

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Marcina Bieniasiewicza

Badanie promieniowania wtórnego wytworzonego przez wiązki terapeutyczne, generowane przez liniowe akceleratory medyczne, w kontekście optymalizacji ochrony radiologicznej osób pracujących w ośrodkach realizujących teleradioterapię.

Przestawiona mi do recenzji praca doktorska wykonana została w Instytucie Fizyki im. A. Chelkowskiego Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Promotorem pracy jest dr hab. Adam Konefał, prof. UŚ.

Praca zawiera 85 stron, w tym 8 tabel, 64 rysunki i wykresy oraz obszerny spis literatury (84 pozycje). Praca podzielona jest na rozdziały zatytułowane:

1. Cel pracy i wprowadzenie
2. Metodyka badań
3. Uzyskane wyniki i ich dyskusja
4. Analiza błędów pomiarowych
5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Autor zwięźle opisał cel pracy:

Problem promieniotwórczości wzbudzonej i promieniowania wtórnego, dla których czynnikiem wytwarzającym są wiązki terapeutyczne generowane przez liniowe akceleratory medyczne, jest badany już od wielu lat. Stale pojawiają się kolejne prace na ten temat, związane przede wszystkim z nowymi modelami akceleratorów wprowadzanych do ośrodków medycznych. Motywacją do podjęcia badań stało się pojawienie się na rynku akceleratorów medycznych dwóch nowych wówczas modeli: Precise firmy Elekta i TrueBeam firmy Varian umożliwiających realizację najnowszych technik napromieniania. Zaprezentowane w niniejszej rozprawie badania nie ograniczają

się jednak jedynie do zbadania promieniowania wtórnego i efektów z nim związanych, ale zostały przeprowadzone w kontekście ochrony radiologicznej personelu obsługującego akceleratory medyczne i wykonującego czynności zawodowe w pomieszczeniu do radioterapii. A więc celem niniejszej pracy było dokładne zbadanie konkurencyjnych procesów fizycznych prowadzących do wytworzenia promieniowania nie mającego zastosowania w radioterapii, będącego jej ubocznym skutkiem w kontekście poszukiwania skutecznych rozwiązań mających zastosowanie w ochronie radiologicznej. W badaniach wykorzystano metody eksperymentalne i obliczeniowe stosowane powszechnie w fizyce jądrowej, takie jak spektroskopia promieniowania gamma, pomiar neutronów metodą aktywacyjną i komorą helową, symulacje Monte Carlo i pomiar mocy dawki promieniowania gamma. Pozwoliło to na uzyskanie szeregu bardzo interesujących wyników. Udało się między innymi zidentyfikować reakcje jądrowe indukowane w komponentach i akcesoriach ww. akceleratorów, a także w innych przedmiotach znajdujących się w pobliżu wiązki terapeutycznej, jak również w drzwiach pomieszczenia do radioterapii akceleratora Elekta Precise. Poza tym zmierzono rozkład neutronów w otoczeniu akceleratorów medycznych oraz zależność pola neutronowego od energii i rodzaju wiązki terapeutycznej. Udało się także zidentyfikować pole neutronowe w sterowni akceleratora medycznego za pomocą spektroskopii promieniowania gamma. Przedstawiono optymalną konstrukcję drzwi do pomieszczenia do radioterapii, a także hołdując idei ALARA zaproponowano kilka praktycznych rozwiązań udoskonalających ochronę radiologiczną personelu. Wyniki badań rozpowszechniono w dwóch artykułach opublikowanych w czasopiśmie z listy filadelfijskiej. Wyniki badań zamieszczone w niniejszej pracy prezentowano na kilku konferencjach i seminariach.

Przytoczyłem obszerny fragment tekstu Autora, ponieważ po przeczytaniu pracy z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że przedstawiony cel pracy był konsekwentnie **realizowany**.

