

Prof. dr hab. Mieczysław Budzyński  
Instytut Fizyki UMCS  
20-031 Lublin  
Pl. M. Curie-Skłodowskiej 1  
budzyn@poczta.umcs.lublin.pl

Lublin, 2015.12.28

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Pacana pt: "Procesy fizyczne w tarczach spalacyjnych układów reaktorowych sterowanych wiązkami elektronów"

Praca została przygotowana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr hab. Bronisława Słowińskiego. W pracy badano możliwość dopalania i transmutacji wypalonego paliwa jądrowego w układach podkrytycznych. Dodatkowo neutrony pochodziły z  $^{252}\text{Cf}$  lub wytwarzane były w oddziaływaniu wiązek protonów lub elektronów z tarczami ołowianymi i wolframowymi. Pracę wykonano metodą modelowania numerycznego korzystając z kodów MCNPX (wersja 2.6.0) i FLUKA (wersja 2011.2.7). Doktorant jest współautorem 2 publikacji w czasopismach z listy filadelfijskiej (Annals Nucl. Energy i Progress in Nuclear Energy), 5 komunikatów w raportach IEA i NCBJ, dwu komunikatów na konferencjach międzynarodowych i dwu referatów na konferencjach krajowych

Zawiera ona następujące elementy. W rozdziale pierwszym przedstawiono aktualny stan energetyki jądrowej na świecie oraz zasadę działania reaktora chłodzonego lekką wodą. W rozdziale drugim opisano postępowanie ze zużytym paliwem jądrowym i jego recykling. W rozdziale trzecim opisano podkrytyczny reaktor na paliwie torowym służący do dopalania i transmutacji zużytego paliwa typu EK-10 z reaktora PWR. Rozdział czwarty zawiera wyniki oddziaływania wiązek elektronowych o energii  $100 \div 1000$  MeV z tarczami spalacyjnymi. Rozdziały piąty i szósty to podsumowanie i perspektywy dalszych badań.

W pracy w sposób wyważony i uczciwy przedstawiono stan energetyki jądrowej na świecie, jej udział w produkcji energii elektrycznej oraz wypadek w elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi. Polska potrzebuje stabilnych i akceptowalnych ekologicznie źródeł energii. Warunki te spełnia współczesna energetyka jądrowa pod warunkiem zagospodarowania wykorzystanego paliwa jądrowego. W otwartym cyklu paliwowym wykorzystuje się około 0,85 % zawartego w nim uranu a jednocześnie wytwarzane jest paliwo jądrowe w postaci plutonu i szereg izotopów promieniotwórczych o wysokiej aktywności. W ostatnich dziesięcioleciach przerób zużytego paliwa jądrowego koncentrował się na odzyskaniu plutonu i uranu z prętów paliwowych co zwiększało o 25 ÷ 30 % ilość energii otrzymywanej z pierwotnego uranu. Problemem jest wysoki poziom aktywności odpadów po przetworzonym w ten sposób paliwie jądrowym. Aktywność i produkty rozpadu o długim okresie połowicznego rozpadu zawarte w przetworzonym paliwie jądrowym mogą być przetwarzane w krótko żyjące izotopy poprzez bombardowanie ich neutronami prędkimi. Proces ten zwany transmutacją zachodzi w układach (reaktorach) podkrytycznych zawierających dodatkowe źródło neutronów. Te dodatkowe neutrony wytwarzane są w procesie spalacji tarcz o dużej liczbie atomowej (U, W, Pb) przez wiązkę protonów o energii około 1 GeV.

Główną zaletą tej pracy jest poszukiwanie odpowiedzi na dwa pytania:

- Jak rozmieścić zużyte pręty paliwowe EK-10 z reaktorów PWR w zestawie podkrytycznym YALINA aby uzyskać maksymalny efekt transmutacji i produkcji energii?
- Czy proces spalacji może być prowadzony efektywnie przez wiązkę elektronów?

Pracę układu podkrytycznego YALINA o efektywnym współczynniku mnożenia neutronów  $k_{ef} < 0,98$  funkcjonującego dzięki neutronom emitowanym przez izotop  $^{252}\text{Cf}$  symulowano za pomocą kodu numerycznego MCNPX przy czterech różnych konfiguracjach rdzenia. Poszczególne konfiguracje rdzenia różniły się liczbą i lokalizacją prętów paliwowych EK-10 i prętów torowych zawierających 60% atomowych  $\text{ThO}_2$ . Badano zmiany, jakie powoduje zastąpienie części prętów z wypalonego paliwa jądrowego przez pręty z paliwem torowym. Uzasadnia to wielokrotnie większa zawartość  $^{232}\text{Th}$ , niż uranu w przyrodzie. Badano zmiany w czasie: efektywnego współczynnika mnożenia neutronów, intensywności powstawania  $^{233}\text{U}$ , składu transuranowców i aktynowców.

