

Jak pisać o atomistyce?

How to write about atomics?

Wojciech Głuszewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Streszczenie: W artykule zwrócono uwagę na kilka kwestii nomenklaturowych, które mają istotne znaczenie dla zrozumienia problematyki oddziaływania promieniowania jonizującego na materię. Poruszono m.in. kwestie radiacyjnego utrwalania ziół, przypraw ziołowych, suszonych grzybów, suplementów diety, fitofarmaceutyków i żywności. Podkreślono unikatowe cechy technologii radiacyjnych, które powodują, że opłaca się budować stosunkowo kosztowne źródła promieniowania dużej mocy. Przedstawiono wyniki własnych badań nad efektem ochronnym związków aromatycznych w radiolizie związków organicznych oraz radiolizie wodnych roztworów tlenku grafenu.

Słowa kluczowe: Napromieniowanie, radioliza polimerów, efekt ochronny, tlenek grafenu, radiacyjne utrwalanie żywności.

Abstract: This article highlights several nomenclature issues that are crucial for understanding the effects of ionizing radiation on matter. In particular, it addresses the radiation preservation of herbs, spices, dried mushrooms, dietary supplements, phytopharmaceuticals, and food. It highlights the unique features of radiation technologies that make it worthwhile to build relatively expensive high-power radiation sources. The results of our own research on the protective effect of aromatic compounds in the radiolysis of organic compounds and the radiolysis of aqueous solutions of graphene oxide are presented.

Keywords: Irradiation, radiolysis of polymers, protective effect, graphene oxide, radiation preservation of food.

Renesans energetyki jądrowej w naszym kraju powoduje, że ukazuje się wiele tekstów na temat bezpiecznego wykorzystania dla dobra społeczeństwa zjawisk, procesów i technik jądrowych, zwanych ogólnie atomistyką w zakresie przetwarzania energii, rozwoju przemysłu i rolnictwa, kosmonautyki, nauki oraz ochrony zdrowia, dóbr kultury i środowiska.

Jednak pisanie o atomistyce nie jest proste i wymaga zwykle wielu lat studiów oraz praktyki zawodowej [1, 2]. Łatwo jest nawet nieświadomie wypaczyć sens informacji, stosując nieadekwatne terminy. Przykładem jest słowo **napromieniowanie**, czyli traktowanie materii promieniowaniem jonizującym. Pochodzi ono od pojęcia promieniotwórczości, które do nauki wprowadziła Maria Skłodowska-Curie. W powszechnym użyciu jest również krótszy termin – **napromienienie**. Znajduje się on w słowniku języka polskiego, można go stosować, chociaż jest mniej

elegancki, bo musiałby się wywodzić od „promienienia”. Analogicznie specjalistę w dziedzinie polimerów można poznać po tym, że rzadko używa zwrotu tworzywa sztuczne. W odróżnieniu od języka niemieckiego, w którym *Kunststoffe* oznacza tworzywa polimerowe i sztukę, w Polsce sztuczność jest raczej przeciwieństwem sztuki i postrzegana jest zwykle jako gorszy substytut czegoś super naturalnego.

