

Ing. Petra ŠTÁVOVÁ,
Ing. Petra RUKAVIČKOVÁ
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Hodnocení větrání měřením CO₂ a simulacemi v programu Contam 2.4

Ventilation Evaluation by the Means of CO₂ Measurements and Simulation in Contam 2.4

Recenzent
Prof. Ing. František Drkal, CSc.

V příspěvku je popsána studie větrání laboratorní komory a většího rodinného domu. V obou objektech byla hodnocena intenzita větrání a distribuce oxidu uhličitého produkovaného lidmi, a to metodou CO₂ a simulacemi v programu Contam 2.4. Analýzy a porovnání výsledků ukazují, že program Contam 2.4 může být vhodným nástrojem pro řešení distribuce škodliviny v jednodušších objektech. Při použití programu pro hodnocení větrání složitějších budov, jsou však výsledky velmi závislé na přesnosti zadání konstrukčních prvků a je proto vhodné simulace doplnit měřením.

Klíčová slova: měření intenzity větrání, Contam 2.4, značkovací plyn CO₂

A ventilation study conducted in laboratory chambers and in one family house is described in the paper. In both buildings the ventilation rate and CO₂ distribution was evaluated by means of CO₂ method and simulation in Contam 2.4. Analyses and results comparisons show that program Contam 2.4 can be a useful tool for evaluation of pollutant distribution in simple objects. However, its application for ventilation evaluation in complicated buildings is limited. The results are strongly dependent on definition of building components and therefore it is recommended to complement the simulation with measurements.

Key words: ventilation intensity measurement, Contam 2.4, tracer gas CO₂

ÚVOD

Stanovení intenzity větrání v obytných budovách je velmi důležité, a to jak z hlediska zdraví osob, tak spotřeby energie. Přímá měření intenzity větrání v přirozeně větraných obytných budovách bývají značně obtížná. Využití značkovacích plynů je často jediným způsobem, jak měření uskutečnit [1]. Základní princip těchto metod je jednoduchý – do místnosti je přiváděn značkovací plyn a na základě měření změny jeho koncentrace je možné za určitých podmínek a předpokladů stanovit intenzitu větrání dané místnosti [2].

Značkovací plyn může být do místnosti přiváděn aktivně nebo pasivně. Při aktivním přívodu je plyn do prostoru dávkován z tlakové láhve, nejčastěji se používají plyny N₂O, SF₆, C₂H₆ a freony (R 134a). Pasivní metody využívají plyny PFT – perfluorcarbony, které se do místnosti samovolně uvolňují z malých dávkovacích trubiček. Zvláštní postavení má využití CO₂ produkovaného lidmi jako značkovacího plynu. Lidé produkují CO₂ dýcháním, množství produkovaného plynu závisí na velikosti těla a stupni fyzické aktivity. Velkou výhodou je, že CO₂ je produkován přímo osobami v měřené místnosti a není proto třeba zajišťovat zdroj a dávkování značkovacího plynu.

Možnost využití CO₂ jako značkovacího plynu byla v posledních letech intenzivně zkoumána [3]. Na základě měření v laboratoři i v reálných obytných budovách byla navržena a testována nová měřicí metoda, založená na analýze koncentrací oxidu uhličitého produkovaného lidmi [4, 5]. Dosažené výsledky ukazují, že metoda je přesnější a levnější než metody používané doposud. Při validačních měřeních však vyvstala otázka mezizónového proudění, kterou je třeba řešit v případech, kdy dveře mezi jednotlivými místnostmi zůstávají delší dobu otevřené.

Pro analýzu proudění vzduchu ve větrané budově je v současnosti dostupných mnoho simulačních softwarů, například multizónové programy Contam a Comis. Program Contam 2.4 umožňuje kromě proudění vzduchu stanovit také koncentrace znečišťujících látek a jejich rozložení vlivem proudění vzduchu [6]. Proto byl tento program vybrán pro doplnění výsledků měření metodou CO₂ ve dvou hodnocených objektech: experimentálních komor (mechanicky – nuceně větrány, pouze tři zóny) a většího rodinného domu (přirozeně větrání, větší počet zón). Cílem bylo upřesnit vý-

sledky získané metodou CO₂, zejména vliv mezizónového proudění a podíl čerstvého vzduchu při větrání místností.

