

prof. dr hab. Paweł Olko  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Radzikowskiego 152  
31-342 Kraków

### **Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Rafała Dąbrowskiego zatytułowanej**

**„Projekt systemu ostrzeżenia o awarii elektrowni jądrowej w przykładowej lokalizacji w Polsce w oparciu o sieć automatycznych sond pomiarowych”**

#### **Podstawa recenzji**

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Politechnice Warszawskiej z dnia 17 października 2023 roku

#### **Cel pracy**

Odejście od energetyki węglowej w Polsce stanowi ważne wyzwanie cywilizacyjne stojące przed naszym społeczeństwem. Zapewnienie stabilnych dostaw energii będzie możliwe m.in. poprzez realizację Polskiego Programu Energetyki Jądrowej, który przewiduje budowę do roku 2045 sześciu reaktorów energetycznych o mocy do 9 GW. Uruchomienie pierwszego reaktora energetycznego w elektrowni jądrowej (EJ) Lubiatowo-Kopaczewo planowane jest w roku 2033. Warunkiem społecznej akceptacji tego programu jest m.in. zapewnienie monitorowania sytuacji radiologicznej wokół planowanej EJ na najwyższym możliwym poziomie. Istniejąca sieć wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych, nadzorowana przez Państwową Agencję Atomistyki, jest obecnie zorientowana głównie na detekcję skażeń transgranicznych, w większości z kierunków wschodnich. Oznacza to, że wokół nowej EJ należy zbudować dedykowaną sieć pomiaru skażeń, umożliwiającą szybkie wykrycie i identyfikację skażeń promieniotwórczych. Okazuje się, że sposób organizacji takiej sieci pomiarowej jest niebanalnym zagadnieniem naukowym. Dlatego też rozprawa doktorska pana mgr. Rafała Dąbrowskiego doskonale wpisuje się w aktualną dyskusję nad sposobem monitorowania działalności EJ. Celem pracy było opracowanie projektu systemu monitorowania radiologicznego wokół EJ na przykładzie planowanej lokalizacji w Lubiatowie-Kopaczewie. Praca została podzielona na kilka logicznych etapów obejmujących analizę parametrów poszczególnych detektorów promieniowania, przygotowanie scenariuszy uwolnień, zebranie danych meteorologicznych i finalnie, przeprowadzenie symulacji pracy systemu w warunkach maksymalnych awarii. Rozprawa została przygotowana pod opieką pana dr hab. inż. Daniela Kikoły, w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej.

#### **Omówienie zakresu rozprawy**

Rozprawa jest napisana w języku polskim, została starannie przygotowana i wydana. Rozprawa ma klasyczną, klarowną strukturę i obejmuje wprowadzenie, wstęp teoretyczny, metodykę pracy (rozdziały 3-4) oraz wyniki i dyskusję, przedstawione w rozdziałach 5 i 6. Wstęp teoretyczny w przystępny sposób wprowadza do zagadnień związanych z pomiarami środowiskowym promieniowania jonizującego oraz omawia czynniki, wpływające na wahania tła naturalnego. Autor analizuje też międzynarodowe i krajowe zalecenia w zakresie monitorowania stanu radiacyjnego

środowiska. Rozporządzenie Rady Ministrów z 9.08.2022 określa sposób monitorowania mocy dawki i widm promieniowania gamma w różnych strefach wokół EJ przez operatora EJ, ale nie definiuje jak powinien być zorganizowany niezależny pomiar, organizowany przez dozór jądrowy, czyli sieć stacji podlegających Państwowej Agencji Atomistyki. Rozprawa doktorską pana mgr. R. Dąbrowskiego może stanowić ważną wskazówkę, jak taką sieć zorganizować.

