

Tomasz BURY, Jan SKŁADZIENI
Politechnika Śląska, Gliwice

CYKLE PALIWOWE W TERMICZNYCH REAKTORACH JĄDROWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono przebieg reaktorowego cyklu paliwowego, tj. czasową zmienność koncentracji izotopów paliwowych i powstałych z nich innych izotopów ciężkich oraz wybranych izotopów związanych z produktami rozszczepienia. Podano ogólne równanie bilansu izotopów dla modelu punktowego, jak też – w odniesieniu do neutronów – jednogrupowego. Zaprezentowano dokładne i uproszczone łańcuchy przemian izotopowych dla reaktora uranowo-plutonowego oraz torowo-uranowego. Rozważania zilustrowano wynikami przykładowych obliczeń liczbowych o charakterze porównawczym zrealizowanych dla dwóch rzeczywistych reaktorów jądrowych.

FUEL CYCLES IN THERMAL NUCLEAR REACTORS

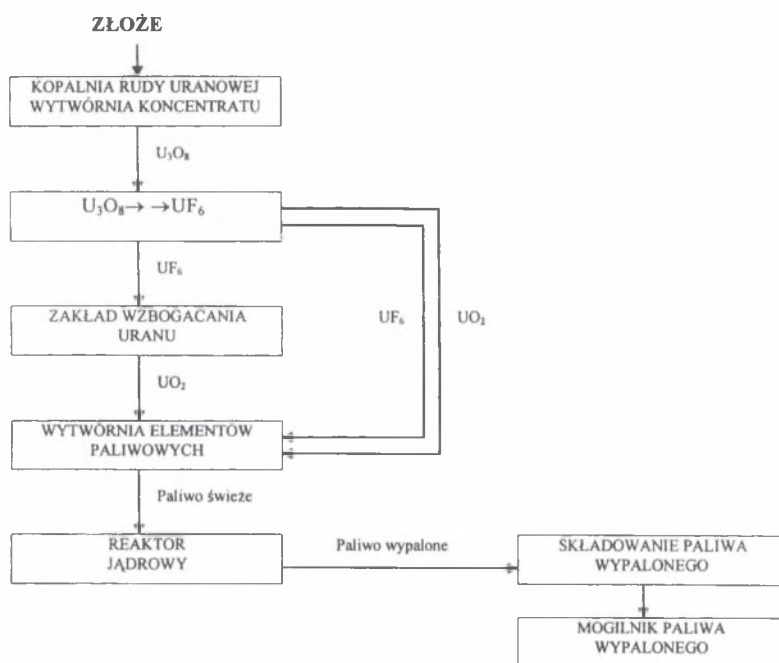
Summary. In the paper there are presented the course of nuclear fuel cycle i. e. the changes of concentration of fuel isotopes, other heavy isotopes which came into being from them and selected fission products. The universal balance equation for the point reactor model and also – concerning neutrons – one-group model has been given. Accurate and simplified chains of nuclear changes of isotopes has been presented. Considerations has been illustrated by results of numerical calculations realised for two existing nuclear reactors.

1. WSTĘP

CYKL PALIWOWY

Konwersja energii przy wykorzystaniu jakiegokolwiek paliwa związana jest z określonym cyklem paliwowym. W energetyce jądrowej cyklem paliwowym nazywa się system operacji przemysłowych i procesów technologicznych mających na celu przygotowanie paliwa do reaktorów jądrowych, a także przerób paliwa wypalonego w reaktorze i składowanie odpadów.

W zależności od użytego materiału paliwowego i paliworodnego oraz typu reaktora można wyróżnić kilka cykli paliwowych - uranowy, uranowo-plutonowy, torowo-uranowy, itp. Obecnie najbardziej opanowany technologicznie jest cykl uranowy, przystosowany do reaktorów termicznych. Cykl paliwowy może być otwarty lub zamknięty.



Rys. 1. Schemat cyklu paliwowego uranowego otwartego
Fig. 1. Scheme of the uranium opened fuel cycle

W cyklu paliwowym zamkniętym (cykl z recykliczacją paliwa) wypalone paliwo podlega procesowi przerobu, w wyniku którego odzyskuje się materiały rozszczepialne nie wypalone do końca w reaktorze. Są one ponownie wykorzystywane do wytwarzania elementów paliwowych.

W cyklu paliwowym otwartym (cykl bez recykliczacji) wypalone paliwo nie jest regenerowane - odpada wtedy bardzo trudne technologicznie ogniwo cyklu paliwowego, którym jest przerób paliwa wypalonego. Paliwo wypalone (rys.1) jest składowane podobnie jak odpady promieniotwórcze, z tym że zazwyczaj sposób jego składowania wpływa na możliwość przerobu wypalonego paliwa jądrowego w przyszłości.

PROCES WYPALANIA PALIWA

Ciepło generowane podczas reakcji rozszczepienia jest odprowadzane przez chłodziwo, podczas gdy struktura paliwa pozostaje prawie nie zmieniona. W czasie wypalania paliwa w reaktorze występują następujące zmiany izotopowe:

- koncentracja izotopów zawartych w świeżym paliwie maleje,
- w wyniku konwersji powstają z izotopów paliworodnych nowe izotopy rozszczepialne - z ^{232}Th powstaje ^{233}U , a z ^{238}U powstaje ^{239}Pu i następnie ^{241}Pu ,

- powstają produkty rozszczepienia o różnych okresach połowicznego rozpadu promieniotwórczego, przy czym niektóre z nich posiadają znaczny przekrój czynny na absorpcję neutronów.

