

Warszawa, 18.06.2019r.

dr hab. inż. Andrzej Bartnik  
Instytut Optoelektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej Włodzimierza Stępniewskiego pt.:**  
**Modelowanie wyładowań typu Z-pinch**

Rozprawa doktorska Włodzimierza Stępniewskiego dotyczy modelowania numerycznego dynamiki plazmy w układach typu z-pinch. Zbudowany przez W. Stępniewskiego dwuwymiarowy kod numeryczny bazuje na równaniach magnetohydrodynamiki w ujęciu dwupłynowym z uwzględnieniem procesów jonizacji i transportu promieniowania. Został on zastosowany do symulacji numerycznych plazmy powstającej w różnych układach eksperymentalnych: eksplodujący drut, eksplodujące druty w układzie X-pinch oraz Plasma Focus. Wyniki symulacji w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych zostały przedstawione w publikacjach do których odpowiednie odnośniki znajdują się w pracy.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów i spisu literatury. Pierwszy rozdział to Wstęp, w którym autor przedstawił pojęcie plazmy, jej występowanie w naturze oraz wytwarzanie w warunkach laboratoryjnych. Przedstawił też w dużym skrócie modele fizyczne plazmy i zakresy ich stosowania.

W drugim rozdziale autor przedstawił cel pracy czyli wykazanie przydatności zmodyfikowanej metody cząstek swobodnych do modelowania dynamiki plazmy w układach typu z-pinch. Wskazał tutaj na bardzo ważne elementy opracowanego kodu numerycznego a mianowicie uwzględnienie procesów atomowych oraz warunków brzegowych na swobodnym brzegu i na elektrodach.

Trzeci rozdział poświęcony jest omówieniu różnego typu układów eksperymentalnych, w których silnopądowe wyładowanie elektryczne prowadzi do wywołania efektu typu Z-pinch. W rozdziale tym W. Stępniewski omówił samo zjawisko Z-pinch, pokrótce przedstawił początki badań nad tym zjawiskiem oraz przedstawił współczesne układy badawcze bazujące na tym efekcie. Najwięcej uwagi poświęcił układom typu Plasma Focus oraz układom z eksplodującymi drutami.

W czwartym rozdziale autor przedstawił modele magnetohydrodynamiczne a w szczególności równania nieidealnej magnetohydrodynamiki, stanowiące podstawę kodu numerycznego użytego przez siebie do symulacji dynamiki plazmy. Przeanalizowane zostały tutaj skale czasowe związane min. z ustalaniem maxwellowskiej funkcji rozkładu prędkości elektronów i jonów oraz wyrównywaniem temperatur elektronowych i jonowych. Przedstawiony został układ równań dwupłynowej magnetohydrodynamiki dla całkowicie zjonizowanej plazmy składającej się z elektronów i jonów o ładunku  $Ze$ , z zastosowanymi uproszczeniami, wprowadzone zostało pojęcie tensora lepkości, oraz dołączone zostały równania Maxwella. Bardzo dużo uwagi autor poświęcił równaniu transportu w polu magnetycznym, w szczególności jego anizotropii. Przedstawił formuły umożliwiające wyznaczenie współczynników transportu dla plazmy idealnej oraz, w osobnym podrozdziale,

dla plazmy nieidealnej: częściowo tylko zjonizowanej bądź plazmy o dużej gęstości i umiarkowanych temperaturach, gdzie istotne są efekty degeneracji. Następny podrozdział autor poświęcił równaniom stanu, istotnym dla plazmy powstałej z eksplozji metalowego drutu. Wskazał tutaj na zakresy stosowalności półempirycznych formuł występujących w literaturze. Dalej przedstawione zostały problemy dotyczące kinetyki procesów atomowych. Przedstawione zostały odpowiednie formuły dotyczące jonizacji oraz rekombinacji, obniżenia potencjału jonizacji oraz efektów związanych z częściową degeneracją. Autor z bardzo dużą starannością podszedł też do sformułowania warunków brzegowych, w szczególności warunków na elektrodach układów eksperymentalnych. O ile można uznać, że wpływ elektrod na plazmę powstającą w wyniku eksplozji pojedynczego drutu, zwłaszcza w jej środkowej części jest pomijalny, o tyle w układzie Plasma Focus wpływ ten jest niewątpliwie bardzo duży. Autor bardzo szczegółowo rozpatrzył efekty występujące na granicy plazma-materiał elektrody, przeanalizował wiele prac dotyczących tego zagadnienia i przedstawił wielkości związane z warunkami brzegowymi zastosowane w swoim modelu. W ostatnim podrozdziale autor przedstawił zagadnienia dotyczące transportu promieniowania. Zastosował on tzw. przybliżenie dyfuzyjne. Przybliżenie to nie uwzględnia oczywiście całej złożoności procesów emisji i absorpcji promieniowania, zwłaszcza promieniowania liniowego, umożliwia jednakże uzyskanie dobrego przybliżenia dla transportu promieniowania w ośrodku optycznie gęstym.

