

dr hab. Izabella Zychor
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk



**Recenzja pracy doktorskiej pana mgr. Włodzimierza Stępniewskiego
„Modelowanie wyładowań typu Z-pinch”**

Praca została wykonana w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy pod kierunkiem dr. hab. Romana Zagórskiego.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska dotyczy modelowania zjawisk zachodzących w plazmie. Istotne znaczenie dla rozwoju ludzkości ma zapewnienie dostępu do energii bezpiecznej zarówno dla ludzi, jak i środowiska. Jednym ze źródeł takiej energii są reakcje syntezy jądrowej. Prace nad możliwością wykorzystania fuzji jądrowej jako wartościowej formy energii odnawialnej są prowadzone w ramach międzynarodowych projektów, na które przeznaczane są znaczne środki finansowe. Zadania badawcze obejmują projektowanie urządzeń i aparatury pomiarowej, jak również analizę wyników eksperymentalnych. Niezbędne na każdym etapie są obliczenia teoretyczne oraz symulacje numeryczne dotyczące modeli opisujących zachowanie się powstającej plazmy.

W rozprawie doktorskiej pana Włodzimierza Stępniewskiego badana jest ewolucja plazmy w układach opartych na efekcie pinchu - zjawiska ściskania materiału przewodzącego prąd elektryczny (np. plazmy) przez siły magnetyczne. W pracy zaprezentowane są zarówno modele fizyczne, jak i numeryczne stosowane do opisu i analizy zjawisk zachodzących w takich układach.

Praca liczy 93 strony i składa się z ośmiu rozdziałów, streszczenia w języku polskim oraz spisu ośmiu publikacji stanowiących podstawę prezentowanej rozprawy doktorskiej. Bibliografia, zamieszczona w rozdziale 8, zawiera także referencje do innych prac, których współautorem jest Doktorant.

Rozdział 1 stanowi wstęp o charakterze wprowadzającym w zagadnienia związane ze zjawiskami występującymi w plazmie. Przedstawione są modele analizujące te zjawiska poprzez zestawienie opisu kinetycznego oraz uśrednionego wraz z bardziej szczegółowym określeniem warunków ich stosowania.

Rozdział 2 przedstawia w bardzo zwięzły sposób cel pracy, zdefiniowany jako pokazanie przydatności wykorzystania zmodyfikowanej metody cząstek swobodnych do modelowania dynamiki plazmy w różnych układach typu Z-pinch. Doktorant podaje podstawowe informacje o opracowanym przez siebie kodzie numerycznym, który uwzględnia takie procesy atomowe, jak jonizacja i transport promieniowania, oraz realistyczne warunki brzegowe.

W rozdziale 3 opisane są dwa wybrane układy oparte na efekcie pinchu. Opis, zawierający historię badań rozpoczętych po II wojnie światowej, przedstawia także stan obecnie prowadzonych prac nad syntezą termojądrową. W dwóch podrozdziałach zawarte są informacje o układach typu „Plasma Focus” oraz z eksplodującymi drutami. Szczegółowo omówiony jest układ X-pinch, powstający poprzez skrzyżowanie kilku drucików. Plazmę obserwowaną w układzie „Plasma Focus” cechuje częściowa jonizacja, w przeciwieństwie do gęstej, wysoko zjonizowanej plazmy w układzie X-pinch. Ze względu na tak różne zjawiska fizyczne występujące w omawianych układach nie jest możliwe zastosowanie tylko jednego opisu.

Rozdział 4 zawiera opis modeli fizycznych wykorzystanych przy tworzeniu kodu numerycznego. W ośmiu podrozdziałach podane są równania dla nieidealnej magnetohydrodynamiki, współczynniki transportu, równania stanu określające zależność ciśnienia i energii wewnętrznej składników plazmy (elektronów i jonów) w warunkach równowagi termodynamicznej od temperatury i gęstości tych składników. Dynamika plazmy w układzie „Plasma Focus” jest opisywana przy użyciu modelu plazmy idealnej ze względu na nieduże gęstości. Doktorant wyczerpująco omawia wyprowadzenie równań płynowych z równania kinetycznego metodą Chapmana–Enskoga. Przedstawia założenia upraszczające prowadzące do układu równań nieidealnej magnetohydrodynamiki, które są podstawą kodu numerycznego użytego do symulacji dynamiki plazmy w układzie „Plasma Focus” oraz do modelowania zjawiska X-pinchu. Omówione jest zagadnienie sztucznej lepkości numerycznej, używanej do prawidłowego opisu fal uderzeniowych. Sformułowane są równania magnetohydrodynamiki uwzględniające jonizację. Omówione są warunki brzegowe. Opisane jest przybliżenie dyfuzyjne dla transportu promieniowania, które w przypadku ośrodka optycznie gęstego jest najważniejszym przybliżeniem.

Rozdział 5 poświęcony jest opisowi modelu numerycznego i przedstawia, poza równaniami, także zastosowany algorytm. Prezentowane są chronologicznie metody numeryczne stosowane do rozwiązywania równań hydrodynamiki. W tym rozdziale autor wskazuje na elementy, które stanowią jego osobisty wkład, obejmujący przede wszystkim stworzenie stosunkowo prostego niejawnego algorytmu dla członów dyfuzyjnych. Stosowanie metod jawnych powodowało silne ograniczenie kroku czasowego. Doktorant wyczerpująco opisuje zaproponowany przez siebie algorytm wyznaczania drugich pochodnych oraz algorytm wstawiania nowych punktów w przypadku niezapełnienia więcej niż jednego sektora kąтового, co jest istotne przy

rozwiązywaniu równania transportu promieniowania. Opisane są różne rodzaje niestabilności, które mogą powodować przerwanie obliczeń.

