

Janusz Adamski
Instytut Techniki Ciepłej

WYZNACZANIE KONCENTRACJI TRANSURANOWCÓW W REAKTORZE JĄDROWYM Z PALIWEM URANOWYM

Wyznaczano średnią koncentrację transuranowców w reaktorze jądrowym w zależności od składu izotopowego rdzenia reaktora z paliwem uranowym. Badano, jak wpływa zmiana składu izotopowego rdzenia reaktora na jakość widma energetycznego neutronów w reaktorze. Badania prowadzono w przybliżeniu wielogrupowym korzystając z metody S_M i kodu obliczeniowego ANISN-W. Przedstawiono wyniki badań w przybliżeniu 26-grupowym, chociaż na początku badań stosowano przybliżenie 6-cio i 16-grupowe. Dla każdego zakładanego składu izotopowego rdzenia reaktora sprawdzano kodem ANISN-W warunek krytyczności reaktora i do dalszych badań wybierano tylko te przypadki, dla których warunek krytyczności był spełniony. Dla wybranych w ten sposób widm neutronów wyliczano za pomocą kodu BULA średnią koncentrację transuranowców w rdzeniu reaktora. Podano skład izotopowy rdzenia reaktora jądrowego, odpowiadający maksymalnej produkcji transuranowców w badanym reaktorze.

OZNACZENIA

- a - rok, pochłanianie
- A - liczba masowa
- c - wychwyty radiacyjny
- (c) - moc cieplna
- d - dzień
- (e) - moc elektryczna
- f - rozszczepienie
- g - grupa energii

G	- ilość grup energii
i	- oznaczenie strefy podziału rdzenia
k	- współczynnik mnożenia
N	- koncentracja
(n, f)	- reakcja rozszczepienia
(n, σ)	- wychwyt radiacyjny
(n, n')	- rozpraszanie sprężyste
(n, 2n)	- emisja neutronów
R_{kryt}	- promień krytyczny reaktora
$T_{\frac{1}{2}}$	- półokres zaniku
t	- przekrój czynny całkowity na pochłanianie
u	- letarg, Δu - przyrost letargu
Z	- liczba atomowa
β	- przemiana jądrowa poprzez emisję elektronu
λ	- stała zaniku
γ	- średnia liczba neutronów wyzwolona podczas jednego aktu rozszczepienia
σ_i	- mikroskopowy przekrój czynny na i-tą reakcję jądrową
Σ_i	- makroskopowy przekrój czynny na i-tą reakcję jądrową
ϕ	- strumień neutronów

1. WSTĘP

Realizacja programu budowy powielających reaktorów jądrowych pozwoli na całkowite wykorzystanie istniejących na kuli ziemskiej zasobów uranu i toru. W naturalnym uranie występują dwa izotopy uranu o liczbach masowych 238 i 235, z których ${}^{92}\text{U}^{238}$ o zawartości 0,712% jest izotopem rozszczepialnym, a ${}^{92}\text{U}^{235}$ o zawartości 99,288% - materiałem rodzym. W powielającym reaktorze jądrowym z materiału rodzego można wyprodukować szereg izotopów plutonu, które są sztucznym paliwem jądrowym. Podobnie z naturalnego ${}^{90}\text{Th}^{232}$ można otrzymać rozszczepialny ${}^{92}\text{U}^{233}$ [6,11].

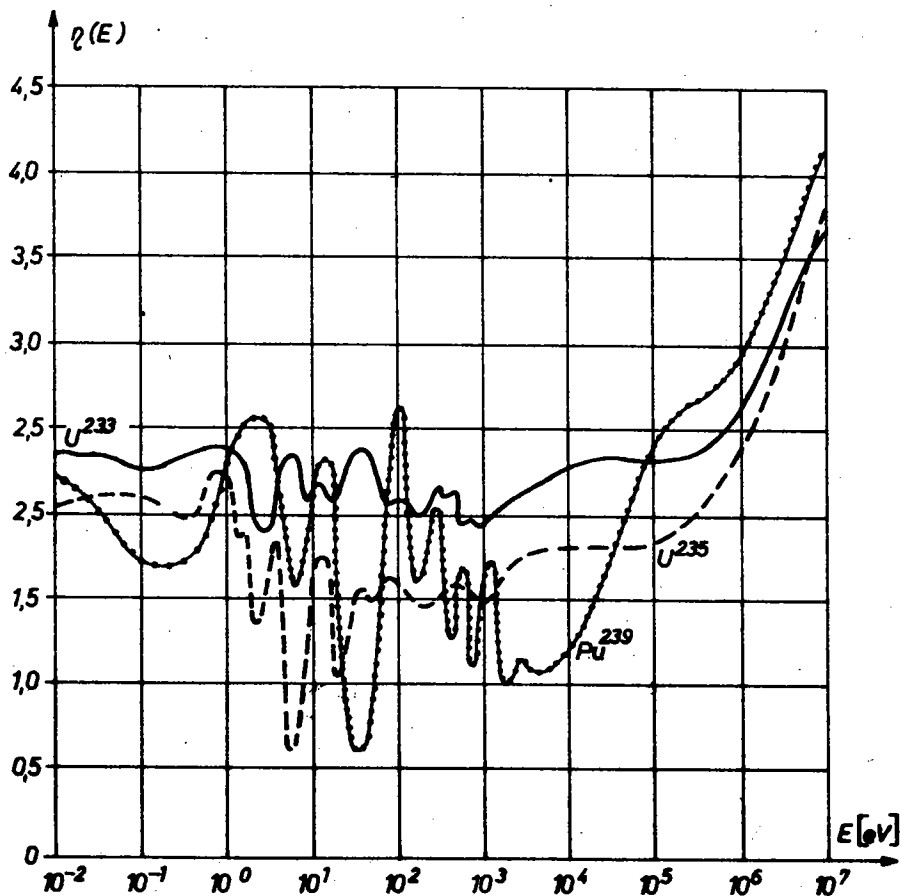
Obecnie na świecie jest realizowany program budowy prędkich reaktorów powielających w cyklu uranowo-plutonowym. Można założyć iż będzie on pięciokrotnie droższy i wymagający co najmniej dwukrotnie więcej czasu na realizację, aniżeli zrealizowany program rozwoju reaktorów termicznych.

Przekroje czynne na reakcje jądrowe maleją wraz ze wzrostem energii kinetycznej neutronów, stąd pochłanianie neutronów w materiałach konstrukcyjnych i produktach rozszczepienia jest mniejsze w reaktorach prędkich, aniżeli w termicznych. Przy tej samej mocy masa krytyczna reaktora prędkiego jest większa w porównaniu do masy krytycznej reaktora termicznego [6, 12].

Daży się do osiągnięcia znacznej gęstości mocy w rdzeniu reaktora prędkiego, by ilość potrzebnego paliwa i wymiary urządzenia nie były zbyt duże. Przewiduje się osiągnięcie mocy właściwej około 1000 kW/kg paliwa. Powoduje to trudności z odbiorem ciepła z rdzenia reaktora powielającego i wymaga stosowania specjalnych chłodziw, jak na przykład sodu. Temperatura wrzenia sodu wynosi około 1156 K, zatem reaktor może pracować w wysokich temperaturach i pod małym ciśnieniem, co zmniejsza koszty układu odprowadzania ciepła.

