro Brno je návrhová teplota vnitřního vzduchu 21 °C a relativní vlhkost 50 % a pro vnější prostředí –15 °C a 84 %.

### 3.3.3 Hodnocení výplní otvorů

Výplně otvorů jsou se svými obvyklými tepelně technickými vlastnostmi nejslabšími konstrukcemi v budovách. Přestože okna obvykle nezaujímají většinou plochu z celé fasády mohou tvořit i více než polovinu celkových tepelných ztrát objektu. Okenní výplň má především vlastnost prosvětlovací, ale musí mít i dostatečné tepelně izolační vlastnosti vyjádřené součinitelem tepelné vodivosti  $U_w$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , w jako window). Vlastnosti rámu (frame) jsou popsány hodnotou  $U_f$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) a zasklení (glazing) pak hodnotu  $U_g$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ). Dle ČSN 730540:2005 je požadováno a  $U_{f,N} < 2,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  a  $U_{w,N} < 1,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  pro svislá okna a  $U_{w,N} < 1,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  pro šikmá okna (měřená ve svislé poloze). Dále je hodnocena nejnižší povrchová teplota okenní výplně  $\theta_{si}$  (°C). Pokud je pod okenní výplní umístěno otopné těleso a vytápění je nepřerušované, hodnota  $\theta_{si} = 9,18 \text{ °C}$ . Vše platí pro obvyklé okrajové podmínky vnitřního

a vnějšího prostředí. Na obr. 3.3.3-3 je uvedeno obvyklé rozdělení tepelných ztrát jednotlivých konstrukcí budovy.



Obr. 3.3.3-3 Vícepodlažní bytový dům - rozdělení tepelných ztrát

### 3.3.4 Hodnocení obvodových stěn a střech

Obvodová stěna je velmi důležitá konstrukce, protože chrání vnitřní prostředí objektu proti vnějším vlivům tak jako otvorové výplně a střešní konstrukce, ale zaujímá obvykle největší plochu. Požadavky jsou mnohem přísnější než u průsvitných konstrukcí (především výplní otvorů). Stěnové konstrukce je možné snímat a vyhodnocovat termokamerou, ale širokou problematiku, která nám hodnocení sťažuje, přináší neustálený teplotní stav tj. vliv tepelné akumulace konstrukce, dále vnitřní zdroje tepla a také přímé sluneční záření dopadající na konstrukci.

Z mnoha měření vyplývá, že tepelně izolační vlastnosti stěnové konstrukce spodní stavby (suterénu) jsou velmi podceňované a nedostatečné. Dochází zde k prostupu tepla vytápěných prostor přes svislou stěnovou konstrukci do soklu, který je již nedostatečně izolován.

U půdních vestaveb je obvykle problém s lokálně chybějící nebo nějakým způsobem degradovanou tepelnou izolací. Hlavním problémem ovšem může být vysoká plošná průvzdušnost obvodových konstrukcí.

Lze také odhalit povrchovou kondenzaci vodní páry a růst plísní na povrchu konstrukcí.

## 4 KOMPLEXNÍ MONITORING VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Další progresivní experimentální metodou v oboru tepelné ochrany budov je dlouhodobé měření fyzikálních veličin na povrchu nebo uvnitř konstrukcí, ale také v okolí konstrukcí tj. v interiéru a exteriéru. Měření může sloužit k přesnému určení tepelně technických poruch v objektu, ať již z důvodu špatného návrhu, provedení nebo užívání. Dále pak k monitoringu kvality vnitřního prostředí v budovách a následnému vyhodnocení správného chodu zařízení či pasivních stavebních konstrukcí, popřípadě inteligentních prvků.

### 4.1 MĚŘENÍ TEPLIT

Teplotu povrchu i vzduchu lze měřit mnoha způsoby, ale jako nejčastější čidlo s dostatečnou přesností se používá termočlánek. Dále pak čidla na bázi elektrického odporu, odporu PN přechodu a také rtuťového nebo lihového teploměru.

#### 4.1.1 Termočlánek

Termočlánek pracuje na principu generování elektrického napětí (řádově mV), které po násobení konstantou určuje pak i sledovanou teplotu. Již je odstraněna nutnost kompenzovat druhý konec termočláneku konstantní známou teplotou a svou cenou je velmi přijatelným řešením.

### 4.1.2 Dataloger – záznam měření

K záznamu naměřených veličin je třeba použít další zařízení s názvem Dataloger, který na příslušném rozsahu elektrické veličiny zaznamenává do paměti pro pozdější zpracování. Důležité parametry tedy jsou schopnost zařízení rozeznat v dostatečném pásmu a počtu úrovní (šířce pásma) veličinu, kterou produkuje na výstupu čidlo a současně musí mít dostatečnou kapacitu - paměť přístroje. Pokud je však analogický výstup z čidla digitalizován A/D převodníkem, je možné hodnoty přímo ukládat i na velice nevykonném osobním počítači. Obvykle je ovšem třeba na místě měření použít přístroj kompaktní, rychlý, tichý, spolehlivý, relativně malý a pokud možno nezávislý na obsluze a popř. na síťovém zdroji el. proudu.

Velmi častým datalogerem na univerzitách v ČR i v zahraničí je pro jeho snadné ovládání a dostatečnou paměť přístroj Almemo od firmy Ahlborn (Německo) viz obr. 4.1.2-1. Obsahuje 9 automaticky programovatelných vstupů s možností až pro 18 měřených veličin. V konektoru je zabudován čip, který sám zjistí typ připojeného čidla, pokud ne lze nastavit měřenou elektrickou veličinu a rozsah dle potřeby. (cena s čidly asi 60 000 Kč)



Obr. 4.1.2-1 Dataloger ALMEMO 3290-8 , 9 vstupů

Dalším vhodným datalogerem může být ADAM-4018M (obr. 4.1.2-2) od firmy americké Advantech, který obsahuje 8 analogových vstupů pro rozsahy veličin mV, V, mA, termočlánek). Vstupy jsou izolovány proti přepětí 3000V DC a flash paměť 128kB postačuje na 38 000 údajů. Nevýhodou je absence displeje, vše je třeba před měřením nastavit pomocí softvéru a počítače připojeného k datalogeru. Více na webových stránkách: <http://www.advantech.com/>, (cena s čidly asi 14000 Kč).

Data z datalogeru je třeba přehrát do počítače a průběh naměřených hodnot se obvykle zpracuje v tabulkovém procesoru Excel. Je také možné přidat dopočítávanou veličinu např. teplotu rosného bodu  $T_w$  (°C) – staré značení (nové značení  $\theta_w$  nebo  $\theta_{si,cr}$ ) a sledovat tak povrchovou kondenzaci na konstrukci – překrytí dolní zelené a žluté křivky (teplota rosného bodu a povrchová teplota v obývacím pokoji v dolním rohu).

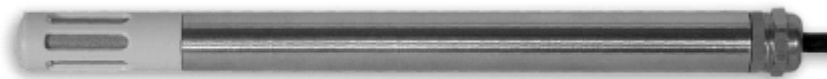
## 4.2 MĚŘENÍ DALŠÍCH VELIČIN

Další tepelně technické veličiny lze měřit obdobným způsobem jako teplotu, ale s odlišným čidlem (sensorem):

- ◆ relativní vlhkost vzduchu
- ◆ hmotnostní vlhkost materiálu
- ◆ hustotu tepelného toku
- ◆ součinitel tepelné vodivosti materiálů

### 4.2.1 Vlhkostní čidla

Pro měření relativní vlhkosti vzduchu lze využít kapacitní čidlo viz obr. 4.2.1-1, které je vhodné pro vnitřní a s krytem i pro vnější měření (výrobce Ahlborn, Německo).



