

## Hybridní modelování ve fyzice plazmatu

Práce se zabývá metodami počítačového modelování nízkoteplotního plazmatu, přičemž pozornost je věnována jak spojitým, tak i částicovým technikám. V první části práce se autor zabývá některými aspekty Boltzmannovy rovnice a jejích momentů, stručně popisuje práci s programem COMSOL Multiphysics k řešení parciálních rovnic a shrnuje základní techniky částicového modelování.

Těžiště práce spočívá ve druhé části práce, počínaje 5. kapitolou. Autor se zde zabývá vybranými modely plazmatu, přičemž postupuje od modelů jednodušších k modelům stále složitějším. Modely nejdříve uvádí v obecné formě, poté diskutuje některé speciální otázky s nimi spojené, nakonec tyto modely numericky realizuje. Základní spojitý model (kap. 5) je založen na rovnicích kontinuity pro elektrony a kladné ionty a na Poissonově rovnici pro elektrický potenciál. Částicové toky v tomto i následujících modelech jsou určovány standardně elektrickým a difúzním driftem s konstantními koeficienty pohyblivosti a difúze, převzatými z literatury. V kapitole 6 je k tomuto spojitému modelu přidána rovnice pro energetickou bilanci elektronů, přičemž se uvažuje pouze interakce elektronů s elektrickým polem prostřednictvím Jouleova členu, nejsou tedy brány v úvahu srážky. Srážky elektronů s neutrály jsou do bilančních rovnic pro koncentrace elektronů a iontů a energii elektronů zahrnuty v další fázi modelování (kap. 7). Problém se závislostí reakčních koeficientů na neznámé rozdělovací funkci elektronů se v realizovaném modelu obchází apriorním předpokladem maxwellovského rozdělení pro teplotu elektronů 2 eV. Model v této zjednodušené formě vede k úplné ionizaci plazmatu. Vrchol práce představuje autorem navržený a numericky úspěšně realizovaný hybridní model (kap.8), který konzistentně řeší otázku závislosti reakčních koeficientů na rozdělovací funkci. Autor nejdříve ze zjednodušeného spojitého modelu odhadne průběh elektrického pole v pracovní oblasti, poté pro dané rozložení elektrického pole určí prostředky částicového modelování rozdělovací funkci elektronů a jí odpovídající reakční koeficienty v závislosti na poloze v pracovní oblasti. Takto stanovené reakční koeficienty dosadí do spojitého modelu a z něj určí nové rozložení elektrického pole. Výpočet je v několika cyklech opakován, až je dosaženo ustáleného stavu. V 9. kapitole je tento hybridní model aplikován na sondy konečných rozměrů. Dosáhl realistických a konzistentních výsledků, na nichž demonstroval, že metoda může být úspěšně aplikována i ke složitějším geometrickým uspořádáním.

Práce je přehledná, je psána srozumitelně a přitom úsporně. Autor při jejím vypracování prokázal rozsáhlé teoretické znalosti z oblasti fyziky plazmatu a počítačové fyziky, zároveň musel zvládnout komplikované prostředí programu COMSOL Multiphysics. Ke své práci využíval i další programy (MATLAB, C, UMFPACK, SPOOLIES ...). Práce uváděním různých alternativ ve formulaci rovnic, okrajových podmínek apod. inspiruje k dalšímu možnému výzkumu v této oblasti. Velmi užitečné jsou různé aproximativní a empirické formule a číselné údaje, soustředěné z nejrůznějších

pramenů, cenný je rovněž reprezentativní přehled publikací vztahujících se ke zkoumané problematice.

Přestože je práce psána pečlivě, došlo k některým drobným překlepům a nepřesnostem. Oproti tvrzení za rovnicemi (2.26), (2.27) (str. 20) jsou na pravých stranách těchto rovnic nuly bez výhrad (jde o zákony zachování **celkové** hmotnosti a **celkového** náboje). Překlep je na str. 61 (v rozdělovací funkci (7.13) má být  $(k_B T_e)^{3/2}$ ), i na str. str. 70<sub>10</sub> ( $\vec{F} = -e \vec{E}$ ). Veličina  $\vec{L}$  není operátor (18<sub>11</sub>), ale vektor reprezentující tepelný tok. Obecně diskutabilní je přejímání anglických termínů do češtiny, zde ve spojitosti se slovem sheath. Navrhuji, aby se autor v diskusi vyjádřil k následujícím otázkám:

- Lze navrhované modely beze změny použít i pro záporný potenciál sondy?
- Je možné do programu implementovat i jiná vyjádření částicových toků, např. uvažovat koeficienty difúze závislé na elektrickém poli?
- Jak se dospělo k okrajové podmínce  $T_e = 69\,600\text{ K}$  na sondě u rovnice (2.4) (str. 52, tab. 6.1)? Vedou obě rovnice (6.2) a (6.4) pro hustotu energie a teplotu elektronů k srovnatelným výsledkům ( $w_e \approx 3/2 kT_e n_e$ )?
- Do jaké míry se výsledky dosažené modely z kapitol 5, 6 a 8 shodují a v čem se naopak rozcházejí? Vede zahrnutí energetické bilance elektronů do modelu prostřednictvím Jouleova tepla k výraznější změně?

Autor v disertační práci prokázal vysokou erudici a tvořivost. Svými výsledky, které prezentoval na mezinárodních konferencích a publikoval časopisecky, přispěl k rozvoji nové progresivní oblasti hybridního modelování, v literatuře zatím poněkud opomíjené, která spojuje výhody a potlačuje nevýhody jen spojitého nebo jen částicového přístupu. Navržené algoritmy poskytují nové efektivní nástroje k výzkumu procesů v plazmatu, probíhajících v okolí elektrod.

#### **Závěrem konstatuji:**

Předložená práce Mgr. Petra Bartoše řeší aktuální problematiku, má velmi dobrou vědeckou úroveň a přináší řadu nových poznatků a výsledků z oblasti počítačového modelování a fyziky nízkoteplotního plazmatu.

Doktorand svou disertační práci jednoznačně prokázal způsobilost k samostatné tvořivé vědecké práci a schopnost přinášet původní vědecké výsledky.

**Práce, ve smyslu platných předpisů, splňuje všechny požadavky kladené na disertační práci a proto doporučuji, aby byla přijata k obhajobě jako podklad pro získání titulu Ph.D. a aby byl tento titul Mgr. Petru Bartošovi udělen.**

V Českých Budějovicích, 4. ledna 2007