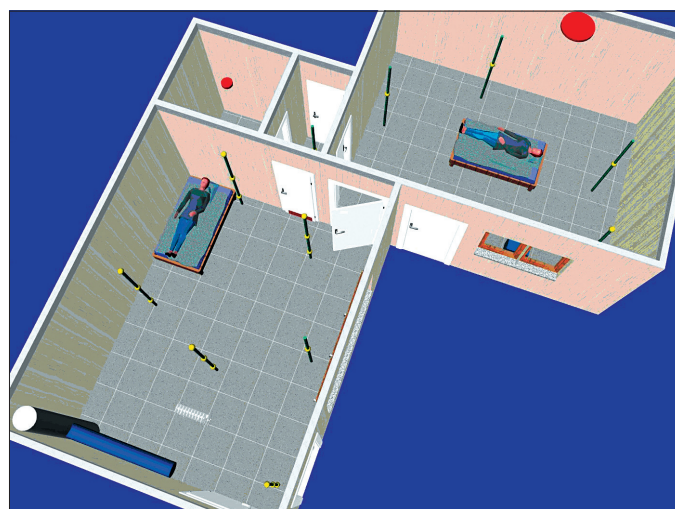
1. METODIKA MĚŘENÍ A SIMULACÍ

Měření byla uskutečněna autorkou článku P. Štávoovou při stáži na Mezinárodním centru pro vnitřní prostředí a energii, DTU Lyngby, Dánsko.

1.1 Experimentální komory v laboratoři

Měřilo se ve dvou laboratorních komorách, viz. obr. 1. V komorách nebyl žádný nábytek kromě otopného tělesa a postelí s termálními figurinami, které sloužily jako zdroj CO₂. Obě komory (K5, K6) byly stejně velké (60 m³), sousedící chodba (CH) měla objem 4 m³ a toaleta 7,2 m³. Komory byly větrány mechanicky stávajícím větracím systémem (v obr. 1: modře – přívod vzduchu, červeně – odvod vzduchu).

V komorách a v chodbě bylo rovnoměrně vybráno 12 bodů, ve kterých byla měřena koncentrace CO₂. V závislosti na zapínání či vypínání termálních figurín se měřil nárůst či pokles koncentrací. Intenzita větrání byla



Obr. 1. Model laboratorních komor (komora 5 je ve spodní části obrázku)

udržována větracím systémem konstantní během každého měření, a to 0,3 nebo 0,54 h⁻¹. Pro možnost analýzy mezizónového proudění, byly během jednotlivých měření otevřeny buď dveře spojující obě komory, nebo byly současně otevřeny dveře vedoucí z komor do společné chodby.

Byla uskutečněna série několika měření s různým propojením obou komor. Lišila se velikost otevření dveří, zapnutí figurín a množství přiváděného čerstvého vzduchu.

Pro porovnání se simulacemi v programu Contam 2.4 byla vybrána tato měření:

- A.1 Komory propojené přes chodbu, dveře otevřeny 15 cm, intenzita větrání 0,3 h⁻¹, obě figuríny zapnuty.
- A.2 Spojení komor přes chodbu, dveře otevřeny 15 cm, intenzita větrání 0,3 h⁻¹, figuríny vypnuty.
- B Přímé spojení komor, dveře otevřeny 50 cm, intenzita větrání 0,3 h⁻¹, zapnuta pouze figurína v komoře 5.
- C Spojení komor přes chodbu, dveře otevřeny 50 cm, intenzita větrání v komoře 5 byla nastavena na 0,54 h⁻¹, v komoře 6 na 0,3 h⁻¹, pouze zapnuta figurína v komoře 5.
- D Spojení komor přes chodbu, dveře otevřeny 50 cm, intenzity větrání nastaveny v komoře 5 na 0,54 h⁻¹, v komoře 6 na 0,32 h⁻¹, obě figuríny zapnuty.

V programu Contam byl nejprve vytvořen geometrický model objektu. Každá místnost byla zadána jako samostatná zóna a definována svým objemem a teplotou. Tlak v zónách byl zadán jako proměnný, aby bylo možné zohlednit tlakové rozdíly během simulace. Dále byl vytvořen jednoduchý vzduchotechnický systém, přírodní vyústky byly umístěny dle skutečnosti. Simulace proudění vzduchu i koncentrací škodlivin byla zvolena *transient* (neustálený stav). Časový úsek pro simulaci byl nastaven tak, aby výsledky bylo možno porovnat s naměřenými hodnotami. Časový krok simulace byl 1 minuta.

