

ĆWICZENIE 8

WYKRYWANIE SKAŻEŃ PROMIENIOTWÓRCZYCH, POMIAR DAWEK PROMIENIOWANIA, OSŁONY PRZED PROMIENIOWANIEM

CEL ĆWICZENIA

- Zapoznanie się z parametrami charakteryzującymi źródło promieniotwórcze z punktu widzenia ochrony radiologicznej
- Poznanie kryteriów doboru odpowiednich osłon izolujących przed promieniowaniem
- Zapoznanie się z zasadami działania urządzeń pomiarowych służących do wykrywania skażeń promieniotwórczych oraz określania dawek promieniowania

ZAGADNIENIA

- Charakterystyka źródeł promieniotwórczych z punktu widzenia ochrony radiologicznej
- Charakterystyka promieniowania α , β , γ
- Rodzaje dawek promieniowania jonizującego
- Osłony przed promieniowaniem, rodzaje osłon i dobór materiału izolującego

ŹRÓDŁO PROMIENIOTWÓRCZE

- Źródła promieniowania beta i gamma: ^{60}Co , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

APARATURA

- Miernik skażeń powierzchni i mocy dawki pochłoniętej RKP-1
- Radiometr RKP-2
- Miernik skażeń powierzchni – Contamat FHT 111 (Thermo Electron Corporation)
- Radiometr kieszonkowy FH 41 D1 firmy FAG (Niemcy, Thermo Electron Corp.)

Należy podkreślić, że w zależności od rodzaju i energii mierzonego promieniowania w przyrządach dozymetrycznych stosuje się różnego typu detektory. Rozróżnia się cztery najważniejsze grupy przyrządów dozymetrycznych:

- do pomiaru dawki
- do pomiarów mocy dawki
- do wykrycia skażeń promieniotwórczych
- do wykrywania skażeń i pomiaru dawek

Miernik skażeń powierzchni i mocy dawki pochłoniętej RKP-1 (Fot. 1)

Przeznaczony jest do pomiarów skażeń powierzchni substancjami beta, gamma promieniotwórczymi o energiach powyżej 0,5 MeV jak również do pomiarów mocy dawki promieniowania gamma. W mierniku tym jako detektor promieniowania zastosowano trzy cylindryczne liczniki G-M połączone równolegle. Zakres pomiarowy przyrządu podzielony jest na 5 podzakresów:

I-20 imp/s dla pomiarów skażeń i 2 $\mu\text{Gy/h}$ dla mocy dawki,

II-60 imp/s dla pomiarów skażeń i 6 $\mu\text{Gy/h}$ dla mocy dawki,

III-200 imp/s dla pomiarów skażeń i 20 $\mu\text{Gy/h}$ dla mocy dawki,

IV-600 imp/s dla pomiarów skażeń i 60 $\mu\text{Gy/h}$ dla mocy dawki,

V-2000 imp/s dla pomiarów skażeń i 200 $\mu\text{Gy/h}$ dla mocy dawki.

Radiometr RKP-2 (Fot. 2)

Jest przeznaczony do pomiaru skażeń powierzchni substancjami beta i alfa promieniotwórczymi (z użyciem zewnętrznej sondy SSA-1P z detektorem scyntylacyjnym ZnS/Ag na podłożu ze szkła organicznego), pomiaru mocy przestrzennego równoważnika dawki promieniowania X oraz gamma. Jako detektor promieniowania w radiometrze typu RKP-2 zastosowano trzy liczniki G-M. Przyrząd ten jest szczególnie przydatny do kontroli szczelności źródeł w izotopowych czujkach dymu, skażeń rąk, odzieży roboczej, powierzchni stołów w pracowniach radiometrycznych oraz w medycynie nuklearnej.



Fot. 1. Miernik RKP-1.



Fot. 2. Miernik RKP-2.

Miernik skażeń powierzchni – Contamat FHT 111 (Thermo Electron Corporation (dawniej Eberline)) (Fot. 3) izotopami α , β , γ . Zbudowany jest z detektora gazowego – licznik proporcjonalny o geometrii płaskiej wypełniony Xe (zamknięty) lub butanem (przepływowy).

Radiometr kieszonkowy FH 41 D1 firmy FAG (Niemcy, Thermo Electon Corp.) (Fot. 4) Przeznaczony jest głównie do pomiarów dawki promieniowania gamma o energii w zakresie od 82 keV do 2MeV. Zbudowany jest z licznika G-M. Dzięki małej masie i niewielkim wymiarom jest bardzo wygodny przy prowadzeniu pomiarów w terenie. Zakres pomiarowy radiometru kieszonkowego wynosi: $5\mu Sv - 9,99Sv$.



Fot. 3. Contamat FHT 111.



Fot. 4. Radiometr kieszonkowy FH 41 D1.

