

D. Stefanović, M.V. Mataušek, N. Zavaljevski
 Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič"-Vinča

REFERAT

KORIŠĆENJE "REAKTORSKOG" PLUTONIJUMA U ISTRAŽIVAČKOM
 ILI EKSPERIMENTALNOM BRZOM REAKTORU

USE OF THE REACTOR GRADE PLUTONIUM IN A RESEARCH OR
 EXPERIMENTAL FAST REACTOR

SADRŽAJ - Za potrebe analize mogućnosti i načina korišćenja plutonijuma iz termalnih reaktora, tzv. "reaktorskog" plutonijuma, u istraživačkom ili eksperimentalnom brzom reaktoru bilo je neophodno razraditi algoritme i računarske programe. Program MIKOZA računa promenu izotopskog sastava goriva sa izgaranjem u dva realna ciklusa brzih reaktora, plutonijumskom i mešovitom, kao i promenu sa izgaranjem prostorno energetske raspodele neutrona, vremena trajanja neutrona i stepena nadkritičnosti sistema. Program VALJAK izračunava prostorno energetska raspodelu neutrona i efektivni faktor umnožavanja u brzom reaktoru u r-z geometriji.

Razmatrani primeri i rezultati koji su navedeni i diskutovani u radu mogu da posluže kao polazna osnova kod izrade idejnog rešenja jednog brzog kritičnog sistema ili istraživačkog brzog reaktora.

ABSTRACT - In order to analyze the possibilities of using the reactor grade plutonium in a research or experimental fast reactor, it was necessary to develop the algorithms and codes. The program MIKOZA calculates the change of the fuel isotope composition with irradiation, as well as the changes with irradiation of the space energy neutron distribution, neutron life time and the criticality parameter of the system. Program VALJAK calculates the space energy neutron distribution and the effective multiplication factor in a cylindrical fast reactor.

The results presented and discussed in the present paper can serve as the starting point in elaborating a preliminary project of a fast critical experiment or a fast research reactor.

Uvod

1. Prema dosadašnjim procenama svetske rezerve urana nisu dovoljne da obezbede rad termalnih energetskih reaktora koji bi bili izgradjeni posle 2000. godine /1/. Medjutim, nuklearna energetska postrojenja sa brzim oplodnim reaktorima koji proizvode više fisibilnog materijala nego što troše, omogućuju da se iz prirodnog urana dobije 50-60 puta više energije nego u termalnim reaktorima, te predstavljaju dugoročno rešenje u korišćenju nuklearne energije. U većini industrijski razvijenih zemalja postoje stoga intenzivni istraživački programi čiji je cilj da ekonomični brzi oplodni reaktori, podesni za komercijalnu upotrebu, budu razvijeni pre nego što situacija u vezi sa snabdevanjem uranom postane kritična.

2. Jedan od uslova za naše osposobljavanje za budući nuklearni program i uspešno ovladavanje nuklearnom tehnologijom je i projektovanje i izgradnja jednog istraživačkog ili eksperimentalnog brzog reaktora /2/. U tom smislu zasnovan istraživački program, mada za sada u veoma skromnom obimu, postoji već više godina. Ovde će biti prikazani neki od postignutih rezultata.

Nastajanje plutonijuma u termalnim reaktorima

3. Osnova goriva brzih reaktora je plutonijum, a njegov izotopski sastav na početku izgaranja zavisi od tipa termalnog reaktora u kome je nastao i od uslova pod kojima je stvaran. Problem proračuna izgaranja nuklearnog goriva u termalnim reaktorima je rešen na zadovoljavajući način i u svetu i kod nas /3/, tako da je stvaranje plutonijuma u toku tog izgaranja moguće pratiti i kvantitativno i kvalitativno. Kao ilustracija, prikazana je na Slici 1. promena izotopskog sastava plutonijuma u toku izgaranja uranskog goriva u teškovodnom i u lakovodnom termalnom energetskom reaktoru do izgaranja od 10 000 MWd/t, a na Slici 2. promena izotopskog sastava plutonijuma u toku izgaranja 2% obogaćenog uranskog goriva u reaktoru RA /4/.

U analizama brzih reaktora koje će biti izložene u ovom radu uzeto je da izotopski sastav plutonijuma u svežem gorivu odgovara izgaranju prirodnog urana u teškovodnom energetskom reaktoru od oko 8000 MWd/t (62,7% Pu²³⁹, 29,6% Pu²⁴⁰, 5,5% Pu²⁴¹ i 2,2% Pu²⁴²).

