

PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE

Działanie promieniowania jonizującego na organizm ludzki

Wprowadzenie

Promieniowanie jonizujące to promieniowanie elektromagnetyczne (γ , X) lub cząstkowe (korpuskularne, np. α , β), które w czasie przenikania przez materię ma zdolność wytwarzania, bezpośrednio lub pośrednio, jonów (z wyłączeniem fotonów promieniowania ultrafioletowego). Pojęcie promieniowania wiąże się z wysyłaniem i przekazywaniem energii. Gdy więc mówi się, że ciało promieniuje, to znaczy, że wysyła (emituje) energię.

Źródłem promieniowania jonizującego mogą być:

– substancje (pierwiastki lub ich chemiczne związki), nazywane promieniotwórczymi lub radioaktywnymi, np. rad 226Ra,

– urządzenia, np. aparaty rentgenowskie.

Promieniotwórczość (radioaktywność) jest to zjawisko samorzutnego rozpadu jąder atomów niektórych izotopów, któremu towarzyszy wysyłanie promieniowania alfa, beta, gamma. Radioaktywne (promieniotwórcze) nuklidy często nazywane są radionuklidami. Jądro nowo powstałego pierwiastka może być stabilne lub również promieniotwórcze. W niektórych przypadkach tworzy się cały łańcuch radionuklidów, powstających jeden z drugiego (szereg promieniotwórczy). Cząstki alfa i beta oraz kwanty gamma są wyrzucane w czasie rozpadów z określoną energią, a rozkład tej energii jest nazywany widmem energetycznym. Promieniowanie rentgenowskie (X), podobnie jak promieniowanie gamma (γ), jest promieniowaniem elektromagnetycznym. Promieniowania te różnią się swoim pochodzeniem. Promieniowanie γ jest wytwarzane przez wzbudzone jądra atomów, natomiast promieniowanie rentgenowskie powstaje poza jądrem atomowym, w wyniku hamowania elektronów (promieniowanie hamowania).

Ważną cechą promieniowania jonizującego jest jego **przenikliwość**, czyli stopień pochłaniania go przez materię. Przenikliwość zależy m.in. od rodzaju promieniowania i jego energii. Rośnie wraz ze wzrostem energii. Zasięg promieniowania jonizującego w danym materiale określa grubość warstwy tego materiału, która całkowicie pochłania to promieniowanie.

Promieniowanie α (strumień szybko poruszających się jąder helu) jest bardzo mało przenikliwe. W powietrzu jego maksymalny zasięg nie przekracza kilku centymetrów (do 10 cm), a w tkance – ułamków milimetra. Z trudem przenika przez pojedynczą kartkę zwykłego papieru.

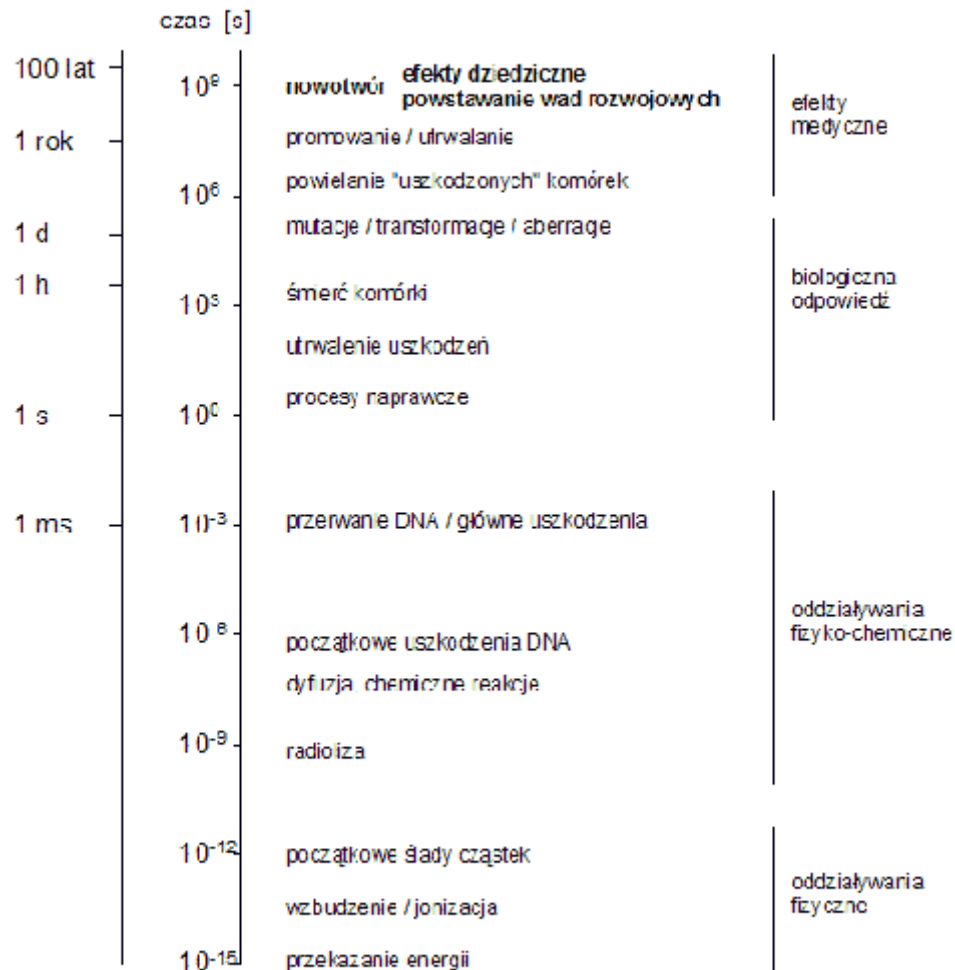
Promieniowanie β (strumień szybko poruszających się elektronów lub pozytonów), które składa się z cząstek mniejszych i mających mniejszy ładunek elektryczny niż cząstki α , wywołuje mniejszą jonizację, w związku z czym jego zasięg jest znacznie większy – w powietrzu blisko 60 razy większy niż promieniowania α o tej samej energii – może dochodzić nawet do kilku metrów. Promieniowanie to może również przenikać przez kilkumilimetrową osłonę metalową.

