

Mirosław Archutowski, Marian Kielkiewicz

Instytut Techniki Ciepłej

OBLICZENIA MOCY POWYŁĄCZENIOWEJ W TERMICZNYCH REAKTORACH JĄDROWYCH

Przeprowadzono obliczenia mocy generowanej w termicznych reaktorach jądrowych w wyniku rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia. Przedstawiono wyniki obliczeń dla 350 izotopów promieniotwórczych będących elementami 91 łańcuchów izobarów o liczbach masowych zawartych w przedziale od 72 do 162. Uzyskane wyniki są zgodne z publikowanymi uprzednio.

WYKAZ OZNACZEŃ

- A - liczba masowa
- E - średnia energia przekazywana materii ośrodka przez emitowane promieniowanie jądrowe [J]
- E_{β} - średnia energia promieniowania β [J]
- E_{γ} - średnia energia promieniowania γ [J]
- k_{ji} - udział nuklidu j w tworzeniu nuklidu i [-]
- N - koncentracja nuklidu [m^{-3}]
- P - moc generowana przez promieniowanie w jednostce objętości rdzenia [$W \cdot m^{-3}$]
- t_0 - czas pracy reaktora [s]
- t_1 - czas po wyłączeniu reaktora [s]
- Y - wydajność nuklidu z rozszczepienia [-]
- ϕ - średni strumień neutronów termicznych w rdzeniu reaktora [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
- λ - stała rozpadu nuklidu [s^{-1}]
- σ_a - mikroskopowy przekrój czynny na absorpcję [m^2]
- Σ_f - makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie [m^{-1}]

1. WSTĘP

W trakcie rozszczepienia jądro izotopu rozszczepialnego (np. ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu) dzieli się na dwa jądra zwane fragmentami rozszczepienia. Fragmenty rozszczepienia są w stanie wzbudzonym i dają początek łańcuchom rozpadów promieniotwórczych. Elementy tych łańcuchów noszą nazwę produktów rozszczepienia. Produkty rozszczepienia ulegają rozpadom promieniotwórczym, najczęściej z emisją cząstek β i fotonów γ .

Rozpad β polega na emisji z jądra atomu elektronu zwanego cząstką β . Jeden z neutronów w jądrze rozpada się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe. Energia rozpadu dzieli się między emitowane z jądra cząstki, tj. elektron i antyneutrino elektronowe. Stąd wynika ciągle widmo energetyczne cząstek β . Cząstki β mogą mieć dowolne energie zawarte w przedziale między zerem a pewną energią maksymalną E_m . Jeśli rozpad β zachodzi do różnych poziomów energetycznych jądra końcowego, to istnieje kilka wartości energii E_m . Rozpadowi β towarzyszy najczęściej emisja fotonów γ o dyskretnym widmie energetycznym.

Okresy półrozpadu produktów rozszczepienia zawierają się w bardzo szerokich granicach od kilku sekund do wielu lat.

Powstałe w czasie pracy reaktora jądrowego produkty rozszczepienia po jego wyłączeniu ulegają rozpadowi promieniotwórczemu. Emitowane cząstki β i fotony γ przekazują swoją energię ośrodkowi materialnemu. Powstające w ten sposób ciepło nosi nazwę ciepła powyłączeniowego. Istnieje zatem konieczność odbioru ciepła powyłączeniowego z rdzenia reaktora jądrowego.

Znajomość wartości ciepła powyłączeniowego w reaktorze jądrowym jest niezbędna dla zapewnienia jego bezpiecznej eksploatacji oraz dla analizy stanów awaryjnych.