Obr. 4.2.1-1 Kapacitní vlhkostní čidlo typ FHA6461C

Pro měření hmotnostní vlhkosti materiálu je vhodná příložná sonda FHA696MF od firmy Ahlborn.

#### 4.2.2 Čidlo na měření hustoty teplotního toku

Čidlo na měření hustoty teplotního toku lze použít na měření tepelných ztrát v průběhu času ( $Wm^{-2}$ ). Toto čidlo lze použít na měření přestupu tepla na povrchu konstrukce tj. hodnotu  $\alpha$ . Vlastních příložných čidel je několik druhů dle velikosti měřené konstrukce.

#### 4.2.3 Čidlo tepelné vodivosti materiálů

Součinitel tepelné vodivosti lze měřit pro tepelně izolační materiály pevné, ale také sypké nebo měkké, např. foukaná izolace z odpadového papíru či minerální vlna atd. Pro pevné materiály je vhodná příložná sonda a pro sypké nebo měkké materiály zase vpichovací sonda.

#### 4.2.4 Přesnost měření

Přesnost měření je důležitý faktor pro využitelnost naměřených výsledků. Běžně používané termočlánky mají dle výrobce Ahlborn s odkazem na normu DIN/IEC 584-2 přesnost  $\pm 2,5$  °C (třída 2, rozsah  $-40$  až  $1200$  °C), což je velmi velká nepřesnost. Po provedení několika srovnávacích měření ovšem bylo dosaženo odchylky několika kalibrovaných termočlánků maximálně  $0,3$  °C. Ostatní čidla mají dle výrobce přesnost 1 až 3 %.

#### 4.2.5 Měřicí sondy pro další veličiny ve stavební fyzice

Kromě tepelně technických veličin je ovšem třeba měřit ve vnitřním i vnějším prostředí mnoho dalších veličin, které jsou uvedeny v tabulce tab. 4.2.5-1.

Tab. 4.2.5-1 Další měřené veličiny

Název	Popis
Luxmetr	Intenzita osvětlení (lx)
Čidlo denního osv.	Denní osvětlení interiéru (%)
Zvukoměr	Měření zvuku v interiéru i v exteriéru (dB (A))
Infrapyrometr	Nekontaktní bodové měření teploty (°C)
Pyranometr	Intenzita slunečního záření ( $Wm^{-2}$ )
Vítr	Rychlost a směr větru ( $ms^{-1}$ , °)
Anemometr	Rychlost proudění vzduchu ( $ms^{-1}$ )
CO <sub>2</sub> sonda	Koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu (%)

### 4.3 APLIKACE METOD V PROJEKTECH

Experimentální a numerické metody uvedené v kapitole 3 a 4 byly použity autorem v mnoha projektech, které řešil v rámci výzkumné činnosti. Především byla využívána



infračervená metoda na zjišťování rozložení teplot na površích konstrukcí. Dále pak nejvíce metoda modelování vícerozměrného a popřípadě nestacionárního šíření tepla v konstrukci.

Především se jedná o projekty:

- hodnocení tepelně izolačních vlastností zasklení Heat Mirror
- výzkum a vývoj nových materiálů z odpadních surovin a zajištění jejich vyšší trvanlivosti ve stavebních konstrukcích
- tepelně-izolační ověřování novodobých skladeb stavebních konstrukcí a materiálů budov

## SIMULAČNÍ METODY

### 5 NUMERICKÉ SIMULAČNÍ METODY

Simulační metody v tepelné technice se začaly více rozšiřovat s rozvojem výpočetní techniky. Je to obdobné jako ve stavební mechanice. Reálné rozsáhlé 3D konstrukce je možné modelovat v posledních pár letech, kdy byl zaznamenán velký rozvoj ve směru rozšíření operační i diskové paměti, ale hlavně ve výkonu procesoru. Nejčastější výpočtová metoda pro tepelnou techniku je MKP – metoda konečných prvků (FEM – Finite Element Method), se kterou je možno modelovat vedení tepla jako např.:

- ◆ Výpočet průběhu teplot v konstrukci
- ◆ Roční bilance zkondenzované a vypařitelné vodní páry v konstrukci
- ◆ Součinitel prostupu tepla
- ◆ Modelování více rozměrného vedení tepla (FEM=MKP)
- ◆ Modelování proudění plynu a sdílení tepla (CFD, FVM=MKO)
- ◆ Výpočet prostupu tepla při modelování ( $U, q$ )

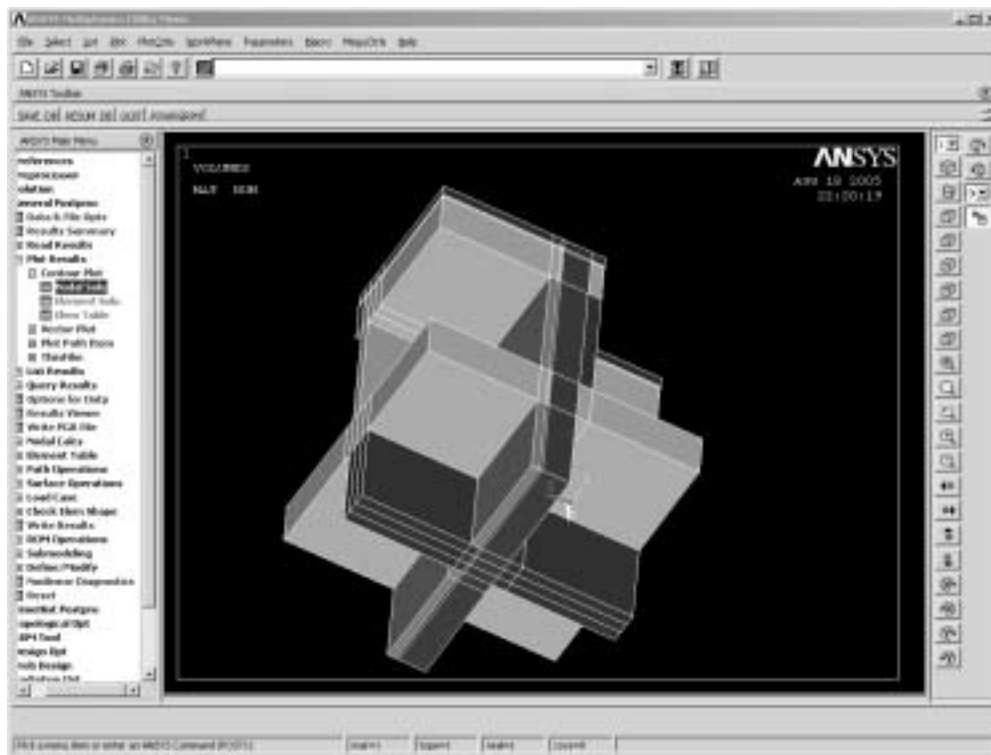
Lze uvést několik názvů software, které jsou vhodné pro tuto problematiku:

- ◆ **Teplo, Area, Pole, Simulace, Stabilita (Doc. Svoboda)**
- ◆ **ANSYS, Thermal, Flotran, Fluid**
- ◆ **TSBI3**
- ◆ **ESP-r**
- ◆ **Bsim**
- ◆ **FLUENT**
- ◆ **FLOVENT**
- ◆ **TRNSYS**
- ◆ **TRANSYS**

Simulační metody mají velký přínos pro zkoumání tepelných jevů, které mohou nastat ve stavebních konstrukcích ještě dříve, než bude konstrukce vybudována. Ovšem za předpokladu dobré shody výpočtového modelu se skutečnými, naměřenými hodnotami. Proto je nutné výsledky simulací či modelování ověřit experimentem in situ. Je pak možné předem navrhnout konstrukci tak, abychom předešli tepelně technickým problémům, případně vzniku vad a poruch.

