

A. Kocić, N. Marinković
 Institut za nuklearne nauke
 "Boris Kidrič" - Vinča
 OOUR Institut za nuklearnu
 energetiku i tehničku fiziku NET

NEKE MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA ISKORIŠĆENJA
 GORIVA U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

SOME POSSIBILITIES FOR IMPROVEMENT OF FUEL
 UTILIZATION IN NUCLEAR POWER PLANTS

SADRŽAJ - U ovom radu razmatraju se metode za poboljšanje iskorišćenja nuklearnog goriva sa posebnim akcentom na lakovodne nuklearne reaktore. Prikazani su osnovni rezultati proračuna prstenastih gorivnih tableta za slučaj reaktora NE Krško, koji sa neutronske tačke gledišta obećavaju mogućnost uštede urana.

ABSTRACT - Methods for improving the nuclear fuel utilization with the emphasis on LWRs are being dealt with in this paper. Some basic results concerning tubular fuel pellets of the Krško nuclear power plant are presented, showing promising possibilities for uranium saving from the neutronics point of view.

1. UVOD

U poslednje vreme sve više se nameće potreba za boljim iskorišćenjem nuklearnog goriva. Istovremeno, neki od tehnoloških problema koji su ograničavali povećanje izgradnja prevaziđeni su, tako da se pojavljuje niz predloga ^{1,2,3/} i istraživačkih programa koji imaju za cilj iznalaženje mogućnosti za uštedu urana i smanjenje troškova gorivnog ciklusa, kao i analizu ovih efekata u vezi različitih delova spoljašnjeg gorivnog ciklusa (separacioni rad, fabrikacija goriva, količina ozračenog goriva i problemi odlaganja, transporta i prerade). Osim ovih pitanja neophodno je razmatrati sigurnosne i aspekte dobijanja dozvole za rad, aspekte prihvatljivosti od strane elektroprivrede, neophodne istraživačko-razvojne napore, kao i vremensku skalu uvođenja usvojenih rešenja.

Imajući u vidu naše skromne rezerve uranove rude, a prema tome i neophodnost minimiziranja potrošnje urana, s jedne strane, i vreme kada se očekuje puštanje u pogon prve nuklearne elektrane u SR Srbiji (posle 1995.god.) s druge strane, neophodno je posvetiti određenu pažnju zbivanjima u ovoj oblasti i tendencijama razvoja jer će odluke donesene u narednom periodu u mnogome uticati na događaje

u vreme puštanja u pogon naše prve nuklearne elektrane.

U SR Srbiji je normalno očekivati dalji porast potrošnje električne energije. tako da se za godinu 1995. predviđa ^{/6/} potrošnja od oko 13860 TJ. i instalisana snaga veća od 7000 MW. Na Sl.1. prikazana je očekivana kriva trajanja opterećenja i verovatna struktura elektrana. Očigledno je da će, zbog velikih varijacija raspoložive snage hidroelektrana, već prve nuklearne elektrane u pojedinim periodima prevazilaziti bazno opterećenje, pa je prema tome fleksibilnost godinog ciklusa, sa stanovišta elektroenergetskog sistema takodje od posebne važnosti. Kad su u pitanju lakovodni reaktori nije očigledno da je 12-mesečni ciklus i najpovoljnije rešenje.

Za lakovodne reaktore predviđa se da se izgaranje progresivno povećava ^{/4/} od sadašnjih 2400 GJ/kg za BWR reaktore i 2750 GJ/kg za PWR reaktore na 3900 GJ/kg i 4200 GJ/kg respektivno. u sledećih deset godina i verovatno stabilizuje na 4350 GJ/kg oko 2000. godine. Tehnike za povećavanje izgaranja u teškovodnim reaktorima su sasvim drugačije, ali je i kod njih ukazano na mogućnosti koje dovode do izgaranja reda 1750 GJ/kg. ^{/5/}

Uzimajući u obzir navedene činjenice smatramo da je potrebno posvetiti odredjenu pažnju pitanju poboljšanja iskorišćenja nuklearnog goriva. To pitanje smo započeli analizom trenda u ovoj oblasti. sistematski prilazeći pojedinim pitanjima. Započeli smo sa problemom korišćenja sagorljivih apsorbera ^{/7.8/} a u ovom radu, osim opštih razmatranja zadržaćemo se nešto više na pitanju prstenastih gorivnih tableta za korišćenje u PWR reaktorima.

