

# Posudek disertační práce

## **Autor a název disertační práce:**

Ing. Lukáš Hájek, Numerical solution of turbulent flow using DES model with mesh adaptation

**Autor posudku:** Doc. Ing. Petr Louda, PhD

Práce se zabývá řešením turbulentního stlačitelného proudění zejména s kombinovanými modely turbulence RANS-LES, ve spojení s implicitním řešičem a adaptivním zjemňováním sítí.

## **Dosažení cílů práce**

V práci je formulováno 9 cílů. Cíle implementace metody upwind HLLC, implementace modelů turbulence X-LES, SST-DES, DDES, IDDES zřejmě byly splněny, což vyplývá z výsledků simulací. Dále byl upraven přepínač v modelu X-LES podle vzoru modelů SST-DES a SST-IDDES. Doktorand dále navrhnul a testoval kritéria adaptace na základě identifikace vírových struktur. Navržené metody doktorand otestoval na několika případech proudění. Cíle práce lze považovat za splněné.

## **Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky**

Rozbor současného stavu je věnován pouze kombinovaným modelům RANS-LES a v tomto směru je dostatečný. Několik cílů práce se však týká i adaptivního zjemňování sítí konečných objemů, a zde rozbor chybí. Zejména s ohledem na cíl č. 6 – návrh několika kritérií adaptace založených na vlastnostech turbulence je to překvapivé.

## **Teoretický přínos disertační práce**

Práce přispívá k rozvoji modelování turbulence kombinovanými modely RANS-LES, což je v současnosti rychle se rozvíjející téma modelování turbulence v technických aplikacích. Konkrétně jde o navázání oblastí RANS a LES pomocí upravených přepínacích funkcí a jejich použití v modelech X-LES a v kombinaci s adaptivními sítěmi konečných objemů.

## **Praktický přínos disertační práce**

Použité metody jsou vhodné pro využití na pomezí výzkumu a praktických simulací proudění. Doktorand implementoval modely a metody zjemňování sítí do softwaru Orion, který používají další studenti a pracovníci Ústavu technické matematiky. Dá se tedy předpokládat, že budou využité i při dalších výpočtech a výzkumných pracích.

## **Vhodnost použitých metod řešení**

Elementy postupů jsou zvolené správně s jednou výhradou, a tou je použití metody HLLC v rámci simulací LES. Tato metoda upwind má poměrně velkou numerickou vazkost, a tak koeficienty turbulentní vazkosti v modelu LES mohou vyžadovat změny při jiné aproximaci konvektivních členů. Standardem postupů LES je buď centrální schema s disipativním modelem turbulence anebo schema upwind bez modelové disipace. Tato volba zřejmě byla způsobena nutností používat upwind v části RANS.

Adaptace sítí jistě vyvolává otázky vzhledem k použití ve spojení s matematickými modely, které výrazně mění své vlastnosti právě v závislosti na hustotě sítě. Bohužel práce se těmito aspekty zabývá spíše okrajově a závěry lze chápat jako předběžné.

## **Způsob, jakým byly použité metody aplikovány**

V teoretické části práce se objevují určité nepřesnosti, které, i když nemají přímý vliv na výsledky práce, by měly být zmíněny:

- metody RANS nemodelují „limited range of turbulent scales“, nýbrž právě všechna turbulenti měřítka reprezentovaná globálně zejména turbulentní energií  $k$
- metody LES nevyvolávají jen požadavky na hustotu sítě, ale i na přesnost numerických metod
- středované rovnice na str. 20 by mohly napovídat, že turbulentní difuzivita a vazkost vznikají právě středováním; není tomu tak, jde už o model turbulence (a to poměrně primitivní)

Slabým místem matematické části práce je popis okrajových popř. počátečních podmínek. Je velmi stručný a opět s určitými nesrovnalostmi:

- stěna je označena jako „adiabatic“, ale přesto se zdá, že je předepisována nenulová derivace teploty ve směru normály (str. 31)
- stagnační tlak na výstupní hranici nemusí být roven stagnačnímu tlaku na vstupu, zejména pokud je výstupů  $a$ /nebo vstupů více
- není popsáno, jak funguje podmínka symetrie v simulaci LES; zřejmě jsou symetrické i fluktuace

Závažnějším nedostatkem je, že i v tak zjednodušených středovaných rovnicích doktorand při implementaci vypustil některé turbulenti členy, aniž by to nějak zdůvodnil:

- v rovnici (3.4) vynechal člen úměrný  $grad\ k$
- ve stavové rovnici (3.5) vynechal turbulentní energii

Znaménko  $+$  v rovnici (3.56) je zřejmě chyba a mělo by být  $-$ . Chyba jsou zřejmě i dvojí závorky v rov. (3.1) nebo symbol jednotkové matice v rov. (3.3).

Pro testování metod doktorand použil 5 geometricky různorodých případů proudění, 3 vnitřní aerodynamiky, 2 vnější. Vlastnosti adaptace sítí s modely RANS jsou demonstrovány na rozlišení rázových vln v turbinové mříži, rázové vlny a odtržení na izolovaném leteckém profilu. Adaptace sítí a modely RANS a RANS-LES byly testovány na difuzoru podle měření Sajbena a kol. Zde se kupodivu ukazuje, že nejbližší měření jsou výsledky modelu RANS (SST) a tedy z kombinovaných modelů ty, kde je větší část pole v módu RANS. Jak modely turbulence, tak adaptivní sítě byly testovány na případě obtékání 2 za sebou seřazených válců. Ukazuje se, že mezi uvažovanými modely turbulence nejsou co do výsledků podstatnější rozdíly. Naopak adaptace umožnila dosáhnout lepších výsledků než na hrubé síti a podobných výsledkům na jemné síti. I když jsou zobrazeny hodnoty kritérií adaptace, tak podstatná informace, kolik se adaptací ušetří výpočetního času popř. paměti – chybí.

## **Prokázané znalosti doktoranda v daném oboru**

Doktorand v práci prokázal, že umí aplikovat a modifikovat pokročilé modely turbulence i náročnější (implicitní a upwind) numerické metody a postupy, jako je adaptace sítí. Kromě toho doktorand implementoval svoje modifikace do rozsáhlejšího softwaru.

## **Formální úroveň práce**

Práce má 125 stran včetně seznamu obrázků, tabulek, zkratk a značení veličin. Je psána anglicky, bez gramatických chyb a s malým množstvím tiskových chyb. Popisy v grafech jsou dobře čitelné.

## **Závěr**

Zpracování teoretické části práce lze sice hodnotit jako slabší, nicméně ukazuje, že doktorand musel zvládnout několik výrazně odlišných oblastí numerického modelování jako modely turbulence, implicitní metody řešení, adaptivní sítě a paralelní implementace v existujícím softwaru. Navržené modifikace modelů turbulence mohou být užitečné, i když na zvolených případech proudění výraznější zlepšení neukázaly. Stanovené cíle práce byly splněny. Práce splňuje požadavky zákona č. 111/1998 Sb., a proto práci doporučuji k obhajobě.

## **Dotazy**

1. Rov. (2.64) zavádí stochastické omezení turbuletní vazkosti v oblasti LES – je důvodem použití metody upwind?
2. Proč byly vynechány některé turbulentní členy v rovnicích (3.4), (3.5)?
3. Jaký je přínos adaptivity sítě ohledně výpočetního času ve srovnání s jemnou sítí?
4. Popis adaptace sítí zmiňuje pouze zjemňování. Docházelo také ke spojování buněk sítě?

V Praze dne 3.4.2024

Doc. Ing. P. Louda, PhD