

# **Oponentský posudek na doktorskou disertační práci Mgr. Vladimíra Fuky**

## **„Mathematical modelling of air-flow in geometrically complicated areas“**

Předložená disertační práce je psána v anglickém jazyce na 185 stranách textu, včetně tří příloh, seznamu literatury a dalších formálních náležitostí. K práci je navíc přiloženo CD, kde je celá práce uvedena ve formátu pdf.

Práce prezentuje počítačový model Charles University Large-eddy Microscale Model (CLMM) pro výpočty proudění a rozptylu pasivních příměsí v mezní vrstvě atmosféry a příklady jeho aplikace. Po stručném úvodu, ve kterém je mimo jiné naznačen historický vývoj problematiky a vztah k meteorologii je výklad rozčleněn do osmi kapitol. V první kapitole jsou zavedeny obecné rovnice pro stlačitelnou Newtonovskou tekutinu vyjadřující zákony zachování, odpovídající konstituční rovnice a další závislé proměnné, které jsou pro atmosféru významné. Následuje popis některých zjednodušujících aproximací těchto rovnic, které jsou v modelu využívány. Další část kapitoly je věnována popisu vybraných numerických metod pro řešení časového vývoje a prostorového rozložení, které jsou v modelu využívány. Pro úplnost by mohla být zmíněna i metoda konečných prvků. V závěru kapitoly je popsána účinná metoda vnořené hranice pro okrajové podmínky.

Druhá kapitola je věnována popisu metody Simulace velkých vírů (LES). Je vysvětlena základní podstata této metody, filtrace závisle proměnných a zejména modely pro popis turbulentních pohybů menších jak rozměr výpočetní sítě, které jsou v anglosaské literatuře vesměs označovány jako subgrid models. Jsou bohužel popsány pouze modely, které jsou v CLMM používány a jsou odvozeny s jistou analogií s turbulentní viskozitou.

V třetí kapitole je opuštěn vlastní popis modelu a jsou popsány vybrané partie problematiky mezní vrstvy atmosféry. Pro plynulost textu bych osobně tuto kapitolu zařadil např. přímo za úvod. Následující kapitola č. 4 se totiž vrací k popisu modelu a sumarizuje to, co bylo uvedeno v kapitolách předchozích. Tedy až na řešič Poissonovy rovnice, která se objevuje s problémy související, tj. s nepřítomností okrajové podmínky pro tlak- viz. Navierova-Stokesova úloha a nelinearitou Navierových-Stokesových rovnic. Tento řešič je popsán v kapitole č. 5.

Další tři kapitoly jsou věnovány aplikacím modelu a tvoří je, až na drobné úpravy, vesměs již recenzované publikace. V kapitole č. 6 jsou uvedeny výsledky aplikace modelu na případ nestlačitelného proudění ve stabilní mezní vrstvě nad horizontálně homogenním povrchem v Boussinesquově aproximaci. Vypočtené výsledky byly porovnány s full-scale experimentem a byla prokázána uspokojivá shoda. Následující kapitolu, opět až na drobné úprav, tvoří recenzovaná publikace, ve které je řešeno obtékání geometricky jednoduchých kopců v případě stabilního zvrstvení. Na výsledcích je demonstrována dobrá shoda se známými integrálními charakteristikami tohoto proudění, jakými je např. délka recirkulační

zóny, vlnová délka závětrných vln. Poslední osmá kapitola vznikla na základě účasti autora na projektu COST Action ES1006. V rámci tohoto projektu bylo řešeno proudění a difúze ve virtuální městské zástavbě, v tzv. Michelstadtu. Je nutné zdůraznit, že se jedná o případ extrémně komplikované geometrie, že byl řešen případ jak kontinuálního zdroje, tak případ zdroje okamžitého, slangově označovaného jako „puff“. Nutno podotknout, že cílem tohoto projektu je navrhnout metodiku validace matematických modelů a že metodika je relativně dobře navržená pro statistické modely (RANS) a, podle mého mínění, podstatně méně pro modely LES. Proto jsou v kapitole uvedeny výsledky validace převážně pro střední hodnoty závisle proměnných.

Celkově mohu konstatovat, že se autoru úspěšně podařilo zaplnit mezeru v rámci CFD (Computer Fluid Dynamics) komunity této republiky. Vesměs byly a jsou pro úlohy související s prouděním tekutin užívány statistické modely (RANS). Tedy až na výjimky, kdy se k této problematice dostali pracovníci v rámci studijních pobytů na excelentních zahraničních pracovištích a pokud je mi známo, bohužel jejich dovednosti nebyly v této republice finálně z různých důvodů využity. Přitom právě modely LES umožňují řešit nové a vysoce aktuální problémy teorie turbulentního proudění. Jsou jimi např. tzv. koherentní struktury, které, jak uvádějí koryfejové oboru, mohou podstatným způsobem přispět k poznání; mohou řešit problémy již zmíněné difúze v případě krátkodobého výronu, tedy problémy akutní z hlediska bezpečnostní problematiky a další.