## 5.1 MODELOVÁNÍ VÍCE ROZMĚRNÉHO VEDENÍ TEPLA

Pro modelování vícerozměrného tepla je možno použít hned několik simulačních produktů (Area, Cube3D, Ansys atd.). Autor nejčastěji používá program *Ansys* s modulem *Thermal*. Prostředí je velmi uživatelsky příjemné a obsahuje výkonný preprocesor, solver i postprocesor. Je založen na metodě konečných prvků (*MKP, FEM – Finite Element Method*) s velkým množstvím rozmanitých typů prvků s možností zadání fyzikálních vlastností v závislosti na teplotě nebo jiné veličině. Ukázka prostředí programu Ansys je na obr. 5.1-1, kde vlevo je rozbalovací menu a vpravo grafické okno pro zobrazení modelu s připojenými ikonami pro změnu grafického zobrazení. V horní části je pak klasické menu programů pod operačním systémem Windows.



Obr. 5.1-1 Náhled na prostředí programu ANSYS (v.8.1)

### Teplotní pole

Teplotním polem nazýváme rozdělení tepla v jednotlivých místech tělesa v určitém časovém okamžiku. Parametricky ho můžeme vyjádřit takto:

$$\theta = f(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (5.1-1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \neq 0$$

Zápis první rovnice 1.30 vyjadřuje, že teplota je funkcí polohy bodu (x,y,z) a času t.

Prakticky se uvažují tyto teplotní pole :

$$\begin{aligned} \theta = (x) & \quad \text{jednorozměrné ustálené} \\ \theta = (x, t) & \quad \text{jednorozměrné neustálené} \\ \theta = (x, y, t) & \quad \text{dvojjrozměrné neustálené} \\ \theta = (x, y, z, t) & \quad \text{trojjrozměrné neustálené} \end{aligned} \quad (5.1-2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad \text{ustálené} \qquad \frac{\partial \theta}{\partial t} \neq 0 \quad \text{neustálené}$$

Teplota je skalární veličina, protože na jeho určení postačuje číslo se znaménkem. Spojení bodů se stejnou teplotou vytvoří v tělese izotermickou plochu (ve vícerozměrných polích). Protože jeden bod nemůže mít dvě různé teploty, nemůžou se dvě izotermické plochy protínat.

Změna teploty na délkovou jednotku se nazývá gradient teploty (grad  $\theta$ ). Gradient je kladný ve směru zvyšující se teploty. Záporná hodnota gradientu teploty se nazývá teplotní spád.

### Hustota tepelného toku

Šíření tepla vedením charakterizujeme tepelným tokem. V homogenním a izotropním tělese má vektor gradientu teploty a tepelného toku stejný směr, ale opačný smysl. Experimentálně se zjistilo, že tepelný tok je přímo úměrný teplotnímu spádu. Matematicky se tato závislost vyjadřuje prvním Fourierovým zákonem:

$$q = -\lambda \text{ grad } \theta \qquad (5.1-3)$$

Udává vztah mezi hustotou tepelného toku  $q$  a teplotním gradientem, přičemž platí přímá úměrnost. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) je činitel úměrnosti gradientu teploty grad  $\Theta$  ( $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ) a hustoty tepelného toku  $q$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Záporné znaménko v rovnici je proto, že tepelný tok se šíří v opačném směru než teplotní gradient. Součinitel úměrnosti  $\lambda$  je skalár a jeho velikost závisí na fyzikálních vlastnostech tělesa. Nazývá se součinitel tepelné vodivosti a charakterizuje schopnost látek vést teplo. Ve stavební praxi se setkáváme s celou řadou stavebních látek s různou hodnotou  $\lambda$ .

Z experimentálních měření poznáváme, že tato veličina není stálá a závisí na mnoha fyzikálních parametrech. Pokud používáme ve výpočtech součinitel tepelné vodivosti jako konstantu, musíme mít na zřeteli, v jakém rozsahu tato hodnota platí. Rovnice (5.1-3) platí pro ustálené teplotní pole. Teplotní gradient ve vícerozměrném teplotním poli je vektor ve směru normály  $n$  k izotermické ploše.

Jeho velikost je dána:

$$\text{grad } \theta = \frac{\partial \theta}{\partial n} \qquad (5.1-4)$$

První Fourierův zákon je možno ve všeobecném tvaru vyjádřit zápisem

$$q = -\lambda \left( i \frac{\partial \theta}{\partial x} + j \frac{\partial \theta}{\partial y} + k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \qquad (5.1-5)$$

První Fourierův zákon definuje velmi důležitou vlastnost látky – tepelnou vodivost. Tento zákon byl odvozený z experimentálních závislostí. Kvantifikuje hustotu tepelného toku na normále k izotermické ploše ve směru klesající teploty. Rovnice (5.1-5) předpokládá izotropní látku, tzn. že hodnota součinitele tepelné vodivosti nezávisí na směru šíření tepelného toku.

Pro neustálené vedení tepla platí druhý Fourierův zákon.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (5.1-6)$$

Kde  $a$  je součinitel teplotní vodivosti ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )  $a = \frac{c}{\lambda \cdot \rho}$

Vztah 5.1-6 udává závislost mezi časovou změnou teploty (levá strana rovnice) a místní změnou teploty (pravá strana rovnice). Konstantou úměrnosti je v tomto případě součinitel teplotní vodivosti, neboli teplotní vodivost. Podle této rovnice se teplota mění v čase nejrychleji v takových tělesech, které mají vyšší hodnotu teplotní vodivosti. Součinitel teplotní vodivosti kromě jiného vyjadřuje změnu v určitém místě uvnitř látky vzhledem ke změně teploty na okraji. Čím je součinitel teplotní vodivosti vyšší, tím rychleji se mění teplota uvnitř. Vztah 5.1-6 je Druhá Fourierova diferenciální rovnice vedení tepla. Je to parciální diferenciální rovnice složená ze souřadnic prostoru a času jako nezávislých proměnných a teploty jako závislé proměnné.

### Šíření tepla prouděním

Prouděním se teplo šíří v kapalinách a plynných látkách tak, že se částice látek (molekuly) pohybují a přitom přenášejí teplo. Principiálně nastávají dva jevy:

- teplo se předává vedením z částice na částici
- pohybující se částice předávají svou vnitřní energii z místa na místo prouděním

Když proudí vzduch kolem povrchu tuhého tělesa (např. povrchu konstrukce), vytváří se oblast tzv. přechodového proudění a oblast, ve které se v důsledku viskozity vzduchu mění rychlost proudění spojitě od nulové hodnoty na povrchu tělesa až do rychlosti volného proudění.

