

Počítačové simulace proudění (CFD) ve větrání a klimatizaci

Computational Fluid Dynamics (CFD) in ventilation and air-conditioning

*Ing. Martin BARTÁK
ČVUT v Praze, FSI, Ústav techniky
prostředí*

Příspěvek poukazuje na možnosti využití počítačové mechaniky tekutin při simulacích proudění vzduchu, tepelných dějů a přenosu hmoty v interiérech budov a větracích nebo klimatizačních zařízeních.

Klíčová slova: větrání, proudění vzduchu, simulace, CFD

*Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.*

The paper points out possible applications of CFD (Computational Fluid Dynamics) in simulations of air flow, heat and mass transfer in building interiors and in ventilating or air-conditioning devices.

Key words: ventilation, air flow, simulation, CFD

Počítačová mechanika tekutin, známá pod zkratkou CFD (computational fluid dynamics), se využívá k detailní simulaci skutečných fyzikálních dějů, které probíhají v proudících tekutinách. Její podstatou je přibližné numerické řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic, které matematicky popisují proudění. Metoda CFD je v současnosti nejvýkonnějším, ale také nejsložitějším nástrojem pro numerickou analýzu proudění a souvisejících procesů v tekutinách, jako je sdílení tepla, šíření škodlivin aj.

Ve vzduchotechnice a technice vnitřního prostředí se začala CFD uplatňovat s přibližně patnáctiletým zpožděním oproti jiným specializacím mechaniky tekutin. Postupy, které jsou běžně použitelné pro určité druhy proudění, se ukázały jako nevyhovující při řešení řady případů, se kterými se v oboru větrání běžně setkáváme. Některé problémy spojené s prouděním vzduchu uvnitř budov se přitom vyznačují takovou různorodostí a složitostí, že jejich počítačové simulace stále zůstávají předmětem výzkumu a vývoje.

TEORETICKÉ PRINCIPY CFD MODELOVÁNÍ

Model proudící tekutiny v CFD je tvořen soustavou *lineárních algebraických rovnic* (LAR). Numerické řešení této LAR popisuje v prostoru a čase parametry proudění – rychlosť, tlak, teplota a případně další veličiny, např. koncentraci škodliviny ve vzduchu. Exaktě je však proudění popsáno soustavou *parciálních diferenciálních rovnic* (PDR), které vyjadřují principy zachování hmoty (rovnice kontinuity), hybnosti (Navierovy-Stokesovy rovnice) a energie. K nim může podle potřeby přibýt další PDR pro bilanci koncentrace škodlivin, vlnnosti apod.

Pro převedení systému PDR na soustavu LAR existuje několik metod, v CFD se nejčastěji používá *metoda konečných objemů*. Zkoumaná oblast proudění (např. větrání místo) se rozdělí na velký počet malých prvků, tzv. kontrolních objemů. Systém PDR se nejdříve formálně integruje přes všechny kontrolní objemy. Výsledkem jsou spojité integrální funkce, které vyjadřují princip zachování veličin v jednotlivých kontrolních objemech. Následuje diskretizace těchto spojitých funkcí, tj. jejich nahrazení diskrétními hodnotami ve zvolených bodech (mohou to být středy kontrolních objemů). Tím se integrální rovnice přenosu sledovaných parametrů proudění – např. rychlosti nebo teploty – převedou na LAR. Řešení soustavy těchto LAR se pro všechny kontrolní objemy získá iteračním postupem.

Uvedený postup se značně komplikuje pro turbulentní proudění, kdy se okamžité hodnoty veličin (rychlosti, tlaku, teploty, ...) s časem mění prakticky náhodně v širokém spektru měřitek. Frekvence fluktuací dosahují až 10 kHz a nejmenší velikosti turbulentních výrů mohou být v řádu 10 až 100 mikrometrů. Právě změny o vysokých frekvencích a výry malých rozměrových měřitek je nejobtížnější vystihnout.

