

Prof. Ing. František Drkal, CSc., Ing. Martin Barták, Doc. Dr. Ir. Jan Hensen,
Ing. Miloš Lain, Ing. Jan Schwarzer
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí

1. Úvod

Vývoj ve větrání a klimatizaci potvrzuje prohlubování *interaktivní vazby* větrací a klimatizační techniky a objektů ve kterých proces úpravy prostředí probíhá (budov, dopravních prostředků aj.). Další podstatnou vlastností je, že větrání, klimatizace je vždy *dynamický proces* vytváření požadovaného tepelného a vlhkostního stavu prostředí a kvality ovzduší v daném prostoru. Nejde tedy pouze o „statické“ chápání vazby techniky a objektu, vyjadřované při projektování např. dispoziční koordinací, ale především o poznání dynamických jevů v objektu (změn tepelné zátěže, produkce škodlivin, provozních podmínek aj.), které jsou určující pro funkci větrání, klimatizace. Větrání a klimatizaci lze tedy charakterizovat jako proces probíhající v systému - *větrací, klimatizační technika (VKT) & objekt (OB)*.

Uvedený systémový přístup vynikne v projektové praxi při návrhu *konceptu* větrání, klimatizace, kdy projektant volí, pro podmínky charakterizující objekt, vhodnou větrací, klimatizační techniku. Tuto fázi lze považovat za klíčovou pro úspěšné vyřešení úkolů větrání, klimatizace. U jednoduchých zadání je koncepte často jednoznačná. Komplikovanější situace vzniká v případech, kdy projektant má rozhodovat o alternativách, nebo u náročných zadání, např.

- postačí v objektu pro úpravu tepelného stavu pouze větrání, nebo je nutná klimatizace,
- jak ovlivní četnost výskytu extrémních letních tepelných zátěží velikost chladicího zařízení, jaká velikost akumulace chladu je účelná na překonání špičkových zátěží,
- jak se projeví tepelná kapacita budovy na časovém rozložení tepelné zátěže,
- je optimální provedení prosvětlovacích ploch i z hlediska tepelné zátěže objektu (např. světlíků průmyslových budov),
- postačí přirozené větrání pro celoroční dodržení limitních parametrů prostředí, nebo je nutné nucené větrání, resp. klimatizace,
- lze vytvořit v omezeném prostoru specifické klimatické podmínky (odlišné od podmínek celého prostoru), zajišťující celoročně přísné teplotní a vlhkostní limity.

Všechny uvedené otázky mají společný jmenovatel – jejich řešení vždy musí respektovat vyváženě funkci obou složek podmiňujících dynamický proces větrání, klimatizace – větrací, klimatizační techniku a objekt.

Běžně uplatňované postupy při navrhování větrací a klimatizační techniky a budov (zvláště tepelně-technických vlastností budov) vycházejí dosud do značné míry z oddělených přístupů k oběma složkám. Tyto postupy, podporované platnými normami, jsou přijatelné pouze u jednoduchých objektů s technicky nenáročnými systémy větrání, klimatizace. I při oddělených přístupech lze do dokonalého objektu (po stránce architektury, konstrukce, technologie) navrhnout dokonalou klimatizační techniku (kvalitní výrobky renomovaných firem), avšak to, bez respektování souvislostí všech složek za proměnných provozních i venkovních klimatických podmínek, nemusí zajistit dokonalé prostředí.

Větrací a klimatizační technika je samozřejmě rozhodujícím činitelem při vytváření požadované čistoty ovzduší a tepelného stavu prostředí. Dodaný systém však musí být navržen na základě kvalitní tepelně-technické analýzy objektu, důkladných znalostí vnitřních zdrojů tepla, vlhkosti, škodlivin, provozních režimů, vnějších klimatických podmínek a hygienických, technologických, bezpečnostních požadavků aj. Často rozhodujícím způsobem negativně ovlivní výsledek celého díla nevhodná distribuce vzduchu nerespektující neizotermní podmínky proudění, vlivy přirozených konvekčních proudů aj. Další systémové chyby souvisejí s nesprávně formulovanými podmínkami pro zdroje tepla a chladu, automatickou regulací a tlumením hluku. Projektant větrání a klimatizace může být postaven i před zadání, o kterém se domnívá, že nemůže být v daných omezujících podmínkách splněno. Právě v takovém případě vynikne nutnost podrobného prověření všech vnějších okolností, které pro návrh větrací a klimatizační techniky jsou určující.

