

OPTIMALIZACE VÝPOČTOVÉHO MODELU MÍSTNOSTI S CHLADICÍM TRÁMCEM POMOCÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH

Vojtěch Zubíček¹, Zbyněk Děckuláček², Ondřej Šikula³

^{1,2} Klimakom spol. s r. o., Zámecká 4, 643 00 Brno - Chrlice

³ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav TZB
e-mail: zubicek@klimakom.cz

ABSTRAKT

Simulační řešení je v dnešní době jednou z nejaktuálnějších metod, pomocí které lze postihnout výměnu tepla, látky a dynamiku tekutin ve zkoumaném prostoru. Nejzásadnější předpoklad správného zpracování numerických CFD simulací je aplikace vhodných okrajových podmínek tak, aby výsledek řešení co nejlépe odpovídal skutečnému charakteru proudění.

V příspěvku je řešena verifikace simulačního řešení, využívajícího software Flovent, experimentálním měřením prováděným v reálném prostoru při reálných podmínkách. Předmětem řešení je vybraná zasedací místnost s instalovaným chladicím trámcem, kde jsou měřena a následně stanovena rychlostní pole v daném prostoru. Závěrem příspěvku je porovnání výsledků měření se simulacemi zpracovanými před a po optimalizaci vstupních okrajových podmínek výpočtu.

Klíčová slova: chladicí trámcem, CFD simulace, obraz proudění, experimentální měření

OPTIMALIZATION OF CALCULATION ROOM'S MODEL WITH THE CHILLED BEAM BY MEANS OF EXPERIMENTAL MEASUREMENT IN THE REAL CONDITIONS

Simulation is at present time one of the most actual methods for modeling of exchange of heat, substances and dynamic of fluid in examined area. Fundamental presumption of correct CFD simulation is application of proper boundary conditions in order to meet real pattern of flow.

In this text is described verification of simulations in software Flovent by experimental measurement done in the real room and conditions. The room is meeting room with installed chilled beam where were measured and consequently set velocities. Final part of this text deals with comparing of outcomes from measurement with simulation done before and after optimization of boundary conditions.

Keywords: chilled beam, CFD simulation, flow pattern, experimental measurement

ÚVOD

K zajištění optimálních mikroklimatických podmínek v budovách z hlediska tepelně vlhkostního mikroklimatu se nabízí celá řada technických řešení. Jedním z možných systémů užívaných zejména v aplikaci u administrativních objektů, je v teplém období roku chlazení pomocí indukčních chladicích trámeců. Aktuální metodou, pomocí které lze postihnout sdílení tepla a látky ve zkoumaném prostoru je simulační řešení metodou CFD. Při zpracování CFD simulací je správné postihu výměny tepla mezi chladicím trámcem a řešeným prostorem náročnou záležitostí, kde vstupuje celá řada činitelů, které přímo či nepřímo ovlivňují jeho předaný výkon do místnosti. Předpokladem správného zpracování numerických CFD simulací je aplikace vhodných okrajových podmínek tak, aby výsledek řešení co nejlépe odpovídal skutečnému charakteru proudění.

Cílem tohoto příspěvku je u vybraného prostoru verifikace simulačního řešení, využívajícího simulační software Flovent [1], experimentálním měřením prováděným v reálném prostoru při reálných podmínkách a následná optimalizace vstupních okrajových podmínek aplikovaných v simulačním řešení.

POUŽITÉ METODY

CFD simulace lze řešit jak stacionárně, tak nestacionárně. V daném případě bylo z důvodu časové a technické náročnosti voleno simulační řešení ustáleného stavu. S ustáleným stavem vnitřního prostředí objektů se ale prakticky nelze setkat. Výměna tepla a látky má v interiérech budov výrazně dynamický charakter. Je závislá jak na *vnějších vlivech* jejichž typickými představiteli jsou intenzita sluneční radiace, teplota exteriéru, intenzita a směr větru atd., tak na *vnitřních vlivech*, z nichž nejzásadnější je fluktuace obsazenosti prostor lidmi a činnosti spojené s jejich pobytem (osvětlení, výpočetní technika atd.). Zásadní vliv na výměnu tepla v prostoru má samozřejmě také stavebnětechnické řešení a od toho se odvíjející sdílení tepla a akumulace tepelné energie v obvodových stavebních konstrukcích.