Dalej we Wprowadzeniu Autor podkreśla, że: *W ostatnim czasie nastąpił rozwój szeroko rozumianej radioterapii, u którego podstaw leży olbrzymi postęp dokonany w technologii przyspieszania cząstek i w technikach komputerowych. Rozpowszechniło się wykorzystanie hadronów, a w szczególności wiązek protonowych.*

Poza tym w ostatnich dwóch dekadach rozpowszechniło się również wykorzystanie terapii borowo – neutronowej opartej na reakcji jądrowej zachodzącej podczas napromieniania izotopu boru-10 neutronami termicznymi, w trakcie której wytwarzana jest cząstka α i jądro litu-7. Reakcja ta zachodzi w obszarze tkanki nowotworowej. Produkty reakcji charakteryzujące się wysokim przekazem energii stanowią efektywny czynnik przekazujący energię tkankom powodując ich destrukcję.

Autor stwierdza jednak, że tradycyjna radioterapia bazująca na zewnętrznych wiązkach fotonowych i elektronowych zwana teleradioterapią stanowi wciąż dominującą gałąź radioterapii. W tej terapii podstawowymi urządzeniami wytwarzającymi zewnętrzne wiązki terapeutyczne są akceleratory medyczne, zwane linakami. Współczesne akceleratory medyczne dzielą się zasadniczo na dwie grupy: akceleratory o potencjale nominalnym nieprzekraczającym sześciu MeV oraz akceleratory wieloenergetyczne generujące wiązki elektronowe i fotonowe o energiach dochodzących nawet do kilkudziesięciu MeV, mające znacznie szerszy zakres zastosowań. Wymienione akceleratory pozwalają bardzo precyzyjnie aplikować dawkę promieniowania przy równoczesnym oszczędzeniu tkanek zdrowych, jak również uwzględniać ruchy nowotworu podczas napromieniania.

Autor stwierdza, że *mimo dużego postępu osiągniętego w teleradioterapii w ciągu ostatnich kilkunastu lat wiele problemów wciąż ostatecznie nie zostało rozwiązanych. Jednym z takich problemów jest zanieczyszczenie neutronami wysokoenergetycznych terapeutycznych wiązek fotonowych i elektronowych.*

Dalej Doktorant opisuje reakcje fotojądrowe i elektrojądrowe istotne dla jego pracy. Zidentyfikował kilkanaście reakcji jądrowych zachodzących w trakcie emisji wiązek przez wymienione akceleratory.

Na rysunku 2 w pracy pokazano widmo energetyczne wysokoenergetycznej wiązki promieniowania X (20 MV) wytworzone w akceleratorze medycznym Clinac-2300, które tylko swoim wysokoenergetycznym „ogonem” pokrywa zakres energii obejmujący energie dla których zachodzą reakcje fotojądrowe dla jąder atomowych o dużej liczbie masowej, i część zakresu energii, w którym te reakcje zachodzą dla lekkich jąder. Neutrony powstałe w wyniku reakcji fotojądrowych charakteryzują się widmem

o szerokim zakresie energii począwszy od energii termicznych aż do energii nawet kilkunastu MeV. Średnia energia neutronów w pomieszczeniu do radioterapii zawiera się w przedziale od 200 keV do około 600 keV. Głównym czynnikiem decydującym o wielkości fluencji neutronów jest rodzaj i energia wiązki terapeutycznej. Neutrony wytwarzane są w reakcjach fotojądrowych, zwanych często reakcjami fotoneutronowymi i w mniejszym stopniu w reakcjach elektrojądrowych. Są to głównie reakcje (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ i $(e, e'n)$ indukowane przez fotony i elektrony wiązki terapeutycznej. Głównym moderatorem neutronów są betonowe ściany oraz podłoga i sufit pomieszczenia do radioterapii

