

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

Prof. dr hab. inż. Marek Lankosz

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Stanisza

**pt. „Lead cooled reactor neutronic study towards verification of nuclear data and
modelling methodology for nuclear transmutation”**

Wypalenie wszystkich aktywności w procesie produkcji energii cieplnej w reaktorach jądrowych na neutrony prędkie w istotny sposób może podnieść efektywność wykorzystania zasobów paliwa jądrowego. Jest to realizowane poprzez odzyskiwanie i ponowne wykorzystanie aktywności a tym samym zamknięcie jądrowego cyklu paliwowego. W recenzowanej pracy do modelowania ewolucji izotopów w czasie spalania paliwa został zastosowany program komputerowy MCB (Monte Carlo Continuous Energy Burnup Code). Symulacje komputerowe zostały wykonane dla złożonych procesów jądrowych w planowanym do budowy europejskim reaktorze na neutrony prędkie z chłodzeniem ołowiem ELFR-(European Lead-cooled Fast Reactor). Zaadaptowany na potrzeby realizacji badań program komputerowy MCB uwzględnia ciągłą reprezentację energetyczną przekrojów czynnych, efekty przestrzenne dla rdzenia reaktora jak również posiada automatyczne algorytmy wyliczające produkcję izotopów dla wszystkich możliwych trajektorii przemian jądrowych. W recenzowanej pracy zaproponowano nowe rozwiązanie, które pozwala na ekspansję ewolucji paliwa jądrowego za pomocą zestawu łańcuchów poza jeden krok obliczeniowy. Trajektorie przygotowane dla każdego kroku obliczeniowego są połączone w procedurze składania okresów, co pozwala badać zmieniające się paliwo poprzez łańcuchy transmutacyjne w długim okresie czasu. Nowa metoda umożliwia nie tylko śledzenie zmian stężenia



**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

nuklidów, ale również pozwala na śledzenie ich ewolucji co daje nowe narzędzie na potrzeby analizy cyklu paliwowego. W recenzowanej pracy poza matematycznym opisem przemian aktywności pokazany został graficzny sposób zastosowania algorytmu obliczeń poprzez zobrazowanie struktury danych w formie grafów. Analizowany w pracy recykling paliwa może produkować izotopy wpływające na bezpieczeństwo pracy reaktorów. Niektóre z izotopów są silnymi emiterami neutronów na drodze spontanicznego rozszczepienia a tym samym produkcja tych izotopów utrudnia proces przetwarzania zużytego paliwa jądrowego. Zaproponowana metoda obliczeniowa umożliwi również wspomaganie weryfikacji danych jądrowych oraz poprawne modelowanie przemian jądrowych. Ponadto, możliwa jest identyfikacja trajektorii przemian tych nuklidów, które mają priorytetowe znaczenie dla potrzeb bezpieczeństwa jądrowego. Autor rozprawy na potrzeby realizacji badań opracował i zaimplementował w języku FORTRAN procedury umożliwiające badanie procesu wypalania paliwa jądrowego za pomocą programu MCB. Opracowana nowa wersja programu komputerowego MCB była wykonywana na komputerze PROMETHEUS z uwagi na konieczność przetwarzania bardzo dużych zasobów danych jądrowych.

Licząca 202 stron praca ma typowy układ dysertacji doktorskiej, przy czym zasadniczy tekst podzielony jest na osiem rozdziałów i jest poprzedzony streszczeniem. Do pracy dołączono spis treści, listę i znaczenie użytych skrótów, bibliografię oraz trzy załączniki.

W rozdziale pierwszym swojej rozprawy doktorant przedstawił podstawowe informacje dotyczące rozwoju energetyki jądrowej i jej wpływ na ochronę środowiska. Szczególną uwagę autor pracy zwraca na rolę rozwoju technologii reaktorów na szybkich neutronach. Ta nowa koncepcja budowy reaktorów energetycznych jest ściśle związana z bardziej efektywnym wykorzystaniem paliwa jądrowego, wzrostem bezpieczeństwa jądrowego, ekonomicznymi aspektami produkcji energii oraz restrykcjami związanymi z rozpowszechnianiem materiałów rozszczepialnych. Na zakończenie tego rozdziału, doktorant podał cele przedstawionej rozprawy doktorskiej.