Tato oblast se nazývá mezní vrstvou. Vzduch se v ní může pohybovat laminárně nebo turbulentně.

### Přirozené proudění

Lokální zvýšení teploty v tekutině (plynu) je vyvoláno přemísťováním částic vlivem rozdílné hustoty. Lehčí částice stoupají, těžší klesají a promíchávají se s tekutinou na jiném místě. Vzniká přirozené proudění vyvolané pouze rozdílem teplot. Pohyb částic je možné vyvolat i jinými způsoby (čerpadlem, ventilátorem), vzniká nucené (umělé) proudění tepla. Při velmi silném nuceném proudění zaniká vliv přirozeného proudění. Výměna tepla prouděním mezi povrchem tělesa a kapalným (plynným) prostředím se nazývá přestup tepla. Přestup tepla ze vzduchu do povrchu stavební konstrukce (nebo opačně) je podle Newtonova zákona daný rovnicí:

$$q_{cv} = h_{cv} \cdot (\theta - \theta_s) \quad (5.1-7)$$

kde  $q_{cv}$  je hustota tepleného toku při proudění ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  
 $h_{cv}$  součinitel přestupu tepla při proudění ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  
 $\theta$  teplota vzduchu ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\theta_s$  teplota povrchu konstrukce ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**Součinitel přestupu tepla při proudění je veličina nestálá a závisí na parametrech, které charakterizují stav a pohyb vzduchu, tvar a umístění konstrukce. Určuje se na základě experimentálních měření. Rozlišuje se pro přirozené a nucené proudění vzduchu.**

### Součinitel přestupu tepla při přirozeném proudění

Přirozené proudění vzniká následkem rozdílné hmotnosti teplých a studených částic vzduchu při přestupu tepla mezi povrchem tělesa a vzduchem. Volné proudění může být:

- laminární
- přechodové
- turbulentní

Když umístíme těleso do plynného prostředí s rozdílnou teplotou, vznikne proudění kolem povrchu tělesa. Ve spodní části je proudění laminární, dále se v určité výšce vytváří přechodová oblast, na konci které se vytváří proudění turbulentní.

Součinitel přestupu tepla závisí na velkém počtu faktorů, které přestup tepla ovlivňují. Závislost tak velkého množství proměnných je těžké sledovat teoreticky i experimentálně. Proto se tyto vztahy zjednodušují vynecháním parametrů, které mají poměrně malý vliv. Tak vzniklo množství empirických vztahů, které vyjadřují přestup tepla v závislosti na několika málo proměnných. Dávají však jen přibližné výsledky.

V teorii přestupu tepla se využívá zákon podobnosti. O geometrické podobnosti hovoříme tehdy, když odpovídající si rozměry tělesa jsou násobkem rozměrů druhého tělesa. Fyzikální podobnost rozšiřuje tento pojem ještě na další veličiny, které jsou pro příslušný jev rozhodující, jako je rychlost, teplota, čas, teplotní vodivost apod. Vyjadřuje se bezrozměrnými kritérii, které musí být pro stejné fyzikální jevy v různých konkrétních případech shodné. Dva stejné fyzikální jevy musí mít stejné hodnoty kritérií podobnosti, tj. poměr určitých veličin má stejnou číselnou hodnotu pro podobné soustavy. Podobnostní čísla umožňují přenášet výsledky z modelu na skutečný objekt. Kritéria podobnosti jsou vytvořena z rozměrových veličin kombinovaných tak, aby vzniklo bezrozměrné číslo. Bezrozměrná podobnostní čísla jsou pojmenována podle významných vědců:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad \text{Reynoldsovo číslo} \quad (5.1-8)$$

$$\text{Nu} = h_{cv} \frac{l}{\lambda} \quad \text{Nusseltovo číslo} \quad (5.1-9)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot c \cdot \rho}{\lambda} = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad \text{Prandtlovo číslo} \quad (5.1-10)$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta \theta \cdot l^3}{\nu^2} \quad \text{Grashofovo číslo} \quad (5.1-11)$$

Kde je

- $\nu$  kinematická viskozita plynu,
- $\rho$  objemová hmotnost plynu,
- $\mu$  dynamická viskozita plynu,
- $g$  gravitační zrychlení,
- $l$  charakteristický rozměr,
- $v$  rychlost proudění plynu,

- $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti,
- $c$  měrná tepelná kapacita ,
- $\Delta\theta$  rozdíl teploty vzduchu a tělesa
- $\beta$  součinitel teplotní roztažnosti vzduchu,  $\beta=1/273$
- $a$  teplotní vodivost ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $C_x$  vhodní koeficient proudění pro daný tvar 0 až 1 (-)

Nusseltovo číslo se používá na bezrozměrné vyjádření součinitele přestupu tepla. Pro volné proudění kapalin a plynů se vyjadřuje v tvaru závislosti.

$$Nu = C_x \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (5.1-12)$$

### Součinitel přestupu tepla nuceného proudění

Nucené proudění vzniká při použití čerpadel a ventilátorů. Na venkovních površích konstrukcí ve stavební tepelné technice způsobuje nucené proudění působení větru.

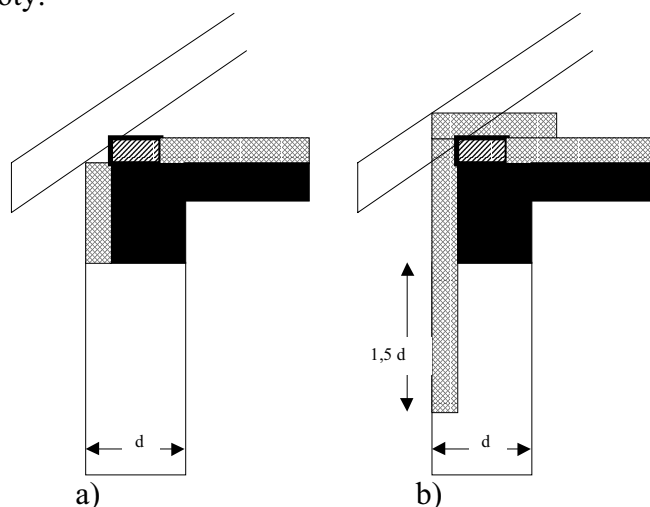
Nucené proudění může být také laminární i turbulentní. Laminární proudění vzniká při menších rychlostech vzduchu ( $Re < 2320$ ), při větších rychlostech nastává proudění turbulentní. Vlivem působení větru se na povrchu konstrukce mění i součinitel přestupu tepla, jak je vidět na.

#### 5.1.1 Dvojměrné šíření tepla

Modelování dvojměrného šíření tepla v konstrukci se běžně již několik let praktikuje v akademických, ale i inženýrských kruzích. Především se modelují tepelné mosty a vazby, které mají charakter dvojměrného řezu konstrukce a lze zanedbat třetí rozměr.

Pokud povrchové teploty nevyhovují požadavkům ČSN je třeba pro splnění požadavků u konkrétního detailu optimalizovat detail, např. přesazením tepelné izolace ze stěny (překlady) přes okenní rám, což se již obvykle navrhuje a provádí, ale ne vždy je pro výpočet a posouzení použito dvojměrné teplotní pole.