Proces powielania paliwa zachodzi, jeżeli są spełnione pewne warunki, przy czym istotne są wyłącznie rozważania dotyczące reaktora jądrowego w stanie krytycznym [12]. Jak wiadomo, η oznacza średnią liczbę neutronów emitowanych na skutek wychwytu jednego neutronu przez jądro rozszczepialnego izotopu. Wartość η zależy od energii kinetycznej neutronu wywołującego rozszczepienie i od rodzaju izotopu-paliwa (rys.1.1). Powielanie paliwa jest możliwe gdy $\eta(E) > 1$. W zakresie małych energii neutronów $\eta(E)$ jest większe dla ${}_{92}\text{U}^{233}$ aniżeli dla ${}_{92}\text{U}^{235}$ i ${}_{94}\text{Pu}^{239}$. Powielanie paliwa w cyklu toro-uranowym odbywa się w reaktorach termicznych. Powielanie paliwa w cyklu uranowo-plutonowym odbywa się w reaktorach prędkich [15].

Tak się złożyło, iż na świecie opanowano wydobywanie i przerobienie uranu, a nie toru. Cała energetyka jądrowa korzysta z paliwa uranowego. Program rozwoju i budowy prędkich reaktorów powielających dotyczy w pierwszej kolejności realizacji cyklu



Rys.1.1. Wartości $k(E)$ dla różnych materiałów rozszczepialnych [12], gdzie: $k(E) = \nu(E) \frac{\sigma_f^f(E)}{\sigma_t^f(E)}$

uranowo-plutonowego [11]. Zamiana nierozszczepialnego ${}_{92}\text{U}^{238}$ na rozszczepialne izotopy plutonu w reaktorach mnożących jest drugim etapem wykorzystania reakcji rozszczepienia dla celów pokojowych.

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń średniej koncentracji transuranowców w zależności od składu izotopowego rdzenia jednorodnego reaktora jądrowego z paliwem uranowym. Ładania dotyczyły cyklu uranowo-plutonowego (rys.2.1).

Założono iż rdzeń badanego reaktora składa się z ośmiu wybranych izotopów (tablica 1.1). Pierwszy izotop to materiał rozszczepialny ${}_{92}\text{U}^{235}$, drugi to materiał rodny ${}_{92}\text{U}^{238}$, trzeci to metaliczne chłodziwo ${}_{11}\text{Na}^{23}$, pozostałe izotopy: ${}_{26}\text{Fe}^{56}$, ${}_{28}\text{Ni}^{60}$, ${}_{42}\text{Mo}^{92}$, ${}_{40}\text{Zr}^{92}$, ${}_{41}\text{Nb}^{93}$ to materiały konstrukcyjne rdzenia reaktora.

T a b l i c a 1.1
Składy izotopowe rdzenia reaktora jądrowego
z paliwem uranowym

Lp.	Zawartość izotopu w [%]							
	${}_{92}\text{U}^{235}$	${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{11}\text{Na}^{23}$	${}_{26}\text{Fe}^{56}$	${}_{28}\text{Ni}^{60}$	${}_{42}\text{Mo}^{92}$	${}_{40}\text{Zr}^{92}$	${}_{41}\text{Nb}^{93}$
1	90	10	-	-	-	-	-	-
2	80	10	10	-	-	-	-	-
3	50	30	10	5	2	3	-	-
4	50	25	10	5	2	8	-	-
5	50	20	10	5	2	13	-	-
6	50	20	10	5	2	-	13	-
7	50	20	10	5	2	-	-	13
8	75	10	10	5	-	-	-	-

Zmieniano udział procentowy poszczególnych izotopów w jednostce objętości rdzenia reaktora i wyznaczano grupowy strumień neutronów, sprawdzając za każdym razem warunek krytyczności reaktora jądrowego. Jeżeli dla założonego składu izotopowego rdzenia k_{ef} był mniejszy od jedności, to zmieniano udziały procentowe poszczególnych izotopów w rdzeniu tak długo, aż warunek krytyczności był spełniony. W ten sposób otrzymano osiem różnych składów izotopowych rdzenia reaktora przydatnych do dalszych badań.

Dla tych składów izotopowych wyznaczono, przy pomocy programu ANISN-W, metodą dyskretnych współrzędnych (S_M) strumień neutronów. Dla każdego badanego składu izotopowego rdzenia wyznaczone promień krytyczny.

Sprawdzono właściwości jednorodnej kuli składającej się z czystego ${}_{92}\text{U}^{235}$ i z czystego ${}_{98}\text{Cf}^{251}$. Zbadano, jak

wpływa liczba stref podziału kuli i liczba iteracji [14] na dokładność obliczeń grupowego strumienia neutronów.

Podano rozwiązanie analityczne układu równań bilansowych średniej koncepcji transuranowców w badanym reaktorze i za pomocą kodu BULA zbadano, jak wpływa zmiana składu izotopowego rdzenia reaktora na produkcję transuranowców.

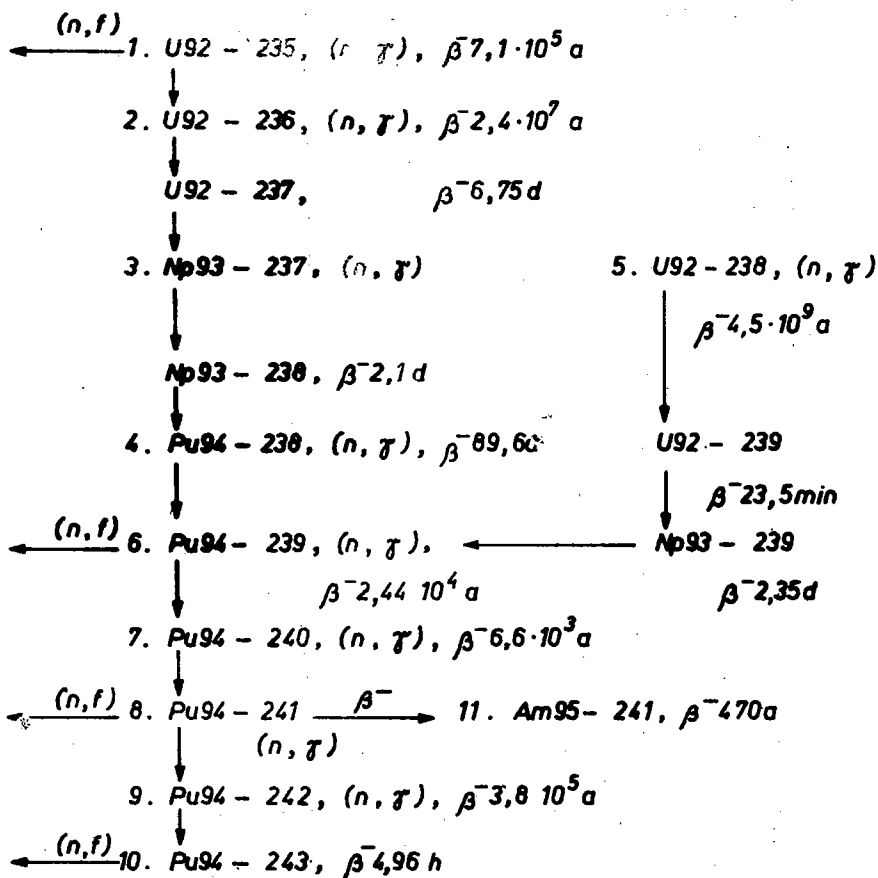
Omówienie wyników badań numerycznych zamieszczono we wnioskach końcowych. Badania prowadzono na M.C. CDC-6400.

2. REAKCJE I PRZEMIANY JĄDROWE W RDZENIU REAKTORA JĄDROWEGO Z PALIWEM URANOWYM

Podczas pracy reaktora jądrowego następuje zmiana składu izotopowego rdzenia reaktora. W paliwie jądrowym powstają fragmenty rozszczepienia, które stanowią początki łańcuchów rozpadu. Wypalone paliwo jądrowe zawiera kilkaset promieniotwórczych nuklidów, o bardzo różnych własnościach jądrowych i fizycznych [6].

