

Monitorowanie urządzeń akceleratorowych, stosowanych dla celów medycznych, ma w praktyce wiele wspólnego z kontrolą dozymetryczną przemysłowych instalacji radiacyjnych, służących do sterylizacji za pomocą promieniowania elektronowego sprzętu medycznego, przeszczepów, farmaceutyków i kosmetyków, a ostatnio również ziół i przypraw ziółowych [1–4]. Mimo że wielkości dawek pochłoniętych stosowanych w obróbce radiacyjnej są z reguły wielokrotnie wyższe od terapeutycznych, to metodologia pomiarów dozymetrycznych jest bardzo podobna [5–6]. Autorzy, opierając się na wieloletnich doświadczeniach w pracy ze źródłami promieniowań jonizujących stosowanymi w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ), omawiają podstawowe, rutynowe metody dozymetrii wiązek wysokoenergetycznych elektronów mając nadzieję, że informacje te będą również przydatne dla osób pracujących z urządzeniami jądrowymi w zakładach medycyny nuklearnej. Autorzy zwracają uwagę na wykonywane i kalibrowane w IChTJ grafitowe dozymetry kalorymetryczne, które dobrze sprawdzają się w praktyce i z powodzeniem zastępują podobne urządzenia oferowane przez renomowane laboratoria zagraniczne. W celu analizy folii dozymetrycznych zaprojektowano i wykonano w IChTJ specjalny czytnik dawki CD-02, który pośrednio można wykorzystać również do pomiarów energii elektronów za pomocą klina aluminiowego. W artykule wspomniano także o zastosowaniach elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR), która to technika jest rozwijana głównie z myślą o dozymetrii alaninowej, ale może być wykorzystywana także do określania dawki pochłoniętej na podstawie analizy tkanki kostnej. Do takiego potraktowania problemu monitoringu promieniowania jonizującego skłoniło nas wspólne uczestnictwo w spotkaniach inspektorów ochrony radiologicznej oraz wieloletnia współpraca z Bankiem Tkanek Akademii Medycznej w Warszawie w zakresie wyjąławiania przeszczepów allogenicznych.

Słowa kluczowe: dozymetria radiacyjna, obróbka radiacyjna, sterylizacja radiacyjna, kalorymetria grafitowa, rutynowe folie dozymetryczne.

Kontrola dozymetryczna promieniowania elektronowego

Dosimetric control of high energy EB

Wojciech Głuszewski, Przemysław P. Panta

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie

WSTĘP

Promieniowanie elektronowe stosuje się obecnie niemal rutynowo do przemysłowej modyfikacji fizycznych i chemicznych właściwości materiałów. Szczególnym przypadkiem wykorzystania akceleratorów elektronów jest sterylizacja radiacyjna wyrobów medycznych. Rozwój tej nowoczesnej metody, tzw. zimnego wyjąławiania stymulowany był w znacznym stopniu zapotrzebowaniem na produkowany z takich materiałów polimerowych sprzęt jednorazowego użytku. Jego upowszechnienie w dużej mierze ograniczyło rozprzestrzenianie się wielu groźnych chorób zakaźnych. Metody radiacyjne znalazły zastosowanie również w innych dziedzinach, np. farmacji, kosmetyce, zielarstwie, produkcji przypraw itd.

Specyfika promieniowania jonizującego wymaga przy każdym nowym opracowaniu technologicznym przeprowadzenia analiz uwzględniających: przeznaczenie wyrobu, rodzaj i kształt tworzywa, sposób pakowania, ekonomikę przedsięwzięcia itd. Należy pamiętać, że zbyt mała dawka pochłoniętej energii nie gwarantuje osiągnięcia zamierzonego efektu technologicznego, natomiast zbyt duża może spowodować uszkodzenie materiału i podwyższa niepotrzebnie koszt zabiegu. Trzeba od razu zaznaczyć, że obróbka radiacyjna nie zawsze prowadzi wyłącznie do degradacji tworzywa. Ca-

ły szereg polimerów stosowanych w produkcji wyrobów medycznych, takich jak polietylen czy elastomery ulega radiacyjnemu sieciowaniu i przy odpowiednio dobranej dawce promieniowania podwyższa swoje własności mechaniczne. W wielu przypadkach można więc połączyć proces wyjąławiania z zabiegiem uszlachetniania materiału.

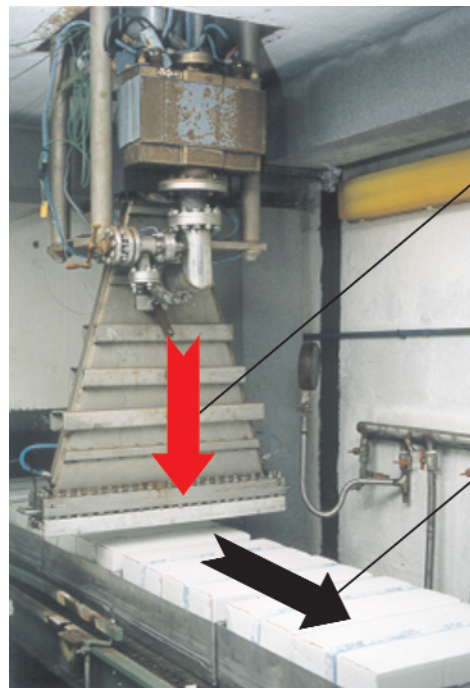
Istotą przemysłowego procesu obróbki radiacyjnej jest dostarczenie produktowi określonej ilości promieniowania jonizującego. Warto podkreślić, że promieniowanie jonizujące działa na wszystkie składniki materiału w sposób proporcjonalny do ich zawartości, a ściślej mówiąc – udziałów elektronowych.

Wyroby medyczne, których jakość może decydować o zdrowiu a nawet życiu pacjentów, wymagają zastosowania specjalnego systemu kontroli dozymetrycznej. W przypadku sterylizacji radiacyjnej mamy do rozwiązania kilka problemów: zaprojektowanie nowej technologii, określenie w uzgodnieniu z użytkownikiem dawki sterylizującej, rutynowa kontrola dozymetryczna dawki pochłoniętej oraz organizacja procedury z uwzględnieniem wskaźników dozymetrycznych typu *przeszedł – nie przeszedł*.

Celem tego opracowania jest krótkie przedstawienie podstawowych metod dozymetrycznych, stosowanych rutynowo do pomiarów

The dosimetric control of industrial installations used for radiation sterilization of medical devices, tissue grafts, pharmaceuticals, cosmetics, herbs and spices, is in practice very much related to the monitoring system of accelerators used for medical purposes. The methods of measurement of high doses as used in radiation processing are similar to those applied in small dose dosimetry, in the radiation therapy, for example. On the basis of long-term experience in the operation of radiation installations at the Institute of Nuclear Chemistry and Technology (INCT) some fundamental methods of dosimetry of EB are discussed. Calorimetric dosimeters developed at the Institute of Nuclear Chemistry and Technology are very useful in practical applications and in terms of quality are equivalent to commercial calorimeters offered by renowned foreign laboratories. It is worth noting graphite quasi-adiabatic calorimeters as absolute dosimeters and "CD-02" dose reader for the control of routine film dosimeters, which was developed in the INCT. This reader can also be used for the measurement of average energy of accelerated electrons using a popular method based on aluminum wedge. The paper reports on the application of electron spin resonance (ESR) technique in l-alanine and bone dosimetry. Bone dosimetry was used for ex post evaluation of accidental overexposure of radiotherapy patients in Białystok Hospital, which happened in 2001. The active participation in the meetings of Radiation Protection Inspectors as well as long-term cooperation of the INCT with the Tissue Bank of the Medical University of Warsaw in the field of radiation sterilization of allogenic grafts was an inspiration in this activity.

Key words: radiation dosimetry, radiation processing, radiation sterilization, graphite calorimetry, routine dosimetric films.



moc wiązki
elektronów (M)

szybkość
transportera (V)

$$D = \frac{M}{V}$$

Ryc. 1. Widok skanera wiązki elektronów i współpracującego z akceleratorem transportera. Dawka pochłonięta (D) promieniowania jest proporcjonalna do mocy wiązki elektronów (M) i odwrotnie proporcjonalna do szybkości transportera (V)

Fig. 1. General view of conveyor irradiated by the electron beam. Absorbed dose is directly proportional to the beam power and inversely proportional to the conveyor speed

dawkę promieniowania elektronowego w Stacji Sterylizacji i Higienizacji Radiacyjnej w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie.

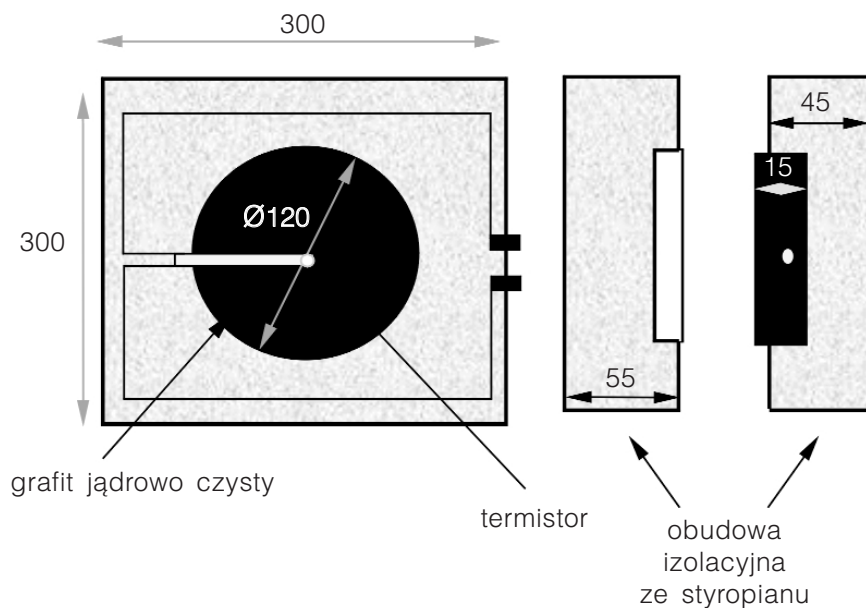
POMIAR DAWKI POCHŁONIĘTEJ PROMIENIOWANIA

Typowa instalacja radiacyjna składa się z akceleratora oraz współpracującego z nim przenośnika, na którym poruszają się pod wiązką elektronów pojemniki ze sterylizowanymi wyrobami (ryc. 1.). Najprostszym i najpewniejszym sposobem zmiany wielkości dostarczonej dawki promieniowania jest korekta szybkości taśmy przy stałych parametrach promieniowania elektronowego. Trzeba podkreślić, że akceleratory i transportery są stale kontrolowane przez urządzenia elektroniczne. Dodatkowo prowadzone badania mają jedynie na celu stwierdzenie w warunkach produkcyjnych, czy właściwie ustalono moc i energię wiązki, i że zaplanowana dawka jest dostarczana z wymaganą dokładnością. W tym celu

dozymetry umieszcza się w pojemnikach, do których następnie wkładany jest sprzęt medyczny.

Dokładne i precyzyjne rozwiązanie zagadnień wpływu wielkości dawki pochłoniętej promieniowania na określone parametry materiałów wymaga opracowania odpowiednich metod dozymetrycznych i dostosowania ich do warunków doświadczenia. Związane jest to zwykle ze znacznym nakładem pracy, spowodowanym stosunkowo skomplikowanym charakterem procesów wywołanych w materiałach przez promieniowanie jonizujące.

Najwygodniejszymi w dozymetrii promieniowania elektronowego okazały się metody kalorymetryczne. Wyróżniają się one absolutnym charakterem, opartym na termodynamice degradacji energii pochłoniętego promieniowania jonizującego w cieple. Oznacza to, że bezpośrednio mierzoną wielkością jest interesująca nas zaabsorbowana przez materiał energia promieniowania. Kalorymetry są obecnie na świecie podstawowy-



Ryc. 2. Schemat kalorymetru grafitowego
Fig. 2. Diagram of a graphite calorimeter

mi dozymetrami używanymi do kontroli urządzeń akceleratorowych.

Jeżeli stosowany w kalorymetrze materiał nie wypromieniowuje wtórnie znaczącej ilości energii pierwotnego promieniowania i nie akumuluje jej w przemianach fizykochemicznych (np. straty promieniowania hamowania, odwrotne rozpraszanie elektronów, przemiany fazowe, radiofotoluminescencja, przemiany struktury krystalicznej i radioliza), to zgodnie z drugim prawem termodynamiki, pochłonięta energia – w naszym przypadku wiązki elektronowej – zdegradowuje się nieodwracalnie w ciepło, wywołując tym samym określony wzrost temperatury w układzie kalorymetrycznym. W przypadku, gdy ciepło właściwe stosowanych w kalorymetrze materiałów jest dobrze znane, łącznie z jego poprawką temperaturową, a ponadto parametry wymiany ciepła z otoczeniem są określone wystarczająco dokładnie, to układ kalorymetryczny nie wymaga jakiegokolwiek kalibracji.

Wskazania kalorymetru nie zależą od mocy dawki wiązki i pozwalają wygodnie kalibrować rutynowe dozymetry chemiczne, np. z nieplastyfikowanego polichlorku winylu (PCW).

Obecnie kalorymetria radiacyjna stanowi bardzo różnorodnie rozwi-

janą technikę pomiarową. W tej publikacji autorzy ograniczyli się jedynie do opisu opracowanej w IChTJ modyfikacji prostej metodyki quasi-adiabatycznego kalorymetru grafitowego. Dla energii 5–10 MeV w graficie straty radiacyjne i wymienione powyżej efekty wtórne są praktycznie do pominięcia.

Kalorymetr jest wykonany w postaci krążka o średnicy 120 mm i wysokości 15 mm, izolowanego termicznie od otoczenia osłoną styropianową o wymiarach zewnętrznych 300x300x100 mm (ryc. 2.). W grafitowy krążek wmontowany jest odporny radiacyjnie termistor termometryczny typu VECO 32 A 180 tak, aby perełka termistora znajdowała się dokładnie w jego środku geometrycznym. Nominalna rezystancja termistora wynosi $1,5 \text{ k}\Omega \pm 20 \text{ proc.}$ w temp. 25°C . Maksymalna temperatura robocza do 200°C . Dopuszczalna moc pomiarowa 85 mW. Stała czasowa odpowiedzi temperaturowej ok. 4 s. Każdy termistor przed zamontowaniem jest przeskalowywany w ultratermostacie wodnym w zakresie od 15 do 70°C z rozdzielczością od $\pm 0,05$ do $\pm 0,10^\circ\text{C}$. Uzyskana zależność stanowi podstawę do określenia różnic temperatury przed i po napromienieniu.

Charakterystyka temperaturowo-rezystancyjna termistora jest nieliniowa i można ją zlinearyzować we współrzędnych półlogarytmicznych:

$$\log R = f(1/T)$$

Do obliczania dawki pochłoniętej promieniowania jonizującego wykorzystuje się zależność:

$$D = k \cdot \Delta T$$

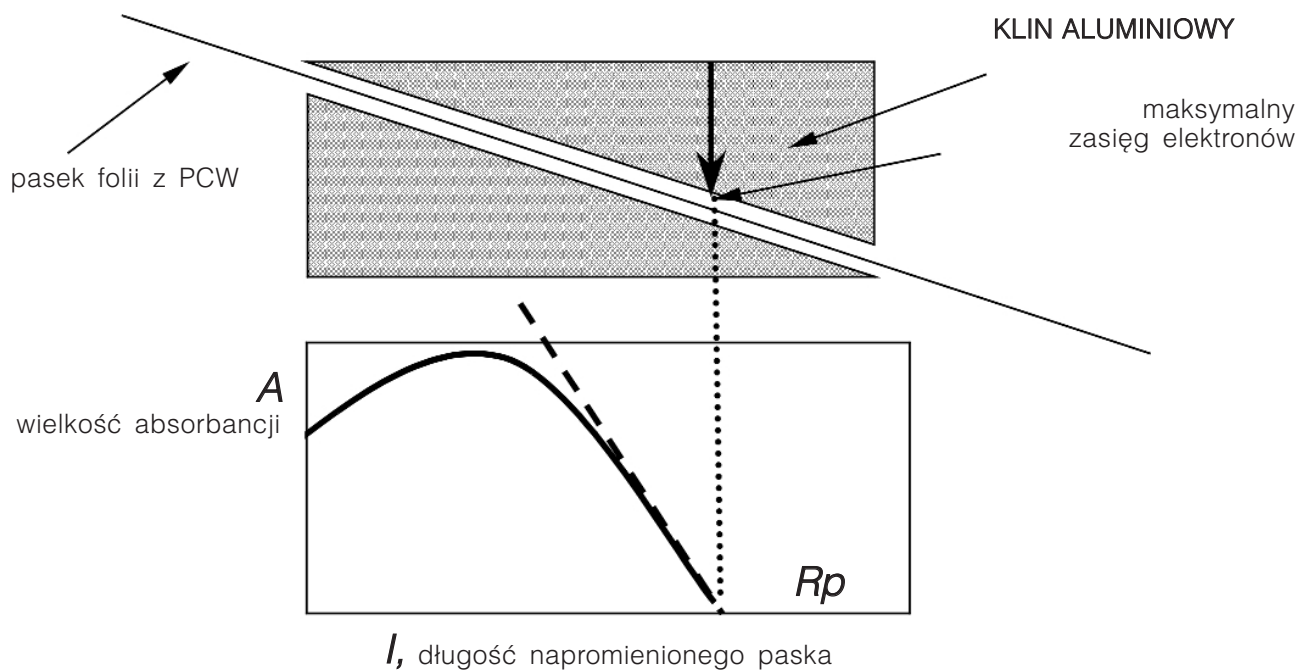
gdzie k równa się sumie iloczynów mas i ciepła właściwych poszczególnych elementów kalorymetru, a ΔT jest przyrostem temperatury przed i po napromienianiu.

Kalorymetr jest przeznaczony do dwóch celów:

- ▶ ustalenia akceleratorowych parametrów wiązki elektronowej, potrzebnych do uzyskania odpowiedniej dawki stosowanej w obróbce radiacyjnej, a zwłaszcza sterylizacji sprzętu medycznego,
- ▶ kalibracji innych dozymetrów, przeznaczonych do stałej kontroli procesów napromieniania, w szczególności dozymetrów foliowych.

Pomiary dawki promieniowania (D) prowadzi się przy zachowaniu tego samego położenia dozymetru względem skanera akceleratora (ryc. 1.).

Niezwykle ważnym problemem, szczególnie z ekonomicznego punktu widzenia, jest uzyskanie akceptowalnej wydajności obróbki radiacyjnej przy zachowaniu niezbędnej jakości usługi. Elektrony – przyspieszone do energii optymalnej dla celów obróbki radiacyjnej, tj. 10 MeV, są pochłaniane w funkcji grubości materiału dość niejednorodnie. Dawka powierzchniowa (tzn. dla bardzo cienkiego absorbenta) ulega tzw. podbiciu na mniej więcej 1/3 do 1/2 całkowitego zasięgu o ok. 28 proc., po czym szybko zanika do zera (ryc. 3.). Użyteczny zakres dawki głębino-wej wynosi dla wody lub dowolnego materiału równoważnego wodzie (miękką tkanką biologiczną lub polimery organiczne) ok. $2,5 \text{ g/cm}^2$. Ta-



Ryc. 3. Schemat klina aluminium i rozkład dawki pochłoniętej
Fig. 3. Diagram of an aluminium wedge and absorbed dose distribution

ka wartość grubości masowej zawiera pewien margines, uwzględniający poprawki na rozpraszanie elektronów dla geometrii odbiegającej od warstwowej (np. korpusy strzykawek czy cewniki w porównaniu do gazy, folii, prześcieradełek chirurgicznych lub saszetek z włókniną jałową). W przypadku zachowania grubości masowej na poziomie $2,5 \text{ g/cm}^2$ niejednorodność przestrzennego rozkładu dawki głębinowej wynosi ok. 14 proc. (wartość uśredniona). Natomiast stosunek dawki maksymalnej do minimalnej wynosi już 1,28.

POMIAR ENERGII ELEKTRONÓW

Energia elektronów określa ich zasięg w napromienianym materiale i w praktyce decyduje o maksymalnej grubości warstwy sterylizowanych wyrobów. Jest, obok mocy wiązki, podstawowym parametrem technologicznym w obróbce radiacyjnej. Aby całkowicie wyeliminować możliwość wzbudzenia w wyniku reakcji fotojądrowych promieniotwórczych radionuklidów, dla celów przemysłowych stosuje się

promieniowanie elektronowe o energii nieprzekraczającej 10 MeV.

Podajemy zasadę pomiaru energii elektronów za pomocą *klinu aluminium*. Jest to najprostsza, najbardziej popularna, rutynowa metoda rekomendowana przez najlepsze laboratoria na świecie. Wykorzystuje się tu zależność głębokości wnikania elektronów w materiał od ich energii. Krótko mówiąc, bardziej energetyczne elektrony dotrą w aluminium na większą odległość. Analiza spektrofotometryczna zaczernienia paska folii z polichloru winylu, umieszczonego pod takim klinem, pozwala określić maksymalny zasięg elektronów i na tej podstawie obliczyć średnią energię elektronów (ryc. 3.).

W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej wykonano specjalne urządzenie do spektrofotometrycznego pomiaru absorbancji folii dozymetrycznych. Czytnik dawki CD-02 pozwala mierzyć paski z tworzyw sztucznych o długości od 0,5 do 5 m. Specjalny układ mechaniczny przesuwają dozymetr przed okienkiem

spektrofotometru i w ten sposób mierzone jest osłabienie strumienia światła (stopień zaciemnienia tworzywa) przy wybranej długości fali. Program przelicza automatycznie wartość absorbancji na dawkę pochłoniętego promieniowania, która jest wyświetlana w postaci wykresu na ekranie monitora.

Średnia energia elektronów może być określona ze wzoru:

$$E_0 = 5,09 R_p + 0,200 \text{ (MeV)}$$

gdzie R_p jest praktycznym zasięgiem w centymetrach, otrzymanym przez ekstrapolację prostoliniowego odcinka dawki głębiny w aluminium.

WSKAŹNIKI (INDYKATORY) DAWKI STERYLIZACYJNEJ

Aby zapobiec możliwości pomyłki w trakcie przemysłowej sterylizacji wyrobów napromienionych z nie-napromienionymi, nakleja się na opakowania wskaźniki, które w wyniku obróbki radiacyjnej zmieniają wyraźnie barwę. W Polsce stosuje się handlowo dostępne indykatory dawki produkcji węgierskiej pod na-

zwą fabryczną *Megaray S*. Zmieniają one barwę z żółtawej na ciemnofioletową. Wyraźna zmiana koloru ma miejsce począwszy od dawki 5 kGy. Mechanizm zjawiska jest prosty – nalepiona na samoprzylepne podłoże folia PCV zawiera zdyspergowany barwnik organiczny, który zmienia barwę pod wpływem radiolitycznie wytwarzanego chlorowodoru (podobnie jak papierki lakmusowe reagujące zmianą barwy na zakwaszenie roztworu).

ZAKOŃCZENIE

Autorzy mają nadzieję, że interdyscyplinarne potraktowanie zagadnienia dozymetrii promieniowania elektronowego okaże się interesujące dla środowiska medycznego, a w szczególności dla zatrudnionych w zakładach medycyny nuklearnej inspektorów ochrony radiologicznej. Warto dodać, że rozwijana w IChTJ technika elektronowego rezonansu paramagnetycznego była wykorzystana do określenia wielkości dawki promieniowania, jaką otrzymały pacjentki w trakcie awaryjnej pracy akceleratora Neptun 10 w szpitalu w Bia-

łymstoku [7]. Na koniec można jeszcze wspomnieć o zupełnie nowej generacji cienkich dozymetrów aluminowych, opracowanych przez INST we współpracy z firmą Bruker. Nowością jest wciągnięcie do współpracy firmy fototechnicznej KODAK, u której, jako u właściwych specjalistów, zamówiono opracowanie emulsji dozymetrycznej [8].

PIŚMIENNICTWO

1. Głuszewski W, Zagórski ZP. *Sterylizacja radiacyjna wyrobów medycznych*. Współcz Onkol 2003; 10 (7): 787-90.
2. Panta PP. *Początki sterylizacji przeszczepów kostnych w Polsce promieniowaniem gamma z rdzenia wyłączzonego reaktora jądrowego*. Jubileuszowa monografia – Przeszczep w walce z kalectwem. Akademia Medyczna w Warszawie 2004; 87-94.
3. Głuszewski W. *Radiacyjna modyfikacja właściwości poliakrylowych klejów samoprzylepnych*. Postępy Techniki Jądrowej 2001; Z. 4: 62.
4. Zagórski ZP, Głuszewski W, Rzymski W. *Radiacyjna modyfikacja polimerów*. *Plastics Review* 2002; 7 (20): 23-8.
5. Proc. Sym. *Standarts and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*. Vienna 25-28 Nov. 2002, IAEA Vienna 2003.
6. American Society for Testing and Materials (ASTM) E 1631-96. *Standard practice for use of calorimetric dosimetry systems for electron beam dose measurements and dosimeter calibrations*. 1999.
7. Stachowicz W, Michalik J, Sadło J i wsp. *Badanie metodą spektroskopii elektronowego rezonansu paramagnetycznego rodników oraz centrów paramagnetycznych powstających w tkankach szkieletowych pod wpływem promieniowania jonizującego*. Jubileuszowa monografia – Przeszczep w walce z kalectwem. Akademia Medyczna w Warszawie 2004; 301-8.
8. Zagórski ZP. *Sterylizacja radiacyjna sprzętu medycznego w świetle konferencji w latach 2002, 2003*. Materiały VII Szkoły Sterylizacji i Higienizacji Radiacyjnej 2003; XIX: 1-5.

ADRES DO KORESPONDENCJI

mgr inż. **Wojciech Głuszewski**
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
ul. Dorodna 16
03-195 Warszawa
tel. +48 22 811 23 47
faks +48 22 811 15 32
e-mail: gluszew@ichtj.waw.pl