Na obr. 5.1.1-1 je znázorněno doporučení přetažení tepelné izolace přes stěnovou konstrukci v místě tepelného mostu (železobetonového věnce). Na rozhraní dvou materiálů v ochlazované konstrukci je doporučeno přetažení tepelnou izolací o minimálně 1,5 násobek tloušťky konstrukce, jinak dochází nárůstu tepelných ztrát přes tepelný most a k velkému lokálnímu poklesu povrchové teploty.



Obr. 5.1.1-1 Svislý řez ztužujícího věnce se zateplením a) bez b) s přesahem

### 5.1.2 Trojrozměrné šíření tepla

Pokud má zkoumaný prvek charakter trojrozměrné konstrukce, např. roh místnosti, je třeba na podrobnější analýzu použít trojrozměrné teplotní pole. Modelováním trojrozměrného šíření tepla lze zkoumat celý objekt, ovšem obvykle postačuje modelování pouze její části. Od roku 2002 je provedení výpočtu trojrozměrného šíření tepla u kritického detailu při procesu navrhování v inženýrské praxi doporučeno normou ČSN 73 0540-2:2002. Zatím toto doporučení u projektantů není příliš respektováno.

Typickým příkladem mostu je 3D kout kde dochází ke styku dvou stěn a železobetonového stropu.

### 5.1.3 Nestacionární teplotní děje

Pomocí programu Ansys je možno modelovat nestacionární (neustálený) teplotní stav. Tudíž je možno modelovat například děje, které se běžně počítají pomocí zjednodušeného výpočtového modelu tj. tepelná jímavost podlah, tepelná stabilita místnosti v zimním i letním období, vliv akumulace konstrukce na tepelné ztráty budovy atd.

Při analýze výsledků je možné získat teplotu, hustotu tepelného toku, popřípadě jinou veličinu v každém uzlu sítě MKP. Při použití dávkové analýzy je možno dokonce upravit konkrétní okrajovou podmínku dle vypočtených veličin v předchozím kroku a modelovat tak inteligentní (samočinné) systémy budovy – princip zpětné vazby. V dávkovém souboru je možné použít jakýkoli příkaz z klasického menu, ale ve tvaru pro příkazový řádek (dříve v době MS-DOS jediná možnost zadávání) a také jazyk FORTRAN popř. jazyk C s komentáři.

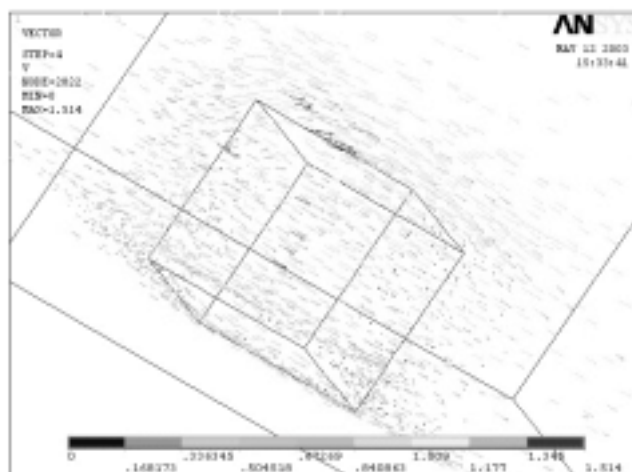
Preprocessing má také velmi silné nástroje např. je možno vytvořit videosekvenci s průběhem teplot na povrchu popřípadě uvnitř konstrukce. Také lze vykreslit průběh veličiny pro konkrétní uzel v grafu popř. přenést výsledky pro další zpracování do programu MS Excel.

## 5.2 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU A SDÍLENÍ TEPLA (CFD, FVM=MKO)

Další širokou problematikou v oblasti přenosu tepla (také hmoty) je modelování proudění plynů (CFD - Computational Fluid Dynamics). Vzduch v interiéru i v exteriéru je v neustálém pohybu a dochází při tom ke sdílení tepla prouděním. Proudění může vznikat vlivem rozdílu teploty povrchů nebo média (přirozené proudění) a nebo může proudit vlivem vnější síly (nucené proudění).

### 5.2.1 Rychlostní poměry větru kolem budovy

Pomocí CFD lze také modelovat rychlostní a tlakové poměry v okolí budovy. Při proudění vzduchu (větru) v okolí objektu dochází ke změnám tlaku i rychlosti proudění z důvodu obtékání různých tvarů a vzniku různě silných turbulencí viz obr. 5.2.3-1.



Obr. 5.2.3-1 Vektorové pole rychlosti proudění vzduchu v okolí budovy ( $\text{ms}^{-1}$ )

V zimním období má vítr velký vliv na tepelné ztráty objektu. Prouděním vzduchu těsně u venkovní strany konstrukce zvyšuje hodnotu  $h_c$  a snižuje tepelný odpor při přestupu až téměř na nulu, ale mnohem větší tepelné ztráty vytváří zvýšenou infiltrací především u starších oken, kde není dokonalé těsnění. Při vyšších rychlostech se mohou zvýšit ztráty u takových oken přirozeným větráním až několika násobně a mohou převyšovat tepelné ztráty objektu prostupem tepla.

Uvedené metody byly použity v projektech:

- Možnosti zvýšení tepelného odporu zdiva z cihelných tvarovek
- Dvojitá solární fasáda MZK v Brně – využití sluneční energie
- Dvojitá provětrávaná fasáda – budova AB Reding v Bratislavě
- Dvojitá provětrávaná fasáda – budova VUT v Brně, fakulta informačních technologií
- Vnitřní zateplení památkově chráněného objektu galerie VAŇKOVKA v Brně
- Simulace vnitřního prostředí při použití PCM sádrokartonu

## 6 PEDAGOGICKÉ, VĚDECKÉ A ZNALECKÉ AKTIVITY

### 6.1 PEDAGOGICKÉ AKTIVITY

Autor je přednášejícím odborným asistentem na ústavu pozemního stavitelství a je zaměřen na oblast *Stavební fyziky – Tepelné ochrany budov*. Je členem *kabinetu stavební fyziky a vnitřního prostředí budov*. Přednáší předměty, které navrhl na akreditaci nových předmětů v roce 1999.

Přednášené předměty:

7H3 - Modelování tepelných jevů stavebních konstrukcí

9H2 - Počítačová aplikace tepelné techniky

V současné době platí několik akreditovaných studijních plánů z důvodů nabíhání nové výuky (bakalářského studia) a dobíhání staré výuky (staré magisterské studium) a proto je velké až nepřehledné množství aktivních předmětů.

Autor má velmi blízký vztah k výpočetní technice a elektrickým měřicím přístrojům a z toho vyplynula aktivita nových předmětů a dalších činností v pedagogice. Na obr. 6.1-1 je ukázka měření v terénu infračervenou kamerou v rámci výuky.





Obr. 6.1-1 Měření v terénu infračervenou kamerou v rámci výuky

Vybrané magisterské předměty (v českém jazyce)

0H7 - Stavební tepelná technika (přednášené)

7H3 - Modelování tepelných jevů stavebních konstrukcí (přednášené)

9H2 - Počítačová aplikace tepelné techniky

AH52 - Stavby s nízkou energetickou náročností

Magisterské předměty (v anglickém jazyce)

H35 – Acoustics and Daylighting

H33 – Thermal Insulation

Doktorské předměty:

DH72 - Modelování fyzikálních jevů stavebních konstrukcí

DH74 - Simulace prostředí budov

DH75 - Energetické hodnocení budov

DH63 - Základy projektování vrstvených konstrukcí s podporou počítače

V rámci doktorského studia se také autor účastní státních doktorských zkoušek jako zkoušející z předmětu „Modelování fyzikálních jevů ve stavebních konstrukcích“ atp. Celkem zkoušel 8 doktorandů. Vede 3 doktorandy na interním studiu a jednoho na kombinované formě studia.