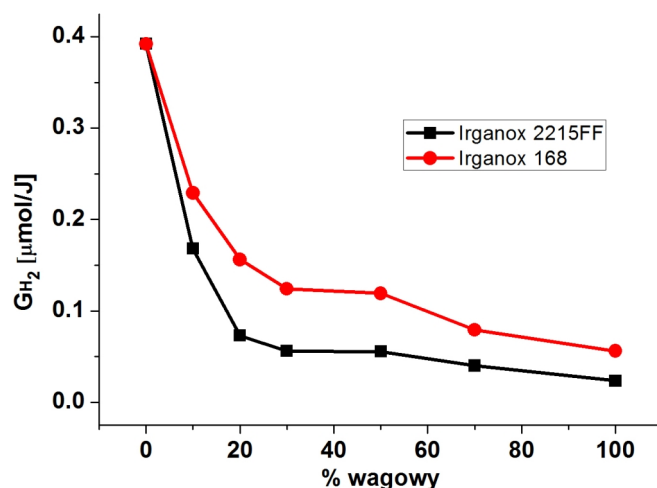
Niestety zamiennie z napromieniowaniem stosuje się również zwrot **naświetlanie**. Jest to powszechne wśród specjalistów z zakresu medycyny nuklearnej i radiologii. Mówi się również często o naświetlaniu neutronami, chociaż nie jest to promieniowanie elektromagnetyczne, ale korpuskularne. Naświetlanie to termin z fotochemii, nauki co prawda pokrewnej radiochemii i chemii radiacyjnej, ale rozwijanej oddzielnie. Nie jest to jedynie kwestia nomenklaturowa. Różnica między oddziaływaniem światła

i promieniowania jonizującego na materię jest zasadnicza. Światło w szczególności w zakresie widzialnym i UV jest pochłaniane w sposób selektywny przez grupy chromoforowe i dotyczy w przypadku materiałów nietransparentnych tylko powierzchni. Natomiast promieniowanie jonizujące nie ma możliwości wyboru i działa na wszystkie składniki proporcjonalnie do ich udziałów procentowych (ściślej mówiąc wkładów elektronowych). Pochłanianie jest w objętości materii głównie przez składnik dominujący, czyli matrycę. Na przykład niewielkie (rzędu 1%) ilości fotostabilizatorów wystarczają do skutecznego zabezpieczenia tworzywa polimerowego przed działaniem światła. Te same ilości dodatku są dla promieniowania jonizującego praktycznie niewidzialne. Co prawda antyoksydanty i fotostabilizatory to w większości związki aromatyczne i z tego powodu mogą działać ochronnie w radiolizie polimerów, ale poprzez przeniesienia energii, ładunku lub wolnego rodnika. Energia z przypadkowo powstałego w matrycy gniazda jonizacji transportowana jest do aromatycznych dodatków, na których jest rozpraszana najczęściej w formie ciepła.

Działanie antyoksydantów badane jest również w innych dziedzinach, np. medycynie, kosmetologii lub diecie. Zakłada się ogólnie, że wolne rodniki są zmiatane w wyniku reakcji z antyutleniaczami. Doświadczenia z zakresu chemii radiacyjnej polimerów pokazują jednak, że działanie ochronne może zachodzić już na pierwotnym, jonowym etapie [3]. Inaczej mówiąc, związek ochronny raczej zapobiega powstawaniu rodników, niż powoduje ich zmniejszenie. Taki mechanizm, w odróżnieniu od przeniesienia rodnika, nie wymaga konformacyjnych zmian łańcucha polimerowego. Dowodem na to są charakterystyczne nieliniowe zależności wydajności radiolitycznego wodoru w funkcji zawartości antyoksydantów w tworzywach. Oderwanie atomu wodoru od łańcucha polimeru związane jest z wytworzeniem wolnego rodnika. Tak więc, podwojona wartość G_{H_2} daje pogląd o ich liczbie. Gdyby zjawiska ochronne powodowane były wyłącznie reakcjami wolnorodnikowymi, to wykresy byłyby prostoliniowe. Atomy wodoru odrywane byłyby w podobnej liczbie niezależnie od zawartości antyutleniacza. Odstępstwo od addytywności jest miarą efektu ochronnego.

Podstawowe przemiany zachodzące w skomplikowanych organizmach żywych łatwiej badać na prostych polimerach syntetycznych. Jako przykład opisany został wpływ dwóch popularnych antyoksydantów typu Irganox na radiolizę pierwotnego polipropylenu (PP). Polimer pobrano bezpośrednio z linii technologicznej przed dodaniem standardowych stabilizatorów, bez których byłby bezużyteczny. Już niewielkie ilości związku aromatycznego obniżały wydajność wodoru kilkukrotnie (rys. 1).

