

Dr hab. Adam Konefał, prof. UŚ
Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski w Katowicach

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Adama Ryczkowskiego zatytułowanej „Rekonstrukcja widma energetycznego wiązki elektronowej generowanej przez akcelerator do radioterapii śródoperacyjnej przy użyciu metod Monte Carlo”.

Rozprawę doktorską mgr Adama Ryczkowskiego stanowi cykl czterech publikacji opublikowanych w czasopismach posiadających Impact Factor i znajdujących się w wykazie czasopisma Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Udział doktoranta w każdej z tych prac został ściśle określony w oświadczeniach współautorów. Doktorant jest pierwszym autorem każdej z czterech publikacji.

U podstaw badań objętych rozprawą doktorską leży projekt opracowania polskiego aparatu AQURE do radioterapii śródoperacyjnej, zrealizowany przez Wielkopolskie Centrum Onkologii wraz z Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Doktorant jako istotny pracownik Zakładu Fizyki Medycznej WCO uczestniczył w badaniach związanych z tym projektem. Zasadniczym przedmiotem badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej była rekonstrukcja widma energetycznego wiązki elektronowej generowanej przez akcelerator do radioterapii śródoperacyjnej przy użyciu metod Monte Carlo.

Charakterystyka badań

Radioterapia śródoperacyjna realizowana za pomocą wiązki elektronowej stosowana jest do napromieniania guza nowotworowego lub obszaru tkanek łoży po guzie usuniętym operacyjnie. Liczne zalety radioterapii śródoperacyjnej były opisywane w wielu pracach. Do jej zalet należy zaliczyć m. in. możliwość wyeksponowania tkanek przeznaczonych do napromienienia, skuteczne zmniejszenie dawki w obszarze tkanek zdrowych wynikające z ograniczonego zasięgu wiązki elektronowej, i tym samym zmniejszenie ryzyka powikłań, a także poprawa wyleczalności miejscowej nowotworu. Polski akcelerator, którego dotyczy rozprawa doktorska generuje wiązkę elektronów o energii nominalnej z zakresu od 4 do 12 MeV i wysokiej wydajności 10 Gy na minutę. Równoległe z powstawaniem prototypu akceleratora powstał model komputerowy na potrzeby symulacji Monte Carlo. Za pomocą tego modelu doktorant zrekonstruował widmo energetyczne wspomnianej wiązki elektronowej. Zastosowanie metod eksperymentalnych do wyznaczenia widma niesie ze sobą szereg trudności związanych na przykład z ograniczeniem natężenia wiązki, co wpływa na zmierzone widmo. Co więcej metody eksperymentalne wymagają specjalistycznej aparatury, którą często nie dysponują ośrodki medyczne. Widmo energetyczne stanowi podstawowy parametr charakteryzujący każdą wiązkę terapeutyczną. Jest ono bezpośrednio związane z rozkładem dawek, w szczególności w fantomie wodnym. Drobną zmianą nawet części widma przekłada się na istotne zmiany zarówno w rozkładzie dawek w osi wiązki jak również w profilach. Widma energetyczne są wykorzystywane w dozymetrii, w systemach planowania leczenia i przy projektowaniu akceleratorów medycznych itp. Zatem recenzowana rozprawa ma duże znaczenie aplikacyjne.

Zasadniczym celem rozprawy, przyjętym przez doktoranta była rekonstrukcja widma energetycznego wiązki elektronowej wytwarzanej przez akcelerator medyczny do radioterapii śródoperacyjnej. W ramach tego celu doktorant wyróżnił trzy cele szczegółowe. Pierwszy z nich dotyczył opracowania metody rekonstrukcji widma energetycznego wiązki elektronowej przy zastosowaniu metod optymalizacyjnych w oparciu o rozkłady procentowej dawki głębokiej zmierzone i otrzymane

drogą symulacji. Drugi cel szczegółowy dotyczył opracowania modelu akceleratora medycznego do radioterapii śródoperacyjnej na potrzeby symulacji Monte Carlo obejmującego dokładne odwzorowanie geometryczne wiązki oraz jej widma energetycznego. Trzecim celem szczegółowym była walidacja opracowanego modelu akceleratora śródoperacyjnego w różnych warunkach jego pracy obejmujących zastosowania kliniczne. Wyniki swoich badań, realizowanych zgodnie z przyjętymi celami, doktorant zaprezentował jak już wspominałem w cyklu czterech publikacji naukowych.

