

OPINIA

o rozprawie doktorskiej

Pana mgr inż. Tomasza Hanuska

pt. „Optimization and transient scenarios of the liquid eutectic metal fuel Dual Fluid Reactor”

A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

Jednym z najważniejszych wyzwań współczesnego świata jest rozwijanie nowych, efektywnych i przyjaznych środowisku technologii energetycznych. Związane jest to z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, przy jednoczesnym wyczerpywaniu się zasobów naturalnych i postępującej degradacji środowiska naturalnego. Chodzi tu w szczególności o emisję CO₂ przyczyniającą się do globalnej zmiany klimatu na naszej planecie.

Energetyka jądrowa jest jedną z technologii, która ma do spełnienia ważną rolę by podołać tym wyzwaniom. Z jednej strony, reaktory jądrowe już dostarczają znaczne ilości bezemisyjnej energii elektrycznej, zatem jest to technologia dojrzała i przyjazna środowisku. Z drugiej strony, energetyka jądrowa ma wciąż ogromny niewykorzystany potencjał pod względem bezpieczeństwa eksploatacji reaktorów, czy też efektywnego wykorzystania paliwa. W tym celu rozwijane są obecnie reaktory jądrowe nowych generacji.

Do pomyślnego i efektywnego rozwoju takich reaktorów potrzebne są szczegółowe analizy numeryczne. Analizy takie pozwalają na optymalizację warunków pracy reaktorów oraz na ocenę bezpieczeństwa ich eksploatacji. W tym kontekście badania podjęte przez Doktoranta są celowe i stanowią ważny przyczynek do rozwoju i optymalizacji nowych typów reaktorów jądrowych, a w szerszym sensie, do dalszego rozwoju energetyki jądrowej.

B. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska liczy 128 stron i jest podzielona na pięć rozdziałów, spis rysunków, spis tablic, spis oznaczeń, podsumowanie oraz spis literatury.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wstęp do pracy, Autor dokonuje krótkiej analizy sposobów generowania energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem ich ogólnie pojętego bezpieczeństwa oraz wpływu na środowisko naturalne. Autor zamieszcza również rys historyczny oraz przegląd reaktorów opartych na stopionych solach, gdyż są one ściśle spokrewnione z reaktorem dwupłynowym, będącym przedmiotem badań przedstawionych w pracy. Jako cel, Autor przyjmuje optymalizację oraz analizy wybranych procesów przejściowych w reaktorze dwupłynowym, w którym paliwo występuje w postaci płynnego metalu.

W rozdziale drugim Autor skupia swoją uwagę na eksperymentalnym reaktorze ze stopioną solą, w którym w latach 1965-69 przeprowadzono szereg dobrze udokumentowanych pomiarów,

czyli tak zwanym „Molten Salt Reactor Experiment” - MSRE. Celem Autora jest rozwinięcie modeli do obliczeń stanów ustalonych i przejściowych reaktora, a następnie (co jest tematem następnego rozdziału) porównanie wyników symulacji przeprowadzonych za pomocą otrzymanych modeli z obliczeniami innych autorów.

W pierwszej części rozdziału Autor poddaje szczegółowej analizie geometrię i rodzaje materiałów występujących w reaktorze. Dane te wykorzystane są do budowy modelu neutroniki reaktora za pomocą kodu Serpent2, opartego na metodzie Monte-Carlo.

Druga część rozdziału poświęcona jest wprowadzeniu niezbędnych modyfikacji do kodu TRACE tak aby przystosować go do symulacji reaktora z cyrkulacją ciekłego paliwa. Najistotniejsze modyfikacje dotyczą wprowadzenia do kodu własności termo-fizycznych płynów występujących w rozpatrywanych reaktorach oraz zmian wynikających z cyrkulacji płynnego paliwa. Zwłaszcza ta druga cecha wymaga dość zasadniczych zmian w kodzie TRACE, polegających na zbudowaniu modelu kinetyki punktowej reaktora z uwzględnieniem cyrkulacji prekursorów neutronów opóźnionych.