Następnie Autor omawia metody pomiaru neutronów w ośrodkach onkologicznych. Zasadniczo metody wyznaczania fluencji lub mocy fluencji neutronów można podzielić na te oparte na technikach eksperymentalnych i na metody stosujące symulacje komputerowe bazujące na metodzie Monte Carlo. Najczęściej celem badań jest wyznaczenie fluencji neutronów spowolnionych, w zakresie energii termicznych i rezonansowych, lub pełnego widma energetycznego. Znajomość fluencji neutronów termicznych i rezonansowych jest ważna, ponieważ wywołują one reakcje (n, γ) , charakteryzujące się dużymi przekrojami czynnymi, a w przypadku licznych izotopów pojawiają się rezonanse o wartościach nawet rzędu tysięcy barnów. Reakcje jądrowe indukowane przez neutrony mogą powodować uszkodzenia radiacyjne, co jest istotnym problemem dla zdrowia pacjenta i personelu obsługi oraz drogiej elektroniki lub urządzeń implantowanych.

Systemy planowania leczenia nie uwzględniają składowej neutronowej. Do dokładnego wyznaczenia dawki neutronowej wymagana jest znajomość pełnego widma neutronów. Do tego służą liczniki proporcjonalne wypełnione helem, a także spektrometry oparte na zasadzie działania komór pęcherzykowych. Natomiast pomiary neutronów termicznych i rezonansowych wykonywane są najczęściej metodą aktywności wzbudzonej.

Autor informuje, że liczne badania wykazały, że rozkład fluencji neutronów wzdłuż stołu terapeutycznego jest w pierwszym przybliżeniu jednorodny. Tak więc, pacjent otrzymuje dawkę neutronową na całe ciało, pomimo, iż pole terapeutyczne ograniczone jest do niewielkiego obszaru. Dawka neutronowa rozkłada się prawie równomiernie

w obrębie ciała osoby leczonej. W przypadku standardowego leczenia klinicznego, pacjent otrzymuje dawkę terapeutyczną wynoszącą 60 Gy na guz w ciągu sześciu tygodni. Dawka efektywna od neutronów akumulowana w tym czasie nie przekracza 150 mSv. Dawka taka nie powoduje żadnych natychmiastowych efektów biologicznych, ale jej działanie na pacjenta powinno być kontrolowane. Trzeba pamiętać, że dawki otrzymywane przez pacjenta poza obrębem wiązki pierwotnej stanowią sumę dawki neutronowej i dawki od rozproszonego promieniowania fotonowego.

W badaniach objętych rozprawą doktorską Autor wykorzystał również symulacje oparte na metodzie Monte Carlo z zastosowaniem oprogramowania GEANT4 opracowanego w CERN, które służy do symulacji zjawisk z zakresu fizyki jądrowej i fizyki wysokich energii. W pracy Autor szczegółowo opisuje to oprogramowanie i przedstawia jego zastosowanie wykorzystane w pracy.

W Rozdziale 2. *Metodyka badań* Autor podaje, że w pracy zastosowano zasadniczo trzy metody pozyskiwania wyników.

Pierwsza to spektroskopia promieniowania gamma służąca do pomiaru widm w pomieszczeniu do radioterapii sterowni akceleratora Elekta Precise, a także widm promieniowania emitowanego przez akcesoria akceleratorów medycznych i inne przedmioty, które znajdowały się w bunkrach akceleratorów w trakcie emisji wysokoenergetycznych wiązek fotonowych. Na podstawie zmierzonych widm pozyskiwano szczegółową informację o radioizotopach indukowanych przez wiązki terapeutyczne i reakcjach jądrowych, w których te radioizotopy powstają. W sumie zidentyfikowano 14 radioizotopów powstających w reakcjach jądrowych rejestrując promieniowanie gamma emitowane podczas rozpadów promieniotwórczych i 5 reakcji jądrowych rejestrując gammy natychmiastowe. Ta technika pomiaru bazowała na zastosowaniu detektora germanowego.

Drugą zastosowaną techniką pomiaru była metoda aktywacyjna zwana również metodą detektorów aktywacyjnych. Metoda ta polega na umieszczeniu detektorów aktywacyjnych w polu neutronowym i wytworzeniu w nich radioaktywnych izotopów.