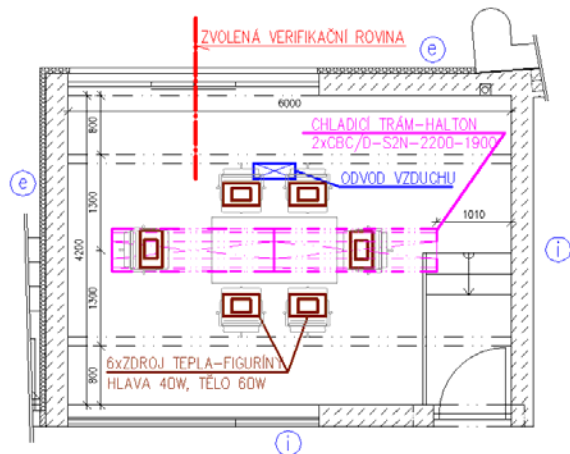
Principem vzájemné konfrontace simulačního řešení s experimentálním měřením je vzájemné porovnání parametrů proudění v jednotlivých bodech prostoru. Z důvodu vysokých požadavků kladených na měřicí techniku prakticky nelze měření provést v jeden okamžik a je nutno za účelem postihu dynamiky tekutiny provést měření v jednotlivých bo-

dech místností postupně s aplikací vhodného systému měřicích sond. Abychom mohli výsledky časově závislého měření porovnat s výstupy stacionárního simulačního řešení, je nutno zásadní vlivy formující mikroklima daného prostoru eliminovat na nejnížší možnou míru. Za tímto účelem bylo provedeno verifikační měření v průběhu noci.

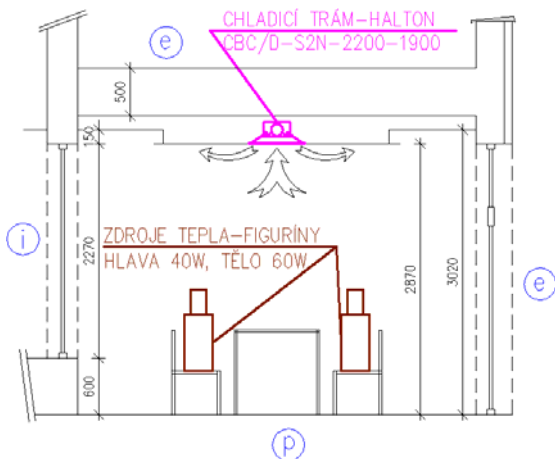
POPIS ŘEŠENÉHO PROSTORU

Předmětem simulačního a experimentálního řešení je vybraná zasedací místnost s instalovanými chladičími trámcí. Geometrie prostoru s rozmístěním zdrojů tepla a zařízení je zobrazena na obr. 1.

Jedná se o místnost, která se nachází v jednopodlažní části objektu. Řešený prostor není podsklepen. Jako střecha slouží pochůzí terasa, která je nad celou místností. Svislé nosné konstrukce jsou tvořeny keramickými tvárniciemi o tl. 300 mm.