1.2 Rodinný dům v obci Naestved

Měřený rodinný dům se nachází v Dánsku v obci Naestved, 60 km jihovýchodně od Kodaně. Jedná se o jednopodlažní dům v zastavěné rovinaté oblasti. Dům byl postaven v roce 1972 a částečně rekonstruován v červenci 2005. Konstrukce je z cihel, okna jsou dřevěná, dvouvrstvá. Dům je větřárn přirozeně – otevíráním oken a infilrací.

V domě se nachází čtyři pokoje (obývací pokoj, ložnice, dětský pokoj a kancelář), kuchyň, technická místnost a koupelna, viz obr. 2. Dům byl během měření obýván třemi lidmi a třemi středně velkými psy.



Obr. 2 Model rodinného domu

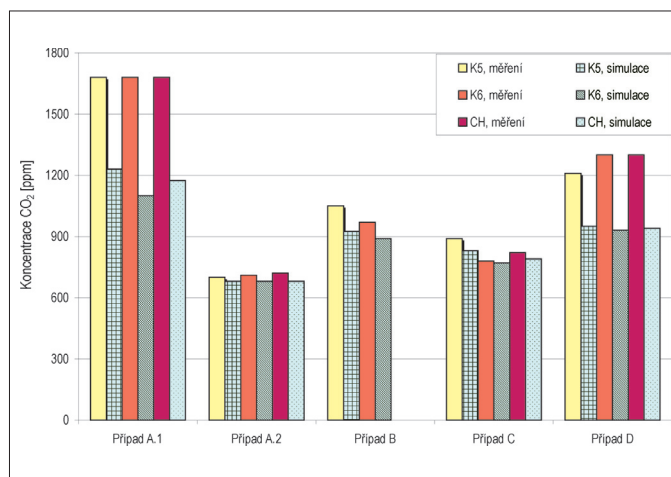
Měření trvalo celkem dva týdny (od 16. do 30. listopadu 2005). Do místností bylo rovnoměrně umístěno 12 měřících přístrojů pro stanovení koncentrace oxidu uhličitého, teploty a relativní vlhkosti vzduchu (PS 31, výrobce SENSOTRON, Polsko). Přístroje byly v domě rozmístěny dle zásad definovaných při studii distribuce CO₂ v přirozeně větraných místnostech [7]. Po skončení měření byly koncentrace analyzovány metodou CO₂ [4].

V programu Contam 2.4 byl vytvořen geometrický model domu. Každá místnost byla zadána jako samostatná zóna a definována podobně jako laboratorní komory. Zdroje CO₂ byly zadány stejně jako při výpočtu intenzity větrání metodou CO₂. Protože pro simulace byly vybrány poměrně krátké časové úseky, byly venkovní podmínky definovány jako konstantní. Vložené hodnoty byly průměry z naměřených hodnot pro daný časový úsek. Kromě teploty vzduchu, tlaku a relativní vlhkosti byly zadány také rychlost a směr větru. Pro proudění vzduchu byla vybrána simulace *transient*. Koncentrace škodlivin byla řešena simulací typu *cyclic*, která umožňuje určit nejen ustálenou koncentraci, ale i dobu, za kterou se koncentrace ustálí.

2. VÝSLEDKY

2.1 Experimentální komory

V grafu na obr. 3 je zobrazeno porovnání ustálených koncentrací zjištěných měření CO₂ a simulacemi v programu Contam 2.4.



Obr. 3 Porovnání výsledků měření a simulací experimentálních komor

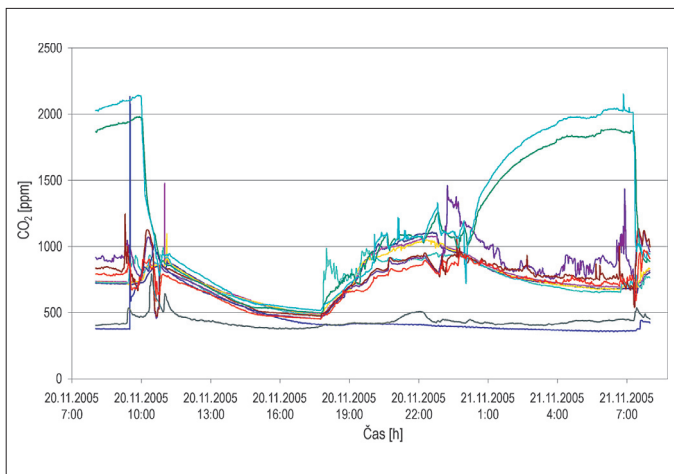
Z grafu je vidět, že nejlepší shoda výsledků nastala v případě A.2, tedy při hodnocení poklesu koncentrace, kdy byly obě figuríny vypnuty a byla nulová produkce CO₂. Hodnota na konci měření zjištěná programem Contam pro stejný časový úsek byla jen nepatrně nižší než při měření.

