



Kraków, 18.10. 2023

Prof. dr hab. Jerzy W. Mietelski  
Zakład Fizykochemii Jądrowej IFJ PAN  
[jerzy.mietelski@ifj.edu.pl](mailto:jerzy.mietelski@ifj.edu.pl)  
+126628392

### **Recenzja poprawionej rozprawy doktorskiej Pana Nairi Baghdasaryan pt. "Modelling and the Uncertainty Quantification of Nuclear Fuel Performances in HTGR"\*)**

Wysokotemperaturowe reaktory grafitowe chłodzone gazem (HTGR) są jednym z rodzajów tzw. reaktorów jądrowych czwartej generacji, z którymi wiązane są spore nadzieje. Ich nowatorska konstrukcja polegająca na ruchomym, migrującym rdzeniu i zbudowanym z przesypanych się elementami paliwowych w formie pastylek ma zapewniać zarówno wyższą wydajność, jak i bezpieczeństwo eksploatacji. Wyższa wydajność termodynamiczna wymaga wyższej temperatury, co powoduje wiele problemów dla bezpieczeństwa pracy, ze względu na ograniczenia temperaturowe stosowanych materiałów. Ta sprzeczność potrzeb jest poważnym wyzwaniem dla technologii materiałowej, który otwiera duże pole do badań. Przedmiot przedstawionej rozprawy znajduje się w tym obszarze. Praca powstała w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, promotorem jest Pan prof. dr hab. Tomasz Kozłowska a promotorem pomocniczym jest Pani dr Agnieszka Boettcher.

Po uwagach krytycznych zawartych w mojej pierwszej recenzji pierwotny tekst rozprawy został znacząco skorygowany i udoskonalony, co przyjmuję z radością. W obecnej formie komunikatywność pracy jest zdecydowanie poprawiona i zdecydowana większość moich uprzednich zarzutów jest już nieaktualna.

Zasadniczy układ pracy pozostał ten sam. Rozprawa rozpoczyna się od spisu treści, rycin i tabel, po którym następują streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz skrótów i symboli użytych w tekście. Treść pracy zawarta jest w pięciu rozdziałach. W Rozdziale 1 sformułowano cele i ogólny zakres rozprawy. Autor deklaruje tam, że celem pracy jest dostarczenie nowych danych wspomagających optymalizację procesu produkcyjnego cząstek paliwa TRISO przy jednoczesnym zwiększaniu bezpieczeństwa i wydajności wysokotemperaturowych reaktorów chłodzonych gazem. W szczególności dotyczy to niepewności w analizie wydajności paliwa TRISO oraz niesłuchanie ważnego dla bezpieczeństwa problemu odporności na naprężenia rozciągające w warstwie SiC paliwa TRISO. Dążąc do zrealizowania tak określonego celu intencją Autora było zbadano sześciu szczegółowych zagadnień:

1. Jakie są aktualne wyzwania i pytania otwarte w analizie wydajności paliwowej TRISO z perspektywy modelowania i symulacji?



2. W jaki sposób stężenie gazów pochodzących z rozszczepienia oraz helu w pastylkach paliwa TRISO wpływa na maksymalne naprężenie rozciągające w warstwie SiC i jak bardzo wyniki różnią się w zależności od obecnie stosowanych metod?
3. Jak uszkodzenia warstwy SiC w cząstkach paliwa TRISO różnią się w zależności od typu paliwa (UCO vs UO<sub>2</sub>) i jak zmienia się to w zależności od poziomu wypalenia?
4. Jaką rolę odgrywa uwalnianie wolnego tlenu w cząstkach paliwa TRISO na mechaniczne zachowanie warstwy SiC i jakie są niepewności w obecnie stosowanych metodach?
5. Jak duża jest niepewność w obliczeniach narastania ciśnienia w warstwie buforowej, jaki może mieć wpływ na integralność mechaniczną cząstek TRISO i które modele są bardziej konserwatywne a więc bardziej adekwatne z punktu widzenia bezpieczeństwa?
6. Jak duży wpływ na integralność mechaniczną warstwy SiC mają zmiany właściwości geometrycznych i materiałowych cząstek TRISO, jak zmienia się ich zachowanie w zależności od wypalenia i czy może ono podlegać to optymalizacji?

