

Dr hab. Prof. IFM PAN Wojciech Kempański
Zakład Fizyki Niskich Temperatur,
Instytut Fizyki Molekularnej PAN
ul. M. Smoluchowskiego 17
60-179 Poznań

Poznań 30.04.2016

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Macieja Grabowskiego

zatytułowanej:

*„Modelowanie stanów awaryjnych systemu kriogenicznego
reaktora termonuklearnego”*

W dobie pytań o przyszłość energetyczną świata podjęcie tematyki z obszaru energetyki jądrowej jest decyzją ważną i aktualną. Zwłaszcza, że Autor zajął się problematyką związaną z ważniejszą częścią zagadnień jądrowych dotyczącą energetyki termojądrowej. W przeciwieństwie do reaktorów jądrowych produkujących trudne do przechowywania, utylizacji czy zagospodarowania odpady promieniotwórcze, reaktory termojądrowe uważane są za niewyczerpalne źródła czystej energii. W Europie powstały dwa poważne ośrodki, w których kreowane są (lub w najbliższej przyszłości będą) rozwiązania techniczne dające nadzieję na urealnienie pomysłów związanych z tą technologią. Są to Greifswald w Niemczech (reaktor Wendelstein 7-X), gdzie w największym na świecie stellaratorze podjęto już próby syntezy z wykorzystaniem izotopu He3 oraz Cadarache we Francji (reaktor ITER) gdzie instalacja typu tokamak jest w budowie.

Bezpieczne rozwiązania dotyczące problemu energetycznego aktualnie są przedmiotem rozważań nie tylko naukowych ale i politycznych. Uniezależnienie się od paliw

kopalnych to również jeden z priorytetów w działaniach licznych organizacji międzynarodowych.

Trudności dotyczące rozwiązań technicznych w konstrukcjach reaktorów termojądrowych wynikają głównie z połączenia zaawansowanych, nowoczesnych technologii z obszaru bardzo niskich oraz bardzo wysokich temperatur z włączeniem zjawiska nadprzewodnictwa. Problem bezpieczeństwa koniecznego do zachowania w tego typu konstrukcjach musi być rozwiązywany na różnych poziomach. Jednym z takich poziomów zajął się Doktorant. Jest to poziom związany z obszarem technologii niskotemperaturowych. Awaryjne, które mogą wystąpić na tym poziomie, bez wnikliwego przeanalizowania i zastosowania adekwatnych środków zaradczych, mogą mieć wpływ na działalność całego reaktora. Oznacza to, że staranność analizy przeprowadzonej dla tego poziomu konstrukcyjnego reaktora termojądrowego jest kluczowa.

Istotność i aktualność to podstawowe kryteria pozytywnej oceny każdej pracy doktorskiej. Cechy te są tu w pełni obecne. Jest to, jak się wydaje, również zasługa promotora pracy prof. Macieja Chorowskiego, wieloletniego współpracownika grup działających na wysokich poziomach technologicznych, takich jak CERN czy właśnie Cadarache – ośrodka, dla którego przeprowadzono doświadczenia i analizy zawarte w tej pracy.

Na rozprawę doktorską mgr inż. Macieja Grabowskiego składa się siedem podstawowych rozdziałów, z których pierwszy jest obszernym wprowadzeniem a ostatni szerokim wykazem literatury (72 pozycje) świadczącym o dobrej orientacji Autora w materiale obecnym w obiegu światowym, związanym z tematem rozprawy.

Rozprawa poprzedzona jest „*Spisem treści*” oraz „*Spisami*” rysunków i tabel. Praca jest bardzo bogato ilustrowana – na sumarycznej liczbie stron 124 umieszczono łącznie 133 rysunki.

Rozdział pierwszy to „*Wprowadzenie*”. Zawiera on krótki rys historyczny przypominający początki badań nad syntezą jądrową. Zaznaczono związek tego zjawiska z militarnym wykorzystaniem w postaci bomby termojądrowej, w której konstrukcji brał również udział polski matematyk Stanisław Ulam. Pokojowe próby wykorzystania zjawiska syntezy jądrowej prowadzono w Związku Radzieckim z wykorzystaniem urządzeń zwanych tokamakami (A. Sacharow i I. Tamm). Wprowadzenie zawiera też

opis urządzenia, dla którego zaplanowano i wykonano badania zaprezentowane w tej pracy. Reaktor ITER przedstawiono tu obok krótkiej charakterystyki reakcji termojądrowej możliwej do przeprowadzenia w tym urządzeniu. Ilustracje tego rozdziału przedstawiają ogólny widok reaktora oraz, co ważniejsze z punktu widzenia tego opracowania, schemat systemu kriogenicznego oraz schemat głównej niskotemperaturowej części układu tego układu. Jest ona wykorzystywana do chłodzenia zestawu cewek magnesów nadprzewodnikowych pozwalających na kształtowanie pola magnetycznego tworzącego pułapkę magnetyczną dla zjonizowanej plazmy w toroidalnym układzie reaktora. Rozdział zawiera również określenie tez pracy, które odgrywają tu rolę planowanych do osiągnięcia celów badań.