Promieniowanie γ lub X (promieniowanie elektromagnetyczne) jest bardzo przenikliwe i może przedostawać się nawet przez grube warstwy betonu czy stali. Tak więc trudno jest określić jego zasięg w materii. Dlatego zazwyczaj podaje się grubość warstwy materii, jaka jest potrzebna aby osłabić np. dwukrotnie natężenie tego promieniowania (tzw. warstwa połówkowa).

Skutki działania promieniowania jonizującego na organizm człowieka

Początkiem zmian popromiennych w materiale biologicznym jest pochłonięcie przez żywą tkankę energii promieniowania, która między innymi powoduje jonizację lub wzbudzenia atomów i cząsteczek, wyzwalamy następnie łańcuch wtórnych reakcji biologicznych. Jonizacja i wzbudzenia atomów wchodzących w skład żywej materii stanowią pierwsze ogniwo łańcucha przemian prowadzących do biologicznego efektu działania promieniowania. Można wyróżnić, w skali czasu, kilka faz (stadiów),

następujących kolejno jedna po drugiej, oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm żywy, np. oddziaływania fizycznego, fizyko-chemicznego, odpowiedzi biologicznej, efektów medycznych (rys. 1).



źródło: UNSCEAR 2000

Rys.1. Fazy oddziaływania promieniowania jonizującego z materią żywą (źródło: UNSCEAR 2000)

Najbardziej wrażliwą na promieniowanie częścią komórki jest jej materiał genetyczny DNA. Uszkodzenia DNA, o ile nie zostaną bezbłędnie naprawione, mogą prowadzić do transformacji nowotworowej lub śmierci komórki.

Wpływ promieniowania na żywą tkankę zależy od wielu czynników i z tego względu ma bardzo skomplikowany charakter. Reakcja organizmu po napromienieniu jest przede wszystkim uwarunkowana dwoma parametrami, a mianowicie przenikalnością promieniowania oraz względną skutecznością biologiczną. Kolejne parametry to: wielkość dawki i jej natężenie, rodzaj ekspozycji (jednorazowa czy frakcjonowana, tj. rozłożona w czasie) oraz właściwości związane bezpośrednio z napromienionym obiektem, takie jak: obszar ciała poddany ekspozycji, wiek i płeć, wrażliwość osobnicza i gatunkowa, temperatura, czynności metabolizmu i równowaga hormonalna oraz nawodnienie i utlenienie napromienionego materiału biologicznego. Wrażliwość komórek na promieniowanie jest tym większa, im większa jest aktywność proliferacyjna i im mniejsze jest zróżnicowanie tkanki.

Napromieniowany organizm może nie wykazywać żadnych wykrywalnych objawów przez bardzo długi okres czasu po ekspozycji. Wiadomo, że skutki tego rodzaju napromieniowań mogą istnieć w formie utajonej i rozwijać się stopniowo. Mogą ujawniać się nawet po kilkudziesięciu latach.

Biologiczne następstwa działania promieniowania jonizującego dzieli się na dwie kategorie:

– **skutki deterministyczne** (niestochastyczne), czyli takie, których zarówno częstość, jak i stopień ciężkości ulegają wzrostowi wraz z dawką promieniowania. Można określić dla nich dawkę progową. Należą do nich np. wszystkie dobrze znane powikłania w radioterapii

– **skutki stochastyczne**, czyli te, których częstość występowania ulega jedynie zwiększeniu wraz ze wzrostem dawki. Są to zjawiska probabilistyczne. Nie istnieje dla nich dawka progowa. Należą do nich np. nowotwory złośliwe.

Tak więc, jedną z podstawowych cech odróżniających skutki stochastyczne od niestochastycznych (deterministycznych) jest konieczność przekroczenia, w celu wywołania tych ostatnich, określonej dawki, zwanej dawką progową. W odniesieniu do skutków stochastycznych nie postuluje się określonego progu dawki. Stąd zapobieganie następstwom niestochastycznym jest stosunkowo proste, gdyż dawki progowe dla następstw o istotnym znaczeniu patofizjologicznym są duże, rzędu od kilku do kilkudziesięciu Gy (grejów), zwłaszcza przy małej mocy dawki lub jej frakcjonowaniu. Inaczej przedstawia się sprawa w odniesieniu do skutków stochastycznych. Brak progu oznacza, że każdej dawce, nawet bardzo małej, towarzyszy zwiększone prawdopodobieństwo indukcji zmian. W tym przypadku pojawienie się następstw ekspozycji na promieniowanie może być rozpatrywane wyłącznie w kategoriach probabilistycznych – oceny ryzyka.