### 6.1.1 Celoživotní vzdělávání inženýrů a univerzita třetího věku

V rámci celoživotního vzdělávání přednáší autor na kurzech pořádaných fakultou na téma *Tepelná ochrana budov*. Jedná se o přednášky pro autorizované inženýry, ve kterých je podávána nejnovější informace o vybrané problematice.

Taktéž se podílel na výuce ve studijním programu *univerzita třetího věku* s tématem *Využití výpočetní techniky ve stavebnictví*. Jednalo se o průřez využití výpočetní techniky v minulosti a v současnosti. Především v oblasti navrhování staveb tzv. CAD systémy – Computer Aided Design, s tím související vizualizace a také simulační programy v oblasti tepelné techniky budov.

## 6.2 Vědecké aktivity

V průběhu období 1997 – 2005 byl autor zapojen do více než 12 výzkumných grantů, záměrů nebo úkolů jako hlavní řešitel nebo člen týmu. Dva granty byly mezinárodní uděleny v rámci 5. Rámcového programu *Evropské unie*. Přehled nejdůležitějších grantů je uveden v tab. 6.2-1.

Tab. 6.2-1 Zapojení autora do výzkumných úkolů

Ozn.	Popis
<i>Národní granty (Grantová agentura ČR, MŠMT, MPO, VUT)</i>	
<b>GAČR 103/03/D085</b>	<b><i>Tepelně-izolační ověřování novodobých skladeb stavebních konstrukcí a materiálů budov, hlavní řešitel, 2003-2006</i></b>
GAČR 103/03/0233	Citlivostní analýza stabilitních problémů tenkostěnných konstrukcí, člen týmu, 2003-2005, (Dr. Ing., Kala Zdeněk)
GAČR 103/01/0964	Analýza působení mikrovlnného záření na stavební materiály, spolupráce, 2001-2003, (Doc. Ing. Miloslav Novotný, CSc.)
GAČR 101/03/0299	Mikrocentrála pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla na bázi motoru s vnějším přívodem tepla, spolupráce, 2001-2003, (Prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.)
<b>VUT FV 280005/98</b>	<b><i>Vylepšení tepelně-technických vlastností cihelné tvarovky, hlavní řešitel, 1998-1999</i></b>
VVZ MSM 0021630511	Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí, člen týmu, 2005-2006 (Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.)
VVZ MSM 261100008	Výzkum a vývoj nových materiálů z odpadních surovin a zajištění jejich vyšší trvanlivosti ve stavebních konstrukcích, člen týmu, 2000-2004 (Prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.)
MPO č. S2-10	Regenerace panelových domů, člen týmu, 1999-2001 (Doc. Ing. Jiří Lank, CSc.)
MPO HS 230 273	Klimatická data podle předběžných evropských norem (prEN) a jejich úprava pro přípravu nových ČSN, člen týmu, 2004 (Ing. Lubomír Zlámal)
<i>Mezinárodní granty (EU, 5.RP)</i>	
<b>GIRT-CT- 2001-05038</b>	<b><i>Performance Based Building - PeBBu, řešitel, 2001-2005</i></b>
NNE5- 2001-00837	Energy in the Built Environment - ENERBUILD, člen týmu, 2002-2003 (Doc. Ing. Jiří Sedlák, CSc.)

*Pozn.: Kurzívou jsou označeny granty, kde je autor hlavním řešitelem.*

Výsledky výzkumných úkolů autor prezentoval v 11 evropských státech na konferencích, přednáškových pobytech apod.

Seznam významných přednášek:

- 1999 Polsko – Gliwice, Opole, TU Department of Building Physics
- 1999 Slovensko – Bratislava, Košice, Tatranská Štrba, Podbanské
- 2000 Dánsko – Kodaň, Eurosun 2000
- 2000 Skotsko – Glasgow, TU Department of Building Physics
- 2001 Slovinsko – Ljublaň, TU Department of Building Physics
- 2002 Itálie – Boloňa, Eurosun 2002
- 2003 Maďarsko – Budapešť, EMI, PeBBu workshop
- 2003 Německo – Weimar, TU Department of Building Physics
- 2004 Rakousko – Vídeň, TU Department of Building Physics
- 2004 Portugalsko – Porto, TU, PeBBu workshop
- 2005 Bulharsko – Sofie, Energy Center, PeBBu workshop

### 6.3 Publikační činnost autora

Výsledky vědecké práce jsou publikovány ve více než 100 publikacích. Jsou to vědecké a odborné články, sborníky českých a mezinárodních konferencích.

Dále jsou uvedeny vybrané významné publikace (úplné znění citací je uvedeno v soupisu autoevaluačních kritérií.

#### Článek na konferenci

- 01 Kalousek, M., Sedlák, J., An energy-savings facade for non-residential buildings..., International conference Eurosun 2000, Kodaň, Dánsko, 2000, 6s.
- 02 Kalousek, M., Energy saving solar facade. In. Building Physics, Opole, Polsko 2001, str.52-53.
- 03 Kalousek, M., Facade for non-residential buildings, International conference Sustainable Buildings 2001, Brno, 2001, 6s.
- 04 Kalousek, M., Hirš, J., Simulation of the summer indoor thermal comfort by using wallboard with phase change material. Evropská konference Eurosun 2002, Itálie, Boloňa, 2002, 6s.
- 05 Kalousek, M., Čuprová, D., Ostrý, M., Summer Simulation and measurement of The building by using wallboard with PCM , Low Energy Housing 2004 - VII Polish research-technical Conference
- 06 Kalousek, M. Recycling and Renovation, PeBBu EEP Meeting, Sofia, 7s., Bulgaria, 2005

#### Článek v časopise

- 05 Kalousek, M., Letní komfort v místnosti s obkladními deskami s fázovou změnou, Vytápění, větrání, instalace, 4/2000, 4s. (recenzovaný časopis)
- 03 Čuprová, D., Donatřáková, D., Kalousek, M., Dřevěný montovaný dům s využitím odpadního materiálu pro tepelnou izolaci. Tepelná ochrana budov. 2001, roč.4, čís. 5, str.21-25. (recenzovaný časopis)
- 01 Kalousek, M., Thermal radiation inside the perforations of the lightweight insulating brick. ZI Ziegelindustrie International, Vol 55, No. 3, s. 38-42, Německo, 2002.
- 06 Kalousek, M., Přenos tepla ve vzduchové dutině cihelné tvarovky, čas. Silika, roč. 12, čís. 5-6, str. 166-170, Praha, 2002, ISSN 1213-3930. (recenzovaný časopis)
- 04 Kalousek, M., Čuprová, D., Tepelně-technické poruchy obalových konstrukcí, č. Tepelná ochrana budov, roč. 7, č. 5, 2004, ISSN. (recenzovaný časopis)
- 02 Škorpík, J., Kalousek, M., Kadrnožka, J., Quasi steady flow of helium modelling inside cooler of stirling engine, Engineering Mechanics, ISSN 1210-2717, 2005 - nyní v tisku
- 07 Kalousek, M., Solar Facade for Climatic Condition in the Czech Republic, In: Slovak Journal of Civil Engineering, 2005, 8p., ISSN 1210-3896 – v tisku
- 08 Kalousek, M., Simulation of the Summer Indoor Thermal Comfort by Using Wallboard with Phase Change Material, In. Building research journal, 7p., 2005, ISSN 1335-8863 – v tisku
- 09 Kalousek, M., Čuprová, D. Tepelné mosty – modelování a diagnostika v praxi, č. Tepelná ochrana budov, roč. 8, č. 2, 2005, ISSN. (recenzovaný časopis)

#### Ostatní práce

- 01 Kalousek, M., Measurement and simulation at Faculty of Civil Engineering, Workshop, TU Weimar, Bauphysik 2003, Germany.

