

N. Marinković, M. V. Mataušek,
I. Zmijarević
Institut za nuklearne nauke
"Boris Kidrič" - Vinča

TEHNOEKONOMSKA ANALIZA EFEKATA KORIŠĆENJA
PRIRODNOG URANIJUMA U DELU JEZGRA LWR

TECHNOECONOMICAL ANALYSIS OF USING NATURAL
URANIUM FUEL IN A PART OF LWR CORE

SADRŽAJ - Jedan od mogućih načina povećanja iskorišćenja nuklearnog goriva kod LWR elektrana je unošenje prirodnog umesto obogaćenog uranijuma na gornjem i donjem kraju gorivnih sklopova. Prirodni uranijum se u jezgru reaktora nalazi u zoni niskog neutronskog fluksa i ponaša se kao aksijalni omotač od oplodnog materijala. Cilj ovog rada je bio da se na primeru NE Krško ispitaaju tehnokonomski efekti i mogućnosti primene opisanog postupka.

Sa stanovišta metodologije proračuna, problem određivanja neutronsko fizičkih parametara reaktora sa aksijalno nehomogenim gorivom složeniji je od standardnog problema proračuna reaktora. U okviru raspoloživog paketa računarskih programa odabrana su u ovom radu tri prilaza, različite složenosti i tačnosti. Dobijeni rezultati su upoređeni međusobno da bi se ocenila adekvatnost primenjene metodologije. Izvršena je zatim analiza tehnokonomskih efekata korišćenja prirodnog uranijuma u delu jezgra LWR.

ABSTRACT - One of the possible means to increase burn-up of the fuel for LWR nuclear power plants is to introduce natural instead of enriched uranium at both ends of the fuel assembly. In the reactor core natural uranium is placed in zones of low neutron flux and forms axial blankets of fertile material. The purpose of the present paper was to examine, using the example of the Krško NPP, the technoeconomical effects and the practical applicability of the described procedure.

From the computational point of view, the problem of determining reactor physics parameters of the core with axially inhomogeneous fuel assemblies is more complex than the problem of calculating the standard LWR core. In the frame of the available computer program package three approaches, having different complexity and different accuracy, were chosen. The results obtained were compared with each other in order to estimate the adequacy of the methodology applied. The analysis of the technoeconomical effects of using natural uranium in a LWR core was then performed.

UVOD

Kod lakovodnih energetskih reaktora po pravilu postoji jako izražena neravnomernost raspodele generisane snage u aksijalnom pravcu. Usled toga, izgorelost isluženog goriva se kreće u relativno širokim granicama, što ima za posledicu manju ukupnu srednju izgorelost isluženog goriva, odnosno njegovo lošije iskorišćenje. Efekat je utoliko izraženiji, ukoliko je obogaćenje svežeg goriva veće.

Navedeni problem se rešava ili bi se mogao rešiti na više načina /1,2,3/; korišćenjem sagorivih otrova u zoni veće gustine generisane snage, čime se postiže njeno delimično poravnanje, naročito dok je gorivo još sveže, a neravnomernost raspodele izraženiya; obrtanjem gorivnih sklopova BWR reaktora kod kojih postoji i izrazita nesimetrija generisane snage po aksijalnom pravcu; uvođenjem zona različitog obogaćenja po aksijalnom pravcu, slično kao što kod gorivnih sklopova BWR reaktora obogaćenje varira od šipke do šipke, čime se smanjuje odnos maksimalnog i srednjeg izgaranja unutar gorivnog sklopa i postiže veće ukupno srednje izgaranje pri propisanoj vrednosti maksimalno dozvoljenog izgaranja. Procenjuje se, međjutim da uštede koje bi se mogle postići variranjem obogaćenja uranijuma unutar gorivne kasete PWR elektrana ne bi pokrile povećane troškove proizvodnje goriva.

