

Warszawa, 14.05.2022

Prof. dr hab. inż. Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej  
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa  
tel. +48-22504 1214  
e-mail: [g.zakrzewska@ichtj.waw.pl](mailto:g.zakrzewska@ichtj.waw.pl)

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Słoneckiej**

**pt. „Statystyka bayesowska, jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w  
dozymetrii promieniowania jonizującego”**

przygotowanej do obrony w dyscyplinie naukowej: Nauki Fizyczne

w dziedzinie nauk: Nauki Ścisłe i Przyrodnicze

## **Informacje ogólne**

Podstawą opracowania recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne, prof. dr hab. inż. Tomasza Wolińskiego przesłane w związku z powołaniem mnie przez Radę Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej na recenzenta rozprawy doktorskiej Pani Iwony Słoneckiej.

Praca doktorska „Statystyka bayesowska, jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego” powstała na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem promotora, dr hab. inż. Daniela Kikoły, prof. uczelni i promotora pomocniczego, dr inż. Krzysztofa W. Fornalskiego z Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Dysertacja zawiera 185 stron, na których mgr inż. Iwona Słonecka przedstawiła wyniki swoich studiów literaturowych oraz prac doświadczalnych i modelowych, w postaci 9 rozdziałów. Część merytoryczną pracy poprzedzają streszczenia w językach polskim i angielskim, opis struktury pracy oraz sformułowanie jej celu i tezy. Na końcu rozprawy zamieszczona została Bibliografia licząca 155 pozycji, spis rysunków, tabel oraz stosowanych skrótów i skrótowców. Autorka uzupełniła swoje opracowanie przedstawieniem jej własnych osiągnięć: publikacji, wystąpień konferencyjnych oraz realizowanych projektów badawczych.

Jako cel pracy mgr inż. Iwona Słonecka postawiła sobie ocenę dawek pochłoniętych od promieniowania jonizującego, metodami dozymetrycznymi i statystycznymi, a jej tezę sformułowała w postaci pytania: „Czy metody oparte na twierdzeniu Bayesa mogą być odpowiednim narzędziem wspomagającym ocenę narażenia na promieniowanie jonizujące w sytuacjach, kiedy metody klasyczne, zarówno fizyczne, jak i biologiczne, są niewystarczające i czy pozwolą one dokładniej oszacować dawki?”. Odpowiedź na to pytanie stanowi kwintesencję przedłożonej do recenzji pracy, w której Autorka skupiła się na porównaniu promowanych przez siebie metod statystycznych szacowania dawek promieniowania jonizującego z metodami dozymetrii fizycznej i biologicznej.

Praca doktorska napisana została w formie monografii będącej podsumowaniem prac Kandydatki, których wyniki były wcześniej opublikowane w artykułach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

### **Oryginalność i aktualność przeprowadzonych prac**

Problematyka zagrożeń związanych z oddziaływaniem promieniowania jonizującego na organizmy żywe jest ważna i zawsze aktualna z uwagi na rozliczne zastosowania tego promieniowania w nauce, medycynie i w przemyśle. Również elektrownie jądrowe (EJ) są zwykle kojarzone z zagrożeniem promieniowaniem jonizującym, zwłaszcza w przypadku wystąpienia zdarzeń radiacyjnych i awarii. Ocena bezpieczeństwa dla pracującej EJ zawiera zwykle prognozy dawek pochłoniętych przez człowieka w trakcie takich zdarzeń, oparte zwykle na doświadczeniu i przeprowadzonych symulacjach. Autorka pracy wiąże swoje zainteresowania naukowe z planami budowy w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej, co zostało wyrażone już na wstępie.

Rekonstrukcja dawki pochłoniętej w trakcie wypadków radiacyjnych ma ogromne znaczenie dla opracowania scenariuszy postępowania z napromienionym organizmem i planowania sposobów terapii; jest nieodłącznym elementem projektowania zachowań w sytuacjach zagrożeń i awarii, zarówno w obiektach jądrowych, jak i instytucjach stosujących promieniowanie jonizujące.

Zagadnienia ochrony radiologicznej znajdują się w obszarze zainteresowań licznych organizacji międzynarodowych, które nakładają do wspólnego rozwiązywania problemów, upowszechniają wiedzę, a także udzielają rekomendacji w przypadku budowy nowych obiektów, realizacji innowacyjnych projektów z udziałem promieniowania jonizującego.