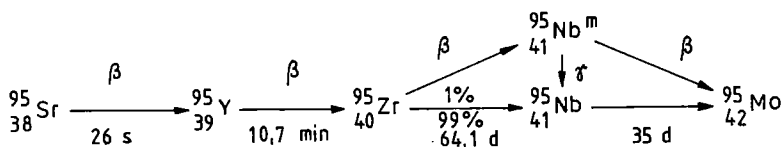
Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie wielkości ciepła powyłączeniowego w termicznych reaktorach jądrowych korzystając z podstawowych danych fizycznych dotyczących produktów rozszczepienia. Obliczenia przeprowadzono uwzględniając rozszczepienia i absorpcje wywołane przez neutrony termiczne oraz biorąc pod uwagę jeden tylko izotop rozszczepialny, a mianowicie ^{235}U .

2. ŁAŃCUCHY PRZEMIAN PROMIENIOTWÓRCZYCH PRODUKTÓW ROZSZCZEPIENIA

W olbrzymiej większości łańcuchów przemian promieniotwórczych produktów rozszczepienia występują rozpady β . W trakcie rozpadu β

całkowita liczba nukleonów w jądrze, czyli liczba masowa A pozostaje niezmienna, natomiast liczba protonów w jądrze, czyli liczba atomowa Z wzrasta o jedność. W łańcuchach takich występują zatem izobary, tj. nuklidy o tej samej liczbie masowej. Liczba masowa jest więc identyfikatorem danego łańcucha przemian promieniotwórczych produktów rozszczepienia.

Na rys.1 przedstawiono dla przykładu łańcuch izobarów o liczbie masowej 95. Pierwszy izobar w łańcuchu powstaje w wyniku rozszcze-



Rys.1. Rozpad promieniotwórczy izobarów łańcucha 95

pienia jądra izotopu rozszczepialnego, natomiast każdy następny - zarówno w wyniku rozszczepienia, jak i rozpadu promieniotwórczego jądra izobaru poprzedniego. Łańcuchy przemian promieniotwórczych produktów rozszczepienia przedstawione są w wielu publikacjach. W niniejszej pracy oparto się na danych zaczerpniętych z [1]. Rozpatrzono 91 łańcuchów izobarów o liczbach masowych zawartych w przedziale od 72 do 162. Występuje w nich 441 nuklidów. Ostatni izobar w łańcuchu jest zawsze nuklidem trwałym; zatem rozpadowi promieniotwórczemu ulega 350 nuklidów. W każdym łańcuchu występuje od 2 do 8 izobarów.

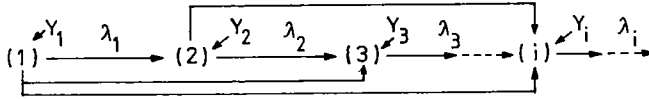
Warto zwrócić uwagę na istnienie połączeń między łańcuchami, które wynikają stąd, że izobary danego łańcucha mogą powstać również w wyniku absorpcji neutronów w jądrach izobarów łańcucha o liczbie masowej mniejszej o jedność. W niniejszej pracy nie ujęto takich połączeń ponieważ ich wpływ na wyniki obliczeń jest niewielki, a ich uwzględnienie skomplikowałoby znacznie obliczenia.

3. OBLICZENIA KONCENTRACJI PRODUKTÓW ROZSZCZEPIENIA

W celu obliczenia mocy powyłączeniowej konieczne jest określenie koncentracji produktów rozszczepienia w rdzeniu reaktora. Przeglądając łańcuchy produktów rozszczepienia łatwo zauważyć, że można je przedstawić w ogólnej postaci, jak pokazano na rys.2. Z powyższego rysunku widać, że dany izobar powstaje w wyniku rozszczepienia oraz w wyniku rozpadu swoich poprzedników. Zakładając, że: a) reaktor pracuje w stanie ustalonym, b) w paliwie jądrowym występuje tylko jeden izotop rozszczepialny (np. ^{235}U) oraz, że reakcje jądrowe wywo-

ływane są tylko przez neutrony termiczne, równania bilansowe koncentracji produktów rozszczepienia można napisać w postaci:

$$N_i = y_i \sum_f \Phi + \sum_{j=1}^{i-1} k_{ji} \lambda_j N_j - (\lambda_i + \sigma_{ai} \Phi) N_i \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (1)$$