2. METODE ZA BOLJE ISKORIŠĆENJE NUKLEARNOG GORIVA

a. Lakovodni reaktori

Mada je efikasnost korišćenja nuklearnog goriva već porediva sa efikasnošću korišćenja fosilnog goriva, postoje jaki ekonomski i operativni razlozi za boljim iskorišćenjem nuklearnog goriva. Kada govorimo o lakovodnim reaktorima poboljšanja mogu da budu rezultat izmenjene konstrukcije goriva, poboljšanih šema izmene goriva ili izbora odgovarajućeg načina rada reaktora u okviru elektroenergetskog sistema. Rezultat svakog od ovih prilaza trebalo bi da bude povećanje izgaranja.

Kada govorimo o konstrukciji goriva osnovni elementi koji mogu da utiču na povećanje izgaranja su: sagorljivi apsorberi, manji efikasni presek za apsorpciju konstruktivnih materijala, smanjeni prečnik gorivne tablete ili prstenaste gorivne tablete, aksijalni omotač od oplodnog materijala i povećanje odnosa voda/gorivo.

Gorivne tablete sa Gd_2O_3 kao sagorljivim apsorberom se normalno koriste u BWR reaktorima za kontrolu viška reaktivnosti na početku ciklusa. Povećanje značaja gadolinijuma pojavljuje se bilo da se želi duži ciklus ili poboljšanje šeme izmene goriva. Na osnovu rezultata već pomenutih radova može se očekivati ušteda

u potrebama uranijuma reda 7%.

Zircaloy ima znatno manji apsorpcioni presek za termalne neutrone od inconel-a ili nerđjajućeg čelika. Korišćenje zircaloy-a za sve konstruktivne elemente gorivnog snopa dovodi do uštede urana, u odnosu na konstrukcije od inconel-a, reda 2%.

Izbor optimalnog prečnika gorivne tablete je vrlo važna faza u konstrukciji gorivnog snopa i u razvoju nuklearnih reaktora igrala je veoma važnu ulogu. Očigledno je da smanjenje prečnika gorivnih tableta dovodi do smanjenja potrebnih količina urana. Istovremeno, smanjenje prečnika dovodi do povećanja odnosa moderator/gorivo, što utiče na povećanje reaktivnosti goriva. Međutim, ovo ima neželjen efekat jer temperaturni koeficijent reaktivnosti moderatora po apsolutnoj vrednosti postaje manji. Prstenaste gorivne tablete takodje dovode do smanjenja potrebnih količina urana, a efekat se zasniva na manjem iskorišćenju materijala u centralnom delu tablete. Očekivani efekat je smanjenje potrebnih količina urana reda 4% izborom optimalnog prečnika, i 2% korišćenjem prstenastih tableta.

Ako se jezgro posmatra u aksijalnom pravcu oblasti blizu dna i vrha su manje važne u neutronsom pogledu. Tu se tablete od obogaćenog goriva mogu zameniti tabletama prirodnog urana (približno 15 cm). Ovakva konfiguracija smanjuje aksijalno isticanje, a smanjuje se i potrebna količina urana. Očekivana ušteta je reda 3%.

Poboljšane šeme izmene goriva mogu se realizovati preko produženja vremena koje gorivo provede u reaktoru, poboljšanim šemama razmeštanja goriva, i ponovnim korišćenjem ozračenog goriva posle određenog vremena odležavanja.

Direktan način za povećanje izgaranja je produženje vremena koje gorivo provede u jezgru. Ovaj se efekat može ostvariti bilo produženjem dužine ciklusa, bilo povećanjem broja grupa (zona) u reaktorskom jezgru. Promena dužine ciklusa sa 12 na 18 meseci može dovesti do uštede potrebnih količina urana reda 5%, a povećanje broja grupa (zona) u jezgru sa 3 na 5 do uštede reda 15% /9/.

