

Prof. dr hab. Krzysztof Drozdowicz
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Kraków

Kraków, 20 stycznia 2018 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Przemysława Stanisza:**

*Lead cooled reactor neutronic study towards verification
of nuclear data and modelling methodology for nuclear transmutations.*

Autor pracy prowadzi powyższe studium na przykładzie konkretnego modelu przyszłego reaktora jądrowego IV generacji na neutrony prężkie – ELFR, czyli *European lead cooled fast reactor*, co związane jest z prześledzeniem ewolucji paliwa. Podstawę fizyczną stanowią obliczenia transportu neutronów w rdzeniu oraz procesu wypalania paliwa, gdzie istotną rolę odgrywają transmutacje nuklidów. Ponieważ w takiej analizie istotna jest jak najdokładniejsza znajomość wartości danych jądrowych (przekrojów czynnych na różne reakcje jądrowe i transmutacje), przedstawione studium może być krokiem w kierunku weryfikacji tych danych, gdyż zawiera analizę wpływu zmian wartości przekrojów czynnych na zmiany przebiegu transmutacji w paliwie.

Przedstawiona rozprawa jest bardzo obszernym opracowaniem, liczącym ok. 200 stron i zawiera całościowy opis ewolucji paliwa w reaktorze ELFR, pokazując na tym tle zastosowanie przez autora nowej metody w analizie trajektorii transmutacji – metody składania trajektorii w okresach. Jest ona opisana na ok. 30 stronach w rozdz. 4, a dalsze części rozprawy (ok. 80 stron) prezentują wyniki obliczeń autora wg zaproponowanej metody.

Cała praca jest podzielona na 8 rozdziałów i uzupełniona trzema Dodatkami.

W rozdziale 1 (*Introduction*) nakreślone są powody skłaniające do budowy reaktorów jądrowych IV generacji, m.in. problem dopalania zużytego paliwa zawierającego aktywność mniejszościowe lub – ogólniej – problem zarządzania paliwem w cyklu. Z wymienionych czterech typów technologii najbardziej prawdopodobnych dla przyszłej konstrukcji prototypu autor rozprawy wybrał dla swojego studium model ELFR, jak wspominałem powyżej,

Stąd rozdział 2 (*Fast-neutron Reactor – Design considerations*) zawiera dokładny opis modelu europejskiego reaktora na neutrony prężkie, chłodzonego ołowiem. Oprócz zamieszczenia danych konstrukcyjnych podany jest szczegółowy opis rdzenia – konfiguracja i skład (427 zespołów paliwowych po 169 prętów paliwowych każdy). Dla rdzenia omówiono ideę tzw. adiabatycznego cyklu paliwowego, w którym będzie się wykorzystywać wszystkie wytwarzane aktywność.

Ważnym fragmentem jest podrozdział opisujący modelowanie adiabaticznego cyklu reaktora ELFR przy pomocy kodu komputerowego MCB. Pan Przemysław Stanisław uczestniczył w modelowaniu i obliczeniach komputerowych opisanych w artykułach [24] i [25] (wg listy zamieszczonej w dysertacji), a tutaj omawia końcowe wyniki otrzymanej optymalizacji.

Rozdział 3 (*Time evolution of nuclide concentrations*) zawiera podstawy opisu ewolucji nuklidów, opartego na różniczkowych równaniach Batemana. Autor referuje możliwość ich rozwiązania metodą macierzową z uwzględnieniem niestacjonarności problemu.

Kolejnym sposobem jest rozwiązanie z użyciem metody liniowych łańcuchów transmutacji. Uwzględnienie zależności czasowej następuje przez wykonanie kroków obliczeniowych (czyli obliczeń w kolejnych okresach cyklu paliwowego), zakładając stałość strumienia neutronów w danym okresie.

Tu doktorant podaje szczegółowy opis matematyczny [w równaniach (3.13) do (3.39)], wprowadzając m.in. dla trajektorii pojęcia funkcji *transition* i *passage*.

Następnie w studium w podrozdziale 3.5 (*TTA – transmutation trajectory analysis*) pokazuje przykład budowania trajektorii transmutacji w uranowym (U-238) łańcuchu wypalania.

