

Katowice, 18 marca 2024 r.

Dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. Instytutu
Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Doktoranta mgr inż. Łukasza Modzelewskiego

pt.:

**Monitoring radiacyjny środowiska w oparciu o spektrometr promieniowania gamma
z detektorem LaBr₃(Ce).**

1. PODSTAWA RECENZJI

Podstawą przygotowania recenzji było z uchwałą nr 3/24 Rady Dyscyplin Naukowych *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Bezpieczeństwa Akademii Pożarniczej w Warszawie* z dnia 30 stycznia 2024r., o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Modzelewskiego pt. Monitoring radiacyjny środowiska w oparciu o spektrometr promieniowania gamma z detektorem LaBr₃(Ce). Dokument, podpisany przez Przewodniczącego Rady Dyscyplin Naukowych, st. bryg. dr hab. inż. Adama Krasuskiego, prof. uczelni otrzymałam w dniu 07.02.2024r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Sławomir Jednoróg prof. Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie.

Wraz z dokumentem przekazany został mi egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY ORAZ UWAGI OGÓLNE

Recenzowany maszynopis składa się ze spisu treści, 4 rozdziałów zawierających treści merytoryczne, podsumowania i wniosków oraz bibliografii, spisu rysunków, tabel. W części „Załączniki” zamieszczone zostało świadectwo pomiaru źródła promieniotwórczego, wykorzystywanego w trakcie eksperymentów i pomiarów przedstawionych w przedmiotowej dysertacji. Pomiar źródła wykonany został przez akredytowane laboratorium wzorcujące w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, posiadające akredytację Polskiego Centrum Akredytacji.

W tekście pracy zamieszczono 27 tabel i 72 rysunki. Zestawienie literatury, na którą powołuje się w swojej pracy Doktorant jest obszerne, zawiera bowiem 110 pozycji, w tym 10 adresów stron internetowych. Należy podkreślić, że wykorzystana w pracy literatura to przede wszystkim nowe i najnowsze publikacje prac prowadzonych w kraju i za granicą. Niemniej autor odnosi się również do kilku pozycji, które można określić jako „historyczne”.

Praca liczy łącznie 167 strony. Bogaty materiał graficzny (rysunki, wykresy) ułatwia czytanie pracy i analizowanie rozległego materiału badawczego i dyskusji uzyskanych wyników. Doktorant zamieścił również *Wykaz skrótów stosowanych w rozprawie*, co jest istotne, bo wiele z nich pochodzi od nazw angielskojęzycznych.

Zastrzeżeń nie budzi także struktura pracy. Co prawda praca nie zawiera streszczenia, ale Wstęp zawiera również treści, które zwykle znajdujemy w streszczeniu. Jasno przedstawione są cel pracy i tezy pracy. Najistotniejsze powody podjęcia się badań to potrzeba prowadzenia skutecznego monitoringu radiacyjnego środowiska i oceny narażenia ogółu ludności na promieniowanie jonizujące, szczególnie istotne wobec planów budowy energetyki jądrowej w naszym kraju i zagrożeń związanych z aktualną sytuacją polityczną. Doktorant w pierwszym podrozdziale Wprowadzenia przedstawił aktualny stan wiedzy z zakresu tematyki rozprawy, gdzie syntetycznie opisał istotę pomiarów z wykorzystaniem metody spektrometrii gamma. Bliżej przedstawił właściwości różnych detektorów scyntylacyjnych, problemy techniczne, pomiarowe i wyzwania związane z ich kalibracją. Jest to istotna część wprowadzenia, ułatwiająca podążanie za dalszymi rozważaniami doktoranta. Pozostałe podrozdziały wstępu odnoszą się do naturalnego tła promieniowania i opisu sposobu prowadzenia monitoringu radiacyjnego środowiska. Specjalna część Wprowadzenia została poświęcona zjawisku dryftu temperaturowego, czyli przemieszczania się widma promieniowania w wyniku zmian temperatury otoczenia.