Jedynym wiarygodnym sposobem uzyskania informacji o zależności między dawką promieniowania a ryzykiem wystąpienia nowotworu u człowieka, są obserwacje oraz badania epidemiologiczne grup ludzi poddanych i nie podanych działaniu promieniowania.

Jednocześnie należy podkreślić, iż nowotwory złośliwe wywołane przez promieniowanie jonizujące nie różnią się żadnymi cechami klinicznymi i morfologicznymi od tych, które obserwuje się w populacji nie poddanej ekspozycji na to promieniowanie. Nie udało się wykazać indukcji przez omawiany czynnik wielu nowotworów złośliwych (np. raka szyjki i trzonu macicy, gruczołu krokowego, chłoniaków złośliwych, przewlekłej białaczki limfatycznej). Wiadomo, że najkrótszy okres utajenia (latencji) dla białaczek nie przekracza ok. 2 lat, a dla raka (guzów litych) 5 – 10 lat. Przeciętny współczynnik ryzyka zgonu z powodu nowotworu złośliwego wywołanego przez promieniowanie jonizujące w wyniku ekspozycji zawodowej w wieku 18 – 65 lat wynosi ok. $4 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (tablica 1).

Tablica 1. Współczynniki ryzyka wystąpienia skutków stochastycznych

Narząd lub tkanka	Współczynnik ryzyka (10^{-2} Sv^{-1})	
	cała populacja	pracownicy
Pęcherz	0,29	0,24
Szpiak kostny	1,04	0,83
Powierzchnia kości	0,07	0,06
Piersi	0,36	0,29
Okreżnica	1,03	0,82
Wątroba	0,16	0,13
Płuca	0,80	0,64
Przełyk	0,24	0,19

Jajniki	0,15	0,12
Skóra	0,04	0,03
Żołądek	1,00	0,80
Tarczycza	0,15	0,12
Pozostałe	0,59	0,47
Razem	5,92	4,74
Ryzyko ciężkich uszkodzeń genetycznych		
Gonady	1,33	0,80
Razem – skutki stochastyczne	7,3	5,6

Ocena ryzyka zmian dziedzicznych, które u człowieka mogą być wywołane przez napromienienie komórek rozrodczych, prowadzące do powstania mutacji dominujących, recesywnych i dziedziczonych w związku z płcią, obecnie oparta jest wyłącznie na ekstrapolacji danych eksperymentalnych, uzyskanych z badań na zwierzętach. Ocenia się, że współczynnik ryzyka wywołania zmian dziedzicznych przez napromienienie jest w przybliżeniu o rząd wielkości mniejszy niż ryzyka wywołania nowotworów popromiennych (śmiertelnych i wyleczalnych) – $0,4 * 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

DAWKI GRANICZNE

osoby	Dawka skuteczna (efektywna) ⁽¹⁾ , [mSv]		Przy zachowaniu ograniczenia dla dawki skutecznej dodatkowe ograniczenie dla dawki równoważnej ⁽²⁾ (w ciągu roku kalendarzowego), [mSv]	
	w ciągu roku kalendarzowego	w ciągu roku kalendarzowego	dla soczewek oczu	dla skóry, jako średnia dla dowolnej powierzchni 1 cm ² napromienionej części skóry oraz dla dłoni, przedramion, stóp i podudzi
Pracownicy oraz osoby przyuczane do zawodu w wieku powyżej 18 lat	20	50 z ograniczeniem do 100 w ciągu kolejnych 5 lat	150	500
Osoby przyuczane do zawodu w wieku 16 – 18 lat	6	-	50	150
Osoby z „ogółu ludności” oraz osoby przyuczane do zawodu w wieku poniżej 16 lat	1	może nastąpić przekroczenie 1 mSv pod warunkiem, że średnia z kolejnych 5 lat nie przekroczy 5 mSv	15	50 wartość średnia określona dla 1 cm ² powierzchni skóry, brak limitu dla kończyn
Kobieta w ciąży Płód	Kobieta ciężarna nie może być zatrudniona w warunkach prowadzących do otrzymania przez płód dawki skutecznej przekraczającej 1 mSv. Karmiąca piersią nie może być narażona na skażenia wewnętrzne i zewnętrzne			

Źródło promieniowania jonizującego

Źródłem promieniowania jonizującego jest każde źródło promieniotwórcze (substancja promieniotwórcza) lub urządzenie wytwarzające promieniowanie jonizujące.