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

Podkreśla, że główne cele obejmowały szczegółową analizę wpływu jądrowych przekrojów czynnych na generowanie trajektorii i przemian/rozpadów w formowanych szeregach przemianach jądrowych mających bezpośredni wpływ na transmutacje wewnątrz paliwa jądrowego. Na potrzeby swych badań autor wykorzystał procedurę opartą na teorii analizy czułości. Ponadto, celami pracy było znalezienie tych izotopów, które są odpowiedzialne za generowanie i narastanie izotopów będących źródłem neutronów w wypalonym paliwie jądrowym (Cm, Bk, Cf). Wspomniana analiza czułości została wykorzystana do identyfikacji najbardziej istotnych przekrojów czynnych na oddziaływanie neutronów z nuklidami dla widma neutronów generowanego w reaktorze. Procedura ta była realizowana poprzez niewielkie zmiany wartości przekrojów czynnych i ocenie ich wpływu na obliczenia wypalania paliwa. Dzięki temu, możliwe będzie udoskonalenie zarządzania paliwem jądrowym poprzez zmniejszanie niepewności wartości przekrojów czynnych i w konsekwencji redukcję źródeł neutronów które mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo zakładów przetwarzania paliwa jądrowego.

Kolejny rozdział został poświęcony budowie reaktora europejskiego ELRF, podstawom technologii budowy tego typu reaktora oraz konfiguracji instalacji reaktora oraz systemu zabezpieczeń. Następnie autor bardzo szczegółowo zobrazował budowę rdzenia reaktora oraz prętów paliwowych. Doktorant opisuje na czym polega adiabatyca równowaga cyklu paliwowego jak również warunki jakim mają podlegać cykle paliwowe. Rozważane są dwa rodzaje cykli, bez zewnętrznego ładowania mniejszościowych aktywności lub z dodaniem mniejszościowych aktywności do utylizowanego paliwa jądrowego. W dalszej części tego rozdziału autor przedstawił na czym polega modelowanie adiabatycznego cyklu paliwowego dla europejskiego reaktora zastosowaniem metody MCB.

Rozdział trzeci stanowi właściwe wprowadzenie w tematykę pracy doktorskiej. W rozdziale tym autor rozprawy przedstawił równania (różniczkowe równania Batemana) opisujące ewolucję kompozycji i stężeń izotopów związane z ich rozpadem promieniotwórczym jak również spowodowane przez reakcje jądrowe wywołane przez

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

neutrony lub inne cząstki. W równaniach opisujących spalanie paliwa do obliczeń zmian składu izotopowego paliwa wykorzystano stałe rozpadów promieniotwórczych, natomiast wydajność transmutacji izotopów obliczano w oparciu o wydajności reakcji jądrowych oraz przestrzenną gęstość strumienia neutronów i ich widmo energetyczne. Obliczenia transportu neutronów umożliwiają obliczenie rozkład gęstości strumienia neutronów oraz współczynnika ich powielania. Różniczkowa forma tych równań określa szybkość zmian stężenia i -tego izotopu w funkcji szybkości wytwarzania izotopu, jego usuwania w wyniku reakcji jądrowych oraz rozpadu promieniotwórczego. Zestaw takich równań może być rozwiązywany za pomocą rachunku macierzowego. Dla potrzeb rozwiązania układu równań opisujących spalanie paliwa jądrowego autor zastosował aproksymację za pomocą liniowych łańcuchów przemian jądrowych. Ponadto, zaproponował i opisał matematyczne warunki uzyskiwania stanu równowagi adiabatycznej w ewolucji paliwa. Główną zaletą metody łańcuchów liniowych jest fakt, że łańcuchy przemian nuklidów reprezentują serie przemian jądrowych które zachowują całkowitą informację ilościową o przemianach transmutacyjnych. Ważnym osiągnięciem tego etapu badań jest wykazanie, że zastosowane przez autora rozprawy rozwiązanie równań Batemana dostarcza numerycznego narzędzia dla potrzeb rozwiązania równań opisujących transmutacje składników paliwa, która reprezentuje fizyczny aspekt zmiany masy nuklidów w czasie dla modelowanego łańcucha przemian jądrowych. Rozwiązanie równań opisujących spalanie paliwa dostarcza informacje o składzie nuklidów na końcu obliczanego okresu czasowego. Nowy skład chemiczny paliwa jest wykorzystany do obliczeń transportu neutronów i sprzęga transport neutronów z obliczeniami spalania dla kolejnego cyklu.