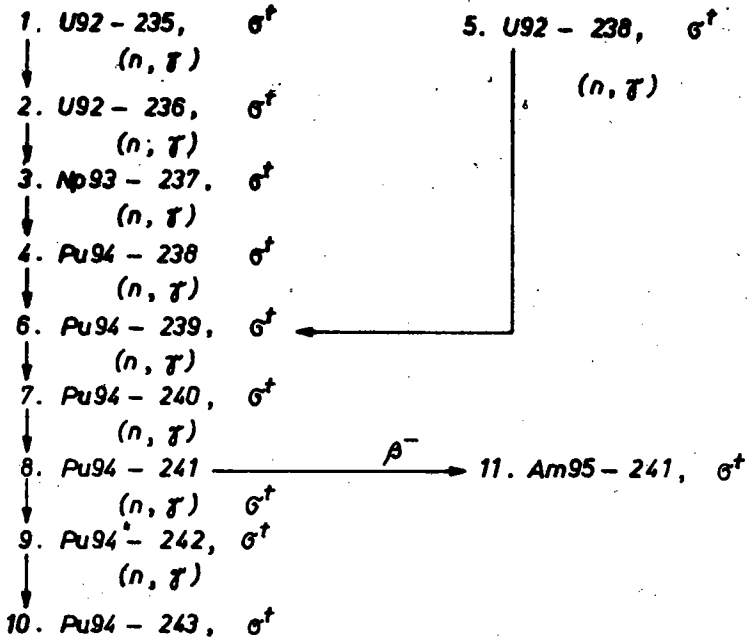
Prócz produktów rozszczepienia w reaktorze jądrowym z paliwem uranowym powstają transuranowce, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.2.1.

Jeżeli w paliwie jądrowym reakcje i przemiany jądrowe zachodzą zgodnie ze schematem pokazanym na rys.2.1, to nazywamy to pracą reaktora jądrowego w cyklu uranowo-plutonowym. W wyniku reakcji rozszczepienia następuje ubytek materiału rozszczepialnego ${}_{92}\text{U}^{235}$, a w wyniku reakcji wychwytu radiacyjnego (n, γ) powstaje z ${}_{92}\text{U}^{235}$ uran ${}_{92}\text{U}^{236}$, a z uranu ${}_{92}\text{U}^{238}$ powstaje ${}_{92}\text{U}^{239}$. W wyniku kolejnych reakcji (n, γ) i przemian β^- powstają dalsze izotopy neptunu, uranu i plutonu. Niektóre z nich stanowią materiał rozszczepialny, a niektóre materiał rodny. Izotopy o liczbach $A > 243$ powstają w ilościach śladowych.



Rys.2.1. Przemiany i reakcje jądrowe transuranowców [6, 7, 12].

Oznaczenia zapisu: Pu94 - 242, (n, γ), $\beta^{-} 3,8 \cdot 10^5$ a oznacza: izotop plutonu o liczbie atomowej 94 i liczbie masowej 242, izotop doznaje reakcji (n, γ) i zachodzi przemiana β^{-} z półokresem zaniku równym $3,8 \cdot 10^5$ lat



Rys.2.2. Uproszczony schemat przemian i reakcji jądrowych transuranowców analizowany w pracy

3. RÓWNANIA BILANSOWE KONCENTRACJI TRANSURANOWCÓW DLA JEDNORODNEGO REAKTORA JĄDROWEGO Z PALIWEM URANOWYM

Po wstępnej analizie postanowiono pominąć transuranowce o okresie półrozpadu mniejszym od dziesięciu dni, jak również pominięto przemiany promieniotwórcze o okresie półrozpadu większym od stu lat (rys.2.1 i 2.2). Ostatecznie przyjęto do wyznaczania średniej koncentracji transuranowców następujący układ równań [7, 12]:

$$\dot{N}_1 = -N_1 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^1 \varphi_g$$

$$\dot{N}_2 = N_1 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,g}^1 \varphi_g - N_2 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^2 \varphi_g$$

$$\begin{aligned}
 \dot{N}_3 &= N_2 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^2 \varphi_g - N_3 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^3 \varphi_g \\
 \dot{N}_4 &= N_3 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^3 \varphi_g - N_4 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^4 \varphi_g \\
 \dot{N}_5 &= -N_5 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^5 \varphi_g \\
 \dot{N}_6 &= N_4 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^4 \varphi_g - N_6 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^6 \varphi_g + N_5 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^5 \varphi_g \\
 \dot{N}_7 &= N_6 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^6 \varphi_g - N_7 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^7 \varphi_g \\
 \dot{N}_8 &= N_7 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^7 \varphi_g - N_8 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^8 \varphi_g \\
 \dot{N}_9 &= N_8 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^8 \varphi_g - N_9 \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^9 \varphi_g \\
 \dot{N}_{10} &= N_9 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,8}^9 \varphi_g - N_{10} \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^{10} \varphi_g \\
 \dot{N}_{11} &= \lambda_8 N_8 - N_{11} \sum_{g=1}^G \sigma_{t,8}^{11} \varphi_g
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

gdzie:

N_1 - oznacza $N_1(t)$ - koncentrację uranu 235; wskaźnik 1 oznacza uran 235, 2-uran 236, 3-neptun 237, 4-pluton 238, 5-uran 238, 6-pluton 239, 7-pluton 240, 8-pluton 241, 9-pluton 242, 10-pluton 243, 11-amer-
ryk 241;

$\sigma_{t,8}^1$ - oznacza grupowy mikroskopowy przekrój czynny; górny wskaźnik 1 oznacza uran 235, dolny wskaźnik t oznacza przekrój czynny całkowity na pochłanianie.

Warunki początkowe:

$$N_1(0) = N_1^0, \quad N_5(0) = N_5^0,$$

$$N_2(0) = N_3(0) = N_4(0) = N_6(0) = \dots = N_{11}(0) = 0.$$

gdzie: N_1^0 i N_5^0 to koncentracje ${}^{92}\text{U}^{235}$ i ${}^{92}\text{U}^{238}$ w jednostce objętości rdzenia badanego reaktora dla $t = 0$, przyjmowanego zgodnie z tabl.1.1. Pozostałe koncentracje początkowe transuranowców dla $t = 0$ równają się, zgodnie z założeniem, zero.

Rozwiązanie analityczne układu równań (3.1) ma postać:

$$\begin{aligned}
 N_1(t) &= N_1^0 \exp\left(-\sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^1 \varphi_g t\right) \\
 N_2(t) &= \frac{N_1^0 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,g}^1 \varphi_g}{\sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^2 \varphi_g - \sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^1 \varphi_g} \exp\left(-\sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^1 \varphi_g t\right) - \\
 &\quad - \frac{N_1^0 \sum_{g=1}^G \sigma_{c,g}^1 \varphi_g}{\sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^2 \varphi_g - \sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^1 \varphi_g} \exp\left(-\sum_{g=1}^G \sigma_{t,g}^2 \varphi_g t\right) \\
 N_3(t) &= \dots \\
 &\quad \vdots \\
 N_{11}(t) &= \dots
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

co można zapisać:

$$N_n(t) = \sum_{i=1}^l A_i \exp\left(-\sum_{g=1}^G \sigma_{g,i} \varphi_g t\right) + \sum_{j=1}^m A_j \exp(-\lambda t) \tag{3.3}$$

gdzie $n = 1, 2, 3, \dots, 11$.

Średnią koncentrację transuranowców wyliczono przy pomocy programu BULA, napisanego dla rozwiązania analitycznego (3.2) układu równań (3.1).

Grupowy strumień neutronów wyznaczano z równań transportu neutronów przy pomocy programu ANISN-W.