WSTĘP TEORETYCZNY

CHARAKTERYSTYKA ŹRÓDEŁ PROMIENIOTWÓRCZYCH Z PUNKTU WIDZENIA OCHRONY RADIOLOGICZNEJ

Do oceny stopnia zagrożenia promieniowaniem jonizującym niezbędna jest znajomość charakterystyki źródła promieniotwórczego tzn.:

- rodzaju promieniowania jakie wysyła źródło
- energii promieniowania
- aktywności promieniotwórczej
- czasu połowicznego zaniku
- rodzaju źródła – zamknięte, otwarte
- rodzaju wiązki promieniowania – rozproszona, skolimowana

DAWKI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

Pojęcie dawki zostało wprowadzone w celu określenia zagrożenia, jakie może się pojawić w wyniku zetknięcia ze źródłem promieniowania. Dawka jest zatem miarą narażenia na promieniowanie jonizujące. W ochronie radiologicznej zgodnie z obowiązującymi przepisami obowiązują trzy podstawowe rodzaje dawek promieniotwórczych:

- dawka pochłonięta D
- dawka równoważna H
- dawka skuteczna (efektywna) E

Wartość dawek możemy zmierzyć odpowiednim radiometrem lub obliczyć.

Dawka Pochłonięta D - jest to średnia wartość energii, jaką traci promieniowanie a pochłania ośrodek, przez który to promieniowanie przechodzi, przypadająca na jednostkę masy tego ośrodka. Jednostką dawki pochłoniętej jest Gy(grej) = J/kg.

$$D = \frac{d \overline{E}}{dm}$$

gdzie: \overline{dE} - średnia energia promieniowania jonizującego przekazana materii w elemencie objętości o masie dm.

Dawkę pochłoniętą można także wyrazić wzorem:

$$D = \frac{\Gamma_r * A * t}{l^2 * k}$$

gdzie: Γ_r - równoważna wartość stałej ekspozycji wyrażona w [cGym²h⁻¹GBq] (centygrej razy metr kwadrat przez godzinę razy gigabekerel) jest to stała charakterystyczna dla danego izotopu promieniotwórczego, A - aktywność źródła [GBq], l - odległość od źródła [m], t - czas narażenia [s lub h], k - krotność osłabienia osłony.

Moc dawki pochłoniętej \dot{D} - jest to dawka promieniowania pochłonięta przez jednostkę masy w jednostce czasu wyrażona w [Gy/h]. Wielkość tę wyraża następujące równanie:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

gdzie: dD - przyrost dawki pochłoniętej, dt - przedział czasu.

Moc dawki pochłoniętej w powietrzu przy prognozowaniu zagrożeń podczas pracy ze źródłami promieniowania jonizującego można także obliczyć z następującego wzoru:

$$\dot{D} = \frac{\Gamma_r * A}{l^2}$$

gdzie: Γ_r - równoważna wartość stałej ekspozycji wyrażona w [CGym²h⁻¹GBq] jest to stała charakterystyczna dla danego izotopu promieniotwórczego, A - aktywność źródła [GBq], l - odległość od źródła [m]

Dawka Równoważna H_T - jest to dawka pochłonięta w tkance lub narządzie, wyznaczona z uwzględnieniem rodzaju i energii promieniowania jonizującego. Jednostką dawki równoważnej jest Siwert [1Sv= J/kg] charakteryzuje on narażenie żywego organizmu. Dawka równoważna może być wyrażona następującym wzorem:

$$H_T = w_R * D$$

gdzie: D - dawka pochłonięta uśredniona w tkance lub narządzie wewnętrznym, w_R - współczynnik wagowy promieniowania R według tabeli 1 z wyłączeniem promieniowania rentgenowskiego.

Jeżeli promieniowania składa się z kilku rodzajów różniących się energiami, to całkowita dawka równoważna jest sumą dawki od poszczególnych rodzajów promieniowania.

$$H_T = w_{R1} * D_1 + w_{R2} * D_2 + \dots$$

Współczynniki Wagowe Promieniowania są mnożnikami dawki pochłoniętej stosowanymi w celu uwzględnienia skutków zdrowotnych wywołanych przez różne typy promieniowania.

Tabela 1. Zależność współczynnika wagowego promieniowania od rodzaju i zakresu energii tego promieniowania

Rodzaj i zakres energii promieniowania	Współczynnik wagowy W_R	
Fotony (wszystkie energie)	1	
Elektrony i miony (wszystkie energie)	1	
Protony (bez protonów odrzutu) (energia >2MeV)	5	
Cząstki alfa, ciężkie jądra oraz fragmenty rozszczepienia,	20	
Neutrony	energia:	
	<10 keV	5
	10 keV – 100 keV	10
	100 keV – 2 MeV	20
	2MeV – 20 MeV	10
	>20 MeV	5

Dawce pochłoniętej w powietrzu równej 0,087 cGy odpowiada dawka równoważna wynosząca 1 mSv.

Moc dawki równoważnej \dot{H} - jest to stosunek dawki równoważnej do czasu:

$$\dot{H} = dH_T / dt$$

Jednostką niniejszej wielkości jest Sv/s.

Dawka Skuteczna E_z - od narażenia zewnętrznego, jest to iloczyn dawki równoważnej H_T i współczynnika wagowego tkanki w_T :

$$E_z = \sum H_T w_T$$

gdzie: w_T - współczynnik wagowy tkanki uwzględniający różną wrażliwość poszczególnych narządów i tkanek na promieniowanie.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że dawka skuteczna E_z określa napromieniowanie całego ciała a nie poszczególnych organów. Wynika to z tego, że wielkość tę otrzymuje się przez zsumowanie wszystkich iloczynów dawek równoważnych i współczynników wagowych tkanki dla poszczególnych narządów wchodzących w skład napromieniowanego organizmu. Podane w tabeli 2 wartości w_T zostały określone na podstawie tak zwanej promieniowrażliwości poszczególnych narządów. Powyższy wzór pozwala więc na obliczenie dawki na całe ciało człowieka w warunkach, kiedy ekspozycji na promieniowanie poddany był tylko pojedynczy narząd.