Rozdział 4 (*The trajectory periods folding method*) opisuje, jak wspomniałem na początku, wkład własny doktoranta do metodologii modelowania.

W przytoczonych wcześniej metodach obliczeniowych wypalania paliwa, tempa transmutacji wyliczone w danym kroku służą do obliczenia nowego składu materiałowego i zostają nadpisane przez wartości następującego kroku. W ten sposób nie ma możliwości interpretacji tempa transmutacji w całym cyklu paliwowym.

Doktorant wprowadza tu nową metodologię analizy transmutacji. Jej istotą jest użycie metody składania trajektorii (określa to jako wyjście poza jeden krok obliczeniowy). Trajektorie z każdego kroku obliczeniowego są łączone w procedurze tzw. składania okresów. W podrozdziałach 4.2 do 4.5 autor przedstawia odnośny aparat matematyczny [równania (4.01) do (4.29)].

Rozdział jest uzupełniony przez studium 4.6. *Period folding*, pokazujące tworzenie trajektorii transmutacji w dwóch okresach: A – rodzina ^{238}U i w B – rodziny ^{238}U , ^{239}U , ^{239}Np , ^{239}Pu , ^{240}Np , ^{240}Pu . Zagadnienia realizacji numerycznej zostały przedstawione (częściowo graficznie) w podrozdziale 4.7, o nieco górnolotnie brzmiącym tytule *Computer science*, a następny podrozdział omawia zagadnienie weryfikacji obliczeń wypalania paliwa w reaktorze, co w zasadzie odnosi się nie tylko do metody zaprezentowanej w rozprawie.

Metoda składania trajektorii została przez doktoranta zaimplementowana w kodzie MCB (*Monte Carlo Continuous Energy Burnup Code*) rozwijanym w macierzystej Katedrze i odpowiedni fragment programu komputerowego jest zamieszczony w *Appendix A*.

W rozdziale 5 (*Nuclear transmutation for individual minor actinides mass evolution*) doktorant zawarł wyniki swoich obliczeń. Obejmują one analizę krytyczności rdzenia reaktora ELFR w okresie 200 lat oraz wyliczenie zmian masy poszczególnych aktynowców na skutek transmutacji. W stanie początkowym przyjęto w paliwie 1.347 % udziału aktynowców (wartość typowa dla wypalonego paliwa z reaktora lekko-wodnego). Zestawienie w Tabeli 5.1 w chwilach czasowych 0, 124 i 600 lat prezentuje wartości dla 25 izotopów (U, Np, Pu, Am, Cm). Autor omówił wszystkie trajektorie szczegółowe i zobrazował wyniki w funkcji czasu 0 do 124 lat na licznych wykresach (Fig. 5.3 do 5.27). Analiza uzupełniona jest wyliczeniem zmian źródła emisji neutronów z rozszczepień spontanicznych.

Bardzo istotne jest podsumowanie na końcu rozdziału zawierające wysnute przez doktoranta wnioski dotyczące fizyki transmutacji w paliwie reaktora typu ELFR, osiągnięte dzięki możliwości prześledzenia historii indywidualnych zmian poszczególnych nuklidów wg wprowadzonej metody składania trajektorii, aż do osiągnięcia składu równowagowego.

W rozdziale 6 (*ELFR period folded trajectories*, w spisie treści widniejącym jako *Trajectories evolution*) autor wykorzystuje numeryczny model reaktora ELFR, przedstawiony w rozdziale 2, do opracowania łańcuchów transformacji do Pu-238, Cm-244, Cf-252, na ogół wywodzących się od kilku przodków. Pokazane są wykresy przebiegów czasowych w przedziale od 0 do 123.2 lat, najczęściej wartości *transition*.

Rozdział 7 (*Parametric sensitivity analysis*) opisuje przeprowadzoną parametryczną analizę czułości wg zasad podanych w podrozdziale 4.8 przy okazji omawiania weryfikacji obliczeń wypalania paliwa postulowaną metodą. Współczynnik czułości (*sensitivity coefficient*) został zdefiniowany w równ. (4.33), jako wskazujący wielkość względnej zmiany trajektorii lub koncentracji nuklidu na skutek danej względnej zmiany przekroju czynnego na określoną reakcję.