Rozdział nr 2, który Doktorant zatytułował „Materiał” zawiera opis problemów utrudniających analizę widm energetycznych – pików. Kształt Full Energy Absorption Peak nie odzwierciedla bowiem idealnie krzywej Gaussa. Stosowanie kalibracji energetycznej, kształtu piku, wydajnościowej i energetycznej istotnie wpływa na jakość/precyzję pomiarów spektrometrycznych. Dalej Doktorant porównuje kalibracje eksperymentalne i matematyczne. Podkreśla, że kalibracja wydajnościowa matematyczna ma przewagę nad kalibracjami z wykorzystaniem źródła promieniotwórczego, zwłaszcza w przypadku prowadzenia monitoringu środowiskowo skażeń promieniotwórczych. Stwierdzenie tego faktu wykazuje zasadność wykonanych przez Doktoranta doświadczeń i symulacji. Dalej krótko omówione zostały standardowe oprogramowania, analizator InSpector 2000, sonda z detektorem $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ oraz źródła kalibracyjne wykorzystane do badań. Pomiary laboratoryjne wykonane zostały w Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowch Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie. Wybór miejsca prowadzenia badań zapewnia zachowanie najwyższych standardów.

Mam wątpliwość, czy rozdział powinien mieć nazwę „Materiał”. Może jaśniej dla czytającego brzmiałby tytuł, zgodny z tym, co na stronie 13 napisał Doktorant, czyli „Wykorzystane do badań narzędzia matematyczne, urządzenia i pracownie”.

Rozdział nr 3 pod nazwą Metody jest bardzo interesujący, ponieważ Doktorant prezentuje w nim, poza opisem stosowanych metod doświadczalnych i numerycznych, autorskie narzędzia analityczne, wykorzystane przez Doktoranta do badań. Można więc tę część Rozprawy traktować jako badania własne Doktoranta. W celu weryfikacji zaproponowanych analiz, Doktorant przeprowadził serie badań *in situ*, w pracowniach i komorze klimatycznej Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Pomiary dotyczyły FEAP (Pik Całkowitego Pochłaniania Energii) dla poszczególnych radionuklidów, dryftu temperaturowego, kalibracji energetycznej, wydajnościowej, temperaturowej i innych.

Rozdział 4 prezentuje wyniki badań i ich omówienie. Szczególną uwagę poświęca Doktorant badaniom usytuowania sondy względem powierzchni podłoża. Ustalenie optymalnego ustawienia detektora będzie miało istotne znaczenie w przypadku potencjalnego wykorzystania urządzenia do badań radiacyjnych. Omówienie wyników badań wsparte jest dużą liczbą wykresów, co ułatwia zrozumienie wyводу Doktoranta. Zrozumiałe jest, że Doktorant dużą część pracy poświęcił problemowi dryftu temperaturowego spektrometru gamma. W przypadku prowadzenia pomiarów w ramach monitoringu radiacyjnego, urządzenia będą montowane w różnych warunkach terenowych, niejednokrotnie w odległych lokalizacjach. W związku z tym konieczna jest wiedza dotycząca odpowiedzi detektora na

zmienne warunki meteorologiczne, a szczególnie na wahania temperatury. Analiza i przede wszystkim porównywanie danych pomiarowych z wielu lokalizacji wymaga wiedzy dotyczącej wpływu temperatury na precyzję pomiaru. W celu poprawy, a przynajmniej utrzymania precyzji pomiaru na odpowiednim poziomie, konieczna jest kalibracja energetyczna i dyskusja odniesiona do dryftu. Doktorant wykonał to zadanie w sposób prawidłowy. Jednakże stwierdza, że w temperaturze 10°C odstępstwa od obserwowanej tendencji są nie do pominięcia i nie podejmuje się interpretacji tego zjawiska. W tej samej temperaturze Doktorant zaobserwował maksymalne pogorszenie rozdzielczości spektrometru. Ponownie nie możliwe było wskazanie przyczyny tego zjawiska. Doktorant stwierdza, że nie była to nieistotna statystycznie fluktuacja, ponieważ podobny obraz otrzymano w każdorazowym pomiarze. Czy możliwe jest, aby zastosowanie innych narzędzi analizy wyników pomogłoby w przyszłości zinterpretować tę anomalię? Równie poprawnie przeprowadzona została analiza dryftu temperaturowego kalibracji wydajnościowej. Doktorant na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdził, że wprawdzie zmiany wydajności rejestracji fotonów w funkcji zmieniającej się temperatury są widoczne, ale ich charakter jest nieistotny statystycznie. W podrozdziale 4.4.2. przedstawione są wyniki i analiza badań doświadczalnych dryftu widma spektrometrycznego. Podsumowując obliczenia dla rzeczywistego dryftu temperaturowego Doktorant stwierdził, że na podstawie widma, uzyskanego w trakcie zmian temperatury, niepewność wyznaczenia aktywności, związana z dryftem temperaturowym wynosi 45%, co pozwala na podejmowanie decyzji we wstępnej fazie potencjalnego zdarzenia radiacyjnego.