Produkty rozszczepienia zawierają zazwyczaj nadmiar neutronów i mają tendencje do osiągnięcia stanu stabilnego, przy zachowaniu stałej liczby masowej. Nadmiar neutronów jest sukcesywnie usuwany przez emisję promieniowania beta minus (emisja elektronu), w wyniku czego neutron ulega zamianie na proton. Promieniowanie γ jest wysyłane w przypadku rozpadu promieniotwórczego jądra w stanie wzbudzonym.

Niektóre izotopy, np. stront ^{90}Sr lub ^{137}Cs , mają długie okresy połowicznego rozpadu, co powoduje znaczne trudności przy składowaniu odpadów. Innym problemem jest występowanie produktów rozszczepienia o znacznych przekrojach czynnych na absorpcję neutronów. Największą rolę odgrywają tutaj izotopy ksenonu ^{135}Xe oraz samaru ^{149}Sm .

Znajomość zasobów izotopów rozszczepialnych i paliworodnych, jak również ilości produktów rozszczepienia, jest niezbędna do zachowania bezpieczeństwa pracy reaktora jądrowego, a także do sterowania reaktorem.

2. MODELOWANIE ZMIAN IZOTOPOWYCH ZACHODZĄCYCH W RDZENIU REAKTORA

Dokładna analiza zmian izotopowych, zachodzących w paliwie, wymaga stosowania skomplikowanych modeli matematycznych, których budowa i rozwiązanie związane są ze znacznymi nakładami czasu i pracy. Z tego powodu do szybkich, szacunkowych obliczeń, dających przybliżony obraz zmian, stosuje się modele uproszczone. Celem dalszej analizy jest porównanie wyników otrzymywanych z modeli o różnym stopniu zgodności z rzeczywistością oraz określenie wpływu założeń upraszczających na wyniki.

Wszelkie dalsze analizy przeprowadzono przy następujących założeniach:

- przyjęto niezmienny w czasie strumień neutronów termicznych ϕ ,
- obliczenia przeprowadzono dla uśrednionego względem położenia w rdzeniu reaktora strumienia neutronów termicznych (model punktowy reaktora),
- modele obliczeniowe oparto na tzw. teorii jednogrupowej reaktora, tzn. modele obliczeniowe zbudowano dla grupy neutronów termicznych.

Analizy dotyczą dwóch typów reaktorów: uranowo-plutonowego i torowo-uranowego. Paliwo reaktora uranowo-plutonowego stanowi rozszczepialny izotop uranu ^{235}U (lub mieszanina ^{235}U oraz plutonów ^{239}Pu i ^{241}Pu) i paliworodny izotop ^{238}U . Natomiast paliwo reaktora torowo-uranowego stanowi rozszczepialny ^{235}U (lub ^{233}U) oraz paliworodny ^{232}Th .

2.1. Zasada tworzenia bilansów izotopów

Zmiany koncentracji jąder danego izotopu powodują następujące zjawiska:

A. Powstawanie jąder *i*-tego izotopu w wyniku rozszczepień jąder ciężkich wywołanych przez neutrony

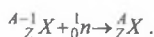
W paliwie reaktora, zwłaszcza pracującego już przez pewien czas, znajduje się zwykle od kilku do kilkunastu ciężkich izotopów (np. izotopy uranu, neptunu, plutonu). Jądra niektórych z nich

ulegają rozszczepieniu w wyniku absorpcji neutronów, a inne podlegają dalszej transmutacji. Zmianę koncentracji jąder i -tego izotopu, powstających w wyniku rozszczepień jąder k -tego izotopu rozszczepialnego, można opisać równaniem:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = y_i^k \sigma_f^k \varphi(t) N_k(t) \quad (1)$$

B. Powstawanie jąder i -tego izotopu w wyniku absorpcji neutronów w jądrach izotopu ${}^{A-1}_Z X$

Jądro i -tego izotopu ${}^A_Z X$ może powstać z jądra $(i-1)$ -szego izotopu ${}^{A-1}_Z X$ w wyniku absorpcji neutronu



Należy zaznaczyć, że nie każde pochłonięcie neutronu w jądrze izotopu ${}^{A-1}_Z X$ prowadzi do powstania jądra izotopu ${}^A_Z X$. Dzieje się tak tylko w reakcji wychwytu radiacyjnego. Zmianę koncentracji jąder i -tego izotopu w wyniku absorpcji neutronów przez $(i-1)$ -szy izotop można zapisać następująco:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \sigma_{\gamma}^{i-1} \varphi(t) N_{i-1}(t) \quad (2)$$

C. Powstawanie jąder i -tego izotopu w wyniku rozpadu promieniotwórczego jąder niektórych izotopów

Jądra i -tego izotopu mogą również powstawać w wyniku rozpadu promieniotwórczego jąder innych izotopów (o ile takie rozpady są możliwe). Dla przykładu można podać:



rozpad β^+ , wychwyt K itd.