Analiza izgaranja goriva u brzom reaktoru

4. Izgaranje plutonijumskog goriva i dalja promena izotopskog sastava plutonijuma, kao i promena količine fertilnih i fisibilnih materijala u omotaču reaktorskog jezgra, suštinske su odlike brzih reaktora. Sa stanovišta analize izgaranja goriva u brzim reaktorima i pravljenja bilansa fisibilnog i fertilnog materijala, posebno je karakteristično postojanje dva različita gorivna ciklusa - gorivnog ciklusa jezgra brzog reaktora i gorivnog ciklusa njegovog omotača.

Za proračun i analizu izgaranja goriva u brzim reaktorima izradjen je računarski program MIMOZA /5/. Primenjen je metod "zamrzavanja" koeficijenata, uobičajen u proračunima izgaranja. Prostorno-energetska promena fluksa neutrona se fiksira u toku izabranih vremenskih koraka i proračunava se samo na početku svakog koraka. Za ovaj deo proračuna koristi se postupak rešavanja multigrupnih 2-3 jednačina sfernih harmonika u sfernoj geometriji i računarski program MIM /6/. Matematički model promene izotopskog sastava goriva u brzom reaktoru sveden je na sistem linearnih diferencijalnih jednačina prvog reda sa konstantnim koeficijentima. Matrica koeficijenata ovog sistema je, zbog prirode lanaca fisibilnih izotopa, donje trougaona i lako se može naći analitičko rešenje.

Program MIMOZA može da računa promenu izotopskog sastava u dva realna ciklusa brzih reaktora, plutonijumskom i mešovitom (jednačine su date u /7/), kao i u nekim posebnim slučajevima ovih ciklusa.

Analiza prostorno energetske efekata u brzom reaktoru

5. Kod analize prostorno energetske efekata i proračuna fizičkih parametara istraživačkih ili eksperimentalnih brzih reaktora, zbog dimenzija sistema i geometrije reaktorskog jezgra i njegovog omotača, kao i zbog nuklearnih karakteristika materijala od kojih su konstruisani i osobenosti nuklearnih reakcija na visokim energijama, ne mogu se direktno primeniti metode i računarski programi razvijeni u toku rada na termalnim reaktorima.

Za potrebe analize prostorno energetske efekata u brzom reaktoru manjih dimenzija izradjen je računarski program VALJAK /8/. Ovaj program izračunava prostorno energetske raspodelu neutrona i efektivni faktor umnožavanja u višezonom sistemu valjkastog

oblika rešavajući multigrupne P-3 jednačine sfernih harmonika u r-z geometriji prema postupku predloženom u /10/. Rešavanje sistema multigrupnih jednačina i određivanje faktora umnožavanja neutrona vrši se iterativno, polazeći od viših energija ka nižim i usvajajući u prvom koraku iteracionog postupka da izvor neutrona odgovara fisionom spektru. U svakom koraku n iteracionog postupka, pod pretpostavkom da je izvor neutrona u posmatranoj energetskoj grupi j ($j=1,2,\dots,J$) konstantan u r-pravcu u domenu podesno izabrane podzone q_p ($q_p=1,2,\dots,Q_p$) materijalne zone p ($p=1,2,\dots,P$), a da se u z-pravcu menja po kosinusnom zakonu, nalazi se aproksimativni analitički izraz za prostornu zavisnost grupe vrednosti skalarnog neutronskeg fluksa $\phi_{q_p,j}^n(r,z)$. Kako se ovaj izraz može analitički integraliti po prostornim koordinatama, lako se određuju srednje vrednosti i integralni parametri.

Osnovne karakteristike programa VALJAK su sledeće: broj materijalnih zona $P \leq 6$, broj podzona u zoni $Q_p \leq 6$, ukupni broj podzona u sistemu veći od dva i manji od šest, broj energetskih grupa $J \leq 26$. Postoji mogućnost automatskog sažimanja energetskih grupa, a granični uslovi na spoljašnjoj granici sistema mogu se birati tako da se tretira ili ćelija reaktora, ili reaktor kao celina.

Rezultati i zaključak

6. Primenom računarskih programa MIMOZA i VALJAK izvršena je analiza korišćenja plutonijuma nastalog u termalnom reaktoru, tzv. reaktorskog plutonijuma, u istraživačkom ili eksperimentalnom brzom reaktoru. Da bi se jasnije uočili efekti prostorno energetskog transporta neutrona izabrani su kompaktni reaktori tipa JEZABEL /10/ od metalnog plutonijuma, plutonijum oksida i plutonijum oksida pomešanog sa natrijumom u odnosu koji odgovara odnosu gorivo-natrijum u reaktoru PHENIX /11/. Poslednji slučaj razmatran je i u cilindričnoj geometriji sa bočnim omotačem od urana. Zapremine kompaktnih reaktora tipa JEZABEL odabrane su tako da su im reaktivnostipribližno jednake i iznose 1%, 3% i 17% respektivno.

