

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Ireny Ivanovej-Stanik  
pt. „Numerical Studies of Impurity Transport in JET ILW Discharges”**

Rozprawa doktorska mgr Ireny Ivanovej-Stanik pod tytułem „Numerical Studies of Impurity Transport in JET ILW Discharges” została wykonana pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. Romana Zagórskiego przy pomocy promotora pomocniczego – dr. Agaty Chomiczewskiej. Jest to rozprawa dość nietypowej doktorantki – zazwyczaj dorobek doktoranta przystępującego do obrony to kilka, ewentualnie kilkanaście publikacji. Zajrzenie do wyszukiwarki scopus.com w przypadku mgr Ireny Ivanovej-Stanik daje 127 pozycji. Jest tam kilka wyników fałszywie pozytywnych, ponieważ wyszukiwarka Scopus potrafi pomieszać działy „authors” i „contributors” w przypadku publikacji wykorzystujących dane z wieloosobowych eksperymentów, ale nie ma ich wiele. W większości są to prace wieloosobowe w dziedzinie, w której publikuje się dużo, ale przyglądając się kolejności nazwisk w liście autorów można stwierdzić, że w znakomitym procencie tych publikacji doktorantka jest jednym z autorów głównych, a całkiem często jest pierwsza. Układ ten dowodzi, że i jej wkład w publikację jest główny, a czasami nawet decydujący, więc wysoka ocena dorobku jest w pełni zasłużona.

Doktorantka zajmuje się modelowaniem plazmy wysokotemperaturowej w maszynach, w których wykorzystuje się magnetyczne uwięzienie plazmy do prowadzenia syntezy jądrowej, skupiając się na przewidywaniu zachowania się znajdujących się w niej zanieczyszczeń i ich wpływu na parametry plazmy. Plazma używana do syntezy jądrowej helu z wodoru ani nie jest, ani nie może być czystą plazmą wodorową. Zanieczyszczenia (już pomijając będący wynikiem reakcji jądrowych hel) pojawiają się w niej z powodu uwalniania atomów i jonów ze ścian komory próżniowej, doprowadzeń gazów itp. ale także są wprowadzane z rozmysłem, w celu poprawienia stanu plazmy i ochrony tych części komory, do których doprowadzane są strumienie plazmy (tzw. dywertora). Problemy tego typu pojawiają się niezależnie od tego, z czego zbudowana jest maszyna, a nawet jakiego jest typu (tokamak czy stellarator). Doktorantka w swoim dorobku ma prace odnoszące się do większości działających (ASDEX, WEST, itp.) czy też planowanych (ITER, DEMO) tokamaków, ale w ramach rozprawy doktorskiej ograniczyła się do jednego z nich – tokamaka JET ze ścianą metalową (berylowo-wolframową), zwaną żargonowo ITER-like wall (ILW), ponieważ tokamak JET jest w tym zakresie polem testowym dla będącego w budowie reaktora ITER.

Modelowanie przepływu zanieczyszczeń w plazmie termojądrowej jest bardzo ważnym działem. Można powiedzieć, że zanieczyszczenia dzielą się na pomocne i szkodliwe. Szkodliwe zanieczyszczenia emitują promieniowanie w zakresie wysokotemperaturowym (1 keV i wyżej), pozbawiając rdzeń plazmy energii, potrzebnej do otrzymania warunków odpowiednich do zajścia syntezy jądrowej. Pomocne promieniują przede wszystkim w zakresie relatywnie niskotemperaturowym (poniżej 1 keV), czyli na brzegach, poprawiając uwięzienie plazmy oraz chroniąc ściany tokamaka, przede wszystkim dywertor. Nawet jednak pomocne zanieczyszczenia nie są jednoznacznie pomocne – dostając się do rdzenia plazmy przeszkadzają w zachodzeniu reakcji termojądrowych zmniejszając procentowy udział izotopów wodoru, a uderzając w ściany komory powodują, z racji swej większej masy, większą erozję niż ta, która zachodzi pod wpływem izotopów wodoru. Wszystkie te efekty dla istniejących tokamaków można i trzeba sprawdzić eksperymentalnie, ale posiadanie modelu numerycznego po pierwsze zmniejsza liczbę eksperymentów koniecznych do ustalenia zachowania się plazmy przy różnych zanieczyszczeniach,