4. WYZNACZANIE STRUMIENIA NEUTRONÓW I PROMIENIA KRYTYCZNEGO REAKTORA O ZMIENNYM SKŁADZIE IZOTOPOWYM RDZENIA [4,5]

Potrzebny do wyznaczania koncentracji transuranowców, w zależności od składu izotopowego rdzenia badanego reaktora, grupowy strumień neutronów wyznaczano korzystając z programu ANISN-W [8, 9, 13, 16]. Obliczenia prowadzono na MC CDC-6400, pracującej w systemie CYBER-70.

Wyznaczanie grupowego strumienia neutronów wymagało przygotowania danych wejściowych, koniecznych do uruchomienia programu ANISN-W [8]:

- a) kart informacyjnych dla systemu CYBER,
- b) kart sterujących dla programu ANISN-W,
- c) mikroskopowych przekrojów czynnych grupowych dla izotopów tworzących rdzeń badanego reaktora,
- d) składu izotopowego jednostki objętości rdzenia reaktora.

Składy izotopowe rdzenia badanego reaktora przedstawiono w tabl.4.1. Dla tych składów izotopowych oznaczonych numerami od 1 do 8 był spełniony warunek krytyczności. Skład izotopowy nr 1 odpowiada składowi izotopowemu reaktora odniesienia LADY GODIVA [9]. Składy izotopowe oznaczone numerami od 2 do 8 dobierano wykorzystując analizę składów izotopowych rdzeni reaktorów mnożących.

Mikroskopowe grupowe przekroje czynne dobierano z tablic uważanych za pewne i wielokrotnie sprawdzanych w różnych ośrodkach [1].

Badania rozpoczęto od sprawdzenia programu ANISN-W dla przypadku reaktora odniesienia LADY GODIVA [9] w przybliżeniu sześciogrupowym. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników, zarówno co do wartości promienia krytycznego, jak i rozkładu strumienia. Przyjęto zatem, iż program ANISN nadaje się do wykorzystania w niniejszych badaniach.

Należy dodać, iż na początku badań stosowano przybliżenie sześciogrupowe, później szesnastogrupowe, ale ponieważ okazało się iż te przybliżenia są mało dokładne, zaczęto stosować przybliżenie 26-grupowe i dane jądrowe Abagjana [1, 4, 5].

T a b l i c a 4.1

Zawartość procentowa i koncentracja izotopów w jednorodnym reaktorze kulistym z paliwem uranowym.

Wyznaczanie grupowego strumienia neutronów

Skład izotopowy numer	Zawartość izotopu [%]							
	Koncentracja izotopu [at·cm ⁻³]							
	⁹² U ²³⁵	⁹² U ²³⁸	¹¹ Na ²³	²⁶ Fe ⁵⁶	²⁸ Ni ⁶⁰	⁴² Mo ⁹²	⁴⁰ Zr ⁹²	⁴¹ Nb ⁹³
1	$\frac{90}{4,3906 \cdot 10^{22}}$	$\frac{10}{4,8169 \cdot 10^{21}}$	0	0	0	0	0	0
2	$\frac{80}{3,9162 \cdot 10^{22}}$	$\frac{10}{4,8169 \cdot 10^{21}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	0	0	0	0	0
3	$\frac{50}{2,4476 \cdot 10^{22}}$	$\frac{30}{1,4501 \cdot 10^{22}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	$\frac{2}{2,003 \cdot 10^{21}}$	$\frac{3}{2,004 \cdot 10^{21}}$	0	0
4	$\frac{50}{2,4476 \cdot 10^{22}}$	$\frac{25}{1,2084 \cdot 10^{22}}$	$\frac{10}{2,450 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	$\frac{2}{2,003 \cdot 10^{21}}$	$\frac{8}{5,342 \cdot 10^{21}}$	0	0
5	$\frac{50}{2,4476 \cdot 10^{22}}$	$\frac{20}{9,6672 \cdot 10^{21}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	$\frac{2}{2,003 \cdot 10^{21}}$	$\frac{13}{8,681 \cdot 10^{21}}$	0	0
6	$\frac{50}{2,4476 \cdot 10^{22}}$	$\frac{20}{9,6672 \cdot 10^{21}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	$\frac{2}{2,003 \cdot 10^{21}}$	0	$\frac{13}{5,481 \cdot 10^{21}}$	0
7	$\frac{50}{2,4476 \cdot 10^{22}}$	$\frac{20}{9,6672 \cdot 10^{21}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	$\frac{2}{2,003 \cdot 10^{21}}$	0	0	$\frac{13}{7,149 \cdot 10^{21}}$
8	$\frac{75}{3,6714 \cdot 10^{22}}$	$\frac{10}{4,8169 \cdot 10^{21}}$	$\frac{10}{2,540 \cdot 10^{21}}$	$\frac{5}{4,232 \cdot 10^{21}}$	0	0	0	0

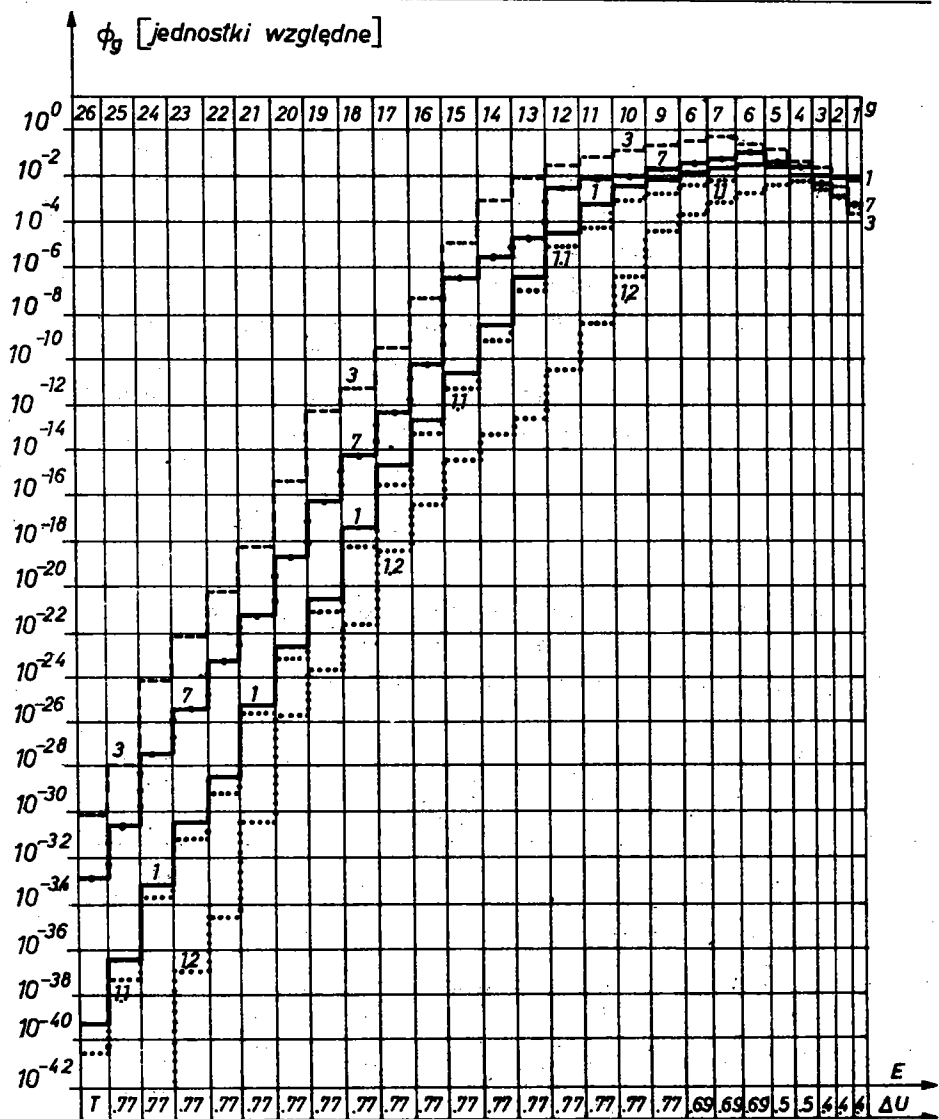
Przedstawione poniżej wyniki badań dotyczą przybliżenia 26-grupowego.