Rozdział drugi poświęcony został przedstawieniu kilku podstawowych scenariuszy awarii mogących wystąpić w układzie chłodzenia niskotemperaturowego elementów reaktora. Na bazie schematu pojedynczego węzła kriogenicznego układu reaktora przeanalizowano pięć scenariuszy, których omówienie oparto o schematy dobrze ilustrujące przedstawiane typy awarii. W czterech przypadkach scenariusze zakładają wystąpienie awarii mechaniczno-materiałowych zbiorników węzła lub linii procesowej. Jeden dotyczy powstania łuku elektrycznego w bliskości elementów instalacji wypełnionych kriogenem. Przedstawiono również analizę tzw. krytyczności awarii. Ocenia się ją przy użyciu wskaźnika krytyczności obliczanego według zaproponowanego wzoru. Dla wybranych parametrów obliczono przykładowy wskaźnik krytyczności. Jednak sposób przedstawienia wyniku końcowego jest niejasny – uzyskana wartość współczynnika (108) jest tylko liczbą, której znaczenie nawet w ujęciu procentowym trudno zrozumieć. W rozdziale tym pojawił się też Rysunek 2.7, który jest identyczny z rysunkiem z rozdziału pierwszego – Rys. 1.5.b.

W rozdziale trzecim, najobszerniejszym, omówiono podstawy matematycznego opisu możliwych stanów awaryjnych reaktora oraz przedstawiono rezultaty modelowania takich stanów. Wyniki zilustrowano licznymi wykresami, które pokazują nie tylko matematyczny obraz analizowanych zjawisk, ale są również intuicyjnie poprawne, co jest ich dużą zaletą. Procedury obliczeniowe użyte w tym rozdziale mogą być przydatne w konstrukcji konkretnych elementów układu kriogenicznego - mogą „podpowiedzieć” inżynierom-projektantom poprawne rozwiązania przewidziane np. dla zaworów

bezpieczeństwa. Duża liczba rysunków (61) pojawiająca się w tym rozdziale, z jednej strony ułatwia i przyspiesza możliwość zrozumienia przedstawionych sekwencji zdarzeń, z drugiej jednak wiele z tych rysunków pozostawiono bez żadnego komentarza. Usprawiedliwieniem takiego sposobu prezentacji wyników obliczeń może być jedynie wspomniana wyżej intuicyjna poprawność większości wykresów. W rozdziale tym, podobnie jak w poprzednio omawianym, powtórzono jeden z rysunków (Rys. 3.41) z rozdziału pierwszego (Rys. 1.2).

Rozdział czwarty to rozdział, w którym opisano wyniki eksperymentów poświęconych analizie rozkładu fali ciśnienia rozchodzącej się w określonym obszarze po eksplozji zbiornika symulującego dowolny fragment układu kriogenicznego, który mógłby ulec awarii. Dużą zaletą tej części pracy jest całościowo autorska konstrukcja stanowiska pomiarowego wyposażonego w zestaw określający parametry ciśnieniowe. Zestaw ten to sekwencyjnie, kątowno rozmieszczony układ czujników piezoelektrycznych. Jest on również konstrukcją Autora.

Ważnym elementem tego rozdziału jest porównanie wyników eksplozji materiału wybuchowego (TNT) z efektami rozerwania zbiornika, który poddany został działaniu wysokiego ciśnienia. W pierwszym przypadku obserwowany jest początkowy wzrost energii fali uderzeniowej. W drugim natomiast energia zaczyna spadać od momentu rozerwania powłoki zbiornika. Efekty takie to podstawowe zagrożenia pojawiające się w układach kriogenicznych, w których zainstalowano niewłaściwie dopasowane zawory bezpieczeństwa. Autor stwierdza, że niesłuszne jest ich porównywanie do eksplozji materiału wybuchowego – odmienna dynamika obu procesów formuje inne profile fal uderzeniowych. Oznacza to, że model tzw. ekwiwalentu trotylowego nie powinien być bezkrytycznie stosowany w przypadkach gdy analizowany jest proces ciśnieniowego rozerwania ścian zbiornika. Autor zakłada, że ten proces, testowany w temperaturze pokojowej z użyciem zbiornika wykonanego z politereftalanu etylenu (PET), można przenieść na konstrukcje kriogeniczne wykonane ze stali austenitycznej i pracujące w obszarze niskich temperatur. Słuszność tego założenia (intuicyjnie poprawnego) należałoby jednak poprzeć dodatkowymi badaniami.