Při rozhodování je třeba mít možnost prakticky řešit popsany dynamický systém VKT & OB. Je zřejmé, že analýzu systému lze provést pouze vhodnými prostředky, které umožní multidisciplinární, integrovaný přístup k řešení a které má současná technika k dispozici. Za takové prostředky lze považovat počítačové modely a moderní experimentální techniku.

V souhrnu: Současné vývojové tendence ve větrání a klimatizaci lze charakterizovat jednak prohlubováním poznatků o vlastnostech a souvislostech obou složek systému VKT & OB, jednak vývojem prostředků k praktickému (projektovému) řešení vazeb VKT & OB pro konkrétní zadání.

Obě složky - větrací, klimatizační technika a objekty - se samozřejmě vyvíjejí podle podnětů daných jejich vlastním oborem. Jak se ukazuje, nová řešení VKT i OB mohou úspěšně zlepšit kvalitu prostředí, jestliže při vývoji byly vzájemně respektovány jejich souvislosti (např. řešení obvodových plášťů budov z hlediska snížení tepelné zátěže, vývoj vícezónových klimatizačních systémů pro budovy s velkým počtem místností).

Podrobněji jde o:

□ *Vývoj větrací a klimatizační techniky, tj.*

- vývoj větracích, klimatizačních zařízení (rozvoj technologie výroby, zlepšování kvality výrobků, uplatňování počítačových metod dimenzování součástí, zvyšování výkonu, účinnosti součástí a jejich vývoj - výměníky tepla, ventilátory, výustě, zvlhčovače aj.),
- vývoj nových systémů a metod dimenzování (chladivové systémy, chladicí stropy, zaplavovací větrání, počítačové metody dimenzování systémů, resp. jejich části aj.).

□ *Vývoj architektonického a stavebního řešení objektů, technologie, prohlubování poznatků o venkovním klimatu - např. změny tepelně-technického a dispozičního řešení objektů, dynamické změny venkovní tepelné zátěže, vnitřních zdrojů tepla, vlhkosti, látkových škodlivin, technologický režim, provozní režim objektů, požadavky na řízení a automatickou regulaci větracích, klimatizačních zařízení, limitující hygienické, technologické, bezpečnostní a biologické podmínky na stav prostředí.*

□ *Vývoj simulačních počítačových metod a experimentálních metod, tj.*

- vývoj integrovaných dynamických počítačových modelů, zahrnujících vlastnosti větrací, klimatizační techniky i objektů,
- rozvoj experimentálních metod (měření v laboratořích a zkušebních komorách i na reálných objektech).

Předložený příspěvek si neklade za cíl podrobně analyzovat vývoj větrací, klimatizační techniky a objektů v celé šíři - i když zvláště rozbor dynamických vlastností objektů (včetně technologie a venkovního klimatu) by byl pro techniky v oboru větrání a klimatizace velmi potřebný. Cílem příspěvku je přispět k objasnění současného stavu prostředků k řešení souvislosti v systému VKT & OB, tj. *počítačových simulačních metod a experimentálních metod.*

2. Simulační metody v technice prostředí

Počítačové modelování a simulace pro navrhování větrací, klimatizační techniky a budov, i pro hodnocení jejich provozu a stavu prostředí, se postupně z fáze výzkumu a vývoje rozšiřují do inženýrské praxe. Uplatňování simulačních metod souvisí s všeobecným rozvojem výpočetní techniky i s prohlubujícími se teoretickými poznatky z oblasti přenosu tepla, hmoty a proudění. Jako rozhodující faktor pro další rozšíření metod počítačových simulací se jeví kvalifikace odborníků a to jak v teoretické oblasti, tak v praktických znalostech vlastností větrací, klimatizační techniky i vlastností budov a souvisejících okrajových podmínek. Problematika je široká a vyžaduje zpravidla velmi dobrou spolupráci strojních a stavebních odborníků, architektů i technologů. Určitém problémem je dostupnost složitějších programů; v současnosti je však již k dispozici řada programů komerčních i programů na univerzitních pracovištích - podstatná je znalost jejich vnitřní struktury, umožňující správnou aplikaci.