Malé rozdíly výsledků byly zjištěny také v případech B a C, kdy byla zapnuta pouze jedna z figurín. V případě C byly hodnoty koncentrací na konci měření vyrovnané, a podobně byly i rozdíly v rozložení koncentrací mezi místnostmi.

Největší rozdíly byly zjištěny ve výsledcích experimentů A.1 a D, kdy byly obě termální figuríny zapnuty a do komor bylo přiváděno největší množství oxidu uhličitého. Ve skutečnosti byly hodnoty koncentrací ve všech místnostech na konci měření A.1 téměř identické, ale rozdíl mezi komorami určený simulacemi byl 130 ppm (obr. 3). Ještě větší rozdíly mezi měřeními a simulacemi byly zjištěny v číselných hodnotách koncentrací a to až 500 ppm v případě A.1 a 300 ppm v případě D.

2.2 Rodinný dům

Typický průběh koncentrací měřených ve všech 12 bodech během jednoho dne (21.11.2005) je zobrazen na obr. 4. Průběhy koncentrací během dal-



Obr. 4 Typický denní průběh koncentrací CO_2 měřených 12 přístroji v rodinném domě

ších dnů byly velmi podobné. Hodnoceny byly především místnosti, v nichž spali lidé, tedy dětský pokoj (DP) a ložnice (L). Pro posouzení šíření plynu do okolních místností byl dále vybrán obývací pokoj (OP), který byl otevřenými dveřmi propojen s chodbou a ložnicí, kde se většina zdrojů CO_2 nacházela (dvě dospělé osoby a tři psi).

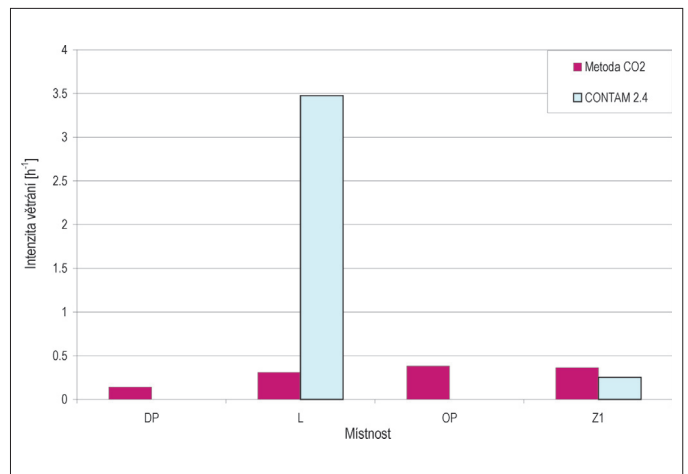
Pro porovnání se simulacemi v programu Contam 2.4 byl vybrán časový úsek v ranních hodinách (4.00–7.00, 21.11.2005), kdy se koncentrace CO_2 v jednotlivých místnostech ustálila na určité hodnotě. Ustálené hodnoty koncentrace CO_2 jsou patrné z grafu na obr. 4: DP – 1960 ppm (aritmický průměr ze dvou horních modrých křivek), L – 840 ppm (fialová a tmavě červená křivka ve spodní části grafu), OP – 690 ppm (červená a růžová křivka).

Měření ukázala, že docházelo k intenzivnímu proudění mezi místnostmi propojenými otevřenými dveřmi. Průběhy i hodnoty koncentrací měřených v ložnici, chodbě, kuchyni a obývacím pokoji byly během všech měřících dnů téměř stejné. Metoda CO_2 neumožňuje přesné rozlišení větrání místností čerstvým venkovním vzduchem, nebo vzduchem z okolních místností, proto byly na základě měřených koncentrací tyto místnosti posuzovány jako jedna zóna. Intenzity větrání vypočtené metodou CO_2 byly tyto: dětský pokoj $0,14 \text{ h}^{-1}$, ložnice $0,31 \text{ h}^{-1}$, obývací pokoj $0,38 \text{ h}^{-1}$.