Nieco inaczej zachodzi radioliza w fazie ciekłej. Gdybyśmy wyobrazili sobie barwnik lub farmaceutyk rozpuszczony w wodzie, to może on ulegać przemianom chemicznym, ale nie w wyniku bezpośredniego trafienia gniazdem jonizacji, lecz w efekcie reakcji z produktami radiolizy



Rys. 1. Zależność radiolitycznie odrywanego wodoru od PP w funkcji zawartości antyoksydantów. Obróbkę radiacyjną prowadzono za pomocą promieniowania gamma dla dawek: 10, 15, 25, 30, 50 kGy. Na wykresie podano wartości średnie G_{H_2} .

Fig. 1. Dependence of radiolytically abstracted hydrogen from PP as a function of antioxidant content. Radiation treatment was carried out using gamma radiation at doses of 10, 15, 25, 30, and 50 kGy. The graph shows the average G_{H_2} values.

matrycy (H_2O), czyli: rodnikami hydroksylowym (OH), hydroperoksylowym (OOH) oraz uwodnionym elektronem (e^-_q). Paradoksalnie więc wydajność takich przemian może maleć ze zwiększeniem stężenia substratu. Zmniejsza się bowiem w tym przypadku zawartość matrycy, a więc i liczba indywidualów, które decydują o wydajności reakcji.

Na przykład roztwór wodny formy utlenionej grafenu można radiacyjnie zredukować do grafenu uwodnionym elektronem (zmiana barwy roztworu z przezroczystego na żółty lub czarny). Aby reakcja mogła zajść, musimy zmieść powstający równoległe z elektronem rodnik hydroksylowy (utleniacz) np. za pomocą bisfenolu lub konserwantów obecnych w popularnych napojach (fot. 1). Można w ten oryginalny sposób ocenić właściwości antyoksydacyjne wybranych wyrobów spożywczych.



Fot. 1. Czarna zawiesina grafenu w wodzie po redukcji roztworu GO w źródle promieniowania gamma Gammacell 5000 (antyutleniacze: bisfenol i dodatek piwa Kasztelan) (źródło: IChTJ).

Photo 1. Black graphene suspension in water after reduction of GO solution in the Gammacell 5000 gamma radiation source (antioxidants: bisphenol and Kasztelan beer additive) (source: IChTJ).

Zupełnym nieporozumieniem jest natomiast zamienne używanie **napromieniowania** i **promieniotwórczości**, w szczególności w informacjach prasowych, radiowych, telewizyjnych, internetowych oraz książkach, grach komputerowych i tłumaczeniach filmów. Na wstępie zwykle podaje się wielkość aktywności promieniotwórczej np. herbaty na poziomie 1100 Bq/kg z komentarzem, że „napromieniowana” herbata dwa razy przekracza normę. Jeszcze dalej tłumaczy się, co to jest „promieniowanie radioaktywne”. Pomijam fakt, że każdy z nas jest również źródłem promieniowania jonizującego (głównie od ^{40}K – $^-$, $^+$, wychwyty K) na poziomie 62 Bq/kg. Tak więc osoba, która pisała o „napromieniowaniu” herbaty, sama była źródłem promieniowania około 4000 Bq i ewentualne kilka gramów herbaty na pewno by jej nie zaszkodziło. Innym przykładem jest komunikat o zatrzymaniu na granicy przez dozometryczną bramkę „napromieniowanego” banknotu. Oczywiście nie był on napromieniowany, ale zabrudzony radionuklidem. Natomiast banknoty lub inne dokumenty można w czasie pandemii wyjaławiać radiacyjnie np. wiązką elektronów. Po takim zabiegu będą bezpieczne bakteriologicznie i radiologicznie.