V současném období lze techniku modelování a simulací pro větrání, klimatizaci charakterizovat třemi tendencemi, které se projevují při tvorbě simulačních programů:

- dlouhodobé rozvíjení komplexních *energetických modelů* pro hodnocení stavu prostředí a provozních vlastností větrací, klimatizační techniky a budov,
- aktuální rozvoj modelů založených na počítačové mechanice tekutin CFD (Computational Fluid Dynamics) pro *modelování proudění v budovách*,
- tvorba *specifických modelů* a software pro řešení užších problémů, zvláště zaměřených na funkci jednotlivých systémů větrání, klimatizace.

Energetické modelování

Simulační metody uvažují větrací, klimatizační techniku a budovu jako soubor (sít) malých konečných objemů. Tyto objemy představují různé části budovy a techniky, uvnitř kterých a mezi nimiž probíhá výměna hmoty a energie (hmotnostní a energetické toky). V průběhu simulace se sleduje, jak se tyto toky vyvíjejí pod vlivem časově proměnných okrajových podmínek (venkovního klimatu i vnitřních provozních podmínek), regulačních zásahů i možných časově závislých vnitřních spojení v budově. Pro každý konečný objem a každý výpočtový časový krok se generují rovnice zachování hmoty a energie. V centrální výpočetní jednotce se rovnice simultánně integrují.

Součinitele přenosu tepla a hmoty se stanovují z obecných rovnic zahrnutých v software. Ve výpočtu jsou zahrnuty vztahy pro prostup tepla stěnami, včetně tepelně akumuláčních

vlastností, vztahy pro výpočet toku tepla sluneční radiací, toku tepla z vnitřních zdrojů (osvětlení, elektrických přístrojů, osob aj.). Geometrie budovy se zadává na počátku výpočtu, novější verze využívají dokumentace budovy v CAD. Materiálové vlastnosti lze volit z dat uložených v softwaru, nebo číselně zadat. Významným podkladem pro simulační výpočty je databáze venkovních klimatických údajů, kterou je nutno pro danou klimatickou oblast uložit do softwaru. Používají se buď reálná data, nebo referenční údaje (zpracované z dlouhodobých - deseti až dvacetiletých - klimatických dat). Základní klimatická databáze obsahuje hodinové (celoroční) údaje pěti základních parametrů; jsou to: teplota venkovního vzduchu, intenzita globální a difúzní sluneční radiace, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru.

Základem řešení je stanovení tepelné a hmotnostní bilance v každém bodě sítě budovy a větrací, klimatizační techniky. Metody dynamického modelování přenosu tepla a hmoty vyžadují integraci značného počtu rovnic, respektujících totální integritu celého systému. Taková řešení jsou náročná na počítačové vybavení, proto některé simulační programy (např. ESP-r [1]) vyžadují pracovní stanici s operačním systémem UNIX; v současné době lze však i ESP-r aplikovat na PC, obdobně jako jiné rozsáhlé programy. Na Ústavu techniky prostředí se používá simulační software ESP-r z University of Strathclyde, Glasgow.

Modelování proudění vzduchu v místnostech

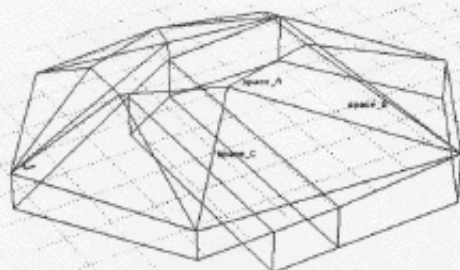
Pro modelování proudění vzduchu v místnostech jsou simulační programy CFD vyvíjeny postupně, vzhledem k obtížnosti definování podmínek proudění v místnostech, kde se může vyskytovat proudění v širokém rozsahu Reynoldsových čísel, od vyvinutého turbulentního proudění až po oblasti kde $Re \rightarrow 0$. Právě definice podmínek turbulence a její výpočet je jistou překážkou při tvorbě univerzálního software pro simulaci proudění v místnostech. Přesto současné výpočtové metody CFD umožňují stanovit a zobrazit vektory rychlosti proudění, rozložení teploty, vlhkosti a koncentrace plynů ve dvou a třírozměrném prostoru za neizotermních podmínek. Pro novou verzi modelu proudění CFD [2], začleněnou do energetického modelu ESP-r, byly v rámci projektu Incocopernicus [3], v laboratoři Ústavu techniky prostředí experimentálně ověřovány některé varianty výpočetních algoritmů [4,5]. Výsledky experimentů jsou uvedeny v dalším textu.