W celu uzyskania poprawnych rozwiązań numerycznych, Autor przetestował stabilność schematu różnic skończonych zastosowanego do rozwiązania równań różniczkowych opisujących kinetykę reaktora. Ponadto Autor zastosował zmienną nodalizację w modelu ciepło-przepływowym symulując rdzeń reaktora za pomocą jednego, czterech lub siedmiu równoległych kanałów, przedstawiających różne strefy promieniowe rdzenia.

W rozdziale trzecim przedstawione są wyniki symulacji uzyskane za pomocą modeli opisanych w rozdziale poprzednim. Na rysunku 39 Autor przedstawia porównanie własnych obliczeń promieniowego rozkładu mocy względnej, uzyskanych za pomocą kodu Serpent, z wynikami obliczeń wykonanych w 1964 r. przez badaczy z Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Zgodność wyników jest bardzo dobra, za wyjątkiem strefy wokół osi reaktora, gdzie wyniki otrzymane przez Autora odbiegają znacznie od wyników referencyjnych. Autor uzasadnia zaobserwowaną różnicę tym, iż w referencyjnych obliczeniach użyto wielogrupowego przybliżenia dyfuzyjnego; a więc metody, która jest mniej dokładna od metody Monte-Carlo w rejonach o znacznej absorpcji neutronów. Uzasadnienie to wydaje się dość przekonujące, gdyż rzeczywiście wokół osi reaktora umieszczone są trzy pręty sterujące, powodujące znaczną absorpcję neutronów. Porównanie osiowych rozkładów mocy względnej przedstawione jest na rysunku 40. W przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, uzyskane przez Autora wyniki są w bardzo dobrej zgodności z wynikami referencyjnymi wzdłuż całej osi reaktora.

Oprócz wspomnianych rozkładów mocy, Autor obliczył efektywny współczynnik mnożenia reaktora (k_{eff}) i pokazał, że jest on w rozsądnej zgodzie z wynikiem uzyskanym przez innych autorów. Współczynnik ten został następnie przeanalizowany dla trzech różnych strategii regeneracji paliwa: dla pełnej i częściowej regeneracji oraz dla przypadku całkowitego braku regeneracji. W tym ostatnim przypadku następuje znaczny spadek współczynnika k_{eff} w pierwszych dniach eksploatacji reaktora, Autor jednak nie wyjaśnia przyczyny tego zachowania, które najprawdopodobniej wynika ze wzrostu koncentracji trucizn reaktorowych.

W dalszej części rozdziału Autor oblicza ustalone rozkłady osiowe temperatur w kanale gorącym oraz przeprowadza analizy stanów nieustalonych reaktora po wprowadzeniu doń skokowej zmiany reaktywności. W przypadku rozkładów temperatur, Autor porównuje wyniki własne z wynikami referencyjnymi. Dobra zgodność wyników została uzyskana dla rozkładu temperatury w paliwie, natomiast istotna różnica w wynikach wystąpiła dla temperatury w graficie.

Jako przypuszczalną przyczynę niezgodności temperatur Autor podaje możliwość przeszacowania współczynnika wymiany ciepła na powierzchni grafitu, ale ta hipoteza nie jest sprawdzona numerycznie. Należy dodać, że inną przyczyną mogłoby być niedoszacowanie źródeł ciepła w graficie.

Analizy stanów przejściowych Autor przeprowadził stosując dwa rodzaje paliwa zawierającego uran 233 lub uran 235, zakładając różne poziomy mocy reaktora w stanie niezaburzonym, oraz używając jednego lub czterech równoległych kanałów w modelu przepływu paliwa przez rdzeń reaktora. Uzyskane przez Autora przebiegi mocy reaktora w czasie na ogół są zgodne z obliczeniami referencyjnymi. Dotyczy to zwłaszcza wyników uzyskanych za pomocą czterokanałowego modelu rdzenia reaktora.

