

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Hanuska

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

1. Wybór tematu

Program polskiej energetyki jądrowej zakłada budowę elektrowni jądrowych, których celem będzie: (1) wzmocnienie bezpieczeństwa energetycznego poprzez dywersyfikację źródeł energii, (2) obniżenie emisji gazów cieplarnianych z sektora energetycznego, (3) zahamowanie wzrostu kosztów energii. Wprowadzie program ten dotyczy elektrowni jądrowych opartych o sprawdzone wielkoskalowe technologie wodne, ale jednocześnie pobudza zainteresowanie alternatywnymi rozwiązaniami, takimi jak reaktory IV generacji. Wśród nich znajdują się: reaktor prędko chłodzony gazem (Gas-Cooled Fast Reactor, GFR); reaktor wysokotemperaturowy (Very-High-Temperature Reactor, VHTR); nadkrytyczny reaktor wodny (Supercritical-Water-Cooled Reactor, SCWR); reaktor prędko chłodzony ciekłym sodem (Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR); reaktor prędko chłodzony ciekłym ołowiem (Lead-Cooled Fast Reactor, LFR); reaktor chłodzony stopionymi solami (Molten Salt Reactor, MSR). Stanowią one nowe technologie jądrowe rozwijane w świecie.

Temat pracy, podejmujący zagadnienie reaktora dwupłynowego (Dual Fluid Reactor, DFR), należącego do tej samej grupy, co reaktor MSR, wpisuje się w aktualne trendy badawcze. Brzmienie tematu jest jednak dyskusyjne, gdyż jego zakres obejmuje małą część pracy.

2. Ogólna charakterystyka

Praca została zawarta na 128 stronach. Składa się ze Spisu treści, Listy rysunków, Listy tabel, Listy symboli, Streszczenia w języku angielskim oraz polskim, 5 rozdziałów, Podsumowania i wniosków oraz Wykazu literatury (71 pozycji).

Rozdział 1 stanowi bardzo krótkie i rozpowszechnione uzasadnienie potrzeby rozwoju energetyki jądrowej oraz równie krótkie przedstawienie reaktorów generacji IV, a zwłaszcza reaktorów typu MSR.

Rozdział 2 dotyczy modelu reaktora Molten Salt Reactor Experiment (MSRE), który został wybrany jako referencyjny do weryfikacji modelu wykorzystanego następnie do analizy reaktora typu DFR. Wybór uzasadniono faktem, że reaktor MSRE został wybudowany i opisany, a więc dostępna jest baza danych

porównawczych. Jedna część rozdziału dotyczy programu Serpent, a druga programu TRACE.

Rozdział 3 zawiera wyniki analiz z wykorzystaniem programów opisanych w Rozdziale 2 i dotyczących reaktora MSRE.

Rozdział 4 jest związany z reaktorem DFR. Pierwsza część rozdziału dotyczy programu Serpent i stacjonarnych obliczeń neutronowych. W drugiej części opisano symulacje zmienne w czasie w programie TRACE, a w trzeciej przedstawiono warunki optymalizacji modelu reaktora DFR.

Rozdział 5 zawiera wyniki analiz optymalizacyjnych oraz zmiennych w czasie dla reaktora DFR.

Całość pracy została podsumowana ze wskazaniem obszarów dalszych badań.

3. Osiągnięcia

- Wprowadzenie modułu obliczeń neutronowych do program TRACE.
- Wprowadzenie podziału rdzenia reaktora MSRE i DFR na strefy radialne, co wpłynęło na poprawę dokładności obliczeń.
- Propozycja wprowadzenia prętów kontrolnych do reflektora, co wpłynęło na rozkład mocy i jej stabilizację.
- Przeprowadzenie analiz zmiennych w czasie dla zmodyfikowanej konstrukcji reaktora.
- Próba określenia warunków, przy których praca reaktora DFR mieści się w marginesach bezpieczeństwa (temperaturowych, przepływowych, reaktywności).

Osiągnięcia wskazują na rozwój danego zagadnienia i jednocześnie pozwalają na określenie dalszych kierunków badań. Potwierdzają też kompetencje Kandydata w zakresie posługiwania się programami Serpent oraz TRACE, a także umiejętność programowania w języku Python.

4. Ogólna ocena

Konstrukcja pracy i sposób prezentowania treści wywołują pewne wątpliwości. Przede wszystkim nie został zdefiniowany cel i zakres pracy. Brak jest części, którą można określić jako aktualny stan badań (state-of-the-art), a która stanowiłaby uzasadnienie podjęcia takiego tematu badawczego.

Praca w znacznej części dotyczy reaktora MSRE, co z jednej strony wynika z potraktowania go jako przypadku referencyjnego, ale z drugiej wskazuje na to, że zasadnicza tematyka stanowi mniejszość.