Korišćenje konfiguracija sa smanjenim radijalnim isticanjem neutrona povećava iskorišćenje uranijuma. Korišćenje šema razmeštanja goriva "in-out-in" obično je kombinovano sa drugim tehnikama (sagorljivi apsorber ili sl.) i posebno je predmet sigurnosnih analiza. Ostvarljiva ušteta urana je reda 4%.

Ponovno korišćenje goriva posle određenog odležavanja takodje dovodi do uštede potrebnih količina urana. Na primer, u toku prvog ciklusa gorivo ima relativno nisko izgaranje. Moguće je da se ovo gorivo ponovo koristi u kasnijim ciklusima. Procenjuje se moguća ušteta reda 3% od početnog inventara goriva.

Operativne mogućnosti povećanja iskorišćenja goriva svode se pre svega na rekonstrukciju gorivnih snopova i na produženje ciklusa radom na nižoj snazi od nominalne i promeni neutronske spektra.

Smanjenje snage reaktora dovodi do smanjenja temperatura goriva i modera-
tora; odnosno do povećanja reaktivnosti jezra. Uz to smanjena ravnotežna koncentracija ksenona također dovodi do povećanja reaktivnosti. Medjutim, efikasnost ove metode je u velikoj meri zavisna od elektroenergetskog sistema. Za naš elektroenergetski sistem mogla bi biti vrlo prihvatljiva u periodima velikih voda u protočnim hidroelektranama.

Ozračeni gorivni snopovi, mogu se u principu rekonstruisati na taj način što se određeni broj neizgorelih gorivnih štapova zameni svežim gorivom i zatim takav snop ponovo koristi u reaktoru, i na taj način poveća srednje izgaranje goriva.

Promena neutronskog spektra je inherentna karakteristika BWR reaktora, gde niži protok povećava sadržaj pare i dovodi do tvrdijeg neutronskog spektra. U početku ciklusa tvrdji neutronski spektar utiče na povećanu konverziju i na taj način smanjuje apsorpciju u konstruktivnim materijalima i istovremeno povećava ulogu plutonijuma.

b. Teškovodni reaktori

Koncepcija usavršenih gorivnih ciklusa kod teškovodnih reaktora svodi se na tri osnovna prilaza:

- Slabo obogaćeno uranijumsko gorivo bez reciklacije (obogaćenje približno %). Ovakav prilaz dovodi do smanjenja potrebnih količina urana za 20 - 30%, u odnosu na količine pri radu sa prirodnim uranom.

- Reciklacija plutonijuma. Smanjenje potrebnih količina urana je reda: 45 - 50%.

- Korišćenje torijuma. Godišnje smanjenje potrebnih količina urana može da varira 70 - 100%. Ovde je osnovni problem tehnologija torijumskog goriva.

3. KORIŠĆENJE PRSTENASTIH TABLETA U PWR REAKTORIMA

Već smo napomenuli da se osnovni cilj smanjenje potrebnih količina urana može ostvariti preko povećanja izgaranja goriva, tj. boljim iskorišćenjem goriva. Prstenaste gorivne tablete potencijalno mogu da podnesu veće izgaranje bez pogoršanja mehaničkih karakteristika zbog toga što se smanjuje srednja temperatura goriva, smanjuje količina fisionih gasova kao i efekat interakcije gorivo-omotač, u odnosu na iste ostale uslove sa punom šipkom.

Određjeni rezultati u proučavanju ovakvog tipa gorivnih tableta već su objavljeni¹¹ tako da ćemo se mi ovde zadržati na konkretnom primeru goriva nuklearne elektrane Krško.

Radi početne ocene efekata razmatrali smo elementarne ćelije reaktora NE Krško sa obogaćenima 2, 1%, 2,6% i 3, 1% i to preko proračuna k_p za puni štap i sa

prečnicima unutrašnje šupljine $r_1 = 0,1$ cm, $r_2 = 0,2$ cm i $r_3 = 0,3$ cm. Dobivene vrednosti za k_p pokazane su u Tabeli I.