W obliczeniach wypalania używa się wartości tempa reakcji (*reaction rate*), które zależy od spektrum strumienia neutronów i od przekrojów czynnych. W metodzie parametrycznej autor stosuje zmiany tempa reakcji $\pm 1\%$ (która to modyfikacja koresponduje z odpowiednią rozbieżnością przekrojów czynnych). Po wykonaniu obliczeń MC obserwuje się odpowiadającą różnicę np. w wartości *transition* dla trajektorii.

Dzięki takiej analizie można stwierdzić, dla których trajektorii (jako najbardziej czułych na zaburzenie wejściowe) dane jądrowe powinny mieć najwyższą dokładność.

Rozprawę kończy rozdział 8 (*Conclusions*), zawierający także rekomendacje dla dalszej pracy w poruszonej tematyce.

Najogólniej można stwierdzić, że została zaprezentowana i zastosowana nowa metoda numerycznej analizy ewolucji paliwa reaktorowego dzięki otwarciu możliwości dokładnego śledzenia trajektorii transmutacyjnych w całym cyklu paliwowym. Doktorant wylicza dziesięć najważniejszych obserwacji wynikających z przeprowadzonego studium. Widzi też

możliwość czy potrzebę dalszych prac w powiązaniu z przedstawioną metodą składania trajektorii. Jest to np. możliwość wykorzystania w analizie kołysania reaktywności w danym rdzeniu (dzięki analizie scenariuszy przy zmianach początkowego wektora paliwowego). Innym bezpośrednim zastosowaniem byłoby użycie tej metody do oceny wpływu niepewności poszczególnych parametrów wejściowych (koncentracji nuklidów, stałych zaniku i transmutacji, przekrojów czynnych, strumienia neutronów) na stan końcowy w rdzeniu. Szerszym zastosowaniem byłby współudział w eksperymentach i obliczeniach *benchmarkowych* (analizy porównawcze z użyciem różnych narzędzi numerycznych, bibliotek danych jądrowych i wyników eksperymentalnych) pozwalających na eliminację błędów systematycznych, prowadząc do zminimalizowania możliwych niepewności.

Pracę uzupełniają trzy Dodatki (*Appendix A, B, C*), niestety niezatytułowane. Pierwszy zawiera fragment komputerowego programu (Fortran 90) włączającego metodę składania trajektorii do kodu MCB; drugi prezentuje rozważania dotyczące izotopów Pu-244 i Cm-250, nie ujęte w głównej części pracy; w trzecim zebrane są w 14 tabelach wyliczone (w funkcji czasu do 123.2 lat) wartości *transition* i *passage* trajektorii prowadzących do Cm-244, Pu-238 i Cf-252 (wykorzystane do sporządzenia wykresów w rozdziale 6).

Spis literatury obejmuje 93 pozycje wykorzystane przez doktoranta przy opracowaniu rozprawy, przy czym ponad 40 z nich (nie licząc bieżących cytacji z internetu) pochodzi z ostatnich 10 lat.

Omówiona pokrótce zawartość tematyczna rozdziałów wskazuje na ich logiczny układ dla całego studium. Spełnia się więc teza pracy wyrażona w tytule jako *Studium neutroniki reaktora chłodzonego ołowiem*. Druga część przyjętego tytułu (jako *Krok ku weryfikacji danych jądrowych oraz metodologii modelowania dla transmutacji jądrowych*) została spełniona przez doktoranta przez zaproponowanie nowej metody, prześledzenie wyników jej zastosowania i na koniec przeprowadzenie parametrycznej analizy czułości. Szkoda, że doktorant zbyt skromnie zaznacza własny wkład, co może czasem sprawiać wrażenie, że tylko referuje znane zagadnienie (np. bezosobowe stwierdzenie: „*transmutation trajectory generator was developed*”, str.59).

Ważny jest jeszcze jeden aspekt pracy doktoranta. Przedstawione studium wpisuje się w poszukiwania rozwiązań dla przyszłości energetyki jądrowej, a mianowicie optymalnego doboru i przetwarzania paliwa reaktorowego w celu jak najlepszego wykorzystania jego zasobów jak i zminimalizowania ilości radioaktywnych odpadów dzięki wypaleniu aktywności w cyklu paliwowym.