Modele rozwinięte i zweryfikowane w rozdziale drugim i trzecim zostały zaadoptowane w rozdziale czwartym do symulacji reaktora dwupłynowego o mocy termicznej 250 MW. Dane materiałowe oraz szczegóły konstrukcyjne reaktora zostały zaczerpnięte z wcześniejszej publikacji własnej jak i z publikacji ogłoszonych przez innych autorów. Do modelowania neutroniki reaktora dwupłynowego użyto kodu Serpent. Model ten obejmuje rdzeń reaktora, reflektor, oraz strefę wlotową i wylotową z rdzenia reaktora.

W pierwszej części rozdziału Autor przeprowadził obliczenia temperaturowego współczynnika reaktywności dla paliwa, chłodziwa i reflektora. Stosując metodę propagacji niepewności, Autor oszacował następnie niepewność termicznego współczynnika reaktywności dla chłodziwa i stwierdził, iż niepewność ta jest tego samego rzędu wielkości co sam współczynnik. Oszacowanie to pozwoliło wysnuć Autorowi wniosek, że temperaturowy współczynnik reaktywności dla chłodziwa jest mały i ma wartość zbliżoną do zera. Spośród wszystkich rozpatrywanych współczynników reaktywności najistotniejszą rolę odgrywa ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności dla paliwa. Jest on jednak, co do wartości bezwzględnej, o rząd wielkości mniejszy niż jego odpowiednik w reaktorze na stopionych solach. Dodatkowo, współczynnik ten w dużej mierze wynika z rozszerzalności cieplnej rdzenia a nie, jak to ma miejsce w reaktorach termicznych, z efektu Dopplera.

W celu wydłużenia okresu bezpiecznej eksploatacji reaktora, Autor proponuje zwiększyć grubość reflektora z 20 do 30 cm, zmniejszyć wzbogacenie paliwa z 12.8 do 11.2 procentów wagowych, oraz wprowadzić wiązki prętów kontrolnych w strefie reflektora.

W drugiej części rozdziału Autor wykorzystuje wyznaczone wcześniej współczynniki reaktywności k , biorąc pod uwagę wprowadzone modyfikacje, implementuje model reaktora dwupłynowego za pomocą kodu TRACE. Rdzeń reaktora podzielony jest w kierunku promieniowym na dwanaście równoległych kanałów paliwowych, zaś każdy z nich, na dziesięć równych części w kierunku osiowym. Ponieważ zastosowano punktowy model neutroniki, odpowiednie współczynniki wagi zostały wyznaczone w celu obliczenia efektywnej temperatury paliwa występującej w temperaturowym współczynniku reaktywności. Nie jest jednak jasne, czy w tych obliczeniach Autor uwzględnił osiowo-zmienny rozkład koncentracji prekursorów neutronów opóźnionych. W celu uwzględnienia wpływu temperatury na własności materiałowe używane w obliczeniach neutronowych, Autor zaimplementował algorytm iteracyjny połączonych obliczeń rozkładu mocy za pomocą kodu Serpent oraz rozkładu temperatury w rdzeniu reaktora za pomocą kodu TRACE.

W końcowej części rozdziału Autor przeanalizował ograniczenia temperaturowe dla ciekłego chłodziwa i paliwa, tak aby nie dopuścić do zmian własności wytrzymałościowych

materiału konstrukcyjnego, oraz uniknąć przemian fazowych w chłodziwie i paliwie. Autor założył również górne granice prędkości przepływu chłodziwa i paliwa w celu uniknięcia nadmiernej erozji materiału konstrukcyjnego.

W rozdziale piątym Autor stosuje uprzednio opracowane modele i kryteria do znalezienia optymalnego punktu pracy reaktora dwupłynowego oraz do analizy wybranych stanów przejściowych w reaktorze. Autor pokazuje, że dla wybranego stałego wydatku masowego chłodziwa, istnieje dość wąski przedział wydatku masowego paliwa, kiedy kryteria bezpieczeństwa oparte na dopuszczalnej różnicy temperatur i maksymalnej prędkości przepływu są spełnione.