Zmiana koncentracji jąder i -tego izotopu w wyniku rozpadu promieniotwórczego innych izotopów l jest określona równaniem:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \lambda_l N_l(t) \quad (3)$$

D. Ubytek jąder i -tego izotopu w wyniku rozpadu promieniotwórczego

Jądra i -tego izotopu również mogą ulegać rozpadom promieniotwórczym opisanym wyżej. Zmiana koncentracji jąder i -tego izotopu w wyniku tych rozpadów opisana jest następująco:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) \quad (4)$$

E. Ubytek jąder i -tego izotopu w wyniku pochłaniania neutronów

Jądra danego izotopu w wyniku absorpcji neutronów stają się jądrami innego izotopu, a zatem są tracone z punktu widzenia rozpatrywanego bilansu. Jest to przypadek wypalania izotopów. Ubytek jąder i -tego izotopu można zapisać następująco:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\sigma_a' \varphi(t) N_i(t) \quad (5)$$

Uwzględniając powyższe zależności można zapisać ogólne równanie bilansu i -tego izotopu w postaci:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = y_i^k \sigma_f^k \varphi(t) N_k(t) + \sigma_r^{i-1} \varphi(t) N_{i-1}(t) + \lambda_i N_i(t) - \lambda_i N_i(t) - \sigma_a' \varphi(t) N_i(t) \quad (6)$$

W przypadku bilansów koncentracji jąder izotopów dla materiałów paliwowych i paliworodnych odpada pierwszy składnik po prawej stronie równania (6). W przypadku izotopów produktów rozszczepienia ogólna postać równania bilansu koncentracji i -tego izotopu ma postać:

$$\frac{dN_i}{dt} = y_i^k \sigma_f^k N_k \varphi + \lambda_{i-1} N_{i-1} + \sigma_r^{i-1} N_{i-1} \varphi - \lambda_i N_i - \sigma_a' N_i \varphi \quad (7)$$

Do tworzenia modeli obliczeniowych wykorzystano łańcuch przemian jądrowych przedstawiony na rys. 2. Wszystkie wartości mikroskopowych przekrojów czynnych na rysunku dotyczą energii neutronów 0.025 eV.

Ponieważ cały łańcuch przemian przedstawiony na rys. 2 zawiera 25 izotopów, to w przypadku reaktora torowo-uranowego należałoby uwzględnić je wszystkie. Jest to jednak skomplikowane i niepotrzebne, gdyż koncentracje dalszych izotopów łańcucha są o kilka rzędów niższe od koncentracji izotopów z początku łańcucha. Dlatego przyjęto ^{236}U jako ostatni rozpatrywany izotop dla reaktora torowo-uranowego.

2.2. Tworzenie modeli obliczeniowych

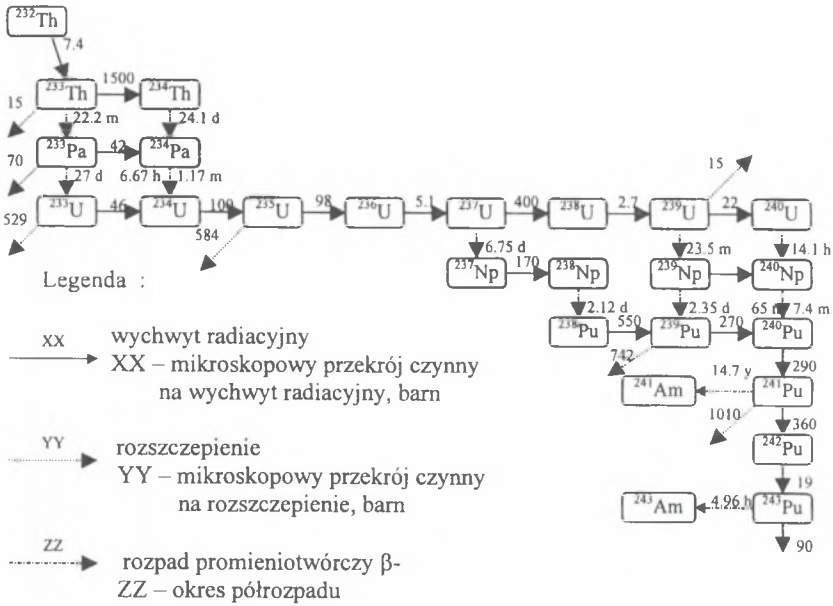
Przy rozpatrywaniu zmian koncentracji izotopów paliwowych i paliworodnych dla każdego typu reaktora zostały utworzone trzy modele: uproszczony, dokładniejszy i dokładny.

W przypadku izotopów produktów rozszczepienia utworzono dwa modele: uproszczony i dokładny.

2.2.1. Reaktor uranowo-plutonowy

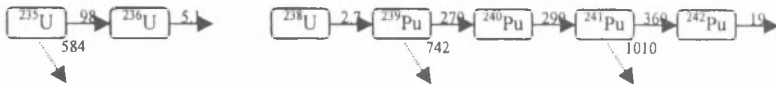
a) model uproszczony

W modelu tym, którego schemat przedstawia rys. 3, nie uwzględniono wszystkich izotopów, jak również nie uwzględniono wpływu neutronów z rozszczepień ^{241}Pu na koncentrację ^{238}U . Model ten nie uwzględnia także zmian koncentracji izotopów będących wynikiem rozpadów promieniotwórczych.



Rys. 2. Schemat przemian izotopów paliwowych i paliworodnych w reaktorze jądrowym
Fig. 2. The chain of changes of fissile and fertile isotopes in nuclear reactor

Jak widać ze schematu, znacznie ograniczono liczbę branych pod uwagę izotopów i w modelu tym uwzględnia się tylko izotopy najważniejsze. Jeśli chodzi o pozostałe izotopy z końców łańcucha, to jest ich niewiele. Na przykład ^{237}U powstaje z pochłonięć neutronów przez ^{236}U . Ilość izotopu ^{237}U jest jednak tak mała, że można ją zaniedbać. ^{237}U ulega wypalaniu i rozpadowi promieniotwórczemu, z którego powstaje ^{237}Np i którego też jest znikoma ilość. Izotop ^{243}Pu również prawie nie występuje w rdzeniu.