W tabelicy 4.2 zestawiono promienie krytyczne wyliczone dla różnych składów izotopowych rdzenia badanego reaktora, zgodnie z tabelicą 4.1, i ponadto podano wyliczone promienie krytyczne dla reaktora składającego się z czystego $^{92}\text{U}^{235}$ i czystego $^{98}\text{Cf}^{251}$. Minimalny promień krytyczny otrzymano dla reaktora z czystego kalifornu i wynosi on w przybliżeniu 26-grupowym 2,64 cm, a dla reaktora z czystego uranu 235 w tym samym przybliżeniu odpowiednio 7,12 cm. Dla wszystkich innych składów izotopowych rdzenia badanego reaktora promień krytyczny jest większy. Należy zauważyć, iż przekrój czynny na reakcję roz-

T a b l i c a 4.2

Promień krytyczny reaktora jednorodnego dla różnych składów izotopowych rdzenia
Przybliżenie wielogrupowe programem ANISN-W

Skład izotopowy numer	Przybliżenie grup-G	Liczba stref podziału-I	Promień krytyczny R_{kryt} [cm]
1	26	50	7,21
2	26	50	7,268
3	26	50	7,99
4	26	50	8,087
5	26	50	8,171
6	26	50	9,312
7	26	50	8,698
8	26	50	11,696
1.1 (100% $^{92}\text{U}^{235}$)	26	50	7,12
1.2 (100% $^{98}\text{Cf}^{251}$)	26	50	2,64



Rys.4.1. Grupowy strumień neutronów w badanym reaktorze dla różnych składów izotopowych rdzenia. Przybliżenie 26-grupowe. Oznaczenia składów izotopowych: 1 - 90% $^{92}\text{U}^{235}$, 10% $^{92}\text{U}^{238}$; 1.1 - 100% $^{92}\text{U}^{235}$; 1.2 - 100% $^{98}\text{Cf}^{251}$; 3 - 50% $^{92}\text{U}^{235}$, 30% $^{92}\text{U}^{238}$, 10% $^{11}\text{Na}^{23}$, 5% $^{26}\text{Fe}^{56}$, 2% $^{28}\text{Ni}^{60}$, 3% $^{42}\text{Mo}^{92}$; 7 - 50% $^{92}\text{U}^{235}$, 20% $^{92}\text{U}^{238}$, 10% $^{11}\text{Na}^{23}$, 5% $^{26}\text{Fe}^{56}$, 2% $^{28}\text{Ni}^{60}$, 13% $^{41}\text{Nb}^{93}$

szczepienia dla ${}_{98}\text{Cf}^{251}$ jest parokrotnie większy od mikroskopowego przekroju czynnego na rozszczepienie dla ${}_{92}\text{U}^{235}$.

Na rysunku 4.1 przedstawiono niektóre z rozkładów strumienia neutronów w badanym reaktorze. Jak widać, najtwardszy strumień neutronów jest w rdzeniu składającym się z czystego kalifornu (skład nr 1.2), a trochę miękniejszy dla rdzenia z czystego uranu 235 (skład nr 1.1). Z badanych dokładniej ośmiu składów izotopowych rdzenia (tabl.1.1) pokazano na rys.4.1 rozkład strumienia neutronów dla trzech składów izotopowych oznaczonych numerami 1, 3 i 7. Jak widać, składowi izotopowemu nr 1, to jest rdzeniowi reaktora o zawartości 90% ${}_{92}\text{U}^{235}$ i 10% ${}_{92}\text{U}^{238}$, odpowiada strumień neutronów "twardy". Skład izotopowy nr 7, to jest rdzeń reaktora o zawartości:

50% ${}_{92}\text{U}^{235}$, 20% ${}_{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}_{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}_{26}\text{Fe}^{56}$, 2% ${}_{28}\text{Ni}^{60}$ i 13% ${}_{41}\text{Nb}^{93}$

charakteryzuje się mniejszym strumieniem neutronów.

Na szczególną uwagę zasługuje rozkład strumienia neutronów oznaczony numerem 3, to jest dla rdzenia reaktora o zawartości:

50% ${}_{92}\text{U}^{235}$, 30% ${}_{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}_{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}_{26}\text{Fe}^{26}$, 2% ${}_{28}\text{Ni}^{60}$, 3% ${}_{42}\text{Mo}^{92}$.

Widać wyraźnie przesunięcie widma grupowego strumienia neutronów w lewo w kierunku niższych energii neutronów, co pozwala mniemać, iż dla tego właśnie składu izotopowego rdzenia reaktora produkcja transuranowców będzie maksymalna. Dobrze jest dobrany stosunek materiału rozszczepialnego do materiału rodzonego, a dziesięcioprocentowa zawartość sodu powoduje zmiękczenie widma. Niewielkie procentowe zawartości żelaza, niklu i molibdenu, jak się wydaje, mają drugorzędne znaczenie. Należy zauważyć iż nazbyt twardy strumień neutronów w reaktorze jądrowym jest powodem mało wydajnego procesu produkcji transuranowców.

5. WYZNACZANIE KONCENTRACJI TRANSURANOWCÓW W REAKTORZE JĄDROWYM Z PALIWEM URANOWYM W ZALEŻNOŚCI OD SKŁADU IZOTOPOWEGO RDZENIA

5.1. WSTĘP

Po zbadaniu wpływu składu izotopowego reaktora na jakość widma energetycznego neutronów w rdzeniu oceniano, jak wpływa skład izotopowy rdzenia reaktora na przyrost koncentracji transuranowców w jednostce objętości. Przyjmowano tylko te składy izotopowe dla których był spełniony warunek krytyczności. Dla rozwiązania analitycznego równań bilansowych koncentracji dokonano tabelaryzacji funkcji przy pomocy programu BULA [4]. Mikroskopowe przekroje czynne grupowe transuranowców dobierano z tablic 26- grupowych Abagjana [1] i z tablic danych jądrowych NDS-IAEA [17, 19, 20]. Koncentracje początkowe ${}_{92}\text{U}^{235}$ i ${}_{92}\text{U}^{238}$ przyjmowano zgodnie z tabl.4.1.

Grupowy strumień neutronów zgodnie z programem ANISN-W [8] jest normalizowany do jedności, tak by ilość rozszczepień w całej objętości i dla wszystkich grup energii była równa jeden na jednostkę czasu. Pozwala to łatwo dopasować strumień do mocy reaktora, gdyż gęstość rozszczepień i moc są proporcjonalne. Stąd strumień neutronów dla każdej grupy energii mnożono przez tę samą dużą liczbę i taki wykorzystywano w programie BULA. Zmianę w czasie średniej koncentracji transuranowców w rdzeniu badano w okresie dwunastomiesięcznej pracy reaktora. Zakładano, iż w tym czasie strumień neutronów jest stały, co stanowi bardzo duże przybliżenie.