Omówione powyżej wyniki prac i analiz Doktoranta dotyczą pierwszej części tezy, w której założono, że detektor scyntylacyjny z bromku lantanu $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ może być stosowany do monitoringu radiacyjnego środowiska w zakresie badania zawartości radionuklidów w otaczającym ją powietrzu i na powierzchni ziemi. Teza została potwierdzona poprzez opracowanie modelu matematycznego obecności radionuklidów w środowisku w warunkach pojawienia się opadu promieniotwórczego. Doktorant wyznaczył metodami matematycznymi uniwersalne krzywe wydajności rejestracji fotonów. Wykonał serię badań i analiz wpływu temperatury otoczenia na kalibrację energetyczną, rozdzielczości i wydajności energetycznej.

Podrozdział 4.5. odnosi się bezpośrednio do drugiej części tezy, cyt. sonda zaopatrzona w detektor scyntylacyjny z bromku lantanu $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ może być stosowana do monitoringu radiacyjnego środowiska jako miernik mocy przestrzennego równoważnika dawki $\text{H}^*(10)$, co pozwala skutecznie ocenić narażenie człowieka na promieniowanie jonizujące. Dla

potwierdzenia tej tezy, Doktorant wykonał serię badań, wykorzystując możliwości stanowiska kalibracyjnego gamma CLOR. Podobnie jak we wcześniejszych eksperymentach, badania prowadzone były dla położenia wertykalnego i horyzontalnego względem iradiatora. Stosowano różne źródła promieniotwórcze. Kończącym elementem pracy była analiza niepewności pomiarowej, wskazująca, że niepewność pomiaru dla niskich energii jest nie większa, niż 2%, a dla energii powyżej 150 KeV – do 0,5%.

Pracę kończą podsumowania i wnioski, sformułowane na podstawie wyników wykonanych badań i analiz. Doktorant jasno przedstawia wyniki swoich analiz i badań, dowodzących słuszności założonej tezy oraz osiągnięcie założonych celów. Doktorant udowodnił, że metodami matematycznymi można wykonać kalibrację wydajnościową urządzenia w terenie, gdzie niedostępne są źródła promieniotwórcze oraz że sonda zaopatrzona w detektor scyntylicyjny z bromku lantanu $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ może być stosowana do monitoringu radiacyjnego środowiska jako miernik mocy przestrzennego równoważnika dawki $\text{H}^*(10)$.

3. KRYTYCZNA ANALIZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Modzelewskiego jest bardzo interesująca, zawiera wiele cennych wyników analiz, pomiarów i badań, cechuje się ponadto ważnym aspektem użytkowym. Niemniej Doktorant nie ustrzegł się pewnych błędów, dlatego w niniejszej Recenzji przedstawiam uwagi o charakterze merytorycznym, pojęciowym i edytorskim. Przedstawiam też pytania, na które oczekuję odpowiedzi w trakcie publicznej obrony pracy doktorskiej.

Uwagi o charakterze merytoryczno-pojęciowym i edytorskim.

Doktorant nie ustrzegł się błędów redakcyjnych, które oczywiście nie wpływają na ogólną ocenę pracy. Na przykład:

Doktorant używa sformułowania „błąd pomiarowy”, zamiast przyjętego wyrażenia „niepewność pomiaru”, np. Rys. 41 na stronie 92. Sugeruję zmienić to określenie na „niepewność pomiaru”.

Moim zdaniem określenie „Akredytowane przestrzenie ekspozycyjne”, czy „Akredytowana komora klimatyczna” nie są zgodne z zapisami w zakresie akredytacji CLOR, sugerowałabym zmianę, w przypadku przyszłej publikacji wyników pracy.

Wyrażenie "proces radiometryczny" jest niejasne. Może należałoby użyć inne określenie, np. pomiar?

W Podsumowaniu sugeruję skorygować cyfry znaczące niepewności wartości współczynników funkcji kalibracji wydajnościowej (str. 133).