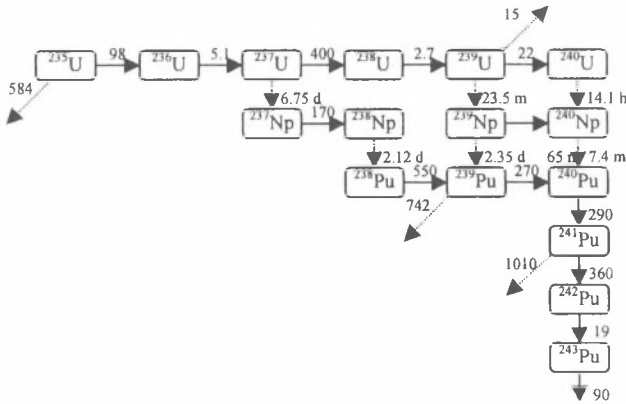
Rys. 3. Schemat łańcucha przemian izotopów przyjęty do modelu uproszczonego
Fig. 3. The chain of changes of isotopes assumed for simplified model

b) model dokładniejszy

W modelu dokładniejszym również nie uwzględniono wszystkich izotopów, uwzględniono jednak wpływ neutronów z rozszczepień ^{241}Pu na koncentrację ^{238}U . Model ten nie uwzględnia także zmian koncentracji izotopów będących wynikiem rozpadów promieniotwórczych. Schemat łańcucha przemian jest identyczny z modelem uproszczonym i jest przedstawiony na rys.3.

c) model dokładny

Model dokładny jest próbą uwzględnienia prawie wszystkich izotopów łańcucha oraz wszystkich typów przemian jąder izotopów. Schemat przemian dla tego modelu jest przedstawiony na rys. 4.



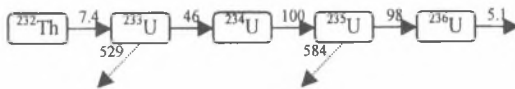
Rys. 4. Schemat łańcucha przemian izotopów przyjęty dla modelu dokładnego
 Fig. 4. The chain of changes of isotopes assumed for accurate model

W przypadku izotopu plutonu ^{243}Pu pominięto fakt, że ulega on rozpadowi promieniotwórczemu i wypalaniu, a w modelu przyjęto, że izotop ten tylko powstaje w wyniku pochłonięcia neutronów termicznych przez ^{242}Pu .

2.2.2. Reaktor torowo-uranowy

a) model uproszczony

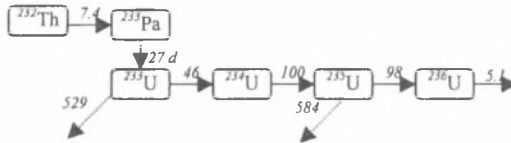
W modelu tym nie uwzględniono opóźnienia czasowego tworzenia się ^{233}U oraz nie uwzględniono wszystkich izotopów łańcucha (rys. 5).



Rys. 5. Schemat łańcucha przemian przyjętego do modelu uproszczonego
 Fig. 5. The chain of changes of isotopes assumed for simplified model

b) model dokładniejszy

W modelu dokładniejszym uwzględnia się istnienie izotopu ^{233}Pa i opóźnienie czasowe tworzenia się ^{233}U . Model ten nie uwzględnia jednak wszystkich izotopów łańcucha oraz wszystkich typów reakcji, w których uczestniczą izotopy. Schemat łańcucha przemian przyjęty dla modelu dokładniejszego przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat łańcucha przemian przyjętego do modelu dokładniejszego
 Fig. 6. The chain of changes of isotopes assumed for more accurate model

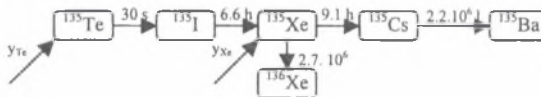
c) model dokładny

W modelu dokładnym uwzględnia się istnienie izotopów ^{233}Th , ^{234}Th , ^{233}Pa i ^{234}Pa oraz opóźnienie czasowe tworzenia się ^{233}U . Model ten uwzględnia wszystkie izotopy łańcucha i zachowuje ciągłość tworzenia się kolejnych izotopów oraz uwzględnia wszystkie typy reakcji, w których uczestniczą rozpatrywane izotopy. Schemat łańcucha przemian jest identyczny z górną częścią rys.1.

2.2.3. Izotopy wybranych produktów rozszczepienia

a) łańcuch ksenonu

Ksenon powstaje w reaktorze jądrowym jako człon łańcucha fragmentów rozszczepienia o masie atomowej 135. Schemat tego łańcucha przedstawia rys. 7.

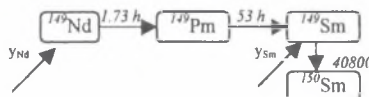


Rys. 7. Schemat łańcucha ksenonu
 Fig. 7 Scheme of the chain of xenon

b) łańcuch samaru

Samar jest końcowym, trwałym członem łańcucha produktów rozszczepienia o masie atomowej 149. Schemat łańcucha samaru przedstawia rys. 8.

Dla łańcuchów przedstawionych na rys. 7 i 8 utworzono po dwa modele obliczeniowe – w uproszczonym pomija się pierwszy izotop łańcucha, natomiast w dokładnym uwzględnia się wszystkie izotopy łańcucha. W modelu dokładnym dla łańcucha ksenonu uwzględnia się ponadto pochłanianie neutronów termicznych przez jod.