W dalszej części rozdziału Autor analizuje stany przejściowe reaktora wywołane trzema rodzajami zaburzeń: skokowym wprowadzeniem do reaktora dodatniej lub ujemnej reaktywności, liniowym wprowadzeniem reaktywności oraz skokową zmianą ilości odbieranego ciepła z obiegu pierwotnego. Autor pokazuje, że wprowadzenie dużej reaktywności do reaktora może spowodować obniżenie lub wzrost temperatury paliwa do poziomu podanego jako granica bezpiecznej eksploatacji reaktora. Natomiast skokowa zmiana odbieranego ciepła z obiegu pierwotnego powoduje inherentną zmianę mocy reaktora, doprowadzając układ do nowego stabilnego punktu pracy w przeciągu około 70 s.

Pracę kończy krótkie podsumowanie uzyskanych wyników i wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych analiz. Autor wymienia również kierunki pożądaných dalszych badań nad reaktorem dwupłynowym.

W bibliografii liczącej 72 pozycje znajdują się dwie prace których współautorem jest Doktorant.

C. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Hanuska jest przykładem dobrze napisanej pracy z jasno sprecyzowanym celem oraz z wyczerpującą analizą postawionych zadań, uwieńczoną wyciągnięciem poprawnych i nietrywialnych wniosków z uzyskanych wyników. Autor nie tylko wykazał się wiedzą ogólną o reaktorach jądrowych, ich konstrukcjach oraz własnościach dynamicznych, ale również zademonstrował duże umiejętności w ich numerycznym modelowaniu.

Rozprawa napisana została starannie, z logicznym układem poszczególnych rozdziałów. We wstępie Autor przybliży czytelnikowi szczegóły budowy i podstawowe cechy reaktorów na stopionych solach. Reaktory te są ściśle spokrewnione z reaktorem dwupłynowym, który jest przedmiotem badań przedstawionych w pracy. W następnych rozdziałach Autor buduje modele niezbędne do obliczeń neutronowych i ciepłno-przepływowych. Jest to zagadnienie nietrywialne, gdyż kod TRACE, użyty do obliczeń ciepłno-przepływowych, wymaga istotnych modyfikacji.

Autor poświęca dużo uwagi weryfikacji rozwiniętego modelu reaktora. W tym celu, tam gdzie to możliwe, porównuje wyniki obliczeń własnych z wynikami uzyskanymi przez innych autorów. Należy podkreślić, że ważnym elementem uwiarygodnienia wyników obliczeń jest walidacja użytych narzędzi, czyli porównanie uzyskanych wyników obliczeniowych z danymi eksperymentalnymi. Nie zostało to uczynione w niniejszej pracy z powodu braku takich danych, ale konieczność ich uzyskanie jest podkreślona przez Autora we wnioskach końcowych.

Uwagi szczegółowe

Str. 43, wiersz 6 od góry: jest „... *is 5 inches...*”; w tym miejscu, jak i w wielu innych, Autor używa jednostek anglosaskich lub innych jednostek wielkości fizycznych nie należących do układu jednostek SI. We współczesnym piśmiennictwie naukowym należy używać jednostek SI, podając ewentualnie oryginalną wielkość w nawiasach. Tak więc powinno być: „... *is 127 mm (5 inches)...*”.

Str. 51, w Tabeli 10 wartość lepkości podana jest z trzema znaczącymi cyframi dla temperatury 922 K, i tylko z jedną znaczącą cyfrą dla temperatury 844 K. Oznacza to, że domniemana niepewność względna w pierwszym przypadku jest około 0.1%, podczas gdy w drugim przypadku wynosi 100%. Jest to znaczna różnica w niepewności co mogłoby negatywnie rzutować na dokładność uzyskanych wyników obliczeń.

Str. 68, podpis pod rysunkiem 37: jest „... *with 3 radial ...*”; powinno być „... *with 4 radial ...*”.