K práci si dovoluji učinit některé, spíše formální připomínky:

- Na str. IV, ale i dále je často používán termín Planetární mezní vrstva. V minulosti tento termín označoval MVA nad horizontálně homogenním povrchem. Mohu ale konstatovat, že v současnosti mnozí autoři tento termín používají jako ekvivalent pro MVA,
- Na str. 58 by logicky měl být nejprve uveden vztah (3.2) a pak vztah (3.1),
- Na obr. 3.1 – str. 61 by bylo vhodné označit osy,
- Charakteristická rychlost  $U$  zavedená na str. 69 má rozměr  $\text{čas}^{-1}$ , předpokládám, že se jedná o chybu tisku,
- Důvodem pro zviditelnění vzniklé Kármánové vírové řady na obr. 3.5 je splnění Proudman-Taylorovy teóremu pro rotující soustavu souřadnou,
- Jako další příklad katabatického proudění – str. 70 je Böhmwind z Krušných hor,
- Označení imaginární jednotky  $i$  a zároveň hodnota indexu je poněkud nepřehledná,
- Na str. 92 je zmíněn tenzor  $\tau_{ij}^d$ , který se v rovnicích neobjevuje (je index  $d$  nadbytečný?),
- Pravděpodobně díky programu TEX jsou v kapitole odkazy na čísla obrázků typu 6.4.1 a obrázky mají označení 6.1 a další,
- Na str. 102 je inzerována turbulentní viskozita  $\nu_t$ , přičemž v rovnicích je  $\nu_{sgs}$ .

K vlastní obhajobě mám následující otázky:

- Na str. 95 je zmíněna náhodná fluktuace jako počáteční podmínka pro generování turbulence. Jak je generována? S tím souvisí poznámka vycházející z teorie o determinismu. Podle ní je turbulentní proudění silně závislé na počátečních podmínkách. Může volba náhodné fluktuace ovlivnit výsledky?
- Na str. 102 je uvedena homogenní podmínka pro rychlost na vstupu. Jaká je pak tloušťka mezní vrstvy v okolí kopce? Ze zkušenosti plyne, že na tak krátkém úseku vyvine pouze tenká MV,
- Na obr. 7.5 je vynesena závislost bezrozměrné délky recirkulační zóny na zvrstvení. Lze odtud např. odhadnout hodnotu limity pro  $Nh/U \rightarrow \infty$ . V mechanice tekutin, tj. pro indiferentní zvrstvení je  $l/h \approx 5$  v závislosti na tvaru překážky,
- U krátkodobého výronu plynu vývoj závisí na počátku výronu. Proto je také nutné provádět množství realizací. Jak bylo zajištěno, aby tento počátek byl „náhodný“ vůči turbulentnímu poli proudění? K tomu je nutné ještě dodat, že počet realizací 25 je relativně malý. Zkušenost z fyzikálního modelování v Ústavu termomechaniky a Univerzity v Hamburku je nutná cca 200 realizací. Tento nedostatek by mohl být příčinou k ne zcela přesvědčivým výsledkům validace. Je mi však jasné, že model je značně náročný na čas a tedy je žádoucí vhodný kompromis. Jak bude tento problém řešen?


Doporučení pro aktualizace modelu:

Zahrnout mnoha-měřítkové „subgrid“ modely, které popisují i triadické interakce mezi měřítky.

## Závěr

Posuzovaná disertační práce je věnována velmi aktuálnímu a stále významnějšímu problému, jakým je proudění a rozptyl příměsí v mezní vrstvě. Mgr. Vladimíru Fukovi se podařilo navrhnout a realizovat matematický model typu simulace velkých vírů. Navržený model je na opravdu vysoké odborné úrovni a je již uznávaný mezinárodní odbornou komunitou. Tím prokázal schopnost samostatně řešit vědecký problém, potvrdil schopnosti k samostatné tvořivé práci a dosáhl původních vědeckých poznatků, které dobře obstály i v mezinárodní kritice. Z uvedených důvodů se domnívám, že práce splňuje všechny požadavky kladené na doktorskou disertaci a lze ji přijmout k obhajobě a posoudit ji jako práci disertační.

V Praze, 10. listopadu 2014

  
prof. RNDr. Zbyněk Jaňour, DrSc.  
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.  
Dolejškova 5  
182 00 Praha 8