Prawdziwy problem polega jednak na tym, że promieniowanie jonizujące jest komercyjnie stosowane do utrwalania: ziół, przypraw ziołowych, suszonych grzybów, żywności, fitofarmaceutyków i suplementów diety. Obróbka radiacyjna wiązką elektronów, promieniowaniami gamma lub hamowaniami nie wzbudza oczywiście promieniotwórczości. Teoretycznie jest to możliwe w wyniku reakcji fotojądrowych, ale musiano by użyć bardzo wysokich energii promieniowania elektromagnetycznego. Paradoksalnie ten przypadek nie dotyczy źródeł kobaltowych i cezowych, w których energie promieniowania gamma są o rząd wielkości mniejsze od progu aktywacji. Formalnie promieniowanie gamma emitowane jest przez produkty rozpadu ^{60}Co i ^{137}Cs , czyli ^{60}Ni – 1,17 i 1,133 keV oraz ^{137}Ba – 662 keV. Można natomiast liczyć się z powstaniem niewielkiej liczby kwantów wysokoenergetycznego promieniowania hamowania w technikach akceleratorowych. Jednak przy energii elektronów na poziomie kilkunastu MeV wydajność konwersji jest niewielka, a liczba kwantów o maksymalnej energii elektronów jeszcze mniejsza (tab. 1).

Dodatkowo powstające radionuklidy są krótkożyciowe. Przez wiele lat do sterylizacji z powodzeniem stosowano wiązki elektronów o energii 13 MeV. Jednak, aby zapobiec wszelkim dyskusjom dotyczącym głównie radiacyjnej konserwacji żywności, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej zaleca ograniczenie energii przemysłowych akceleratorów do 10 MeV.

Warto wyjaśnić, że konserwacja wybranych rodzajów produktów spożywczych za pomocą promieniowania jonizującego jest legalna i posiada akceptację Głównego Inspektora Sanitarnego. Jedyne warunki jest oznaczenie na opakowaniu sposobu utrwalania. Z tym niestety jest problem. Producenci obawiają się, że konsumenci będą mylić napromieniowanie z promieniotwórczością i nie chcą umieszczać informacji o napromieniowaniu. Aby uniknąć kłopotów, zastępują obecnie techniki radiacyjne tradycyjną obróbką termiczną (dwa razy para wodna 120°C) lub chemiczną.

W literaturze można spotkać używaną dawniej jednostkę dawki pochłoniętej promieniowania jonizującego – Rad. Nie ma ona jednak związku z nazwą pierwiastka (Ra) a jest skrótem od angielskiego *radiation absorbed dose*.

Unikatowość radiacyjnej higienizacji polega na tym, że nie powoduje praktycznie zmian organoleptycznych w żywności. Energia promieniowania jonizującego jest odkładana w sposób niehomogeniczny w stosunkowo nielicznych tzw. gniazdach jonizacji. Zakładając średnią wartość energii jonizacji na poziomie 35 eV, jedno gniazdo jonizacji przypadnie na 3000 makromolekuł o liczbie masowej 1000. Tak więc zmiany, podkreślam jedynie chemiczne, dotyczą ilości materiału na poziomie promila. Natomiast konserwacja wodną parą działa na cały produkt, dając w pewnym sensie wyrób trzeciego parzenia. Podsumowując, nomenklaturowe nieporozumienia spowodowały, że na rynku są gorszej jakości wyroby, a techniki radiacyjnej konserwacji stosuje się jedynie w wojsku, kosmonautyce lub medycynie.

W kraju działają cztery laboratoria identyfikacji napromieniowania żywności. Nazwa „napromieniowania” nie jest przypadkowa, bowiem nie ściga się „napromieniowanej” żywności, lecz jedynie brak informacji o obróbce radiacyjnej. Nawiasem mówiąc, tak stosunkowo skompli-

Tabela 1. Progi energetyczne dla reakcji fotojądrowych dla wybranych pierwiastków.