Pierwsza praca zatytułowana jest "Commissioning, dosimetric characterisation and machine performance assessment of the AQUIRE mobile accelerator for intraoperative radiotherapy". Praca ta została opublikowana w Polish Journal of Medical Physics and Engineering w 2024 roku. W publikacji zaprezentowano wyniki pomiarów dozymetrycznych dla śródoperacyjnego akceleratora elektronów AQUIRE. Wyniki obejmowały procentowe dawki głębokie i profile poprzeczne, weryfikację symetrii oraz płaskości wiązki elektronowej, a także liniowości i powtarzalności dostarczanej dawki. Zweryfikowano także niezależność wydajności akceleratora od ustawienia jego głowicy. W pomiarach wykorzystano fantom wodny BeamScan (PTW-Freiburg), a także fantom z PMMA, detektor diamentowy microDiamond (PTW-Freiburg) oraz komorę jonizacyjną typu Farmer (PTW-Freiburg). Zasadniczym i bardzo ważnym wnioskiem wypływającym z tych badań jest stwierdzenie, że akcelerator AQUIRE spełnia wszystkie wymagania polskich przepisów oraz zaleceń międzynarodowych.

W drugiej pracy zatytułowanej "Optimization of the regularization parameter in the Dual Annealing method used for the reconstruction of energy spectrum of electron beam generated by the AQUIRE mobile accelerator" opublikowanej w Zeitschrift für Medizinische Physik w 2024 roku zaprezentowano opracowaną metodę rekonstrukcji widma energetycznego wiązki elektronowej oraz sposób wyznaczenia optymalnej wartości parametru regularyzacji. U podstaw rekonstrukcji widma leży całkowite równanie Fredholma pierwszego stopnia. Równanie to opisuje rozkład procentowej dawki głębokiej dla wiązki elektronowej o pewnym widmie energetycznym jako złożenie dawek głębokich pochodzących od wiązek monoenergetycznych. Aby ze zmierzonego rozkładu procentowej dawki głębokiej z użyciem rozkładów od wiązek monoenergetycznych odtworzyć widmo energetyczne wiązki elektronowej należy rozwiązać równanie odwrotne do całkowitego równania Fredholma. Jednak równanie odwrotne jest źle uwarunkowane co uniemożliwia jego rozwiązanie metodami algebraicznymi. Pomocne jest określenie dodatkowych warunków wynikających z natury badanego zagadnienia, czyli wprowadzenie regularyzacji. Doktorant zastosował regularyzację Tichonowa, polegającą na wzbogaceniu oryginalnego równania o dodatkowy człon nazwany normą rozwiązania, zawierający tzw. parametr regularyzacji λ . Zasadniczą kwestią jest znalezienie optymalnej wartości tego parametru. Jest to tzw. optymalizacja, która prowadzi do rozwiązania odwrotnego równania Fredholma. Jedną z metod optymalizacyjnych umożliwiającą rozwiązanie odwrotnego równania Fredholma uwzględniającego regularyzację Tichonowa jest metoda Simulated Annealing (SA), która umożliwia znalezienie optymalnej wartości parametru λ odpowiadającej widmu energetycznemu zrekonstruowanemu na podstawie danych dozymetrycznych. Niezbędne dla równania Fredholma rozkłady dawek dla wiązek monoenergetycznych uzyskano za pomocą symulacji Monte Carlo w oparciu o uproszczoną wersję modelu akceleratora śródoperacyjnego. Warto zauważyć, że doktorant z powodzeniem zaadaptował zaawansowane metody matematyczne, w tym regularyzację Tichonowa oraz metodę Simulated Annealing, do rozwiązania problemu odwrotnego w dozymetrii elektronowej, co stanowi oryginalne podejście do problemu wyznaczania widma wiązki terapeutycznej. Tym samym doktorant wykazał się biegłością w łączeniu metod optymalizacyjnych z symulacjami Monte Carlo.

Trzecia publikacja objęta rozprawą doktorską zatytułowana jest "Implementation and validation of the method for the energy spectra reconstruction of electron beams generated by the AQUIRE mobile accelerator" i została opublikowana w Reports of Practical Oncology and Radiotherapy

w 2025 roku. W pracy opisano szczegóły modelu komputerowego akceleratora AQUIRE oraz zaprezentowano wyniki walidacji modelu w warunkach standardowych. Opracowany model zawiera wszystkie komponenty akceleratora przez które przechodzi wytwarzana wiązka elektronowa, w tym pierwszą i drugą folię rozpraszającą, aplikatory formujące pole, a także elementy mocowania poszczególnych podzespołów oraz obudowę. Walidacja modelu polegała na porównaniu rozkładów dawek w fantomie wodnym, obliczonych metodą symulacji Monte Carlo za pomocą opracowanego modelu i rozkładów zmierzonych. Stwierdzono dużą zgodność pomiędzy rozkładami obliczonymi i zmierzonymi tj. poza obszarem narastania dawki spełnione było kryterium 2% 2mm w analizie gamma, co świadczy o wysokiej precyzji uzyskanych wyników. Za pomocą opracowanego modelu odtworzono także widma energetyczne dla wszystkich czterech energii elektronów. Wyniki uzyskane w drugiej i trzeciej pracy stanowią bogatą bazę danych charakteryzujących wiązki terapeutyczne wytwarzane w akceleratorze AQUIRE. Tego typu dane mogą być wykorzystane do nauki systemów opartych na algorytmach sztucznej inteligencji stanowiących podstawę przyszłych systemów planowania leczenia bazujących na technologii AI. Doktorant jednak nie porusza tego zagadnienia.