Analizowano, jak wpływa na wielkość produkcji transuranowców:

- wzbogacenie paliwa uranowego,
- zawartość w rdzeniu metalicznego chłodziwa,
- procentowa zawartość w rdzeniu pierwiastków używanych do budowy rdzenia jak: ${}_{26}\text{Fe}^{56}$, ${}_{28}\text{Ni}^{60}$, ${}_{42}\text{Mo}^{92}$, ${}_{40}\text{Zr}^{12}$ i ${}_{41}\text{Nb}^{93}$.

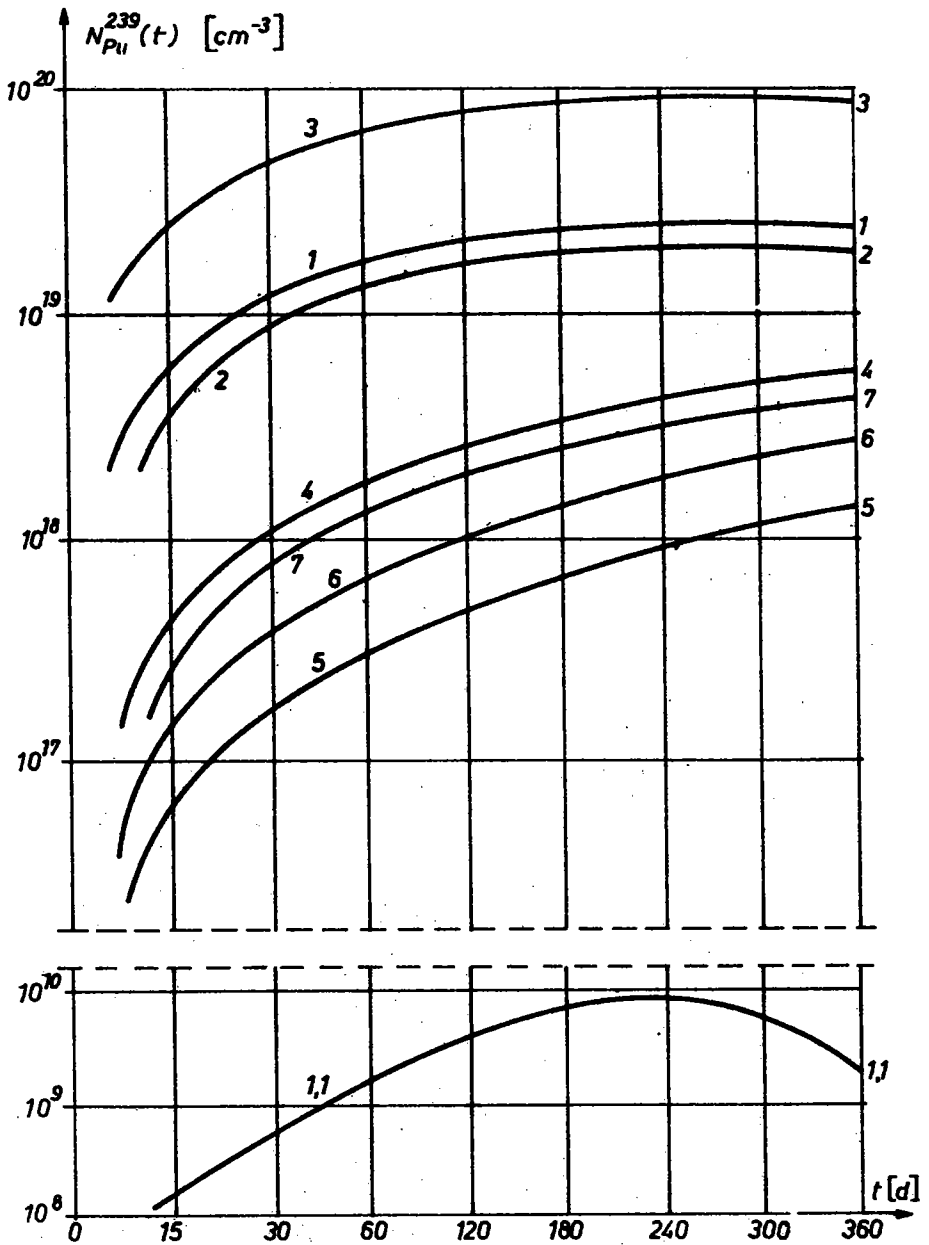
5.2. WYNIKI OBLICZEŃ

Większość otrzymanych wyników obliczeń przedstawiono w opracowaniu [5] w postaci wykresów, gdzie zilustrowano zmianę w czasie średniej koncentracji transuranowców w jednostce objętości badanego reaktora.

Na rys.5.1 podano porównanie wyników obliczeń średniej koncentracji plutonu 239 dla różnych składów izotopowych rdzenia badanego reaktora. Jak widać, najmniejszą koncentrację pluto 239 otrzymuje się dla rdzenia reaktora składającego się z czystego uranu 235 (skład nr 1.1), większą dla rdzenia reaktora składającego się z: 50% ${}_{92}\text{U}^{235}$, 20% ${}_{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}_{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}_{26}\text{Fe}^{56}$, 2% ${}_{28}\text{Ni}^{60}$, 13% ${}_{42}\text{Mo}^{92}$; a największą dla rdzenia reaktora składającego się z: (skł. nr 3): 50% ${}_{92}\text{U}^{235}$, 30% ${}_{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}_{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}_{26}\text{Fe}^{56}$, 2% ${}_{28}\text{Ni}^{60}$, 3% ${}_{42}\text{Mo}^{92}$.

Łatwo zauważyć iż dla składów izotopowych oznaczonych numerami: 1, 2, 4, 6 i 7 (tabl.4.1) otrzymuje się pośrednie wartości koncentracji plutonu 239. Należy dodać iż podobne krzywe otrzymuje się dla pozostałych transuranowców, co pokazano w opracowaniu [5].

Analizując rys.5.1 i tabl.4.1 widzi się, iż o wielkości produkcji transuranowców decyduje stosunek materiału rozszczepialnego do materiału rodnego jest to: ${}_{92}\text{U}^{235}$ do ${}_{92}\text{U}^{238}$, sód ${}_{11}\text{Na}^{23}$ powoduje zmiękczenie widma strumienia neutronów, a niewielka procentowa zawartość materiałów konstrukcyjnych rdzenia reaktora, jak się wydaje, ma znaczenie drugorzędne. Rzecz jasna, biorąc pod uwagę jednostkę objętości rdzenia reaktora jądrowego, materiałów konstrukcyjnych nie może być dużo, gdyż mają one własności pochłaniające i nie uzyska się krytyczności reaktora. Z tych względów w badanym reaktorze jednorodnym zawartość materiału rozszczepialnego, to jest ${}_{92}\text{U}^{235}$, musi wynosić około 50% w jednostce objętości, by układ mógł osiągnąć krytyczność. W tabelicy 5.1 przedstawiono ubytek w % ${}_{92}\text{U}^{235}$ i ${}_{92}\text{U}^{238}$, to jest dwóch materiałów źródłowych (rys.2.1 i 2.2), po okresie dwunastu miesięcy pracy reaktora. Jak widać, dla większości składów izotopowych rdze-



Rys.5.1. Zmiana koncentracji ${}^{94}\text{Pu}^{239}$ w jednostce objętości badanego reaktora. Przybliżenie 26-grupowe. Oznaczenia składów izotopowych:

- 1 - 90% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 10% ${}^{92}\text{U}^{238}$
- 1.1 - 100% ${}^{92}\text{U}^{235}$
- 2 - 80% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 10% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$
- 3 - 50% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 30% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}^{26}\text{Fe}^{56}$,
2% ${}^{28}\text{Ni}^{60}$, 3% ${}^{42}\text{Mo}^{92}$
- 4 - 50% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 25% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}^{26}\text{Fe}^{56}$,
2% ${}^{28}\text{Ni}^{60}$, 8% ${}^{42}\text{Mo}^{92}$
- 5 - 50% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 20% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}^{26}\text{Fe}^{56}$,
2% ${}^{28}\text{Ni}^{60}$, 13% ${}^{42}\text{Mo}^{92}$
- 6 - 50% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 20% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}^{26}\text{Fe}^{56}$,
2% ${}^{28}\text{Ni}^{60}$, 13% ${}^{40}\text{Zr}^{92}$
- 7 - 50% ${}^{92}\text{U}^{235}$, 20% ${}^{92}\text{U}^{238}$, 10% ${}^{11}\text{Na}^{23}$, 5% ${}^{26}\text{Fe}^{56}$,
2% ${}^{28}\text{Ni}^{60}$, 13% ${}^{41}\text{Nb}^{93}$

nia reaktora ubytek ten wynosi parę procent. W przypadku składów izotopowych nr 1 i nr 3 tak nie jest (tabl.5.1 i ubytek materiału rozszczepialnego i rodnoego wynosi w okresie 12 miesięcy kilkadziesiąt procent. Związana z tym jest znaczna pro-

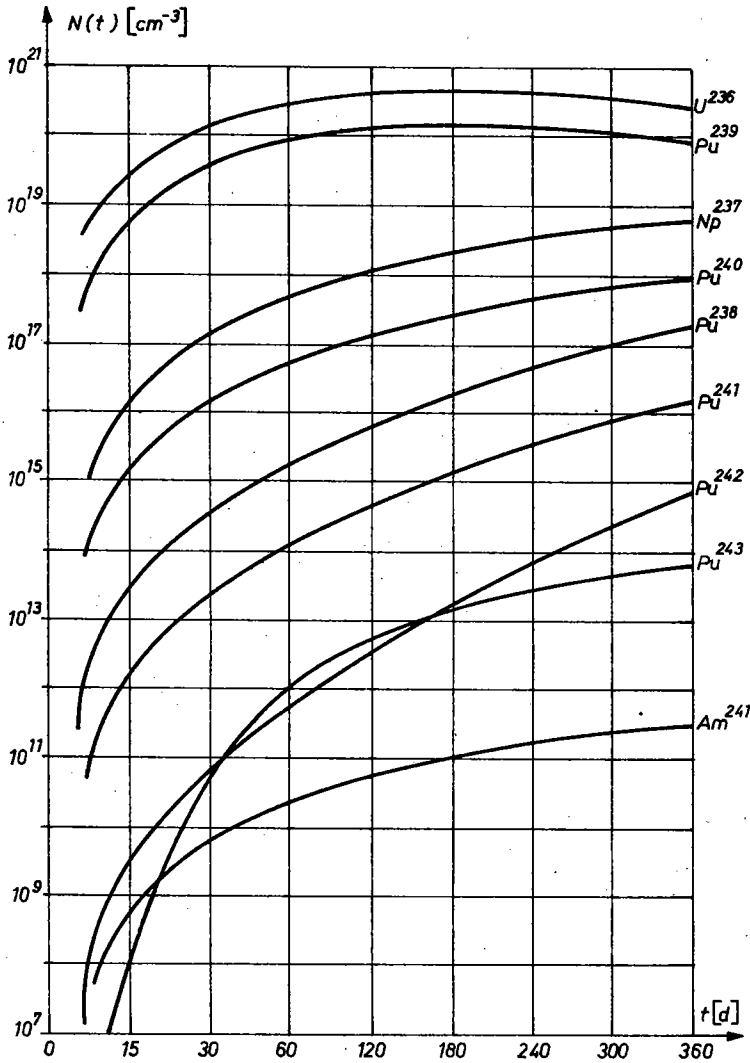
T a b l i c a 5.1

Ubytek ${}^{92}\text{U}^{235}$ i ${}^{92}\text{U}^{238}$ w okresie dwunastomiesięcznego wypalania paliwa

Skład izotopowy numer	Ubytek ${}^{92}\text{U}^{235}$ i ${}^{92}\text{U}^{238}$ [%]		
	Przybliżenie grup	${}^{92}\text{U}^{235}$	${}^{92}\text{U}^{238}$
1	26	52,40	53,00
1.1	26	0,61	-
2	26	55,80	55,90
3	26	70,50	63,50
4	26	1,22	1,24
5	26	1,23	0,27
6	26	1,27	0,07
7	26	1,10	0,07
8	26	1,09	0,62

dukcja transuranowców, co widać wyraźnie na rys.5.1 na przykładzie analizy zmiany w czasie koncentracji plutonu 239. Dotyczy to zwłaszcza składu izotopowego nr 3.

Na rysunku 5.2 dla najlepszego składu izotopowego rdzenia reaktora, to jest dla składu izotopowego numer 3, przedstawiono zmianę w czasie koncentracji wszystkich dziewięciu badanych transuranowców również w przybliżeniu 26-grupowym. Jak widać, największy przyrost średniej koncentracji transuranowców w rdzeniu reaktora jądrowego ma miejsce w ciągu pierwszych kilkunastu dni jego pracy, po załadunku świeżym materiałem rozszczepialnym i rodnoym. Przeładunek paliwa w reaktorze jądrowym służącym do produkcji transuranowców odbywa się w sposób ciągły, względnie kampania paliwowa trwa krótko. Jak wi-



Rys.5.2. Zmiana koncentracji transuranowców w jednostce objętości badanego reaktora. Przybliżenie 26-grupowe, skład izotopowy numer 3, o zawartości procentowej: ${}_{92}U^{235}$ - 50, ${}_{92}U^{238}$ - 30, ${}_{11}Na^{23}$ - 10, ${}_{26}Fe^{56}$ - 5, ${}_{28}Ni^{60}$ - 2, ${}_{42}Mo^{92}$ - 3

T a b l i c a 5.2

Procentowa zawartość transuranów w badanych reaktorze, wyliczana w odniesieniu do zmiennej
w czasie koncentracji U92-235. Skład izotopowy nr 3

t [d]	$X_j = \frac{X_i(t)}{X_1(t)} 100$ [%], gdzie: $i = 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11$										
	X_2	X_3	X_4	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}		
15	0,149	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$3,7 \cdot 10^{-11}$		
30	0,299	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$5,7 \cdot 10^{-11}$	$3,9 \cdot 10^{-11}$		
60	0,596	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$9,0 \cdot 10^{-10}$	$8,0 \cdot 10^{-11}$		
90	0,983	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$		
120	1,187	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$7,9 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$		
150	1,549	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$		
180	1,791	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$		
210	2,086	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$		
240	2,362	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$		
270	2,670	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$		
300	2,970	$5,5 \cdot 10^{-2}$	1,066	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$		
330	3,263	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	1,170	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$		
360	3,553	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	1,270	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$		

dać, koncentracja plutonu 239 początkowo narasta, a po 180 dniach pracy reaktora zaczyna maleć. Tak jest i dla pozostałych transuranowców, z tym że maksimum wypada dla różnych czasów pracy reaktora.