Przed publikacją pracy sugeruję ponadto zwrócić uwagę na drobne niezręczności językowe (np. kolokwializmy) i powtórzenia.

3. UWAGI DYSKUSYJNE

Poniżej przedstawiam uwagi dyskusyjne, na które oczekuję odpowiedzi w czasie publicznej obrony rozprawy doktorskiej:

W rozdziale 4, część 4.3.1., *Dryft widma*, Doktorant przedstawił na rys. 46 dryft wierzchołków FEAP dla różnych temperatur. Stwierdził, że pojawiające odstępstwa od liniowości, obserwowane dla temperatury 20°C są „niemożliwe do wyjaśnienia”. Może uwzględnienie niepewności pomiaru złagodziłyby odstępstwa od liniowości? Czy możliwe jest, aby zastosowanie innych narzędzi analizy wyników pomogłoby w przyszłości zinterpretować tę anomalię?

Wyciągając wnioski z części badań dotyczących orientacji detektora względem powierzchni ziemi Doktorant stwierdza, że wybór pozycji wertykalnej lub horyzontalnej nie wpływa na jakość pomiaru. Czy wobec tego dowolny sposób mocowania sondy z detektorem jest akceptowalny?

4. WARTOŚCI POZNAWCZE I UTYLITARNE PRACY

Do wartości naukowych i aplikacyjnych pracy zaliczam przede wszystkim wykonanie w sposób systematyczny i przemyślany analiz i badań eksperymentalnych, w wyniku których Doktorant stwierdził, że można metodami matematycznymi wykonywać kalibrację wydajnościową sondy zaopatrzonej w detektor scyntylicyjny z bromku lantanu $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ w terenie, gdzie niedostępne są źródła kalibracyjne. Tym samym udowodnił, że urządzenie może być wykorzystywane do monitoringu radiacyjnego w przypadkach pojawienia się zagrożeń radiacyjnych i awarii obiektów jądrowych. Wobec trudnej i niepewnej dla naszego kraju sytuacji związanej z toczącą się wojną w Ukrainie, musimy być przygotowani do różnego typu okoliczności kryzysowych: potencjalne użycie broni jądrowej, ataki na obiekty jądrowej itp., podczas których należy działać szybko, by kontrolować rozwój

zagrożenia i planować odpowiednie działania zaradcze. Dodatkowym wkładem w budowanie systemu bezpieczeństwa publicznego jest udowodnienie, że badane urządzenie może być wykorzystane jako miernik mocy przestrzennego równoważnika dawki $H^*(10)$, co pozwoli szacować narażenie mieszkańców potencjalnie zagrożonych obszarów. Bardzo wysoko oceniam użyteczny charakter pracy, które w mojej ocenie jest istotnym wkładem do rozwoju i implementacji pomiarów *in situ*, zwłaszcza w sytuacjach kryzysowych.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa **mgr inż. Łukasza Modzelewskiego** pt. *Monitoring radiacyjny środowiska w oparciu o spektrometr promieniowania gamma z detektorem $LaBr_3(Ce)$* , ma charakter poznawczy i użyteczny, stanowi kompleksowy i oryginalny sposób realizacji celu rozprawy, co potwierdza, że Autor posiada pełne umiejętności samodzielnego wykonywania pracy naukowej i spełnia wymogi stawiane dysertacjom doktorskim. Autor w sposób prawidłowy dokonał wyboru metod badawczych i analitycznych.

Stwierdzam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinach *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Bezpieczeństwa*, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań;
- przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i oryginalne rozwiązanie w zakresie stosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej.

Mgr inż. Łukasz Modzelewski udowodnił zatem swoje kompetencje w zakresie formułowania celów badawczych, organizacji prac i badań naukowych, korzystania z nowoczesnych metod analitycznych, badań i eksperymentów laboratoryjnych, krytycznego wykorzystywania uzyskiwanych danych oraz właściwej interpretacji i dyskusji końcowych wyników badań.

Mając to na uwadze, w mojej opinii recenzowana praca odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w art.187 ust.1 i 2. ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. Z 2023 r., poz. 742) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Modzelewskiego do publicznej obrony przed Radą Dyscyplin Naukowych Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Bezpieczeństwa Akademii Pożarniczej w Warszawie.