Rys.2. Schemat łańcucha rozpadów promieniotwórczych: Y_i - wydajność i-tego izobaru z rozszczepienia λ_i - stała rozpadu i-tego izobaru

Warunki początkowe mają postać:

$$N_i(0) = N_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (2)$$

Układ równań (1) można przedstawić w postaci:

$$N_i = f_i + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ji} N_j - a_{ii} N_i \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (1^*)$$

gdzie:

$$f_i = Y_i \sum_f \Phi \quad (3)$$

$$a_{ji} = k_{ji} \lambda_j \quad (4)$$

$$a_{ii} = \lambda_i + \sigma_{ai} \Phi \quad (5)$$

Jest to układ równań różniczkowych zwyczajnych liniowych o stałych współczynnikach. Koncentracje N_i można przedstawić w postaci kombinacji liniowych funkcji wykładniczych.

W niniejszej pracy zastosowano zmodyfikowany algorytm analitycznego rozwiązania równań (1*) zaproponowany w pracy [2], a mianowicie:

$$N_i(t) = \frac{G_i - b_i e^{-a_{ii} t} - W_i(t)}{a_{ii}} \quad (6)$$

gdzie:

$$b_i = G_i - a_{ii} N_{i0} \quad (7)$$

$$G_i = f_i + \sum_{j=1}^{i-1} H_{ji} \quad (8)$$

$$H_{ji} = \frac{a_{ji} G_j}{a_{jj}} \quad (9)$$

$$Z_{ji} = \frac{a_{ji}}{a_{jj}} \quad (10)$$

$$R_{ji} = \begin{cases} \frac{a_{jj}}{a_{ii} - a_{jj}} \sum_{n=1}^{i-1} Z_{i-n,i} R_{j,i-n} & j \neq i \\ b_i - \sum_{n=1}^{i-1} R_{i-n,i} & j = i \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{ji}(t) = e^{-a_{jj}t} - e^{-a_{ii}t} \quad (12)$$

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^{i-1} R_{ji} S_{ji}(t) \quad (13)$$

4. OBLICZENIA MOCY GENEROWANEJ PRZEZ PROMIENIOTWÓRCZE PRODUKTY ROZSZCZEPIENIA

Promieniotwórcze produkty rozszczepienia emitują cząstki β i fotony γ , które przekazują swoją energię ośrodkowi materialnemu. W celu określenia mocy generowanej w ten sposób przez i -ty izobar łańcuchą należy pomnożyć liczbę rozpadów zachodzących w rozpatrywa-

nej objętości w ciągu sekundy przez średnią energią przekazywaną przez emitowane promieniowanie ośrodkowi materialnemu.
Zatem

$$P_i(t) = \lambda_i N_i(t) E_i \quad (14)$$

gdzie

$$E = E_\beta + E_\gamma \quad (15)$$

Średnie wartości energii E_β i E_γ można wyznaczyć, gdy znane są widma energetyczne cząstek β i fotonów γ .

Moc generowana przez wszystkie rozpatrywane izobary w jednostce objętości równa się

$$P(t) = \sum_{i=1}^I P_i(t) \quad (16)$$

Do wykonania wyżej omówionych obliczeń konieczna jest znajomość danych jądrowych takich, jak mikroskopowe przekroje czynne, stałe rozpadu, wydajności z rozszczepienia, średnie energie promieniowania β i γ itd.

Źródłem tych informacji są biblioteki danych jądrowych opracowane w różnych krajach. Jedną z najpowszechniej stosowanych w świecie bibliotek danych jądrowych jest biblioteka ENDF (Evaluated Nuclear Data File) opracowana w Stanach Zjednoczonych. Jest ona systematycznie uaktualniana. Obecnie jest dostępna wersja ENDF/B-V. W niniejszej pracy wykorzystano tę właśnie bibliotekę przedstawioną w opracowaniu [3].