Cilj ovog rada je bio da se ispituju efekti korišćenja uranijuma prirodnog izotopskog sastava umesto obogaćenog uranijuma pri samim krajevima gorivnih šipki. Naime, u zoni male gustine neutronskog fluksa obogaćeni uranijum malo doprinosi generisanju snage, to jest nedovoljno se koristi. S druge strane, očekuje se da se u prirodnom uranijumu generiše a zatim i koristi plutonijum, čime se pospešuje aksijalno poravnanje snage do koga normalno dolazi u toku rada reaktora.

METODOLOGIJA PRORAČUNA

Sa stanovišta metodologije proračuna, problem određivanja neutronsko fizičkih parametara reaktora sa aksijalno nehomogenim gorivom složeniji je od standardnog problema proračuna reaktora. Egzaktan tretman zahtevao bi dvodimenzioni transportni proračun parametara reaktorske rešetke i višegrupnih konstanti, odnosno trodimenzioni difuzioni proračun parametara gorivne kasete i reaktora u celini.

S obzirom da je cilj ovog rada bio dobijanje pre svega kvalitativnih, a ne egzaktnih kvantitativnih pokazatelja, u okviru raspoložive metodologije odabran je relativno grub aproksimativni tretman. Međjutim, da bi se eliminisala mogućnost izvodjenja netačnih zaključaka, pogotovo što su očekivani efekti reda svega nekoliko procenata, primenjena su tri različita prilaza koji ukazuju na pojedinačne efekte problema, a istovremeno dozvoljavaju izvesno poredjenje rezultata.

Prvi pristup imao je za cilj grubu okvirnu analizu efekata izgaranja. Određivana je promena koncentracije fisibilnih i nefisibilnih jezgara u gorivnoj šipki datog početnog obogaćenja i u gorivnoj šipki istog obogaćenja kojoj je dodata određena količina prirodnog uranijuma. Za proračun je korišćen program WIMSD/4 /4/, ali je elementarna ćelijska rešetka rekonstruirana tako da u njoj figuriše jedna fiktivna zona (slično kao što se radi kod korišćenja programa LEOPARD /5/), čiji sastav uzima u obzir postojanje različitih konstrukcijskih materijala i kontrolnih apsorbera u gorivnom sklopu. Pretpostavlja se da gorivo izgara pri zadatoj srednjoj gustini generisane snage. Ovakav pristup očigledno ne vodi računa o aksijalnoj raspodeli i preraspodeli neutronske fluksa i generacije snage.

Da bi se uzeli u obzir efekti promene aksijalne raspodele gustine generisane snage u toku izgaranja, ćelijski parametri određeni na sličan način kao u prethodnom slučaju, ali posebno za obogaćeno, a posebno za prirodno uranijumsko gorivo, korišćeni su u dvodimenzionom (R-Z) difuzionom tretmanu gorivne kasete. Proračun je vršen programom IZGOR /6/, koji u sebi objedinjuje program WIMSD/4 i program za višegrupni dvodimenzioni difuzioni proračun, odnosno obezbeđuje automatsku izmenu podataka između ovih programa kod globalne analize efekata izgaranja nuklearnog goriva. Pretpostavljajući da gorivna kasete za sve vreme boravka u jezgri reaktora izgara pri istoj snazi, koja je jednaka srednjoj snazi po gorivnoj kaseti, ovakav tretman omogućuje dobar uvid u efekte preraspodele generisane snage između obogaćenog i prirodnog uranijuma, ali ne govori ništa o mogućnostima održavanja određenog režima rada reaktora.

