Posudek diplomové práce Bc. Vítězslava Putny

Model proudění vícesložkové směsi v raketovém motoru

Diplomová práce je věnována modelování vícesložkového proudění s rozptýlenou fází a spalováním s důrazem na vývoj efektivního nástroje pro návrh raketového motoru. K tomuto účelu je uvažován zjednodušený model, který sestává z kvazi-2D soustavy Eulerových rovnic v případě plynné fáze. Rozptýlená fáze je modelována dvěma odlišnými způsoby. V prvním případě je použita Eulerova formulace, která k výše zmíněné soustavě Eulerových rovnic přidává další parciální diferenciální rovnice, které reprezentují zákony zachování rozptýlené fáze. Druhý přístup, Lagrangeův popis, je založen na popisu chování skupin kapiček pomocí dalších soustav obyčejných diferenciálních rovnic. Matematický model také popisuje stavové chování tzv. kvazi-ideálního plynu, kde jsou měrné tepelné kapacity uvažovány jako funkce teploty. Dále je modelována interakce tekutiny a rozptýlené fáze a chemické reakce.
Numerické řešení je získáno pomocí metody konečných objemů. Práce zahrnuje popis různých schémat pro aproximaci nevazkých toků (Laxovo-Friedrichsovo, HLL, AUSM), zvýšení řádu přesnosti v prostoru pomocí po částech lineární rekonstrukce a různé metody časové diskretizace (jednokrokové Runge-Kuttovy a vícekrokové metody typu Adams-Bashforth).
Práce dále obsahuje dvě řešené úlohy. První úloha je odpařování kapalné fáze v jednoduchém kanálu konstantního průměru, která slouží jako testovací případ k porovnání obou výše zmíněných přístupů k modelování rozptýlené fáze. Druhá řešená úloha je spalování v komoře raketového motoru, která již představuje reálnou aplikaci.

Práce je rozdělena do šesti kapitol včetně úvodu a závěru. Je napsána srozumitelně a kapitoly na sebe logicky navazují. Autor v práci používá zvláštní formát, kde jsou všechny vzorce vyčleněny z vět, ačkoliv by měly být jejich součástí. Dále se na některých místech vyskytují hovorové a anglické výrazy (např. "Coupling" v názvu kapitoly 1.4, nebo "slope limiting" na straně 49, či "fity" na straně 62), kterých se jistě dalo vyvarovat. Na některých místech chybí citace (např. na Newtonovu-Rhapsonovovu metodu na straně 23, schémata HLL, HLLC, AUSM, atd.). Seznam použitých symbolů je neúplný, což vzhledem k velkému množství veličin zhoršuje přehlednost. Rovněž by bylo vhodnější na některých místech textu nově zavedené veličiny představit.

Otázky a připomínky:

- Byly testovány i jiné metody časové diskretizace než Eulerova explicitní metoda?
- Jak byl volen časový krok?
- Jak byla sledována konvergence numerického řešení ke stacionárnímu stavu? V práci se nevyskytuje žádný průběh rezidua v závislosti na čase/počtu iterací. Mohl by je autor doplnit při obhajobě?
- V kapitole 3.2 autor zmiňuje "Po numerickém toku vyžadujeme jisté vlastnosti, aby byla zaručena konvergence numerické aproximace k exaktnímu řešení." Jaké jsou zmiňované jisté vlastnosti? Je konzistence postačující podmínkou konvergence?

- V rovnicích (3.19) a (3.20) je v konvektivní části toku ve třetí složce celková energie. Je to tak správně?
- Proč jsou na vstupu předepsány okrajové podmínky pro všechny čtyři veličiny v případě kapalné fáze, zatímco v případě plynné fáze jsou předepsány pouze tři?
- Jaký byl počet kapičkových skupin při použití Lagrangeova popisu rozptýlené fáze u úlohy odpařování kapalné fáze v jednoduchém kanálu? Jaký počet by byl dostatečný?

Zadání diplomové práce hodnotím jako velmi náročné. Autor si musel podrobně nastudovat problematiku modelování vícesložkového proudění, což dokazuje v úvodních kapitolách práce. Dále musel vyvinout a odladit vlastní program, který úspěšně otestoval a použil pro simulaci proudění v raketovém motoru. Prezentované výsledky jsou dobře okomentovány, kladně také hodnotím provedenou analýzu vlivu velikosti kapiček a jejich vstupní rychlosti na tah motoru. Po formální stránce je práce i přes výše zmíněnou kritiku uspokojivá. Cíle práce byly zcela splněny. Po zodpovězení otázek proto práci navrhuji hodnotit známkou B (velmi dobře).

V Praze dne 17. 8. 2023 Ing. Jiří Holman, Ph.D.