Tabela 2. Współczynniki wagowe tkanek (w_T)

Organ	Współczynnik wagowy tkanki w_T
gonady	0,25
gruczoły piersiowe	0,15
czerwony szpik kostny	0,12
płuca	0,12
żołądek	0,12
jelito grube	0,12
tarczycza	0,05
pęcherz moczowy	0,05
wątroba	0,05
kości	0,01
skóra	0,01
inne najbardziej narażone	0,30

Dawka Skuteczna (Efektywna) Obciążająca E - od narażenia zewnętrznego i wniknięcia radionuklidu do organizmu. Wartość tę wyznacza się przez zsumowanie dawek skutecznych E_z od narażenia zewnętrznego oraz dawek obciążających spowodowanych wniknięciem radionuklidów do organizmu w tym samym czasie. Dawkę tę można opisać dla osoby w grupie wiekowej (np. g) następującym równaniem:

$$E = E_z + \sum_j e(g)_{j,p} J_{j,p} + \sum_j e(g)_{j,o} J_{j,o}$$

gdzie:

E_z - dawka skuteczna od narażenia zewnętrznego, $e(g)_{j,p}$ i $e(g)_{j,o}$ - obciążające dawki skuteczne (dla osób w grupie wiekowej g), po wniknięciu do organizmu radionuklidu, J o aktywności 1Bq (drogą pokarmową - indeks p lub drogą oddechową - indeks o).

Dawki Graniczne - to wartości dawek promieniowania jonizującego, wyrażone jako dawka skuteczna lub równoważna, dla określonych grup osób, pochodzące od kontrolowanej działalności zawodowej, których poza przypadkami przewidzianymi w ustawie nie wolno przekraczać. Przy ocenie narażenia, obliczenia prowadzi się z reguły dla tygodnia pracy, przestrzegając zasady, aby narażenie było równomierne. Dla osób narażonych zawodowo jest to wartość dawki skutecznej równa **20 mSv/rok** na całe ciało, a dla pozostałych osób **1mSv/rok**. Z tego wynika odpowiednio: **0,4 mSv/tydzień i 0,02 mSv/tydzień**. Tabela 2 podaje wartości dawek granicznych według rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 28 maja 2002 r.

Tabela 3. Dawki graniczne [mSv/rok]

	Dawka skuteczna	Dawka równoważna		
		oczy	skóra	dłonie, przedramiona, stopy, podudzia
Osoby narażone zawodowo, praktykanci i studenci w wieku ≥ 18 lat	20	150	500	500
Praktykanci i uczniowie w wieku (16-18 lat)	6	50	150	150
Osoby z ogółu ludności, praktykanci i uczniowie w wieku poniżej 16 lat	1	15	50	

W ochronie radiologicznej jest stosowana zasada ALARA (**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable). Zgodnie z tą zasadą należy tak planować i organizować pracę, aby otrzymane dawki były możliwe jak najmniejsze z racjonalnym uwzględnieniem czynników technicznych, ekonomicznych i socjalnych. Niezmiennymi zasadami ochrony radiologicznej służącymi do zmniejszania i ograniczania dawek są: stosowanie odpowiednich osłon, zachowywanie bezpiecznej odległości od źródła promieniotwórczego, jak najkrótszy czas ekspozycji na promieniowanie oraz przestrzeganie warunków bezpieczeństwa i higieny pracy zabezpieczających przed wchłonięciem promieniowania.

Czynniki wpływające na efekt napromienienia żywego organizmu

- wielkość pochłoniętej energii na jednostkę masy ciała, czyli dawka pochłonięta
- rozkład dawki w czasie
- rodzaj promieniowania
- stopień napromieniania ciała
 - wielkość napromienionego obszaru ciała
 - rodzaj narządu lub tkanki jakie zostały napromienione
 - sposób napromienienia: zewnętrzne czy wewnętrzne
 - wiek, płeć i stan zdrowia
 - wrażliwość osobnicza i gatunkowa

OSŁONY PRZED PROMIENIOWANIEM, RODZAJE I DOBÓR MATERIAŁU

Podstawowym sposobem ochrony przed napromienieniem zewnętrznym jest stosowanie osłon. Różnorodność ich form jest bardzo duża. Ogólnie można je podzielić na osłony: stałe, ruchome (przenośne) oraz osobiste. Najczęściej stosowanymi osłonami są osłony stałe lub ruchome: źródeł, stanowisk pracy oraz przestrzeni, w których pracuje się ze źródłami. Osłony osobiste stosowane są doraźnie przez pracowników wykonujących pomiary z substancjami promieniotwórczymi.

Oślony Stałe - są to ściany osłonowe, ich elementy wchodzi w konstrukcje obiektu lub wypełniają ją i są na trwale związane z podłożem.