Kada se umesto obogaćenog uranijuma u deo jezgri postojećeg reaktora unosi uranijum prirodnog izotopskog sastava, postavlja se pitanje održavanja određenih propisanih radnih režima. Smanjenje ugrađenog viška reaktivnosti može zahtevati izvesno skraćivanje ciklusa, dok će u početku ciklusa opterećenje obogaćenog goriva biti povećano, te se mora voditi računa da specifična generacija snage u ovom gorivu ostane u zadatim sigurnosnim granicama. U cilju sagledavanja ovih efekata izvršen je u ovom radu proračun efektivnog faktora umnožavanja neutrona i raspodele gustine snage u funkciji izgaranja goriva u prva tri ciklusa rada PWR reaktora. Program IZGOR korišćen je za globalni proračun reaktora koji ima tri zone različitog obogaćenja u radijalnom i tri u aksijalnom pravcu. Prisustvo i promena koncentracije sagorivog apsorbera u toku izgaranja nisu uzeti u obzir.

REZULTATI PRORAČUNA

Analiza je izvršena za reaktor tipa NE Krško. U Tabeli 1. su navedeni osnovni podaci korišćeni u proračunima i relevantni za razmatranja data u ovom radu.

Tabela 1. Osnovni podaci korišćeni u proračunu /7/

poluprečnik gorivne šipke	0,438	cm
aktivna visina gorivne šipke	365,80	cm
srednja linearna gustina snage	0,180	kW/cm
srednja snaga gorivne šipke	65,96	kW
broj šipki u kaseti	235	
srednja snaga kasete	15,50	MW
gustina goriva (sinterovani UO_2)	10,07	g/cm ³
početno obogaćenje svežeg goriva u ravnotežnim ciklusima	3,4%	
početno obogaćenje svežeg goriva u prvom jezgru		
oblast 1	2,1%	
oblast 2	2,6%	
oblast 3	3,1%	
broj kasete u jezgru	121	
broj kasete u prvom jezgru		
oblast 1	41	
oblast 2	40	
oblast 3	40	

U Tabeli 2 dati su parametri gorivne šipke, računati programom WIMSD/4, u zavisnosti od sadržaja UO_2 prirodnog izotopskog sastava. Pretpostavljeno je da sadržaj ^{235}U u obogaćenom gorivu odgovara projektovanom početnom obogaćenju svežeg goriva u ravnotežnim ciklusima NE Krško (3,4%). Za razmatranja koja se vrše u ovom radu, pored parametara kritičnosti, od posebnog su značaja količina fisibilnog materijala na početku i na kraju korišćenja goriva i razlika između ov dve veličine, odnosno te iste veličine svedene na jedinicu generisane snage.

U Tabeli 3 navedeni su parametri gorivne kasete, računati programom IZGOR, svedeni na jednu gorivnu šipku da bi se mogli porediti sa vrednostima datim u Tabeli 2. Može se smatrati da je slaganje vrednosti datih u ove dve tabele u očekivanim granicama. Iz Tabela 2 i 3 se vidi da je količina fisibilnog materijala, po jedinici generisane snage, utoliko manja, ukoliko je količina unetog prirodnog uranijuma veća, a to isto važi i za razliku mase unetog i preostalog fisibilnog materijala. Međutim, dok se u posmatranim slučajevima količina unetog fisibilnog materijala smanjuje za 3,5%, 5,3% i 7% u odnosu na stanje kada se ne koristi prirodni uranijum, razlika mase unetog i preostalog materijala smanjuje se sporije za 3%, 4% i 4,8% respektivno, prema tabeli 3 koja vodi računa o aksijalnoj raspodeli generacije snage i promeni ove raspodele u toku izgaranja. Na osnovu ovoga se može zaključiti da je korišćenje prirodnog uranijuma u delu jezgra PWR značajnije ukoliko on radi u otvorenom, nego kad radi u zatvorenom gorivnom ciklusu.