Rys. 8. Schemat łańcucha samaru
 Fig. 8. Scheme of the chain of samarium

W przypadku izotopów produktów rozszczepienia ważne jest także ich zachowanie się po wyłączeniu reaktora. Z tego powodu tworzy się dodatkowe równania bilansu. Równania te są bardzo podobne do równań bilansu dla pracy w stanie ustalonym. Jediną różnicą jest brak składników zawierających wielkość ϕ .

3. ROZWIĄZANIE RÓWNAŃ BILANSU KONCENTRACJI. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ

Po uwzględnieniu założeń przyjętych przy tworzeniu bilansów równania tworzą układy równań różniczkowych, zwyczajnych, pierwszego rzędu, o stałych współczynnikach. Do ich rozwiązania wykorzystano transformację Laplace'a.

Po otrzymaniu rozwiązań równań bilansu przeprowadzono przykładowe symulacje cyfrowe dla reaktorów: uranowo-plutonowego i torowo-uranowego. Jako obiekty symulacji posłużyły reaktory typu PWR z elektrowni BUGEY we Francji oraz elektrowni INDIAN POINT w Stanach Zjednoczonych. Niezbędne dane dla obu reaktorów zestawiono w tabeli poniżej.

Tabela 1

Charakterystyczne dane badanych reaktorów

Wyszczególnienie	Reaktor	
	uranowo-plutonowy (BUGEY)	torowo-uranowy (INDIAN POINT)
Moc cieplna reaktora, MW	2785	585
Moc elektryczna, MWe	957	275
Paliwo	74 tony uranu wzbogaconego do 3% 157 zestawów paliwowych 264 pręty w zestawie	1300 kg UO ₂ wzbogaconego do 93% 17207 kg ThO ₂ 120 zestawów paliwowych 168 prętów w zestawie
Moderator	woda zwykła	woda zwykła
Wysokość rdzenia, m	3.66	2.5
Średnica pastylek paliwowych, mm	8.12	7.0
Warunki początkowe*	$N_{25}(0) = 7.247 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ $N_{28}(0) = 2.314 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	$N_{02}(0) = 2.534 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ $N_{25}(0) = 1.452 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

* - Dla pozostałych izotopów przyjęto początkowe wartości koncentracji równe zeru

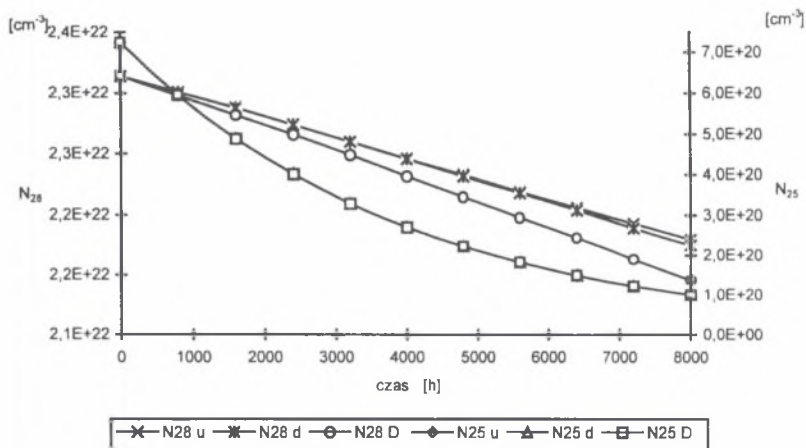
Pełne rezultaty symulacji otrzymane z różnych modeli mają dosyć obszerną postać. Dlatego wyniki zaprezentowane dalej w formie wykresów stanowią jednocześnie element analizy porównawczej. Z tego powodu, dla pierwiastków paliwowych i paliworodnych uwzględniono tylko izotopy rozszczepialne i paliworodne. Symulacje przeprowadzono dla 8000 godzin pracy reaktora w stanie ustalonym, dla strumienia neutronów $\phi = 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

W przypadku izotopów produktów rozszczepienia symulacje obejmują 100 godzin pracy w stanie ustalonym i 100 godzin po wyłączeniu reaktora dla łańcucha ksenonu oraz 750 godzin pracy w stanie ustalonym i 100 godzin po wyłączeniu reaktora dla łańcucha samaru. W przypadku izotopów produktów rozszczepienia podano wyniki dla izotopów jodu, ksenonu, prometu i samaru.

3.1. Wyniki symulacji dla reaktora uranowo-plutonowego

Na wykresach oznaczenie u dotyczy modelu uproszczonego, d - modelu dokładniejszego, D - modelu dokładnego.

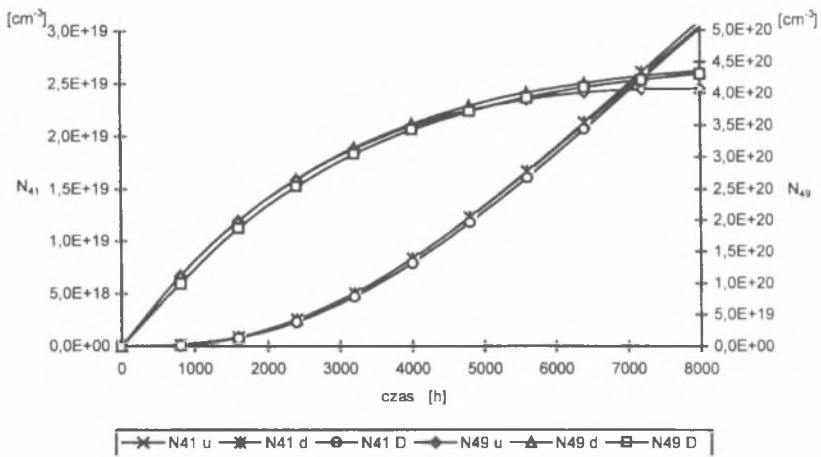
UWAGA: Brak niektórych linii na wykresach wynika z ich pokrywania się.



