

## V. DAWKI STOSOWANE W MEDYCYNIE NUKLEARNEJ

W niniejszym rozdziale zajmiemy się bardziej szczegółowo sposobami obliczania dawek wewnętrznych, stosowanymi w medycynie nuklearnej<sup>7</sup>. Przede wszystkim jednak warto sobie uzmysłowić o jakich wielkościach dawek będziemy mówili. Pewnym punktem odniesienia – ze względów czysto poglądowych - mogą być dawki otrzymywane przez pacjentów w najróżniejszych badaniach z użyciem promieniowania rentgenowskiego. Wielkości te zgromadzone są w Tabelach 5.1 i 5.2<sup>8</sup>. Gwoli przypomnienia: dla mieszkańca Polski średnia roczna dawka od promieniowania naturalnego, to ok. 2,5 mSv.

Poddając pacjenta naświetlaniom możemy rozpatrywać zarówno narażenie całego jego organizmu, jak i narażenie jego poszczególnych narządów.

**Tabela 5.1. Uśrednione wartości dawek efektywnych otrzymywanych przez przeciętnego dorosłego pacjenta podczas konwencjonalnych badań rentgenowskich w Polsce**

Rodzaj badania	Dawka efektywna [mSv]
Badania głowy	0,03
Zdjęcie kręgosłupa	3,0
Zdjęcie miednicy	0,5
Urografia	3,5
Zdjęcie jamy brzusznej	0,8
Zdjęcie klatki piersiowej (duży format)	0,11
Małoobrazkowe zdjęcie płuc	1,0
Badanie żołądka i przewodu pokarmowego	5,6
Wlew doodbytniczy	8,0

### 5.1 Obliczenie dawek wewnętrznych

Obliczanie dawek wewnętrznych jest trudne, gdyż

- efekty biologiczne oceniane są głównie na podstawie ekstrapolacji danych otrzymanych dla zwierząt

<sup>7</sup> R.Chandra, *Nuclear Medicine Physics. The basics*, Williams&Wilkins, (1998)

<sup>8</sup> wg. *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, pod red. A.Hrynkiwicza, PWN (2001))

- w obliczeniach stosujemy różne przybliżenia; zakładamy np., że rozkład dawki jest jednorodny, że radiofarmaceutyk został wchłonięty przez organizm natychmiast po jego wprowadzeniu, a proces wydalania opisany jest prostym prawem eksponencjalnego zaniku, co nie zawsze jest zgodne z rzeczywistością
- obliczenia stosują się do „człowieka standardowego” z białej rasy kaukaskiej, o wadze 70 kg i o dobrze określonych masach poszczególnych organów oraz żywiącego się wg. dobrze określonej diety
- obliczana dawka dotyczy uśrednień po dużej objętości (ponad 1 cm<sup>3</sup>), a zatem nie może być użyteczna na poziomie komórkowym (mikrodozymetrii)

W wyniku tych trudności dokładność oceny wartości dawki, to czynnik nawet około 2.

**Tabela 5.2 Typowe wartości dawek dla standardowego pacjenta (70kg/170 cm) w badaniach radiologicznych**

Rodzaj badania	Dawka [mGy]
Radiografia	
klatka piersiowa	0,3-1,5
czaszka	3,0-5,0
kręgosłup lędźwiowy	10,0-30,0
kręgosłup piersiowy	7,0-20,0
miednica i układ moczowy	10,0
zęby	5,0
Mammografia	
Bez kratki przeciwozproszeniowej	1,0
Z kratką	3,0
Tomografia komputerowa	
głowy	50
kręgosłupa lędźwiowo – krzyżowego	35
jamy brzusznej	25
Fluoroscopia	
podczas normalnej pracy lampy	15 mGy/min
Podczas pracy przy dużym obciążeniu	100 mGy/min

W wypadku dostarczenia pewnej aktywności do narządu wewnętrznego nasze zadanie wygląda następująco: mamy narząd - źródło S (od ang. *source*) promieniowania X lub gamma, które naświetla jakiś inny narząd-tarczę T (od ang. *target*). Należy ocenić wartość dawki otrzymanywanej przez poszczególne narządy.