Table 1. Energy thresholds for photonuclear reactions for selected elements.

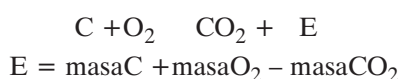
Reakcja fotojądrowa	Próg energetyczny	Okres półrozpadu	Rodzaj promieniowania
$^2\text{D}(\gamma, n)^1\text{H}$	2,22 MeV	stabilny	
$^9\text{Be}(\gamma, n)2\ ^4\text{He}$	1,67 MeV	stabilny	
$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$	10,2 MeV	12 godzin	$^+$ (61%), $^-$ (39%)
$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$	10,9 MeV	10 minut	$^+$
$^{64}\text{Zn}(\gamma, n)^{63}\text{Zn}$	13,8 MeV	9 minut	$^+$
$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	16,3 MeV	2,1 minuty	$^+$
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	18,7 MeV	21 minut	$^+$

kowane analityczne metody identyfikacji napromieniania są rozwijane w instytucjach zajmujących się radiacyjną konserwacją żywności. Uważa się, że gdyby nie było wiarygodnych sposobów wykrycia napromieniania, radiacyjne techniki mogłyby być zupełnie zakazane.

Mówiąc o terminologii, warto wspomnieć o wymienionej już w tekście **radiolizie**. Maria Skłodowska-Curie i Piotr Curie opublikowali w roku 1899 artykuł, w którym opisali: wydzielanie się produktów gazowych z wodnych roztworów pierwiastków promieniotwórczych, utlenianie tlenu do ozonu, zmianę barwy szkła i ceramiki oraz żółknięcie i kruszenie się papieru [4]. Była to pierwsza praca z zakresu chemii radiacyjnej. Głównym produktem gazowym był wodór, a więc drugim musiał być tlen. Zjawisko to przez analogię do elektrolizy Skłodowska nazwała radiolizą. M. Kernbaum udowodnił, że tlen jako produkt działania promieniowania na wodę pozostaje w niej w formie H_2O_2 [5]. Ostatecznie termin przyjął się jednak w nauce i oznacza obecnie ogół procesów chemicznych wywołanych działaniem promieniowania na materię. Oczywiście nie ma on nic wspólnego z elektrolizą. Późniejsze badania pokazały, że ilość energii odłożona w gniazdach jonizacji jest tak duża, że pierwotne zjawiska radiolizy można raczej przyrównać do gorącej plazmy niż elektrolizy. To że radiacyjne procesy są średnio niskotemperaturowe, wynika ze stosunkowo niewielkiej liczby gniazd jonizacji [6, 7, 8].

Jak wiadomo, Maria Skłodowska-Curie wyjaśniła istotę zjawiska naturalnej promieniotwórczości i przy okazji odkryła dwa pierwiastki: polon i rad. Zawdzięczamy jej również dostarczenie nauce rewolucyjnego, jak na tamte czasy, analitycznego narzędzia poznania mikroświata, jakim było promieniowanie alfa. W eksperymencie ze złotą folią Ernest Rutherford wykazał, że są to jądra atomu helu. Z ich pomocą zbadano strukturę budowy atomu. O tym, że praktycznie cała masa atomu skupiona jest centralnie w stosunkowo małej objętości, Ernest Rutherford poinformował w roku 1911. Tak więc Maria Skłodowska-Curie dokonała największych swoich odkryć, nie znając budowy atomu.

Początkowo nie było znane pojęcie jądra atomowego, a więc badania dotyczyły ogólnie atomistyki. Współcześnie, obok klasycznej chemii, studiować można również chemię jądrową i radiacyjną. Często mówiąc o **energetyce jądrowej**, zamiennie stosuje się termin **energetyka atomowa**. Mamy Państwową Agencję Atomistyki, Międzynarodową Agencję Energii Atomowej, Polski Atom itd. Jednak formalnie to elektrownie opalane np. węglem można również nazwać atomowymi. Energia przetwarzana jest w nich w wyniku reakcji między atomami i cząsteczkami. Co więcej, należy pamiętać, że równanie Einsteina ($E = mc^2$) ma charakter uniwersalny i nie dotyczy oczywiście tylko reakcji jądrowych.



