

Posudek diplomové práce Bc. Tomáše Levého  
vypracované na téma

### **Modelování turbulentního proudění stlačitelných tekutin pomocí vhodných RANS modelů turbulence**

Diplomová práce obsahuje celkem 67 stran, které zahrnují anotaci, obsah, úvod, 3 kapitoly týkající se řešení daného problému, závěr, seznam literatury a 2 přílohy popisující použité modely turbulence v bezrozměrném tvaru. V jednotlivých kapitolách je popsán matematický model turbulentního proudění stlačitelné tekutiny, numerické řešení turbulentního proudění stlačitelných tekutin a ověření implementovaných modelů turbulence.

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním turbulentního proudění stlačitelné tekutiny se zaměřením na vnější aerodynamiku. V první kapitole je popsáno podmíněné středování soustavy Navier-Stokesových rovnic pro stlačitelnou tekutinu, doplnění soustavy pohybových rovnic o nezbytné termodynamické vztahy a stavovou rovnici. Dále jsou popsány způsoby uzavření soustavy pohybových rovnic modelem turbulence. Pro další použití jsou zvoleny modely založené na hypotéze o turbulentní vazkosti - jednorovnicový model Spalarta a Allmarase (S-A) s transportní rovnicí pro turbulentní vazkost a dvourovnicový  $k-\varepsilon/k-\omega$  SST model Mentera se dvěma transportními rovnicemi. Podmínka pro vzdálenost prvního bodu sítě od stěny je odvozena pomocí základních vztahů pro turbulentní mezní vrstvu.

Druhá kapitola je věnována numerickému řešení pohybových rovnic pro dvourozměrné proudění stlačitelné tekutiny pomocí metody konečných objemů s využitím strukturované čtyřúhelníkové sítě. Nevazké toky jsou aproximovány AUSM schématem se zvýšením řádu přesnosti pomocí limiteru. Aproximace vazkých toků je provedena centrálně druhým řádem přesnosti. Pro časovou diskretizaci je použita explicitní dvoustupňová Runge-Kuttova metoda druhého řádu přesnosti. Zvláštní pozornost je věnována zadání různých typů okrajových podmínek pro subsonický vstup. Obecným problémem je zadání počátečních podmínek pro turbulentní veličiny. V S-A modelu se volí turbulentní vazkost jako násobek molekulární vazkosti. V SST modelu se určuje specifická rychlost disipace pomocí charakteristické délky resp. referenčního Reynoldsova čísla a turbulentní energie pomocí molekulární vazkosti a specifické rychlosti disipace. Stejný způsob je použit v původních publikacích Spalarta a Allmarase (1994) a Mentera (1994).

Ve třetí kapitole je provedeno ověření implementace použitého numerického řešení podmíněně středovaných Navier-Stokesových rovnic uzavřených S-A a SST modely turbulence pomocí obtékání rovinné desky bez tlakového gradientu a obtékání tvarované dolní stěny výpočetní oblasti podle databáze NASA Turbulence Modeling Resource. Pro oba případy je provedena diskretizace výpočetní oblasti s různým počtem buněk zahuštěných v blízkosti stěny a náběžné hrany a výpočet pomocí obou modelů turbulence. Provedené výpočty dávají v obou případech dobrou shodu s výsledky výpočtů databáze NASA, které byly získány s větším počtem buněk sítě. Provedené výpočty byly získány pomocí sítě s menším počtem buněk, a tedy nemohla být dosažena doporučená hodnota  $y_1^+ < 1$ , což se projeví na průběhu některých parametrů.

V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky, možné způsoby využití např. jako příklad implementace numerických schémat pro řešení turbulentního proudění a zejména jako základ pro další numerické řešení turbulentního proudění s využitím různých matematických i fyzikálních modelů.

## Poznámky a připomínky

K obsahu diplomové práce nemám žádné otázky. Práce je velmi dobré úrovně, jak po odborné, tak i grafické stránce. Text neobsahuje prakticky žádné prohřešky proti češtině, pouze občas je uveden doslovný překlad z angličtiny, např. „...proudění okolo rovné desky...“ místo obtékání desky. Proměnné jsou psány ležatým písmem s výjimkou podobnostních čísel.

V práci chybí seznam označení. Některé veličiny jsou označeny nestandardně, např. celková měrná energie je označována  $e$  a měrná vnitřní energie  $\varepsilon$  stejně jako rychlost disipace, která je v práci nazývána jen disipace. Střední proudové pole je zpravidla popsáno dvěma tenzory – tenzorem rychlosti deformace  $S_{ij}$  a tenzorem rychlosti rotace  $\Omega_{ij}$ , někdy označovaným  $W_{ij}$  a v anglosaské literatuře často nazývaným tenzorem vířivosti. Použité označení  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  pro tenzor rychlosti deformace a  $S_{ij}$  pro tenzor vířivosti není obvyklé a poněkud ztěžuje sledování rovnic.

Ve výrazu pro produkci turbulentní energie  $P_k = \tau_{ij} \partial U_i / \partial x_j$  je použit místo tenzoru rychlosti deformace tenzor vířivosti. Pro dvourozměrné proudění dává tato změna jen malé rozdíly ve srovnání se standardním vztahem, ale snižuje produkci turbulentní energie v oblasti nevyvinuté mezní vrstvy, např. v oblasti náběžné hrany při obtékání těles. Pro řešení komplexního 3D proudění je výhodnější použít původní vztah a nadprodukcii turbulentní energie omezit jiným způsobem.

Při modelování turbulentního proudění je problémem zadání počátečních hodnot pro turbulentní parametry. Výpočet je mnohem citlivější na počáteční hodnotu turbulentní energie  $k$ , než rychlosti disipace  $\varepsilon$  resp.  $\omega$ . Proto se nejčastěji zadává hodnota turbulentní energie pomocí stupně turbulence  $Tu$  vztahem  $k_\infty = 3/2 (U_\infty Tu)^2$ , jak je uvedeno v diplomové práci na str. 17. Rychlost disipace se určí z poměru vazkostí  $\mu_t/\mu$ , který odpovídá útlumu turbulentní energie ve vnějším proudu.

## Závěr

Předložená diplomová práce splňuje všechny zadané požadavky. Obsahuje rozsáhlou rešerši RANS modelů turbulence zaměřenou na modelování proudění stlačitelné tekutiny. Po diskretizaci výpočtové oblasti je matematický model pro numerické řešení dvourozměrného proudění stlačitelné tekutiny implementován v prostředí MATLAB a ověřen pomocí dvou testovacích případů z databáze NASA Turbulence Modeling Resource.

Provedená implementace numerických schémat pro řešení dvourozměrného turbulentního proudění stlačitelné tekutiny může sloužit jako základ pro další numerické řešení turbulentního proudění s využitím různých matematických i fyzikálních modelů.

Předložená práce zcela splňuje požadavky na diplomovou práci a navrhuji její hodnocení stupněm výborně.

V Praze dne 14. června 2019