

## Oponentský posudek na disertační práci Ing. J. Nikla „Modelling of non local energy transport in laser plasma”

Disertační práce doktoranda Ing. Jana Nikla se zabývá značně rozsáhlou problematikou věnovanou počítačovým simulacím interakce laseru s pevným terčem. V práci je obsažen popis tohoto problému. Vzhledem k tomu, že interakce je velmi složitý jev zahrnující různé mechanismy transportu energie, je také fyzikální popis velmi složitý zejména v případě intenzivních laserových impulzů, kdy energetické elektrony a fotony pronikají hluboko do terče. Zde autor uvádí potřebné modely nelokálního transportu. Autor v práci shrnuje teoretický popis problému, jednak přístup k modelování interakce laseru s terčem pomocí kinetické simulace problému v rámci Vlasov–Fokker–Planck–Maxwell modelu a dále metoda simulací pomocí magnetohydrodynamické Lagrangeovské tekutiny doplněná modely pro absorpci laseru a difúzní nebo nelokální transport elektronového tepla a radiace. Autor dále aplikuje numerickou metodu založenou na konečných prvcích vysokého řádu pro aproximaci relevantních testovacích problémů a dále pro další realistické simulace, které ukazují použitelnost těchto metod pro simulace uvedených úloh.

Disertační práce je členěna do úvodu a **tří částí**. **První část** je věnována fyzikálním popisům řešených problémů. První část je dále rozčleněna do pěti kapitol, kde každá z kapitol je věnována samostatné tématice. První kapitola se věnuje základní kinetické teorii, druhá kapitola se pak věnuje popisu hydrodynamiky bez důležitých problémů transportu energie. Tyto jsou popsány v dalších kapitolách věnovaných problému vedení tepla (kapitola 3 – heat transport) a sálání tepla (kapitola 4 – heat radiation). Kapitola 5 pak shrnuje metody pro absorpci laseru. **Druhá část** se zabývá numerickými metodami vyvinutými pro modelování fyzikálních jevů. Tyto metody jsou zejména založeny na metodě konečných prvků, z tohoto důvodu jsou přehled a základy této metody uvedeny v kapitole 6. Další kapitoly jsou pak věnovány numerickým řešením modelů prezentovaných ve stejném pořadí v první části. Kapitola 7 se zabývá aproximací kinetického Vlasov–Fokker–Planck–Maxwell redukováného modelu. Za podstatnou část autor nicméně považuje zejména aproximaci multi-fyzikálního magnetohydrodynamického problému v kapitole 8. Aproximace problémů vedení tepla a sálání je shrnuta v kapitole 9. Jako alternativa jsou v kapitole 10 popsány nelokální problémy vedení tepla sálání tepla pomocí. Konečně v kapitole 11 jsou popsány metody sledování laseru a jeho absorpce. **Třetí část** pak přináší numerické simulace realistických problémů interakce laseru. V kapitole 12 je srovnán 1D problém srovnán difúzní a nelokální problém vedení tepla a sálání. Kapitola 13 rozšiřuje model pro 2D případ s uvážením geometrických jevů jako je absorpce laseru a spontánní generování magnetického pole. V kapitole 14 je pak uveden demonstrační příklad 3D problému.

Práce se zabývá vysoce aktuálním tématem, obsahuje jeho fyzikální i matematický popis, je vhodně strukturovaná, psána velmi dobrou angličtinou, pečlivě se věnuje detailnímu popisu široké problematiky a popisuje podrobně použité velmi složité modely stejně jako i jejich aproximaci. Vzhledem k velmi složitému tématu musel autor obsáhnout značně komplikované téma a zvládnout i jeho velmi složitý popis. V práci je popsána řada velmi složitých matematických modelů fyzikálních jevů, následně je popsán i postup numerické diskretizace těchto modelů při použití konečných prvků respektující slabou formulaci daných problémů, práce obsahuje i celou řadu numerických testů a následně jsou popsány metody aplikované na relevantní případy. Práce samotná je značně rozsáhlá, má cca 190 stran, autor uvádí celkem 10 svých publikací v renomovaných časopisech (1 publikace je ve stavu submitted, ostatní buď přijaté, v tisku nebo již publikované), ve třech z těchto publikací je autor prvním autorem. Autor své výsledky dále publikoval i ve sbornících významných mezinárodních konferencí. Lze jednoznačně konstatovat, že autor zcela jednoznačně prokázal, že zvolené téma ovládá velmi dobře jak po teoretické stránce, tak z hlediska přibližného řešení pomocí numerických výpočtů.