7. Računarskim programom MIMOZA računata je promena izotopskog sastava plutonijuma u toku izgaranja u brzom reaktoru. Na slici 3 prikazani su rezultati za reaktor sastava tipa PHENIX za izgaranje do oko 10^{23} n/cm² integralnog neutronskeg fluksa.

Procentualna promena izotopskog sastava plutonijuma na početku i na kraju posmatranog intervala izgaranja prikazana je u Tabeli I. Interesantno je podvući da su, za usvojeni početni izotopski sastav plutonijuma, dalja promene sa izgaranjem neznatne u posmatranom prireću brzog reaktora.

TABELA I

Procentualna promena izotopskog sastava plutonijuma na početku i kraju izgaranja

	[%]				
	Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰	Pu ²⁴¹	Pu ²⁴²	
Procentno stanje sa izgaranjem za integralni fluks $\Phi = 10^{23}$ n/cm ²	62.7	29.6	5.5	2.2	
Procentno stanje sa izgaranjem za integralni fluks $\Phi = 10^{23}$ n/cm ²	Pu	61.86	30.19	5.67	2.26
	PuO ₂	61.71	30.33	5.68	2.27
	PuO ₂ +Na	61.67	30.36	5.68	2.27

8. Značajan parametar za kinetiku brzih reaktora je vreme trajanja neutrona. Programom MIMOZA proračunata je promena vremena trajanja neutrona u gore pomenutim primerima reaktora tipa JEZESEL za slučaj da je plutonijum od koga su načinjeni ti reaktori već "izgoreo" do integralnog fluksa od oko 10^{23} n/cm². Rezultati su prikazani u Tabeli II. Najbitniji razlog razlike u vremenu trajanja neutrona za pojedine reaktore su dimenzije tih reaktora. Neznatno povećanje vremena trajanja neutrona sa izgaranjem je posledica smanjenja efikasnog preseka za absorpciju.

Uticaj izgaranja goriva na promenu stepena nadkritičnosti sistema PuO₂-Na prikazan je na Slici 4. Krajnjem integralnom fluksu od oko 10^{23} n/cm² odgovara smanjenje količine plutonijuma za 5%, što je uzrok relativne promene Δk .

9. Promena energetske raspodele neutrona sa izgaranjem je neznatna, na dijagramu se ne može ni uočiti, te je prikazana u Tabeli III, za slučaj metalnog plutonijuma i plutonijum oksida sa natrijumom. Konstatuje se opadanje raspodele za oko 1% pri višim

TABELA II
Promena vremena trajanja neutrona usled
izgaranja goriva

	/nsec/		
	Pu	PuO ₂	PuO ₂ -Na
Početno stanje sa izgaranjem za integralni fluks $\phi t = 0$ n/cm ²	3.79	8.06	16.15
Krajnje stanje sa izgaranjem za integralni fluks $\phi t = 10^{23}$ n/cm ²	3.87	8.27	16.56

TABELA III
Promena energetske raspodele neutrona sa izgaranjem

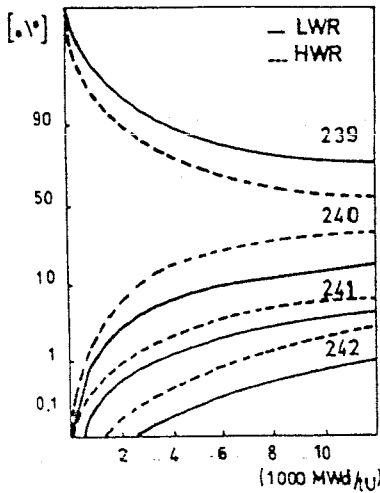
širina grupe [MeV]	Relativni grupni fluksevi			
	Metalni plutonijum		PuO ₂ - Na	
	0	10 ²³	0	10 ²³
4,0-6,5	0,060	0,068	0,052	0,051
2,5-4,0	0,137	0,135	0,112	0,110
1,4-2,5	0,208	0,206	0,182	1,190
0,8-1,4	0,188	0,183	0,147	0,147
1,4-0,8	0,186	0,183	0,195	0,195
0,2-0,4	0,118	0,120	0,134	0,135

energijama, uz istovremeno povećanje raspodele pri nižim energijama, što je posledica prisustva produkata fisije i njihove veće moći usporavanja.