Przedstawimy wpierw sposób obliczeń wg tzw. *metody pochłanianej frakcji*. Obliczenia te wykonujemy w następujących czterech krokach, w których obliczamy kolejno:

1. emitowaną moc promieniowania [J/h] dla wszystkich rodzajów promieniowania emitowanego przez radionuklid znajdujący się w narządzie zawierającym źródło
2. tempo absorpcji energii przez narząd docelowy (target)
3. średnią moc dawki
4. średnią dawkę

Pierwsze trzy kroki obliczenia wymagają znajomości danych fizycznych. Ostatni krok – danych biologicznych. Omówimy je po kolei.

#### Krok 1: Emitowana moc promieniowania

Jeśli źródło wysyła tylko jeden rodzaj promieniowania o energii  $E$  [MeV] na rozpad, przy aktywności  $1\mu\text{Ci}$  ( $3,7\cdot 10^4$  Bq), emitowana w czasie 1 sekundy energia wynosi  $3,7\cdot 10^4\cdot E$  [MeV/s]= $2,13\cdot 10^{-5}$  [J/h]. Moc promieniowania dowolnego źródła wysyłającego szereg energii  $\{E_i\}$  z częstotliwościami emisji  $\{n_i\}$  wynosi zatem

$$2,13\cdot 10^{-5}\{n_1E_1+n_2E_2+\dots\} \text{ [J/h]} \quad (5.1)$$

Gdy aktywność źródła wynosi  $A$  [ $\mu\text{Ci}$ ] powyższą wartość należy pomnożyć przez  $A$ .

#### Krok 2: Tempo absorpcji energii

*Współczynnik absorpcji* (zaabsorbowana frakcja)  $\Phi_i(T\leftarrow S)$  jest z definicji stosunkiem energii  $i$ -tego promieniowania, zaabsorbowanej przez objętość targetu ( $T$ ) do energii promieniowania wysłanego z objętości źródła ( $S$ ). W większości problemów medycyny nuklearnej źródło i target są tym samym organem i rozważamy więc problem samoabsorpcji (absorpcji własnej).

Tempo pochłaniania energii równe jest mocy wysłanego  $i$ -tego promieniowania pomnożonej przez wartość współczynnika absorpcji  $\Phi_i(T\leftarrow S)$ . Ogólnie

$$2,13 \cdot 10^{-5} \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) [J/h/\mu Ci] \quad (5.2)$$

Wartości  $\Phi_i(T \leftarrow S)$  zostały stabelaryzowane dla różnych energii promieniowania X i  $\gamma$ , a także objętości organów źródłowych i docelowych „standardowego człowieka”. Wartości tych współczynników dla samoabsorpcji  $\Phi_i = \Phi_i(T \leftarrow T)$  w niektórych narządach podane są w Tabeli 10.

### Krok 3: Moc dawki

Z definicji, moc dawki, to tempo pochłaniania energii na jednostkę masy narządu (tkanki), a zatem:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= \frac{2,13 \cdot 10^{-5} A(t) [\mu Ci]}{M} \sum_{i=1}^n n_i E_i \Phi_i(T \leftarrow S) [J/(g \cdot h)/\mu Ci] \equiv \\ &\equiv \frac{A(t)}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) [Gy/h] \end{aligned} \quad (5.3)$$

gdzie  $A(t)$  oznacza aktywność w objętości źródła w chwili  $t$ .

### Krok 4: Średnia dawka D

Aktywność  $A(t)$  zgromadzona w danym organie jest z reguły tylko ułamkiem  $f$  podanej aktywności  $A_0$ .

$$A(t) = fA_0 e^{-0,693t/T_{1/2}(eff)} \quad (5.3)$$

Całkowita dawka D będzie całką z mocy dawki po czasie od zera do nieskończoności. Wynosi ona:

$$D(T \leftarrow S) = 1,44 \cdot T_{1/2}(eff) \cdot \frac{fA_0}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) [Gy] \quad (5.4)$$

Zauważmy, że  $fA_0/M$  jest koncentracją aktywności w organie - źródle i to właśnie ta koncentracja, a nie ilość materiału promieniotwórczego determinuje wartość dawki.

