



Warszawa, 18.10.2023

Prof. dr hab. inż. Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa
tel. +48-22504 1214
e-mail: g.zakrzewska@ichtj.waw.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Nairi Baghdasaryana

“Modelling and Uncertainty Quantification of Nuclear Fuel Performance in HTGR”
(Modelowanie i kwantyfikacja niepewności parametrów paliwa jądrowego w HTGR)

Informacje ogólne o pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska powstała w Narodowym Centrum Badań Jądrowych pod kierunkiem prof. Tomasza Kozłowskiego. Promotorem pomocniczym pracy była dr Agnieszka Boettcher.

Dysertacja liczy 126 stron, na co składają się: wprowadzenie i przegląd literatury liczące 41 strony oraz zasadnicza, modelowo-obliczeniowa część pracy stanowiąca 85 stron. Poprzedzają je: podziękowania autora, spis treści, lista rysunków, lista tabel, wykaz stosowanych skrótów i symboli oraz streszczenie pracy w językach: angielskim i polskim.

Oryginalność i aktualność przeprowadzonych prac

Energia jądrowa to niezawodne, niskoemisyjne źródło energii, które może pomóc w ograniczeniu ilości gazów cieplarnianych uwalnianych do środowiska i przeciwdziałaniu zmianom klimatycznym. Kluczowymi czynnikami, które należy wziąć pod uwagę przy ocenie, czy energia jądrowa jest właściwym rozwiązaniem w kontekście obecnego przejścia na energię niskoemisyjną, jest znikoma produkcja dwutlenku węgla w trakcie całego cyklu życia elektrowni jądrowej. Nielektryczne wykorzystanie energii jądrowej, na przykład w ciepłownictwie czy do odsalania wody morskiej, a w przyszłości do produkcji wodoru, jest podejściem właściwym, zakładającym pełne zrównoważenie energetyki jądrowej, łączącej rozwój gospodarczy z dbałością o środowisko i dobrobytem społecznym. Takie cechy posiada kogeneracja jądrowa, która zapewnia wzrost efektywności energetycznej, prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa, zapewnia duże oszczędności ekonomiczne i jest korzystna ekologicznie w porównaniu do podejścia z osobną produkcją ciepła w klasycznej ciepłowni.



Reaktory HTGR mogą być stosowane jako bezemisyjne źródło energii elektrycznej i ciepła procesowego dla przemysłu, dzięki czemu mogą przyczynić się do zwiększenia odporności gospodarki na regulacje klimatyczne i zmiany cen paliw oraz zmniejszenie uzależnienia od importu gazu. Wysokotemperaturowy reaktor chłodzony gazem (HTGR) pozwala na osiągnięcie znacznego wypalenia, umożliwia uzyskanie wysokich temperatur i wysokich poziomów bezpieczeństwa poprzez wykorzystanie systemów pasywnych, a także poprzez zastosowanie bezpiecznego paliwa TRISO, paliwa z własną obudową bezpieczeństwa. Choć technologia TRISO została już opracowana, jej ciągłe doskonalenie jest potrzebne, choćby z punktu widzenia osiągania lepszej szczelności powłok pojedynczych ziaren, wytrzymałych mechanicznie elementów paliwowych, osiągania wysokiego wypalenia, a także postępowania z wypalonym paliwem. Ponieważ prace eksperymentalne z napromienionym paliwem są utrudnione, w sukurs przychodzi opis matematyczny poparty modelowaniem i optymalizacją parametrów paliwa.

Rozprawa doktorska mgr Nairi Baghdasaryana dotycząca technologii reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem, obecnie intensywnie rozwijanej w NCBJ, a ściślej oceny wypalenia paliwa TRISO z rdzeniami paliwowymi typu UCO i UO₂, poprzez prowadzone modelowanie i optymalizację wydajności z oszacowaniem niepewności parametrów pracy, wpisuje się w trendy nauki światowej poszukującej rozwiązań dla niskoemisyjnych źródeł energii i nowych zastosowań reaktorów jądrowych, w tym reaktorów wysokotemperaturowych.

Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w reprezentowanej dyscyplinie naukowej

W części literaturowej pracy przedłożonej do oceny p. Nairi Baghdasaryan opisał rozwój reaktorów wysokotemperaturowych: od rozwiązań eksperymentalnych w krajach będących głównymi graczami na polu technologii HTGR, tj. w Wielkiej Brytanii, USA, Niemczech, Japonii i Chinach, poprzez prototypy tych reaktorów, aż do rozwiązań, które uznał za komercyjne. Brakuje mi tutaj kryteriów podziału reaktorów na te trzy kategorie. Czym się kierował doktorant uznając pewne rozwiązania za prototypowe, inne za komercyjne? Dojrzałością danej technologii, czy osiągniętej skali technologicznego rozwiązania? Komercjalizacja to proces wprowadzania na rynek nowych produktów gotowych do sprzedaży. Nie wiem, czy wymienione przez autora pracy rozwiązania zasługują na takie miano; czy rzeczywiście stanowią gotowe produkty mogące zaspokoić ewentualnego klienta, a producentowi zapewnić osiągnięcie komercyjnego sukcesu.

W dalszej części pracy p. Nairi Baghdasaryan dokonał przeglądu literatury dotyczącej zachowania się paliwa TRISO w warunkach pracy reaktora HTGR, zjawisk fizycznych, chemicznych i mechanicznych, zachodzących w paliwie, wydajności paliwowej i jej ograniczeń. Studia literaturowe, analiza zjawisk w paliwie oraz metod i narzędzi do badania warstw TRISO doprowadziły autora pracy



do identyfikacji braków i luk w stosownych w dotychczasowych sposobach pomiaru parametrów dla rdzeni paliwowych typu UCO, jak i UO₂, również w ograniczeniach używanych modeli, co następnie podjął w swojej pracy doktorskiej. Doktorant wskazał na potrzebę dalszych badań i optymalizacji w zakresie modelowania wydajności paliwa, wywołaną ograniczeniami obecnie stosowanych modeli. Ograniczenia te wynikają z niekompletności danych wejściowych związanych z właściwościami powłok TRISO oraz z niewystarczającej wiedzy na temat powiązań zjawisk zachodzących w napromienionym paliwie. Zwrócił słusznie uwagę na konieczność oceny niepewności metod i modeli stosowanych w analizach wydajności paliwa.

Przedstawiony przegląd literatury, zapewne nie wyczerpujący tematu, jest adekwatny do przedmiotu prac przeprowadzonych w dysertacji i wskazuje na orientację doktoranta w badanej dziedzinie: w technologii HTGR i stosowanego w niej paliwa TRISO. Przegląd literatury liczy 137 pozycje i zawiera obok klasyki, wiele stosunkowo nowych publikacji.

Wyniki i osiągnięcia

Zasadniczą część pracy stanowią zagadnienia modelowania wzrostu ciśnienia w granulach paliwa TRISO oraz kwantyfikacja i ocena niepewności w szacowaniu wydajności paliwa uranowego typu UO₂ i UCO. Wzrost ciśnienia spowodowany jest ciśnieniem gazów powstających w reakcjach rozszczepienia uranu i następujących po nich reakcjach chemicznych wolnego tlenu z węglem powłok TRISO. Przeprowadzone obliczenia wypalenia za pomocą kodu Serpent do maksymalnego poziomu wypalenia 150 MWd/kgU, pozwoliły na oszacowanie stężenia gazowych produktów rozszczepienia, głównie gazów szlachetnych (Xe, Kr oraz He powstającego poprzez rozszczepienie trójskładnikowe). Stężenie wolnego tlenu prowadzącego do powstawania tlenków węgla (w założeniu głównie tlenku CO) obliczono za pomocą modeli Prokscha i Homana. Tu nasuwa się moje pytanie o tlenek CO₂: z jakimi stężeniami można się liczyć w przypadku dwóch typów paliw rozpatrywanych w pracy i na jakich danych opierano się przy decyzji o zaniechaniu tego produktu w modelowaniach. Czy były gdzieś prowadzone odpowiednie eksperymenty, czy dane o stężeniach pochodzą również z modelowań i symulacji? Dodatkowo, prezentacja wyników za pomocą modeli Prokscha i Homana wymaga dyskusji; wyniki dwóch modeli znacząco się różnią, zwłaszcza dla niższych wypaleń. Czy Doktorant potrafi wyjaśnić z czego mogą wynikać te różnice? W kontekście pierwszego pytania celowe jest też wyjaśnienie, jakie molekuly powstają w wyniku działania wolnego tlenu, oprócz CO, skoro Doktorant stwierdza, że wartości koncentracji CO są przeszacowane?