W przemyśle stosuje się przede wszystkim mierniki radioizotopowe służące do pomiarów różnych wielkości, do kontroli procesów produkcyjnych itp. Są to m.in. mierniki grubości materiału, jego gęstości, poziomu ciał stałych lub cieczy w zbiornikach, grubości pokrycia podłoża jakimś materiałem, mierniki stężenia kwasu, zapylenia powietrza itp. W tego typu urządzeniach stosuje się głównie źródła zamknięte promieniowania γ lub β i najczęściej wykorzystuje zjawisko pochłaniania promieniowania przy przejściu przez materię bądź zjawisko rozproszenia promieniowania.

RADIOGRAFIA PRZEMYSŁOWA

Bardzo popularną metodą badań „nieniszczących” jest **radiografia przemysłowa**. Wykorzystuje się w niej promieniowanie γ lub X do kontroli np. elementów spawanych. Oprócz przenikliwości i zależności pochłaniania promieniowania od grubości materiału wykorzystuje się tu jeszcze jedno zjawisko fizyczne, a mianowicie zaczernienie błony fotograficznej pod wpływem promieniowania. Badany element umieszcza się między źródłem promieniowania a detektorem z błoną fotograficzną. Jeżeli jest on jednorodny, promieniowanie pochłaniane jest w nim w jednakowym stopniu i błona zostanie równomiernie zaczerniona. Jeżeli jest niejednorodny promieniowanie jest pochłaniane w różnym stopniu i w różnym stopniu będzie zaczerniona błona fotograficzna. Aparaty używane w radiografii przemysłowej to, tzw. defektoskopy (obecnie, w przypadku używania promieni γ coraz częściej nazywane są aparatami gammagraficznymi).

Oprócz klasycznej radiografii stosowanej do wykrywania nieszczelności i wad w szczególnie istotnych elementach konstrukcyjnych (np. rurociągach), wykorzystującej promieniowanie γ i X, w ostatnich latach znaczenia nabierają specjalne metody radiograficzne: neutronografia przydatna do prześwietlania materiałów lekkich, radiografia protonowa, mikroradiografia (do badania bardzo małych przedmiotów) oraz radiografia dynamiczna.

TECHNIKI RADIACYJNE

Techniki radiacyjne stosowane są w różnych gałęziach przemysłu. Wykorzystuje się je do sterylizacji sprzętu medycznego jednorazowego użytku, modyfikacji polimerów, materiałów oraz przyrządów półprzewodnikowych, do barwienia tkanin, szkła oraz sztucznych, a nawet naturalnych kamieni. Na świecie ilość produktów wytwarzanych lub modyfikowanych radiacyjnie sięga milionów ton rocznie i ciągle wzrasta. Zasada stosowania technik radiacyjnych polega na napromieniowaniu materiałów i gotowych wyrobów za pomocą wiązki elektronów lub promieniowania γ . Ciekawym przykładem wykorzystania tych technik są termokurczliwe rurki i taśmy, które doskonale sprawdzają się jako izolacja elektryczna. Znajdują one zastosowanie wszędzie tam, gdzie trzeba wykonać trwałe i szczelne połączenia elementów konstrukcyjnych, m.in. przy montażu połączeń rur wentylacyjnych, przewodów, kabli elektrycznych. Techniki radiacyjne wykorzystano także w technologii oczyszczania gazów odlotowych z instalacji spalających m.in. węgiel. Napromieniowanie gazów wiązką elektronów powoduje zredukowanie emisji dwutlenku siarki (SO₂) o 95%, a tlenków azotu (NO_x) o 80%. Technologię tą zastosowano w pierwszej pilotowej stacji w elektrowni Kawęczyn, położonej w pobliżu Warszawy. Jest to wielce obiecujące przedsięwzięcie w zakresie ochrony środowiska.

METODY ZNACZNIKÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Metody znaczników promieniotwórczych znalazły największe zastosowanie do badań obiektów oraz substancji w różnych stanach skupienia. Polegają one, najogólniej mówiąc, na dodaniu radioizotopu do materiałów przesyłanych na odległość, poddawanych procesowi mieszania lub zmieniających podczas obróbki technologicznej stan skupienia (odparowanie, rozpuszczanie, itp). Pozwala to na śledzenie zmian intensywności promieniowania w różnych miejscach przepływu lub przesuwania się badanego materiału.

Ponieważ podczas badań używa się znikomych ilości izotopu o małej aktywności, to wprowadzenie go nie zaburza badanych procesów. Za pomocą metod znacznikowych można ustalić przepływ materiałów, określić ich prędkość, tor poruszania, dyspersję (niejednorodność). Można przeprowadzić również badania procesów mieszania i rozdzielania składników oraz ich faz. Metody te znalazły zastosowanie w produkcji szkła, w przemyśle papierniczym, chemicznym i metalurgicznym. Znaczniki promieniotwórcze stosuje się również do badania stopnia zużycia materiałów, narzędzi, śledzenia procesów korozyjnych, badania smarów, a także lokalizacji i pomiarów nieszczelności zbiorników i rurociągów.