Rozdział 2 zawiera przegląd budowanych reaktorów HTGR. Przedstawiono reaktory sklasyfikowane jako eksperymentalne, prototypowe i komercyjne. Opisano zarys ideowy poszczególnych konstrukcji i zwięźłą historię danego reaktora. W grupie eksperymentalnych znalazły się reaktory: Dragon (Wlk. Brytania), Peach Bottom Unit 1 (USA), AVR (RFN), HTTR (Japonia), HTR-10 (Chiny). Jako konstrukcje prototypowe przedstawiono reaktory: THTR (RFN) i FSV (USA). W grupie reaktorów komercyjnych przedstawiono niezrealizowane projekty PR-500, HHT, HTR-500, HTGR-1160 (USA), PNP, PBMR (RPA) i ANTARES (Francja). Część projektów nie jest powiązana przez Autora z żadnym z krajów, z kontekstu wynika że były to zasadniczo projekty niemieckie. W dalszej części tego rozdziału omówiono doświadczenia eksploatacyjne, np. zjawiska wpływające na wydajności paliwa TRISO. Są one podzielone na trzy kategorie: zjawiska ogólne (nagromadzenie ciśnienia w warstwie buforowej, efekty anizotropii, wytwarzanie i transfer ciepła z rdzenia, migrację rdzenia, gromadzenie się i uwalnianie produktów rozszczepienia), zjawiska chemiczne i zjawiska mechaniczne. Dla każdej grupy przeprowadzany jest przegląd obecnych możliwości modelowania i stawiane są pytania dla przyszłych badań. Całość utrzymuje się na poziomie nieco pogłębionego opisu popularnonaukowego, jednak głębsze wnikanie w opis teoretyczny zjawisk lub metod badawczych czy modelowania nie był tu niezbędny w mojej ocenie, jako nie mający bezpośredniego związku z pracą wykonaną w doktoracie. Zdecydowanie przekraczałby to też zwyczajowe ramy stawiane rozprawie doktorskiej. Uważam, że przegląd osiągnięć i problemów techniki grafitowych reaktorów wysokotemperaturowych zawarty w Rozdziale 2 jest bardzo wartościowym osiągnięciem i wskazuje na znaczące kompetencję i wiedzę Autora w tym zakresie. Również walor dydaktyczny takiego zestawienia jest nie do przecenienia.

W Rozdziale 3 przeprowadzono analizę narastania ciśnienia w cząstkach paliwa TRISO z rdzeniami UCO i UO<sub>2</sub> dla różnego wypalenia. Wzrost ciśnienia wewnątrz cząstek TRISO jest wynikiem powstawania i gromadzenia gazów na skutek trzech głównych procesów, mianowicie gazy te są wytwarzane podczas rozszczepienia, powstają podczas oddziaływania tlenu z warstwą węgla (CO, CO<sub>2</sub>) oraz pochodzą (głównie hel) z tzw.