Do oceny wzrostu ciśnienia w warstwie buforowej dwóch typów paliwa Doktorant zastosował równanie gazu doskonałego i równanie stanu Redlicha – Kwonga porównując następnie wyniki tych dwóch modeli. Różnice ciśnienia dla Xe nie są duże, wzrastają z wielkością wypalenia do 1,77 %.



Uzyskane wyniki modelowania wskazują na mały udział He i CO. Jak widać, wzrost ciśnienia jest przede wszystkim powodowany wkładem stężeń Xe i Kr.

W swojej pracy p. Nairi Baghdasaryan obliczył również maksymalne naprężenia rozciągające warstwy SiC cząstki TRISO i oszacował zakres jej zniszczenia za pomocą rozkładu Weibulla. Oprócz wzrostu ciśnienia istnieje wiele innych zjawisk mogących wpłynąć na uszkodzenie mechaniczne cząstek TRISO, takich jak, np. migracja jądra czy odklejanie się warstwy IPyC. Dokładna ocena naprężeń w warstwie SiC jest szczególnie ważna dla określenia granicy bezpieczeństwa, gdyż to warstwa węglkowa daje pełną gwarancję pełnej szczelności paliwa.

Rozdział 4 pracy został poświęcony kwantyfikacji niepewności parametrów geometrycznych i materiałowych. W celu oceny wydajności paliwa Doktorant przeprowadził obliczenia dla 5 grup przypadków, przy użyciu kodu BISON wykorzystującego metodę elementów skończonych. Odnosząc kwantyfikację niepewności do danych eksperymentalnych reaktora AGR-2 z tzw. „zaawansowanym paliwem”, z eksperymentu przeprowadzonego w Idaho National Laboratory, w celu optymalizacji uwzględnił różne kombinacje danych wejściowych. Doświadczenia były przeprowadzone dla dwóch typów paliwa: UCO i CO₂, w różnych kapsułach i przy zmiennych parametrach fluencji i wypalenia. Jedną z kapsuł wybrano jako referencyjną. W analizie niepewności p. Nairi Baghdasaryan użył jedynie parametrów geometrii i gęstości paliwa, co prawdopodobnie będzie wstępem do dalszych, bardziej rozwiniętych rozważań biorących pod uwagę również zagadnienia termohydrauliczne. Jako analizowane parametry celowe wybrał: ciśnienie gazu, penetrację Pd, naprężenia promieniowe i styczne na warstwie SiC oraz frakcje uszkodzeń warstw SiC i IPyC określone z zależności Weibulla. Rozdział 4.2. zawiera szczegółową analizę niepewności, zobrazowaną odpowiednimi rozkładami wielkości celowych; wyznaczono ich średnie, wartości minimalne i maksymalne; porównano z wartościami referencyjnymi. Analiza wykazała małe różnice pomiędzy wartościami średnimi i referencyjnymi badanych parametrów, wynoszące zwykle 1-3%. Natomiast różnice pomiędzy wartościami referencyjnymi a maksymalnymi były duże: w przypadku oceny frakcji uszkodzeń wynosiły 65 % dla warstwy IPyC i aż 80 % dla SiC.

Przeprowadzone analizy dały szereg interesujących wyników; choć niepełne, stanowią potencjał dla optymalizacji własności paliwa TRISO nie tylko z perspektywy integralności mechanicznej, a także wstęp do dalszych badań prowadzących do pełnych ocen ilościowych paliwa potrzebnych dla zapewnienia bezpieczeństwa przyszłych reaktorów HTGR.