ANALIZA AKTYWACYJNA

Jedną z ważniejszych metod wykorzystujących promieniowanie jonizujące, jest tzw. **analiza aktywacyjna** czyli jądrowa analiza składu materiałów. Za pomocą tej metody można określić lub wykryć zanieczyszczenia w półprzewodnikach, luminoforach i innych materiałach o wysokiej czystości. Można również, stosując analizę aktywacyjną, określić np. ilościową zawartość metali ciężkich w odpadach (np. popiołach), azotu w ziarnach, nawozach sztucznych itp. Jej niewątpliwą zaletą jest możliwość oznaczania jednocześnie wielu pierwiastków. Metoda ta polega, jak sama jej nazwa mówi, na zjawisku aktywacji, najczęściej neutronowej. Badaną próbkę materiału naświetla się strumieniem neutronów z reaktora lub pochodzących z innego źródła (np. rad-beryl), i w ten sposób staje się ona promieniotwórcza. Ilość powstałego izotopu promieniotwórczego jest w danych warunkach aktywacji proporcjonalna do ilości trwałego izotopu „macierzystego”. Pozwala to wykryć i oznaczyć jego znikome ilości w badanej próbce. Bada się (za pomocą specjalnego urządzenia zwanego spektrometrem β lub γ) widmo energetyczne otrzymanego izotopu promieniotwórczego określając w ten sposób, jaki rodzaj promieniowania wysyła i o jakiej energii. Znane są widma energetyczne poszczególnych izotopów. Analizując widmo badanej próby można ustalić, jakie izotopy, a więc jakie pierwiastki wchodzi w jej skład i w jakich ilościach.

DIADNOSTYKA MEDYCZNA I RADIOTERAPIA

Wykorzystywanie technik radiologicznych i radioizotopowych w **diagnostyce medycznej oraz w radioterapii** (badania rentgenowskie, tomografia komputerowa, medycyna nuklearna, radioterapia itp.) jest niewątpliwie wielkim sukcesem nauki. Umożliwiają one bowiem wykrycie nieprawidłowej budowy lub czynności badanego narządu. Uzyskane wyniki badań są niejednokrotnie decydujące w ustaleniu właściwego rozpoznania choroby. Zastosowanie tych metod w radioterapii w zwalczaniu nowotworów ma często decydujące znaczenie dla życia pacjentów.

INNE ZASTOSOWANIA

W przemyśle spożywczym i farmaceutycznym stosuje się urządzenia radiacyjne do **konserwowania żywności i sterylizacji** narzędzi lekarskich, strzykawek i materiałów opatrunkowych poprzez napromienienie ich bardzo dużymi dawkami. Jako źródło promieniowania stosuje się przede wszystkim kobalt ^{60}Co

o aktywności rzędu dziesiątków tysięcy TBq, a stosowane dawki są na ogół rzędu kilkudziesięciu kGy (kilogreji), lub akceleratory elektronowe.

W **badaniach geologicznych** korzysta się ze źródeł neutronów przy poszukiwaniu złóż minerałów, jak również do pomiaru wilgotności (lub gęstości) gruntu.

Własności jonizacyjne promieniowania wykorzystuje się także w tzw. **eliminacjach ładunku elektrycznego**. W produkcji papieru, folii, tkanin, filmów fotograficznych, a więc wszędzie tam, gdzie materiał nie przewodzący przesuwa się i ociera o różne elementy maszyn, występuje zjawisko wytwarzania ładunków elektrycznych, które jest następstwem tarcia. Nagromadzenie dużego ładunku może być przyczyną bardzo poważnego zagrożenia pożarowego i wybuchowego w procesach technologicznych, w których operuje się substancjami łatwopalnymi i wybuchowymi. Można temu zapobiegać wywołując silną jonizację powietrza

w pobliżu naładowanego materiału, właśnie za pomocą promieniowania o dużej zdolności jonizacji.

W **czujkach dymu**, urządzeniach stosowanych do wykrywania i sygnalizacji wystąpienia pożaru, także powszechnie używane są źródła promieniotwórcze (Am-241, Pu-239).

Właściwości rozpadu promieniotwórczego wykorzystywane są również jako **miara czasu**. Do określania wieku znaleziska można wykorzystać różne radioizotopy, chociaż najpopularniejsza jest metoda węglowa, polegająca na określaniu zawartości promieniotwórczego węgla ^{14}C w szczątkach organizmów i stąd wnioskowanie o ich wieku.

Zastosowania promieniowania jonizującego, energii jądrowej **o charakterze czysto naukowo-badawczym** mają obecnie miejsce głównie w naukach fizycznych, chemicznych i biologicznych.

Podsumowując, należy stwierdzić, że nie sposób szczegółowo wymienić wszystkich zastosowań promieniowania jonizującego. Jest ono m.in. wykorzystywane w rolnictwie, w konserwacji żywności, poszukiwaniu źródeł wody, diagnostyce i terapii medycznej, sterylizacji sprzętu medycznego, a także w wykrywaniu i usuwaniu zanieczyszczeń środowiska naturalnego. Promieniowanie to wykorzystuje się również do zmiany struktury chemicznej materiałów, konstruowania niezwykle czułych detektorów (czujek) dymu, a także badania skażenia rzek, zbiorników wodnych i wód gruntowych. Techniki jądrowe (radioizotopowe) znalazły zastosowanie w górnictwie, geologii, archeologii. Pozwalają one m.in. precyzyjnie określić wiek badanych skał czy minerałów, a także szczątków żywych organizmów.