rozszczerzenia trójskładnikowego. Autor zauważa, że w dotychczasowych modelach zakładało się, że udział helu jest znikomy i nie był on brany pod uwagę. Jednak w przypadku głębokiego wypalenia akumulacja helu być może musi być uwzględniona. Zagadnienie to jest w recenzowanej tu pracy bardziej szczegółowo rozważone. W pierwszym podejściu nie rozważano molekularnych gazów pochodzących z uwalniania tlenu ograniczając się do paliwa w którym nie stosuje się  $UO_2$  a jedynie UCO. Stężenia gazów z rozszczepienia oraz helu wewnątrz rdzenia reaktora były modelowane typowymi narzędziami. W modelowaniu korzystano z istniejącego programu Serpent. W dalszych rozważaniach uwzględniono jednak śladową produkcję CO w paliwie z uranem w formie UCO. Obliczenia prowadzono w stosując empiryczne wzory modeli Homana lub Proksch'a. Autor uzupełnił w pewnym stopniu opisy tych modeli, jednak pewien niedosyt poznawczy pozostaje. Wyniki obliczeń różnią się znacząco dla płytkiego wypalenia zbliżając się jednak do siebie wraz ze wzrostem wypalenia (rys. 3.7). Wyniki pełnego modelowania tworzenia się wszystkich gazów wskazują (rys. 3.8 i 3.9), że ksenon odpowiada za nawet 80% powstającego w paliwie ciśnienia niezależnie od formy chemicznej uranu w paliwie. Rys. 3.11 najbardziej wyraziście unaocznia różnicę wyników modelowania opartego o metody Homana lub Proksch'a dla mniej istotnych gazów, co aż prosi się o wskazanie tej bardziej prawdziwej metody. Tego mi zabrakło. Jednocześnie, wyniki pokazane na rys. 3.13 sugerują, że dla modelowania całkowitego ciśnienia, różnice pomiędzy dwoma podejściami są małe, chociaż systematycznie większe wartości otrzymuje się w metodzie Homana, a więc jest ona bardziej konserwatywna. Ale czy prawdziwa, czy nie nazbyt ostrożna? Nie znajduję na to pytanie jednoznacznej odpowiedzi w pracy. Jednocześnie zagadnienie to prowadzi bezpośrednio do następnego rozdziału. Rozdział 4 poświęcony jest badaniu niepewności modelowania dla różnych cząstek paliwa TRISO dla paliwa UCO i  $UO_2$ . Wyniki modelowania porównywane były z doświadczeniem przeprowadzonym w reaktorze AGR-2 w USA, w którym sześć kapsuł zawierających każda po 12 elementów (pastylek) paliwowych było starannie monitorowanych ze względu na temperaturę i uwolnienia gazów. Po trzy kapsuły zawierały pastylki każdego z testowanych typów paliwa (np. paliwo zawierające UCO było w kapsułach 2,5 i 6 a  $UO_2$  w pozostałych). Procesy zachodzące w paliwie modelowano programem BISON. Modelowano zachowanie się paliwa dla pięciu wartości wypalenia. Modelowanymi parametrami było: ciśnienie gazu w buforze, głębokość wnikania Pd w warstwę SiC, maksymalne radialne naprężenia w warstwie SiC, naprężenia styczne w SiC i udział defektów w wybranych warstwach paliwa. Wyniki odnoszono do wyników z wybranej jednej kapsuły referencyjnej. Zaprezentowano je na kolejnych wielu stronach w formie zarówno rysunków jak i tabel. Wiele rysunków ujawnia periodyczną lub quasi periodyczną strukturę, nie jest to jednoznacznie wyjaśnione lub skomentowane przez Autora. W podrozdziale 4.3. przeprowadzono krótką dyskusję wyników. Zauważono, że wynik dla ciśnienia mogą być niezgodne z rzeczywistymi w zakresie do ok. 30% modelowanych wartości. Nieznacznie mniejszą ocenę niepewności uzyskano dla naprężeń radialnych i naieznacznie większą dla tangencjalnych.

W Rozdziale 5 przedstawiono podsumowanie wyników. Stanowi on rozbudowane streszczenie pracy, czy też swoistą autorecenzję. Autor formułuje tam kilka najbardziej palących problemów całej technologii paliwa TRISO, a więc:



1. uwzględnienie gazów rozszczepieniowych i lotnych produktów rozszczepienia w obliczeniach ciśnienia warstwy buforowej w celu zwiększenia dokładności modelowania.
2. Szersze zastosowanie nowo opracowanego sztucznego grafitu
3. Dopracowanie metody oceny niepewności dla transportu ciepła w elemencie paliwowym.
4. Dopracowanie metody oceny skutków tzw. migracji rdzenia na analizę wydajności paliwa.
5. Dopracowanie metody uwalniania się produktów rozszczepienia z elementów paliwowych, zwłaszcza uwzględnienie kilku pomijanych dotąd metali.
6. Lepsze rozumienie reakcji chemicznych w obrębie pastylki paliwowej.
7. Stworzenie bardziej zintegrowanych narzędzi modelowania

W kwestii problemów związanych z generacją gazów w elementach paliwowych Autor wymienia jako najważniejsze następujące obserwacje i wnioski:

1. Ksenon stanowi główny czynnik (~80%) zarówno dla paliwa UCO, jak i  $UO_2$ .
2. Krypton odpowiada za około 18% ciśnienia całkowitego w przypadku paliwa UCO i za około 10% w przypadku  $UO_2$ .
3. Udział helu gazowego w całkowitym ciśnieniu dla paliwa  $UO_2$  jest wyższy niż dla paliwa typu UCO, jednak wartości te są bardzo małe nawet przy wysokich wartościach wypalenia (poniżej 0,2% dla obu typów).
4. Udział CO w ciśnieniu całkowitym wzrasta wraz z wypalaniem w modelu Prokscha zmierzając do 2% natomiast w modelu Homana sięga 10%. Nie ma niestety konkluzji, która ocena bardziej zasługuje na uwagę.
5. Prawo gazu doskonałego i równanie stanu Redlicha-Kwonga dają podobne wyniki dla płytkiego wypalenia.
6. W przypadku wysokich wartości wypalenia zalecane jest użycie równania Redlicha-Kwonga.
7. Ryzyko uszkodzenia pastylek paliwa (z uwzględnieniem jedynie wzrostu ciśnienia wewnątrz paliwa TRISO) jest większe dla paliwa  $UO_2$  niż w przypadku UCO, jednak jest znacząco mniejsze od przyjętych kryteriów akceptacji.
8. Potrzebne jest głębsze zrozumienie korelacji między wzrostem ciśnienia a innymi zjawiskami zachodzącymi dla paliwa TRISO.