Rozdział czwarty opisuje nowatorską metodologię analizy transmutacji jądrowych. W zaproponowanej metodologii zmiana mas przy bezpośrednich przejściach jądro-jądro prowadzących do łańcucha transmutujących jąder w każdym kroku obliczeń jest interpretowana dla całkowitego okresu będącego celem zainteresowania. Dzięki temu wszystkie ilościowe informacje dotyczące procesu transmutacji ograniczone do

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

pojedynczego kroku obliczeń są zachowane. Procedury te umożliwiają wyliczenie przejść transmutacyjnych w czasie eksploatacji paliwa jądrowego. Ważnym dla oceny recenzowanej pracy doktorskiej jest opis weryfikacji obliczeń wypalania paliwa. Autor wskazuje dwa typy błędów wpływających na dokładność obliczeń, tzn. błędy przypadkowe oraz błędy systematyczne. Doktorant podaje szereg wzorów umożliwiających obliczanie niepewności statystycznych wynikających z charakteru modelowania strumienia neutronów i oddziaływania neutronów z jądrami w metodzie Monte Carlo. W rozdziale tym autor rozprawy opisuje swój wkład w rozwój kodów komputerowych na potrzeby realizacji pracy doktorskiej. Zaproponowana metodyka umożliwia lepsze poznanie fizycznych aspektów procesów transmutacji, a tym samym pomaga zidentyfikować najważniejsze reakcje decydujące o bezpieczeństwie reaktorowym. Ponadto, wyniki te są niezwykle przydatne w projektowaniu reaktorów na neutrony prędkie.

W kolejnych trzech rozdziałach swojej pracy doktorskiej, mgr inż. Stanisław przedstawił wyniki obliczeń jakie wykonał dla modelu cyfrowego reaktora ELFR. W rozdziale piątym modelowano ewolucje mas w transmutacjach jądrowych dla każdego mniejszościowego aktynowca. Motywacją zaproponowanych obliczeń było lepsze zrozumienie jak mieszane paliwo plutonowo-uranowe -MOX z dodatkiem mniejszościowych aktynowców pochodzących wielu recyklingowych wsadów paliwowych wpływa na ewolucję nuklidów w systemie. Obliczenia wykonano dla okresu 124,2 lat co odpowiada 2-3 czasom życia elektrowni jądrowej. Do najważniejszych rezultatów tych symulacji należy zaliczyć fakt, że masy nuklidów ulegających transmutacjom ewoluują według krzywych posiadających ekstrema lokalne. Autor rozprawy zauważył również, że transmutacje coraz to cięższych izotopów odbywają się za pośrednictwem ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am i ^{244}Cm a jeszcze inne transmutacje powodują powstanie cięższych izotopów takich jak kiur i kaliforn. Innym ważnym wnioskiem jest stwierdzenie, że powstawanie cięższych aktynowców obniża zdolności rozszczepienia paliwa a tym samym wpływa na aspekty ekonomiczne użytkowania

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

reaktorów. Ponadto, ważnym jest wykazanie, że redukcja czasu chłodzenia zużytego paliwa wpływa na utwardzenie widma neutronów w reaktorze a tym samym może poprawić efektywność rozszczepialności paliwa. Znajomość indywidualnej ewolucji mniejszościowych aktynowców umożliwia ponadto przygotowanie bardziej optymalnego składu paliwa jądrowego jak również umożliwia analizę zmienności reaktywności reaktora ELRF po kilku cyklach paliwowych.

W rozdziale szóstym badano wpływ niepewności danych jądrowych na czasową ewolucję aktynowców. Niepewności w wartościach danych przekrojów jądrowych mają istotny wpływ na dokładność obliczeń a tym samym wpływają na bezpieczeństwo związane z przetwarzaniem i transportem paliwa jądrowego w zakładach przeróbki zużytego paliwa. Jest to niezwykle ważne w przypadku obecności izotopów niebezpiecznych z punktu widzenia przetwarzania zużytego paliwa a spowodowane generowaniem ciepła w czasie ich rozpadu promieniotwórczego oraz obecnością neutronów pochodzących z ich rozszczepień spontanicznych (kiur, berkel, kaliforn).