Tabela I. Vrednosti k_p za različite vrednosti poluprečnika unutrašnje šupljine.

Obogaćenje (%)	Poluprečnik šupljine (cm)	k
2,1	0,0	1,2638
	0,1	1,2676
	0,2	1,2745
	0,3	1,2509
2,6	0,0	1,3192
	0,1	1,3243
	0,2	1,3359
	0,3	1,3247
3,1	0,0	1,3597
	0,1	1,3657
	0,2	1,3809
	0,3	1,3799

Uočava se da se najveća vrednost za k_p u svakom od razmatranih slučajeva dobija za vrednost unutrašnje šupljine poluprečnika $r = 0,2$ cm. Količine UO_2 po jedinici dužine ovakvih tableta, računajući sa gustinom $\rho = 10,408$ g/cm³ prikazane su u Tabeli II.

Tabela II. Količine UO_2 za različite konstrukcije.

Redni broj	Poluprečnik šupljine (cm)	Količina UO_2 (g/cm)
1	0,0	5,4851
2	0,1	5,1581
3	0,2	4,1772
4	0,3	2,5423

Smanjenja količine UO_2 u slučaju poluprečnika šupljine $r = 0,2$ cm u odnosu na punu tabletu iznosi 23,8%. Sam ovaj rezultat nije dovoljan za bilo kakvu ocenu ali daje osnove za naredne analize. Prvo što se može i potrebno je analizirati

je zavisnost k_{∞} u funkciji izgaranja. U Tabeli III prikazana je ova zavisnost za postojeću ćeliju i za ćeliju sa poluprečnikom šupljine od 0,2 cm. Ovi rezultati prikazani su i na Sl.2.

Tabela III. Zavisnost k_{∞} od izgaranja.

Red. broj	2, 1%		2,6%		3, 1%		Izgaranje (GWJ/kg)
	r=0,0cm	r=0,2cm	r=0,0cm	r=0,2cm	r=0,0cm	r=0,2cm	
1	1,2638	1,2745	1,3192	1,3359	1,3597	1,3809	0
2	1,1659	1,1765	1,2196	1,2367	1,2609	0,2828	328,32
3	1,1145	1,1223	1,1697	1,1856	1,2135	1,2355	656,64
4	1,0675	1,0697	1,1234	1,1353	1,1691	1,1885	984,96
5	1,0250	1,0201	1,0805	1,0866	1,1276	1,1427	1313,28
6	0,9864	0,9738	1,0407	1,0397	1,0885	1,0978	1641,60
7	0,9516	0,9317	1,0035	0,9948	1,0514"	1,0537	1969,92
8	0,9207	0,8944	0,9688	0,9524	1,0159	1,0107	2298,24
9	0,8937	0,8625	0,9371	0,9134	0,9823	0,9626	2626,56
10	0,8706	0,8364	0,9084	0,8787	0,9507	0,9298	2954,88
11	0,8513	0,8154	0,8831	0,8489	0,9214	0,8937	3283,20

Iz rezultata se vidi da je za prstenasto gorivo vrednost za k_{∞} veća od odgovarajućeg punog goriva, ali da brže opada sa izgaranjem. Drugim rečima za istu dužinu potrebno je imati veće obogaćenje svežeg goriva, a zbog većeg viška reaktivnosti u tom slučaju i veću početnu koncentraciju sagorljivog apsorbera. U ovom slučaju se logično nameće mogućnost korišćenja gadolinijuma.

Uticaj na dužinu ciklusa može se sagledati na Sl.3. gde je pokazana zavisnost viška reaktivnosti goriva sa šupljinom u odnosu na puno gorivo u funkciji izgaranja.