## 6.4 Soudní a znalecká činnost

V roce 1997 autor začal studovat na ústavu soudního inženýrství specializační kurz znalectví v oboru ekonomika stavebnictví. V roce 1998 absolvoval závěrečnou zkoušku s obhájením závěrečné práce a v roce 2004 byl jmenován soudním znalcem. Je autorem nebo spoluautorem více než 70 znaleckých posudků.

## 6.5 Další aktivity autora na pracovišti

Autor je **fakultním koordinátorem mezinárodního mobilitního programu CEEPUS** (Central European Exchange Programme for University Studies), kde v období 1995 – 2003 byla aktivní síť PL – 23 s názvem *Stavební fyzika - trvanlivost stavebních materiálů*. V rámci této sítě probíhaly výměny studentů a pedagogů v zemích: Česká republika, Slovensko, Polsko a Rakousko.

Navázal kontakt v rámci programu SOCRATES / ERASMUS s ústavem stavební fyziky na TU Weimar a TU Vídeň – fakulty architektury.

Na *ústavu pozemního stavitelství* byl v období 1999 – 2002 **vedoucím kabinetu počítačové grafiky**, kde byly vyučovány předměty s podporou výpočetní techniky (CAD).

Dále se zapojuje při vytváření plánu rozšíření měřicí základny v laboratoři ústavu a účastní se měření v rámci doktorských disertačních prací doktorandů a také v rámci doplňkové činnosti ústavu a přijímacích řízení do doktorského studia a také státních doktorských zkoušek.

## 7 Závěry

Úspora energie byla po příchodu energetické krize a dále je po roce 1990 velmi aktuálním tématem nejen v oboru stavebnictví, ale ve všech oborech průmyslu. Úspora energie při vytápění je velmi žádoucí, protože vytápění činí až třetinu spotřeby energie celkem. Autor se začal tématem úspor energie zabývat již při studiu magisterského programu a dále na doktorském studiu a setrval u něj až do současnosti.

### 7.1 Závěry a přínosy pro praxi a další rozvoj vědy

Výsledky práce autora mají přímý vliv na praxi v oblasti tepelné ochrany budov, protože mnoho odborných a soudně znaleckých posouzení (autor je soudním znalcem se specializací: Tepelná technika budov) směřovalo přímo na identifikaci a později vyřešení vad a poruch na konkrétních stavbách. Především se jedná o oblasti: zateplování staveb, eliminace možnosti vzniku plísní na konstrukci v interiéru a ohrožení poškození zdraví uživatelů a také snižování energetické náročnosti staveb v zimním i letním období.

S příchodem dalšího zpřísnění normativních požadavků v oblasti tepelné ochrany budov (ČSN 730540 Tepelná ochrana budov, část 2:2002,Z1-2005, 1, 3, 4:2005) je třeba nadále zdokonalovat metody a možnosti posouzení chování konstrukcí před skutečnou realizací (tzv. predikci chování), aby došlo ke zefektivnění stavební činnosti bez nutnosti dalších stavebních úprav po realizaci a dalších finančních a časových ztrát v období užívání stavby.

#### Práce vychází z oblastí:

- teorie přenosu tepla ve stavebních konstrukcích
- experimentální analýzy funkčnosti objektů a konstrukcí
- využití klimatických dat pro simulaci energetické bilance objektů

- modelování tepelných jevů ve stavebních konstrukcích
- metodické postupy při hodnocení tepelně vlhkostních problémů

### **Výstupy vědeckých a výzkumných prací lze použít pro následující aplikace:**

- optimalizaci energetického chování nové nebo stávající budovy v několika variantních provedení
- posouzení kvality vnitřního prostředí v budovách s vazbou na požadované parametry konstrukcí a zařízení (v souladu s platnými předpisy)
- odstraňování poruch a vad stavebních děl
- metodika pro využití termodiagnostiky v širším měřítku pro kontrolu kvality tepelné izolace staveb

### **Přínos pro vědu:**

**Autor v rámci grantového úkolu GAČR 103/03/D085 „Tepelně-izolační ověřování novodobých skladeb stavebních konstrukcí a materiálů budov“ jako řešitel provedl velké množství posouzení, ze kterých vyplynula specifická metodika hodnocení stavebních konstrukcí z hlediska tepelné ochrany staveb. Bylo provedeno několik desítek měření in situ a pořízeno několik stovek termografičeských snímků a mnoho naměřených položek parametrů vnitřního prostředí.**

**V průběhu období 1996 – 2005 byl autor zapojen do více než 12 výzkumných grantů, záměrů nebo úkolů jako hlavní řešitel nebo člen týmu. Dva granty byly mezinárodní a byly uděleny v rámci 5. rámcového programu Evropské unie. Přehled těchto grantů je uveden v tab. 6.2-1.**

Výzkumné aktivity, které měly významný přínos pro další rozvoj vědy jsou uvedeny níže:

**VUT FV 280005/98** Vylepšení tepelně-technických vlastností cihelné tvarovky, řešitel, 1998-1999

**VVZ MSM 261100008** Výzkum a vývoj nových materiálů z odpadních surovin a zajištění jejich vyšší trvanlivosti ve stavebních konstrukcích, člen týmu, 2000-2004

**VVZ MSM 0021630511** Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí, 2005-2006

**MPO č. S2-10** Regenerace panelových domů, 1999-2001

Autor se podílel na vytváření sítě evropských pracovišť v rámci evropských projektů **G1RT-CT-2001-05038** Performance Based Building - PeBBu, (řešitel, 2001-2005) a **NNE5-2001-00837** Energy in the Built Environment - ENERBUILD, (2002-2003) a zúčastňoval se odborných meetingů v Portu, Sofii, Budapešti, Bratislavě a přispěl prezentací výzkumu fakulty stavební na setkání v Manchesteru.

## **7.2 Přínos v pedagogice**

Ve obdobném smyslu jako pro vědu má práce přínos i pro pedagogiku, protože jsou nové poznatky předávány studentům v předmětech, které vznikly z iniciativy autora před pěti lety na výše uvedené téma. Jedná se o předmět „Modelování tepelných jevů stavebních konstrukcí“ a „Počítačová aplikace tepelné techniky“ v magisterském studiu a „Modelování fyzikálních jevů

stavební konstrukcí“ v doktorském studiu. Na přednáškách a cvičeních jsou prezentovány a aplikovány výsledky z výzkumu i praktických posouzení.

Dále jsou výsledky autorem pravidelně prezentovány na seminářích a konferencích v rámci celoživotního vzdělávání inženýrů (ČKAIT).