Str. 75, Autor sugeruje, że rozbieżność rozkładów temperatur w graficie pokazana na rysunku 43 wynika z przeszacowania współczynnika wymiany ciepła. Pożądana zatem byłaby tu analiza czułościowa aby uwiarygodnić tę hipotezę.

Str. 87, wiersz 10 od góry: jest „*the excess reactivity is low and close to 1*”; powinno być: „*the excess reactivity is close to zero*”.

Str. 88, wiersz 9 od dołu: Autor proponuje umieścić wiązki prętów kontrolnych w reflektorze, gdzie strumień neutronów jest stosunkowo niski. Zatem efektywność tego rozwiązania będzie też niewysoka. Zresztą Autor to pokazuje sam na rysunku 55. Autor proponuje zwiększenie liczby wiązek kontrolnych, ale nie wydaje się to być dobrym rozwiązaniem.

Str. 91, rys. 58, rysunek przedstawia porównanie promieniowych rozkładów mocy w reaktorze dwupłynowym na początku (BOL) i na końcu (EOL) okresu eksploatacji reaktora. Ponieważ rozkłady te są osiowo-symetryczne, porównanie powinno być przedstawione w postaci dwuwymiarowej, co byłoby znacznie bardziej czytelne niż reprezentacja trójwymiarowa, która uniemożliwia dostrzeżenie ewentualnych różnic między rozkładami.

Str. 100, w równaniu (13) powinna występować minimalna temperatura dopuszczalna dla chłodziwa. Po lewej stronie równania powinno zatem być: $T_{coolant_min}$.

Str. 102, Tabela 31 zawiera zaproponowane rozmiary (powierzchnie przekroju i długości) elementów pętli paliwowej i pętli chłodzenia, Autor jednak nie uzasadnia na jakiej podstawie te wielkości zostały ustalone.

Str. 103, wiersze 15-16 od dołu, jest: „... *the temperature gradient for coolant is 200 K...*”. W tym miejscu (ale też w innych miejscach rozprawy) Autor używa pojęcia *gradient temperature* (którego jednostką jest K/m) zamiast pojęcia *różnica temperatur* (której jednostką jest K).

Str. 108-111, Autor demonstrowa odpowiedź reaktora na skokową zmianę reaktywności. W szczególności po wprowadzeniu negatywnej reaktywności -100 pcm, moc reaktora przed i po zaburzeniu pozostaje na tym samym poziomie (rysunki 67 i 68) podczas gdy minimalna temperatura paliwa spada o około 30 K. Zatem wydaje się, że w reaktorze dwupłynowym system prętów kontrolnych nie może być użyty do awaryjnego wyłączenia reaktora, jak to jest sugerowane na stronach 88 i 89, a jedynie do obniżenia temperatury w obiegu paliwowym (a zarazem w

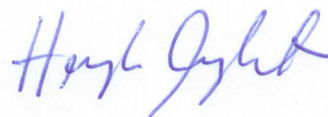
pierwotnym).

Str. 127, nazwiska autorów i tytuł pozycji 69 w spisie literatury powinny być podane w tłumaczeniu na język angielski.

D. WNIOSKI KOŃCOWE

W ramach swojej rozprawy doktorskiej Pan mgr inż. Tomasz Hanusek zrealizował zadania badawcze mające na celu optymalizację warunków pracy i przeprowadzenie analiz wybranych przebiegów niestacjonarnych w reaktorze dwupłynowym z paliwem w postaci ciekłego metalu. Podczas realizacji pracy Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami zarówno w dziedzinie obliczeń neutronowych za pomocą metody Monte Carlo, jak i obliczeń cieplno-przepływowych za pomocą kodu TRACE. Niedostatki rozprawy wymienione w uwagach szczegółowych mają charakter drugorzędny i nie zmniejszają osiągnięć metodologicznych i poznawczych oraz wagi wyników uzyskanych w pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Tomasza Hanuska praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnioskuję do Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Hansel Jylich', is centered on the page.