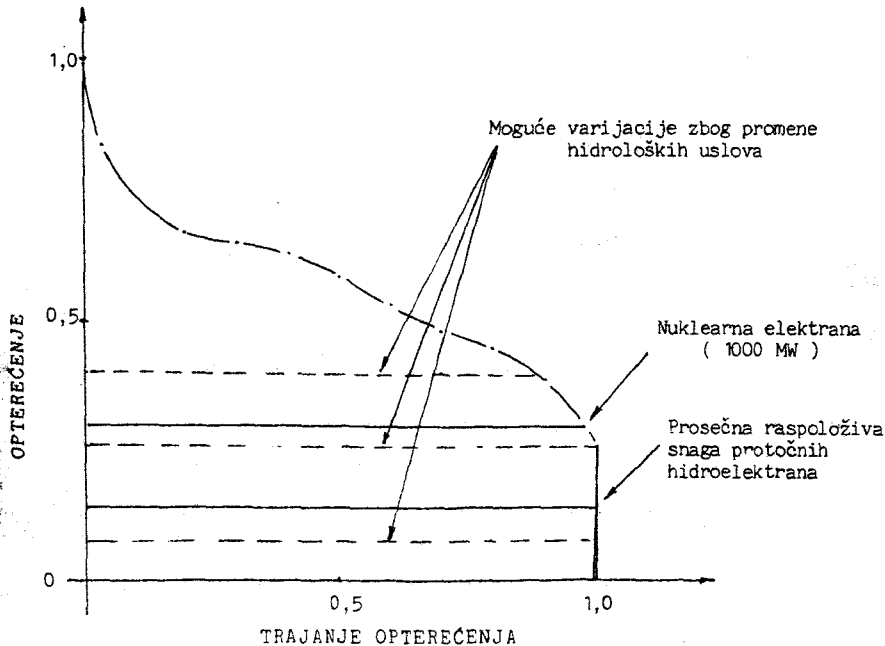
4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je deo sistematske aktivnosti na analizi mogućnosti poboljšanja iskorišćenja goriva u nuklearnom reaktoru. Ova aktivnost ima dvostruki cilj: da se izvrše odgovarajuće preliminarne analize i da se u okviru tih analiza pripreme analitičke mogućnosti (podaci i računarski programi). U ovom kao i u ranijim radovima, jasno su uočene i preliminarno proverene neke od mogućnosti. Ovde razmatrana mogućnost korišćenja prstenastih gorivnih tableta izgleda vrlo atraktivna sa neutronske tačke gledišta. Nismo smatrali neophodnim da u ovoj fazi ulazimo u sve detalje jer za to ne postoje svi potrebni preduslovi. Ovu aktivnost