Obr. 1 – Geometrie prostoru s rozmístěním zdrojů tepla



Obr. 2 – Řez místností v úrovni zvolené verifikační roviny

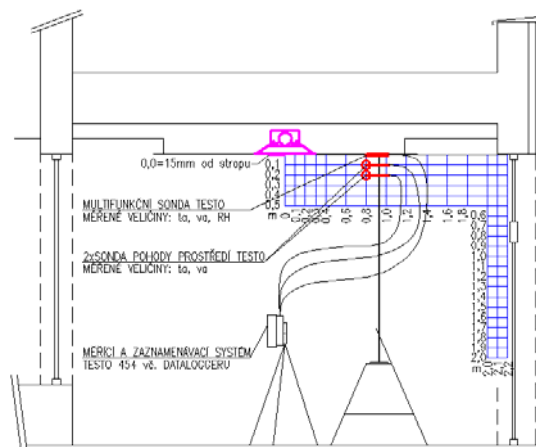
Vnější obvodové konstrukce orientované směrem do exteriéru, které jsou na obr. 1 a obr. 2 označeny písmenem „e“ jsou dále zaizolovány minerální vlnou o tl. 80 mm a opatřeny venkovní fasádní omítkou. Prostory sousedící s interiérem objektu jsou označeny písmenem „i“.

Na obrázku 1 je také zobrazena verifikační rovina, ve které bylo provedeno experimentální měření. Kritériem pro volbu měřicí (verifikační) roviny byla geometrie prostoru a ustálenost proudu vzduchu po délce trámů. Jako zdroje tepla sloužili figuranti v podobě papírových krabic, do kterých byly instalovány žárovky. Aby tyto figuranti pokud možno co nejlépe nahradili skutečné osoby, byl jejich tepelný výkon rozložen do dvou částí. Do krabice nahrazující hlavu člověka byly instalovány žárovky o příkonu 40 W, do krabice nahrazující tělo člověka byly instalovány žárovky o příkonu 60 W.

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Předkládané měření bylo provedeno z důvodu ustálenosti venkovních podmínek a provozu prostor v noci ze dne 20. 08. 2008 na 21. 08. 2008 v době od 22.50 hod. do 2.35 hod. Systém chlazení trávce vč. instalace zdrojů tepla byl v provozu za účelem ustálení již ve 20.00 hod. Nejprve byla provedena analýza rozložení průtoků vzduchu po délce trámu, na základě které byla zvolena verifikační rovina.

Vzhledem k náročnosti provedení měření a vysokým nárokům na technické vybavení měřicí techniky byla měřicí síť redukována na část prostoru, kde byla předpokládána zásadní dynamika proudu vzduchu z chladičího trávce. Zvolená měřicí síť je zobrazena na obr. 3. Vzdálenosti uvedené u měřicí roviny jsou vztaženy ke středu chladičího trámu.



Obr. 3 – Schéma sítě měřicích bodů

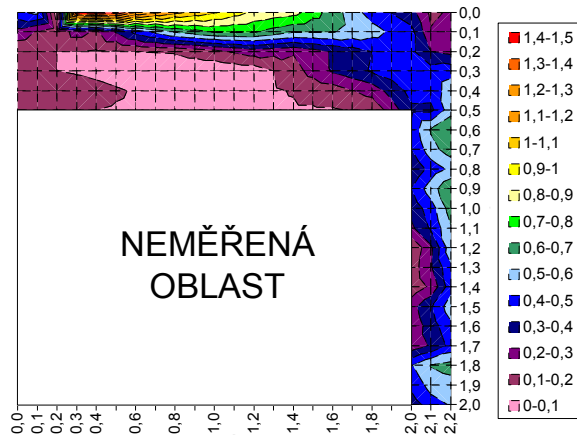
K měření bylo využito měřicího systému TESTO 454 vč. dataloggeru v kombinaci s 3 ks všesměrových sond. V každém bodě měřicí sítě byly po dobu 3 minut měřeny a zaznamenávány v intervalu 2 sekund rychlost proudění v_a a teplota vzduchu t_a . V průběhu měření byly dále monitorovány průběžně teplotní podmínky v řešené místnosti a okolních prostorech:

- teplota interiéru ve vzdálenosti 1,3 m v ose trávce v měřicí rovině se pohybovala v rozmezí 22,3 °C – 22,5 °C
- teplota v exteriéru t_e se pohybovala v rozmezí 18,3 °C – 18,6 °C