Ważne miejsce na tym polu zajmują międzynarodowe grupy i sieci naukowe, takie jak European Radiation Dosimetry Group (EURADOS) czy Running the European Network of Biological and retrospective Physical dosimetry (RENEB), wskazujące na stałą potrzebę badań i wytyczające kierunki ich rozwoju. Nad zachowaniem standardów i propagowaniem dobrych praktyk czuwają takie organizacje, jak m.in. International Atomic Energy Agency (IAEA), czy International Commission on Radiological Protection (ICRP).

Potrzeba badań w dziedzinie ochrony radiologicznej i dozymetrii promieniowania jonizującego stymuluje zainteresowanie naukowców nowymi, stale ulepszanymi metodami estymacji dawek, rozwijaniem narzędzi do prowadzenia obliczeń i modelowania, a także projektowaniem i konstrukcją niezawodnych systemów i urządzeń pomiarowych.

Badania przeprowadzone przez mgr inż. Iwonę Słonecką nad uzupełnieniem metod dozymetrii fizycznej i biologicznej metodami statystycznymi, a zwłaszcza metodami opartymi na twierdzeniu Bayesa, stanowią oryginalny wkład do metodyki szacowania dawek pochodzących od promieniowania mieszanego. Wykorzystanie przez nią w tym podejściu opracowanych przez siebie narzędzi oceny, w postaci napisanych samodzielnie programów i aplikacji, stanowi o oryginalności i wartości pracy.

### **Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydatki w dyscyplinie naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Stan wiedzy w dziedzinie związanej z rozprawą doktorską przedstawiają rozdziały: 2, 3 i dużej mierze 4, spośród których tylko rozdział 2 został objęty takim tytułem (Obecny stan wiedzy). W rozdziale tym Autorka omówiła źródła promieniowania jonizującego, pochodzenia naturalnego i antropogenicznego, z powołaniem się na dane przedstawione w raporcie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z roku 2020. Wskazała na możliwość wzrostu zagrożenia promieniowaniem w związku budową elektrowni jądrowej w kraju i związaną z tym konieczność rozwoju stosowanych metod dozymetrii, zarówno na poziomie używanego sprzętu, jak i metodyki oceny dawek pochłoniętych. Pokróćce opisała stan badań nad zastosowaniem dozymetrii termoluminescencyjnej i biologicznej opartej na testach dicentrycznych wykorzystywanych po wielkich awariach w Czarnobylu i Fukushima-Daiichi. Przedstawiła ograniczenia tych metod, zwłaszcza przy pomiarach promieniowania mieszanego oraz możliwość przeciwdziałania tym ograniczeniom poprzez zastosowanie metod statystycznych opartych na twierdzeniu Bayesa i podejściu Monte Carlo.



W rozdziale 3 wprowadziła podstawowe pojęcia i wielkości stosowane w dozymetrii, opisała rodzaje promieniowania, skupiając się na dwóch, wyróżnionych przez siebie rodzajach promieniowania mieszanego: beta i gamma oraz na promieniowaniu neutronowym i gamma. Wybór tych dwóch rodzajów promieniowania jest uzasadniony, z uwagi, że pierwsze z nich występuje zazwyczaj w zakładach medycyny nuklearnej i laboratoriach zajmujących się badaniami i wytwarzaniem radiofarmaceutyków oraz diagnostyką i terapią medyczną, drugie zaś, w reaktorach jądrowych, podczas zachodzących w nich reakcji rozszczepienia. Stąd też współpraca mgr inż. Iwony Słoneckiej przy wykonywaniu eksperymentów z dwoma ośrodkami badawczymi posiadającymi urządzenia do napromieniania, Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej i Narodowym Centrum Badań Jądrowych, na którego terenie znajduje się reaktor badawczy Maria. Rozdział 3 kończy opis mechanizmów oddziaływania promieniowania jonizującego z organizmami żywymi na poziomie molekularnym i komórkowym. Zawartość tego rozdziału nie budzi zastrzeżeń.