## 8 Abstract in English

The scientific work shows on several projects utilization of experimental and theoretical method in Building physics especially thermal science. Very important parts are indoor environment and saving energy of heating in the buildings.

Experimental methods are infrared thermography and measurement of thermal and humidity properties of indoor air climate and building constructions. Theoretical methods are building simulation and modelling of thermal phenomena on 3D models of the structures.

Contribution of this work is scientific methodology of infrared images evaluation in experimental part and description of thermal insulation fails and their correction in simulation parts.

In the educational field is very important dissemination of feed back knowledge by the help of lectures for the students and engineers (whole life education).

## 9 Použité informační zdroje

1. ČSN 730540 Tepelná ochrana budov, část 2:2002,Z1-2005, 1, 3, 4:2005
2. Halahya, M., Chmurný, I., Sternová, Z., Stavební tepelná technika, Tepelná technika budov, Jaga, Bratislava, 1998.
3. Řehánek, J., Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti uzavřených vzduchových vrstev ve stavebních konstrukcích, VÚPS, Praha, 1984.
4. Graf, J., Numerical simulation of equivalent specific thermal conductivity of vertically perforated clay masonry units, Ziegelindustrie, roč 95, č. 2, NSR, 1995.
5. Manual Ansys 5.7, elektronická verze helpu, 2001.
6. Pytlík, P.: Cihlářství, Přednášky, VUT FAST, CERM, Brno, 1995.
7. ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce, Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla, Výpočtová metoda (původně 73 0558).
8. Sokolář, R., Tepelná vodivost a mikrostruktura cihlářského střepu, Diplomová práce, VUT FAST, Brno, 1996.
9. Řehánek, J. a kol., Zlepšování užitečných vlastností konstrukcí pozemních staveb. Úspora energií, STNL, Praha, 1990.
10. Jícha, M., Přenos tepla, skripta VUT FS, Brno, 1986.
11. Heyder, F. The influence of the cross-sectional design of vertically perforated clay masonry units on thermal insulating requirements, Ziegelindustrie, roč 96, č. 2, NSR, 1996.
12. Spitzner, H., M., Correlation of the measured results for the thermal conductivity of bricks from wall and half-brick measurements, Ziegelindustrie, roč 2000, č. 13, NSR, 2000.
13. Mergenthaler, D., Testing and development of vertically perforated clay blocks with new thermal conductivity measurement appliance, Ziegelindustrie, roč 96, č. 9, NSR, 1996.
14. Sazima, M. a kol., Sdílení tepla, Technický průvodce TP78, SNTL, Praha, 1993.
15. Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J. a kol., Teplo, Technický průvodce TP2, STNL, Praha, 1989.
16. Jícha, M., Přenos tepla, skripta, VUT FS, Brno, 1986.
17. Kuneš, J., Modelování tepelných procesů, TKI STNL, Praha, 1989.

18. Rédr, M., Příhoda, M., Základy tepelné techniky, STNL, Praha, 1991.
19. Gomolová, Z., Rybáryk, J., Šveda, M., Možnosti zlepšení tepelnoizolačních schopností tehliarských výrobkov pre murované obvodové konštrukcie stavieb, Stavební obzor, roč. 98, č. 4, Praha, 1998.
20. Mills, A., F., Heat Transfer, Irwin, Boston, USA, 1988.
21. Bejan, A., Heat Transfer, Wiley, New York, USA, 1993.
22. Schmidt, F., W., Henderson, R., E., Wolgemuth, C. H., Introduction to thermal sciences, Wiley, NY USA, 1984.
23. Kalousek, M., Bahula J., Tepelná technika budov, Návody pro cvičení, CERM, 1999, ISBN 80-214-1150-3.
24. Vranka, L., Daniel, J., Vysoce lehčené cihlářské výrobky, Technická zpráva, ČSCZ GŘ, s. 213-218, Praha, 1985.
25. Svoboda, J., Manuál k programu Neprůzvučnost 2001, CVUT SvF, 2001.
26. Kalousek, M., Thermal radiation inside the perforations of the lightweight insulating brick. ZI Ziegelindustrie International, Vol 55, No. 3, s. 38-42, Německo, 2002.
27. Fanger, P., O., Thermal Comfort, (Tepelná pohoda), McGraw Hill, New York, 1970
28. Pašek, J., Svoboda, J.: Fyzikální aspekty použití nekontaktní termografie při analýze obvodových pláštěů budov, Stavební obzor, s. 82-91, roč. 2004, čís. 3.
29. Blahož, V., Kadlec, Z.: Základy sdílení tepla, Edice SPBI Spektrum 2, 109 s., ISBN 80-902001-1-7, nak. Cicero, Ostrava, 1996
30. ČSN EN 13187:1999 (730560) Tepelné chování budov – Kvalitativní určení teplených nepravidelností v pláštích budov – Infračervená metoda
31. Bielek, M., Dvojité fasády, nakl. Jaga, Bratislava
32. Drastich, A., Metodika sběru dat v infračervené části spektra, ÚBMI FAKT, VUT Brno 2001
33. Vaverka, J., Stavební tepelná technika, Stavební fyzika II, 420 s., Vutium, 2000.
34. Tóth, S., Tomko, M., Analýza súčasného stavu poznatkov z oblasti navrhovania a hodnotenia podkrovných priestorov občianskych a obytných budov. Časopis Znalectvo, ročník VIII – 1-2/2003, ISSN 1335-809X, str. 39-48, 2003
35. Tóth, S., Tomko, M.: Prehľad o konštrukčných riešeniach a súčasnom stave poznatkov šikmých a strmých striech u nás a v zahraničí. Časopis Znalectvo, ročník VIII – 3/2003, ISSN 1335-809X, str. 5-16, 2003
36. Tóth, S., Tomko, M.: Návrh konštrukčného riešenia skladby šikmého strešného plášt'a. Časopis Znalectvo, ročník IX – 1/2004, ISSN 1335-809X, str. 13-17, 2004
37. Cihleka, J., a kol., Vytápění větrání a klimatizace, Praha, STNL, 1985
38. Dlesek, V., a kol., Minimalizace energetické náročnosti v pozemních stavbách, STNL/Alfa, Praha, 1984
39. Hříš, J., Větrání regenerovaných panelových budov, Seminář Regenerované panelové domy, problematika větrání, ZTI a osvětlení, Mezinárodní veleth SHK, Brno, 2003
40. Jokl, M.,V., Teorie vnitřního prostředí budov, Vydavatelství ČVUT, Praha 1993
41. Jokl, M.,V., Zdravé a obytné pracovní prostředí, ISBN, 80-200-0928-0, Academia, 2002
42. Kabele, K., Modelování a simulace energetických systémů budov, Modelling and simulation of building energy systems, Topenářství - instalace, 2/2001, s. 60-63, ISSN 1211-0906, 2001
43. Řehánek, J., Janouš, A., Kučera, P., Šafránek, J., Tepelně technické a energetické vlastnosti budov, ISBN 80-7169-582-3, Grada Publishing a.s., Praha, 2002
44. Vyhláška 291/2001 Sb. (14.srpna 2001) Vyhláška ministerstva průmyslu a obchodu, kterou stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při spotřebě tepla v budovách.
45. Vybrané internetové zdroje:  
[www.tzbinfo.cz](http://www.tzbinfo.cz)  
[www.louisa.cz](http://www.louisa.cz)  
[www.termovize.wz.cz](http://www.termovize.wz.cz)  
[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)