

Oponentní posudek diplomové práce

Bc. Ivety Študentové

(ZČU v Plzni, FAV, *studijní program*: N3955 Počítačové modelování v inženýrství,
studijní obor: Dynamika konstrukcí a mechatronika)

zpracované na téma

Modelování vícefázového proudění reálné tekutiny pomocí lattice Boltzmannovy metody

Bc. Iveta Študentová vypracovala diplomovou práci zabývající se využitím moderní lattice Boltzmannovy metody pro modelování vícefázového proudění tekutin. Práce má 48 stran textu včetně obrázků a seznamu literatury.

Lattice Boltzmannova metoda (LBM) se v posledních desetiletích stává stále používanější metodou pro numerické simulace fyzikálních procesů. Jde o poměrně novou metodou, která v různých modifikacích vznikajících od přelomu 80. a 90. let představuje alternativu ke klasickým metodám numerického řešení Navierových-Stokesových rovnic, jako je např. metoda konečných prvků nebo metoda konečných objemů. Hlavní oblastí jejího využití je proudění tekutin, kde LBM umožňuje postihnout velmi složité jevy, např. vícefázové proudění nebo proudění s chemickými reakcemi v komplikovaných geometrických uspořádáních. A právě modelování vícefázového proudění je hlavním tématem této diplomové práce.

Hodnocení práce

Předložená diplomová práce je kromě úvodu a závěru rozčleněna do čtyř stěžejních kapitol. V první kapitole se autorka věnuje historickému vývoji LBM – jednak z buněčných automatů a jednak odvozením ze spojitě Boltzmannovy rovnice. Dále jsou zde zmíněny některé lattice Boltzmannovy modely sloužící k modelování vícefázového proudění tekutin.

Ve druhé kapitole je vysvětlen princip LBM, je zde provedeno její odvození diskretizací Boltzmannovy rovnice a jsou uvedeny okrajové podmínky použité v této práci. Dále je popsán způsob převodu veličin mezi fyzikálním a tzv. lattice Boltzmannovým systémem, ve kterém je daná úloha řešena. Nakonec je uveden algoritmus pro implementaci LBM.

Třetí kapitola je věnována popisu LBM pro řešení vícefázového proudění. Pro modelování pohybu rozhraní mezi dvěma nemísitelnými tekutinami autorka zvolila metodu difúzního rozhraní s využitím Cahn-Hilliardovy rovnice. Pohyb modelovaných tekutin je řešen pomocí již zmíněných lattice Boltzmannových rovnic, ze kterých je vyjmuta hustota, což vede k modelování tzv. beztlakových rovnic. Tlak je potom dopočítáván pomocí Poissonovy rovnice.

Na základě algoritmů popsaných v předchozích kapitolách autorka vyvinula ve výpočtovém prostředí Matlab vlastní software, jehož správnost je ověřena na testovacích úlohách uvedených ve čtvrté kapitole. Nejprve je řešena úloha pro ověření vlivu povrchového napětí, kdy se ze čtverce naplněného tekutinou o mnohonásobně menší hustotě, než je hustota tekutiny vnější, stane kruh. V další úloze je modelován pohyb dvou nemísitelných tekutin o různých hustotách v dvourozměrné obdélníkové oblasti. Na počátku úlohy jsou tyto tekutiny uspořádány do dvou vrstev nad sebou a je sledováno jejich rozložení ve výpočtové oblasti v průběhu času, tzv. Rayleighova-Taylorova nestabilita. Výpočty byly provedeny pro dvě různé hodnoty Reynoldsova čísla, $Re = 256$ a $Re = 2048$. Výsledky získané numerickou simulací pomocí vyvinutého softwaru jsou v dobré shodě s výsledky publikovanými v literatuře (Huang, Sukop, Lu, 2015), kterých bylo dosaženo rovněž lattice Boltzmannovou metodou. Nakonec je řešena úloha působení vztlakové síly na bublinu uvnitř kapaliny. Výpočty byly provedeny pro tři různé hodnoty Bondova čísla, které vyjadřuje vliv povrchového napětí a ovlivňuje tak tvar bubliny. Získané výsledky jsou porovnány s výsledky

publikovanými v literatuře (Sun, Tao, 2009) a vypočtenými metodou VOSET. Z porovnání výsledků je zřejmá dobrá shoda tvaru bubliny pro všechna testovaná Bondova čísla.

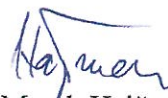
V rámci diskuze si dovoluji autorce položit následující dotazy:

- 1) V úvodním odstavci kapitoly 4 jsou uvedeny použité hodnoty parametrů matice $SMRT$ modelu a konstanty C , která vystupuje v definici koeficientu mobility v Cahn-Hilliardově rovnici. Na základě čeho byly hodnoty těchto parametrů takto stanoveny?
- 2) V testovací úloze pro ověření působení povrchového napětí není uvedeno srovnání s referenčním výpočtem, např. z literatury. Je v tomto případě pro ověření správnosti výpočtu postačující skutečnost, že dochází k zakulacení původního čtverce obsahujícího tekutinu s nižší hustotou?
- 3) U hodnocení výsledků v případě Rayleighovy-Taylorovy nestability je uvedeno, že lepší shody výsledků by bylo dosaženo použitím jemnější výpočtové sítě. Byly prováděny nějaké další výpočty na jemnější síti?
- 4) U výpočtu stoupající bubliny je porovnáván vypočtený tvar bubliny s výsledky publikovanými v literatuře. V případě pozice bubliny ve výpočtové oblasti v průběhu času jsou ovšem uvedeny jen výsledky vypočtené autorkou. V literatuře takovéto výsledky dostupné nebyly?
- 5) Jaká je výpočtová náročnost použité metody? Kolik výpočtového času zabraly numerické simulace uvedených úloh?
- 6) Má autorka v úmyslu vyvinutý software dále rozvíjet či používat pro řešení komplexnějších úloh vícefázového proudění?

Závěr

Bc. Iveta Študentová prokázala, že je schopna samostatné tvůrčí práce a je schopna zpracovat moderní metodu pro řešení úloh mechaniky tekutin, jakou lattice Boltzmannova metoda je. Přínos práce spatřuji především ve vytvoření vlastního softwaru pro řešení úloh vícefázového proudění tekutin, který byl otestován na několika testovacích úlohách a lze jej dále využít pro řešení podobných úloh tohoto typu. Práce je napsána přehledně a bez gramatických chyb, graficky je na velmi dobré úrovni. Cíle práce vytyčené v zadání byly splněny. Diplomovou práci hodnotím známkou **v ý b o r n ě** a doporučuji k obhajobě.

V Plzni, dne 20. června 2016



Ing. Marek Hajžman
oponent diplomové práce