Kategorie narażenia zawodowego

Pracownicy zatrudnieni w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące zostali zaszeregowani do dwóch kategorii: „A” i „B”, ze względu na stopień narażenia (art. 17 Prawa Atomowego), a miejsca pracy podzielono na tereny kontrolowane i tereny nadzorowane (art. 18).

Kategoria A obejmuje pracowników, którzy mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 6 mSv (milisiwertów) w ciągu roku lub na dawkę równoważną, przekraczającą trzy dziesiąte wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn.

Kategoria B obejmuje pracowników, którzy mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 1 mSv w ciągu roku lub na dawkę równoważną, równą jedną dziesiątą wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn.

Pracownicy są zaliczani do kategorii A lub B przez kierownika jednostki organizacyjnej, w zależności od przewidywanego poziomu narażenia.

W celu dostosowania działań i środków ochrony radiologicznej pracowników do wielkości i rodzajów zagrożeń wprowadzono podział lokalizacji miejsc pracy na:

- **tereny kontrolowane**, na których istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii A, istnieje możliwość rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych lub mogą występować duże zmiany mocy dawki promieniowania jonizującego,
- **tereny nadzorowane**, na których istnieje możliwość otrzymania dawek określonych dla pracowników kategorii B i które nie zostały zaliczone do terenów kontrolowanych.

Podstawowe wymagania dotyczące terenów kontrolowanych i nadzorowanych, w tym sposób oznakowania, warunki dostępu i opuszczania tych terenów dla pracowników i innych osób oraz wykonywania pomiarów dozymetrycznych zostały określone w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 20 lutego 2007 r. w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych (Dz.U. 2007 nr 131 poz. 910).

Ocena narażenia pracowników powinna być prowadzona na podstawie kontrolnych pomiarów dawek indywidualnych lub pomiarów dozymetrycz-

nych w środowisku pracy.

Pracownicy kategorii A podlegają ocenie narażenia prowadzonej na podstawie **systematycznych pomiarów dawek indywidualnych**, a jeżeli mogą być narażeni na skażenia wewnętrzne, mające wpływ na poziom dawki skutecznej dla tej kategorii pracowników, podlegają również pomiarom skażeń wewnętrznych.

W przypadku gdy pomiar dawki indywidualnej jest niemożliwy lub niewystarczający, ocena dawki indywidualnej otrzymanej przez pracownika kategorii A może być dokonana na podstawie wyników pomiarów dawek indywidualnych przeprowadzonych dla innych narażonych pracowników tej kategorii albo na podstawie wyników pomiarów dozymetrycznych w środowisku pracy.

Pracownicy kategorii B podlegają ocenie narażenia prowadzonej na podstawie **pomiarów dozymetrycznych w środowisku pracy** w sposób umożliwiający stwierdzenie prawidłowości zaliczenia ich do tej kategorii. Zezwolenie może zawierać warunek prowadzenia oceny narażenia pracowników kategorii B, wykonujących prace określone w tym zezwoleniu, na podstawie pomiarów dawek indywidualnych.

Ocena ryzyka zawodowego

Proces oceny ryzyka wynikający z zawodowego narażenia na promieniowanie jonizujące, oparty na systemie ochrony radiologicznej określającym dopuszczalne warunki ekspozycji na stanowiskach pracy, powinien m.in. obejmować:

a) Identyfikację źródeł

Identyfikację źródła promieniowania jonizującego przeprowadza się na podstawie dokumentacji technicznej urządzenia zawierającego źródła promieniotwórcze lub wytwarzającego promieniowanie jonizujące oraz na podstawie danych określonych w udzielonym zezwoleniu na jego stosowanie. Przegląd powinien także dotyczyć prowadzenia ewidencji i kontroli posiadanych źródeł promieniotwórczych.

b) Analizę warunków pracy – stanowisko pracy, pomieszczenie

Powinna być przeprowadzona ocena spełniania wymagań technicznych i wymagań ochrony radiologicznej dotyczących pracowni stosujących źródła promieniowania jonizującego i warunków użycia tych źródeł.

c) Warunki ekspozycji

Przeprowadzona analiza powinna dotyczyć wykonywanych czynności oraz określonych procedur i zasad pracy ze źródłami promieniowania jonizującego, mającymi wpływ na wielkość ekspozycji. Należy określić jaki był rodzaj promieniowania. Czy ekspozycja była ciągła (w czasie zmiany roboczej), czy sporadyczna, frakcjonowana, o stałym, czy zmiennym poziomie narażenia. Czy istniała możliwość skażeń promieniotwórczych zewnętrznych i wewnętrznych.

d) Personel i wyposażenie

Należy określić liczbę osób narażonych na promieniowanie. Czy byli to pracownicy czy uczniowie, praktykanci, studenci, kobiety w ciąży lub karmiące piersią. Czy były to osoby pełnoletnie, czy młodociani. Zostali objęci opieką medyczną – nie stwierdzono przeciwwskazań do zatrudnienia w narażeniu na promieniowanie jonizujące – zdolni do pracy; zdolni do pracy pod pewnymi warunkami. Przeszli odpowiednie szkolenie z zakresu ochrony radiologicznej. Czy stosowano środki ochrony indywidualnej.