Každé takto rozsáhlé práci je nicméně možné vytknout nějaké nepřesnosti, opomenutí nebo i



chyby. Z pozice matematika – a tedy z pozice člověka, který se v daném oboru příliš neorientuje - jsem nicméně práci nucen vytknout některé nedostatky. Autorovi bych zejména vytknul velmi často chybějící popis užívaných veličin nebo jejich nekonzistentní případně nejasné označování veličin, operátorů atp. Chybějící popis užívaných veličin/operací se týká například i úvodu do kinetické teorie,

kde např. na straně 17 je v rovnici (1) je užitá funkce  $F_\alpha$ , ale při vysvětlení je tatáž funkce brána bez tohoto indexu aniž by autor tuto nekonzistenci zmínil, nebo např. v rovnici (2) autor zřejmě užívá funkce  $f$  namísto dříve zmíněné funkce  $f_e$ . I v úvodní kapitole se autor dopustil několika dalších prohřešků, např. na straně 17 jsou prezentovány rovnice bez uvedení příslušných odkazů na literaturu, nebo používá nepřesné zavádějící formulace „total derivative can be expanded to form the Boltzmann(a new artificial pitch) equation“ a nevysvětlené značení (pravá strana rovnic (1) a (2)). Obdobných opomenutí jsem v práci registroval více, např. v rovnici (5) není vysvětlen význam členu  $\Delta t$  a to ani v doprovodném textu, v rovnici (6) je užíván operátor bez řádného vysvětlení, viz také rovnice (13), stejně jako není vysvětlen celý poměrně komplikovaný zápis. Obdobně v rovnici (20) je nejspíše chyba v zápise, kterou ovšem není jednoduché identifikovat, neboť autor bez označení zřejmě užívá operace tenzorového počtu a to bez jakéhokoliv upozornění (tyto operace jsou ovšem takto používány v celém textu, viz např. rovnice (59)). To by samo o sobě bylo z hlediska matematiky tolerovatelné, ale v kombinaci s dalšími chybami to čitelnost práce výrazně snižuje, viz již zmíněná chyba v rovnici (20) nebo v rovnici (88). Obdobným opomenutím se autor bohužel nevyhнул ani v kapitole 7 věnované metodě konečných prvků, kde pracuje s prostory  $V(\Omega)$  a  $V'(\Omega)$  bez jejich bližší specifikace a přitom v prostoru  $V'(\Omega)$  následně používá skalární součin. Při použití diskretizace oblasti používá nejasný zápis, oblast  $\Omega$  pak nahradí oblastí  $\Omega_h$ , kterou ovšem bere pouze jako podmnožinu sjednocení všech elementů ze  $\Sigma_h$ . Funkce z konečněprvkového prostoru  $V_h(\Omega)$  aproximujícího prostor  $V(\Omega)$  pak zapisuje vztahem (201), který ovšem v rovnici (202) používá chybně spolu se zápisem, který je nevysvětlen. V práci není uvedeno, jak je aproximován prostor  $V'(\Omega)$ . Obdobně dále na str. 75 je užito nevysvětleného značení v rovnicích (204), (205) a (206), (207). Na straně 77 je pak uveden nesprávný odkaz na tyto prostory.

Vzhledem k obrovskému rozsahu práce ale zmíněné nedostatky a nepřesnosti chápu spíše jako určitou míru zjednodušení nutnou k tomu, aby tato práce nepřekročila příliš obvyklý rozsah prací. I takto má práce 178 stran. Zde je třeba zmínit, že při takovém rozsahu práce a při takové složitosti tématu je prakticky nemožné vyhnout se určitým nedostatkům. Nicméně bych v této souvislosti položil následující otázky:

- 1) Popsané modely a simulace uvažují vždy pouze Lagrangeovský popis? Nedojde při tomto přístupu k přílišné deformaci výpočetní oblasti? Viz např. obrázek 32.
- 2) Na straně 71, rovnice 195, autor zmiňuje tzv „de Rham complex“. Uvádí „The operation connecting the spaces is noted above the arrow“ a dále „Practically, it is desired to follow the exact sequences ...“ Může autor toto tvrzení vysvětlit podrobněji?

**Závěr:** Předložená disertační práce má vynikající úroveň, prokazuje autorovy dobré předpoklady k samostatné tvořivé práci a obsahuje nové a originální výsledky. Z těchto důvodů ji doporučuji k obhajobě a navrhuji, aby Ing. J. Niklovi byl udělen titul PhD.

Praha 15. 7. 2022

Doc. RNDr. Petr Svacek, PhD.  
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, U 12101