Piąty rozdział to opis modelu numerycznego. Budując swój kod numeryczny, autor bazował na metodzie cząstek swobodnych, zmodyfikowanej przez prof. Jacha i stosowanej min. do modelowania zjawiska kumulacji i przebijania. Autor zastosował szereg modyfikacji związanych z możliwością uwzględnienia efektów fizycznych mających miejsce w plazmie w szerokim zakresie parametrów. Istotnym jego wkładem w rozwój metody punktów swobodnych było stworzenie stosunkowo prostego, niejawnego algorytmu dla członów dyfuzyjnych. Dalej, przybliżając lokalnie rozkład danej wartości wprowadził odpowiednie wagi w postaci umożliwiającej usuwanie osobliwości i poprawę wyznaczania gradientów. Zaproponował też własny algorytm wyznaczania drugich pochodnych w równaniach nieidealnej magnetohydrodynamiki, pozwalający na uniknięcie zaniżania wartości pierwszych pochodnych, co miało miejsce w pierwotnej wersji metody cząstek swobodnych. W metodzie tej czasochłonny okazuje się algorytm wyboru sąsiadów. W. Stępniewski opracował algorytm wstawiania nowych punktów w przypadku niezapełnienia więcej niż jednego sektora kąтового. Okazuje się to szczególnie ważne przy rozwiązywaniu równania transportu promieniowania.

W rozdziale szóstym autor przedstawił wyniki symulacji numerycznych zjawiska Z-pinch dla różnych warunków eksperymentalnych. Najprostsza z konfiguracji eksperymentalnych dotyczy efektu Z-pinch powstającego w wyniku eksplozji pojedynczego drutu w wyniku silnoprądowego wyładowania elektrycznego. W najprostszym przypadku zastosowano wariant kodu bazujący na modelu idealnej MHD. Pomimo dużych uproszczeń, dobierając odpowiednio warunki początkowe, udało się uzyskać jakościowa zgodność przebiegu zjawiska z wynikami eksperymentu. Dalej autor przedstawił wyniki symulacji z zastosowaniem wariantów kodu uwzględniających jego własne modyfikacje jak wprowadzenie nowej metodyki wyznaczania drugich pochodnych oraz przejście do modelu nieidealnej MHD z uwzględnieniem procesów atomowych. Dodatkowo, w symulacjach

uwzględnione zostało istnienie dwóch stref: stosunkowa rzadkiej korony oraz gęstego, zimnego rdzenia, co wynikało z pomiarów optycznych. W prostszym wariacie nie uwzględniano procesów obecnych w początkowym stadium eksplozji drutu, kiedy rdzeń jest mieszaniną fazy ciekłej i gazowej. W bardziej zaawansowanym wariacie ta faza została uwzględniona. Autor zamieścił wyniki symulacji ewolucji sznura plazmowego dla tych różnych wariantów kodu, a w szczególności dokonał porównania dla trzech przypadków: z parowaniem rdzenia, z całkowicie zjonizowanym rdzeniem oraz bez rdzenia. O ile we wszystkich przypadkach następuje rozwój niestabilności typu  $m=0$  to występują duże różnice jeśli chodzi o maksymalne wartości temperatury i gęstości.