Rozdział 4 stanowi wprowadzenie do części badawczej, dotyczy on termoluminescencji, a więc metody dozymetrycznej stosowanej w badaniach prowadzonych przez mgr inż. Iwonę Słonecką. Autorka pracy opisała w nim detektory termoluminescencyjne, stosowane w dozymetrii oraz systemy używane w ocenie narażenia pracowników. Zawarła tu również ważne dla pracy informacje na temat wykonywania napromieniania dozymetrów, odczytów detektorów TLD i ich kalibracji. Wybór detektorów do badań – to ważny element eksperymentalnej części pracy, obejmujący anilację i odczyt zerowy, testy liniowości oraz wyznaczenie współczynników kalibracyjnych z użyciem źródeł promieniowania gamma i beta. Praca dostarcza szczegółowego opisu przygotowania detektorów do pracy i ich selekcji, a wyniki analiz i obliczeń przedstawione zostały klarownie w formie tabel. Doświadczenia z detektorami zostały zaplanowane i przeprowadzone przez Doktorantkę samodzielnie, dały wyraz jej dobremu przygotowaniu do pracy naukowej, w której eksperyment jest podstawą. Samodzielnie mgr inż. Iwona Słonecka opracowała narzędzia obliczeniowe pozwalające na estymację dawek i wspomaganie ich oceny metodą termoluminescencyjną, dokonała odpowiednich obliczeń i walidacji zaproponowanej metody.

### **Wyniki i osiągnięcia**

Zasadniczą część pracy stanowi wykorzystanie twierdzenia Bayesa i statystyki bayesowskiej w obliczeniach dawek pochłoniętych od promieniowania różnego rodzaju: mieszanego  $\beta$  i  $\gamma$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ , a także dawek pochodzących od pojedynczego promieniowania. Wszystkie obliczenia

wspomagane były eksperymentami umożliwiającymi porównanie opracowanej metodyki do metod klasycznych i jej walidację. W przypadku promieniowania mieszanego, Autorka pracy wykorzystwała analizę bayesowską w wersji analitycznej i Monte Carlo.

Do oceny dawek pochodzących od promieniowania mieszanego  $\beta$  i  $\gamma$  mgr inż. Iwona Słonecka wykorzystwała podejście bayesowskie, wspomagające metodę termoluminescencyjną. Uzupełniła ją wynikami otrzymanymi metodą Monte Carlo, również stosując analizę bayesowską. Zaproponowana przez nią metoda wykorzystywała funkcję a priori, którą przypisywała nieznanym parametrom:  $\theta$  i  $K_x$ , opisanym rozkładem Gaussa, oraz funkcję wiarygodności uzyskaną z eksperymentu, które następnie można było przekształcić w rozkład prawdopodobieństwa a posteriori, poszukiwanego parametru - dawki  $D_x$ . Maksimum rozkładu a posteriori wyznaczyło najbardziej prawdopodobną wielkość dawki pochłoniętej. Zaproponowaną metodykę poparto obliczeniami analitycznymi i za pomocą metody Monte Carlo, które potwierdziły wyniki uzyskane w podejściu bayesowskim i zweryfikowały proponowaną w pracy metodę.

Statystykę bayesowską zastosowała Doktorantka do szacowania dawek za pomocą dozymetrii biologicznej – cytogenetycznej, pochodzących od mieszanego pola promieniowania neutronowego i gamma emitowanego z reaktora jądrowego Maria. Stosując to podejście Autorka przeprowadziła analizę i weryfikację metod: iteracyjnej, analitycznej, quasi-bayesowskiej i bayesowskiej, wykorzystując przy tym dane literaturowe. Wcześniej, w ramach prac prowadzonych w projekcie „Rozwój metod zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej dla bieżących i przyszłych potrzeb energetyki jądrowej” zapoznała się z metodami stosowanymi w dozymetrii biologicznej. W obszarze jej zainteresowań znalazł się m.in. test dicentryczny umożliwiający ocenę dawki pochłoniętej w organizmie na podstawie porównania częstości występowania chromosomów dicentrycznych w limfocytach krwi człowieka, z częstotliwością dicentryków w krwi napromienionej. Doktorantka wykonywała doświadczenia obejmujące hodowlę limfocytów i analizę napromienionych próbek metodą mikroskopową. Za pomocą laboratoryjnych krzywych kalibracyjnych dawka-skutek oszacowała dawki pochłonięte od neutronów i promieniowania gamma. Obliczenia prowadzone metodą iteracyjną usprawniła opracowując kod do programu Octave, używany w ramach nadzorowanej przez nią merytorycznie pracy inżynierskiej. Podobny kod do obliczeń dawek metodą analityczną oraz quasi-bayesowską opracowała do programów Octave i Mathematica. Stosując funkcję wiarygodności uzyskaną z danych



eksperymentalnych oraz różne rozkłady prawdopodobieństwa a priori, wyznaczyła rozkład a posteriori szukanej dawki od promieniowania mieszanego  $n$  i  $\gamma$ .