Jak widać, aby zminimalizować obciążenie pacjenta dawką należy

- zmniejszać aktywność,
- stosować radiofarmaceutyki z krótkim efektywnym okresem połowicznego zaniku
- stosować radionuklidy o małych wartościach współczynników absorpcji (co oznacza promieniowanie gamma o energiach większych od 100 keV i nie wysyłających promieniowania korpuskularnego)

**Tabela 5.3 Frakcja samoabsorpcji  $\phi_i$  dla różnych energii promieniowania  $\gamma$  i różnych narządów**

Narząd	Energia [keV]						
	15	30	50	100	200	500	1000
Pęcherz	0,885	0,464	0,201	0,117	0,116	0,116	0,107
Żołądek	0,860	0,414	0,176	0,101	0,101	0,101	0,093
Nerki	0,787	0,298	0,112	0,066	0,068	0,073	0,067
Wątroba	0,898	0,543	0,278	0,165	0,158	0,157	0,144
Płuca	0,665	0,231	0,089	0,049	0,050	0,051	0,045
Trzustka	0,666	0,195	0,068	0,038	0,042	0,044	0,040
Kośćciec	0,893	0,681	0,400	0,173	0,123	0,118	0,110
Śledziona	0,817	0,331	0,128	0,071	0,073	0,077	0,070
Tarczycyca	0,592	0,149	0,048	0,028	0,031	0,032	0,029
Całe ciało	0,933	0,774	0,548	0,370	0,338	0,340	0,321

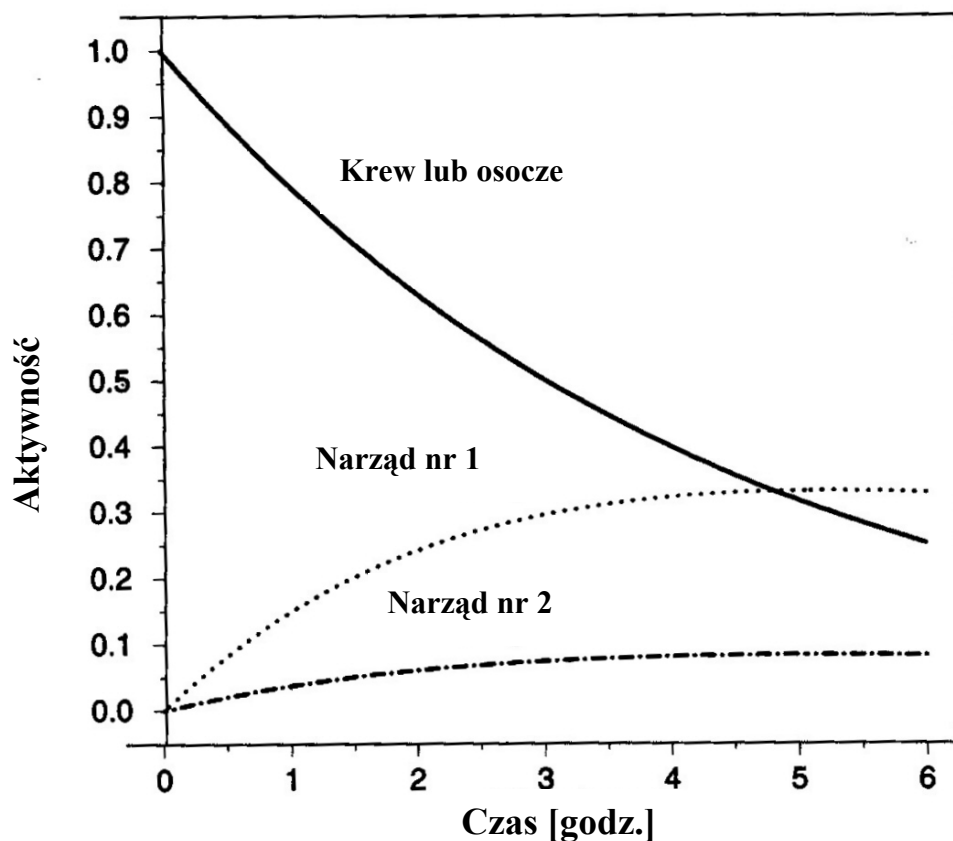
## 5.2 Aktywność skumulowana

Obliczona w powyższy sposób dawka zakłada:

- natychmiastowe wchłonięcie radiofarmaceutyku przez dany organ (narząd)
- pojedynczy zanik wykładniczy aktywności w źródłowym organie.

Tymczasem rozkład aktywności w funkcji czasu może przebiegać według bardziej skomplikowanego schematu. Na rys. 5.1 pokazujemy schematycznie w jaki sposób zanika w krwi lub osoczu aktywność radiofarmaceutyka podanego dożylnie.