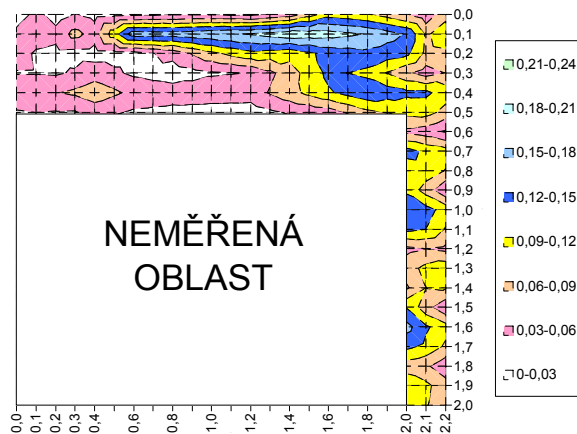
- teplota v interiéru okolních prostor t_i se pohybovala v rozmezí 24,2 °C – 24,6 °C

Na základě těchto naměřených hodnot lze konstatovat, že měření bylo provedeno při takřka dokonale ustálených teplotních podmínkách.

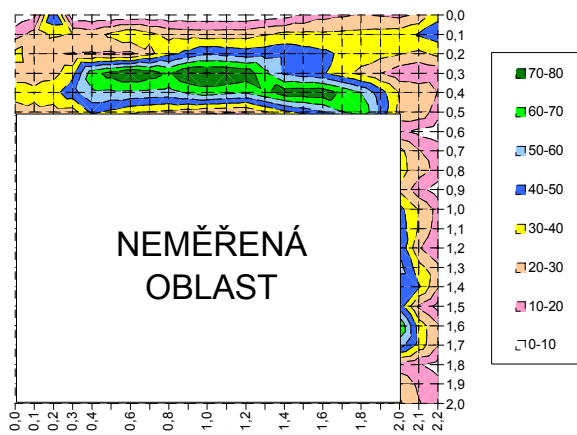
Množství primárního vzduchu o teplotě exteriéru t_e , přiváděné do každého z trámců bylo 144 m³/h.



Obr. 4 – Rozložení středních rychlostí v_a [m/s] v jednotlivých bodech verifikační roviny – experimentální měření



Obr. 5 – Rozložení směrodatných odchylek měření SD [m/s] v jednotlivých bodech verifikační roviny



Obr. 6 – Rozložení intenzity turbulence TU [%] v jednotlivých bodech verifikační roviny

Hmotnostní tok chladicí kapaliny byl 319 kg/h při teplotním spádu 15 °C na 16,4 °C, což odpovídá předanému výkonu 519 W na jeden trámec.

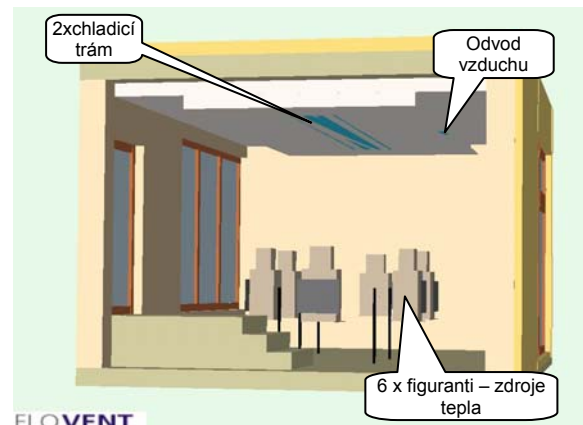
Výsledky měření jsou zpracovány do plošných grafů. Rychlost proudění vzduchu v libovolném bodě prostoru kolísá s časem. Proud vzduchu lze popsat jako střední (průměrnou) rychlostí v_a a směrodatnou odchylkou měření SD , která se vypočítá dle vztahu (1). Rozložení rychlostního pole ve verifikační rovině je zobrazeno na obr. 4. Rozložení směrodatných odchylek SD pro jednotlivé body měření je zobrazeno na obr. 5. Na základě těchto veličin lze dále stanovit intenzitu turbulence TU vzduchového proudu – rovnice (2). Rozložení intenzity turbulence TU je zobrazeno na obr. 6.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_{a_i} - v_a)^2} \quad (1)$$

$$TU = \frac{SD}{v_a} \times 100 \quad (2)$$

SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ

Simulační řešení bylo zpracováno pomocí CFD software FLOVENT – verze 6.1. Výpočtová geometrie je zobrazena na obr. 7.