Istotnym elementem pracy jest propozycja wyboru detektorów do systemu wczesnego wykrywania skażeń. Autor zaproponował trzy detektory: licznik Geigera-Mullera, spektrometr z kryształem scyntylacyjnym NaI (3") oraz spektrometr z kryształem scyntylacyjnym CeBr<sub>3</sub> (1") o zwiększonej zdolności rozdzielczej. Autor włączył do analizy również parametry sond z licznikami GM i detektorem NaI TDPMS3, używanych w dotychczasowych stacjach wczesnego ostrzegania PAA. Autor przetestował działanie sondy TDSG3 z licznikiem GM w unikalnych warunkach podziemnego laboratorium niskotłowego w Asse koło Brunszwiku. Badania te umożliwiły m.in. wyznaczenie biegu własnego licznika, a także potwierdzenie liniowej odpowiedzi licznika w zakresie niskich dawek. Wyznaczono również parametry kalibracyjne detektora dla <sup>137</sup>Cs i <sup>226</sup>Ra, gdyż wydajność detekcji dla tego typu liczników silnie zależy od energii promieniowania. Pomiary widma izotopów prowadzone w podziemnym laboratorium umożliwiły wyznaczanie współczynników konwersji widm spektrometrów NaI na przestrzenny równoważnik dawki. Otrzymane współczynniki konwersji zgadzają się dobrze (na wykresie podwójnie logarytmicznym) z danymi literaturowymi. Wyliczona na ich podstawie H\*(10) wahają się w granicach ± 5%, co jest zupełnie wystarczającą dokładnością w pomiarach tego typu.

Jednym z podstawowych problemów przy interpretacji wskazań systemów alarmowych jest konieczność weryfikacji, czy wzrost aktywności jest wynikiem skażenia ze źródeł antropogennych czy też wynika ze zjawisk naturalnych, np. opadu atmosferycznego, wyłukującego pochodne radonu z powietrza. Miarą pojawienia się sztucznych izotopów promieniotwórczych jest wzrost wskaźnika MMGC, który określa względną liczbę zliczeń detektora dla energii fotonów do 1400 keV w stosunku do zliczeń dla fotonów o energii pomiędzy 1400 i 3000 keV. Innym parametrem kwantyfikującym zmianę widma jest test  $\chi^2$ , w którym badane widmo porównuje się z widmem odniesienia np. uzyskanym z detektora eksponowanego na konkretnym obszarze w czasie bez deszczu. Autor analizował testowe widma z detektora NaI po opadach atmosferycznych oraz przy próbach ze źródłami <sup>137</sup>Cs i <sup>232</sup>Th. Pojawienie się pojedynczego pików <sup>137</sup>Cs zostało zidentyfikowane przez detektory NaI przy stosunkowo niskim poziomie mocy dawki. W podsumowaniu tej części Autor podaje przepis na użycie oby wskaźników dla rozróżnienia wzrostu mocy dawki wywołanej opadem atmosferycznym i przejściem chmury zawierającej sztuczne radioizotopy.

Istotnym elementem przy analizie systemu wczesnego ostrzegania jest wiedza o potencjalnym źródle skażenia (uwolnienie z reaktora) oraz o potencjalnej zmienności warunków meteorologicznych. Dla reaktora AP-1000 dane na temat maksymalnych uwolnień w czasie normalnej pracy reaktora zaczerpnięto ze Wstępnego Raportu Bezpieczeństwa i Raportu Środowiskowego, przygotowanych dla AP-1000 dla regulatora brytyjskiego. Rozważana była poważana awaria tzw. Large Break Loss of Coolant Accident (LB/LCA), w której nieszczelność obudowy bezpieczeństwa może prowadzić do uwolnień do atmosfery. Scenariusz ten przewiduje emisję do atmosfery aktywności na poziomie 10<sup>16</sup> Bq, z czego większość stanowią gazy szlachetne. Bardzo istotne w analizie są dane meteorologiczne. Autor dysponował imponującym zestawem danych meteorologicznych dla obszaru z okolic Lubiatowa- Kopalina, obejmującego 20 lat pomiarów (w cyklu godzinny) prowadzonego przez Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody. Dane te zostały zweryfikowane z danymi synoptycznymi Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej dla stacji w Łebie. W pracy wykorzystano kilka modeli rozprzestrzeniania się skażeń zawartych w systemie JRodas, który jest od lat stosowany przez Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych Państwowej Agencji Atomistyki. Podczas



rozchodzenia się chmury, moc dawki liczona jest jako suma wkładów od izotopów znajdujących się zarówno w chmurze jak i osadzonych na powierzchni. Obliczenia prowadzone były zarówno dla uwolnień podczas normalnej pracy reaktora jak i przy awarii, dla analiz jedno i wielokierunkowych. W obliczeniach tych chodziło o wyznaczenie odległości od źródła emisji, przy której awaria zostanie wykryta przez dany detektor. W zależności od zastosowanego modelu wartości mocy dawki dla uwolnień przy normalnej pracy różnią się, szczególnie w pobliżu źródła. Zadanie, jaki postawił sobie Autor rozprawy, to określenie geometrii rozmieszczenia zestawów detektorów, aby zadziałały one poprawnie zarówno podczas niewielkich uwolnieniach jak i przy poważnej awarii reaktora, kiedy należy uniknąć nasycenia ich odpowiedzi.