które są kosztowne i czasochłonne, a także daje możliwość przewidywania zachowania się plazmy w reaktorach, które są dopiero na etapie planowania. Takimi obliczeniami właśnie zajmuje się doktorantka, głównie we współpracy ze swoim promotorem prof. Zagórskim oraz ich współpracownikiem dr Telescą.

Praca doktorska mgr Ireny Ivanovej-Stanik składa się z 12 rozdziałów, z których 1–4 są rodzajem wstępu opisującego podstawy dziedziny, a dalsze odnoszą się już wprost do pracy doktorantki.

Rozdział pierwszy opisuje zasady syntezy jądrowej w plazmie uwięzionej w polu magnetycznym, przedstawia zasady funkcjonowania tokamaków, a w szczególności tokamaka JET i kończy się przedstawieniem motywacji i tematu pracy, którym jest przedstawienie systemu modelowania COREDIV, zgodności jego wyników z eksperymentem oraz użyteczności dla zrozumienia wielu zjawisk związanych z transportem domieszek wewnątrz plazmy w tokamaku JET ze ścianą metalową (JET-ILW).

Rozdział drugi i trzeci omawiają podstawy fizyczne zachowania się domieszek w tokamaku, ich pochodzenie, transport i generację promieniowania elektromagnetycznego. Trzeba pamiętać, że główną metodą wpływu domieszek na zachowanie się plazmy jest właśnie generacja specyficznego dla domieszki promieniowania w określonym zakresie temperatur, zmniejszająca energię wewnętrzną plazmy w określonym jej rejonie. Prezentowane tam równania są omawiane pod kątem, pod jakim zastosowane są w używanym przez doktorantkę kodzie modelującym COREDIV, w częściach odnoszących się do modelowania procesów atomowych i w częściach zajmujących się procesami transportu.

Ponieważ sprawdzenie poprawności działania kodu modelującego zachodzi przez porównanie jego wyników z wynikami eksperymentalnymi, rozdział czwarty omawia część aparatury diagnostycznej tokamaka JET. Jest to skrócone przedstawienie pomiarów temperatury i gęstości elektronowej plazmy za pomocą spektroskopii laserowej (rozpraszania Thomsona), pomiarów mocy wypromieniowanej i rozkładu promieniowania plazmy w całym zakresie widmowym oraz tych pomiarów spektroskopowych, które są szczególnie ważne dla oszacowania gęstości domieszek w plazmie i ich zachowania. Są to spektroskopia w zakresie dalekiego i próżniowego ultrafioletu, głównie do obserwacji wysokojonizowanych jonów domieszek cięższych (W, Ni) oraz spektroskopia z wymianą ładunku (CXRS – charge exchange recombination spectroscopy), do pomiaru gęstości lżejszych domieszek (Be, Ne).

Piąty rozdział jest w pewnym sensie przejściowy – autorka omawia w nim różne programy i systemy programów do modelowania plazmy stosowane do numerycznej analizy plazmy w tokamakach, a w szczególności do modelowania tokamaka JET. Dzielą się one na najczęściej uproszczone przestrzennie (1 – 1.5D) kody do modelowania rdzenia plazmy, takie jak JETTO i JETTO-SANCO oraz znacznie bardziej skomplikowane przestrzennie (2D i bardziej) kody modelujące rejony na zewnątrz ostatniej zamkniętej powłoki magnetycznej (separatrysy), jak chociażby EDGE2D. Wyniki kodów odnoszących się do rdzenia mogą być stosowane jako warunki wejściowe dla kodów modelujących warunki na zewnątrz separatrysy i odwrotnie, natomiast istnieją również systemy, w których te rejony są połączone w sposób samouzgodniony, takie jak JINTRAC lub też używany przez autorkę COREDIV. Podczas omawiania programów do modelowania rdzenia plazmy przedstawiono również modułowy system o nazwie European Transport Solver rozwijany w ramach grupy Integrated Tokamak Modeling, w który doktorantka miała swój wkład, kreując i rozwijając jego oparty na części wewnętrznej kodu COREDIV moduł do modelowania zachowania się zanieczyszczeń, więc jest to nie tylko omówienie narzędzi, którymi posługuje się doktorantka, ale także części wykonanej przez nią pracy.