Oślony Ruchome - to wszelkiego typu pojemniki transportowe, stosowane jako opakowania handlowe, służące do przenoszenia i przechowywania źródeł oraz odpadów promieniotwórczych.

Oślony Osobiste - są to na ogół dodatkowe elementy osłaniające, zalecane do stosowania przez personel w czasie pracy.

Parametrem charakteryzującym osłony jest **krotność osłabienia wiązki promieniowania (k)**. Jest to parametr bezwymiarowy mówiący ile razy zmniejszy się w danym punkcie przestrzeni wielkość, za pomocą, której opisujemy natężenie promieniowania (np. moc dawki pochłoniętej). Jeżeli moc dawki pochłoniętej w powietrzu w odległości l od nieosłoniętego źródła promieniowania wynosiła D_1 a po przejściu przez osłonę w tej samej geometrii wynosi D to krotność osłabienia (k) wynosi:

$$k = \frac{D_1}{D}$$

Krotność osłabienia zależy nie tylko od parametrów fizycznych osłony, lecz również od właściwości promieniowania przechodzącego przez osłonę. Należy zwrócić uwagę na fakt, że dla różnych izotopów promieniotwórczych krotność osłabienia k dla tej samej osłony jest inna.

W powyższy sposób określa się krotność osłabienia dla wiązki szerokiej (rozproszonej). Dla wiązki skolimowanej stosuje się wzór:

$$k = e^{-\mu a}$$

gdzie: a - grubość osłony, μ - liniowy współczynnik osłabienia [cm^{-1}]

W przypadku promieniowania α , z uwagi na jego niewielki zasięg w powietrzu (kilka centymetrów), nie stosuje się specjalnych osłon ponieważ promieniowanie to zatrzymuje już kartka papieru. Dla promieniowania β preferowanymi materiałami służącymi do wykonywania osłon izolujących są metale lekkie np. aluminium bądź szkło organiczne. W przypadku promieniowania gamma osłonę może stanowić gruba betonowa ściana lub warstwa ołowiu. Aby zaprojektować właściwą osłonę należy:

- znać charakterystykę źródła promieniowania
- ustalić wymaganą krotność osłabienia (k) projektowanej osłony
- dokonać doboru materiału na osłonę
- obliczyć grubość osłony

WYKONANIE ĆWICZENIA

Należy zapoznać się z obsługą wykorzystywanych w ćwiczeniu urządzeń pomiarowych: RKP-1, RKP-2 i Contamatu. Następnie umieścić w statywie pierwszy z dwóch badanych izotopów ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ lub ^{60}Co) i zmierzyć **moc dawki pochłoniętej w $\mu\text{Gy/h}$ (licznikiem RKP-1)** oraz **moc dawki równoważnej $\mu\text{Sv/h}$ (licznikiem RKP-2)** w następujących odległościach od źródła: 10 cm, 50 cm, 100 cm. Kolejną czynnością jest umieszczenie pomiędzy źródłem, a licznikiem odpowiedniej osłony osłabiającej promieniowania (papier, plastik, szkło) i wykonanie pomiarów w odległościach: 10 cm, 50 cm, 100 cm od źródła (wykonując pomiary w trzech odległościach dla każdej osłony). Powyższą procedurę należy powtórzyć zmieniając źródło promieniowania. Otrzymane wyniki proszę skorygować za pomocą zamieszczonej krzywej kalibracyjnej, a następnie obliczyć krotność osłabienia wiązki promieniowania.

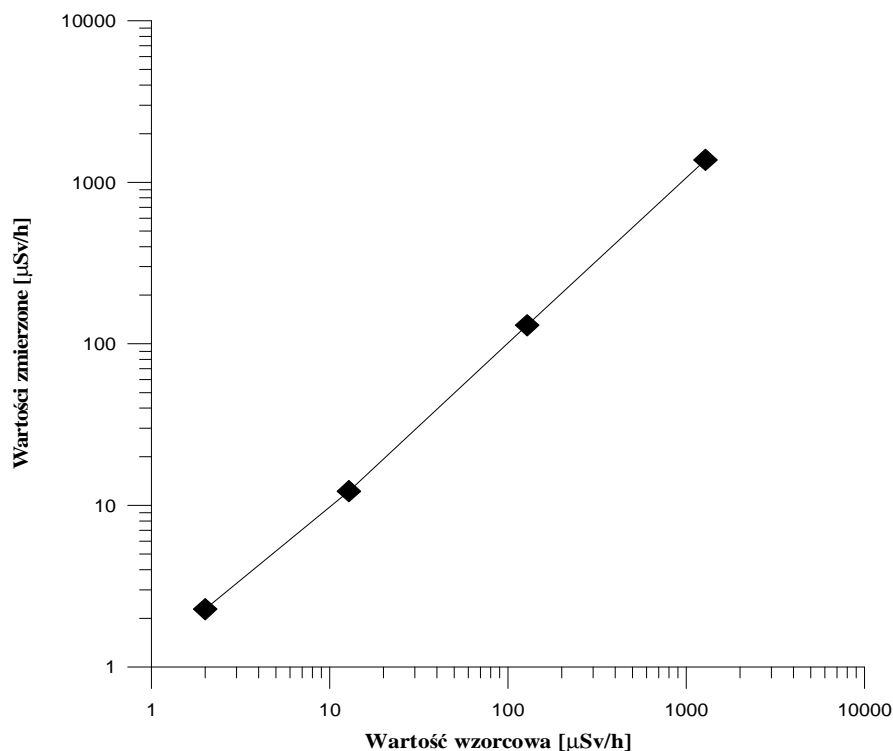
Otrzymane wyniki należy umieścić w tabelach:

Wyniki otrzymane za pomocą licznika RKP-1 [$\mu\text{Gy/h}$]				
		10 cm	50 cm	100 cm
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	bez osłony			
	papier			
	plastik			
	szkło			
^{60}Co	bez osłony			
	papier			
	plastik			
	szkło			

Wyniki otrzymane za pomocą licznika RKP-2 [$\mu\text{Sv/h}$]				
		10 cm	50 cm	100 cm
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	bez osłony			
	papier			
	plastik			
	szkło			
^{60}Co	bez osłony			
	papier			
	plastik			
	szkło			

Ostatnią częścią wykonania ćwiczenia jest wykrywanie skażeń promieniotwórczych. W tym celu, używając **aparatu Contamat FHT 111** należy określić, na której bibule znajduje się skażenie radiochemiczne. Proszę podać numer bibuły i wielkość zliczeń.

Krzywa kalibracyjna przyrządu dozymetrycznego RKP-2



OPRACOWANIE WYNIKÓW

- 1) Należy obliczyć krotność osłabienia wiązki promieniowania przy przechodzeniu przez poszczególne osłony.
- 2) Należy rozwiązać sześć następujących zadań:

Zadanie 1.

W pracowni izotopowej znajduje się źródło promieniowania γ ^{192}Ir o aktywności $A=20$ GBq. Stanowisko pracy znajduje się w odległości $l=50$ cm od źródła, za osłoną z kształtek ołowianych o grubości 5 cm. Czas pracy wynosi 40 h. Jako limit użytkowy przyjęto wartość 0,3 dawki granicznej. Oceń czy warunki pracy są prawidłowe. (Proszę wykorzystać nomogram i tabelę 4). Dawce pochłoniętej w powietrzu równej 0,087 cGy odpowiada równoważnik dawki równy 1 mSv.

DANE:

Izotop-.....

Aktywność-.....

Odległość-.....

Grubość-.....

Zadanie 2.

Trzy osoby: mężczyzna o masie 70kg, kobieta o masie 50kg i dziecko o masie 20 kg, zostały napromienione w taki sposób, że ciało każdej z nich pochłonęło 10^8 cząstek o energii $E=2\text{MeV}$. Oblicz dawkę pochłoniętą dla każdej z tych osób.

DANE:

Masy $M=$, $K=$, $D=$

Ilość pochłoniętych cząstek-.....

Energia cząstek-.....

Zadanie 3.

Obliczyć dawkę skuteczną E_z po napromienieniu płuc dawką $H_1=0,2$ mSv i kręgosłupa dawką $H_2=5$ mSv. (Odczytać wartość współczynników wagowych dla płuc i kości z tabeli 2)

DANE:

Organ napromienienia/dawka;

...../.....

Zadanie 4.

Oblicz moc dawki pochłoniętej w powietrzu w odległości $l_1= 1\text{m}$ i $l_2= 0,25\text{m}$ od punktowego źródła promieniowania γ ^{192}Ir o aktywności $A=10\text{GBq}$ Równoważną ($E_j=59,4\text{keV}$) wartość stałej ekspozycji odczytać z wykresu w załączniku. $\Gamma_T= ??\text{cGyh}^{-1}\text{m}^2\text{GBq}^{-1}$. (Proszę skorzystać z danych zawartych w tabeli 4)

DANE:

Izotop-.....

Aktywność-.....

Odległość l_1 -.....

Odległość l_2 -.....

Zadanie 5.

W pracowni znajduje się ruchome źródło promieniowania γ ^{60}Co o aktywności $A=2\text{ GBq}$. Pracownię oddziela od sąsiedniego pomieszczenia betonowa ściana o grubości $l_1=50\text{ cm}$. Źródło może być zbliżone do ściany na odległość $l_2=70\text{ cm}$. Czy sąsiednie pomieszczenie można przeznaczyć na pokój biurowy? Czas pracy personelu $t= 40\text{ h}$ tygodniowo. Należy przyjąć, że współczynnik osłabienia promieniowania w powietrzu wynosi 1. (Proszę wykorzystać nomogram 1).

DANE:

Izotop-.....

Aktywność-.....

Materiał ściany –.....

Grubość ściany-.....

Odległość l_2 -.....

Zadanie 6.

Obliczyć maksymalny zasięg w powietrzu promieniowania β ze źródeł: ^{32}P i ^{60}Co (tzn. obliczyć minimalną grubość warstwy powietrza, która całkowicie pochłonie promieniowanie β ze źródeł: ^{32}P i ^{60}Co). (Proszę skorzystać z tabel 5 i 6)

DANE:

Źródło 1-.....

Źródło 2-.....

Tabela 4. Wybrane izotopy wysyłające promieniowanie γ .