Trzecią zasadniczą zastosowaną metodą były symulacje oparte na metodzie Monte Carlo. Numeryczne pozyskiwanie danych w oparciu o zweryfikowane modele procesów fizycznych pozwoliło m.in. zoptymalizować konstrukcję drzwi do pomieszczenia terapeutycznego z akceleratorem generującym wysokoenergetyczne wiązki fotonowe.

Te trzy metody były dodatkowo wsparte pomiarami mocy dawki za pomocą wywzorcowanego radiometru, a także pomiarami strumienia neutronów wykonanymi komorą helową. Autor bardzo szczegółowo opisuje w pracy stosowane metody pomiarowe.

W pracy Autor przedstawia optymalną konstrukcję drzwi do pomieszczenia do radioterapii stosując symulację Monte Carlo. Istotną rolę odgrywają tu dwie grupy procesów fizycznych. Pierwsza grupa procesów to oddziaływania elektromagnetyczne, a druga grupa to reakcje neutronowe w tym głównie reakcje wychwytu neutronów i procesy rozpraszania neutronów.

Pomiary mocy dawki promieniowania gamma były wykonywane z dwóch powodów. Po pierwsze były prowadzone w celu zapewnienia ochrony radiologicznej w trakcie pomiarów. Dotyczyły w szczególności pomiarów mocy dawek w pobliżu głowic akceleratorów, bezpośrednio po dłuższych emisjach wiązek wysokoenergetycznych fotonów. Po drugie pomiary mocy dawek promieniowania gamma stanowiły uzupełnienie zasadniczych badań. Dotyczyły one określenia mocy dawek w sterowniach akceleratorów, na powierzchni drzwi do bunkra z akceleratorem i w bezpośredniej bliskości przedmiotów aktywowanych przez neutrony, bądź wiązkę terapeutyczną.

Pomiary mocy dawki promieniowania gamma były wykonywane z dwóch powodów. Po pierwsze były prowadzone w celu zapewnienia ochrony radiologicznej w trakcie pomiarów. Dotyczyły w szczególności pomiarów mocy dawek w pobliżu głowic akceleratorów, bezpośrednio po dłuższych emisjach wiązek wysokoenergetycznych fotonów. Po drugie pomiary mocy dawek promieniowania gamma stanowiły uzupełnienie zasadniczych badań. Dotyczyły one określenia mocy dawek w sterowniach akceleratorów, na powierzchni drzwi do bunkra z akceleratorem i w bezpośredniej bliskości przedmiotów aktywowanych przez neutrony, bądź wiązkę terapeutyczną.

Do pomiarów mocy dawek promieniowania gamma zastosowano radiometr RKP-1-2 .

Do pomiarów rozkładu strumieni neutronów w pomieszczeniu do radioterapii zastosowano komorę helową będącą integralną częścią układu detekcyjnego InSpector 1000 firmy Canberra. Komora helowa wypełniona jest helem-3, zatem rejestruje neutrony spowolnione, głównie termiczne.

W badaniach wykorzystano łącznie trzy akceleratory wieloenergetyczne: dwa akceleratory Elekta (CO w Opolu) i ich wiązki fotonowe 18 MV i akcelerator TrueBeam (NIO w Gliwicach) i jego wiązki fotonowe 10 FFF MV, 15 MV, 20 MV, a także wiązkę elektronową 22MeV.