W przypadku uwolnienia podczas normalnej pracy największa moc dawki przewidywana jest na ogół w odległościach mniejszych niż 0.5 km od reaktora, choć zależy to od prędkości wiatru. Umieszczenie sieci zbyt daleko od EJ powoduje, że detektory nie zarejestrują takiej emisji. Z odwrotną sytuacją mamy do czynienia podczas awarii LBLCA – należy uniknąć nasycenia odpowiedzi detektora. Autor zaproponował pewną kombinację optymalnego rozmieszczenia detektorów w odległościach od 75 m do około 15 km, tak aby zmniejszyć prawdopodobieństwo niewykrycia małych uwolnień i zapobiec nasyceniu przy poważnej awarii.

Finalną częścią pracy była propozycja rozmieszczenia stacji pomiarowych wokół EJ w lokalizacji Lubiato-Kopalino: 16 spektrometrów NaI, 10 spektrometrów CeBr3 oraz 32 liczniki GM. Dla zaproponowanej lokalizacji detektorów przeprowadzono symulacje sprawdzające skuteczność działania systemu. Na tym etapie pracy przeprowadzono również analizę zależności pomiędzy wskazaniami poszczególnych stacji, dla uzyskania pełnego obrazu sytuacji radiologicznej. Autor zaproponował i opracował algorytm analizy danych, wspomagający przygotowanie semiwariogramów obrazujących zmienność rozkładu mocy dawki oraz wykrycie kierunku rozchodzenia się skażeń. Zaproponowana technika umożliwi automatyzację procesu wykrywania i oceny rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych.

### **Ocena elementów nowości naukowej**

Rozprawa zawiera projekt systemu ostrzegania o awarii EJ przygotowany w oparciu o nowoczesne spektrometry i detektory GM, przetestowane w ramach europejskiego projektu MetroERM. Rozprawa jest jedną z nielicznych prac, obejmujących tak kompleksowe i wieloaspektowe podejście do zagadnienia projektowania systemu monitorowania wokół obiektu jądrowego. Metoda zaproponowana przez Autora obejmuje zarówno testy detektorów w laboratorium niskotłowym oraz na poletkach doświadczalnych, zastosowanie nowoczesnych kodów transportu zanieczyszczeń wraz z imponującą biblioteką danych meteorologicznych, a na koniec przetestowanie istniejącego systemu. Interesująca jest propozycja algorytmu do ilościowej identyfikacji skażeń w oparciu o geostatyczną analizę opartą o analizę semiwariancji. W mojej ocenie rozprawa jest wartościowym, unikalnym opracowaniem, mogącym stanowić podstawę projektowania takich systemów zarówno w nowych jak i istniejących obiektach jądrowych.

### **Uwagi krytyczne i elementy dyskusyjne:**

- 1) Autor uzasadnił wybór konkretnych detektorów do budowy systemu, choć w części teoretycznej powinny się też znaleźć informacje o rozwiązaniach komercyjnych oferujących detektory i systemu monitorowania. Informacja o dostępnych systemach komercyjnych byłaby

również użyteczna w końcowej dyskusji, w której można by je było porównać do konfiguracji zaproponowanej w tej pracy.