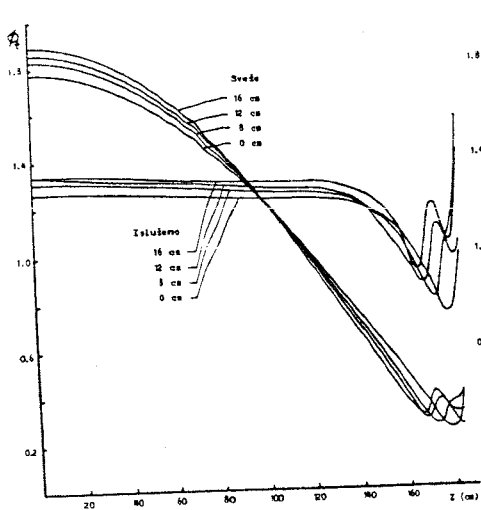
Na Slikama 1 i 2 prikazana je aksijalna raspodela termalnog neutronskega fluksa i gustine generisane snage na početku i na kraju korišćenja kasete, pod pretpostavkom da ona radi na konstantnoj snazi. Odnos snage generisane u prirodnom gorivu i snage generisane u obogaćenom gorivu, Tabela 4, u toku izgaranja se stalno povećava, ali utoliko sporije ukoliko je ukupna količina prirodnog urani-

Tabela 2. Parametri gorivne šipke u zavisnosti od sadržaja UO_2 prirodnog izotopskog sastava. Početno obogaćenje 3,4%.

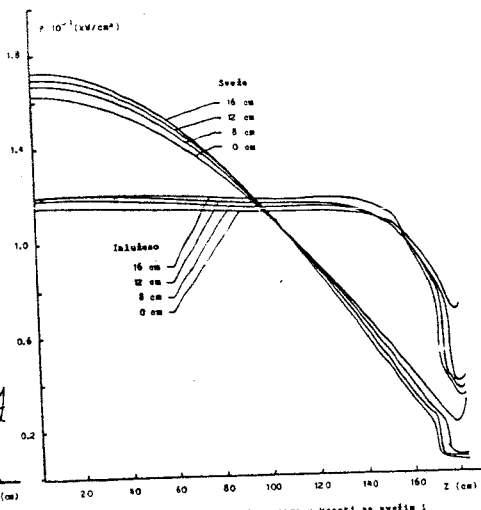
	dužina segmenta od prirodnog UO_2 na krajevima goriv-šipke (cm)			
	0	8	12	16
k_{eff}	1,309876	1,303249	1,299791	1,296225
masa ^{235}U u svežem gorivu (g)	57,840	55,818	54,807	53,795
masa ^{235}U u oza- raćenom gorivu (g)	19,500	18,153	17,517	53,795
masa ^{239}Pu u ozraćenom gorivu	11,240	11,151	11,106	11,060
razlika masa fisti- bilnih izotopa na kraju i početku (g)	27,150	26,514	26,184	25,846
masa unetog fisti- bilnog materijala po jediniци generisane snage (g/M)	$8,769 \cdot 10^{-4}$	$8,463 \cdot 10^{-4}$	$8,309 \cdot 10^{-4}$	$8,156 \cdot 10^{-4}$
masa fistiabilnog ma- terijala u isluženom gorivu po jedinici generisane snage (g/M)	$4,660 \cdot 10^{-4}$	$4,443 \cdot 10^{-4}$	$4,340 \cdot 10^{-4}$	$4,237 \cdot 10^{-4}$
razlika mase unetog i preostalog fisti- bilnog materijala po jediniци generisane snage (g/M)	$4,109 \cdot 10^{-4}$	$4,020 \cdot 10^{-4}$	$3,969 \cdot 10^{-4}$	$3,919 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3. Parametri gorivne kasete (po gorivnoj šipki) u zavisnosti od sadržaja UO_2 prirodnog izotopskog sastava. Početno obogaćenje 3,4%.