Rys. 9. Przebieg zmian koncentracji jąder wybranych izotopów uranu
Fig. 9. Course of changes of concentration of selected isotopes of uranium

Jak widać z zamieszczonych powyżej oraz poniżej wykresów, uwzględnienie sprężenia ^{241}Pu nie wpływa w sposób zdecydowany na wyniki. Jedyna widoczna różnica występuje w przypadku ^{249}Pu , jednak dla badanego okresu czasu maksymalna wartość różnicy względnej (odniesionej do modelu dokładniejszego) wynosi 6,5%. Poza tym wyniki uzyskane z obu modeli są prawie w 100% zgodne – dla ^{235}U nie ma żadnej różnicy (co wynika ze sposobu rozwiązywania równań bilansu), natomiast dla ^{241}Pu nie przekracza 2%. Niewielki wpływ na wyniki ma również uwzględnienie w modelu obliczeniowym izotopów, które wprowadzają opóźnienie czasowe tworzenia się izotopów transuranowych. Różnica między wynikami uzyskanymi z modelu dokładnego w stosunku do wyników otrzymanych z modelu dokładniejszego nie przekracza 1,5% dla ^{238}Pu , natomiast dla ^{241}Pu maleje z czasem i z 20% na początku okresu obliczeniowego zmniejsza się do 2,5%.

W przypadku izotopu ^{238}U różnica wyników nie przekracza 0,3% dla modelu uproszczonego i 1,5% dla modelu dokładnego.



Rys. 10. Przebieg zmian koncentracji jąder wybranych izotopów plutonu
Fig. 10. Course of changes of concentration of selected isotopes of plutonium

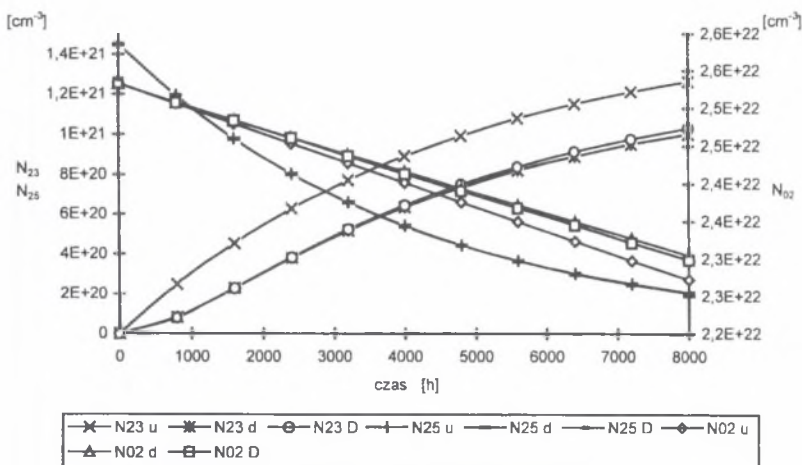
3.2. Wyniki symulacji dla reaktora torowo-uranowego

Analizując rys. 11 można stwierdzić, że uwzględnienie krótkożyciowych izotopów toru i protaktynu w sposób widoczny odbija się na wynikach. Izotopy te stosunkowo szybko osiągają wartości ustalone koncentracji. Wprowadzenie do modelu obliczeniowego izotopów, które podlegają rozpadowi promieniotwórczemu, wpływa w sposób widoczny na uzyskiwane wyniki. Największe różnice występują między modelem uproszczonym, który nie zawiera izotopów betaaktywnych, a modelem dokładniejszym. Różnice między modelem dokładniejszym i dokładnym są znacznie mniejsze, czyli uwzględnianie dodatkowych izotopów betaaktywnych nie ma już większego wpływu na wyniki. W przypadku izotopu uranu ^{235}U różnice są niezauważalne na wykresie, chociaż w rzeczywistości występują.

Obliczając różnice względne wyników w odniesieniu do modelu dokładniejszego można zauważyć następujące prawidłowości:

- w przypadku izotopu toru modele uproszczony i dokładny dają wyniki niższe od modelu dokładniejszego. Różnice wyników zwiększają się z czasem, przy czym różnica dla modelu uproszczonego nie przekracza (dla analizowanego okresu) 1,4%, a dla modelu dokładnego nie przekracza 0,3%;
- w przypadku izotopu uranu ^{233}U , w stosunku do modelu dokładniejszego, modele uproszczony i dokładny dają wyniki wyższe. Różnica wyników między modelem uproszczonym i dokładniejszym maleje z czasem z ponad 200% na początku okresu obliczeniowego do około 26% na końcu okresu obliczeniowego. Różnica wyników między modelem dokładnym i dokładniejszym rośnie z czasem, ale pod koniec okresu obliczeniowego nie przekracza 3%;

- dla izotopu uranu ^{235}U sytuacja jest podobna jak w przypadku ^{233}U , przy czym różnice rosną z czasem w przypadku obu modeli. Pod koniec okresu obliczeniowego wynoszą one około 1%.