Mgr inż. Iwona Słonecka wykazała w swojej pracy, że w przypadku ograniczonych możliwości dozymetrii biologicznej prowadzonej metodą iteracyjną lub analityczną, jest miejsce dla metody quasi-bayesowskiej i bayesowskiej w wersji analitycznej i Monte Carlo. Wg Autorki zwalidowana metoda mogłaby znaleźć zastosowanie zarówno w przemyśle jądrowym, jak i terapii medycznej, np. w borowo-neutronowej (Boron Neutron Capture Therapy) przy estymacji dawek w ciele pacjenta poddanego terapii.

Analizę bayesowską z dozymetrią biologiczną Autorka wykorzystała również do oceny dawek pochłoniętych pochodzących od pojedynczego rodzaju promieniowania. Do tego celu zaproponowała własne rozwiązanie oceny dawek, oparte na wykorzystaniu współczynników krzywych dawka-skutek opublikowanych przez inne laboratoria. Podejście to proponuje stosować w sytuacji braku dostępności krzywych dawka-skutek, przy założeniu znajomości źródła promieniowania. Autorka porównała wyniki uzyskane przez zastosowanie krzywych dawka-skutek do przykładowych źródeł promieniowania o niskim i wysokim współczynniku przenoszenia energii, LET, z wynikami uzyskanymi dla krzywej promieniowania X, wykazując większą dokładność własnej metody opartej na statystyce bayesowskiej. Wg Autorki pracy, uzyskane przez nią wyniki dowiodły, że w przypadku braku krzywych dawka-skutek wykorzystanie dostępnych współczynników krzywych w postaci rozkładu w analizie bayesowskiej daje najdokładniejszą spośród różnych metod estymację dawek pochłoniętych.

Pracę kończy opis możliwości zastosowania twierdzenia Bayesa w analizie danych, tj. w celu dopasowania krzywych modelowych do zbioru punktów, np. danych eksperymentalnych, co jest najbliższym każdemu eksperymentatorowi, czysto praktycznym rezultatem pracy. Mgr inż. udowodniła, że w przypadku punktów wystających, metoda bayesowska daje lepsze odwzorowanie trendu danych niż metoda najmniejszych kwadratów.

Pracę kończy rozdział „Podsumowanie i dalsze plany” ukazujący z pozycji autora plusy jego badań i obliczeń, zalety stosowanych metod i ich przyszłe miejsce w energetyce jądrowej i w zastosowaniach promieniowania jonizującego. Recenzentka w pełni podziela te opinie i niekwestionowaną ważkość tematyki ochrony radiologicznej w atomistyce.

Przedstawiona ocenie praca napisana jest poprawnym językiem i w sposób klarowny wyczerpuje podejmowane zagadnienia. Jej zakres jest szeroki, a teza sformułowana na

wstępie udowodniona. Materiał ilustracyjny jest obfity, wyniki obliczeń prezentowane w tabelach, zostały prawidłowo dobrane.

Wartością dodaną rozprawy jest na pewno szeroka współpraca z wieloma zespołami i instytucjami, w których Autorka pracy realizowała swoje badania: z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej (w którym pracowała przez 7 lat), Narodowym Centrum Badań Jądrowych i Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej. Potencjał tych instytucji pozwolił na poszerzenie narzędzi badawczych, a doświadczone zespoły uzupełniły wiedzę Autorki, niezbędną w przygotowaniu tej interesującej pracy. Współpraca, której znaczenie doceniła w swoich podziękowaniach, na pewno zaowocuje w przyszłości innymi, wartościowymi projektami.

Dotychczasowy dorobek publikacyjny Kandydatki jest bogaty; stanowią go 4 publikacje z JCR; w trzech z nich mgr inż. Iwona Słonecka jest pierwszym i korespondencyjnym autorem. Pozostałe 5 publikacji, o mniejszym oddziaływaniu, powiązane są również z tematem pracy doktorskiej. Liczne wystąpienia konferencyjne, działalność edukacyjna (opieka nad pracami inżynierskimi i magisterskimi) oraz udział w projektach dopełniają obrazu młodego naukowca o sprecyzowanych zainteresowaniach. Prowadzenie prac eksperymentalnych w laboratoriach o różnych profilach, umiejętność stosowania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych do modelowania badanych procesów jest niezaprzeczalnie atutem mgr inż. Iwony Słoneckiej i wpłynęło na wysoką wartość jej dysertacji.