Rozdział kolejny, piąty, poświęcony został również opisowi eksperymentów związanych z pojawieniem się znacząco podwyższonego ciśnienia, jednak tym razem

analiza dotyczy pomieszczeń zamkniętych, w których medium czynnym jest hel. W tym rozdziale po raz kolejny Autor wykazał się inwencją projektując i wykonując własny układ pomiarowy do detekcji helu. W układzie tym wykorzystał efekty rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w ośrodku o zmiennej charakterystyce procentowej składowych ośrodków. Eksperymenty wykonano w tunelu akceleratora LHC w CERN. Wyniki uzyskane przy pomocy własnego układu pomiarowego porównano z wynikami otrzymanymi przy użyciu, standardowo wykorzystywanego w takich sytuacjach, czujnika elektrochemicznego. Duża czułość detektora ultradźwiękowego połączona z szybkością reakcji wykrywania helu stanowi o atrakcyjności tego rozwiązania. Ważna jest również możliwość wielokrotnego wykorzystania tego zestawu. Szkoda tylko, że Autor przewagę własnego urządzenia nad starszą metodą elektrochemiczną zilustrował przez porównanie wykresów, które są niemal identyczne. Taki sposób porównania dwóch metod nie wskazuje "zwycięzcy".

Konkluzje zawarto w rozdziale szóstym, który tak właśnie zatytułowano. Przedstawiono w nim podsumowanie rezultatów uzyskanych w ramach prowadzonych badań, ze zwróceniem uwagi na najważniejsze osiągnięcia. Znalazły się tu zarówno wnioski wynikające z matematycznego modelowania stanów awaryjnych jak również ważne konkluzje wynikające z przeprowadzonych eksperymentów. Zebrany w pracy materiał może być pomocny przy projektowaniu końcowych elementów zabezpieczeń kriogenicznego systemu reaktora termojądrowego. Warto bowiem przypomnieć, że w takich urządzeniach spotykają się dwa światy temperaturowo bardzo odległe. Dla obu obszarów technologiczne rozwiązania lokują się na najwyższym stopniu skomplikowania. Sprawnie i bezpiecznie funkcjonująca część niskotemperaturowa jest równocześnie gwarantem poprawnego funkcjonowania obszaru wysokotemperaturowego.

Mimo niezaprzeczalnych zalet praca nie jest wolna od błędów. Najwięcej niestety, jest tych redakcyjnych. Tak zwane „literówki” i częste gramatyczne niezręczności pojawiają się zbyt często jak na opracowanie Doktora *in spe*. Autor nie przestrzega również kilku podstawowych zasad obowiązujących przy redagowaniu dowolnej pracy naukowej. Mam tu na myśli brak rozwinięć, lub tłumaczeń (praca napisana jest przecież w języku polskim) używanych akronimów. Do wyjątku należy ODH (*Oxygen Deficiency*

Hazard) – akronim, który nie wiadomo dlaczego, rozwinięto (bez polskiego odpowiednika) aż trzykrotnie (strony: 25, 38, 104). Również alfabetyczny układ bibliografii, mimo że formalnie poprawny, to jednak bez odpowiedniej staranności pozwala na ominięcie obowiązku zacytowania w tekście wszystkich publikacji zamieszczonych w bibliografii. Dobitym tego przykładem jest brak w tekście odnośników literaturowych [1] i [2].

Należy też wskazać na grupę elementów pracy, które wprawdzie trudno zaliczyć do błędów, jednak takich, które mocno utrudniają zrozumienie pewnych wątków dysertacji. Zaliczyłbym tutaj brak uzasadnień dla pojawiania się niektórych liczb, np. dlaczego przyjęto wartość współczynnika przepływu równą 0.6 (str. 37) oraz co uzasadnia użycie konkretnych liczb w kilku równaniach: 3.64 (str. 47), 3.65 (str. 48) lub 5.2 (str. 108)? Zanedbano też wskazanie źródeł pochodzenia niektórych rysunków (np. 1.2, 1.3, 1.5 itd.). Brak wyjaśnień dla kilku użytych terminów również nie ułatwia analizy tekstu, np.: dlaczego wymiar L jest wymiarem charakterystycznym (str. 35) i co to jest wielkość wybuchu (str. 47)? O braku interpretacji niektórych rysunków wspomniano już wyżej. Tutaj podam tylko jeden charakterystyczny przykład – wydawałoby się, że rezultaty przedstawione na rysunkach od 5.14, 5.15 i 5.16 powinny wykazywać znaczniejsze różnice ponieważ pomiary spadku koncentracji helu wykonano na różnych odległościach od miejsca awarii. Tego jednak na tych rysunkach nie widać. Co więcej, fakt ten pozostawiono bez żadnego komentarza.

Wyżej wymienione usterki obniżają wartość omawianej rozprawy, jednak nie mają wpływu na końcową, pozytywną ocenę całości. Doceniając wkład własny Doktoranta w zakresach programowania, modelowania i projektowania badanych układów, pozostaję w przekonaniu, że przedłożona do recenzji rozprawa mgra inż. Macieja Grabowskiego spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej autora do publicznej obrony zawartych w niej tez.

W. Kępiński