Přímý výpočet turbulentního proudění (direct numerical simulation, DNS) je možný zatím pouze teoreticky, protože vyžaduje tak malé kontrolní objemy (krychlová oblast o hraně 0,1 m vyžaduje 10^9 až 10^{12} kontrolních objemů) a tak krátké časové úseky (řádově 0,1 milisekundy), že ani nejvýkonnější superpočítací nedokáží zpracovat jednoduché případy v přijatelném čase.

Běžně se proto používá Reynoldsův přístup, při němž se parametry turbulentního proudění (rychlost, tlak, teplota, ...) rozdělí na časově střední hodnotu a fluktuaci složku. Tím se Navierovy – Stokesovy rovnice transformují na Reynoldsovy rovnice (Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS). Tyto rovnice ovšem s dalšími PDR tvorí neuzavřenou a tedy neřešitelnou soustavu. Aby byla numericky řešitelná, doplňuje se tzv. *modelem turbulence*, který umožní stanovit přidání Reynoldsovy členy korelací mezi fluktuacemi a časově středními složkami veličin. Nejpoužívanější je $k - \varepsilon$ model turbulence, popsaný dvěma rovnicemi pro energii turbulence (k) a rychlosť její disipace (ε). Protože jsou parametry modelů turbulence empiricky zjišťovány, existuje několik variant $k - \varepsilon$ modelů.

Jakýmsi mezistupněm mezi výše zmíněnými postupy DNS a RANS je přímá simulace velkých výř – large eddy simulation, LES – kombinovaná s modelováním turbulence pouze pro výry malých měřitek. Metoda LES není tak náročná na výpočetní techniku jako DNS, přesto se využívá hlavně k výzkumným účelům.

POUŽITÍ CFD

Postup při CFD simulaci daného případu je následující:

1. Vytvoření geometrického modelu a sítě kontrolních objemů

Pro definici geometrie a sítě kontrolních objemů se používají speciální graficky orientované programy, tzv. preprocessory. Někdy lze importovat geometrii ze softwarů pro konstruování (CAD). Již v této etapě je vhodné uvažovat, kde bude docházet k prudkým změnám veličin a podle tohoto odhadu vhodně rozdělit oblast proudění (např. celou místo) na vhodné podoblasti. Dalším kritériem pro volbu podoblastí jsou okrajové podmínky; prakticky to znamená „oddělit“ místa, kde je stěna, otvor nebo vyústka, zdroj tepla apod. od oblastí volného proudění. Je zřejmé, že v této fázi je nutná určitá představivost a zkušenosť z teoretické i experimentální mechaniky tekutin.

Generování sítí je jednou z nejpracnějších etap CFD modelování. Zkoumanou oblast je třeba rozdělit na malé prvky – kontrolní objemy. Hustota sítě čili množství buněk závisí na tom, jak detailní informace o proudění chceme získat. Například pro získání obrazu převládajícího proudění ve větrané místo postačí desítky tisíc kontrolních objemů, v některých případech lze tento počet snížit až

na jeden tisíc [1]. Chceme-li ale zároveň studovat přestup tepla na stěnách, nebo proudění v mezní vrstvě, je třeba hustší numerická síť s počtem buněk několik set tisíc až několik miliónů. Hustota sítě je omezena operační pamětí počítače, na kterém simulaci zpracováváme, a má samozřejmě podstatný vliv na délku budoucího výpočtu (řešení je třeba získat pro každý kontrolní objem). Nevhodně definovaná numerická síť může způsobit nestabilitu iteračního výpočtu.