Izotop	Okres połowicznego zaniku	Energia kwantów [MeV]	Liczba kwantów na 100 rozpadów	Energia przyjmowana do obliczeń E_0 [MeV]	Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej [cGyh⁻¹GBq⁻¹m²]
Na-22	2,6 lat	1,27	99,9	1,3	29,6x10 ⁻³
Na-24	14,7 h	2,76 1,37	100,0 100,0	2,8	44,9x10 ⁻³
K-42	12,4 h	1,52	18,8	1,5	4,5x10 ⁻³
Sc-46	83,8 dni	1,12 0,89	100,0 99,9	1,1	26,1x10 ⁻³
Cr-51	27,8 dni	0,32	8,0	0,3	0,5x10 ⁻³
Mn-56	2,6 h	1,8 2,1	27,0 14,0	2,0	19,7x10 ⁻³
Fe-59	44,5 dni	1,10 1,29	56,5 43,2	1,3	16,0x10 ⁻³
Co-60	5,3 lat	1,17 1,33	99,9 100,0	1,3	30,8x10 ⁻³
Sr-85	65 dni	0,51	99,3	0,5	7,1x10 ⁻³
Rb-86	18,6 dni	1,08	8,8	1,1	1,2x10 ⁻³
Mo-99	2,8 dni	0,78 0,74 0,14	4,35 12,1 90,7	0,7	4,2x10 ⁻³
Tc-99	6 h	0,14	87,2	0,1	1,4x10 ⁻³
Ir-192	73,8 dni	0,29 0,31 0,32 0,47 0,60 0,61	28,3 29,3 83,0 47,7 8,3 5,3	0,6	10,9x10 ⁻³

Tabela 5. Wybrane izotopy wysyłające promieniowanie β .

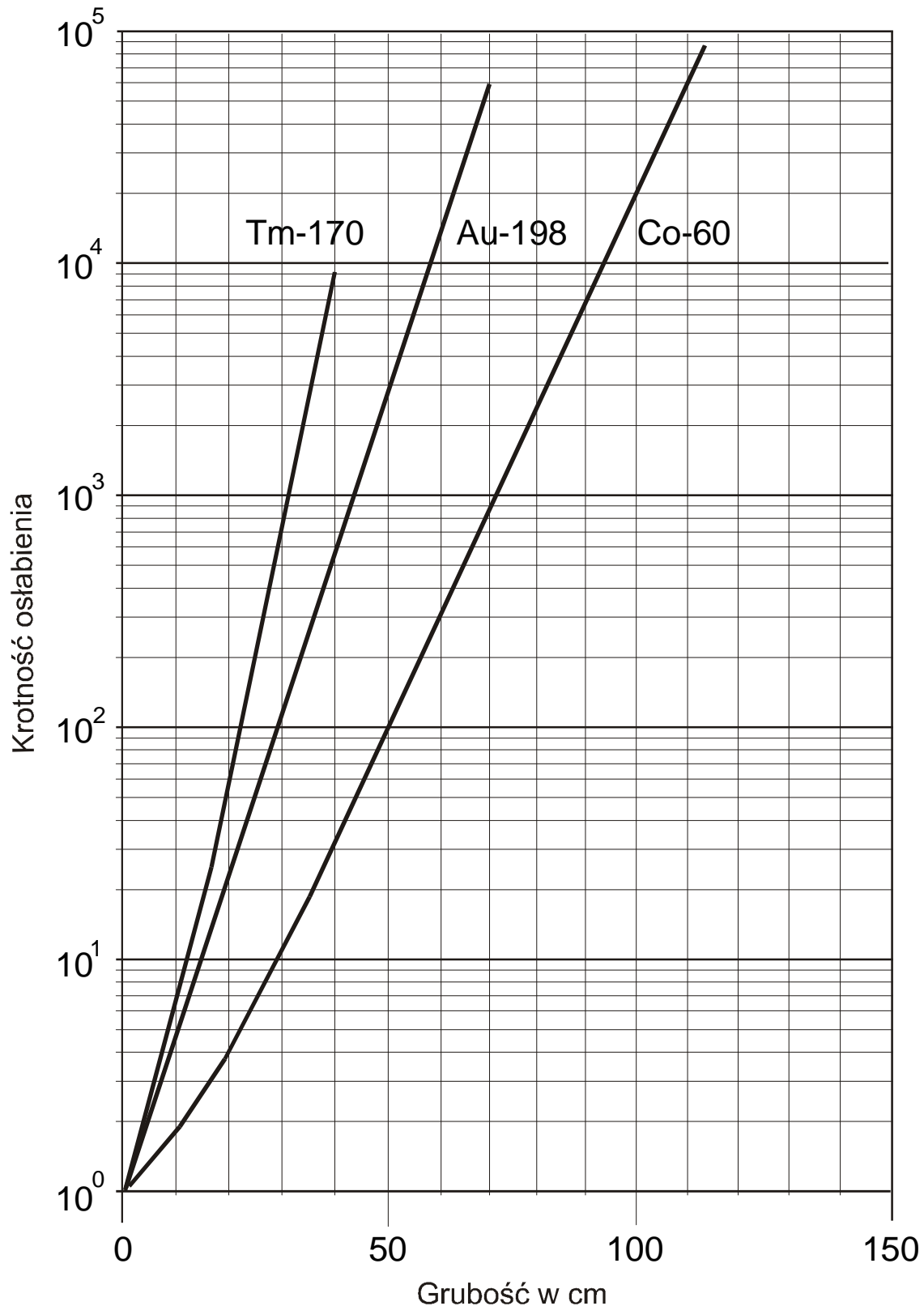
Izotopy	Okres połowicznego zaniku	Energia maks. [MeV] udział, %	Energia średnia. E [MeV]	Zasięg maks. R [mg/cm²]
H-3	12,3 lat	0,019	0,006	0,62
C-14	5730 lat	0,155	0,053	34
P-32	14,5 dni	1,708	0,68	8,0x10 ²
S-35	87,1 dni	0,169	0,056	32
K-40	1,3x10 ⁹ lat	1,325	0,51	5,8x10 ²
Ca-45	163,8 dni	0,254	0,084	57
Sc-46	83,8 dni	0,34/99,5 1,2/0,5	0,11 0,46	96 5,0x10 ²
V-48	16 dni	0,69/95 0,80/5	0,26 0,30	2,5x10 ² 3,0x10 ²
Ti-51	5,82 min	1,9/70 2,2/30	0,80 0,92	9,0x10 ² 1,1x10 ³
Mn-52	5,7 dni	0,58	0,21	2,0x10 ²
Fe-59	44,5 dni	0,46/50 0,257/50	0,16 0,082	1,4x10 ² 60
Co-60	5,3 lat	0,306	0,098	80
Cu-64	12,8 h	0,57	0,19	1,9x10 ²
Zn-65	245 dni	0,325	0,10	90
As-76	26,8 h	1,29/15 2,49/25 3,04/60	0,48 1,04 1,28	70 1,2x10 ³ 1,5x10 ³
Br-82	35,9 h	0,465	0,14	1,3x10 ²
Na-24	14,7 h	1,39/100 4,17	0,55 1,92	6,0x10 ² 2,1x10 ³
Kr-85	10,6 lat	0,67	-	-