W Rozdziale 3. *Uzyskane wyniki i ich dyskusja* Autor przedstawił badania, które obejmowały pomiary widm promieniowania gamma i fluencji neutronów spowolnionych w dwóch pomieszczeniach do radioterapii w Opolskim Centrum Onkologii, z akceleratorami Elekta. Pomiary fluencji neutronów zostały przeprowadzone dla wiązki promieniowania X o potencjale nominalnym 18 MV. Pomieszczenia, w których przeprowadzono pomiary, różnią się zasadniczo materiałami zastosowanymi do konstrukcji ścian i drzwi wejściowych. W celu szerszego zbadania problemu zanieczyszczenia wiązek terapeutycznych neutronami i konsekwencji tego zjawiska przeprowadzono analogiczne pomiary w pomieszczeniu akceleratora TrueBeam. W obu pomieszczeniach widoczny jest w miarę równomierny rozkład strumienia neutronów w bezpośrednim otoczeniu akceleratora i wyraźny spadek w pobliżu drzwi spowodowany z absorpcją i rozproszeniem neutronów w ścianach, suficie i podłodze pomieszczenia. Neutrony dochodzące do drzwi wywołują w materiałach konstrukcyjnych drzwi reakcje jądrowe. Są to głównie reakcje wychwyty radiacyjnego (n,γ), w wyniku których emitowane jest promieniowanie gamma o energii dochodzącej nawet do kilku MeV.

W ramach niniejszej pracy zoptymalizowano konstrukcję drzwi zmieniając materiały konstrukcyjne i grubość drzwi. Zasadniczą różnicę stanowi zamiana materiału pełniącego funkcję moderatora i absorbera neutronów na boraks - materiał bogaty w izotop boru-11, dla którego reakcja wychwyty radiacyjnego zachodzi z produkcją cząstki α i jądra litu-7 i fotonów o energii 477,6 keV (94 % reakcji). Najwięcej neutronów pojawia się w trakcie emisji wiązek fotonowych o największym potencjale 20 MV (tj. największej

energii maksymalnej). Jednocześnie obserwowane jest słabnięcie pola neutronowego dla wiązek o fotonowych mniejszej energii, a także dla wiązki elektronów o energii 22 MeV. Fluencja neutronów spowolnionych zmniejsza się maksymalnie o dwa rzędy wielkości.

Bezpośrednią konsekwencją wytwarzania neutronów przez wysokoenergetyczne wiązki terapeutyczne są reakcje jądrowe wywoływane przez te neutrony. Oczywiście, ze względu na obecność pola neutronowego w całym pomieszczeniu do radioterapii reakcje neutronowe mogą zachodzić praktycznie w każdym przedmiocie znajdującym się w tym pomieszczeniu, w tym również w ścianach, podłodze i suficie. Jednym z zadań badawczych realizowanych w ramach niniejszej pracy była identyfikacja reakcji jądrowych zachodzących w pomieszczeniu do radioterapii za pomocą pomiarów widma energetycznego promieniowania γ emitowanego przez powstałe w reakcjach neutronowych radioizotopy

Drugim czynnikiem jak już wspomniano są wysokoenergetyczne fotony wiązki terapeutycznej, które w reakcjach fotojądrowych (głównie fotoneutronowych (γ, n)) mogą produkować radioizotopy protonowo nadmiarowe rozpadające się głównie przez rozpad β^+ i wychwył elektronu. Natomiast w wyniku reakcji indukowanych przez promieniowanie neutronowe (głównie (n, γ)) mogą powstać radioizotopy neutronowo nadmiarowe rozpadające się głównie przez rozpad β^- . Dane literaturowe wskazują również na możliwość wytwarzania zarówno neutronów jak i radioizotopów przez wysokoenergetyczne wiązki elektronowe. Jednak, jak pokazały pomiary prezentowane w poprzednim rozdziale, strumień neutronów wytwarzanych przez wiązkę elektronową o energii 22 MeV jest około dwa rzędy wielkości mniejszy w porównaniu do wiązki fotonowej 20 MV. Jednak, o ile reakcje jądrowe z udziałem neutronów mogą zachodzić w całym pomieszczeniu do radioterapii, o tyle reakcje fotojądrowe są ograniczone tylko do przestrzeni wiązki.

Widmo pochodzące od promieniotwórczości wzbudzonej praktycznie nie zależy od pomieszczenia, w którym działa akcelerator medyczny.