Jak widać, w przypadku krwi lub osocza biokinetyka rozkładu radionuklidu nie pozwala na użycie pojedynczego zaniku wykładniczego. Dla obliczenia dawki należy obliczyć skumulowaną aktywność, tj. scałkować rozkład  $A(t)$  po czasie.



Rys. 5.1 Aktywność we krwi lub osoczu z czasem zanika. Część podanej aktywności jest wchłaniana przez narząd 1 i narząd 2. Część podanego radiofarmaceutyka jest wydalana. W wyniku takich procesów żadna z rzeczywistych krzywych zaniku aktywności nie może być opisana pojedynczą eksponentą, jak w równaniu (82).

### 5.3 Uprozczone obliczenia dawek

#### 5.3.1 Czynniki S

Fizyczne charakterystyki promieniowania wysyłanego przez radionuklid oraz współczynniki absorpcji dla różnych kombinacji narządu - źródła i narządu - tarczy w „człowieku standardowym” zebrano w postaci tzw. czynnika S:

$$S(T \leftarrow S) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \Delta_i \Phi_i(T \leftarrow S) \quad (5.5)$$

Tak więc

$$D(T \leftarrow S) = 1,44 \cdot f \cdot A_0 \cdot T_{\frac{1}{2}}(eff) \cdot S(T \leftarrow S) \quad (5.6)$$

W wypadku skomplikowanej biokinetyki należy wpierw obliczyć skumulowaną aktywność. Wtedy:

$$D(T \leftarrow S) = \tilde{A} \cdot S(T \leftarrow S) \quad (5.7)$$

Czynnik S jest jednoznacznie określony dla danego radionuklidu i danej pary organów w człowieku standardowym. Metoda ta nie może być więc stosowana np. do dzieci!

Wartości czynników S, gdy użytym izotopem promieniotwórczym jest  $^{99m}\text{Tc}$  podane są w Tabeli 5.4.

### 5.3.2. Przykłady

Zadanie 1. Obrazujemy wątrobę przy użyciu 2 mCi koloidu siarkowego znaczonego  $^{99m}\text{Tc}$ . Zakładamy, że 90% radiofarmaceutyka jest wchłaniane przez wątrobę natychmiast, a efektywny okres połówkowy wynosi 6 godz. Obliczyć dawkę na wątrobę przy pomocy metody współczynników absorpcji. Masa wątroby człowieka standardowego to 1800 g.

Rozwiązanie:

Aktywność początkowa wynosi:

$$A_0 = 0,90 \times 2000 \mu\text{Ci} = 1800 \mu\text{Ci} = 66,6 \text{ MBq}$$

Istotne dla obliczenia parametry wraz z  $\Sigma \Delta_i \Phi_i$  podaje Tabela 12. Ostatecznie otrzymujemy:

$$D(\text{wątrobą}) = (1800/1800) \cdot 1,44 \cdot 6 \cdot 0,078 = 0,67 \text{ rad} = 6,7 \text{ mGy}$$

Jeśli pozostałe 10% radiofarmaceutyka nie zostanie wydalone z organizmu, będzie także wносило wkład, choć niewielki, w dawkę otrzymywaną przez wątrobę.

**Tabela 5.4 Wartości czynników S dla izotopu  $^{99m}\text{Tc}$  oraz różnych narządów-źródeł i narządów-tarczy w rad/ $\mu\text{Ci}\cdot\text{godz}$ . Aby przejść do jednostek SI [Gy/MBq·godz] należy podzielić wartości w tabeli przez czynnik 3,7.**