e) Pomiary; poziom ekspozycji

Pracownicy podlegają obowiązkowi prowadzenia systematycznej oceny poziomu narażenia na promieniowanie jonizujące. Należy określić częstotliwość i rodzaj prowadzonej dozymetrii. Czy była to dozymetria indywidualna, czy pomiary dozymetryczne w środowisku pracy. Posiadany przez zakład sprzęt dozymetryczny. Wielkości pomierzonych dawek skutecznych (efektywnych) i dawek równoważnych.

f) Szacowanie ryzyka zawodowego

Przy tworzeniu niniejszej propozycji szacowania ryzyka zawodowego w doniesieniu do promieniowania jonizującego uwzględniono potencjalne ryzyko zawodowe związane z zagrożeniem (zagrożenie (narażenie potencjalne) – narażenie, które może nastąpić, przy czym prawdopodobieństwo jego wystąpienia i wielkość mogą być zawczasu oszacowane) oraz z narażeniem (ekspozycją) (narażenie – proces, w którym organizm ludzki podlega działaniu promieniowania jonizującego) Tabela Nr 4 i Nr 5. Zastosowano cztero- i trzystopniową skalę, zgodnie z założeniami norm PN-N-18001 i PN-N-18002. Wykorzystano również klasyfikację ekspozycji na promieniowanie jonizujące określoną w ustawie Prawo atomowe.

Tabela 4. Potencjalne ryzyko zawodowe związane z zagrożeniem* od urządzeń wywarzających promieniowanie jonizujące

Urządzenie wytwarzające promieniowanie jonizujące					
Parametry	Kategorie potencjalnego ryzyka zawodowego				
	1	2	3	4	
Urządzenie				
Energia Emax (kV)	≤ 30 keV	30 – 70 keV	70 – 200 keV	≥ 200 keV(**)	
Prąd Imax (mA)	≤ 5 mA	5 – 50 mA	50 – 100 mA	≥ 100 mA	
Blokada/Osłonność	Blokada + pełna osłonność	Pełna osłonność	Częściowa osłonność - Ogranicznik pola wiązki	Pełna dostępność pola wiązki	
Wartość	
...				Suma wartości ryzyka	...

Uwagi:

*) Zagrożenie (narażenie potencjalne) – narażenie, które może nastąpić, przy czym prawdopodobieństwo jego wystąpienia i wielkość mogą być zawczasu oszacowane.

***) np. akceleratory liniowe (telegammaterapia).

OSZCOWANIE POTENCJALNEGO RYZYKA ZAWODOWEGO

Dla każdego określonego parametru ryzyko może przyjmować odpowiednio wartości: dla parametrów z kolumny „0” wartość 0, z kolumny „1” wartość 1, z kolumny „2” wartość 2 i z kolumny „3” wartość 3. Całkowita wartość ryzyka (suma) może więc wynosić maksymalnie 9.

Oceniając potencjalne ryzyko zawodowe związane z narażeniem od urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące przyjmujemy następujące kryteria jego klasyfikacji:

- I. Wartość ryzyka od 0 do 2 - ryzyko bardzo małe,
- II. Wartość ryzyka > 2 do 4 - ryzyko małe,
- III. Wartość ryzyka > 4 do 6 - ryzyko średnie,
- IV. Wartość ryzyka > 6 do 9 - ryzyko duże.

Tabela 5. Potencjalne ryzyko zawodowe związane z zagrożeniem* od źródła promieniotwórczego

Źródło promieniotwórcze				
Parametry	Kategorie potencjalnego ryzyka zawodowego			
	1	2	3	4
Radionuklid (substancja promieniotwórcza)			
Chemiczna postać/forma			

Aktywność / grupa izotopów promieniotwórczych(**)	MBq	MBq + zamknięte źródła	MBq	MBq
1	> 0.1	0.1 – 1	1 – 1000	> 1000
2	> 1	1 – 10	10 – 10000	> 10000
3	> 10	10 – 100	100 – 100000	> 100000
4	> 100	100 – 1000	1000 – 1000000	> 1000000
Wykonywane czynności	Magazynowanie Diagnostyka lekarska	Bardzo proste czynności na mokro	Normalne czynności chemiczne	Skomplikowane czynności na mokro z prawdopodobieństwem rozlania i czynności na sucho z możliwością pylenia
Rodzaj promieniowania	γ	γ i/lub β	γ i/lub β i/lub α	n z/bez α β γ
Półokres rozpadu $T_{1/2}$	< 3 tyg.	≥ 3 tyg. < 6 mies.	≥ 6 mies. < 5 lat	≥ 5 lat
Maksymalna energia promieniowania E_{max}	< 100 keV	≥ 100 – 500 keV	≥ 500 – 1000 keV	≥ 1000 keV
Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej Γ ($cGy \cdot h^{-1} \cdot GBq^{-1} \cdot m^2$)	bez γ	< 5×10^{-3}	≥ 5×10^{-3} – 15×10^{-3}	≥ 15×10^{-3}
Maksymalny zasięg promieniowania β w powietrzu	- bez β	< 50 cm	≥ 50 cm – 4 m	≥ 4 m
Wartość
...			Suma wartość ryzyka	...