Při numerickém řešení diferenciálních rovnic popisujících proudové pole se používá, obdobně jako při energetickém modelování, metoda konečných objemů. V praxi na bázi CFD je k dispozici několik komerčních programů (např. Fluent [6]); práce [2,4,5] jsou podkladem pro univerzitní software CDF.

3. Praktické užití simulačních metod

Energetické modelování

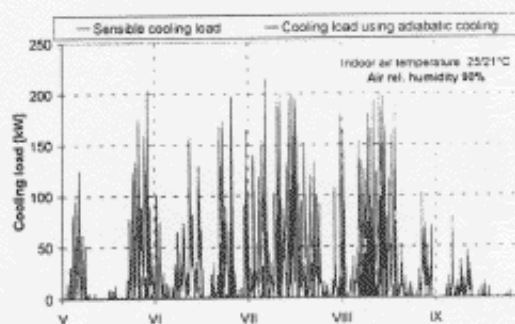
Jako příklad uvádíme modelování větrání a klimatizace pavilonu Indonéská džungle v ZOO Praha [7]). Na obr. 1 je geometrické schéma modelu budovy; požadované parametry vnitřního



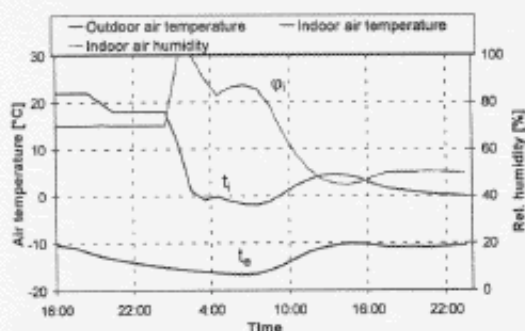
Obr. 1 Schéma modelu budovy pavilonu ZOO

vzduchu jsou: teplota - zima den 22 °C, noc 18 °C, léto den 25 °C, noc 21 °C; relativní vlhkost 70 %. Z řady výsledků vyjímáme ukázkou (obr.2) průběhu potřebného citelného chladicího výkonu v prostoru pavilonu v měsících květnu až říjnu (referenčního klimatického roku). Provozovatel připouští nárůst relativní vlhkosti vzduchu v létě až na

90 %, to lze zajistit rozstříkáváním vody v prostoru - adiabatickým chlazením. Maximální výkon strojního chlazení se snížil z původních 215 kW (při $\phi = 70$ %) na 160 kW (při $\phi = 90$ %), doba provozu strojního chlazení se snížila z původních 2 000 hodin na 1 000 hodin ročně. Zajímavá je i analýza chování systému, pokud by došlo k poruše



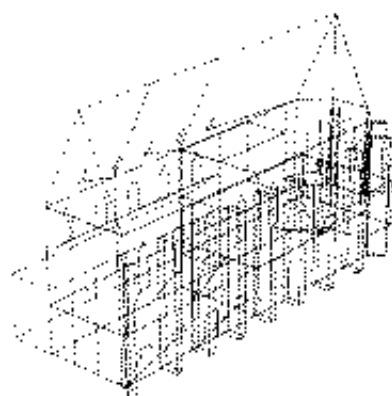
Obr. 2 Citelný chladicí výkon v pavilonu ZOO



Obr. 3 Změna teploty t_i a relativní vlhkosti ϕ_i při výpadku klimatizační techniky (v 7.30 hod) za letního dne.

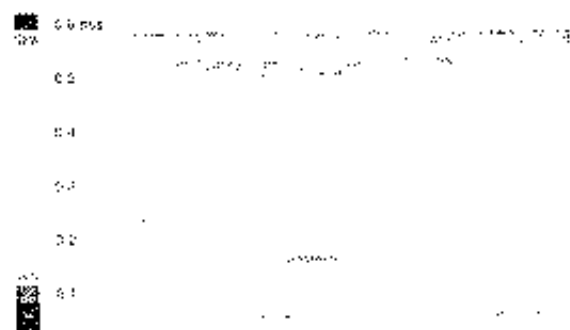
větrací a klimatizační techniky. Na obr. 3 je ukázkou změny teploty t_i , relativní vlhkosti ϕ_i vnitřního vzduchu během letního dne, při výpadku VK techniky v 7,30 hod. (nárůst teploty t_i , pokles relativní vlhkosti ϕ_i).