Wymienione obserwacje i wnioski są dobrze uzasadnione i nie budzą moich wątpliwości w oparciu o zaprezentowane w pracy rozważania.

Wyniki uzyskane w zasadniczym dla pracy Rozdziale 4 Autor podsumowuje w następujący sposób:

1. Niepewności geometryczne i materiałowe dla ciśnienia między przypadkiem referencyjnym a średnim wynosiły około 1%, jednak maksymalna różnica wynosiła do 30%.



2. Głównymi czynnikami w analizie niepewności wartości ciśnienia (zwłaszcza przy wyższych wartościach wypalania) były gęstości SiC i OPyC.
3. Różnica między przypadkami referencyjnymi i średnimi dla wartości naprężenia radialnego warstwy SiC wynosiła około 1%, natomiast dla przypadku maksymalnego wynosiła około 28%.
4. Różnica między przypadkiem referencyjnym a średnim dla wartości naprężenia stycznego warstwy SiC wynosiła około 1%, natomiast dla przypadku maksymalnego wynosiła około 32%.
5. Różnica między przypadkami referencyjnymi a średnimi dla częstości defektów warstwy IPyC wynosiła około 1%, natomiast dla przypadku maksymalnego wynosiła około 65%.
6. Różnica między przypadkiem referencyjnym a średnim dla częstości zniszczenia warstwy SiC wyniosła około 3%, natomiast dla przypadku maksymalnego wyniosła około 80%.
7. Rozkłady badanych parametrów w większości nie były normalne, dlatego dla bardziej precyzyjnych ocen potrzebne są dalsze dodatkowe obliczenia.

Zaprezentowane wnioski są poprawne i uzasadnione w świetle przeprowadzonego eksperymentu.

Poprawiona praca zyskała na komunikatywności w stopniu wystarczającym dla rozumienia celów i wyników przeprowadzonych modelowań, jednocześnie w warstwie głębszego rozumienia fizyki metod pozostaje mały niedosyt. Jednak praca w obecnej formie jest dobrze zredagowana i przedstawia wartościowy naukowo materiał. Znacząco poprawiono czytelność prezentowanych na rysunkach zależności dzięki starannemu opisowi osi.

Wywiązując się z obowiązku recenzenta muszę zauważyć też nieliczne drobne niedociągnięcia takie jak np.

1. W spisie skrótów (str. 10, „Abbreviations” ale umieszczonych raczej błędnie w części „Greek symbols and letters” symbole związków chemicznych takich jak CO, CO<sub>2</sub> czy UO<sub>2</sub> i UCO zapisane są kursywą, co nie jest ogólnie przyjęte. Na szczęście w tekście dysertacji symbole te jednak występują pisane prostą czcionką (co jest właściwe).-
2. Równanie Redlicha-Kwonga pojawia się w omówieniu na str. 50 jako wzór 3.5, jednak pierwszy raz wspomniane jest już na stronie 30 a potem ponownie jest wzmianka na stronie 43. Byłoby wskazane, już wtedy odnieść się np. poprzez numer wzoru i stronę, niejako antycypując jego późniejsze omówienie w pracy.
3. Na str. 57 (wstęp Rozdziału czwartego) pojawia się zdanie ”There are several publications which are addressing the impact of uncertainties of geometrical and material data on failure fraction of TRISO particles [127-128].” A więc słowo “several” odnosi się do dwóch publikacji, co wydaje się trochę przesadą.



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

---

Przechodząc do końcowej konkluzji mojej recenzji chcę zauważyć, że bardzo drobne powyższe uchybienia i pewien niedosyt poznawczy pozostający w kwestii szczegółów modeli wykorzystanych w pracy nie umniejszają obecnie generalnie pozytywnej mojej oceny przedstawionej do recenzji pracy w jej aktualnej formie. Jestem przekonany, że obecnie praca doktorska Pana Nairi Baghdasaryan pt. "Modelling and the Uncertainty Quantification of Nuclear Fuel Performances in HTGR" spełnia wszelkie ustawowe wymogi stawiane obecnie rozprawie doktorskiej, określone w stosownej Ustawie o stopniach i tytułach naukowych i stąd wnoszę o dopuszczenie jej Autora, Pana Nairi Bahdasaryana, MSc do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

---

\*<sup>i</sup> Chociaż rozprawa napisana jest w języku angielskim, zostałem poinformowany, że recenzja ma być napisana po polsku.