W dalszej części tego rozdziału autor przedstawił wyniki symulacji plazmy wytwarzanej w układzie X-pinch. Autor musiał tutaj dokonać pewnych uproszczeń odnośnie geometrii takiego układu, tak aby można go było traktować jak dwuwymiarowy. W większości symulacji ograniczył się do dwuwymiarowego modelowania obszaru przecięcia drutów. Obszar ten został potraktowany jako paraboloida bądź połączenie dwóch obszarów stożkowych stykających się wierzchołkami. W obu wariantach następuje utworzenie miniaturowego sznura plazmowego, w którym następuje rozwój niestabilności przewężeniowych. Istotne różnice dotyczą maksymalnych parametrów plazmy, znacznie wyższych w wariacie z geometrią stożkową. Ponadto, w wariacie tym następuje rozwój tylko pojedynczego gorącego punktu.

W dalszej części rozdziału W. Stępniewski przedstawił wyniki symulacji przeprowadzonych dla plazmy powstającej w układzie Plasma Focus. Jest to problem o tyle bardziej złożony, że należy uwzględnić fazę przebicia i wytworzenia warstwy prądowej a następnie jej akcelerację wzdłuż elektrod oraz, w końcowej fazie w kierunku osi. Z drugiej strony nie ma tutaj zimnego rdzenia, jak to ma miejsce, w przypadku eksplodującego drutu, gęstość plazmy w końcowym stadium jest też o kilka rzędów wielkości niższa, nie ma więc problemu degeneracji. Uzyskane wyniki symulacji są zbliżone do wyników pomiarów eksperymentalnych.

Dodatkowo w rozdziale tym autor przedstawił też wyniki symulacji dotyczących syntezy termojądrowej w kolumnie deuteru, gdzie jednak nie ma odniesienia do eksperymentu. Przedstawił też wyniki symulacji plazmy dla tokamaka z ergodycznym diwertorem.

Ostatni rozdział to podsumowanie, gdzie autor przedstawił najważniejsze zalety zastosowanego kodu numerycznego, uwypuklając swój oryginalny wkład do jego rozwoju. Zwrócił też uwagę na bardzo istotny aspekt, a mianowicie problem odpowiedniego doboru równań i sformułowania warunków brzegowych dla określonych warunków eksperymentalnych.

W. Stępniewski włożył bardzo dużo pracy w rozwój kodu numerycznego zastosowanego głównie do symulacji zjawiska Z-pinch w różnych konfiguracjach eksperymentalnych. Dotyczy to zarówno samego algorytmu jak i włączonych elementów modelu fizycznego. Bardzo istotnym było niewątpliwie włączenie procesów atomowych, które mają istotny wpływ na przebieg zjawiska, jeśli wziąć pod uwagę, że nawet kilkadziesiąt procent energii z gorących obszarów może być wypromieniowane w formie promieniowania rentgenowskiego i skrajnego nadfioletu. Jak pokazują symulacje plazmy w układzie X-pinch

przyjęcie określonej konfiguracji eksperymentalnej a więc i warunków brzegowych ma duży wpływ na symulację rozwoju sznura plazmowego. Mam w związku z tym pytania do autora, na które powinien odpowiedzieć w trakcie publicznej obrony:

- Na ile wyniki symulacji plazmy w układzie X-pinch odpowiadają wynikom eksperymentu, jeżeli w zależności od przyjętej geometrii początkowej uzyskuje się bardzo duże różnice parametrów plazmy?
- W trakcie rozwoju sznura plazmowego i formowania się przewęzek powstają obszary o silnie zróżnicowanych parametrach. Można się spodziewać, że w pewnych obszarach plazma będzie optycznie cienka, w innych gruba, może to dotyczyć tylko pewnych linii widmowych. Czy zdaniem autora pełne uwzględnienie kinetyki procesów atomowych i transportu promieniowania (gdyby to było możliwe) miałyby istotny wpływ na wyniki symulacji, czy niewielki?
- Autor z bardzo dużą starannością podszedł do procesów mających miejsce w początkowej fazie eksplozji drutu, który jest przewodnikiem prądu. Wiadomo jednak, że podobne efekty jak w przypadku eksplodujących drutów uzyskiwano w wyniku eksplodujących włókien dielektrycznych (tworzenie przewęzek, silna jonizacja, emisja promieniowania rentgenowskiego). Jaki zdaniem autora jest przebieg początkowej fazy wyładowania w takim przypadku?