Simulacemi v programu Contam 2.4 byly zjištěny průměrné hodnoty hmotnostních průtoků vzduchu „z“ a „do“ jednotlivých zón během zvoleného časového úseku. Z těchto hodnot byla vypočtena intenzita větrání pro jednotlivé místnosti. Simulací rozložení škodlivin byly také pro jednotlivé místnosti určeny ustálené hodnoty koncentrace CO_2 odpovídající výslednému proudění vzduchu. V grafu na obr. 5 jsou porovnány intenzity větrání vypočtené z naměřených koncentrací metodou CO_2 a určené z hmotnostních průtoků venkovního vzduchu zjištěných programem Contam 2.4.

Všechny intenzity větrání vypočtené metodou CO_2 byly menší než $0,5 \text{ h}^{-1}$. Intenzita větrání určená programem Contam 2.4 byla však $3,5 \text{ h}^{-1}$ pro ložnici a pro všechny ostatní místnosti nulová. Měření ukázalo, že místnosti spojené otevřenými dveřmi lze považovat za jednu zónu a také výsledky stanovení průtoku vzduchu simulacemi potvrdily, že zde docházelo k velmi intenzivnímu proudění vzduchu (objemový průtok vzduchu mezi ložnicí a chodbou byl desetkrát větší než průtok venkovního vzduchu). Proto byla dále vytvořena tzv. zóna 1, kterou představují ložnice, chodba, kuchyně a obývací pokoj. Intenzita větrání v této zóně byla následně vypočtena jako vážený průměr intenzit jednotlivých místností. Výsledné intenzity větrání určené pro takto vytvořenou zónu se pak již od měření lišily jen minimálně, viz poslední sloupce v obr. 5.

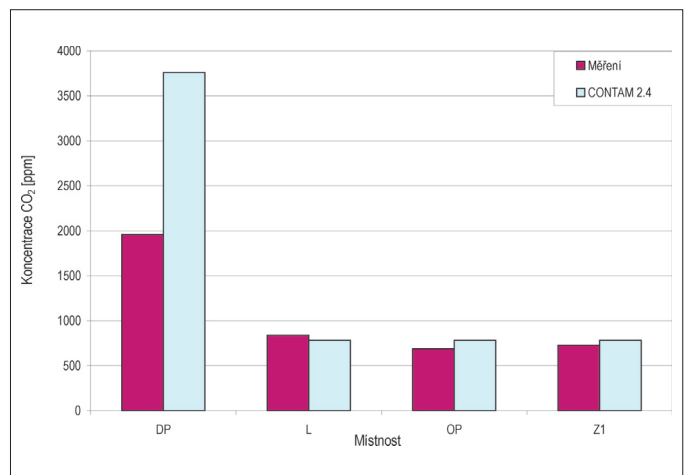
Intenzity větrání určené pro dětský pokoj metodou CO_2 byly také rozdílné. Měření koncentrací a jejich analýzou metodou CO_2 byla vypočtena in-



Obr. 5 Intenzita větrání určená pro jednotlivé místnosti metodou CO_2 a simulacemi v programu CONTAM 2.4

tenzita $0,14 \text{ h}^{-1}$, avšak dle výsledků simulací do pokoje neproudil žádný venkovní vzduch a tedy i intenzita větrání byla nulová, obr. 5. Pravděpodobné příčiny jsou uvedeny v diskusi.

Ustálené hodnoty koncentrací určených měřeními a simulacemi pro jednotlivé místnosti jsou zobrazeny v grafu na obr. 6. Rozdíly jsou dány výsledky simulačních výpočtů proudění vzduchu mezi jednotlivými zónami. Zcela rozdílná je ve srovnání s měřeními koncentrace CO_2 určená simulacemi pro dětský pokoj, což ovšem pouze odpovídá rozdílu v zjištěných intenzitách větrání. Dle programu Contam 2.4 byla intenzita větrání i výměna vzduchu s okolními místnostmi téměř nulová, proto je i výsledná koncentrace CO_2 velmi vysoká (3700 ppm). V zóně 1 (ložnici a obývacím pokoji) již byly rozdíly v koncentracích minimální, což dále potvrzuje oprávněnost hodnocení místností jako jediné zóny.