Do obliczeń można przykładowo wykorzystać Elektrownię Bełchatów, która przetwarza 28 TWh ($10^{17}J$) energii rocznie, spalając węgiel brunatny. Celowo piszę o przetwarzaniu energii, której – jak wiadomo – nie jesteśmy w stanie podobnie jak materii wytworzyć. Jedyne, co możemy, to przetwarzać jedną formę energii w inną. Oczywiście powszechnie mówi się o produkcji energii, ale praktycznie jest to niemożliwe. Obowiązuje zasada zachowania energii, zgodnie z którą jest ona *constans*. Można ewentualnie mówić o wytworzeniu konkretnej formy energii, np. energii elektrycznej. Podobnie przenosi się mówienie o odnawialnej energii. Nie można jej wytworzyć, a więc i odnowić. Jest to uproszczenie, które w gruncie rzeczy mówi jedynie o wykorzystaniu energii słonecznej, a więc energii termojądrowej. Energia ta przetwarzana jest z niewielką zresztą wydajnością, ale w olbrzymiej skali w jądrze Słońca. Ciepło z wnętrza Słońca wędruje do korony około 30 milionów lat, a stamtąd już ekspresowo (8 minut 19 s) do naszej atmosfery. Tak na marginesie w Prawie atomowym zapisano granicę między promieniowaniem jonizującym i niejonizującym na poziomie 100 nm (nanometrów). Jest to maksymalna energia promieniowania UV, jaka dociera w widmie słonecznym do Ziemi. Promieniowanie to jest w całości pochłaniane przez atmosferę, która z punktu widzenia ochrony radiologicznej stanowi równoważność kilku metrów betonu. Pierwsze energie jonizacji całego szeregu pierwiastków są zresztą znacznie niższe od zapisanych w prawie (12,4 eV). Wybranie najniższej energii jonizacji francu byłoby jednak niepraktyczne. Reasumując, ewentualnego poparzenia słonecznego nie można zgłaszać jako wypadku radiacyjnego. Energię słoneczną wykorzystujemy natomiast w fotowoltaice, produkcji biopaliw, energetyce wiatrowej, wodnej oraz w postaci zgromadzonych w długim okresie paliw kopalnych. Warto jednak pamiętać, że została ona przetworzona w reakcjach termojądrowych i to w czasie, kiedy przodek człowieka chodził na czworakach. Wracając do elektrowni w Bełchatowie, np. jeżeli wartość przetwarzanej tam energii podzielimy przez kwadrat szybkości światła ($9 \cdot 10^{16} (m/s)^2$), to otrzymamy około 1,12 kg. O tyle masa powstałego dwutlenku węgla będzie mniejsza od sumy mas tlenu i węgla zużytych do spalania.



Rys. 2. Międzynarodowy znak oznaczający żywność konserwowaną radiacyjnie.

Fig. 2. International symbol for food preserved by radiation.



Fot. 2. Instalacja do konwersji wiązki elektronów na promieniowanie hamowania nowego akceleratora w Stacji Sterylizacji Radiacyjnej Wyrobów Medycznych i Przeszczepów w IChTJ (źródło: IChTJ).

Photo 2. Installation for converting electron beam to braking radiation of a new accelerator in the Radiation Sterilization Station for Medical Devices and Transplants at the Institute of Nuclear Chemistry and Nuclear Technology (source: IChTJ).