Pro rekonstrukci kostela sv. Anny na koncertní objekt byla provedena počítačová simulace



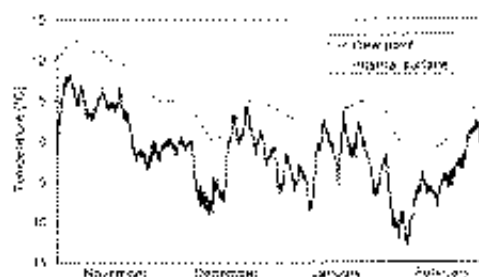
Obr. 4 Schéma modelu kostela sv. Anny

Simulaci CFD (okrajové podmínky byly získány z modelu ESP-r) bylo stanoveno v prostorovém modelu (prostorová síť o více než 1 895 000 kontrolních objemů) rozložení teplot a rychlostí proudění vzduchu v prostoru. Zobrazení lze provést v libovolném rovinném řezu. Na obr. 6 je pole rychlostí proudění v podélné centrální



Obr. 6 Vektorové pole rychlosti vzduchu (v podélné rovině kostela) při omezeném přirozeném větrání kostela sv. Anny a teplota rosného bodu vnitřního vzduchu v zimním období

jednak energetické bilance (ESP-r), jednak proudění (CFD - Fluent). Geometrické prostorové schéma objektu je na obr. 4. Pomocí zonálního modelu v ESP-r byly stanoveny teploty vzduchu a teploty povrchu stěn a průtok vzduchu při přirozeném větrání. Pro stav vzduchu v prostoru byla vypočítána teplota rosného bodu - výsledky jsou znázorněny v období listopad až únor na obr. 5. a ukazují riziko kondenzace vlhkosti na stěně.



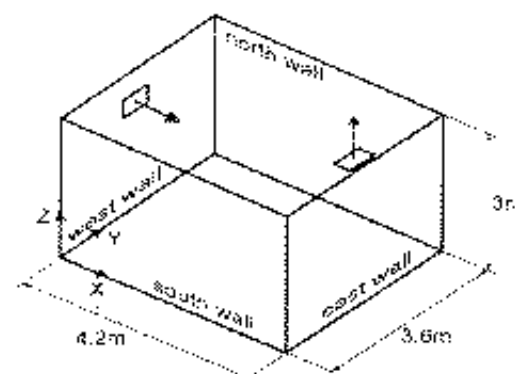
Obr. 5 Teplota povrchu severní stěny

rovině pro případ potlačeného přirozeného větrání, kdy vzniká v prostoru výraznější cirkulace (barevný originál pole je podstatně názornější).

4. Experimentální metody

Měření koncentrací, stanovení stármu vzduchu

V laboratorní zkušební místnosti Ústavu techniky prostředí byly provedeny experimenty [4] pro porovnání výsledků získaných nově vytvořeným softwarem CFD [2] s hodnotami

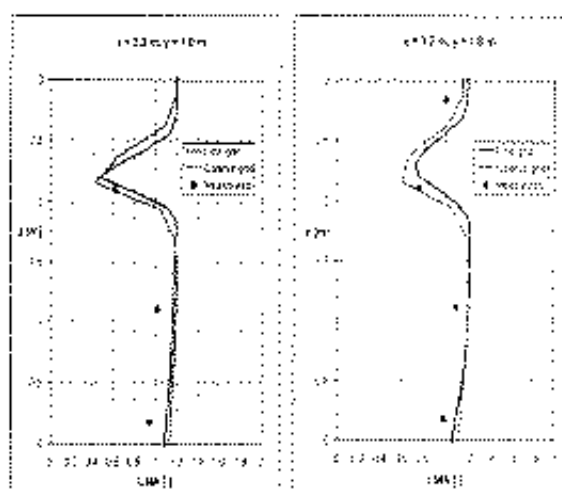


Obr. 7 Schéma zkušební místnosti pro měření koncentrací (izotermní směšovací vět.)