Od szóstego rozdziału do końca doktorantka omawia wyniki swoich własnych prac. W większości cytuje prace opublikowane już w czasopiśmie międzynarodowych, ale np. w rozdziałach 8, 9 i 11 pojawiają się wyniki, które wyglądają na jeszcze nieopublikowane (np. analiza pary impulsów o podobnej konfiguracji, z których jeden zakończony jest zerwaniem sznura plazmowego, a drugi nie, i próba odpowiedzi na pytanie co spowodowało różnicę, czyli sekcje 8.2.1 oraz 9.1). Zakres naukowy tych prac jest bardzo szeroki, cytuje bardzo użyteczne dla całej

społeczności JETa wyniki i pokazuje dużą wiedzę i wartość działalności naukowej autorki, dowodząc że symulacje za pomocą kodu COREDIV, jeżeli nawet nie tak dokładne jak za pomocą kodów konkurencyjnych, doskonale nadają się do odtworzenia trendów i ich ekstrapolacji przy zmianie różnych parametrów zewnętrznych wpływających na stan impulsu plazmowego w JET, takich jak:

- energia i typ jej dostarczania z zewnątrz (za pomocą anteny ICRH lub wiązek neutralnych NBI);
- ilość wpuszczanego do plazmy gazu, tak paliwa (deuteru), jak i gazów domieszkujących – azotu lub gazów szlachetnych;

a przy tym z racji mniejszej komplikacji przestrzennej wyniki te, jak podejrzewam, są osiągalne znacznie szybciej.

Jednym z podstawowych nurtów obliczeniowych prezentowanych przez autorkę są numeryczne badania wysokoenergetycznych impulsów domieszkowanych neonem oraz przewidywania jak takie impulsy mogą wyglądać w plazmie deuter-tryt (dotąd w tokamaku JET-ILW przeprowadzane były tylko eksperymenty z plazmą wodorową i deuterową). Jest to absolutnie zrozumiałe, biorąc pod uwagę że eksperymenty JET-ILW i obliczenia autorki są przygotowaniem pod działanie reaktora ITER, w którym wg aktualnych przewidywań taka właśnie konfiguracja ma być główną. Podsumowując, praca doktorska mgr Ireny Ivanovej-Stanik jest sensownie pomyślanym i zorganizowanym przedstawieniem bardzo dużego i cennego dorobku naukowego doktorantki w dziedzinie modelowania plazmy w JET-ILW.

Nie jest to jednakże praca idealna. Od strony typograficznej, napisana wyraźnie w LaTeXu, jest poprawna, rysunki są czytelne i ich podpisy wystarczające. Niestety, zwłaszcza w częściach bardziej ogólnych, nie oznacza to braku literówek, czasami bardzo zabawnych (np. „nobel gases” czy „axiallity” zamiast auxiliary). W rozdziale 10 i później uderza bardzo duża liczba zgubionych spacji. Jest sporo błędów gramatycznych, niezręczności, bardzo też widać niechęć autorki do przecinków. W częściach bardziej opisowych pojawiają się błędy merytoryczne, czasami dające dość absurdalny wynik, np. w rozdziale 4 autorka najpierw pisze, że używany do oszacowania gęstości wolframu w JET spektrometr KT7 ma zakres widmowy 140–440 Å, a w następnym zdaniu mówi, że używane jest quasi-continuum w zakresie 5 nm. Oba te zdania są prawdziwe, ale odnoszą się do dwóch różnych spektrometrów, obu z diagnostyki KT7 – zakres widmowy do spektrometru KT7/2 (VUV), a pasmo w okolicy 5 nm używane dla oszacowania zawartości wolframu w plazmie mierzone jest przez spektrometr KT7/3 (XUV).

