

Prof. dr hab. inż. Maciej Budzanowski
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 30.08.2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Macieja Maciaka

Tytuł rozprawy:

"Metody wyznaczania równoważnika dawki i widma promieniowania neutronowego z wykorzystaniem detektorów rekombinacyjnych i pasywnych z moderatorami wielowarstwowymi"

Wstęp

Detekcja neutronów, ze względu na oddziaływanie ich z materią poprzez reakcje jądrowe jest trudniejsza. Dodatkowo w dozymetrii i ochronie radiologicznej ważnym parametrem jest współczynnik jakości promieniowania, który w przypadku neutronów zmienia się znacząco w zależności od energii. Energia neutronów i znajomość widma jest kluczowa zarówno do detekcji jak i obliczenia równoważnika dawki, co szczególnie jest kluczowe w nieznanach polach neutronowych. Dodatkowo najczęściej mamy do czynienia z mieszanymi polami neutronów i promieniowaniem gamma co dodatkowo utrudnia obliczanie dawki, tym bardziej dawki skutecznej.

Neutrony w narażeniu na promieniowanie są powszechnie stosowane w źródłach neutronowych izotopowych tj. ^{252}Cf , $^{239}\text{Pu-Be}$, $^{241}\text{Am-B}$, $^{226}\text{Ra-Be}$, akceleratorowych tj. generatory neutronowe D-T czy D-D, reaktorach jądrowych energetycznych i badawczych, akceleratorach fotonowych medycznych z energiami powyżej 10 MeV, akceleratorach przyspieszających protony np. w radioterapii protonowej czy akceleratorach przyspieszających ciężkie cząstki np. jony węgla. W ostatnich latach powszechne stały się w badania z inżynierii materiałowej, farmacji i biologii w wiązce neutronów ze źródeł spalacyjnych, gdzie osiąga się rzędy wielkości większe strumienie neutronów niż w pozostałych wymienionych powyżej źródłach. To powoduje, że tematyka dozymetrii neutronów jest na czasie i przydatna w praktycznych zastosowaniach w ochronie radiologicznej czy w radioterapii BNCT czy FNT.

W Polsce pionierami badań w zakresie wyznaczenia współczynnika jakości promieniowania w polach neutronowych był Śp Prof. Mieczysław Zielczyński z Narodowego Centrum Badań Jądrowych oraz Śp. Prof. Natalia Gołnik z Politechniki Warszawskiej. Ich prace nad zastosowaniem własnych opracowanych komór rekombinacyjnych przyczyniły się do rozwoju tej dziedziny zarówno w Kraju jak

i zagranicą. Pan mgr inż. Maciej Maciak jest kontynuatorem tych badań i z powodzeniem rozwija nowe metody.

Opis rozprawy

Przedstawiona praca doktorska ma niestandardowy format ponieważ jest w postaci tzw. zszywki publikacji. Jest to sposób dopuszczalny ustawowo. Dotychczas tzw. zszywki były stosowane w autoreferatach procedury habilitacji nie mniej osoba-naukowiec mający tytuł magistra z wieloletnim dorobkiem naukowym ma możliwość przygotowania rozprawy doktorskiej załączając publikacje stanowiące przedmiot rozprawy. Do opisu rozprawy zwyczajowo przedstawia się prace rozdziałami. W tym przypadku wdaje się, że najlepsza ocena pracy będzie poprzez ocenę publikacji. Pan mgr inż. Maciej Maciak załączył 7 monotematycznych i obejmujących zakres doktoratu publikacji oznaczonych od A do G.

Publikacja A zatytułowana „*Study on the influence of the B_4C layer thickness on the neutron flux and Energy distribution shape in multi-electrode ionization chamber*” i F zatytułowana „*Multisignal ionization chamber with a B_4C coating as an active neutron beam spectrometer: Monte Carlo simulations*” obejmują zastosowanie metody aktywnej – komory rekombinacyjnej wielosygnałowej ozn. KW-1. Badania w tym zakresie koncentrowały się nad określeniem/optymalizacją warstwy boru B_4C i wpływu jej gęstości powierzchniowej na wielkość gęstości strumienia neutronów oraz rozkład energetycznych widma neutronów. Doktorant najpierw przeprowadził symulacje transportu i oddziaływania promieniowania metodą obliczeniową Monte Carlo z użyciem kodu MCNPX i FLUKA. Dzięki optymalizacji określono warstwę boru, a także maksymalizację dawki pochłoniętej w gazie komory. Wyniki potwierdziły, że dodanie warstwy B_4C o grubości 26 mm wielokrotnie zwiększa odpowiedź komory w całym zakresie energetycznym neutronów (1 meV do 20 MeV). Autor przedstawił także poprawki jakie powinny być stosowane w pomiarach celem wyeliminowania błędów, czy zmniejszenia niepewności pomiarowej. Publikacja B zatytułowana „*Passive multi-layer neutron spectrometer for neutron dosimetry*” przedstawia konstrukcję spektrometru ozn. SWP-1 (Spektrometr Wielowarstwowy Pasywny) składającego się z kuli polietylenowej z wprowadzonymi promieniowo pasywnymi detektorami termoluminescencyjnym typu MTS-6 ($^6LiF:Mg, Ti$) i MTS-7 ($^7LiF:Mg, Ti$). Dobrano tak głębokości umieszczania detektorów aby odpowiadało to średnicy kuli odpowiednio 2, 4 i 6,5 cala. Zaproponowany w spektrometrze układ pozwala na pomiar widma energetycznego neutronów, określenie wartości przestrzennego równoważnika dawki, kierunku propagacji neutronów, a także dodatkowych jakościowych parametrów pola neutronowego z wykorzystaniem umieszczonej w kuli komory B2. Zaproponowany spektrometr umożliwi pomiar neutronów w zakresie energii od 10 do 20 MeV co dla ochrony radiologicznej jest wystarczające, biorąc pod uwagę współczynnik wagowy promieniowania. W pracy G przedstawił Doktorant pierwsze wyniki praktycznego zastosowania spektrometru