Jeśli chodzi o moją ocenę pracy to oceniam ją bardzo wysoko pod względem merytorycznym, mam jednak szereg uwag odnośnie strony edytorskiej. Autor niestety nie ustrzegł się wielu błędów językowych, których nie będę wymieniał. Większym niedociągnięciem są jednakże błędy w przytaczanych równaniach i formułach. Podam kilka przykładów:

We wzorach 4.1-3 muszą być błędy, nie wiadomo, które są poprawne, czy poprawne jest  $\sqrt{m}$  czy  $m$ ,  $kT^{3/2}$  – zapewne powinno być  $(kT)^{3/2}$ , pytanie jaki jest układ jednostek

We wzorze 4.6,  $\frac{m}{2}$  zapewne powinno być po prawej stronie

W równaniach ciągłości 4.9, 4.10 - brak operatora  $\nabla$

Str.23 w formule

$$\eta_0 = m_e / (en_e \tau_{ei})$$

w mianowniku jest  $e$ , na str.24 w podobnej formule

$$\eta = \frac{m_e}{n_e e^2 \tau_e}$$

mamy  $e$  w drugiej potędze. Jedna z nich musi być błędna.

Porównując wzór 4.45

$$\tau_{\eta, \chi} = A_{\eta, \chi} \frac{(1.5kT_e + E_f)^{3/2} \bar{\gamma}_e(Z)}{Z^2 n_i e^4 \ln \Lambda_{ei} S(0)} \left(1 - \frac{B_{\eta, \chi} kT_e}{kT_e + E_f}\right)^{-1}$$

Ze wzorem 4.46

$$\tau_{ei} = \frac{3m_e (kT_e)^{3/2}}{2\sqrt{2} z^2 n_i e^4 \ln \Lambda_{ei}} \left[1 + \exp\left(-\mu/kT_e\right)\right] F_{1/2}\left(\mu/kT_e\right),$$

Łatwo zauważyć, że poza wielkościami bezwymiarowymi w liczniku drugiego wzoru występuje  $m_e k$ , czego nie ma w pierwszym. Oznacza to, że jeden z nich jest błędny Wyrażenie na długość fali de Broglie'a na str.26

$$\lambda_{\text{Broglie}} = \frac{h}{\sqrt{3}m_e k (T_e^2 + T_e^2)^{1/4}}$$

jest błędne,  $m_e k$  w mianowniku powinno być w potęgze  $1/2$   
W równaniu 4.61

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\rho}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Przed drugim członem po prawej stronie powinien być minus

Formuły dotyczące współczynników jonizacji i rekombinacji (str.33) są niezgodne z formułami w podanych odnośnikach literaturowych [53,54]. W szczególności w wielu miejscach zamiast  $I_z/kT_e$  jest  $kT_e/I_z$ . Jako przykład można podać formuły dotyczące jonizacji:

Z publikacji [54]

$$S(z, j; z+1, 0) = 2.429 \times 10^{-6} \frac{\xi_z T_e^{1/2}}{\chi(z, j)^2} \exp\left(\frac{-\chi(z, j)}{T_e}\right) \frac{\text{cm}^3}{\text{sec}}$$

Oraz z pracy

$$S = \frac{9 \cdot 10^{-6} \zeta_e (kT_e/I_z)^{1/2}}{I_z^{3/2} (4.88 + kT_e/I_z)} \exp(-kT_e/I_z)$$

W równaniu 4.70 występuje nieznaną wielkość oznaczoną jako  $i$ . Ponadto nie ma zgodności jednostek w poszczególnych członach ponieważ po lewej stronie brak stałej  $k$ , natomiast po prawej jeden z członów zawiera pojedyncze różniczkowanie po czasie a drugi podwójne, chyba, że nieznaną wielkość  $i$  ma wymiar czasu.

Str 35 błędna formuła na falę de Broglie'a, inna zresztą niż na str.26. Prawdopodobnie miało to być wyrażenie na  $\lambda^2$ .

W równaniu 4.106 prawa strona zapewne ma przez pomyłkę dwukrotnie  $k_v F_v$

Ponadto, ponieważ autor nie używa układu SI, powinien podać układ jednostek stosowany w równaniach czy formułach dotyczących wielkości fizycznych.

Powyższe niedociągnięcia nie umniejszają wartości pracy, należy stwierdzić, że praca jest oryginalna o wysokim poziomie naukowym. **W związku z tym rekomenduję dopuszczenie do publicznej obrony.**

