

Ivan M. Petrović

Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič" - Vinča

OOUR Institut za nuklearnu energetiku i tehničku fiziku

VERIFIKACIJA RASPOLOŽIVIH RAČUNARSKIH PROGRAMA ZA PRORAČUN  
EFEKTA SIGURNOSNIH ŠIPKI EKSPERIMENTIMA NA REAKTORU RB

VERIFICATION OF SAFETY ROD CALCULATIONS BY EXPERIMENTS  
ON RB REACTOR

SADRŽAJ - Rezultati proračuna sigurnosnih šipki programima za globalnu analizu nuklearnog reaktora verifikovani su eksperimentalnim vrednostima dobijenim na reaktoru RB. Korišćeni su trodimenzioni program TRITON i dvodimenzioni programi VAMPIR i KONEK. Prostorna diskretizacija difuzione jednačine se u prva dva programa vrši metodom konačnih razlika, a u trećem metodom konačnih elemenata. Analizirane su greške proračuna u X-Y-Z, X-Y i R-Z geometriji. Dobijeni rezultati se nalaze u okviru očekivane greške proračuna.

ABSTRACT - Safety rod calculations performed by computation codes for global reactor core analysis were verified on experimental results obtained by measurements on RB reactor. Threedimensional code TRITON and twodimensional codes VAMPIR and KONEK were applied. In the first two codes finite difference method is used for the space discretization of the diffusion equation and in the third finite element method. Computational errors were analysed for X-Y-Z, X-Y and R-Z geometries. The obtained results are in the frame of the expected calculational errors.

#### 1. UVOD

Prilikom planiranja izvodjenja eksperimenata na eksperimentalnim reaktorskim postrojenjima vrlo je važno raspolagati što tačnijim parametrima relevantnim za realizaciju eksperimenata. Ova činjenica se naročito odnosi na sigurnosnu stranu izvodjenja eksperimenata, da bi se mogućnost akcidenata svela na najmanju moguću meru. Imajući navedeno u vidu potrebno je raspolagati odgovarajućim računarskim programom kako za čelijski tako i za globalni proračun fizičkih parametara nuklearnog reaktora.

Za izvodjenje eksperimenata na reaktoru RB u Institutu "Boris Kidrič" u Vinči najvažniji parametar koji je unapred potrebno poznavati, je kritična visina teške vode za odgovarajući korak reaktorske rešetke. Razlog je taj što se kritičnost reaktora postiže podizanjem nivoa moderatora u reaktorskom sudu. Kritičan nivo moderatora, za isti korak reaktorske rešetke, je manji ukoliko se u jezgru ne nalazi uronjena sigurnosna šipka s obzirom da ona unosi izvesnu antireaktivnost.

U radu su analizirana tri tipa reaktorskih konfiguracija; jedna bez sigurnosnih šipki i dve sa uronjenom šipkom, ali na različitim visinama od dna reaktorskog suda. Kritične visine moderatora su izračunate raspoloživim računarskim programima za globalni proračun jezgra nuklearnog reaktora. Potom su dobijene kritične visine teške vode proverene eksperimentalnim putem na reaktoru RB. Pokazalo se da efektivni faktor umnožavanja neutrona dobijen računskim putem ostu-  
pa manje od 1% od eksperimentalne vrednosti što se može smatrati zadovoljavajućim.

## 2. EKSPERIMENTI

Istraživački reaktor RB ima mogućnost promene koraka rešetke i broja gorivnih kanala. Pored goriva od uranijuma prirodnog izotopskog sastava u obliku pune šipke, reaktor RB koristi i gorivo u obliku segmenata tubularnog tipa od 2% obogaćenog metalnog uranijuma i od 80% obogaćenog uranijum oksida dispergovanog u aluminijumu.

Pri realizaciji ovog rada korišćena je konfiguracija jezgra reaktora sa 52 gorivna kanala i sa korakom rešetke od 16 cm. Po tipu goriva kojim su popunjeni gorivni kanali jezgro reaktora je podeljeno na dve zone. U unutrašnjoj zoni, koju čini 32 kanala nalazi se 14 segmenata dužine 11,25 cm od 2% obogaćenog metalnog uranijuma. Spoljašnju zonu predstavlja 20 gorivnih kanala popunjenih sa 13 segmenata od 2% obogaćenog metalnog urana i jednim segmentom, na gornjem kraju kanala, od 80% obogaćenog uranijum oksida. Segmenti u ovoj zoni su iste dužine kao u unutrašnjoj zoni. U eksperimentima su korišćene i dve iste sigurnosne šipke dužine 1 m, izradjene od kadmijuma i čiji je položaj u reaktoru simetričan. (Sl.1).

Za potrebe rada vršena su merenja kritične visine teške vode za tri tipa jezgra:

- 1) bez sigurnosnih šipki
- 2) sa jednom sigurnosnom šipkom uronjenom u moderator do visine od 38,5 cm od dna reaktorskog suda (SŠ1)
- 3) sa drugom sigurnosnom šipkom uronjenom u moderator do visine od 46 cm od dna reaktorskog suda (SŠ2).

Svi eksperimenti su izvodjeni na temperaturi od 21°C.

U slučaju kada su jedna ili druga sigurnosna šipka uronjene u moderator, nije moguće ostvariti kritičan nivo teške vode sa jezgrom od samo 2% obogaćenog metalnog uranijuma. Zbog toga je u spoljašnjoj zoni, zamenjen poslednji četrnaesti segment od 2% obogaćenog metalnog uranijuma segmentom od 80% obogaćenog uranijum oksida. Na ovaj način je moguće ostvariti kritičnost reaktora. Kada u jezgro nije uronjena sigurnosna šipka kritični nivo teške vode je ostvarljiv sa jezgrom od samo 2% obogaćenog metalnoj uranijuma, i manji je nego što iznosi visina 13 segmenata, pa je dvozona konfiguracija jezgra korišćena za sva tri eksperimenta (Sl.2).