SWP-1 w NCBJ dla źródeł ^{252}Cf oraz $^{239}\text{Pu-Be}$ i dekonwolucji widma neutronów. Jak już wspomniano wcześniej pomiary przy użyciu zaproponowanego spektrometru mogą również dać odpowiedź dotyczącą kierunku z jakiego pada promieniowanie zarówno gamma jak i neutrony. Należy więc oczekiwać dalszych ciekawych pomiarów w tym zakresie. Prace C, D i E dotyczą pomiarów i wyników badań z zastosowaniem komory rekombinacyjnej REM-2. Praca C zatytułowana jest „*Calculation of LET distribution in the active volume of recombination chamber*”. Głównym celem pracy było przygotowanie numerycznego modelu komory REM-2 i wykonanie obliczeń rozkładów liniowego przekazu energii LET w objętości czynnej komory. Autor przygotował model geometryczny i wykonał symulacje z użyciem kodu FLUKA. W ramach symulacji określił rozkłady dawki pochłoniętej względem LET dla monoenergetycznych neutronów w zakresie energii 500 keV do 200 MeV co w szczególności obejmuje obszar neutronów powstających w pomieszczeniach radioterapii protonowej, gdzie występują neutrony od 20 MeV. W pracy D zatytułowanej „*Calculated neutron energy dependence of the dose-response of large recombination chamber*” przedstawiono badania w zakresie stosowania komory REM-2 do badania zależności dawki pochłoniętej dla neutronów monoenergetycznych od energii termicznych (25 meV) do 20 MeV. Badania wykonano przeprowadzając symulacje Monte Carlo oraz porównując wyniki do wyników eksperymentalnych przeprowadzonych w odpowiednich wiązkach w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na optymalizację mieszanki komory $\text{CH}_4 + \text{N}_2$, w szczególności zoptymalizowano pod kątem odpowiedzi komory w funkcji koncentracji azotu w mieszance. Publikacja E zatytułowana „*Dosimetry and microdosimetry of monoenergetic neutrons using recombination chamber – measurements and Monte Carlo simulations*” jest bardzo dojrzałą publikacją gdzie autor zajął się pomiarami realizowanymi w monoenergetycznych polach neutronowych z wykorzystaniem Rekombinacyjnej Metody Mikrodozymetrycznej (ozn. RMM). Szereg wyników było przeprowadzonych w ramach kampanii pomiarowej w National Physical Laboratory (NPL) w Wielkiej Brytanii. Dzięki uzyskanym wynikom Doktorant określił wartości rekombinacyjnego wskaźnika jakości Q_4 czyli estymatora współczynnika jakości promieniowania jonizującego Q . Wyniki pozwoliły na spostrzeżenie zawyżonej odpowiedzi komory REM-2 na $D^*(10)$ i odchylenie odpowiedzi o 25% od wartości wzorcowej.

Oprócz załączonych publikacji Doktorant przygotował skrócony opis swoich badań: tezy pracy, stosowane materiały i metody oraz przedstawił główne wyniki wraz z komentarzem oraz cytując liczne (144 pozycje) publikacje. Do zebranych publikacji własnych pan mgr inż. Maciej Maciak załączył oświadczenia współautorów, z których wynika, że w zakresie zarówno merytorycznym jak i administracyjno-edytorskim miał znaczący udział od 25% do 100%.

Uwagi krytyczne do rozprawy

Zwyczajowo recenzent, po dokładnym zaznajomieniu się z tekstem rozprawy przedstawia uwagi krytyczne. W przypadku zszywkowej publikacji, które przeszły już redakcyjny proces recenzji trudno kolejny raz recenzować manuskrypty i nie jest to też rola recenzenta.

Nie mniej jest jedna uwaga dotycząca opisu zawartości izotopu litu 6 i 7 w detektorach MTS-6 i MTS-7. Prawidłowa zawartość wzbogaconego ${}^6\text{Li}$ wynosi 95% w detektorach MTS-6 a w MTS-7 99,9% ${}^7\text{Li}$. Wartości te zostały wzięte z certyfikatów dostarczanych przez producentów litu. Można też znaleźć dane w publikacji: B. Burgkhardt i in. *Application of different TL detectors for the photon dosimetry in mixed radiation fields used for BNCT*. Radiat. Prot. Dosim. 120:83-86,2006.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest ciekawa, rozwojowa, wnosząca wartość dodaną w dozymetrii neutronowej, prezentuje wysoki poziom merytoryczny, zawiera oryginalne opublikowane w siedmiu manuskryptach wyniki, napisana jest dobrym fachowym językiem i zawiera wszystkie te elementy, które w dobrej pracy doktorskiej powinny się znaleźć czyli opis, tezy pracy, wyniki i ich analiza oraz przegląd literaturowy, dlatego reasumując uważam, że przedstawiona **praca doktorska Pana mgr inż. Macieja Maciaka spełnia ustawowe i merytoryczne warunki stawiane pracy doktorskiej w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna** i wnoszę o dopuszczenie do dalszego etapu przewodu doktorskiego.