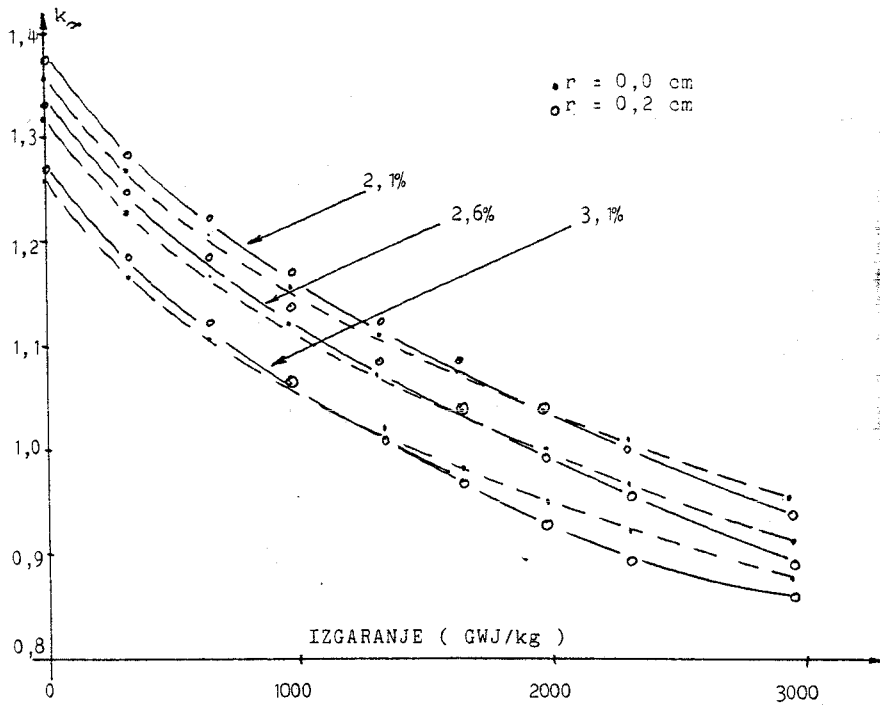
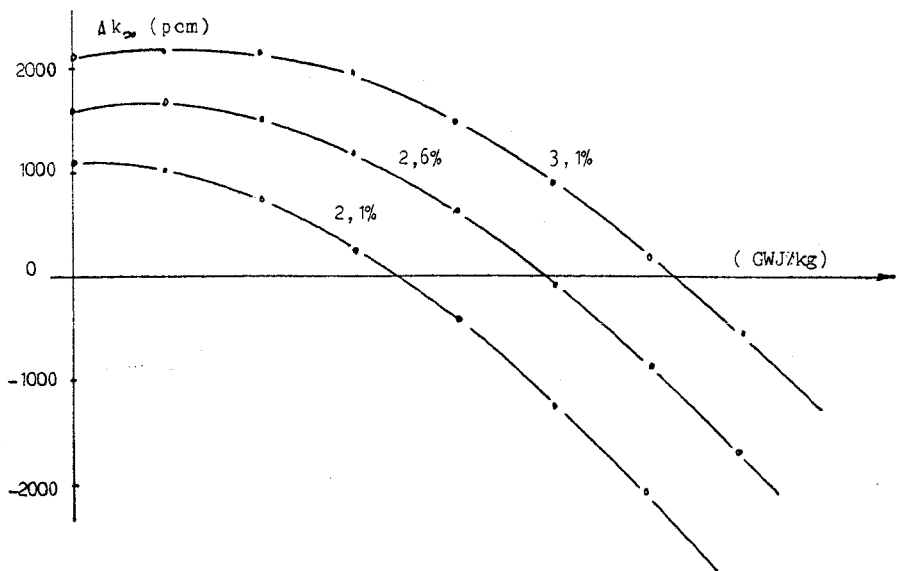
nastavićemo u narednom periodu preko analize konfiguracija sa samnjenim radijalnim isticanjem neutrona. Tek posle te faze bićemo u mogućnosti da izvršimo kompletne analize mogućnosti uštede urana u lakovodnim reaktorima, koje smatramo veoma važnim u okviru opštih energetske analize.

5. REFERENCE

1. Transactions of American Nuclear Society, Vol. 38, pp. 145-152, 1981.
2. International Conference on Nuclear Power Experience, Vienna, 13-17 Sep. 1982.
3. Transactions Of the Third European Nuclear Society Conference, Vol. 40, 1982.
4. H. Bairiot, High Burnup: Status and Expectations, Belgonucleaire, Bruxelles, Belgium, IAEA-CN-42/49.
5. J. Veeder, J.V. Donnelly, CANDU-The Versatile Option, International ENS/ANS Conference, New Directions in Nuclear Energy with Emphasis on Fuel Cycles, Brussels, Belgium, April 26-30, 1982.
6. Materijali iz studije razvoja elektroenergetskog sistema ZEP Beograd za period 1990-2010. (U toku je izrada studije.)
7. N. Marinković, Mogućnosti korišćenja gadolinijuma u jezgru PWR, Zbornik radova XXV Jugoslovenske konferencije ETAN-a, 1981.
8. A. Kocić, N. Marinković, On the possibilities of Gadolinium Utilization in the PWR core of Krško Plant, New Directions in Nuclear Energy with Emphasis on Fuel Cycles, Brussels, Belgium, April 26-30, 1982.
9. M.J. Driscoll, Methods for the Evaluation of Improved PWR Core Design, Proc. Topical Meeting Technical Bases for Nuclear Fuel Cycle Policy, Newport, Rhode Island, September 1981., pp2.6-1.



Sl. 1. Položaj nuklearne elektrane u dijagramu opterećenja.

Sl. 2. Zavisnost k_{∞} od izgaranja.

Sl. 3. Zavisnost promene reaktivnosti od izgaranja.