Autorzy tekstów i prezentacji na temat atomistyki niezależnie, czy dotyczą one radiochemii, czy chemii radiacyjnej, najczęściej wykorzystują symbole ostrzegające przed promieniowaniem jonizującym. Jeżeli mowa jest o radionuklidach lub źródłach promieniowania, to jest to uzasadnione. Natomiast w kontekście radiacyjnej sterylizacji, utrwalania żywności oraz modyfikacji polimerów sprawia wrażenie, że dotyczy to również napromieniowanego materiału. Jeżeli piszemy o produkcie modyfikowanym promieniowaniem jonizującym, to znacznie lepiej stosować w prezentacjach sympatyczny, zielony znak radury. Znak ten jest obowiązkowy w przypadku żywności konserwowanej radiacyjnie.

Jeszcze parę słów na temat promieniowań: X, rentgenowskich i hamowania. Termin X Rentgen zaproponował, gdy nie wiedział jeszcze, z czym ma do czynienia. Współcześnie wiemy, że ma ono dwie składowe. Pierwsza, o charakterze subtelnym, związana jest z przeskokiem elektronu z wyższego stanu energetycznego. Zjawisko to stosuje się np. we fluorescencji rentgenowskiej do identyfikacji pierwiastkowej. Druga składowa jest wynikiem hamowania elektronów na jądrach atomów i nazywana jest promieniowaniem hamowania. Ten rodzaj promieniowania jest obecnie komercyjnie stosowany (fot. 2) do modyfikacji materiałów (np. sterylizacji radiacyjnej). Promieniowanie hamowania ma większą energię niż promieniowanie od wzbudzonych jąder ^{59}Ni (produkt beta rozpadu ^{60}Co).

Aby uniknąć nieporozumień, proponuje się pierwszy rodzaj promieniowania nazywać rentgenowskim, a drugi hamowania. Na koniec polecam odwiedzenie Muzeum Lamp Rentgenowskich w Opolu. Znajduje się tam replika

miniaturowej lampy do fluorescencji rentgenowskiej, wyprodukowana przez amerykańską firmę Moxtek, która wylądowała w łaziku Perseverance na Marsie.

Notka o autorze

dr inż. Wojciech Głuszewski – adiunkt w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Chemik radiacyjny. Specjalista w zakresie technologii radiacyjnych i dozymetrii promieniowania jonizującego. Zajmuje się problematyką radiacyjnej modyfikacji tworzyw polimerowych, a także zagadnieniami wykorzystania technik jądrowych w identyfikacji i konserwacji obiektów o znaczeniu historycznym. Sekretarz Towarzystwa Marii Skłodowskiej-Curie w Hołdzie.

Literatura

1. Głuszewski W.: *Sprawdzian z wiedzy o nukleonice cz. I*, Przegląd Techniczny, 19/20, 2019, 22–27.
2. Głuszewski W.: *Sprawdzian z wiedzy o nukleonice – cz. II*, Przegląd Techniczny, 21, 2019, 23–24.
3. Głuszewski W.: *Zjawiska ochronne w chemii radiacyjnej polipropylenu*, Praca doktorska, 2008 r.
4. *Effets chimiques produits par les rayonnements de Becquerel*. M. et Mme P. CURIE. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CXXIX, p. 823 (20 novembre 1899).
5. Kernbaum M.: *Action chimique sur l'eau des rayons pénétrations du radium*, C. R. Acad. Sci. Paris, 1909, 148, 705, 149, 116: Le radium, 1909, 6, 126.
6. Curie M.: *Sur l'étude des courbes de probabilité relative à la localisation du radon X sur les bactéries*, Compte rendu, 1929, 198, 102.
7. Zagórski Z.P.: *Sterylicacja radiacyjna z elementami chemii radiacyjnej i badań radiacyjnych*, IChTJ, Warszawa 2007, s. 272.
8. Głuszewski W., Zagórski Z.P., Tran Q.K., Cortella L.: *Maria Skłodowska Curie – the precursor of radiation sterilization methods*. „Analytical and Bioanalytical Chemistry” 2011, 400, s. 1577–1582.