Wyniki symulacji, których celem była ocena wpływu niepewności wartości przekrojów czynnych na reakcje jądrowe generowane przez neutrony w procesie wypalania paliwa przedstawiono w rozdziale siódmym pracy doktorskiej. Do oceny wpływu niepewności przekrojów czynnych na wydajność obliczanych reakcji jądrowych doktorant zastosował parametryczną analizę czułości (wrażliwości) w której obliczano wpływ 1% zmiany wartości przekrojów czynnych na wyniki obliczeń reaktorowych. Wyniki obliczeń wykazały, że współczynniki czułości pozostają zasadniczo stałe i nie przekraczają 1%. Obliczenia wykazały ponadto, że na przykład reakcja $^{241}\text{Am} (n, \gamma)$ ma największy wpływ na produkcję ^{244}Cm , a reakcja ta występuje w większości modelowanych trajektorii. Ponadto autor wykazał, że niepewność obliczenia mas mniejszościowych aktynowców ma priorytetowe znaczenie w projektowaniu reaktorów czwartej generacji szczególnie w aspekcie obliczania poziomu stężenia nuklidów wpływających na bezpieczeństwo pracy reaktora. Ważnym wnioskiem wynikającym z obliczeń jest potwierdzenie, że przekroje czynne dla Cm i innych ciężkich izotopów są

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

obarczone dużą niepewnością przekrojów czynnych i dane te powinny być uaktualnione poprzez przeprowadzenie stosownych eksperymentów.

Recenzowaną pracę kończy rozdział ósmy obejmujący podsumowanie wyników badań, wnioski końcowe oraz wytyczne dotyczące przyszłych badań. Do najważniejszych osiągnięć swoich badań autor zaliczył:

- opracowanie nowatorskiej metody numerycznej analizy ewolucji paliwa jądrowego.
- zaimplementowanie z sukcesem opracowanej metodyki do badania transmutacji jądrowych.
- zaobserwowanie pików w narastaniu masy niektórych transmutujących nuklidów przed osiągnięciem równowagi adiabaticznej.
- wykazanie, że ciężkie izotopy powstają za pośrednictwem ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am i ^{244}Cm .
- potwierdzenie, że kod analizy trajektorii transmutacji w rozwiązaniu równań Batemana dla kolejnych przedziałów czasowych może być wykorzystany dla przedstawienia ewolucji mas dla całego cyklu naświetlania paliwa włączając wielocykliczne powtórne ładowania paliwa jądrowego.
- zaobserwowanie silnego wpływu czasu chłodzenia wypalonego paliwa na szlaki transmutacji, co można wykorzystać na potrzeby optymalizacji gospodarki paliwem jądrowym.

Do najważniejszych wniosków wskazanych przez doktoranta należy zaliczyć fakt, że wyniki wykonanych symulacji mogą być wykorzystane na potrzeby udoskonalania konfiguracji rdzenia reaktora ELRF i zredukować długożyciowe toksyczne odpady radioaktywne.

W pracy autor zacytował 93 pozycje literatury naukowej, w tym siedem własnych publikacji, w których jest wiodącym autorem lub współautorem. Świadczy to o tym, że wyniki badań autora rozprawy znalazły uznanie w międzynarodowym środowisku naukowym.

Przechodząc do oceny pracy trzeba przede wszystkim zgodzić się z wnioskami autora, że postawione cele badań zostały osiągnięte. Przedstawiona do recenzji praca

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

stanowi istotny krok w badaniach nad zjawiskami fizycznymi związanymi z wypalaniem paliwa jądrowego w reaktorach na szybkie neutrony. Autor rozprawy zasługuje przede wszystkim na uznanie za swoje umiejętności umożliwiające opracowanie kodów programów komputerowych i wykonania obliczeń za pomocą opracowanych programów na ultranowoczesnych maszynach komputerowych.