Organ	Źródło									
	Zawartość pęcherza	Zawartość żołądka	Nerki	Wątroba	Płuca	Szpik czerwony	Kości	Śledziona	Tarczycyca	Całe ciało
Ściana pęcherza	1,6e-4	2,7e-7	2,8e-7	1,6e-7	3,6e-8	9,9e-7	5,1e-7	1,2e-7	2,1e-9	2,3e-6
Kości	9,2e-7	9,0e-7	1,4e-6	1,1e-6	1,5e-6	4,0e-6	1,1e-5	1,1e-6	1,0e-6	2,5e-6
Ściana żołądka	2,7e-7	1,3e-4	3,6e-6	1,9e-6	1,8e-6	9,5e-7	5,5e-7	1,0e-5	4,5e-8	2,2e-6
Nerki	2,6e-7	3,5e-6	1,9e-4	3,9e-6	8,4e-7	2,2e-7	8,2e-7	9,1e-6	3,4e-8	2,2e-6
Wątroba	1,7e-7	2,0e-6	3,9e-6	4,6e-5	2,5e-6	9,2e-7	6,6e-7	9,8e-7	9,3e-8	2,2e-6
Płuca	2,4e-8	1,7e-6	8,5e-7	2,5e-6	5,2e-5	1,2e-6	9,4e-7	2,3e-6	9,4e-7	2,0e-6
Szpik	2,2e-6	1,6e-6	3,8e-6	1,6e-6	1,9e-6	3,1e-5	6,6e-6	1,7e-6	1,1e-6	1,1e-6
Jajniki	7,3e-6	5,0e-7	1,1e-6	4,5e-7	9,4e-8	3,2e-6	8,5e-7	4,0e-7	4,9e-9	2,4e-6
Śledziona	6,6e-7	1,8e-5	8,6e-6	9,2e-7	2,3e-6	9,2e-7	5,8e-7	3,3e-4	1,1e-7	2,2e-6
Jądra	4,7e-6	5,1e-8	8,8e-8	6,2e-8	7,9e-9	4,5e-7	6,4e-7	4,8e-8	5,0e-6	1,7e-6
Tarczycyca	2,1e-9	8,7e-8	4,8e-8	1,5e-7	9,2e-7	6,8e-7	7,9e-7	8,7e-8	2,3e-3	1,5e-6
Całe ciało	1,9e-6	1,9e-6	2,2e-6	2,2e-6	2,0e-6	2,2e-6	6,6e-7	2,2e-6	1,8e-6	2,0e-6

Zadanie 2. Dla warunków zadania 1 obliczyć dawkę na wątrobę i szpik wykorzystując czynnik S.

Z tabeli 5.4 czynników S mamy:

$$S(\text{wątrob}\leftarrow\text{wątrob})=4,6\cdot 10^{-5}$$

$$S(\text{szpik}\leftarrow\text{wątrob})=1,6\cdot 10^{-6},$$

a więc

$$D(\text{wątrob}\leftarrow\text{wątrob})=1,44\cdot 1800\cdot 6\cdot 4,6\cdot 10^{-5}=0,72\text{ rad} = 7,2\text{ mGy}$$

$$D(\text{szpik}\leftarrow\text{wątrob})=1,44\cdot 1800\cdot 6\cdot 1,6\cdot 10^{-6}=0,025\text{ rad} = 0,25\text{ mGy}$$

Jak widać, jeśli pacjent nie odbiega zasadniczo od „człowieka standardowego”, posługiwanie się tabelą czynników S bardzo ułatwia rachunki.



**Tabela 5.5 Obliczenia sumy  $\Delta_i\phi_i$  w zadaniu 1**

Rodzaj promieniowania	$n_i$	$E_i$ [MeV]	$\Delta_i=2,13n_iE_i$	$\phi_i$	$\Delta_i\phi_i$
$\gamma_1$ - Elektron konwersji	0,986	0,002	0,004	1	0,004
$\gamma_2$	0,883	0,140	0,264	0,16	0,042
elektron konwersji K	0,088	0,119	0,022	1	0,022
elektron konwersji L	0,011	0,138	0,003	1	0,003
elektron konwersji M	0,004	0,140	0,001	1	0,001
$\gamma_3$ - Elektron konwersji	0,01	0,122	0,003	1	0,003
X: $K_\alpha$	0,064	0,018	0,003	0,88	0,0026
X: $K_\beta$	0,012	0,021	-	0,87	-
Elektron Augera KLL	0,015	0,015	-	1	-
Elektron Augera LMM	0,106	0,002	-	1	-
Elektron Augera MXY	1,23	0,0004	-	1	-
					<b><math>\Sigma \Delta_i\phi_i=0,078</math></b>

Zadanie 3. Pacjentowi z nadczynnością tarczycy podano 5 mCi  $^{131}\text{I}$ . Oblicz dawkę na tarczycę przyjmując, że masa gruczołu tarczycowego wynosi 30 g, efektywny czas połowkowy 4 dni, a wchłonięcie radiofarmaceutyka wynosi 45%.

W człowieku standardowym masa gruczołu tarczycowego wynosi nie 30 g ale 20 g, dlatego też nie możemy używać metody współczynników S.