Obr. 6 Porovnání ustálených koncentrací CO_2 zjištěných měřeními a simulacemi v programu CONTAM 2.4

3. DISKUSE

Porovnání výsledků ukázalo, že distribuce oxidu uhličitého určená simulacemi v programu Contam 2.4 neodpovídala přesně výsledkům měření (obr. 3 a 6). Shodný byl však závěr, že docházelo k intenzivnímu proudění vzduchu mezi místnostmi propojenými otevřenými dveřmi.

Experimentální komory

Z výsledků měření v laboratorních komorách je možno říci, že čím byla vyšší produkce CO_2 , tím byly větší rozdíly ve výsledných hodnotách (obr. 3). Na zvyšující se rozdíly měla také vliv délka zvoleného časového úseku. Nejkratší doba byla zvolena v případě A.2 (3,5 h), nejdelší doba měření

byla v případě A.1 (7,5 h). Ostatní délky period byly: případ B 6 h, případ C 5 h, případ D 7 h.

Dle Contamu se s rostoucí dobou trvání měření rozdílly v koncentracích zvyšovaly, zatímco v měřených hodnotách byl zjevný trend opačný – ke konci měření byly rozdílly v koncentracích menší.

Při jednotlivých měřeních se ukázalo, že k lepšímu rozložení plynu mezi místnostmi došlo při přímém spojení komor (případ B, kdy rozdílly mezi komorami byly během celého měření cca 50 ppm). Ještě rovnoměrnější rozložení plynu nastalo při zvýšení intenzity větrání v jedné z komor (případy C a D), kdy rozdílly mezi místnostmi byly přibližně 30 ppm.

Rodinný dům

Výsledky simulací rodinného domu se také výrazně lišily od hodnot zjištěných měření. Je vidět, že celkově byla intenzita větrání celého domu dle programu nižší než dle měření (obr. 5). Naopak shodné byly závěry týkající se proudění mezi místnostmi propojenými otevřenými dveřmi.

Koncentrace zjištěné simulacemi i měřeními pro typický den se poměrně dobře shodují (obr. 6). V místnostech propojených otevřenými dveřmi byly koncentrace dle Contamu 2.4 dokonce zcela identické, ve skutečnosti se tyto koncentrace mírně lišily. Lze tedy říci, že dle programu Contam 2.4 došlo k lepšímu promísení vzduchu než ve skutečnosti.

Výrazný rozdíl mezi naměřenými hodnotami a programem je vidět v dětském pokoji, kde ustálená hodnota koncentrace dle programu je téměř dvojnásobná oproti naměřené hodnotě, což odpovídalo nulovému průtoku čerstvého vzduchu do dětského pokoje dle programu Contam 2.4 (obr. 6). Pravděpodobnou příčinou byla špatná volba cest proudění, které představují zavřené okno a vnitřní dveře.

Podobné problémy byly pozorovány i při definici ostatních konstrukčních prvků, přestože byly voleny tak, aby co nejvíce odpovídaly poznatkům získaným při měření. Například okna i vnitřní dveře v dětském pokoji byly zvoleny z knihovny programu jako standardní prvky, bez utěsnění. Výsledky simulací však ukázaly, že těmito cestami neproudil do pokoje téměř žádný vzduch, a to i např. při zadání velmi vysoké rychlosti větru. Stejný úkaz byl pozorován také v obývacím pokoji a kuchyni.

Program Contam 2.4

Výše popsané jevy ukazují na velkou citlivost programu Contam 2.4 k zadaným parametrům cest proudění. Zavřená okna a dveře způsobují strmější nárůsty koncentrací než naměřené hodnoty a naopak. U zavřených oken byl patrný tlakový rozdíl, ale nedocházelo k proudění vzduchu. Lze předpokládat, že program počítá s větším hydraulickým odporem netěsností oken, než tomu bylo ve skutečnosti.

ZÁVĚR

Studie experimentálních komor ukázala, že i při přesně známé intenzitě větrání (při nuceném větrání) nenastává úplná shoda v koncentracích CO₂ zjištěných měřeními a simulacemi. Rozdílly ve výsledcích rostly s vyšší produkcí CO₂ a delší dobou vybranou pro simulaci. Rovnoměrnější rozložení plynu bylo zjištěno při přímém propojení komor a v případě, kdy byla v jedné z komoře nastavena vyšší intenzita větrání (obr. 3).

Výrazně větší byly rozdílly ve výsledcích intenzit větrání a koncentrací CO₂ zjištěných ve studii rodinného domu (obr. 5). Nebylo možné přesně identifikovat příčiny těchto rozdílů. Objekt byl podstatně složitější, vzhledem k počtu oken a dveří v domě, existuje velké množství možných kombinací, ve kterých může dojít k chybnému zadání vstupních parametrů a okrajových podmínek.

I přes rozdílly v číselných hodnotách studie rodinného domu potvrdila předpoklad, že pro dostatečné oddělení jednotlivých zón běžně postačuje zavírání interiérových dveří. Naopak mezi místnostmi propojenými otevřenými dveřmi dochází k intenzivnímu proudění vzduchu a k velmi dobrému rozložení plynu. Při zjišťování intenzity větrání metodou CO₂ i simulacemi v programu Contam 2.4 je proto vhodné považovat místnosti propojené otevřenými vnitřními dveřmi za jednu zónu.

Výsledky studie větrání laboratoře i rodinného domu ukázaly, že program Contam 2.4 je velmi citlivý k zadání vstupních parametrů. Nepřesnost v zadání může způsobit nepřijatelně velkou chybu výsledků a může proto vést i k chybnému hodnocení větrání daného objektu. Nicméně program Contam 2.4 dává dobrý přehled o mezizónovém proudění v budově a lze jej proto doporučit pro hodnocení mezizónové distribuce škodliviny při známé intenzitě větrání. Pro komplexnější případy zahrnující i hodnocení intenzity větrání ve složitějších objektech s více místnostmi je vhodné simulace doplnit měřeními, např. metodou značkovacího plynu CO₂.

Studie vznikla ve spolupráci s Mezinárodním centrem pro vnitřní prostředí a energii (DTU Lyngby, Dánsko) a je součástí výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí.

Poděkování patří majitelům domu v Dánsku, kteří k měření dali souhlas a plně naši práci podpořili. Na měření se dále podíleli A. Melikov, K. G. Naydenov a J. Sundell.

Použité zdroje:

- [1] Etheridge, D., Sandberg, M.: *Building Ventilation. Theory and Measurement*. John Wiley & Sons Ltd., 2000, ISBN 0-471-96087-X.
- [2] Awbi, H.B. *Ventilation of Buildings*. Spon Press, London, 2003.
- [3] Baránková, P.: *Měření intenzity větrání metodou značkovacího plynu CO₂. Část 1. Vytápění, větrání, instalace*, 14, č. 1, 2005, s. 31-34.
- [4] Baránková, P.: *Měření intenzity větrání metodou značkovacího plynu CO₂. Část 2. Vytápění, větrání, instalace*, 14, č. 2, 2005, s. 77-81.
- [5] Stavova (Barankova), P., Melikov, A.K., Sundell, J., Naydenov, K.G.: *A New Approach for Ventilation Measurement in Homes Based on Carbon Dioxide Produced by People – Laboratory Study*. Sborník 17. Konference Klimatizace a větrání 2006, květen 17-19, Praha, 2006, s. 291-296.
- [6] Walton, G.N., Dols, W.S.: *CONTAM 2.4 – User Guide and Program Documentation*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2005.
- [7] Naydenov, K.G., Baránková, P., Melikov, A.K., Sundell, J.: *Distribution of Carbon Dioxide Produced by People in a Room. Part 2 – Field Study*. Book of Abstracts, ROOMVENT '04, Coimbra, Portugal, 2004. ■

* Tepelné vlastnosti dřevěných domů

Centrum pro ekologické stavby (ZUB) v Kasselu bylo nově vybaveno zkušebnou pro výzkum ochrany proti letním vedrům. Na střeše centra byl posazen dřevěný dům, v němž se má, za účelem zvýšení vnitřní tepelné pohody, po tři následující roky zkoumat použití materiálů PCM (fázového posunu) pro dřevěné stavby.

Výzkum se bude provádět ve 12,5 m dlouhém domě, obsahujícím čtyři stejné místnosti vybavené deskovými „kompaktními akumulacími moduly“. Tyto navíc k standardní tepelné izolaci obsahují materiály PCM (hydráty soli z „Rubitherm“).

Fraunhoferův institut pro stavební fyziku (IBP) vysvětluje funkci hydrátů tím, že tyto při velkém vedru odebírají teplo z vnitřního prostředí v důsledku procesu tání a při klesajících vnitřních teplotách vlivem tuhnutí teplo vracejí zpět. Tím vyrovnávají výkyvy teplot a starají se o trvale příjemné klima.