Obr. 7 – Geometrie výpočtového modelu

Při výpočtech byl použit LVEL $k - \epsilon$ model turbulence. Výpočtová síť byla odstupňována do několika stupňů jemnosti dle potřeby přesnosti získaných údajů. Simulační řešení byly zpracovány jako stacionární neizotermní proudění vzduchu.

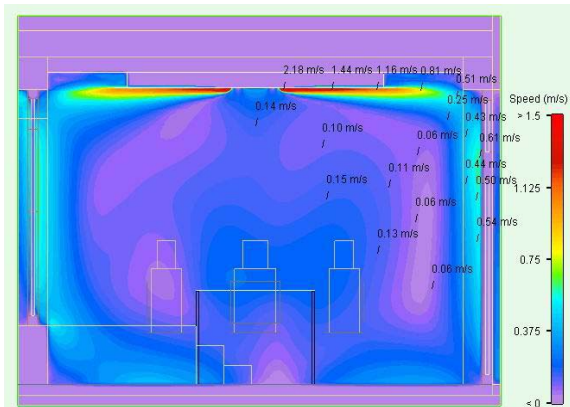
Chladicí trávce byly modelovány jako recirkulační zařízení formou smísení primárního proudu vzduchu o teplotě exteriéru t_e s indukovaným cirkulačním vzduchem ochlazeným přes výměník chladicího trávce. Míra ochlazení indukčního vzduchu byla definována předaným výkonem výměníku, který byl stanoven na základě přeneseného množství tepelné energie teplotnosnou látku při experimentálním měření. Okrajové podmínky aplikované na výpočtový model byly převzaty z experimentálního řešení.

Byla zpracována dvě simulační řešení, která se lišila v indukčním poměru primárního a indukčního vzduchu:

- *Varianta 1* - indukční poměr primárního a indukovaného vzduchu byl 5:1 (udává výrobce)
- *Varianta 2* - indukční poměr primárního a indukovaného vzduchu byl upraven na základě výstupů z experimentálního měření

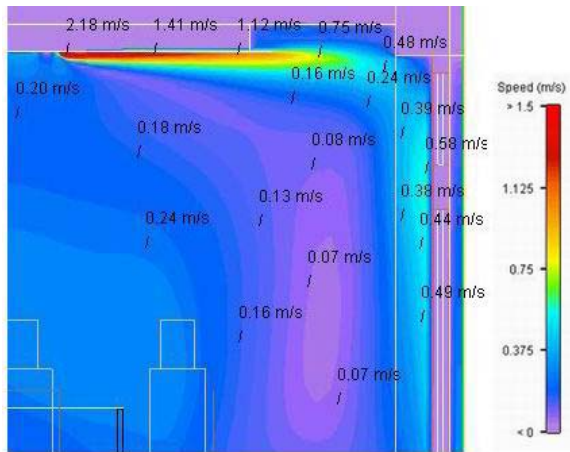
VÝSLEDKY

Nejprve byla zpracována počáteční simulace pro chladicí trám s množstvím indukovaného vzduchu, které definuje výrobce tj. 5:1.



FLOVENT

Obr. 8 – Rozložení pole rychlosti proudění vzduchu – varianta 1.