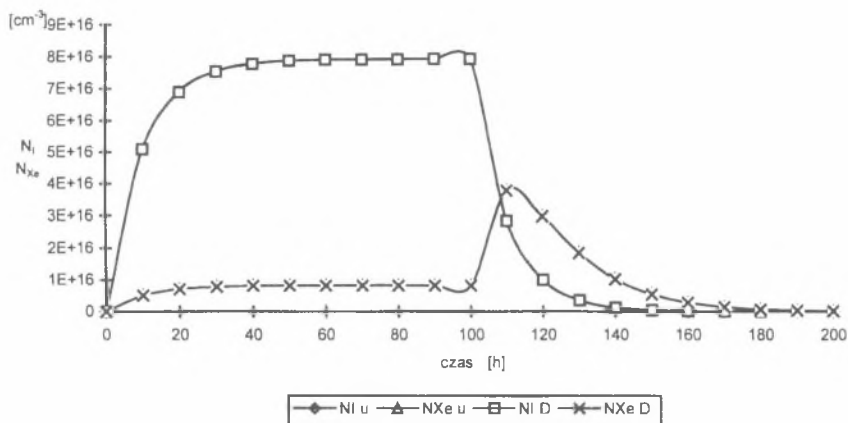
Rys. 11. Przebieg zmian koncentracji izotopów rozszczepialnych i paliworodnych
 Fig. 11. Course of changes of concentration of fissile and fertile isotopes

3.3. Wyniki symulacji dla izotopów produktów rozszczepienia

Analizując otrzymane tu wyniki można stwierdzić, że uwzględnienie izotopu telluru nie powoduje zmian w charakterze przebiegu zmian koncentracji pozostałych izotopów (jakościowych) w łańcuchu. Ze względu na krótki czas półrozpadu izotop ^{135}Te szybko osiąga stan ustalony i równie szybko zanika po wyłączeniu reaktora. Koncentracja izotopów jodu i ksenonu stosunkowo szybko osiąga stan ustalony, przy czym czas ten jest zbliżony dla obydwu typów reaktorów i jest praktycznie identyczny w przypadku obydwu izotopów. Po wyłączeniu reaktora koncentracja izotopu ksenonu rośnie, co jest spowodowane brakiem wypalania tego izotopu przez pochłonięcia neutronów. Wartość koncentracji osiąga maksimum po około 11 godzinach od wyłączenia reaktora (tzw. jama jodowa), niezależnie od jego typu. Wyłączenie reaktora powoduje zanik źródła produkcji jodu i jego koncentracja gwałtownie maleje w wyniku rozpadu promieniotwórczego.

W odróżnieniu od poprzednich izotopów łańcucha koncentracje cezu i baru nie osiągają stanu ustalonego w jednej rocznej kampanii paliwowej ani też w czasie trzyletniej kampanii. Jest to spowodowane bardzo małą wartością stałej rozpadu cezu (10^{-14} s^{-1}). Ponieważ w obu modelach pomija się wypalanie cezu i baru, które jest znikome, to koncentracje tych izotopów rosną zarówno podczas pracy reaktora, jak i po jego wyłączeniu.

Z porównania rezultatów wynika, że zarówno w przypadku reaktora uranowo-plutonowego, jak i w przypadku torowo-uranowego różnice wyników koncentracji dla izotopów jodu i ksenonu są znikome i nie przekraczają 2% dla jodu oraz 0,3% dla ksenonu. Dotyczy to zarówno pracy reaktora w stanie ustalonym, jak również okresu po wyłączeniu reaktora.

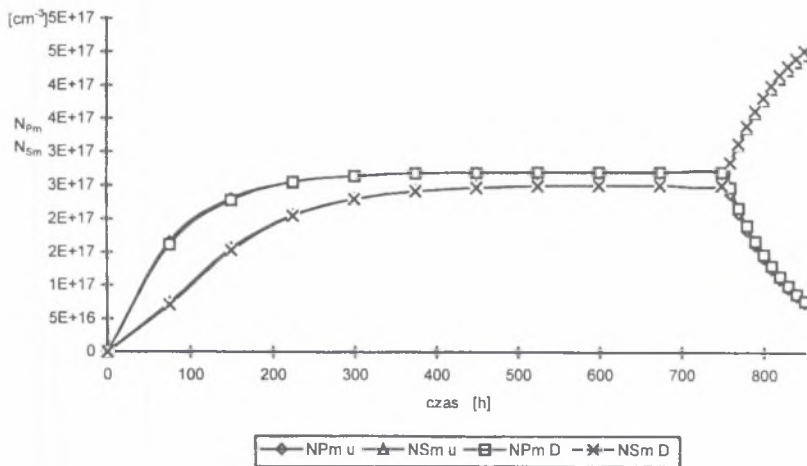


Rys. 12. Przebieg zmian koncentracji jodu i ksenonu – reaktor uranowo-plutonowy
 Fig. 12. Course of changes of concentration of iodine and xenon - uranium-plutonium reactor

W przypadku łańcucha samaru również nie pojawiają się zmiany jakościowe w przebiegu zmian koncentracji izotopów po uwzględnieniu neodymu. Krótki okres półrozpadu ^{149}Nd powoduje szybkie osiągnięcie wartości ustalonej – w czasie około 15 godzin od włączenia reaktora. Mniej więcej w takim samym czasie po wyłączeniu reaktora jego koncentracja maleje prawie do zera.

Koncentracje prometu i samaru osiągają poziom ustalony w takim samym czasie, który wynosi około 4 tygodni od włączenia reaktora, i jest to czas niezależny od rodzaju reaktora. Po wyłączeniu reaktora koncentracja prometu maleje w wyniku braku produkcji, a koncentracja samaru rośnie na skutek rozpadu promieniotwórczego prometu. Po czasie około 400 godzin od wyłączenia reaktora koncentracje prometu i samaru ustalają się na stałym poziomie.