Czwarta praca objęta rozprawą doktorską zatytułowana jest "Shielding disc backscatter calculations in intraoperative radiotherapy using a Monte Carlo simulation based on the method of energy spectra reconstruction". Praca została opublikowana w Scientific Reports w 2025 roku. W pracy przedstawiono walidację opracowanego modelu komputerowego akceleratora AQUIRE w warunkach niestandardowych oraz wykazano jego przydatność dla zastosowań klinicznych. Obliczono rozkłady procentowe dawki w fantomie wodnym w obecności płytki osłonnej mającej postać dysku wykonanego ze stali chirurgicznej o grubości 5 mm i średnicy dopasowanej do średnicy aplikatora elektronowego używanego podczas napromieniania. Płytkę taką stosuje się w celu ochrony tkanek zdrowych przed promieniowaniem poprzez umieszczenie jej za napromienianym obszarem w czasie zabiegu operacyjnego. Dozymetryczne dane pomiarowe potrzebne do weryfikacji modelu komputerowego uzyskano przy pomocy filmów gafchromowych EBT4 umożliwiającymi umieszczenie ich w małej przestrzeni pomiędzy końcem aplikatora elektronowego, a płytką osłonną, a także za płytką, w miejscu fantomu odpowiadającym tkankom zdrowym. Pomiarów wykonano dla trzech energii elektronów 6, 9 i 12 MeV. Ta część badań niesie ze sobą dwa bardzo ważne wnioski o dużym znaczeniu praktycznym. Po pierwsze porównania rozkładów dawek za płytką osłonną z rozkładami bez płytki potwierdzają skuteczność płytki w redukcji dawki w tkankach zdrowych. Po drugie obecność płytki podnosi dawkę zdeponowaną bezpośrednio przed nią. Ten wzrost dawki jest zależny od użytej energii i wynosi odpowiednio 19,8%, 18,4% i 17,5% dla energii nominalnych wiązki 6, 9 i 12 MeV. Ten wzrost dawki powinien być uwzględniony przy planowaniu dawki w planie leczenia. Ma to kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa pacjenta, wskazując na konieczność korekty dawki w obszarach styku tkanek z osłoną. Badania wykazały ponadto, że zastosowanie płytki złożonej z kilku warstw może skutecznie zredukować dawkę za płytką przy jednoczesnym ograniczonym wzroście dawki przed płytką.

Ocena merytoryczna

Reasumując, chciałbym zauważyć, że prezentowane w ramach rozprawy doktorskiej badania są kompleksowe. Doktorant przeprowadził pełną ścieżkę badawczą – od standardowych pomiarów dozymetrycznych, przez budowę zaawansowanego modelu komputerowego i jego walidację w warunkach standardowych, aż po analizę trudnych klinicznie przypadków niestandardowych. Takie podejście dowodzi dojrzałości naukowej i umiejętności projektowania złożonych eksperymentów.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi spójne i wartościowe studium badawczo-wdrożeniowe, wpisujące się w nurt nowoczesnej fizyki medycznej. Autor podjął się ambitnego zadania polegającego na pełnej charakterystyce dozymetrycznej i modelowaniu nowatorskiego, polskiego urządzenia medycznego, jakim jest akcelerator AQUIRE. Wybór formy

rozprawy w postaci cyklu publikacji w renomowanych czasopismach posiadających Impact Factor świadczy o wysokiej jakości uzyskanych wyników oraz ich uznaniu przez międzynarodowe środowisko naukowe.

Wnioski końcowe i rekomendacja

Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie warunki ustawowe stawiane pracom doktorskim. Autor wykazał się pogłębioną wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie dozymetrii oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wyniki zawarte w cyklu publikacji stanowią istotny wkład w rozwój polskiej myśli technicznej w onkologii oraz w optymalizację procedur radioterapii śródoperacyjnej. **Wnioskuje o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Biorąc pod uwagę duże znaczenie praktyczne wyników otrzymanych w ramach rozprawy doktorskiej jak również wysoki poziom naukowy badań wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr Adama Ryczkowskiego.