2. Definice okrajových podmínek a volba modelu turbulence

V další fázi je nutné popsat všechny vlivy působící na modelovanou oblast z hlediska velikosti tepelných toků, množství přiváděného (příp. odváděného) větracího vzduchu, charakteru přenosu tepla (konvekce, prostup, sálání), zdrojů škodlivin atd. Volba modelu turbulence závisí na konkrétním řešeném problému. Standardní $k - \epsilon$ model platí v oblasti proudění, kde jednoznačně převládá turbulentní režim. Protože při proudění vzduchu v prostoru nalezneme oblasti s nízkou turbulencí, se smíšeným prouděním nebo oblasti, kde proudění zcela stagnuje, je nutné $k - \epsilon$ model modifikovat a doplňovat dalšími rovinicemi – používají se např. stěnové funkce nebo dvouzónové modely turbulence [2].

3. Vlastní simulační výpočet

Vlastní numerická simulace není zcela automatizovaným procesem a je nutné do něj průběžně zasahovat. Sleduje se stabilita výsledků a konvergence řešení, které by se mělo postupnými iteracemi stále přibližovat ke konečným hodnotám. Na základě průběhu simulace je nutné upravovat parametry výpočtu, případně měnit diskretizační schéma apod. Zde je nutno uplatnit jak zkušenosti z používání CFD tak praktické poznatky o proudění.

Mezi typické aplikace CFD modelování a simulací v oboru vzduchotechniky a techniky prostředí patří:

- proudění vzduchu ve tvarových a koncových prvcích VZT rozvodů;
- proudění v rotačních strojích (ventilátorech, příp. kompresorech);
- přenos tepla a vlhkosti ve výměnících;
- rychlosť a turbulence proudění vzduchu ve větrané místnosti;
- rozložení teplot vzduchu ve vnitřním prostoru;
- distribuce vlhkosti ve vnitřním prostředí;
- šíření a odvod škodlivin, účinnost větrání místnosti;
- havarijní situace v budovách – odvod kouře při požáru apod.

Na trhu je dnes k dispozici řada komerčních CFD softwarů, které je možné použít pro simulace v oblasti vzduchotechniky a techniky prostředí. Jednu skupinu tvoří univerzální programy, které se vyznačují řadou možností v definici okrajových podmínek, modelování turbulence atd. (FLOW-3D, FLUENT, PHOENICS, STAR-CD aj.). Druhou skupinu spadají programy orientované přímo na techniku prostředí (AIRPAK, FLOVENT aj.).

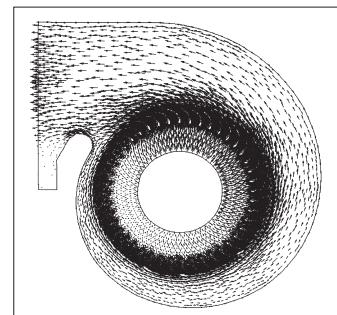
Ve vývojové a výzkumné fázi je integrace nástrojů CFD do softwarů pro komplexní simulaci budov. Příkladem je software ESP-r vyvinutý na University of Strathclyde v Glasgow (Skotsko). Ústav techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze se v letech 1998 až 2001 podílel na vývoji CFD

modulu a jeho integraci do ESP-r v rámci tříletého mezinárodního projektu „Integrated Design Optimization of Building Energy Performance and Indoor Environment“, který financovala Evropská komise [3].

Hardware vybavení není v současnosti velkou překážkou pro práci s CFD softwarem. Nejdůležitější je dostatek operační paměti; její potřebná velikost může dosahovat i několika GB, to je ale řešitelné i na bázi tzv. osobních počítačů. Nejčastěji používaným operačním systémem je UNIX nebo Linux, řada programů již funguje i v prostředí Windows NT/2000. Ceny potřebného softwaru jsou velmi vysoké, přesahují cenu hardwaru i několikanásobně a pohybují se v rámci několika set tisíc až miliónů Kč.

PŘÍKLADY VÝSLEDKŮ CFD SIMULACÍ

Několik možností aplikace CFD ve vzduchotechnice ukazují následující grafické výstupy počítačových simulací.