Uwagi

Praca zawiera pomyłki; niektóre poniżej je wymieniam:



- Pomyłka w numeracji rozdziałów, brakuje rozdziału 2.1.3.6.
- W wielu miejscach pracy (również w publikacji w Nuclear Engineering and Design) występuje termin „layer deboning”; prawdopodobnie chodzi o „layer debonding” czyli odklejenie warstwy, a nie o „odkostnienie”.
- Wg opisów Rys. 38 i 39, pokazane są na nich wyniki dla paliwa UCO, podczas gdy w tekście pracy znajdujemy odniesienie do obu typów paliw: UCO i UO₂.
- Page 61: zamiast “section 3” powinna być “section 4.3”.
- W Tabeli 4.3 błędne jednostki długości: zamiast [mm] powinny być [μm]

Posumowanie końcowe

Praca doktorska mgr Nairi Baghdasaryana jest interesująca, dostarcza informacji na temat paliwa TRISO oraz zjawisk w nim zachodzących, prowadzących często do uszkodzeń warstw ochronnych granuli, których prawidłowa ocena ważna jest dla bezpieczeństwa przyszłych reaktorów HTGR. Pokazuje jak można zjawiska, takie jak np. wzrost ciśnienia w pojedynczym elemencie paliwa opisać i zamodelować, w taki sposób, aby uzyskać szerszą wiedzę na temat struktury TRISO i jego zachowania w reaktorze. W pracy znajdujemy podejście, które można wykorzystać również przy opisie innych typów reaktorów jądrowych.

Przygotowując dysertację Pan Nairi Baghdasaryan wykazał się nie tylko wiedzą z zakresu technologii HTGR i stosowanego w niej paliwa, ale przede wszystkim zdolnościami w użyciu dostępnych narzędzi matematycznych i modeli do opisu zjawisk występujących podczas pracy paliwa w wysokich temperaturach.

Ważnym punktem pracy doktorskiej była kwantyfikacja niepewności parametrów paliwa TRISO. Dla uzyskania wiarygodnych wyników, konieczne są odpowiednie, wiarygodne dane wejściowe do stosowanych modeli matematycznych. Zwiększone zaufanie do stosowanych modeli i uzyskiwanych za ich pomocą wyników przekłada się na bezpieczeństwo reaktorów, czy w tym przypadku paliwa jądrowego. W tym aspekcie należy uznać pracę p. Nairi Baghdasaryana i zastosowane w niej podejście oraz pozyskaną wiedzę za ważne i rozwijające.

Wyniki prac studialnych przeprowadzonych przez Doktoranta zostały już przedstawione w publikacji w czasopiśmie Nuclear Science Engineering (2020), a prac modelowych w 2 publikacjach w czasopiśmie Nuclear Engineering and Design (2021) i (2023). Recenzentka zapoznała się również z dostępnymi w Internecie publikacjami p. Nairi Baghdasaryana, będącymi rezultatami jego wcześniejszej współpracy z Nuclear and Radiation Safety Center w Armenii, wskazujące na ugruntowane już zainteresowanie Doktoranta zagadnieniami paliwowymi w reaktorach jądrowych



INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ

oraz modelowaniem procesów przebiegających w napromienionym i zużytym paliwie, również analizą niepewności w opisie ilościowym zjawisk w nich zachodzących.

Podsumowując swoją recenzję pragnę stwierdzić, że praca doktorska Pana mgr Nairi Baghdasaryana skupia się na zagadnieniach ważnych, takich jak bezpieczna praca przyszłych reaktorów jądrowych, a szczególnie reaktorów wysokotemperaturowych. Budowa paliwa TRISO ogranicza uwalnianie substancji radioaktywnych do otoczenia, przez co ma istotny udział w zagwarantowaniu ich bezpieczeństwa. Wzmocnieniu bezpieczeństwa służy m.in kwantyfikacji parametrów paliwa i odpowiednie podejście do oceny niepewności i wrażliwości w ocenie zbieranych danych potrzebnych do opracowania modeli matematycznych.

Przedłożona rozprawa doktorska Pana mgr Nairi Baghdasaryana spełnia wymagania Ustawy: „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (test jednolity Dz. U. z 11 marca 2022 r., poz. 574) określone w artykule 187, tzn. prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie: nauki fizyczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, które w przyszłości może być zastosowane w sferze gospodarczej. Z uwagi na powyższe, wnoszę o przyjęcie pracy przez Radę Naukową NCBJ i o dopuszczenie do dalszych czynności przewodu doktorskiego w dyscyplinie Nauki Fizyczne, w Dziedzinie Nauk: Nauki Ścisłe i Przyrodnicze.

Grażyna Selwańska-Kotłowska