Z warunków zadania mamy:

$$A_0=0,45 \cdot 5000 \mu\text{Ci}=2250 \mu\text{Ci} = 83,25 \text{ MBq}$$

$$T_{1/2}(\text{eff})=4 \text{ dni} = 96 \text{ h}$$

Potrzebne parametry dla izotopu  $^{131}\text{I}$  znajdują się w tabeli 5.6. Posługując się tabelą 5.6 otrzymujemy:

$$D(\text{tarczyca})=(2250/30) \cdot 1,44 \cdot 96 \cdot 0,433 \text{ rad}=44,89 \text{ Gy}$$

Zwróćmy uwagę, że dawka ta jest głównie spowodowana promieniowaniem korpuskularnym! Dlatego też  $^{131}\text{I}$  jest dobrym radionuklidem w terapii, a nie diagnostyce. Zwróćmy także uwagę na wielkość otrzymanej dawki. Jedna dziesiąta tej dawki, podana na całe ciało, byłaby dla człowieka dawką śmiertelną. Tymczasem w odniesieniu do narządu (tu – tarczycy) pełni rolę terapeutyczną.

**Tabela 5.6. Obliczenia sumy  $\Delta_i\phi_i$  w zadaniu 3**

Rodzaj promieniowania	$n_i$	$E_i$ [MeV]	$\Delta_i=2,13n_iE_i$	$\phi_i$	$\Delta_i\phi_i$
$\beta_1$	0,016	0,070	0,002	1	0,002
$\beta_2$	0,069	0,095	0,014	1	0,014
$\beta_3$	0,005	0,143	0,001	1	0,001
$\beta_4$	0,905	0,192	0,369	1	0,369
$\beta_5$	0,006	0,286	0,004	1	0,004
$\gamma_1$	0,017	0,080	0,003	0,035	-
Elektron Konwersji K	0,029	0,046	0,003	1	0,003
$\gamma_2$ – elektron konwersji	0,004	0,129	0,001	1	0,001
$\gamma_3$	0,047	0,284	0,029	0,03	-
Elektron Konwersji K	0,002	0,250	0,001	1	0,001
$\gamma_4$	0,002	0,250	0,001	1	0,001
$\gamma_5$	0,833	0,364	0,646	0,03	-
Elektron Konwersji K	0,017	0,330	0,012	1	0,012
Elektron Konwersji L	0,003	0,359	0,002	1	0,002
$\gamma_6$	0,003	0,503	0,003	0,03	-
$\gamma_7$	0,069	0,637	0,093	0,03	0,003
$\gamma_8$	0,016	0,723	0,025	0,03	0,001
X: $K_\alpha$	0,038	0,030	0,002	0,15	-
					<b><math>\Delta_i\phi_i=0,433</math></b>

## 5.4 Dawki w rutynowych obrazowaniach

W medycynie nuklearnej, podczas badania dorosłych, wartości dawek na całe ciało wynikłe z podania radiofarmaceutyku o typowej aktywności od kilku do tysiąca bekereli wynoszą od 0,01 do ok. 10 mGy, patrz Tabela 14. Jednocześnie dawka w *organie krytycznym* (tj. takim, który otrzymuje największą dawkę) w rutynowych obrazowaniach

wynosi od kilku do ok. 50 mGy. Wyjątkiem jest badanie tarczycy przy użyciu izotopu  $^{131}\text{I}$ , kiedy to tarczyca otrzymuje dawkę 750 mGy. Aby zorientować się w skali wielkości dawki pochłoniętej w badaniach związanych z użyciem różnych radiofarmaceutyków, tabela 5.7 pokazuje wielkości tych dawek w odniesieniu do średniej rocznej dawki pochłoniętej ze źródeł naturalnych (2,5 mSv rocznie).

W wypadku dzieci dozowanie radiofarmaceutyków jest odpowiednio mniejsze ze względu na mniejsze powierzchnie i masy. W rezultacie dawki na konkretny organ są podobne, choć nie identyczne. Radiofarmaceutyków na ogół nie podaje się kobietom w ciąży. Jeśli jest to niezbędne, sprawą krytyczną jest ocena dawki na płód, zarówno z ciała matki, jak i samego płodu. Przy podaniu 10 mCi (370 MBq) typowe dawki na płód, to 200-400 mrad (2-4 mGy).