Rozdziały dotyczące modelu reaktora MSRE, jak i w dużej mierze reaktora DFR, są ogólnikowe. Nie wynika z nich jak skonstruowane są reprezentacje reaktorów w programach Serpent czy TRACE. Przedstawione są szczątkowe informacje dotyczące części neutronowej, ale część dotycząca zagadnień ciepłno-przepływowych została pominięta. Autor nie przedstawił szczegółów dotyczących sprzężeń między tymi programami ani sposobu wprowadzenia zmiany w kodzie źródłowym. Tego typu

uwag jest więcej – zostaną one przedstawione w uwagach szczegółowych. Chcę jednak dodać, że część poświęcona reaktorowi DFR jest spójna i pozytywnie odbiega od wcześniejszej części, poświęconej reaktorowi MSRE. Zagadnienie dotyczące modyfikacji struktury reaktora poprzez wprowadzenie prętów kontrolnych do reflektora i przeprowadzone dla nich analizy stanowią nowość badawczą, natomiast pozostałe części prezentowanych badań mają charakter odtwórczy (np. X. He, "Validation of the TRACE code for the system dynamic simulations of the Molten Salt Reactor Experiment and the preliminary study on the Dual Fluid molten salt reactor," Technische Universität München, 2016).

Problem, który został zatytułowany jako optymalizacja, nie jest nią w rozumieniu matematycznym. Brak jest sformułowanej funkcji celu, natomiast zostały zdefiniowane pewne parametry, które mogłyby mieć na nią wpływ. W ten sposób objawił się problem, który powinien zostać potraktowany jako optymalizacja wielokryterialna. Co więcej, nie zostały wspomniane żadne algorytmy optymalizacyjne. Z tego powodu tą część pracy należy uznać za wstępne analizy, zmierzające do określenia zakresu pracy reaktora z uwzględnieniem marginesów bezpieczeństwa. Dodatkowym utrudnieniem w ocenie wyników jest brak spójności stosowania jednostek. Anglosaski układ jednostek miar jest stosowany na równi z Międzynarodowym Układem Jednostek Miar. Trudno jest odnosić się do wartości liczbowych prezentowanych w tabelach czy na rysunkach, kiedy systemy te są stosowane zamiennie. To nie jest dopuszczalne w publikacji naukowej i tak jak wspomniałam, utrudnia interpretację wyników.

Podsumowując, praca została przygotowana na niskim poziomie. Zawiera jednak elementy rozwiązania oryginalnego problemu badawczego. Złożoność modeli dotyczących między innymi analiz systemowych wymagała zaangażowania i kompetencji ze strony Kandydata. Kompetencje powinny być jednak lepiej udokumentowane w pracy.

5. Szczegółowe uwagi krytyczne

Uwagi wymienione zostały w kolejności ich pojawiania się.

- Str. 20 – Na Rys. 1 brak jest informacji o pozycji Polski w tym rankingu.
- Str. 21 – Rys. 2 – różnica temperatury podana jest w °F. Zamiennie stosowanie Anglosaskiego oraz Międzynarodowego układu jednostek miar jest niedopuszczalne w publikacji naukowej. Wpływa to negatywnie na zdolność śledzenia metodologii obliczeń oraz interpretację wyników. Ta uwaga ma zarówno charakter merytoryczny jak i edytorski, przy czym merytoryczny jest tutaj zdecydowanie ważniejszy.
- Rozdział 1.2 dotyczy bardzo ogólnego opisu różnych rozwiązań reaktorów typu MSR. Przedstawiony opis utrudnia porównania między poszczególnymi przykładami, gdyż każdy z nich prezentowany jest w inny sposób i z różnym stopniem szczegółowości. W tym rozdziale zamiennie stosowanie układów jednostek miar jest widoczne na rysunkach, w tabelach i tekście.