W celu określenia źródeł promieniotwórczych poza zasadniczymi komponentami głowicy akceleratora Elekta, wykonano pomiary spektroskopowe dla wybranych

przedmiotów używanych w trakcie seansu napromienia pacjenta. Pomiarami objęto akcesoria akceleratora:

- 1) aplikator elektronowy służący do kolimacji terapeutycznych wiązek elektronowych i formowania pola napromieniowania o rozmiarach 20 cm x 20 cm dla SSD = 100 cm,
- 2) indywidualny kolimator elektronowy wykonany ze stopu Wooda, stosowany jako dodatkowa osłona przed promieniowaniem wiązki pierwotnej,
- 3) specjalna szuflada stosowana do mocowania dodatkowych osłon,
- 4) cegła do osłony elektroniki szczególnie wrażliwej na promieniowanie jonizujące.

Rozdział 4. *Analiza błędów pomiarowych*

Bardzo staranna analiza błędów pomiarowych dotyczy części badań związanych z wyznaczaniem fluencji neutronów termicznych i rezonansowych, opartym na ściśle określonych formułach, których podstawową wielkością jest aktywność. Właśnie dokładność wyznaczenia aktywności daje największy przyczynek do wartości błędu, którym obarczona jest fluencji neutronów.

Recenzent uważa, że zamiast *błędów pomiarowych* powinno się używać sformułowania *niepewności pomiarowe*.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Autor stwierdza:

Przeprowadzone badania pokazały, że szczególne znaczenie mają reakcje wychwytu neutronu (n, γ), wywoływane przez neutrony termiczne i rezonansowe. Reakcje te charakteryzują się dużymi przekrojami czynnymi dla większości izotopów. Szczególnie istotne są duże rezonanse pojawiające się w zakresie energii od 0,1 eV do nawet 100 keV.

Pola neutronowe nie ograniczają się do obszaru wiązki terapeutycznej. Powoduje to wzbudzenie aktywności we wszystkich przedmiotach znajdujących się

w pomieszczeniu do radioterapii, nawet jeśli nie znajdują się w obrębie wiązki pierwotnej. Źródłami promieniowania jonizującego stają się akcesoria akceleratora, takie jak aplikatory elektronowe, różnego rodzaju osłony itp.

W przypadku niektórych zidentyfikowanych radioizotopów o dłuższych czasach półrozpadu pojawia się możliwość kumulowania się radioaktywności. Takimi radioizotopami są te o czasach półrozpadu rzędu kilkunastu godzin lub dłuższymi. Z pośród zidentyfikowanych radioizotopów aż 11 spełnia to kryterium. Są to W-187, Na-24, Br-82, Sb-122, Sb-124, Co-60, Co-57, Ba-131, Ni-57, Cr-51 i Fe-59. Wszystkie te radioizotopy występują w komponentach akceleratora. Dlatego jeśli to możliwe, należy unikać długich emisji wiązek wysokoenergetycznych fotonów. Natomiast wśród krótkożyłowych emiterów promieniowania gamma zidentyfikowano Mn-56, Cl-36 i Al-28. Zazwyczaj krótszy czas półrozpadu owocuje większą aktywnością wzbudzoną przy krótszych ekspozycjach.

Wyraźny spadek strumienia neutronów pojawia się dopiero w labiryncie wejściowym. Pomimo tego neutrony docierają do drzwi, wywołując w nich reakcje jądrowe, a nawet przenikają przez nie, przedostając się do sterowni akceleratora. Moc dawki w sterowni w pobliżu drzwi nie przekraczająca $40 \mu\text{Sv/h}$, jak również słabe pole neutronowe nie stanowią wyraźnego zagrożenia dla personelu, tym nie mniej należy dążyć do minimalizowania nawet małych dawek promieniowania jonizującego. Stosując metodę Monte Carlo zoptymalizowano konstrukcję drzwi do pomieszczenia do radioterapii. Ustalono przy tym dwa priorytety. Pierwszy to redukcja promieniowania gamma wychodzącego z drzwi i zmniejszenie energii tego promieniowania, a także całkowita absorpcja niskoenergetycznych neutronów w materiałach drzwi. Zaprojektowana konstrukcja spełnia te dwa wymogi.