FLOVENT

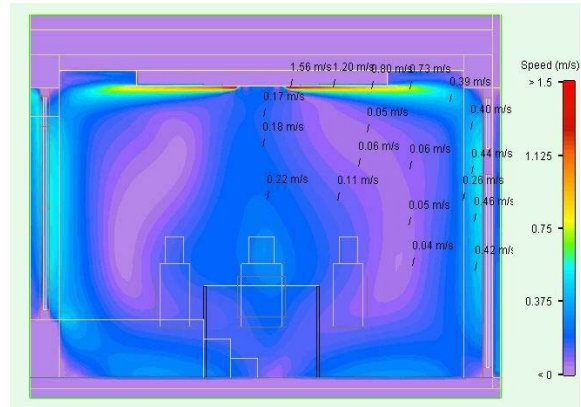
Obr. 9 – Rozložení pole rychlosti proudění vzduchu – varianta 1 – detailní zobrazení

Výsledky počátečního simulačního řešení jsou zobrazeny na obr. 8 a obr. 9. Výstupy jsou zpracovány v úrovni měřicí roviny.

Z výstupů simulačního řešení je patrné, že trámec pracuje s vyšším množstvím indukčního vzduchu než plyne z výsledků experimentu. To se v simulaci projevilo zvýšenou rychlostí proudění zejména při vyústění vzduchu z trámce, při podhledu a následně i ve vertikálním proudě vzduchu podél okna.

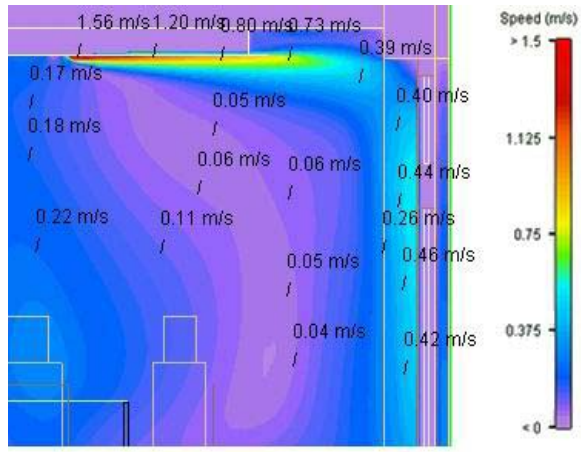
Na základě těchto poznatků byla následně zpracována simulace – varianta 2, kdy bylo postupně snižováno množství indukovaného vzduchu do té doby, než se pole rychlosti proudění ustálilo téměř na hodnotách rychlostí a obrazu proudění, zjištěného měřením. Vybrané výstupy optimalizovaného simulačního řešení – varianta 2 jsou zobrazeny na obr.10 a 11.

Z předložených výstupů je patrné, v porovnání s výsledky simulačního řešení varianty 1, zejména snížení rychlosti, při vyústění upraveného vzduchu z chladicího trámu. Toto se následně projevilo jak na snížení rychlosti vertikálního proudě vzduchu při okně, tak v interiéru jako takovém.



FLOVENT

Obr. 10 – Rozložení pole rychlosti proudění vzduchu – varianta 2.

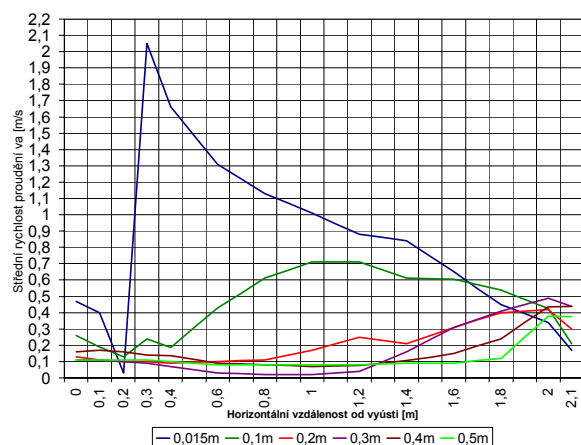


FLOVENT

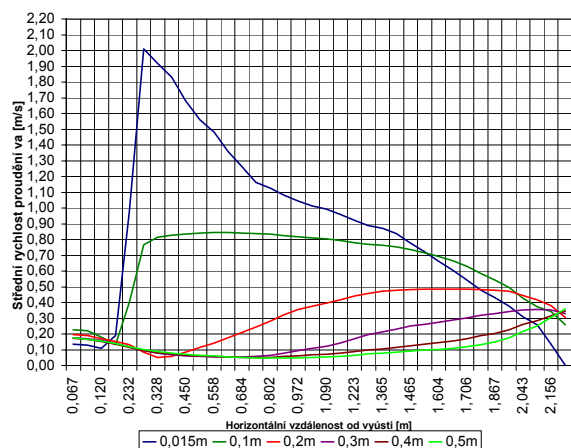
Obr. 11 – Rozložení pole rychlosti proudění vzduchu – varianta 2 – detailní zobrazení