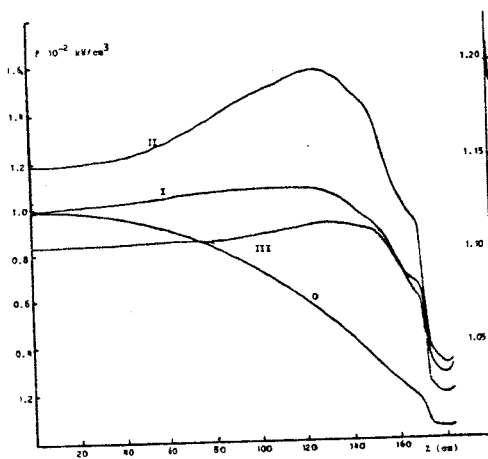
	dužina segmenta od prirodnog UO_2 na krajevima kasete (m)			
	0	8	12	16
k_{eff}	1,30495	1,30465	1,30447	1,30426
masa ^{235}U u svežem gorivu (g)	57,840	55,818	54,807	53,795
masa ^{235}U u oza- raćenom gorivu (g)	21,591	20,185	19,504	18,770
masa ^{239}Pu u oza- raćenom gorivu (g)	10,932	10,790	10,712	10,639
razlika masa fisti- bilnih izotopa na kraju i početku (g)	25,317	24,843	24,691	24,386
masa unetog fisti- bilnog materijala po jediniци generisane snage (g/M)	$8,769 \cdot 10^{-4}$	$8,463 \cdot 10^{-4}$	$8,309 \cdot 10^{-4}$	$8,156 \cdot 10^{-4}$
masa fistiabilnog ma- terijala u isluženom gorivu po jedinici generisane snage (g/M)	$4,661 \cdot 10^{-4}$	$4,696 \cdot 10^{-4}$	$4,581 \cdot 10^{-4}$	$4,469 \cdot 10^{-4}$
razlika mase unetog i preostalog fisti- bilnog materijala po jediniци generisane snage (g/M)	$3,898 \cdot 10^{-4}$	$3,767 \cdot 10^{-4}$	$3,728 \cdot 10^{-4}$	$3,697 \cdot 10^{-4}$



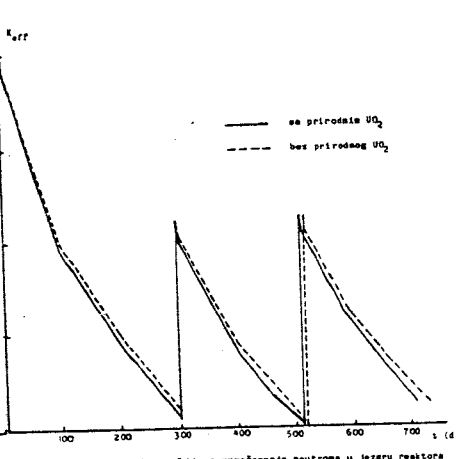
Slika 1. Aksijalna raspodela termalnog neutronskog fluksa u kaseti sa svežim i isušenim gorivom za različite dužine segmenata od prirodnog UO_2 na kraju vijeka.



Slika 2. Aksijalna raspodela gustine neutrona u kaseti sa svežim i isušenim gorivom za različite dužine segmenata od prirodnog UO_2 na kraju vijeka.



Slika 3. Aksijalna raspodela generisane snage u jezgri sa svežim gorivom (I), i isušenim gorivom na kraju prva tri ciklusa rada reaktora (II,III) i (D).



Slika 4. Promene efektivnog faktora umnožavanja neutrona u jezgri reaktora sa i bez prirodnog UO_2 u toku prva tri ciklusa rada na nominalnoj snazi.

Tabela 4. Odnos snage generisane u prirodnom gorivu i snage generisane u obogaćenom gorivu (%)

Vreme rada reaktora (d)	dužina segmenta od prirodnog UO_2 na krajevima kasete (cm)		
	8	12	16
0	0,292	0,418	0,533
20	0,370	0,530	0,676
120	0,804	1,147	1,458
220	0,887	1,291	1,682
320	1,101	1,567	2,002
420	1,254	1,832	2,410
540	1,377	1,985	2,595
660	1,618	2,380	3,130
780	1,649	2,410	3,251

Tabela 5. Odnos maksimalne i srednje generisane snage u kaseti

	dužina segmenta od prirodnog UO_2 na krajevima kasete (cm)		
	0	8	12
svježe gorivo	1,489	1,532	1,558
isluženo gorivo	1,054	1,088	1,103

Tabela 6. Odnos snage generisane u gorivu prirodnog izotopskog sastava i snage generisane u obogaćenom gorivu. (%)
Rezultati globalnog proračuna jezgra.