### **Uwagi**

Jak zwykle, w pracach o szerokim zakresie, Kandydatka nie uchroniła się od drobnych niedociągnięć i pomyłek. Poniżej wymieniam ważniejsze:

- Nie bardzo rozumiem celowość włączenia przez Doktorantkę do cyklu swoich osiągnięć publikacji bez jej współautorstwa (poz. 10-12 w spisie publikacji i 2 ostatnie wystąpienia konferencyjne). Myślę, że powód zostanie wyjaśniony w trakcie obrony.
- Cytowane publikacje [10] i [110] są tożsame.
- Błędnie opisana jest pozycja [46] w Bibliografii.
- Wypadałoby zaktualizować dostępność poz. [7] Bibliografii, przeglądanej w styczniu 2021 r.

Definicja ochrony radiologicznej z powołaniem się na Prawo Atomowe (!), jest obarczona błędem gramatycznym: powinno być „zapobieganiu narażeniu ludzi i skażeniu środowiska...”, a nie „zapobieganiu narażenia ludzi i skażenia środowiska...”.

Myślę, że autorka pracy odróżniająca skróty od skrótowców (lista na końcu pracy), nie powinna tworzyć własnych, niezbyt zgrabnych, skrótów. Na stronie 61 pojawił się dziwny skrót prawdopodobieństwa: p-stwo.

Strona 94; błąd gramatyczny: powinno być „wg równania 6.2, przekształcając je” a nie „go”.

### **Posumowanie końcowe**

Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (test jednolity Dz. U. z 11 marca 2022 r., poz. 574) w artykule 187 określa następujące wymagania co do rozprawy doktorskiej:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.
2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.
3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wydodrębniona część pracy zbiorowej.

Wszystkie te wymagania w pracy doktorskiej Pani mgr inż. Iwony Słoneckiej zostały spełnione z nawiązką.

W konkluzji, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Iwony Słoneckiej spełnia wymagania ustawowe i wnoszę zatem o przyjęcie pracy przez Radę Naukową Dyscypliny Nauki Fizyczne i o dopuszczenie do dalszych czynności przewodu doktorskiego w dyscyplinie Nauki Fizyczne, w Dziedzinie Nauk – Nauki Ścisłe i Przyrodnicze.

*Gracjan Słonecki - Kierownik*



## **Załącznik 1.**

Prof. dr hab. inż. Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej  
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa  
tel. +48-22504 1214  
e-mail: [g.zakrzewska@ichtj.waw.pl](mailto:g.zakrzewska@ichtj.waw.pl)

### **Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Słoneckiej pt. „Statystyka bayesowska, jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego”**

Ze względu na istotne elementy nowości naukowej zawarte w pracy, znaczący materiał badawczy powstały na podstawie prawidłowo zaprojektowanych eksperymentów oraz przejrzyste zaprezentowanie wyników, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Słoneckiej.

Praca ma charakter wielodyscyplinarny, wymagający dobrego przygotowania zarówno w zakresie metodyki prowadzenia eksperymentów w laboratoriach o różnym profilu, jak i swobodnego poruszania się we współczesnych metodach obliczeniowych. Umiejętność zaplanowania odpowiedniej struktury rozprawy sprawiła, że pomimo jej wielowątkowości dysertacja nie straciła na spójności i klarowności wyводу naukowego.

Na uwagę zasługuje bogaty i wartościowy dorobek naukowy mgr inż. Iwony Słoneckiej, wyrażony 4 publikacjami z listy JCR i innymi opublikowanymi artykułami, związanymi z tematyką pracy, prezentowanie przez nią wyników własnych prac na licznych konferencjach, a także udział w projektach badawczych. Wartością dodaną pracy jest efektywna współpraca z kilkoma laboratoriami w instytucjach jądrowych, dająca podstawy do przyszłych, wspólnych działań i realizacji wielodyscyplinarnych projektów.

W mojej opinii praca badawcza i rozprawa doktorska mgr inż. Iwony Słoneckiej stanowi znaczący wkład do nauki, zwłaszcza do badań w dziedzinie ochrony radiologicznej. Aktualność tematyki podnoszonej w rozprawie i jej duże znaczenie w rozwoju metod dozymetrii promieniowania jonizującego, oryginalne podejście do estymacji dawek, potwierdzają moją wysoką ocenę merytoryczną pracy oraz wniosek o wyróżnienie.

*Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz*