



Radiacyjna modyfikacja tworzyw polimerowych stosowanych w medycynie

Radiation modification of polymer plastics used in medicine

Wojciech Głuszewski

Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa, tel. +48 22 504 12 88, e-mail: w.głuszewski@ichtj.waw.pl

Streszczenie

Abstract

Za pomocą promieniowania jonizującego można korzystnie modyfikować właściwości materiałów polimerowych. Planując wykorzystanie naturalnych i syntetycznych polimerów w wyrobach medycznych i implantach chirurgicznych, należy pamiętać, że powinny być one wolne od wegetatywnych, przetrwalnikowych oraz zarodnikowych form mikroorganizmów. Techniki radiacyjne są unikatowymi metodami sterylizacji pozwalającymi w krótkim czasie wyjałowiać materiał w całej objętości, w dowolnej temperaturze (również warunkach kriogenicznych), w opakowaniu jednostkowym i zbiorczym. Co istotne, w odróżnieniu od tradycyjnych metod chemicznych (gazowych) działanie promieniowania jonizującego nie pozostawia szkodliwych zanieczyszczeń. Temat jest stale aktualny w związku z postępem w dziedzinie konstrukcji źródeł promieniowania jonizującego oraz pojawianiem się nowych tworzyw sztucznych. W szczególności zwrócono uwagę na radiolizę znajdujących coraz więcej zastosowań tworzyw biodegradowalnych. Jako przykład omówiono materiały komórkowe (pianki) na bazie polilaktydu (PLA) i polikaprolaktanu (PCL). W tym przypadku wielkość dawki pochłoniętej promieniowania można kontrolować (skracać) czas ich biowchłaniałości. Wspomniano również o badaniach nad nowymi kompozytami typu polimer/metal wykorzystywanymi w ochronie radiologicznej, radiacyjnej polimeryzacji, którą można prowadzić bez inicjatorów i/lub katalizatorów oraz o modyfikacji powierzchni polimerów.

Słowa kluczowe: radioliza, polimery, wiązka elektronów, promieniowanie gamma, promieniowanie hamowania, sterylizacja radiacyjna, wyroby medyczne, implanty

Ionizing radiation can advantageously modify the properties of polymeric materials. When planning the use of natural and synthetic polymers in medical devices and surgical implants, it should be remembered that they should be free of vegetative, spore and spore forms of microorganisms. Radiation techniques are unique sterilization methods that quickly sterilize the material in its entire volume at any temperature (including cryogenic conditions), in unit and collective packaging. Importantly, unlike traditional chemical (gas) methods, ionizing radiation does not leave harmful contaminants. The topic is constantly relevant in connection with the progress in the field of construction of ionizing radiation sources and the emergence of new plastics. In particular, attention has been paid to the radiolysis of more and more applications of biodegradable plastics. As an example, cell materials (foams) based on polylactide (PLA) and polycaprolactone (PCL) are discussed. In this case, the amount of radiation absorbed dose can be controlled (shortened) their biosorbability time. The following were also mentioned – the research on new polymer/metal composites used in radiation protection, radiation polymerization that can be carried out without initiators and/or catalysts, and modification of polymer surfaces by tacking.

Key words: radiolysis, polymers, electron beam, gamma radiation, X radiation, radiation sterilization, medical devices, implants

otrzymano / received:

10.06.2020

poprawiono / corrected:

15.06.2020

zaakceptowano / accepted:

19.06.2020



Wprowadzenie

Pojęcie radiolizy wprowadziła Maria Skłodowska-Curie. Uczona zauważyła, że przy kontakcie soli radu z wodą wydzielają się produkty gazowe, tlen i wodór, tak więc termin powstał przez analogię do elektrolizy. Przyjął się w nauce, chociaż współcześnie zmienił znaczenie – jest to ogół zjawisk chemicznych wywołanych przez działanie promieniowania jonizującego na materię. Maria Skłodowska-Curie opublikowała również artykuł, w którym po raz pierwszy przedstawiła krzywe radiacyjnej inaktywacji [1]. Podsumowała w ten sposób doświadczenia z okresu I wojny światowej, kiedy to własnoręcznie przygotowywała amputki z radonem służące do wyjąławiania ran w warunkach frontowych. Ścisłej mówiąc, źródłem przenikliwego promieniowania były radioaktywne produkty rozpadu radonu (^{214}Pb , ^{214}Bi). Pomysł zwalczania patogenów za pomocą promieniowania jonizującego został w praktyce zrealizowany dopiero kilkadziesiąt lat później. Paradoxem jest, że promieniowanie X, które w badaniach stosowała uczona, przemysłowo wykorzystano najpóźniej. W analizie publikacji Marii Skłodowskiej-Curie warta podkreślenia jest kwestia fundamentalna dla chemii radiacyjnej. Eksperyment uczoney (wykładniczy kształt krzywych inaktywacji) wykazał, że małe dawki promieniowania są dużo bardziej wydajne w wywołaniu letalnego efektu niż dawki duże. Współcześnie wiemy, że energia promieniowania jonizującego odkładana jest w materii w sposób niehomogeniczny. Miejsca (gniazda jonizacji), w których jest ona przekazywana poprzez wybicie elektronów, są stosunkowo nieliczne. Aby zatem uzyskać w przypadku patogenu efekt letalny, musimy komórkę trafić w miejsce istotne dla jej funkcji życiowych. Na początku zabiegu wyjąławiania, gdy żywych bakterii jest relatywnie najwięcej, oczywiście łatwiej to zrobić. Znacznie trudniej trafić nieliczne już, ostatnie komórki i wymaga to sumarycznie większej dawki. Zrozumiałe jest również, że do zwalczania mniejszych wirusów potrzeba znacznie większych dawek promieniowania niż dla zabicia grzybów, pleśni czy bakterii. W rzeczywistości zjawiska przekazywania energii w radiolizie są bardzo skomplikowane. Wielkości energii zdeponowane w gniazdach jonizacji są bowiem bardzo różne i prowadzą do rozmaitych wtórnych procesów chemicznych. Paradoksalnie bardziej wydajne w przekazywaniu energii są elektrony najwolniejsze (o dużym LET), których efektem działania są gniazda wielojonizacyjne. Nie wchodząc w szczegóły, można ogólnie powiedzieć, że w gniazdach jednojonizacyjnych dochodzi do wybicia elektronu, a w gniazdach wielojonizacyjnych do bezpośredniego rozerwania łańcucha polimerowego. W gniazdach jednojonizacyjnych następuje oderwanie najczęściej atomu wodoru (w teflonie fluoru, w PCW chloru), co skutkuje powstaniem wolnego rodnika (makrorodnika) [2]. W gniazdach wielojonizacyjnych w wyniku degradacji łańcucha polimeru powstają również produkty małowcząsteczkowe.

Zjawiska postradiacyjne w radiolizie polimerów

Reaktywny makrorodnik powstający w wyniku działania promieniowania jonizującego jest w atmosferze powietrza natychmiast atakowany przez tlen, co zapoczątkowuje procesy postradiacyjnej oksydegradacji [3]. Reakcją konkurencyjną jest tworzenie wiązań poprzecznych między dwoma rodnikami. Zjawisko sieciowania znakomicie poprawia właściwości mechaniczne materiału i znalazło wiele praktycznych zastosowań. Przykładowo w ten sposób modyfikuje się polietylenowe elementy endoprotez stawów kolanowego i biodrowego, stosując relatywnie duże dawki (ponad 100 kGy). Generalnie jednak wszystkie wyroby medyczne wykonane z polietylenu poprawiają właściwości użytkowe w wyniku sterylizacji radiacyjnej. Do wyjąławiania stosuje się jednak znacznie mniejsze dawki, zwykle od 18 do 35 kGy.

Przykładem polimeru nieodpornego radiacyjnie jest polipropylen (PP), który stosunkowo niewiele różni się od polietylenu. Zawada przestrzenna grupy metylowej powoduje jednak, że w powietrzu makrorodnikom znacznie trudniej utworzyć wiązania poprzeczne, co preferuje reakcję przyłączania tlenu. Dodatkowo rodnik nadtlenny powstały po ataku O_2 na makrorodnik odrywa wodór z innego miejsca łańcucha. Powstają w efekcie wodoronadtlenek i odtwarzany w innym miejscu kolejny wolny rodnik. Zainicjowane promieniowaniem jonizującym zjawisko łańcuchowego postradiacyjnego utleniania PP bardzo szybko pogarsza jego własności mechaniczne. Z tego powodu strzykawki jednorazowego użytku wykonane z polipropylenu najczęściej nie są wyjąławiane radiacyjnie [4].

Duże źródła promieniowania jonizującego

Technologie radiacyjne pozwalają uzyskać na tyle unikatowe korzyści, że optaca się budować stosunkowo kosztowne źródła promieniowania jonizującego dużej mocy. W praktyce wykorzystuje się dla tych celów wiązki elektronów przyspieszane w urządzeniach akceleratorowych (*EB od angielskiego electron beam*) oraz tzw. kobaltowe źródła promieniowania gamma (γ). Precyzyjnie mówiąc, ^{60}Co jest β promieniotwórczy, natomiast źródłem dwóch kwantów promieniowania elektromagnetycznego o energiach 1,17 i 1,33 MeV jest produkt jego rozpadu wzbudzony $^{60}\text{Ni}^*$. W naszym kraju postawiono głównie na szybkie elektrony [5]. W przemysłowe akceleratorów elektronów wyposażone są Stacja Sterylizacji Radiacyjnej Wyrobów Medycznych w Warszawie (Fot. 1) oraz Stacja Radiacyjnego Utrwalania Płodów Rolnych we Włochach pod Warszawą. Rozwój technologii akceleratorowych prowadzony jest obecnie głównie w celu podniesienia sprawności elektrycznej urządzeń, obniżenia ich ceny oraz zwiększenia niezawodności. W niedalekiej przyszłości możliwy będzie transfer technologii z obszaru akceleratorów badawczych stosowanych w fizyce wysokich energii, co pozwoli na konstrukcję innowacyjnych urządzeń poszerzających znacząco zakres możliwości technicznych i cenowych.



Fot. 1 Akcelerator elektronów przeznaczony do radiacyjnej sterylizacji wyrobów medycznych. Na fotografii widać skaner (końcowa część instalacji akceleratorowej) do przemieszczania wiązki elektronów na szerokość transportera, na którym przesuwają się obrabiane radiacyjnie wyroby
Źródło: Archiwum własne.

Z uwagi na to, że elektrony mają stosunkowo niewielki zasięg (praktyczny około 3 cm w wodzie), projektowane są też systemy wykorzystujące do obróbki radiacyjnej promieniowanie X generowane w systemach wyposażonych w akceleratory elektronów. Dokładniej mówiąc, jest to promieniowanie hamowania (niem. *Bremsstrahlung*) powstające, gdy elektrony energetyczne są odchylane przez silne pole elektryczne w pobliżu jądra atomowego. Wydajność wytwarzania tego rodzaju energii elektromagnetycznej wzrasta wraz z energią kinetyczną elektronów i liczbą atomową materiału tarczy. Obróbka radiacyjna wyrobów za pomocą wysokoenergetycznego promieniowania hamowania powoduje podobne zjawiska jak przy promieniowaniu γ ze źródeł kobaltowych. Istnieją jednak pewne różnice, które mogą wpływać na wybór praktycznych zastosowań. Promieniowanie hamowania ma ciągłe widmo energetyczne ograniczone od strony fal krótkich maksymalną energią elektronów. Natomiast źródła kobaltowe, jak było powiedziane, dają promieniowanie o dobrze zdefiniowanych energiach. Kolejną znaczącą różnicą jest rozkład kątowy promieniowania. Jądrowe promieniowania γ są emitowane we wszystkich kierunkach, a wysokoenergetyczne fotony hamowania koncentrują się w kierunku padających na materiał elektronów. Właściwość ta powoduje, że urządzenia akceleratorowe są bardziej kompaktowe niż urządzenia izotopowe o podobnej przepustowości oraz mają znacznie większy zasięg i wydajność przekazywania energii do napromieniowanych materiałów.

Przełomowym dla praktycznego wykorzystania promieniowania hamowania było wdrożenie w Belgii opatentowanego we Francji akceleratora typu Rhodotron. Nazwa pochodzi od sposobu przyspieszania elektronów poprzez wielokrotne (dzięki zawracaniu przez system elektromagnesów) przechodzenie ich przez odcinek linii koncentrycznej. Pierwsza przemysłowa instalacja została uruchomiona w Szwajcarii przez firmę Leoni. W praktyce udowodniono, że sposób konwersji wiązki elektronów (7 MeV, 560 kW) na promieniowanie hamowania jest korzystniejszy ekonomicznie od instalacji izotopowych promieniowania gamma wyposażonych w źródła kobaltowe o aktywności powyżej 1,5 MCi. Ogólnie można przyjąć, że 1 kW mocy promieniowania hamowania odpowiada aktywności źródła z ^{60}Co na poziomie 67,6 kCi, przy czym z uwagi na wspomniany charakterystyczny rozkład przestrzenny można osiągnąć blisko dwukrotnie większy współczynnik wykorzystania promieniowania w stosunku do charakteryzujących się rozkładem izotropowym źródeł izotopowych. Warto dodać, że ze względu na możliwość zachodzenia reakcji fotojądrowych (wzbudzenia sztucznych izotopów promieniotwórczych), Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej formalnie ograniczyła energię przemysłowych instalacji akceleratorowych do 10 MeV.

Niezależnie jednak od rodzaju zastosowanego promieniowania jonizującego, w każdym przypadku niemal cała energia przekazywana jest przez wtórne elektrony. W technologiach akceleratorowych elektrony są wybijane poprzez oddziaływania



elektrostatyczne w przypadku promieniowań elektromagnetycznych w wyniku zjawiska fotoelektrycznego i efektu Comptona. Dla energii powyżej dwóch mas spoczynkowych elektronu może również dojść do kreacji par elektron pozyton, co w konsekwencji anihilacji pozytonu i elektronu daje dwa kwanty promieniowania gamma o energii 511 keV. Zatem z punktu widzenia pierwotnych zjawisk zachodzących w napromieniowywanych materiałach sposób obróbki radiacyjnej nie ma decydującego znaczenia. W przypadku promieniowań elektromagnetycznych osiągamy większy zasięg (możliwość obróbki przedmiotów o większej gęstości), a przy zastosowaniu akceleratorów większą moc dawki. W źródłach kobaltowych moc dawki jest zwykle na poziomie kilku kGy/h, a w przypadku wiązki elektronów o mocy 10 kW rzędu 14 000 kGy/h. Większa szybkość napromieniowania ma znaczenie z punktu widzenia procesów postradiacyjnego utleniania polimerów. Gdy zastosujemy szybkie elektrody, warunki obróbki radiacyjnej są zbliżone do próżni (tlen nie zdąży dyfundować do materiału). Instalacje akceleratorowe są również lepiej postrzegane z punktu widzenia bezpieczeństwa radiologicznego. Jako w pewnym sensie zwykłe urządzenia elektryczne po wyłączeniu nie stanowią zagrożenia i nie wymagają całodobowej specjalnej ochrony.

Polimery biodegradowalne

Poszukiwania odpornych na warunki sterylizacji radiacyjnej polimerów do produkcji wyrobów jednorazowego użytku dały początki chemii radiacyjnej polimerów. Priorytety zmieniły się jednak z chwilą wykorzystania w inżynierii tkankowej i genetycznej polimerów biodegradowalnych. Obok biotolerancji, materiały do zastosowań wewnątrzustrojowych powinny charakteryzować się odpowiednimi właściwościami mechanicznymi i technologicznymi. Znajomość wszystkich wyżej wymienionych wymagań jest podstawą poszukiwań sposobów modyfikacji i sterylizacji tworzyw polimerowych do produkcji implantów o różnym czasie degradacji [6].

Przykładowo leczenie ubytków tkanek z wykorzystaniem produktów inżynierii tkankowej (rusztowań tkankowych) jest stosunkowo nowym rozwiązaniem w dziedzinie medycyny regeneracyjnej. Duże nadzieje w wytwarzaniu trójwymiarowych porowatych szkieletów wiąże się z biodegradowalnymi polimerami, a w szczególności polilaktydem (PLA) oraz polikaprolaktonem (PCL). Jednym ze sposobów nadawania tworzywom nowych właściwości użytkowych i technologicznych jest proces porowania. Prowadzi on do zmniejszenia masy wyrobu oraz zwiększenia jego elastyczności. Kontrolowany proces degradacji wszczepianego materiału do żywego organizmu jest jednym z ważnych zagadnień, nad którym prowadzone są obecnie badania. Przedmiotem naszych prac była radioliza pianek polimerowych PLA/PCL wykorzystywanych dla celów medycznych. Temat jest interesujący zarówno z punktu widzenia celowej modyfikacji właściwości materiału (sieciowanie, zmiana właściwości powierzchniowych, kontrola zjawiska degradacji),

jak i niekiedy niepożądanych zmian zachodzących w wyniku radiacyjnej sterylizacji. W badaniach starzeniowych opisano procesy postradiacyjnego utleniania pianek otrzymanych z materiałów o składzie PLA/PCL/porofofor: 100/0/0; 96/0/4; 91/5/4; 86/10/4; 81/15/4. Zastosowano dwie skrajne moce dawek γ (3,0 kGy/h) i EB (14 000 kGy/h). Za pomocą chromatografii gazowej (oznaczono ilości O_2 pochłanianego przez polimery) porównano zjawiska oksydegradacji próbek napromieniowanych i niepoddanych obróbce radiacyjnej. Ilości tlenu pochłanianego w procesach starzenia przez pianki napromieniowane były średnio dwukrotnie większe niż przez pianki nienapromieniowane. Do badań procesów postradiacyjnego utleniania powierzchni materiałów PLA/PCL zastosowano DRS (spektroskopię absorpcyjną w wersji odbiciowej promieniowania rozproszonego). Uzyskano między innymi widma próbek napromieniowanych i starzonych względem starzonych, ale nienapromieniowanych. Oszacowano w ten sposób, o ile wzrasta wydajność oksydegradacji w wyniku obróbki radiacyjnej [7]. Zmiany właściwości powierzchni polimerów mają również znaczenie z punktu widzenia np. hodowli komórkowych.

Kompozyty polimer/metal barierowe dla promieniowań jonizujących

Polimerowe kompozyty mogą zastąpić ołów w ochronie radiologicznej. Kompozyty z matrycą silikonową znajdują uznanie zwłaszcza w ochronie przed promieniowaniem rentgenowskim (radiologia). Unikatową cechą tego rodzaju barier ochronnych jest obecność w materiale atomów: wodoru, boru i ciężkiego metalu, co chroni przed promieniowaniem gamma i komptonowskimi elektronami oraz neutronami. Nie ma konieczności stosowania kilku różnych warstw, co znakomicie ułatwia postępowanie się osłoną w pomieszczeniach o podwyższonym promieniowaniu. W celu porównania przydatności różnych kompozytów w ochronie radiologicznej zmierzono osłabienie natężenia promieniowania gamma po przejściu przez określoną grubość tworzywa. To oznacza natężenie promieniowania padającego na powierzchnię, a I natężenie promieniowania za barierą radiologiczną. Jako dodatek (zbrojenie) matrycy z silikonu i epoksydy zastosowano: bizmut, żelazo, baryt, żelazo i baryt, wolfram [8].

Radiacyjna polimeryzacja

Wolne rodniki powstające w monomerze w wyniku działania promieniowania jonizującego mogą inicjować jego polimeryzację. Unikatowymi cechami techniki radiacyjnej są: polimeryzacja niemożliwa innymi metodami i to w dowolnym stanie skupienia (ciecz, gaz, ciało stałe), w dowolnej temperaturze (najczęściej otoczenia), otrzymywanie czystych polimerów bez dodatków np. katalizatorów lub innych domieszek, możliwość polimeryzacji w trudnych technologicznie warunkach (np. wewnątrz części urządzeń). Zjawisko polimeryzacji łatwo kontrolować wielkością dawki pochłoniętej promieniowania. Radiacyjnie można również



modyfikować wyroby otrzymane w wyniku przestrzennego drukowania (3D). W przypadku produkcji trójwymiarowych ściśle dopasowanych protez można sieciowanie radiacyjne uformowanego wyrobu połączyć ze sterylizacją [9].

Radiacyjna modyfikacja powierzchni

Promieniowanie jonizujące można wykorzystać, jak wspomniano, do modyfikacji powierzchni polimerów (zwilżalność, twardość, odporność termiczna, możliwość łączenia z innymi materiałami). W tym przypadku mała energia elektronów, a więc ograniczony ich zasięg jest zaletą. Techniki radiacyjne wykorzystuje się przy produkcji membran trekowych, kompozytów oraz systemów kontrolowanego uwalniania leków. Poprzez obróbkę radiacyjną można poprawiać właściwości i funkcjonalności opakowań wytwarzanych na bazie polimerów syntetycznych (poliolefin i polimerów biodegradowalnych) oraz polimerów naturalnych. Dotyczy to zarówno materiałów przeznaczonych dla żywności, suplementów diety i farmaceutyków, jak również materiałów opakowaniowych dla produktów przeznaczonych do radiacyjnej sterylizacji i higienizacji.

Podsumowanie

Sterylizacja radiacyjna tworzy polimerowych wykorzystywanych do produkcji wyrobów medycznych może prowadzić zarówno do ich oksydegradacji, jak i sieciowania [10]. Mimo że odporność radiacyjne większości podstawowych tworzyw sztucznych są poznane i opisane, to jednak ewentualne zmiany w składzie np. antyoksydantów, fotostabilizatorów oraz innych dodatków funkcjonalnych wymagają każdorazowo dodatkowych badań [11]. Na rynku pojawiają się również nowe polimery, których radioliza nie jest poznana [12]. Dotyczy to zwłaszcza polimerów biodegradowalnych. W ich przypadku możliwość kontroli czasu biodegradacji wielkością dawki promieniowania może okazać się cenną zaletą. Zdarza się tak, że wytwórca po zaprojektowaniu wyrobu i pozytywnych testach materiałowych orientuje się, że będzie musiał poddać go na koniec sterylizacji radiacyjnej. Wcześniejsze poznanie radiolizy zastosowanych polimerów pozwoli ocenić wpływ promieniowania jonizującego na właściwości użytkowe wyrobu [13, 14, 15]. W przeglądzie literaturowym celowo ograniczono się do publikacji dotyczących doświadczeń autora w zakresie chemii radiacyjnej polimerów, zwracając uwagę na krajowe doświadczenia w tej dziedzinie. Badania były prowadzone w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych IChTJ.

Literatura

1. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, Q.K. Tran, L. Cortella: *Maria Skłodowska Curie – the precursor of radiation sterilization methods*, Analytical and Bioanalytical Chemistry, 400, 2011, 1577-1582.
2. W. Głuszewski: *The use of gas chromatography for the determination of radiolytic molecular hydrogen, the detachment of which*

initiates secondary phenomena in the radiation modification of polymers, Polimery, 64(10), 2019, 44-49.

3. W. Głuszewski: *Postradiacyjna oksydegradacja polimerów*, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, 3, 2018, 102-104.
4. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski: *Radiation effects in polypropylene/polystyrene blends as the model of aromatic protection effects*, Nukleonika, 53, 2008, 21-24.
5. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, G. Przybytniak, Z. Zimek: *Modyfikacja radiacyjna polimerów*, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, 4, 2014, 38-40.
6. W. Głuszewski, A. Stasiak, A. Raszowska-Kaczor, D. Kaczor: *Effect of polyethylene crosslinking for properties of foams*, Nukleonika, 63(3), 2018, 81-85.
7. W. Głuszewski, M. Htwe: *Radiacyjna polimeryzacja i modyfikacja polimerów*, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, 1, 2020, 58-59.
8. H. Engelmann, W. Głuszewski: *Kompozyty polimer-metal w ochronie radiologicznej*, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, 4, 2016, 56-57.
9. A.G. Chmielewski, Z. Zimek: *Innowacje dla energii i nie tylko*, Ministerstwo Energii, Warszawa 2018.
10. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, M. Rajkiewicz: *The Comparison of Radiation and a Peroxide Crosslinking of Elastomers*, KGK und PV, 11/12, 2015, 46-49.
11. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, M. Rajkiewicz: *Protective Effects in Radiation Modification of Elastomers*, Radiation Physics and Chemistry, 105, 2014, 53-56.
12. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, M. Rajkiewicz: *Synergistic effects in the processes of crosslinking of elastomers*, Radiation Physics and Chemistry, 94, 2014, 36-39.
13. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, Z. Zimek, M. Rajkiewicz: *Odporność radiacyjna tworzyw polimerowych*, Tworzywa Sztuczne w Przemysle, 2, 2014, 50-51.
14. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski: *Sterylizacja radiacyjna wyrobów medycznych*, Współczesna Onkologia, 10(7), 2003, 787-790.
15. Z.P. Zagórski, W. Głuszewski: *Modyfikacja własności polimerów w procesie sterylizacji radiacyjnej*, Przeszczep w walce z kalectwem, Akademia Medyczna, Warszawa 2004, 357-349.

reklama

KONTROLA DAWEK



LABORATORIUM DOZYMETRII INDYWIDUALNEJ I ŚRODOWISKOWEJ

ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków
e-mail: ladis@ifj.edu.pl

tel.: 12 662 84 57
fax: 12 662 81 58