Pracę można uznać za napisaną w sposób poprawny pod względem stylistycznym i językowym. Autor niniejszej recenzji zauważył tylko jeden błąd drukarski. Niestety, niektóre wykresy są nieczytelne z uwagi na bardzo małe wielkości czcionek stosowanych do opisu osi. Praca nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym. Pewne zastrzeżenia budzi jednak strona redakcyjna rozprawy. Praca jest zbyt obszerna i zawiera aż 202 strony. W pracy niezwykle szczegółowo przedstawiono konstrukcje reaktorów na neutrony prędkie, budowę rdzeni reaktorów a także prętów paliwowych. Autor rozprawy dużo uwagi poświęcił przedstawieniu podstaw fizycznych działania reaktorów oraz podał dobrze znane równania opisujące wypalanie paliwa oraz transmutacje aktynowców. Odnośnie wyników obliczeń to przedstawione zostały wszystkie wyniki obrazujące trajektorie i łańcuchy przemian wszystkich aktynowców w czasie wypalania paliwa. Tak napisana praca jest doskonałym podręcznikiem dla studentów w zakresie nauczania fizyki reaktorów na neutrony prędkie oraz umożliwia poznanie szlaków przemian składników paliwa jądrowego. Czytelnikowi niekiedy jednak trudno jest się zorientować, które uzyskane rezultaty symulacji odgrywają istotną rolę w spalaniu paliwa jądrowego w reaktorach na szybkie neutrony i produkcji aktynowców a które są mniej istotne oraz co jest nowatorskim osiągnięciem naukowym doktoranta. Poniżej przedstawiono ważniejsze uwagi krytyczne dotyczące ocenianej pracy:

-rozdział 4,8 jest poświęcony weryfikacji obliczeń wypalania paliwa jądrowego. Czytając jednak tekst tego rozdziału nie można znaleźć dowodów potwierdzających poprawność uzyskanych wyników. Wprawdzie autor podaje jakimi błędami mogą być obarczone zrealizowane symulacje, brak jednak porównania uzyskanych wyników na

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

przykład z podobnymi symulacjami uzyskanymi przez inne zespoły badawcze przedstawionymi w literaturze.

-w modelowaniu transportu neutronów metodą Monte Carlo ważną rolę w obliczeniach odgrywa niepewność statystyczna. Autor podaje jaką liczbę historii rozpatrywał. Brak jednak informacji przy jakiej niepewności statystycznej obliczenia był zakańczane.

-szkoda, że w rozdziale 4,9 brak jest schematu blokowego opracowanego programu komputerowe. Doktorant ograniczył się jedynie do przedstawiona wydruk kodu tego programu w Załączniku A. Autor rozprawy powinien jasno pokazać co jest Jego dziełem twórczym a co zostało zaczerpnięte z istniejących programów komputerowych.

-na rysunkach przedstawiających wyniki obliczeń w rozdziałach 6 i 7 autor niestety nie podaje jakimi niepewnościami obarczone są przedstawiane wyniki.

-niezwykle interesujące byłoby podanie przez autora jak duże są błędy obliczonych wielkości związanych z wypalaniem paliwa i transmutacją izotopów spowodowane niepewnością przekrojów czynnych stosowanych w obliczeniach oraz uproszczeniami w modelowaniu zjawisk fizycznych związanych z wypalaniem paliwa. Autor wprawdzie wykonał parametryczną analizę czułości na potrzeby oceny wpływu niepewności w wartościach stosowanych jądrowych przekrojów czynnych na wyniki obliczeń trajektorii przemian przy produkcji ciężkich aktynowców, ale wyniki te nie pozwalają jednak ocenić jakie są na przykład maksymalne błędy obliczonych stężeń wytworzonych nuklidów.

Wspomniane powyżej uwagi wymagają wyjaśnienia przez doktoranta w czasie publicznej obrony pracy doktorskiej.

Podsumowując należy stwierdzić, że podjęta przez autora tematyka badań jest bardzo ważna z punktu widzenia naukowego. Przeprowadzone badania świadczą o dużych umiejętnościach doktoranta. Istotnym osiągnięciem doktoranta jest potwierdzenie możliwości wykorzystania metod fizyki jądrowej do modelowania

**Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI**

zjawisk związanych z wypalaniem paliwa jądrowego w reaktorach na szybkie neutrony. Badania te należy uznać za bardzo istotne na potrzeby rozwoju energetyki jądrowej. Jak już wspomniano w niniejszej recenzji, wyniki badań doktoranta zostały opublikowane w siedmiu artykułach naukowych w czasopismach o zasięgu światowym co świadczy o wysokiej pozycji autora rozprawy w środowisku międzynarodowym. Reasumując, pragnę stwierdzić, że przedstawiona praca pt. **„Lead cooled reactorneutronic study towards verification of nuclear data and modelling methodology for nuclear transmutation”** spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony w celu uzyskania stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.

Marek Lankosz

Kraków, 20.01.2018