Przeprowadzone symulacje dały ciekawe wyniki pomimo ograniczenia wynikającego z nieuwzględniania strumienia neutronów pochodzących z zewnętrznego źródła, którym był  $^{252}\text{Cf}$ .

- Podkrytyczny układ z prętami torowymi zapewnia dostateczną stabilność współczynnika mnożenia neutronów.
- Wypalone paliwo z elektrowni PWR zmieszane z prętami torowymi jest w większym stopniu wykorzystane w układach ADS na neutronach ciepłych.
- Wytwarzana jest mniejsza ilość jąder radiotoksycznych przy generowaniu energii w przypadku paliwa składającego się z mieszaniny wypalonego paliwa jądrowego i prętów torowych w porównaniu do rdzenia wypełnionego tylko prętami EK-10, ale wzrasta ilość izotopów pierwiastków ziem rzadkich.

Druga część rozprawy poświęcona możliwości generowania neutronów przez wiązkę elektronów oddziaływujących z tarczami składającymi się z pierwiastków o dużej liczbie atomowej. Być może większa ilość akceleratorów liniowych, postępujące ich udoskonalanie oraz niższe koszty doprowadzą do ich zastosowania w układach ADS pomimo mniejszej wydajności generowania neutronów przez jeden elektron w porównaniu z protonem o tej samej energii 1 GeV.

Badano efekty napromieniania tarcz ołowianych wiązką elektronów o energiach  $200 \div 1000$  MeV: intensywność i widmo energetyczne neutronów wtórnych, indukowana promieniotwórczość oraz rozkład energii w tarczach o dwu różnych wymiarach. Otrzymano interesujące wyniki.

- Widma neutronów emitowanych pod wpływem elektronów i protonów o energiach większych niż 10 MeV istotnie się różnią.
- Wydajność emisji neutronów przez wiązkę elektronów jest o dwa rzędy wielkości mniejsza niż przez wiązkę protonów o tej samej energii.
- Promieniotwórczość tarczy napromienianej w ciągu roku wiązką protonów jest o trzy rzędy wielkości mniejsza niż napromienianej wiązką elektronów o tych samych parametrach.

W pracy brak uzasadnienia wykorzystania kodów MCNPX i FLUKA. Jakie są ich zalety i ograniczenia? W pracy na rys. 4.2 i 4.3 pokazano liczbę neutronów wydostających się z tarcz składających z miedzi, ołowiu, uranu i tantalu po uderzeniu pojedynczego elektronu o energii  $20 \div 40$  MeV, ale interesujący nas zakres energii jest znacznie większy do 1 GeV. Ponadto rysunki te są nieczytelne.

Uwagi o charakterze technicznym i redakcyjnym.

- Doktorant używa określenia „starsze i młodsze aktynowce” lepszym określeniem również

- ze względu na właściwości fizyczne byłoby cięższe i lżejsze aktynowce.
- Nie rozumiem dlaczego prawie cała strona 3 z rozdziału „Streszczenie” została przekopiuwana do rozdziału „Wnioski” – strona 53 i 54.
  - Żargonowe określenie „liniaki (linaki)” – str.8<sup>18</sup> powinno być zamienione na akceleratory liniowe.
  - Jeśli już jesteśmy zmuszeni do zaakceptowania określenia „dopalenie” paliwa jądrowego to nie mogę zaakceptować następującej frazy: „Przedstawiono różne kompozycje zestawu podkrytycznego podpalanego źródłem promieniotwórczym kalifornium”.
- Praca zawiera szereg potknięć o charakterze technicznym i redakcyjnym. Największą przeszkodą w percepcji rozprawy spowodowały dwie decyzje i nieuwzględnienie ich skutków przez doktoranta:

- zmniejszenie rozmiaru publikowanej strony z A4 na B5,
- rezygnacja z kolorowych rysunków na rzecz czarno-białych.

Działania te o charakterze oszczędnościowym spowodowały że praktycznie wszystkie rysunki, za wyjątkiem dwu pierwszych 1.1 i 1.2, są nieczytelne. Wszystkie nieczytelne rysunki zawierają przecież wyniki badań. Dobrym posunięciem było wydanie rozprawy jako publikacji Politechniki Warszawskiej. Rozprawa na to zasługuje i poszerzy to krąg jej potencjalnych odbiorców

Wyniki uzyskane przez doktoranta mogą być wykorzystane przy projektowaniu i budowie prostych prototypowych podkrytycznych urządzeń do badania transmutacji, dopalania i zwiększenia efektywności wykorzystania zużytego paliwa jądrowego z klasycznych reaktorów jądrowych.

Recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*M. Budzinski*