Stronę edytorską oceniam na ogół bardzo dobrze z nielicznymi wyjątkami, a mianowicie:

- na stronie tytułowej „Cracov” zamiast „Cracow”,
- na str. 183 numer podrozdziału 8.1 zamiast 8.3,
- różny tytuł rozdziału 6 w spisie treści i w tekście rozprawy,

- nazwa dolnego indeksu „suffix” zamiast „subscript” (str. 59)
- zbyt małe niektóre wykresy (np. Fig. 6.2 i następne tego typu), przez co legenda jest prawie nieczytelna,
- zbyt drobna czcionka w wielu zapisach trajektorii w rozdziale 6 (str. 145, 147, i wiele następnych),
- w części wstępnej pod tytułem „Major nomenclature” mieści się raczej „List of acronyms”, natomiast odczuwam brak spisu oznaczeń wielkości fizycznych stosowanych w pracy (np. „List of symbols”, albo właśnie „Nomenclature”).

Praca jest napisana przejrzysto po angielsku, ale jestem zaskoczony niezręcznościami językowymi w niewielkim streszczeniu po polsku. Można również zastanawiać się nad tłumaczeniem tytułu pracy na język polski – odczuwam tu nieco inny wydźwięk tematu.

Dotychczasowe spostrzeżenia nie wymagają komentarza. Poniżej zamieszczam uwagi, na które oczekuję odpowiedzi.

- 1) Poważniejszym potknięciem redakcyjnym jest błędne podanie jednostek fizycznych w objaśnieniach symboli pod równaniem (3.01). W odpowiedzi na recenzję proszę o zaprezentowanie tego równania z objaśnieniami zawierającymi poprawne jednostki.
- 2) Doktorant wielokrotnie słusznie zwraca uwagę na znaczenie dokładności wartości przekrojów czynnych, a w pracy brakuje nawet wzmianki, jakie biblioteki danych jądrowych zostały użyte w przeprowadzonych obliczeniach.
- 3) Wygodne byłoby dla czytelnika mniej zaawansowanego w tematyce precyzyjne określenie relacji pomiędzy pewnymi wielkościami, którymi autor operuje ze swobodą. Może w postaci graficznej?
Np. takie, jak: okres (*considered period*), łańcuch (*transmutation chain*), rodziną (*family*), *trajectory transition*, *trajectory passage*.
- 4) Kod MCB (*Monte Carlo Continuous Energy Burnup Code*) jest od wielu lat opracowywany i rozwijany w Katedrze Energetyki Jądrowej na Wydz. Energetyki i Paliw AGH w Krakowie. Łączy on program MCNP (transport cząstek metodą Monte Carlo) z programem TTA (*Transmutation Trajectory Analysis*). Był poprzednio stosowany do obliczeń dla reaktorów na neutrony termiczne. Tu doktorant modyfikował go dla celów obliczeniowych dla reaktora na neutrony prędkie i na dodatek dla nowej specyficznej metody. Czy istnieją różne wersje kodu MCB (odpowiednio dedykowane), czy w ogólnym kodzie wybiera się opcje? Brak takiej informacji w pracy.

W końcowej ocenie stwierdzam, że przedstawione *Lead cooled reactor neutronic study towards verification of nuclear data and modelling methodology for nuclear*

transmutations świadczy o znajomości przez doktoranta potrzeb weryfikacji modelowań i wartości przekrojów czynnych dla udokładnienia analiz prowadzonych dla reaktorów jądrowych IV generacji. Pan Stanisław wykazał się umiejętnością matematycznego i numerycznego rozwiązywania postawionego zagadnienia, dobrą prezentacją wyników, zdolnością do formułowania obserwacji i wniosków z nich płynących oraz umiejętnością nakreślenia kierunków dalszej pracy wpływających z przeprowadzonego studium.

Wspomniane przeze mnie drobne usterki edytorskie nie wpływają w żadnym stopniu na wartość merytoryczną pracy, a oczekiwane odpowiedzi na pytania zamieszczone w recenzji będą stanowić tylko pewne doprecyzowanie poszczególnych aspektów studium.

Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymogi stawiane takim pracom i wnoszę o dopuszczenie pana mgr. inż. Przemysława Stanisława do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

M. Dworkin