Analiza wyników wykazuje, że w przypadku łańcucha samaru również wystarczająco dokładny jest model uproszczony. Wprawdzie różnice wyników są na wykresach zauważalne, ale średnia wartość różnicy względnej (odniesiona do modelu dokładnego) wynosi około 1,5% dla obydwu typów reaktorów. Różnice te są bardziej widoczne w początkowym okresie pracy reaktora i po jego wyłączeniu (osiągają wartość nawet 28%), a następnie maleją z upływem czasu. Dla prometu różnice są większe niż dla samaru. W przypadku pracy w stanie ustalonym różnica ta jest większa na początku, tuż po włączeniu reaktora i maleje z czasem dla obydwu izotopów. Po wyłączeniu reaktora w przypadku samaru jest odwrotnie: różnica rośnie, natomiast dla prometu utrzymuje się na stałym poziomie około 3,5%.



Rys. 13. Przebieg zmian koncentracji prometu i samaru – reaktor torowo-uranowy

Fig. 13. Course of changes of concentration of promethium and samarium - thorium-uranium reactor

4. UWAGI KOŃCOWE, WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wykazała, że tworzenie coraz dokładniejszych modeli obliczeniowych jest czasochłonne i pracochłonne. Ponadto uproszczenie rozwiązywania takich modeli przez rozwiązanie dla konkretnego przypadku automatycznie wyklucza uniwersalność rozwiązania, tzn. możliwość jego zastosowania dla różnych modeli reaktorów danego typu.

Dodatkowo przeprowadzona analiza porównawcza wykazała, że przyjęte uproszczenia nie negują całkowicie zastosowania modeli uproszczonych. W przypadku izotopów paliwowych i paliworodnych mogą występować dość znaczne różnice na początku analizowanego okresu obliczeniowego, które jednak zmniejszają się w miarę upływu czasu i zazwyczaj osiągają stałą wartość. Można stwierdzić, że różnice te są szczególnie widoczne po uwzględnieniu w modelu obliczeniowym izotopów, które ulegają rozpadowi promieniotwórczemu. W przypadku izotopów produktów rozszczepienia różnice między modelem uproszczonym i dokładnym są znikome, jeśli chodzi o łańcuch ksenonu. Dla łańcucha samaru różnice są widoczne, jednak nie przekraczają one 1.5% po osiągnięciu stanu ustalonego.

Reasumując można stwierdzić, że stosowanie uproszczeń w modelowaniu pracy tak skomplikowanego urządzenia, jakim jest reaktor jądrowy, jest jak najbardziej celowe, a modele uproszczone mogą być bezpiecznie stosowane do obliczeń szacunkowych, dających pogląd o działaniu reaktora.

WYKAZ OZNACZEŃ

- N - koncentracja jąder izotopu, cm^{-3}
 σ_a - mikroskopowy przekrój czynny na pochłonięcie neutronu, barn [10^{-24}cm^2]
 σ_f - mikroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie, barn
 σ_g - mikroskopowy przekrój czynny na wychwyt radiacyjny, barn
 Σ_f - makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie, cm^{-1}
 λ - stała rozpadu promieniotwórczego, s^{-1}
 φ - strumień neutronów termicznych, $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 y_i^k - wydajność powstawania i -tego izotopu z rozszczepienia jądra k -tego izotopu

ZNACZENIE INDEKSÓW I OZNACZEŃ

- i – dotyczy i -tego izotopu
 k – dotyczy k -tego izotopu
 l – dotyczy l -tego izotopu
02 – dotyczy toru ^{232}Th
23 – dotyczy uranu ^{233}U
25 – dotyczy uranu ^{235}U
28 – dotyczy uranu ^{238}U
41 – dotyczy plutonu ^{241}Pu
49 – dotyczy plutonu ^{239}Pu
I – dotyczy jodu ^{135}I
Xe – dotyczy ksenonu ^{135}Xe
Pm – dotyczy prometu ^{149}Pm
Sm – dotyczy samaru ^{149}Sm

LITERATURA

1. Bury T., *Cykle paliwowe w termicznych reaktorach jądrowych*, praca dyplomowa magisterska, Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
2. Celiński Z., Strupaczewski A., *Podstawy energetyki jądrowej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984
3. Fic A., *Podstawy teorii reaktorów jądrowych – część I*, Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1347, Gliwice 1987
4. Knief R. A., *Nuclear energy technology: theory and practice of commercial nuclear power*, McGraw-Hill Book Company, New York 1981

5. Osiowski J., *Zarys rachunku operatorowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972
6. Świerzawski T. J., *Podstawy energetyki jądrowej*, Skrypt Politechniki Śląskiej nr 197, Gliwice 1968

Recenzent: Dr hab. inż. Józef Portacha
Prof. Politechniki Warszawskiej

Abstract

Acquaintance of resources of fissile and fertile isotopes as well as amount of fission products are required for safe operation of a nuclear reactor and its accurate control. The in-core processes analysis and calculations of concentration of isotopes are very difficult mainly because of dependence of isotopes properties on neutrons energy, dependence on neutron flux and position in the core.

The analysis presented in this paper was made under the following simplified assumptions:

- the point reactor model,
- the one-group reactor model (analysis concerns the thermal neutrons),
- a constant and independent on time neutron flux.

Under the conditions described above the balances of concentration of isotopes equations form the system of ordinary differential equations, which can be solved using the Laplace's transformation method.

A few calculation models with different accuracy have been made for uranium-plutonium reactor, thorium-uranium reactor and for the chains of selected fission products (all using simplified assumptions). The results obtained from those models have been compared. Some of them have been presented in this paper.