Tabela 6. Gęstości niektórych materiałów.

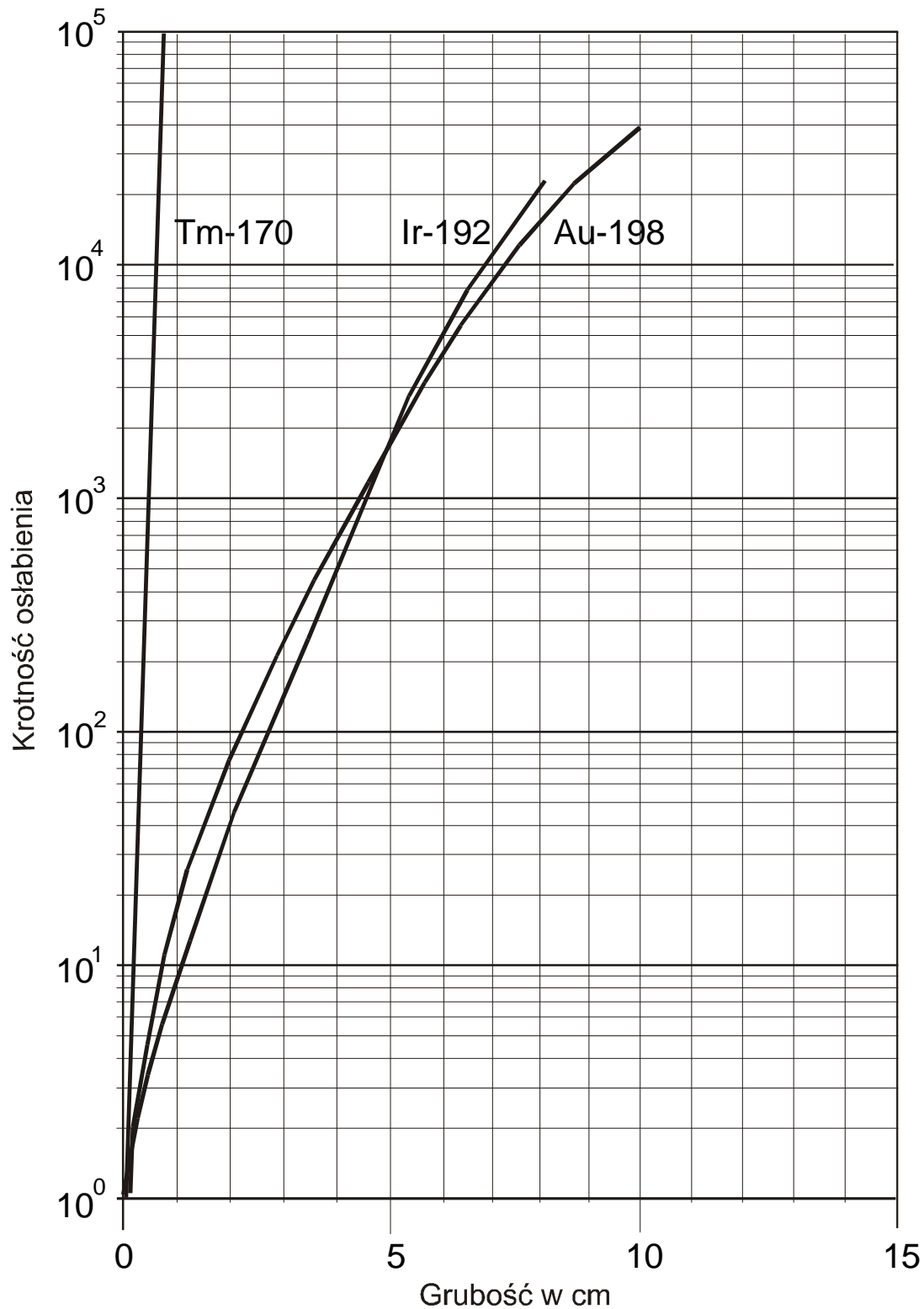
Materiał	Gęstość [g/cm³]
powietrze	0,0013
papier	0,7-1,1
skóra	0,85-1,0
guma	0,91-0,93
polietylen	0,91-0,95
szkło organiczne	1,2
bakelit	1,3
cegła	1,4-1,6
kość	1,8-2,0
beton	2,2-2,35
grafit	2,26
gips	2,3
krzem	2,3
szkło	2,4-2,75
aluminium	2,7
duraluminium	2,79
szkło ołowiane	3,4-4,8
tytan	4,5
cyna	7,0-7,15
żeliwo	7,2
żelazo, stal	7,1-7,9
mosiądz	8,45-8,6
miedź	8,6
stop ołów-cyna	9,0-10,5
ołów	11,3
uran	18,7
wolfram	19,3