- Str. 38 – Przegląd literatury związany z reaktorami typu DFR zawiera się w 9 liniach. Nie wynika z nich, jaki jest obecnie stan badań, a część zdania „the proposed metallic version of the DFR still has many unknown areas.” wymaga rozwinięcia. Z niej bowiem powinna wynikać motywacja podjętych działań.
- Str. 39 – **Brak jest zdefiniowanego celu i zakresu pracy.**
- Str. 41. 42 – Brak spójności stosowanych układów jednostek miar.
- Str. 44, 45 – Rys. 21 i 22 brak jest opisu poszczególnych elementów przedstawionych na rysunku oraz kodu kolorystycznego.
- Str. 46 – Tabela 6 – Czy skład zanieczyszczeń grafitu był wykorzystywany w którymkolwiek ze stosowanych programów?
- Rozdział 2.1.3 – „Sampler-enricher” nie pojawia się na żadnym prezentowanym rysunku, podobnie jak off-gas system.
- Str. 48 – Brak jest informacji o wymiarach dotyczących konstrukcji prętów kontrolnych, a podanie zamiast nich odnośnika literaturowego nie powinno mieć miejsca.
- Rozdział 2.2 – Brak jest opisu programu TRACE, przedstawienia jego struktury, schematu blokowego odnoszącego się do jego modułów i połączeń między nimi.
- Str. 50 – Brak jest informacji w jaki sposób Kandydat wprowadził modyfikacje do programu. W jaki sposób zostały one połączone z pozostałymi częściami.
- Str. 51 – Całkowity brak informacji o części ciepło-przepływowej (równania modelowe, jak są opisane poszczególne elementy, jakie warunki brzegowe wprowadzono, zastosowane uproszczenia czy schematy numeryczne).
- Str. 54 – Brak jest informacji o założonych warunkach brzegowych dla solvera neutronowego oraz warunkach początkowych. Brak jest uzasadnienia wyboru schematu Eulera „wprzód”.
- Str. 57 – Brak jest informacji co oznaczają liczby znajdujące się na Rys. 28 i 29.
- Str. 57 – Rys. 29 nie obrazuje części $[(\rho(t) - \beta)/\Lambda]n(t)$. Jaką część wzoru obrazuje?
- Str. 63 – W modelu utworzonym przez ORNL każdy obszar rdzenia reprezentowany jest przez 2 węzły. Co to oznacza? Co reprezentuje moduł „metal” i w jaki sposób został uwzględniony w modelu? Tabele 15 i 16 zawierają wielkości: pojemność cieplną i całkowity strumień ciepła oddawany z powierzchni przy zmianie temperatury o 1°F (jednostki tych wielkości to odpowiednio MJ/°F i MW/°F). Czy w taki sposób dane były wprowadzane do programu TRACE? Jeżeli nie, to jakie wartości były wprowadzane? W jaki sposób wyznaczone zostały wspomniane wielkości dla zaproponowanego przez Kandydata podziału obszaru rdzenia?
- Str. 66 – Brak jest opisu modelu hydraulicznego w programie TRACE. Elementy znajdujące się na Rys. 35 nie zostały opisane. Co reprezentują liczby znajdujące się na poszczególnych składowych modułu? Brak jest informacji, w jaki sposób dane z modelu ORNL zostały wprowadzone do programu TRACE i jakie jednostki posiadały.
- Str. 70 – Sprzężenie między programami Serpent i TRACE zostało pokazane dopiero na str. 98.

- Str. 74 – Zdanie „The author's model probably overestimates the wall heat transfer coefficient compared to the ORNL model from research [51].” wymaga wyjaśnienia, ponieważ w pracy nie pojawiają się informacje o wartościach zastosowanych/obliczonych przez Autora.
- Str. 81 – Brak jest podanych warunków brzegowych dla modelu cieplno-przepływowego w programie TRACE reaktora DFR.
- Str. 84 – Brak jest informacji jak wyglądała procedura obliczeniowa w programie Serpent i co oznacza sformułowanie „with 500 active cycles, 200 inactive cycles and 100000 neutrons per simulation.” Z czego wynikają takie wartości?
- Str. 86 – Jak wyglądała procedura doboru grubości reflektora wprowadzonej jako modyfikacja?
- Str. 94 – Model przedstawiony na Rys. 59 nie został omówiony. Brak jest informacji o sposobie połączenia poszczególnych elementów, warunkach temperaturowych i przepływowych.
- Str. 95 – Dlaczego rdzeń został podzielony na heksagonalne strefy, skoro wcześniej stosowane były kołowe? Jakie jest uzasadnienie takiego podziału?
- Rozdział 4.3 – brak jest zdefiniowanej funkcji celu, więc z punktu widzenia matematycznego to nie jest optymalizacja. Nie zostały podane żadne algorytmy optymalizacyjne.
- Str. 102 – Tabela 30, podane wartości graniczne prędkości dotyczyły innego układu, o innych wymiarach geometrycznych, innym składzie paliwa. Na jakiej podstawie uznano, że te wartości będą odpowiednie dla reaktora DFR. Brak jest uzasadnienia stosowania tych danych oraz informacji o skalowaniu. Wpływa to na wiarygodność dalszych wyników, które mogą być traktowane wyłącznie jako wstępne. Brak jest informacji, w jaki sposób oszacowano wymiary pętli i przekrojów podanych w Tabeli 31.
- Rozdział 5 – Niepoprawne stosowanie wyrażenia gradient temperatury i przypisanie mu jednostki [K].
- Str. 107 – Tabela 32, dlaczego różnica temperatury chłodziwa ustalona jest na stałym poziomie? Brak informacji o konfiguracji modelu cieplno-przepływowego programu TRACE wpływa na trudności z interpretacją danych.
- Str. 115 – Zgodnie z opisem Rys. 76, wraz ze wzrostem odbioru ciepła o 40% w ciągu pierwszych 5s moc reaktora i temperatura chłodziwa spadają. Natomiast na Rys. 79 wykazano wzrost temperatury chłodziwa w ciągu tych 5s.

6. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi

- (1) Przedstawienie krótkiego podsumowania stanu badań dotyczącego reaktorów DFR z wyjaśnieniem jakie „the proposed metallic version of the DFR still has many unknown areas.” nieznanne obszary Kandydat podjął się wyjaśnić.
- (2) Pokazanie rysunku, na którym zaprezentowany zostanie „Sampler-enricher” oraz off-gas system w przypadku reaktora MSRE.

- (3) Przedstawienie krótkiej charakterystyki programu TRACE i obliczeń cieplno-przepływowych: równanie modelowe, reprezentacja układu, założenia upraszczające, warunki brzegowe zarówno dla reaktora MSRE jak i DFR.
- (4) Przedstawienie informacji w jaki sposób Kandydat wprowadził moduł obliczeń neutronowych do programu TRACE i w jaki sposób dokonał sprzężenia z modułem cieplno-przepływowym. Zaprezentowanie warunków brzegowych dla modułu neutronowego
- (5) Przedstawienie informacji związanych z wartościami współczynnika wnikania ciepła na ścianie między grafitem a paliwem (sposób określenia, wartości).
- (6) Wyjaśnienie dlaczego rdzeń reaktora DFR został podzielony na strefy heksagonalne, skoro wcześniej stosowane były kołowe?
- (7) Porównanie wyników symulacji stacjonarnych i zmiennych w czasie (z Rozdziałów 3.2.2 – 3.2.3) dla modelu MSRE z pracą He X. [31].
- (8) Uzasadnienie zastosowania wartości granicznych prędkości z Tabeli 30 do obliczeń reaktora DFR.
- (9) Wyjaśnienie nieścisłości pojawiających się w opisie Rys. 76 i 79 (uwaga dotycząca str. 115).

7. Uwagi Edytorskie

Poniżej zostały wymienione najważniejsze uwagi edytorskie. Pominęto uwagi o charakterze językowym.

- Lista symboli jest bardzo krótka. Brakuje jednostek przedstawianych wielkości.
- Brak jest listy skrótów literowych stosowanych w pracy. Znacznie ułatwiłoby to nawigację.
- Stosowanie podwójnego nazewnictwa INOR-8 (na rysunkach i w tabelach) oraz Hastelloy-N w tekście. Powinna być stosowana jedna forma.
- Brak wyjaśnienia skrótu NRC.
- Tabela 11 - zamiast B_5 i B_6 powinny być symbole β_5 i β_6 .
- Tabela 12 – przy różnicy temperatury powinna być jednostka [K]. Jednocześnie stosowane są jednostki SI i ich pochodne. Powinno być to ujednoczone.
- Str. 68 – Podpis pod Rys. 37 powinien odnosić się do 4 pierścieni.
- Str. 93 – Brak jest źródła danych dotyczących SiC w Tabeli 27.
- Str. 106 – Rys. 63 i 64 powinny mieć taką samą skalę.
- Str. 117 – Rys. 79 wykazuje brak spójności w kolorystyce linii (heat sink increase 40%).
- Wiele rysunków, pochodzących z innych źródeł, cechuje się niską jakością kopii.
- Niektóre z podrozdziałów są bardzo krótkie (np. 4 linie tekstu). Taka struktura pracy niekorzystnie wpływa na jej przejrzystość.
- Literatura nie ma spójnej formy zapisu. W wielu przypadkach brak jest informacji o źródle publikacji [12-14], [18], [20], [22], [34], [50], [51], [54], [70].
- Pozycja literaturowa [69] jest zapisana znakami alfabetu chińskiego. Dane bibliometryczne powinny zostać przetłumaczone.

8. Wniosek końcowy

Zgodnie z zapisem Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Art. 187:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Praca doktorska mgr. inż. Tomasza Hanuska w minimalnym stopniu prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata. Podstawą do tego stwierdzenia są wszystkie braki wykryte w pracy, wspomniane wcześniej. Osiągnięcia, które wymieniłam w recenzji, a zwłaszcza propozycja modyfikacji struktury reaktora DFR, przeprowadzone analizy zmienne w czasie oraz analizy dotyczące zakresu pracy reaktora przy narzuconych marginesach bezpieczeństwa, można natomiast uznać za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz dowód umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Akceptując oryginalność problemu naukowego oraz poziom kompetencji potrzebnych do jego rozwiązania, wnioskuję do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych o dopuszczenie Kandydata do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