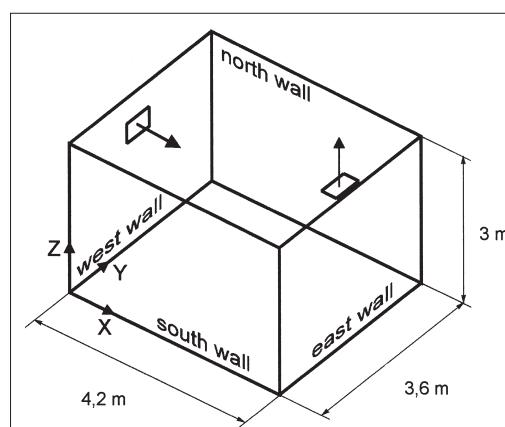


Obr. 1 Rychlostní pole v radiálním ventilátoru ($v_{max} = 70$ m/s)

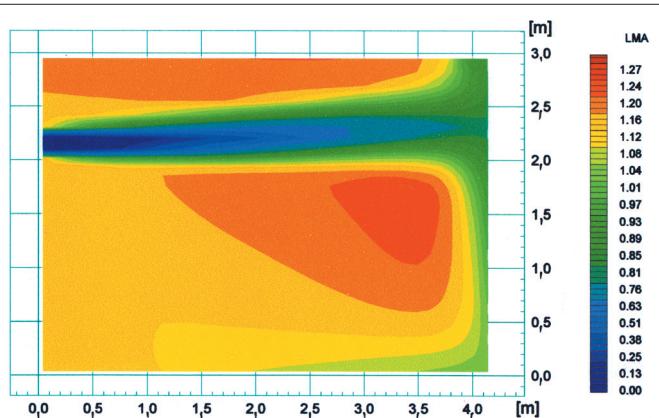
Na obr. 1 je znázorněno rychlostní pole v radiálním ventilátoru. Výsledek byl získán jako řešení instruktážní úlohy, která je součástí CFD softwaru FLUENT [4]. V závislosti na hustotě numerické sítě lze jít do detailu např. v oblasti obtékání lopatek nebo proudění ve spirální skříně, což lze využít při optimalizaci konstrukčního návrhu ventilátoru. Obdobně lze aplikovat CFD při návrhu výměníků, filtrů, vyústek aj. prvků vzduchotechnických zařízení.

Účinnost větrání místnosti lze charakterizovat tzv. lokálním stářím vzduchu LMA (local mean age of air). Tato veličina udává, jak dlouhou dobu potřebují částice vzduchu na to, aby urazily dráhu mezi přívaděcím a odváděcím otvorem větrané místnosti. Různými mísami procházejí různé „staré“ částice vzduchu. Na obr. 2 je znázorněno rozložení bezrozměrových hodnot LMA (vztažených ke stáří vzduchu v odváděcím otvoru) v podélném řezu místnosti větrané izotermním proudem vzduchu. Oblasti s různou hodnotou LMA se liší barevně, takže je na první pohled patrné, v kterých místech je hodnota LMA vysoká, resp. kde je větrání málo účinné. Pro výpočet byl použit CFD modul softwaru ESP-r pro integrovanou simulaci budov [1].

Obr. 3 ukazuje ve svíslém řezu cirkulační proudění a rozložení teplot vzduchu v zasklené dvoraně, jejíž podlaha a pravá svíslá stěna jsou z betonu (resp. přilehají k budově). Simulace ukazuje ustálený stav v extrémní letním dni za si-



Obr. 2 Model místnosti větrané izotermním proudem vzduchu a rozložení lokálního stáří vzduchu LMA



tuace, kdy je prostor dvoraný těsně uzavřen, takže nedochází k výměně vzduchu s okolím. Na prosklených stěnách byl uvažován tepelný tok prostupem tepla (konvekce na vnějším i vnitřním povrchu) a sálání od slunce.