naměřenými. V prostoru větraném izotermně směšovacím principem (schéma zkušební komory, shodné se schématem modelu CFD je na obr. 7) je přívod vzduchu proveden výstři ve stěně (poč stropem), odvod vzduchu na konci místnosti výstři ve stropě. Cílem experimentů bylo určit místní střední stármu vzduchu - local mean age of air - LMA. Stručně lze charakterizovat LMA v libovolném bodě větraného prostoru jako

dobu, kterou potřebuje čerstvý vzduch přiváděný do místnosti k dosažení tohoto bodu. Obvykle se vyjadřuje LMA v bezrozměrném stavu ($LMA = 1$ pro dokonale promísení vzduchu v místnosti). LMA lze stanovit v proudovém poli simulační metodou CFD. Jednou z experimentálních metod zjišťování LMA je metoda poklesu koncentrace - v místnosti se dokonale rozptýlí testovací plyn (při prováděných měřeních SF_6), po přerušení přívodu plynu se do prostoru větracím systémem přivádí vzduch a měří se časová závislost poklesu koncentrace. K měření byl použit měřicí systém INNOVA AirTechInstruments 1302 a 1303, hodnoty LMA byly vyhodnoceny softwarem INNOVA.

Výsledky experimentů v zkušební místnosti a výpočtů CFD jsou na obr. 8. Měření a výpočty byly provedeny podél dvou vertikálních os vedených v podélné rovině symetrie modelu místnosti ve vzdálenostech $x = 2.2$ m a

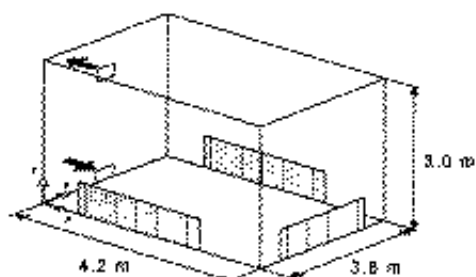


Obr. 8 Výsledky simulačních výpočtů a měření místního středního stármu vzduchu LMA (-) ve dvou vertikálních osách

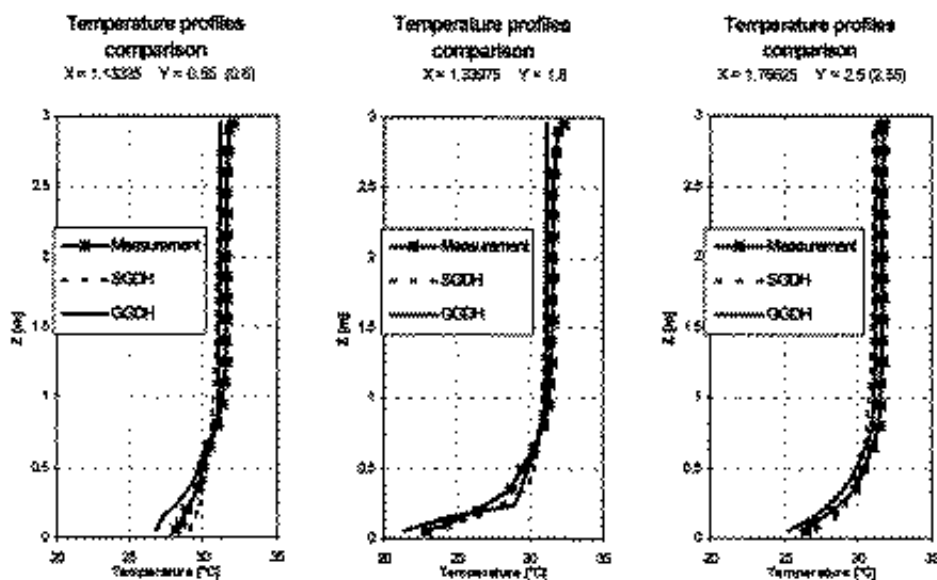
$x = 3,2$ m od výustě. Na grafech jsou zakresleny dva výsledky počítačové simulace (odlišné podle provedení sítě kontrolních bodů); jemná síť (fine grid) má 24 300 bodů (objemů), hrubá síť 1089 bodů. Rozdíly obou řešení nejsou podstatné (do 10 %), což ukazuje na možnost zjednodušení výpočtu (a také jeho zkrácení) při použití hrubé sítě. Rozdíly mezi experimentálními a simulovanými hodnotami LMA jsou okolo 10% (max. 20 %), což s ohledem na nutná zjednodušení je přijatelný výsledek, potvrzující platnost modelování CFD.