Wykorzystując wyżej przedstawione równania sporządzono program komputerowy, który pozwala na obliczanie takich wielkości, jak:

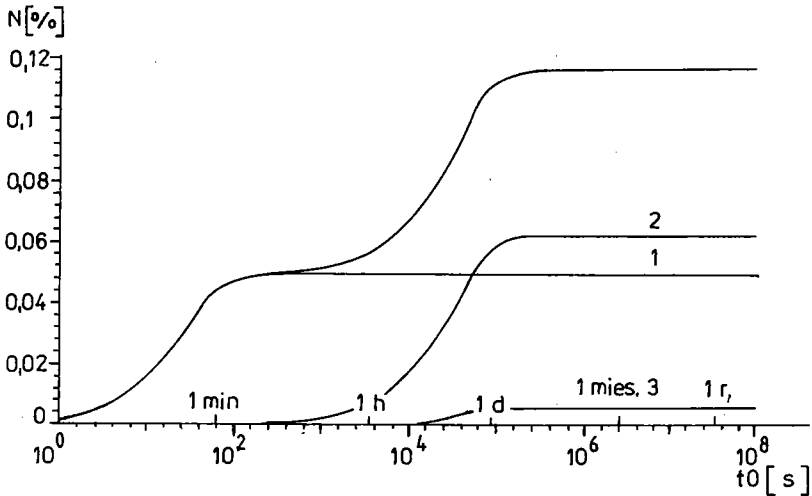
- koncentracja produktów rozszczepienia,
- moc i ciepło generowane przez produkt rozszczepienia.

Wielkości te mogą być obliczane dla dowolnego czasu pracy reaktora oraz w dowolnym czasie po jego wyłączeniu.

Obliczenia przeprowadzono dla 91 łańcuchów izobarów o liczbach masowych w przedziale od 72 do 162. Występuje w nich 441 nuklidów, w tym 350 izotopów promieniotwórczych.

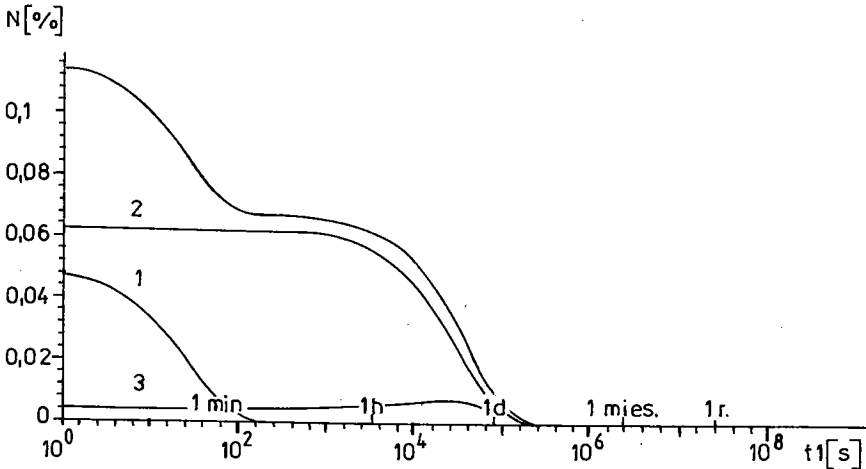
5. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia mocy generowanej przez produkty rozszczepienia ²³⁵U wykonano przyjmując następujące założenia:



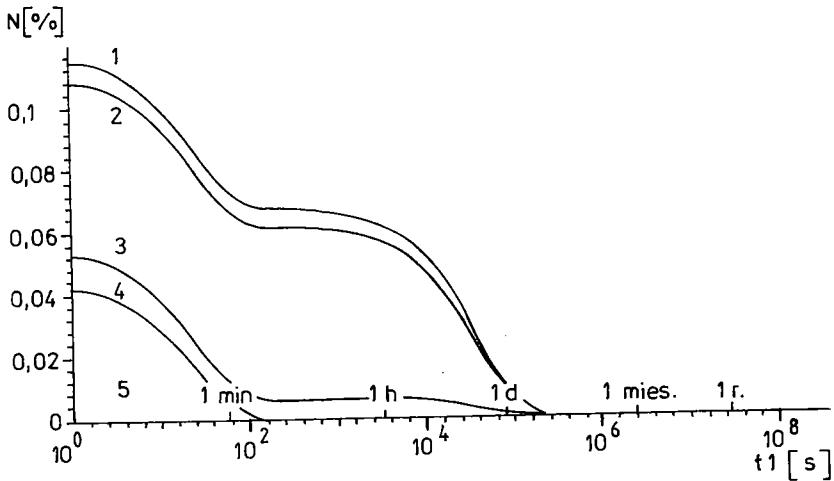
Rys.3. Zredukowana moc promieniowania całego łańcucha 135 oraz jego izobarów w zależności od czasu pracy reaktora t_0 :

1 - $^{135}_{52}\text{Te}$, 2 - $^{135}_{53}\text{I}$, 3 - $^{135}_{54}\text{Xe}$

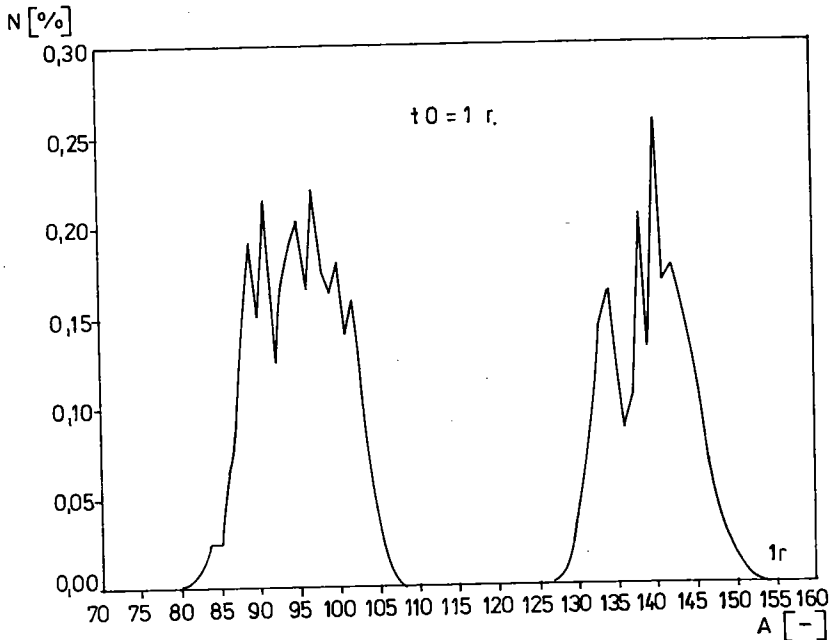


Rys.4. Zredukowana moc powyłączeniowa całego łańcucha 135 oraz jego izobarów w zależności od czasu po wyłączeniu reaktora t_1

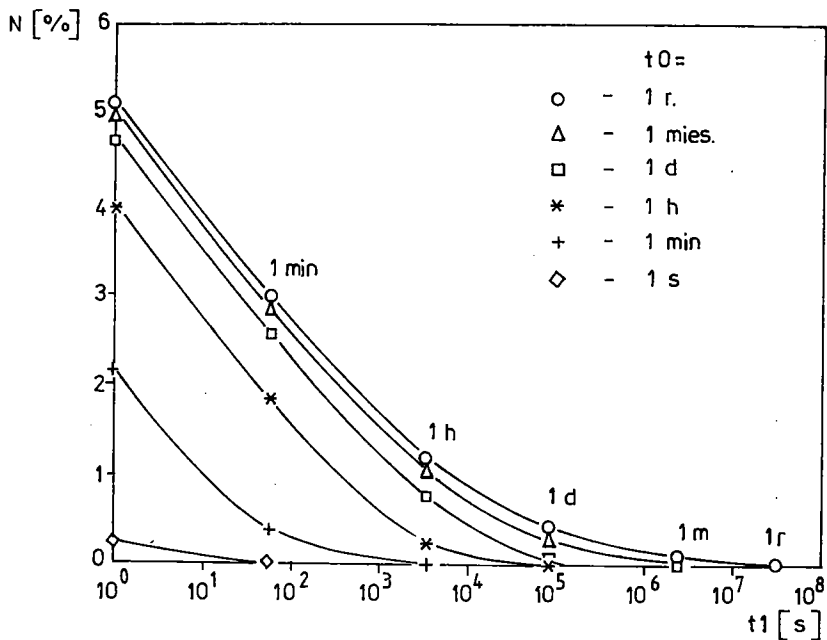
($t_0 = 1$ rok): 1 - $^{135}_{52}\text{Te}$, 2 - $^{135}_{53}\text{I}$, 3 - $^{135}_{54}\text{Xe}$