I ciklus					
vreme rada reaktora (d)	1		201		301
	0,48	0,56	1,25	1,43	1,86
II ciklus					
vreme rada reaktora (d)	1		201		261
	0,79	0,90	1,72	1,78	1,88
III ciklus					
vreme rada reaktora (d)	1		141		201
	0,79	0,90	1,38	1,68	1,83

juma unetog u jezgro manja. Odnos maksimalne i srednje snage u svežoj gorivnoj kaseti, Tabela 5 u posmatrana tri slučaja povećava se za 2,9%, 4,6% i 6,6%, respektivno, u odnosu na situaciju kad nema prirodnog uranijuma.

Slike 3 i 4 i Tabela 6 su rezultat analize prva tri ciklusa rada reaktora izvršene programom IZGOR. za slučaj kada dužina segmenta od prirodnog uranijuma na krajevima gorivne šipke iznosi 12 cm. S obzirom na relativno grub aproksimativni tretman, rezultati prikazani na Slici 3 ne odgovaraju stvarnoj situaciji NE Krško, ali mogu poslužiti za izvodjenje zaključaka o relativnim odnosima. Pod pretpostavkom da u prvom ciklusu zbog dovoljnog ugrađenog viška reaktivnosti, unošenje prirodnog uranijuma ne bi dovelo do skraćivanja, ukupno skraćivanje prva tri ciklusa iznosilo bi 2,5%, a u istom procentu smanjila bi se i vrednost ukupno generisane snage. Na Slici 3 prikazana je aksijalna raspodela generisane snage u svežem (zona 3, početak prvog ciklusa) i isluženom gorivu (na kraju svakog od tri ciklusa, zona 3, 2 i 1). U Tabeli 6 prikazana je promena odnosa snage generisane u prirodnom i obogaćenom gorivu u toku prva tri ciklusa rada reaktora. Ove rezultate treba upoređivati sa rezultatima prikazanim na Slici 2 i u Tabeli 4.

ZAKLJUČAK

Kada se korišćenjem prirodnog uranijuma u zoni niskog neutronskega fluksa količina unetog fisibilnog materijala smanji za nekoliko procenata (na primer 3-7%) smanjuje se, mada nešto sporije (3-5%), i razlika unetog i preostalog fisibilnog materijala, što pretstavlja značajnu uštedu, posebno ako se radi u otvorenom gorivnom ciklusu. Međutim, kod postojećeg lakovodnog reaktora, ovaj efekat postoji samo ukoliko je količina unetog prirodnog uranijuma dovoljno mala da ne zahteva smanjenje projektovane dužine gorivnog ciklusa. U tom slučaju neće doći ni do prekoračenja dozvoljenih opsega za parametre koji utiču na sigurnost postrojenja.

REFERENCE

1. Reprocessing, Plutonium Handling Recycle, Rep. of Working Group 8, INFCE/PC/2/8, IAEA 1980.
2. New Directions in Nuclear Energy with Emphasis on Fuel Cycles, Proceedings of International Conference ENC-3, 1982.
3. Ekonomija izgaranja nuklearnog goriva, I faza, Prva knjiga, Vinča 1983.
4. M.V. Matušek, et.al., Uputstvo za korišćenje programa WIMSD/4, IBK-1576, 1983.
5. N. Marinković, A. Kocić, Program LEOPARD, Opis i uputstvo za korišćenje, IBK-1556, 1982.
6. I. Zmijarević, Uputstvo za korišćenje programa IZGOR, IBK-1578, 1983.
7. Final Safety Analysis Report, NE Krško.