Na slici 5 prikazana je energetska raspodela neutrona pri "nultom" izgaranju za sva tri primera brzih reaktora. Značajne razlike u energetske raspodeli nastaju zbog prisustva kiseonika u PuO_2 sistemima. Energetska raspodela neutrona u sistemu od metalnog plutonijuma ima maksimum blizu maksimuma fisionog spektra, neznatno pomeranje je zbog neelastičnog rasejanja. Energetske raspodele neutrona u sistemima PuO_2 i $\text{PuO}_2\text{-Na}$ su medjusobno bliske, jer uticaj prisustva natrijuma nije posebno značajan. U oha slučajaja, medjutim, pored maksimuma u blizini maksimuma fisionog spektra javlja se i drugi jako izraženi maksimum oko vrednosti letargije 3, što odgovara intervalu energije 0,5-1 MeV. Pojava novog maksimuma je rezultat energetske promene preseka za rasejanje kiseonika, koji je u pomenutom intervalu energije dva do tri puta veći nego na nižim, odnosno višim energijama.

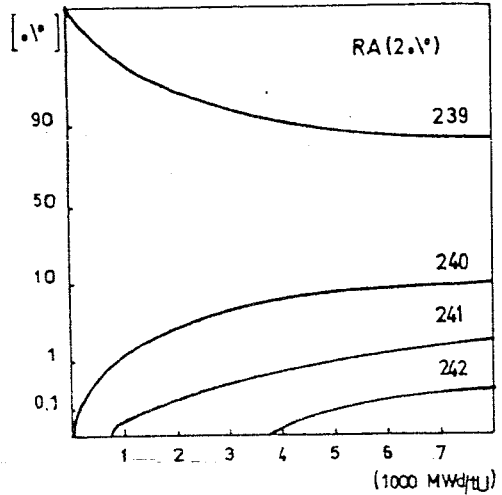
10. Računarski program VALJAK je primenjen na sistem $\text{PuO}_2\text{-Na}$, sastava tipa PHENIX i zapremine 17%. Odnos prečnika i visine jezgra reaktora oblika cilindra izabran je tako da je površina minimalna, a zatim je dodat bočni reflektor od ^{238}U debljine 5 cm. Računata je prostorno energetska raspodela neutrona i promena te raspodele sa izgaranjem goriva. Pošto je uticaj izgaranja na energetske raspodelu i ovde beznačajan, prikazana je samo energetska raspodela i to u četiri tačke centralne horizontalne ravni, Slika 6, i u četiri tačke na osi sistema, Slika 7. Dok raspodele na Slici 7. imaju isti oblik kao raspodele koje odgovaraju sistemima od plutonijum oksida na Slici 5, raspodele na Slici 6. pokazuju uticaj reflektora-omotača od urana: raspodela za $r=0$ cm je već analizirana; na granici jezgro - omotač ($r=14,352\text{cm}$) zbog relativno manjeg broja fisija maksimum na energijama ispod 1 MeV-a je značajniji; u omotaču postoji samo jedan maksimum, jer je doprinos energetske raspodeli od novih fisija zanemarljiv.

Razmatrani primeri i rezultati koji su navedeni i diskutovani u radu mogu da posluže kao polazna osnova kod izrade idejnog rešenja jednog brzog kritičnog sistema ili istraživačkog brzog reaktora.