W tablicy 5.2 podano procentową zawartość transuranowców odniesioną do zmiennej czasie koncentracji ${}_{92}\text{U}^{235}$. Jak widać, największą koncentrację osiągają ${}_{92}\text{U}^{236}$ i ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, a najmniejszą ${}_{94}\text{Pu}^{243}$. Tak jest, ponieważ ${}_{92}\text{U}^{236}$ powstaje bezpośrednio z ${}_{92}\text{U}^{235}$ w wyniku reakcji (n, γ) , a ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ powstaje w wyniku kolejnych reakcji z ${}_{92}\text{U}^{235}$ i ${}_{92}\text{U}^{238}$. Aby powstał ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, musi najpierw powstać jego poprzednik w łańcuchu przemian i reakcji jądrowych. Stąd koncentracja ${}_{94}\text{Pu}^{243}$ jest relatywnie mała w porównaniu do koncentracji jego poprzedników w łańcuchu. Jak wiadomo, pierwiastki o liczbach atomowych większych od 94 powstają w reaktorze jądrowym w ilościach śladowych. Są one przedmiotem intensywnych badań, gdyż odznaczają się bardzo ciekawymi własnościami jądrowymi. Ostatnim znanym pierwiastkiem jest pierwiastek o liczbie atomowej 109.

6. WNIOSKI

Przedstawiona procedura badania wpływu składu izotopowego rdzenia reaktora jądrowego na wielkość produkcji transuranowców może być wykorzystywana podczas prac studialnych przy projektowaniu rdzeni reaktorów mnożących. Jest to metoda pracochłonna wymagająca dostępu do nowoczesnych maszyn cyfrowych. Jak wiadomo, produkcja transuranowców będzie tym większa, im większa będzie ilość reakcji (n, γ) w uranie 238 i w izotopach plutonu. Te ostatnie mają mikroskopowy przekrój czynny na reakcję (n, γ) o silnej strukturze rezonansowej, a szczyty rezonansowe są poprzesuwane względem siebie dla różnych izotopów. Badania potwierdziły, iż nie jest łatwo odpowiedzieć na pytanie, jaki rozkład strumienia neutronów w rdzeniu reaktora jest optymalny, by produkcja izotopów plutonu była mak-

symalna. Tym bardziej że dobór różnej kompozycji izotopowej rdzenia jest ograniczony warunkiem $k_{ef} \geq 1$, który to warunek nie jest łatwo spełnić. W wyniku wstępnych badań otrzymano skład izotopowy, któremu odpowiada największa produkcja transuranowców, to jest rdzeń o zawartości:

50% - ${}_{92}\text{U}^{235}$

30% - ${}_{92}\text{U}^{238}$

10% - ${}_{11}\text{Na}^{23}$

5% - ${}_{26}\text{Fe}^{26}$

2% - ${}_{28}\text{Ni}^{60}$

3% - ${}_{42}\text{Mo}^{92}$

W następnym etapie badań należałoby ten skład dokładniej przebadać zmieniając nieznacznie udział procentowy poszczególnych izotopów.

Jak widać z wykresu (rys.5.2), największe znaczenie jako produkowany sztucznie materiał rozszczepialny ma pluton 239, gdyż jest go w jednostce objętości badanego reaktora najwięcej. Mniejsze znaczenie ma pluton 241, gdyż jego koncentracja w jednostce objętości jest około 10 000 razy mniejsza aniżeli plutonu 239. Najmniejsze znaczenie ma pluton 243, gdyż jego koncentracja w jednostce objętości badanego reaktora jest około milion razy mniejsza od koncentracji plutonu 239. Jak widać, najważniejsze jest to co się dzieje na początku łańcucha przemian i reakcji jądrowych dla paliwa uranowego (rys. 2.1). Należy zaznaczyć, iż stosowana w badaniach metoda dyskretnych współrzędnych S_M nie jest wolna od błędów [15] i dla niektórych przypadków strumień neutronów był ujemny, co utrudniało badania [3].

Na koniec należy zauważyć iż byłoby rzeczą ciekawą przebadać, jak wpływają na produkcję transuranowców rezonanse w izotopach plutonu i uranu.

BIBLIOGRAFIA

1. Abagjan L.P. i inni: Gruppowyje konstanty dla rasczeta jadiernych reaktorow. Atomizdat, Moskwa (1964).

2. Adamski J.: Optimization of breeding gain and sodium void reactivity coefficient in the fast reactors core. MIT, (February 1975) - Unpublished.
3. Adamski J.: Transport neutronów i fotonów gamma w powietrzu. Biuletyn Informacyjny ITC PW Nr 57, (1980).
4. Adamski J.: Wyznaczanie strumienia neutronów w reaktorze jądrowym z paliwem uranowym o zmiennym składzie izotopowym rdzenia reaktora. Praca wykonana w CPRP Nr 02.18. kier.4, Zad.4.3.1.2 (1986).
5. Adamski J.: Wyznaczanie koncentracji transuranowców w reaktorze jądrowym o zmiennym składzie izotopowym rdzenia. (Grudzień 1987). Praca wykonana w ramach Centralnego Planu Badań Podstawowych. Nr 02.18. Kierunek 4. Zadanie 4.3.1.2.
6. Adamski J.: Paliwa i gospodarka paliwowa w E.J. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Nr 57. (1986).
7. Adamski J., Kiełkiewicz M.: Zbiór zadań z podstaw fizyki reaktorów jądrowych. WFW, Warszawa 1981.
8. ANISN-W. Multigroup one dimensional discrete ordinates transport code with anisotropic scattering. CCC - 225 (1975).
9. Benchmark problem book. ANL-7416-TID-4500. (1968).
10. Carlson B.G.: On more precise definition of the discrete ordinates method. CONF-710107, p.p.348 - 390 (1971).
11. Dahlberg R.C.: Alternative cycles and fast breeders, a look to the future. Nuclear Eng. International (November 1979).
12. Duderstadt J.J., Hamilton L.J.: Nuclear reactor analysis. John Wiley and Sons, New York-Toronto, 1976.
13. Engle W.W.: A users manuel for ANISN - a one dimensional discrete ordinates transport code with anisotropic scattering. Oak Rodge, K-1963 (1967).
14. Greenspan M., Kelber C.N., Okrent D.: Computing methods in reactor physics. Gordon and Breach Science Publishers, Inc., New York 1963.
15. Kiełkiewicz M.: Teoria reaktorów jądrowych. PWN, Warszawa 1987.
16. Lathrop K.D.: Discrete - ordinates methods for the numerical solution of the transport equation. Reactor Technology, Vol.15, No 2 p.p.107-135 (1972).
17. Transactin'um isotope nuclear data. IAEA - TECDOC - 232 (1979).
18. Izanoz C.P. et al.: Optimisation of material distributions in fast reactor cores. Nucl. Science and Eng. 52, p.p. 84-94 (1973).
19. Voropaev A.I.: Group neutron fission and radiative-capture crosssection for transactinides.
20. IAEA Nuclear Data Section. INDC (CCP)-149/LV. (June 1980).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСУРАНИДОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ
С УРАНОВЫМ ТОПЛИВОМ

А н н о т а ц и я

Определяется средняя концентрация трансуранидов в ядерном реакторе в зависимости от изотопного состава в рабочей области реактора с урановым топливом.

Исследуется, как влияет изменение изотопного состава рабочей области реактора на качество энергетического спектра нейтронов в реакторе. Исследования проводились с учетом многогруппового приближения по методу S_M и вычислительного кода ANISN-W.

Для выбранных спектров нейтронов вычисляется, при помощи кода BULA, средняя концентрация трансуранидов в рабочей области реактора.

Приводится изотопный состав рабочей области ядерного реактора, соответствующий максимальному производству трансуранидов в исследуемом реакторе.

THE TRANSURANIUM ISOTOPES PRODUCTION IN THE NUCLEAR
REACTOR WITH THE DIFFERANT ISOTOPES COMPOSITION
OF THE REACTOR CORE

S u m m a r y

The transuranium isotopes production in the homogeneous critical nuclear reactor with different isotopes mixture has been analysed. The influence of the isotopes mixture on the transuranium concentration growth has been shown. ANISN-W code has been used to calculate the neutron flux, and BULA code has been used to calculate the transuranium concentration growth.