Detailnější porovnání výstupů z experimentálního měření a výsledků optimalizovaného simulačního řešení, zpracovaného ve variantě 2, je zobrazeno na obr. 12 a 13. Jednotlivé křivky představují rozložení rychlostních polí ve verifikační rovině při stropu v úrovních, ve kterých bylo provedeno experimentální měření tj. 0,015 m, 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m a 0,5 m od stropu. Na obrázku obr. 12 jsou zobrazeny průběhy středních rychlostí proudění, zpracované z výsledků z experimentálního řešení. Na obr. 13 pak

exportované výstupy z optimalizovaného simulačního řešení ve stejných úrovních.



Obr. 12 – Graf průběhů středních rychlostí proudění vzduchu při stropu ve vybraných vzdálenostech – experimentální měření



Obr. 13 – Graf průběhů rychlosti proudění vzduchu při stropu ve vybraných vzdálenostech – optimalizované simulační řešení – varianta 2

Z předložených grafických výstupů, zobrazených na obr. 12 a 13, je patrná shoda jednotlivých křivek. Nejmenší rozdíly mezi měřeními a simulací vykazují křivky s nejvyššími rychlostmi v úrovni 0,015 m od stropů. Největší neshoda výsledku experimentálního a simulačního řešení byla shledána u křivek pro úroveň 0,1 m od stropu. V daném případě byla lokálně zjištěna neshoda při porovnání lokálních maxim až 18 %.

DISKUSE

Při provádění experimentálního měření je zásadním problémem docílení ustáleného stavu prostředí. I když bylo měření provedeno v noci, kdy byly teplotní podmínky v exteriéru a okolních prostorech takřka ustálené, projevovaly se v blízkosti stavebních konstrukcí s naakumulovanou tepelnou energií z předchozího slunného dne konvekční proudy. Tyto pak, zejména u svislých stěn, způsobily odchylky rych-

lostního pole zjištěného měřeními oproti, rychlostnímu poli získanému CFD simulací.

ZÁVĚR

Cílem příspěvku byla prezentace CFD simulace proudění vzduchu v místnosti s chladicím trámecem a její experimentální ověření. Výsledky experimentu byly dále využity k přizpůsobení okrajových podmínek na chladicím trámci v simulačním řešení.

Hlavním poznatkem je, že pro přiblížení se reálnému působení trámců na proudění vzduchu v místnosti, bylo nutno jej simulovat s nižším indukčním poměrem, než uvádí výrobce.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován za pomoci a přispění kolegů ze společnosti Klimakom spol. s r. o. Tímto jim všem patří dík za odvedenou práci. Příspěvek vznikl též s podporou vnitřního grantu FAST VUT v Brně č. 188 s názvem „Verifikace výsledků CFD simulace laboratorním měřením“ a GRAFO VUT v Brně.

LITERATURA

- [1] FLOVENT 6.2 (www.flovent.com) simulation software
- [2] ČSN EN ISO 7726 – Ergonomie tepelného prostředí – Přístroje pro měření fyzikálních veličin

PŘEHLED OZNAČENÍ

- v_a střední (průměrná) rychlost vzduchu [m/s]
- SD směrodatná odchylka měření [m/s]
- n počet měření v daném bodě měřicí sítě
- v_{ai} rychlost v čase „i“ doby měření [m/s]
- TU intenzita turbulence proudu [%]
- t_a teplota proudícího vzduchu [°C]
- t_i teplota vzduchu v interiéru [°C]
- t_e teplota vzduchu v exteriéru [°C]