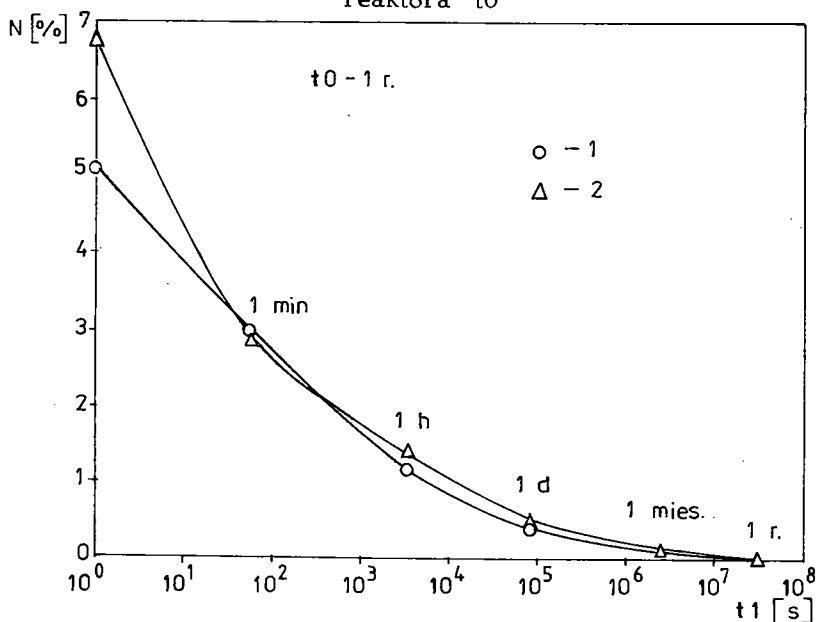
Rys.5. Zredukowana moc powyłączeniowa łańcucha 135 w zależności od czasu po wyłączeniu reaktora t_1 dla różnych wartości czasu jego pracy t_0 : 1 - $t_0 > 3$ d, 2 - $t_0 = 1$ d, 3 - $t_0 = 1$ h, 4 - $t_0 = 1$ min, 5 - $t_0 = 1$ s



Rys.6. Zredukowana moc promieniowania reaktora w chwili wyłączenia ($t_0 = 1$ rok) dla różnych łańcuchów rozpadów promieniotwórczych



Rys.7. Zredukowana moc powyłączeniowa reaktora w funkcji czasu po wyłączeniu t_1 dla różnych wartości czasu pracy reaktora t_0



Rys.8. Porównanie wyników obliczeń mocy powyłączeniowej reaktora otrzymanych w niniejszej pracy (krzywa 1) oraz ze wzoru 17 (krzywa 2) w funkcji czasu po wyłączeniu reaktora t_1

- izotopem rozszczepialnym jest ^{235}U ,
- wzbogacenie paliwa jądrowego - 3%,
- strumień neutronów termicznych - $\Phi = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,
- czas pracy reaktora - $t_0 = 1$ rok.