- 2) Moc dawki przy której nasycą się spektrometry NaI jest dość niska i wynosi  $5 \mu\text{Sv/h}$ . Górny zakres pomiarowy LBr3 wynosi  $100 \mu\text{Sv/h}$ . Czy w systemie nie należy zadbać o spektrometry działające przy wyższych mocach dawki? W chwili obecnej, czyli 12 lat po katastrofie, w odległości ok. 100 metrów od ciągu reaktorów w EJ Fukushima Dai-ichi, moc dawki wynosi ok.  $60 \mu\text{Sv/h}$ . W przypadku poważniejszej awarii detektory zaproponowane w pracy ulegną wysyceniu. Czy nie powinno się więc instalować dodatkowo instrumentów, które działają w wyższym obszarze mocy dawki (np. komory jonizacyjne), a także spektrometry, których celem nie jest pomiar mocy dawki, ale identyfikacja widma? Podczas pierwszych godzin po wystąpieniu poważnej awarii jądrowej może nie być znana skala awarii i niezaburzony pomiar spektrometryczny może dać bezcenne informacje na ten temat.
- 3) Zastanawiające jest, dlaczego wyniki pomiarów mocy dawki  $H^*(10)$ , prowadzonych przy użyciu liczników NaI i GM i przedstawione na rys. 27, różnią się prawie dwukrotnie. Skąd ta różnica?
- 4) Nie do końca rozumiem rysunek 46, pokazujący siatkę obliczeniową w systemie JRodos dla lokalizacji Lubiatowo-Kopalino. Przedstawione tam wartości rozmiarów komórek wydają się niespójne z podziałką mapy.
- 5) Termin spektro-dozymetr jest dosłownym tłumaczeniem stosunkowo rzadko używanego w literaturze angielskojęzycznej terminu „spectro-dosimeter”. Są to w rzeczywistości spektrometry gamma, które przy odpowiedniej kalibracji i obróbce danych mogą służyć wyznaczaniu również dawki i mocy dawki. W literaturze polskiej rusycyzm „dozymetr” został już dość dawno zastąpiony terminem „dawkomierz”. Zlepek „spektro—dawkomierz” brzmi też niecodziennie, więc osobiście zostałbym przy terminie „spektrometr”.
- 6) Kończącym aspektem pracy było badanie przestrzennej korelacji wyników pomiarów z różnych detektorów. Bardzo ciekawym byłoby opracowanie metody odwikływanie źródła, czyli skali awarii, na podstawie zebranych wyników pomiarów. Warto podkreślić, że w początkowym okresie poważnej awarii, kiedy nie jest do końca znane jego skala, właśnie takie informacje są najbardziej pożądane. Jest to oczywiście bardziej złożone zagadnienie być może na nowy doktorat, ale chętnie poznałbym opinię Autora, na ile proponowane rozmieszczenie stacji mogłoby być użyte do takiej dekonwolucji.

#### **Podsumowanie i ocena końcowa**

Bardzo wysoko oceniam zaprezentowaną rozprawę doktorską. Autor jasno postawił cel pracy i z powodzeniem go zrealizował. Praca, obejmująca cykl testów, pomiarów środowiskowych i obliczeń modelowych została dobrze zaplanowana i konsekwentnie przeprowadzona. Autor w pełni zrealizował cele postawione w pracy, a wymienione w recenzji uwagi krytyczne i polemiczne nie naruszają zasadniczych wyników pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia warunki stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych, w szczególności art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej – Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Politechnice Warszawskiej o dopuszczenie pana Rafała Dąbrowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.



### **Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy**

Wyzwaniem projektu była konieczność pogodzenia poprawnej pracy systemu zarówno przy minimalnych zmianach mocy dawki, w warunkach normalnej pracy EJ jak i przy poważnej awarii reaktora. Autor przeprowadził testy detektorów w unikatowych warunkach podziemnego laboratorium niskotłowego jak i przygotował zawansowany zestaw obliczeniowy, adaptując na potrzeby projektu bogaty zestaw danych meteorologicznych. Przedstawiona rozprawa jest pierwszym tego typu opracowaniem, analizującym całościowo zagadnienie monitorowania radiologicznego pracy współczesnej elektrowni jądrowej, począwszy od wyboru detektorów, ich testów, modelowania transportu skażeń aż do zaproponowania miejsc rozmieszczenia detektorów. Poszczególne elementy tego podejścia zostały opublikowane w dwóch artykułach z listy JRC, w których pan mgr R. Dąbrowski jest pierwszym autorem, oraz w kilku publikacjach w języku polskim.



Prof. dr hab. Paweł Olko

Kraków, 28-12-2023