Měření teplotního pole

Ve stejné zkušební místnosti, jako v předchozím případě, bylo provedeno měření rozložení teplot v prostoru větraném neizotermním zaplavovacím principem (intenzita větrání 4 l/h, přívod vzduchu výusti ve stěně u podlahy, odvod v téže stěně pod stropem) – schéma je na obr. 9.



Obr. 9 Schéma zkušební místnosti proměnění teplotního pole (neizotermní zaplavovací větrání)



Obr. 10 Vertikální teplotní profily získané simulačními výpočty a měřením (SGDH,GGDH - simulace)

Zkušební místnost byla umístěna v rozměrné komoře, v jejímž prostoru byla udržována teplota vzduchu shodná se střední teplotou ve zkušební místnosti tak, aby stěnami zkušební místnosti se nepřenášeelo teplo.

Zkušební místnost byla vytápěna nízkoteplotními elektrickými panely (povrchová teplota 30 až 40 °C) s celkovým příkonem 638 W. Teplota přiváděného vzduchu byla udržována konstantní (20 °C), teplota v prostoru zkušební místnosti (regulací výkonu topných panelů) byla udržována na střední hodnotě 31,5 °C. Pozn.: Relativně vysoký rozdíl mezi teplotou vzduchu v místnosti a teplotou přiváděného vzduchu byl zvolen pro získání výrazných diferencí v teplotním poli za účelem porovnání simulací a měření.

Teploty byly měřeny negativními termistory na vertikálních drátových nosičích (22 bodů na jednom nosiči 3 m, celkem současně 90 bodů) pomocí ústředny Ahlborn ALMEMO 5590. Na obr. 10 jsou dva vybrané teplotní profily získané simulací CFD a měření.

Počítačová simulace analyzovala dvě varianty algoritmu tepelného toku u neizotermního proudění označené SGDH a GGDH. Výsledkům experimentů se poněkud lépe blíží model GGDH, oba simulované případy se však velmi dobře shodují s experimenty.

Publikace vznikla za podpory Evropské komise – INCOCopernicus project ERB IC15 CT989 0511) a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR – Výzkumný záměr CEZJ04/98: 21000011.

Literatura

- [1] ESP- τ (Environmental Systems Performance- research) software; www.esru.strath.ac.uk
- [2] BEAUSOLEIL-MORRISON, L., CLARKE, J. A., DENEV, J., MacDONALD, I. A., MELIKOV, A., STANKOV, P.: Further developments in conflation of CFD and building simulation. Proc. of 7th International IBPSA Conference Building Simulation 2001. Rio de Janeiro.
- [3] INCOCopernicus project ERB IC 15 CT989 0511, Integrated design optimization of building energy performance and indoor environment (1999-2001).
- [4] BARTÁK, M., ČERMÁK, R., CLARKE, J. A., DENEV, J., DRKAL, F., LAIN, M., MacDONALD, I. A., MAJER, M., STANKOV, P.: Experimental and numerical study of local mean age of air. Proc. of 7th International IBPSA Conference Building Simulation 2001. Rio de Janeiro.
- [5] STANKOV, P., DENEV, J., BARTÁK, M., DRKAL, F., LAIN, M., SCHWARZER, J., ZMRHAL, V.: Experimental and numerical investigation of temperature distribution in room with displacement ventilation. Proc. of 8th World Congress Clima 2000, Napoli 2001.
- [6] Fluent Inc. 2001. Fluent 5.5 Software Documentation; www.fluent.com
- [7] BARTÁK, M., DRKAL, F., HENSEN, J., LAIN, M.: Design support simulations for the Prague ZOO "Indonesian jungle" pavilion. Proc. of 7th International IBPSA Conference Building Simulation 2001. Rio de Janeiro.
- [8] DRKAL, F.: Simulační metody v technice prostředí budov a úloha IBPSA-CZ. Sborník konference Simulace budov 2000. IBPSA-CZ, ČVUT v Praze, 2000.