**Tabela 5.7 Typowe dawki pochłonięte podczas badania narządów wewnętrznych przy użyciu radiofarmaceutyków <sup>a)</sup>**

Badany narząd	Radiofarmaceutyk	Aktywność znacznika promieniotwórczego [mCi]	Procent dawki pochłoniętej w stosunku do średniej dawki rocznej (2,5 mSv)
Tarczyca	Nadtechnecjan	1	21
Nerki	( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	0,04	29
Płuca	Hipuran ( $^{131}\text{I}$ )	4,5	100
Wątroba	Mikrosfery ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	4,5	110
Kości	Koloid ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) Fosfoniany ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	15	180

<sup>a)</sup> L.Królicki, R.Andrysiak, A.Bajera w *Diagnostyka Obrazowa* pod red. B.Pruszyńskiego, PZWL (2000)

## 5.5. Kilka słów o radiofarmaceutykach

Jest rzeczą oczywistą, że podstawowym wymaganiem w stosunku do związku chemicznego, który wybierzemy jako nośnik naszego izotopu promieniotwórczego (znacznika) jest jego zasadniczo odmienny sposób wchłaniania do narządu w sytuacji

patologicznej i normalnej. Niemniej oczywistą rzeczą jest, że taki radiofarmaceutyk nie może być toksyczny ani pyrogenny (powodujący gorączkę). Kinetyka wchłaniania radiofarmaceutyków jest bardzo różnorodna, a kilka mechanizmów pokazuje tabela 5.8.

**Tabela 5.8 Niektóre mechanizmy wchłaniania radiofarmaceutyków**

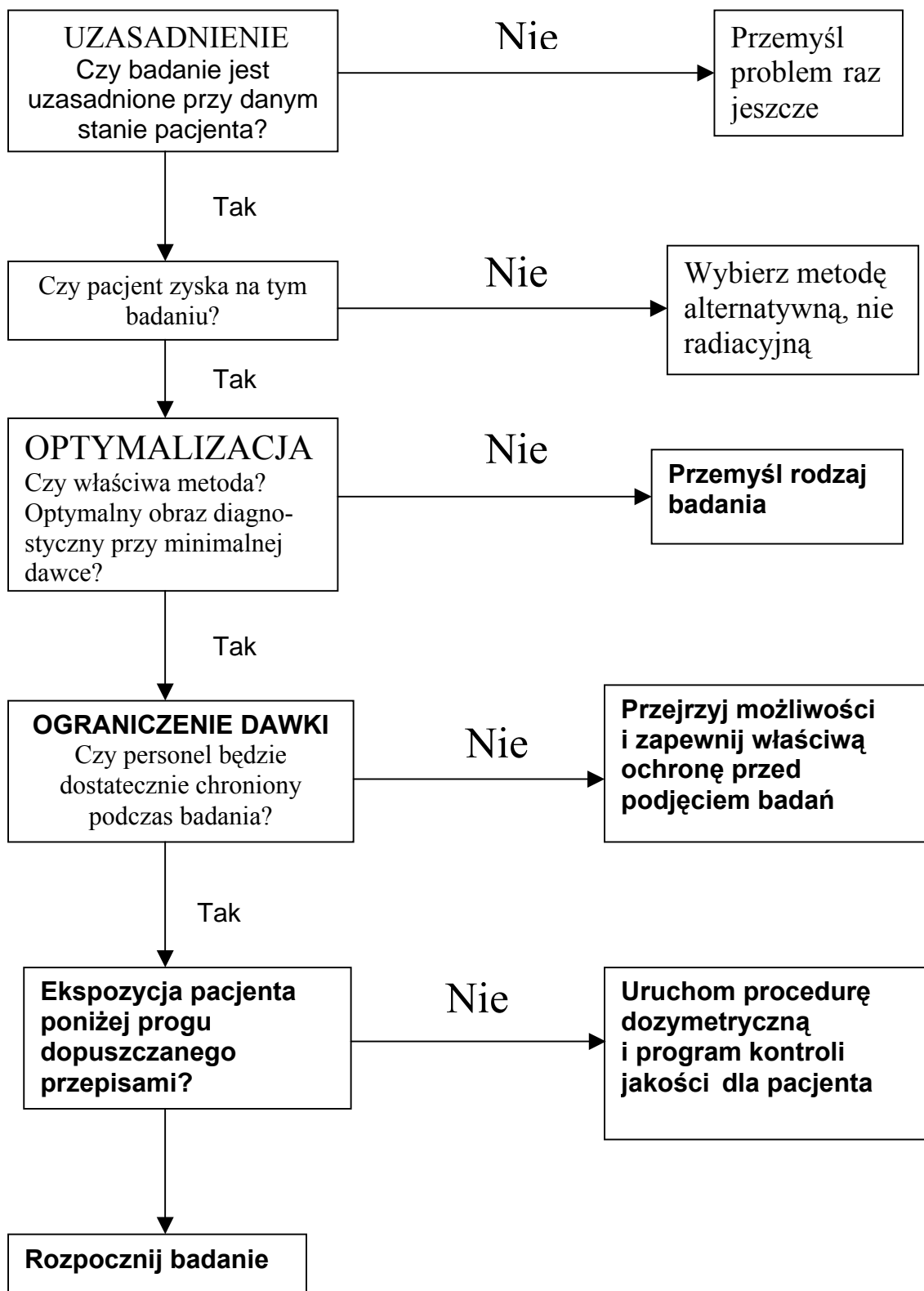
Mechanizm wchłaniania	Przykład
Czynny transport do komórek docelowych	wchłanianie radioaktywnego jodu przez tarczycę
Blokowanie włosowatych naczyń krwionośnych	Scyntygrafia płuc przy użyciu mikrosfer (8 do 75 $\mu\text{m}$ )
Sekwestracja komórkowa	Badania śledziona przy użyciu znakowanych, uszkodzonych termicznie erytrocytów
Prosta wymiana lub dyfuzja	Badania kości przy użyciu związków fosfatowych znakowanych $^{99\text{m}}\text{Tc}$
Znakowanie łożysk naczyniowych	Badanie przepływu krwi w dużych naczyniach i w komorach serca
Procesy immunologiczne	Przeciwciało zawierające znacznik promieniotwórczy, po podaniu dożylnym, łączy się z komórkami zawierającymi odpowiedni antygen. Obrazowanie nowotworu przy pomocy somatostatyny znakowanej $^{111}\text{In}$ .