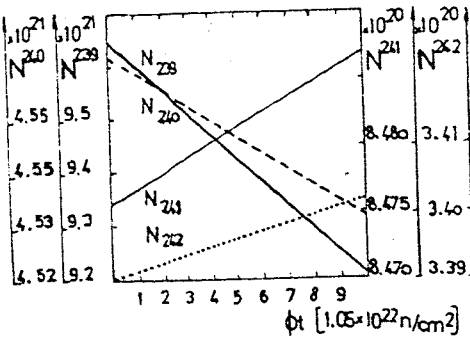
S1.1

Promena izotopskog sastava Pu u toku izgaranja u LWR i HWR



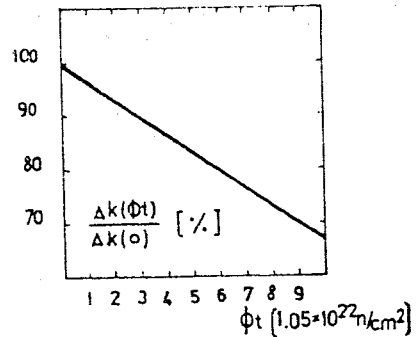
S1.2

Promena izotopskog sastava Pu u toku izgaranja u reaktoru RA



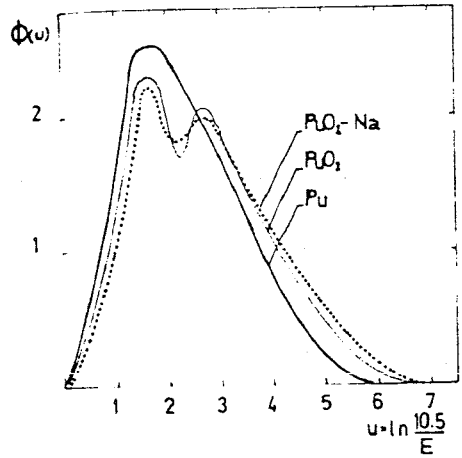
S1.3

Promena koncentracije izotopa Pu u toku izgaranja u brzom reaktoru izotopskog sastava tipa PBRMIX



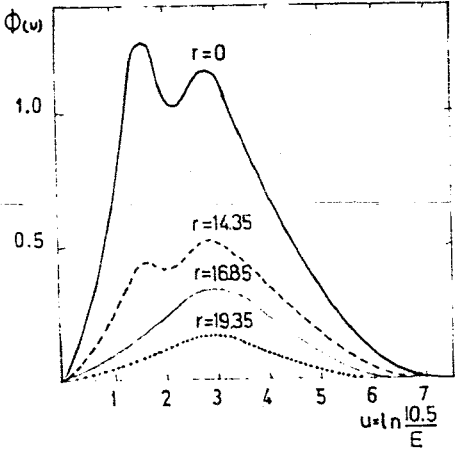
S1.4

Promena nadkritičnosti sistema PuO_2 -Na sa izgaranjem



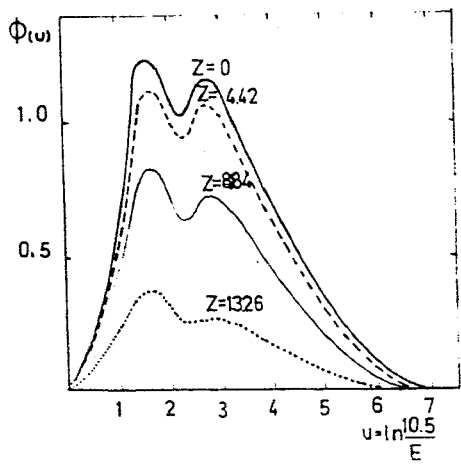
S1.5

Početna energetska raspodjela u sfernom brzom reaktoru



S1.6

Energetska raspodjela po radijusu cilindričnog brzog reaktora



S1.7

Energetska raspodjela po osi cilindričnog brzog reaktora

LITERATURA

- /1/ M.V. Mataušek: "Brzi energetska reaktori" IBK-1426, 1978.
- /2/ M.V. Mataušek, D. Stefanović, M. Afgan: "Moćnosti i potrebe izgradnje brzog istraživačkog ili eksperimentalnog reaktora", Konferencija o korišćenju nuklearnih reaktora u Jugoslaviji, Beograd, 1978.
- /3/ M. Marinković: "DELFIN-Program za proračun promene izotopskog sastava nuklearnog goriva", IBK-1414, 1977.
- /4/ P. Strugar, A. Kocić, M. Marinković: "Proizvodnja i korišćenje plutonijuma u nuklearnim elektranama", XXII Konferencija ETAN-a, Zadar, 1978.
- /5/ M. Zavaljevski, M. Milošević, D. Stefanović: "Promena izotopskog sastava goriva kod brzih reaktora (Program MIMOZA)", IBK-1480, 1979.
- /6/ M. Milošević, M.V. Mataušek: "Primena P_3 -metode sfernih harmonika u jednodimenzionoj sfernoj i cilindričnoj geometriji", XX Konferencija ETAN-a, Opatija 1976.
- /7/ M.N. Zizin: "Račun neutronske fizičke karakteristike reaktora na bistrim neutronima", M. Atomizdat, 1978.
- /8/ M. Milošević, M.V. Mataušek: "Višegrubni dvodimenzionalni P_3 -proračun u cilindričnoj geometriji (Program VALJAK)", IBK-1481, 1979.
- /9/ M.V. Mataušek, M. Milošević: "Postupak rešavanja multigrubnih jednačina sfernih harmonika u dvodimenzionalnoj geometriji", XXII Konferencija ETAN-a, Maribor, 1979.
- /10/ A/Conf. 15/P/592, Vol.12
- /11/ F. Cogne et al., IAEA-CN-36/230, Proceedings of "Nuclear Power and its Fuel Cycle", Salzburg, 1977.