Ostatnie założenie oznacza, że wartości początkowe dla stanu po wyłączeniu reaktora są równe odpowiednim wartościom uzyskanym po roku pracy reaktora.

Pełny zestaw wyników obliczeń przedstawiono w opracowaniach [5,6]. W niniejszej pracy zamieszczono jedynie niektóre z nich.

Na rys.3, 4 i 5 pokazano przebieg mocy generowanej w wyniku rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia należących do łańcucha izobarów o liczbie masowej 135, zarówno w czasie pracy reaktora, jak i po jego wyłączeniu. Moc wyrażono w odniesieniu do mocy generowanej przed wyłączeniem reaktora w wyniku rozszczepienia jąder izotopu rozszczepialnego ^{235}U .

Na rys.6 przedstawiono zależność mocy generowanej przez produkty rozszczepienia w zależności od ich liczby masowej. Widać, że znaczący udział w mocy powyłączeniowej mają jedynie izobary o liczbach masowych zawartych w przedziale między 80 i 107 oraz między 123 i 153. Przedstawiony wykres przypomina rozkład wydajności fragmentów rozszczepienia, co świadczy o ich istotnym wpływie na moc generowaną w wyniku rozpadu promieniotwórczego produktów rozszczepienia.

Na rysunku 7 pokazano zależność mocy generowanej w wyniku rozpadu wszystkich produktów rozszczepienia (tj. dla 91 łańcuchów) w funkcji czasu po wyłączeniu i dla różnych czasów pracy reaktora przed wyłączeniem.

Na rysunku 8 porównano wyniki obliczeń mocy powyłączeniowej reaktora otrzymane w niniejszej pracy z wartościami obliczonymi ze wzoru [4]:

$$\frac{P}{P_0} = 0,07 \left[t_1^{-0,2} - (t_0 + t_1)^{-0,2} \right] \quad (17)$$

gdzie: P i P_0 - moc reaktora odpowiednio po wyłączeniu i przed wyłączeniem.

Na zakończenie warto podkreślić, że opracowany program komputerowy może być wykorzystany do analizy generacji mocy powyłączeniowej w różnych warunkach eksploatacyjnych i awaryjnych reaktorów termicznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Gangrskij J.P., Dałchsuren B., Markow B.N.: Oskołki dielenja jadier. Energiatomizdat, Moskwa 1986.
2. Zacharowa S.M.: O riesenii sistemy diffierencjalnych urawnienij opisujuszczich izmienie koncentracji produktow dielenja w rieaktorze. Fiziko-Energieticzeskij Institut, Obninsk 1969.

3. Walker W.H., Hebert A.: An expanded fission product accumulation program using ENDF/B-V Decay Data. Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario 1982.
4. Kuzniecowa N.M. i inni: Energetyczne obрудование блоков AES. Maszynostrojenie, Leningrad 1987.
5. Archutowski M., Kielkiewicz M.: Opracowanie metodyki obliczeń ciepła powyłączeniowego w elementach paliwowych reaktora. Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej (Oprac. nie publikowane) 1987.
6. Archutowski M., Kielkiewicz M.: Analiza wytwarzania produktów rozszczepienia w rdzeniu reaktora oraz ich uwalniania z obiegu chłodzenia w warunkach awaryjnych. Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej (Oprac. nie publikowane) 1988.

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Приводятся результаты вычисления мощности, генерируемой в ядерных реакторах на тепловых нейтронах в результате радиоактивного распада осколков деления. Приводятся результаты вычислений для 350 радиоактивных изотопов, являющихся элементами 91 цепочек изобар с массовыми числами в интервале от 72 до 162. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными данными.

CALCULATIONS OF SHUTDOWN POWER IN THERMAL NUCLEAR REACTORS

Summary

The calculations of power generated in thermal nuclear reactors as a result of radioactive decay of fission products have been performed. The results of calculations for 350 radioactive isotopes being elements of 91 chains of isobars with mass numbers in the range from 72 to 162 have been presented. The obtained results are in a good agreement with those published previously.