Software FLUENT [5] byl použit k výpočtu.

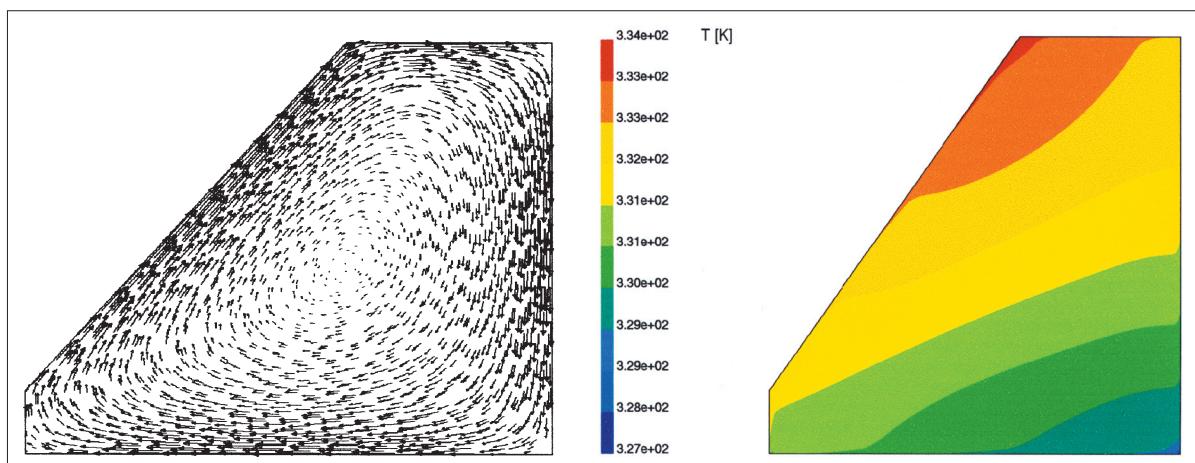
Ustálené rozložení teplot vzdachu v místnosti se zdrojovým větráním ukazuje obr. 4. Poměrně vysoká tepelná zátěž je modelována třemi otopnými plochami na stěnách místnosti. Výsledky ukazují, že větrací vzduch ochlazuje prostor do výše cca 1 m nad podlahou, nad touto úrovni je teplota vzdachu vyšší než 31 °C. Výpočet byl proveden v CFD modulu softwaru ESP-r pro integrovanou simulaci budov [6].

Počítačové programy pro CFD modelování jsou specializovanými nástroji, které poskytují detailní informace o proudění, rozložení teplot, šíření škodlivin apod. Jsou vhodné pro analýzu dějů spíše v rámci jedné místnosti nebo jednoho zařízení. V současné době lze modelovat časově ustálené i přechodové stavby ve složitě uspořádaném větraném prostoru stejně jako tvarově komplikované prvky vzduchotechniky.

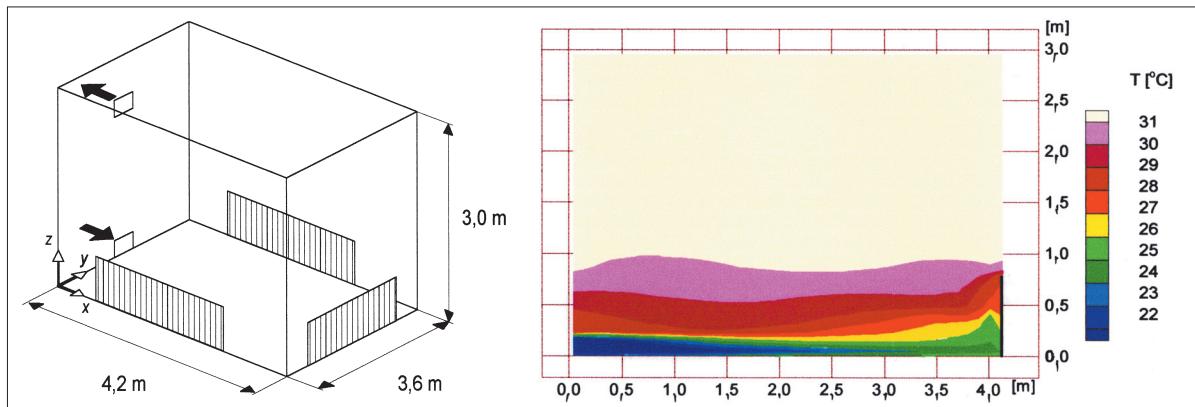
Z hlediska posuzování vnitřního prostředí budov a projektování vzduchotechniky mají CFD simulace význam pro:

- analýzu dějů a systémů, u nichž je obtížné nebo nemožné experimentálně měření (např. velmi rozsáhlé systémy, nepřístupné prostory, příliš malé rychlosti);
- posouzení funkce systémů za extrémních podmínek (např. havarijní situace);
- snížení časových nároků a finančních nákladů při navrhování prvků a systémů VZT;
- případy, kdy jsou požadovány podrobné údaje o proudění vzdachu, přenosu tepla, rozložení teploty a vlhkosti vzdachu, šíření škodlivin.

Dnešní softwary pro CFD jsou sice relativně pohodlné pro uživatele, avšak správnost výsledků simulace není zajištěna automaticky. Použití CFD v oboru větrání a klimatizace předpokládá znalosti z oblasti numerických metod a teoretické mechaniky tekutin, zároveň vyžaduje zkušenosť z experimentálních a provozních



Obr. 3 Rychlosť proudenia (vľavo) a teploty vzduchu (vpravo) v uzavretom nevetrane prostrediu, jehož strop a sklonena i svislá stena na lev strane jsou zakleny. Maximálna rychlosť proudenia je 0,14 m/s, teploty jsou v rozmeji 54 až 61 °C.



Obr. 4 Model mistnosti se zdrojovým větráním a třemi zdroji tepla na stěnách

Vpravo je zobrazeno rozložení teplot vzdachu v podélném řezu.
 $t_{\text{pivod}} = 20^\circ\text{C}$; výkon otopných ploch (elektrická odporná fólie) = 683 W; intenzita větrání $I = 4/h$

měření a v neposlední řadě jsou důležité praktické poznatky o vzduchotechnických systémech. Z toho vyplývá, že téměř nezbytnou podmínkou kvalitního zpracování CFD simulace je týmová spolupráce dvou až tří osob, aby byly splněny požadavky na odbornou úroveň výsledků včetně jejich interpretace. V žádném případě nelze problém zúžit jen na zadání geometrie a numerický výpočet.

Předneseno na Semináři STP „Počítače pro vzduchotechniku“ dne 11. 10. 2001.

Literatura:

- [1] 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. Proceedings of 7th Intl. IBPSA Conference Building Simulation 2001. Rio de Janeiro. 2001.
- [2] BARTÁK M.: Využití CFD pro modelování proudění vzdachu v místnosti. Sborník 14. konference STP Klimatizace a větrání. Praha. 1999.
- [3] BEAUSOLEIL-MORRISON I., CLARKE J. A., DENEV J., MACDONALD I. A., MELIKOV A., STANKOV P.: Further Developments in the Conflation of CFD and Building Simulation. Proceedings of 7th Intl. IBPSA Conference Building Simulation 2001. Rio de Janeiro. 2001.
- [4] FLUENT 5 Tutorial Guide. Fluent Inc. Product Documentation. 2000.
- [5] BARTÁK M., MAJER M., SCHWARZER J.: Zonal and CFD Modeling of Air Temperature Distribution in Large Glazed Spaces. Proceedings of Workshop 2001, CTU in Prague 2001. Praha. 2001.
- [6] 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. 7th REHVA World Congress Clima 2000. Napoli. 2001.