W tabeli 5.9 pokazujemy najczęściej stosowane radiofarmaceutyki. Pomimo względnie niewielkich dawek z jakimi stykamy się w medycynie nuklearnej lekarz nigdy nie powinien ich lekceważyć. Dlatego też nim podejmie badanie powinien przeprowadzić analizę przypadku wg schematu logicznego przedstawionego na rys. 5.2.

**Tabela 5.9 Najczęściej stosowane radiofarmaceutyki <sup>a)</sup>**

Radiofarmaceutyk	Radioizotop	Badany narząd	Funkcja	Choroba
ECD, HM-PAO	<sup>99m</sup> Tc	Mózg	Przepływ krwi w mózgu,	Padaczka, udar, ośpienie
Jodek sodu, nadtechnecjan sodu	<sup>123</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>99m</sup> Tc	Tarczycza	Czynność pompy jodowej	Guzki tarczycy, jodochwytność
Leukocyty	<sup>111</sup> In, <sup>99m</sup> Tc	Całe ciało	Procesy zapalne	Ropnie, ogniska zapalne
Somatostatyna	<sup>111</sup> In	Obecność receptorów dla somatostatyny	Guzy nowotworowe zawierające ten typ receptora	Procesy nowotworowe
Chlorek talu, MIBI	<sup>201</sup> Tl, <sup>99m</sup> Tc	Serce	Przepływ krwi w mięśniu sercowym	Choroba wieńcowa, zawał serca
Mikrosfery, makroagregaty	<sup>99m</sup> Tc	Płuca	Przepływ krwi w płucach	Zatorowość płuc
Koloid siarczkowy	<sup>99m</sup> Tc	Wątroba, śledziona, szpik kostny	Czynność układu siateczkowo - śródbłonkowego	Marskość i nowotwory wątroby
DTPA	<sup>99m</sup> Tc	Nerki	Czynność kłębuszków nerkowych	Stany zapalne nerek, niewydolność, zaburzenia w odpływie moczu
Cytrynian galu	<sup>67</sup> Ga	Wątroba i inne narządy		Zapalenia, nowotwory

<sup>a)</sup> L.Królicki, R.Andrysiak, A.Bajera w *Diagnostyka Obrazowa* pod red. B.Pruszyńskiego, PZWL (2000)



**Rys. 5.2 Schemat podejmowania decyzji o badaniu przy użyciu izotopów promieniotwórczych**