Największym problemem pracy jest jednak nie jej „niedoczyszczenie”, tylko trochę nieodpowiednie i nieuporządkowane jej napisanie. Głównym nurtem pracy doktorskiej powinno być zaprezentowanie wkładu doktorantki w określone badania. Doktorantka średnio to ułatwia – z jednej strony na samym początku pracy mamy przedstawione 14 publikacji, z których materiału doktorantka korzystała (i który, z analizy listy autorów, jest w sporym procencie jej autorstwa). Z drugiej strony, tylko 9 z tych publikacji jest cytowanych później w pracy, chociaż tytuły wskazują, że reszta również mogłaby być. Z drugiej strony, w pracy cytowane są (ref. 144, 161 i 169) inne prace również jej współautorstwa, których wyniki autorka prezentuje, ale które nie występują na wstępnej liście. Oczywiście, 9 prac to absolutnie wystarczający materiał na pracę doktorską (a tym bardziej 12!), ale powyższa mieszanka dokłada się do wrażenia, że praca była przygotowana pośpiesznie i w momencie, kiedy doktorantka pisała dalsze rozdziały, już zapomniała, które prace miała na początku w planie zacytować.

W dwóch miejscach rozprawy pojawiły się tezy, co do których uważam, że przydałoby się je trochę bardziej skomentować i proszę, żeby doktorantka odniosła się do nich podczas obrony:

1. W sekcji 8.1 autorka omawia wykonane za pomocą kodu ETS symulacje, mające dać sugestię co do powodów faktu, że koncentracja wolframu w centrum plazmy jest znacznie większa przy zewnętrznym podgrzewaniu metodą rezonansu synchrotronowego niż wiązkami neutralnymi. O ile dobrze zrozumiałam, wyniki modelowe wskazują, że rozkład wolframu w plazmie jest bardziej zgodny z tezą, że większe jest źródło wolframu, a nie większa przenikalność przez granicę centrum

plazmy (prędkość konwekcji). Jest jednak pozostawiona wątpliwość, cytuję „effect of a radially shaped convective velocity (not tested here)”. Jak miałyby to wyglądać? Czym miałyby się różnić od wersji testowanej?

2. W sekcji 8.2.1 oraz 9.1 autorka sugeruje, że po pierwsze przerwanie sznura plazmowego w impulsie 92347 oraz poprawne zakończenie impulsu 92442 dadzą się wytłumaczyć różnicą gęstości plazmy w okolicy separatrysy, która działa jak bariera przeciwko akumulacji wolframu w centrum plazmy. Rzecz w tym, że wyniki z rysunku 9.3 sugerują dość dramatyczną różnicę w zawartości wolframu w centrum plazmy dla różnicy w gęstości na separatrysie w zakresie 10-15%. Eksperymentalne oszacowania gęstości wolframu w centrum plazmy dla czasu 14,25 s (rysunek 8.9) różnią się jednak dla tych dwóch impulsów dość niewiele, wygląda na to, że większa różnica jest dla gęstości niklu, która to wg obliczeń z sekcji 9.1, powinna na zmiany gęstości na separatrysie reagować znacznie słabiej. Czy nie ma tu jednak jakiejś innej różnicy, poza gęstością plazmy na separatrysie, która mogłaby tłumaczyć różnicę zachowania się tych dwóch impulsów podczas wyłączenia grzania plazmy?

Wszystkie te uwagi nie zmieniają mojej opinii o wysokiej zawartości merytorycznej samej pracy doktorskiej, jak i użyteczności wykonywanej przez doktorantkę pracy w ramach projektu JET. Z naddatkiem spełnia ona warunki formalne i merytoryczne stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje więc o dopuszczenie mgr Ireny Ivanovej-Stanik do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Dr hab. Ewa Pawelec, prof. UO