Tabela 7. Równoważne wartości Γ_r stałych ekspozycyjnych oraz przyjmowane do obliczeń energie E_0 promieniowania gamma nuklidów promieniotwórczych.

Nuklid	Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej Γ_r [cGym ² s ⁻¹ GBq]	Równoważna wartość stałej ekspozycyjnej Γ_r [cGym ² h ⁻¹ GBq]	Energia przyjmowana do obliczeń E_0 [MeV]
Na-24	11,94x10 ⁻⁶	43,0x10 ⁻³	2,8
K-42	0,89x10 ⁻⁶	3,2x10 ⁻³	1,6
Sc-46	7,16x10 ⁻⁶	25,9x10 ⁻³	1,1
Cr-51	0,17x10 ⁻⁶	0,6x10 ⁻³	0,3
Mn-56	5,58x10 ⁻⁶	20,1x10 ⁻³	1,8
Fe-59	4,07x10 ⁻⁶	14,6x10 ⁻³	1,3
Co-60	8,46x10 ⁻⁶	30,5x10 ⁻³	1,3
Sr-85	1,93x10 ⁻⁶	7,0x10 ⁻³	2,0
Rb-86	0,33x10 ⁻⁶	1,2x10 ⁻³	1,1
Mo-99	1,16x10 ⁻⁶	4,2x10 ⁻³	0,7
Tc-99	0,39x10 ⁻⁶	1,4x10 ⁻³	0,1
Ag-110	10,14x10 ⁻⁶	36,5x10 ⁻³	1,3
Ag-111	0,11x10 ⁻⁶	0,4x10 ⁻³	0,3
I-131	1,42x10 ⁻⁶	5,1x10 ⁻³	0,4
Cs-134	5,74x10 ⁻⁶	20,7x10 ⁻³	0,8
Cs-137	2,13x10 ⁻⁶	7,7x10 ⁻³	0,7
Ba-140	0,72x10 ⁻⁶	2,6x10 ⁻³	0,5
La-140	7,56x10 ⁻⁶	27,2x10 ⁻³	1,6
Ce-141	0,29x10 ⁻⁶	1,0x10 ⁻³	0,15
Pr-144	0,09x10 ⁻⁶	0,3x10 ⁻³	0,7
Eu-154	4,30x10 ⁻⁶	15,5x10 ⁻³	1,9
Yb-169	1,16x10 ⁻⁶	4,2x10 ⁻³	0,3
Tm-170	0,02x10 ⁻⁶	0,07x10 ⁻³	0,1
Ir-192	3,03x10 ⁻⁶	10,9x10 ⁻³	0,6
Au-198	1,52x10 ⁻⁶	5,5x10 ⁻³	0,4
Hg-203	0,85x10 ⁻⁶	3,1x10 ⁻³	0,3
Ra-226	5,94x10 ⁻⁶	21,4x10 ⁻³	1,7



Zależność krotności osłabienia promieniowania γ
od grubości warstwy betonu ($\rho = 2.3 \text{ gcm}^{-3}$)



Zależność krotności osłabienia promieniowania γ
od grubości warstwy ołowiu ($\rho = 11.3 \text{ gcm}^{-3}$)

Literatura uzupełniająca:

1. Radiochemia w ćwiczeniach i zadaniach - praca zbiorowa.
2. J. Sobkowski - Chemia jądrowa, rozdz. 2, 5, 7.
3. J. Sobkowski - Zastosowanie nuklidów promieniotwórczych w chemii, rozdz. 6.
4. J. Araminowicz - Laboratorium z fizyki jądrowej, rozdz. 2, 3, 9.
5. W. Szymański - Chemia jądrowa, str. 272 i str. 198.
6. B. Gostkowska - Fizyczne podstawy ochrony radiologicznej, rozdz. 1, 3, 5, 6, 7.
7. W. Gorączko - Radiochemia i ochrona radiologiczna, rozdz. 3.