W rozdziale 6 zaprezentowane są wyniki symulacji. W pięciu podrozdziałach zawarta jest dyskusja wyników dla układu eksplodującego drutu, układów: X-pinch, Z-pinch i „Plasma Focus” oraz dla tokamaka TEXTOR. Przedstawione jest porównanie z rezultatami eksperymentów.

Wyniki uzyskane przy użyciu kolejnych wersji programu są ilustrowane przykładami zaczerpniętymi z opublikowanych artykułów, których Doktorant jest autorem lub współautorem.

Przedstawione jest również porównanie wyników otrzymanych dla trzech modeli fizycznych w przypadku eksplodującego drutu: model z parowaniem rdzenia, z całkowicie zjonizowanym rdzeniem oraz bez rdzenia. Rozkład gorących punktów jest dla wszystkich symulowanych przypadków bardzo podobny. Proszę o sformułowanie wniosku, który z tego wynika.

Omawiając symulacje wykonane dla układu X-pinch Doktorant podkreśla, że w obliczeniach nie widać strug plazmy na osi układu, które są obserwowane eksperymentalnie. Czy planowane jest prowadzenie obliczeń, które mogłyby sprawdzić sugestię Doktoranta, że strugi na osi są efektem zderzenia się zewnętrznych odparowujących warstw drucików ?

Przedstawione są ponadto wyniki symulacji dotyczących zapłonu i rozprzestrzeniania się fali spalania termojądrowego w kolumnie deuteru utrzymywanego polem magnetycznym. Zaobserwowano rozchodzenie się takiej fali tylko w jedną stronę, co w konsekwencji prowadzi do jej zaniku.

Doktorant opracował także kod do symulacji dynamiki plazmy w układzie „Plasma Focus”. Wyniki obliczeń porównał z eksperymentalnymi, uzyskanymi przy użyciu urządzenia PF-1000, znajdującego się w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, uzyskując dość dobrą zgodność.

Wykonane zostały ponadto symulacje plazmy dla tokamaka TEXTOR, działającego w przeszłości w Ośrodku Badawczym w Juelich w Niemczech. Wyniki symulacji wskazują, że w przypadku tokamaka z ergodycznym diwertorem dominujący jest transport równoległy.

W podsumowaniu w rozdziale 7 zawarty jest przede wszystkim opis wkładu autora w rozwój metody cząstek swobodnych. Doktorant podkreśla znaczenie wyboru odpowiedniego modelu fizycznego, a więc równań i warunków brzegowych, zależnego od opisywanego układu eksperymentalnego. Pewnym mankamentem jest zbyt ogólnikowe porównanie zgodności wyników symulacji z uzyskanymi w pomiarach, o czym świadczy tylko stwierdzenie w podsumowaniu: „Uzyskano dobrą zgodność symulacji z rejestrowaną w eksperymentach w Instytucie im. Lebedeva w Moskwie, ewolucją układu X-pinch W”.

Interesująca byłaby informacja, w jakich laboratoriach jest obecnie stosowany kod przygotowany przez Doktoranta. Czy uzyskane rezultaty będą wykorzystane przy planowaniu nowych urządzeń?

Nie udało się uniknąć w tekście pracy uchybień redakcyjnych. Niektóre z nich wymieniam poniżej.

Wielokrotnie w pracy jest stosowane określenie „ilość”, zamiast „liczba” w połączeniu z rzeczami policzalnymi, np. ilość cząstek, ilość zmiennych przestrzennych.

Niezbyt dokładne są opisy rysunków, np. Rys. 1.1 – brak wyjaśnienia krzywej oznaczonej symbolem „4”; podpis do Rys. 6.4 powinien być następujący: „Rozkłady temperatury w końcowej fazie rozwoju niestabilności”; Rys. 6.6: symbole „a” i „b” występują w tekście, ale brak ich na rysunku.

Poprawna nazwa odległości, jaką potrzebuje plazma do pełnego ekranowania naładowanej elektrycznie powierzchni, to „długość Debye’a” od nazwiska Petera Debye’a. Doktorant zamiennie używa nazw: Debaey’a, Debay’a, Debeaya, Debeya.

W podpisie pod Rys. 6.19 Doktorant wprowadza pojęcie „świecie” dla terminu „luminosity”. Używana nazwa w języku polskim to „światłość”.

Słowo „Schlieren” nie jest nazwiskiem. Należy używać określenia „technika Schlieren”, a nie „technika Schlierena”. Polska nazwa tej techniki to np. obrazowanie smugowe.

Brakuje wzoru oznaczonego (4.84). Na str. 77 powinien być odnośnik do pracy [85], a nie do pracy [35]. We wzorze (4.82) symbol pierwiastka jest wpisany niewłaściwie, podobnie jak we wzorach na długość fali de Broglie’a na stronach 26 i 35.

Staranniejsza edycja wzorów i porównanie z tymi, które są w cytowanych pracach, pozwoliłyby na uniknięcie szeregu błędów.

Powyższe uwagi nie mają wpływu na pozytywną ocenę pracy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa dowodzi dobrego przygotowania matematycznego Doktoranta. Autor udowodnił, że ma szeroką wiedzę z zakresu fizyki plazmy oraz znaczące doświadczenie w modelowaniu komputerowym. Wykazał się umiejętnością stosowania przybliżeń i oszacowań, co świadczy o dobrym opanowaniu metod numerycznych.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie mgr. Włodzimierza Stępniewskiego do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.



Świerk, dn. 11 lipca 2019