Podstawową metodą zastosowaną do pomiarów promieniotwórczości wzbudzonej była spektroskopia promieniowania gamma. Ze spektroskopii promieniowania gamma korzystała także metoda detektorów aktywacyjnych wykorzystana do pomiaru fluencji neutronów spowolnionych. Spektroskopię promieniowania gamma wykorzystano również bezpośrednio do identyfikacji pola neutronowego w oparciu o reakcje jądrowe wywołane przez neutrony w kryształach germanu detektora HPGe.

W tym miejscu warto podkreślić, że zazwyczaj ośrodki medyczne stosujące radioterapię akceleratorową, nie dysponują specjalistyczną aparaturą do pomiaru promieniowania neutronowego. Natomiast układ detekcyjny zaopatrzony w detektor HPGe jest obecnie podstawowym sprzętem w ośrodkach stosujących terapię za pomocą promieniowania jonizującego. W związku z tym część z prezentowanych badań może być wykonana bez trudu w każdym ośrodku medycznym stosującym radioterapię.

Ważną sprawą jest wykrycie nawet słabego pola neutronowego w miejscu pracy osób z personelu mających schorzenia kardiologiczne wymuszające posiadanie przez te osoby implantowanych urządzeń monitorujących lub wspomagających pracę serca. Badania prowadzone przez wielu naukowców w ostatnich latach pozwoliły wykryć korelację pomiędzy polem neutronowym, a obserwowaną dysfunkcją urządzeń kardiologicznych. Takie awarie mogą zagrażać życiu. Dlatego ważne jest, aby podkreślić, że osoby z implantowanymi urządzeniami elektronicznymi takimi jak np. rozruszniki serca, nie powinny pracować jako operatorzy lub technicy przy akceleratorach medycznych stosowanych w teleradioterapii. Problem ten oczywiście dotyczy również pacjentów. W ramach standardowych pomiarów z zakresu ochrony radiologicznej w ośrodkach stosujących radioterapię akceleratorową, należy również wykonać w możliwie szerokim zakresie pomiary neutronów.

Wnioski recenzenta:

- Praca doktorska dobrze zredagowana i jest napisana w poprawnym języku polskim.
- Tematyka badań jest ważna i aktualna ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa pacjentów i personelu przed niekontrolowanym i niepożądanym rozproszonym promieniowaniem w przypadku pojawiania się w szpitalach coraz nowych akceleratorów medycznych do teleradioterapii.
- Autor w pełni wykonał szeroki program badań, wykazał się znajomością metod i urządzeń służących do pomiarów promieniowania elektromagnetycznego i neutronowego. W badaniach wykorzystał metody eksperymentalne i obliczeniowe stosowane powszechnie w fizyce jądrowej,

takie jak spektroskopia promieniowania gamma, pomiar neutronów metodą aktywacyjną i komorą helową, symulacje Monte Carlo i pomiar mocy dawki promieniowania gamma. Bardzo dokładnie opisał wyniki pomiarów i sformułował wnioski końcowe wynikające z wykonanych badań.

- Autor podał, na podstawie swoich pomiarów i obliczeń, przepis na konstrukcję drzwi bardziej bezpiecznych dla personelu znajdującego się w sterowni.
- Doktorant zrealizował wszystkie zadania jakie wymienił w *Celu Pracy*.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Marcina Bieniesiewicza spełnia wymogi stawiane przez odpowiednie przepisy dotyczące zdobywania stopni naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów przewodu.

Wzorowe wykonanie badań i współautorstwo w 3 filadelfijskich publikacjach zasługują moim zdaniem na wyróżnienie tej pracy. Stawiam więc wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Marcina Bieniasiewicza.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Marcin Bieniesiewicz', written in a cursive style.