Uwagi:

***)** Zagrożenie (narażenie potencjalne) – narażenie, które może nastąpić, przy czym prawdopodobieństwo jego wystąpienia i wielkość mogą być z góry oszacowane.

****)** grupy izotopów promieniotwórczych określone w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz. U. 2006 nr 140, poz. 994).

W przypadku wykonywania prac z izotopami promieniotwórczymi z różnych grup izotopów kategorii potencjalnego ryzyka zawodowego określa się porównując aktywność obliczoną według wzoru:

$$A = A_1 + 0,1A_2 + 0,01A_3 + 0,001A_4$$

gdzie: A_1, A_2, A_3, A_4 - stosowana jednocześnie aktywność izotopów odpowiednio 1, 2, 3 lub 4 grupy izotopów z aktywności "1" grupy izotopów podaną w Tabeli 5.

Dla półokresu rozpadu $T_{1/2}$, maksymalnej energii promieniowania E_{max} , równoważnej wartości stałej ekspozycyjnej Γ , maksymalnego zasięgu promieniowania β w powietrzu przyjmujemy najwyższe kategorie potencjalnego ryzyka zawodowego wynikające z wartości określonych dla poszczególnych izotopów promieniotwórczych.

Źródło promieniotwórcze – substancja promieniotwórcza przygotowana do wykorzystania jej promieniowania jonizującego.

Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej Γ – jest to moc dawki pochłoniętej w odległości 1 m od nieosłoniętego źródła promieniowania γ przypadająca na 1 GBq aktywności.

OSZCZOWANIE POTENCJALNEGO RYZYKA ZAWODOWEGO

Dla każdego określonego parametru ryzyko może przyjmować odpowiednio wartości: dla parametrów z kolumny „0” wartość 0, z kolumny „1” wartość 1, z kolumny „2” wartość 2 i z kolumny „3” wartość 3. Całkowita wartość ryzyka (suma) może więc wynosić 21.

Oceniając potencjalne ryzyko zawodowe związane z narażeniem od urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące przyjmujemy następujące kryteria jego klasyfikacji:

- I. Wartość ryzyka od 0 do 7 - ryzyko bardzo małe,
- II. Wartość ryzyka > 7 do 14 - ryzyko małe,
- III. Wartość ryzyka > 14 do 18 - ryzyko średnie,
- IV. Wartość ryzyka > 18 do 21 - ryzyko duże.

Przyjęto następujące kryteria trzystopniowej oceny ryzyka dla ogółu pracowników:

- **Ekspozycyjne ryzyko duże**, występuje w przypadku przekroczenia warunków dopuszczalnej ekspozycji; przekroczenia dawek granicznych,
- **Ekspozycyjne ryzyko średnie**, gdy pracownicy otrzymują dawki z poziomu kategorii A – obejmującej pracowników, którzy mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 6 mSv (milisiewertów) w ciągu roku lub na dawkę równoważną, przekraczającą trzy dziesiąte wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn,
- **Ekspozycyjne ryzyko małe**, gdy pracownicy otrzymują dawki z poziomu kategorii B – obejmującej pracowników, którzy mogą być narażeni na dawkę skuteczną przekraczającą 1 mSv w ciągu roku lub na dawkę równoważną, równą jedną dziesiątą wartości dawek granicznych dla soczewek oczu, skóry i kończyn.

Należy podkreślić, iż przyjęcie nazewnictwa „ryzyko małe, średnie, duże” jest określeniem umownym i nie ma bezpośredniego przełożenia na ryzyko następstw zdrowotnych. Obowiązujące w ochronie radiologicznej limity dawek (dawki graniczne) ze względu na specyfikę tego rodzaju narażenia ustalone są na poziomie znikomego ryzyka zdrowotnego. Nawet przy przekroczeniu dawki skutecznej 50 mSv/rok, co jest dopuszczalne w sytuacjach związanych z usuwaniem skutków zdarzenia radiacyjnego, narażenie na dawki w granicach limitów ustalonych dla takich sytuacji w art. 20 ustawy Prawo Atomowe nie można klasyfikować jako niedopuszczalne ryzyko zdrowotne.

Pracowników należy poinformować o wynikach przeprowadzonego szacowania ryzyka zawodowego.

g) Działania korygujące i/lub zapobiegawcze

Kierownik jednostki organizacyjnej przeprowadza ocenę narażenia pracowników. Jeżeli z przeprowadzonej analizy wynika taka konieczność, ustala dla nich dalsze ograniczenia narażenia.

W przypadku stwierdzenia ryzyka dużego niezbędne jest podjęcie działań zmniejszających poziom ryzyka poprzez ograniczenie narażenia. W przypadku ryzyka średniego taką ewentualność należy rozważyć. Niezależnie od wielkości narażenia zawsze powinna być stosowana zasada ALARA (As Low As Reasonably Achievable) – przy rozsądnym uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych liczba narażonych pracowników i osób z ogółu ludności była jak najmniejsza, a otrzymywane przez nich dawki promieniowania

jonizującego były możliwie małe.

Powinno być przeprowadzone sprawdzenie skuteczności podjętych działań mających na celu redukcję otrzymywanych przez pracowników dawek.