## 3. PRORAČUNI

Svi proračuni su vršeni na računarskoj mašini IBM 370/3031 u Računskom centru Republičkog zavoda za statistiku SRS. Da bi se odredili čelijski parametri korišćen je program WIMSD/4. Kritična visina teške vode izračunata je računarskim programima za globalni proračun jezgra TRITON, VAMPIR i KONEI.

Računarski programi TRITON i VAMPIR su višegrupni difuzioni programi za proračun reaktora i uslova ostvarivanja kritičnosti u zavisnosti od izgaranja i načina izmeštanja goriva. Pored direktnog proračuna efektivnog faktora

umnožavanja neutrona u funkciji izgaranja, programi omogućavaju i proračune za nalaženje uslova za postizanje zadatog faktora umnožavanja neutrona. Oba programa su zasnovana na istoj matematičkoj metodologiji, odnosno koriste metod konačnih razlika za prostornu diskretizaciju. Dobijeni linearni algebarski sistem jednačina se rešava Chebyshevlijevim semi-iterativnim postupkom. Razlika između ova dva programa je u tome što TRITON tretira trodimenzionu X-Y-Z geometriju i vrši diskretizaciju u sedam prostornih tačaka, dok program VAMPIR tretira dvodimenzionu X-Y ili R-Z geometriju sa diskretizacijom u pet prostornih tačaka.

Računarski program KONEL je višegrupni dvodimenzioni difuzioni program za proračun fizičkih parametara jezgra nuklearnog reaktora. Prostorna diskretizacija difuzione jednačine izvršena je metodom konačnih elemenata. Umesto unutrašnjih iteracija, koje se koriste u prethodna dva programa, za rešavanje sistema linearnih algebarskih jednačina, program KONEL primenjuje direktan postupak rešavanja, odnosno Choleski dekompoziciju. Program ne koristi nikakvo ubrzavanje spoljašnjih iteracija, tj. iteriranje po izvoru. Proračun se vrši u X-Y geometriji, a numeracija tačaka u prostornoj mreži je sprovedena metodom linijske disekcije.

Čelijski podaci su izračunati kao za beskonačnu čeliju.

Prvo su za sva tri slučaja opisana u prethodnom poglavlju trodimenzionim programom TRITON izračunate kritične visine moderatora.

Dalje je proračun vršen programom VAMPIR u X-Y geometriji sa zadatim aksijalnim baklingom. Za eksperimente u kojima je sigurnosna šipka uronjena u tešku vodu, pri proračunu čelijskih parametara, izvršena je homogenizacija u aksijalnom pravcu kanala u kome se nalazi sigurnosna šipka kao i gorivnih kanala u kojima je poslednji segment od 80% obogaćenog uranijum oksida.

Programom KONEL je zatim proračunato jezgro bez sigurnosne šipke. S obzirom da je ovaj program još u fazi razvoja, njime je za sada moguće cilindričnu ivicu reaktora stepenasto aproksimirati samo u slučaju kada je reaktor simetričan u odnosu na X i na Y osu, odnosno pri proračunu četvrtine reaktora. Pošto u slučaju uronjene sigurnosne šipke koja ima ekscentričan položaj u jezgru ne postoji simetrija, izvršena je izvesna aproksimacija. Proračun celog reaktora je realizovan tako što je prostor između stepenasto aproksimirane realne granice reaktora i ravnih ivica primenjenog modela popunjen teškom vodom kao reflektorom. Ovakva aproksimacija je izvodljiva imajući u vidu da je debljina reflektora (u reaktoru RB teška voda ima i ulogu reflektora) znatno veća nego difuziona dužina jezgra, tako da ovo povećanje reflektorskog sloja ne menja znatno efektivni faktor umnožavanja neutrona u odnosu na slučaj kada nema povećanja debljine reflektora. Primenjujući ovu aproksimaciju proračunato je i celo jezgro u slučaju kada u njega nije uronjena sigurnosna šipka.

Da bi se dobijeni rezultati na ovakav način mogli direktno porediti, opisanim postupkom ponovljen je proračun sve tri reaktorske konfiguracije programom VAMPIR u X-Y geometriji.

Mogućnost programa VAMPIR da vrši proračun u R-Z geometriji iskorišćena je na tri načina. Pošto je izvršena cilindrizacija jezgra reaktora, prvo je vršen proračun u kome je jezgro podeljeno na zone i u aksijalnom pravcu. U drugom slučaju usrednjen je sastav jezgra u zoni u kojoj je u gorivnim kanalima poslednji segment od 80% obogaćenog uranijum oksida, kao u slučaju X-Y geometrije, i sa tako aksijalno homogenizovanom zonom izvršen je proračun kritične visine moderatora. Na kraju, izračunata je kritična visina teške vode u slučaju kada je usrednjen sastav jezgra i u kanalu u kome se nalazi sigurnosna šipka,

tako da je sada celo jezgro homogenizovano u aksijalnom pravcu. Dakle, u ovom slučaju korišćeni su kompletni ćelijski podaci kao u slučaju proračuna u X-Y geometriji.

#### 4. ANALIZA REZULTATA

Kritične visine teške vode koje su dobijene u sva tri eksperimenta, odnosno u slučaju kada ni jedna sigurnosna šipka nije uronjena u moderator, a zatim kada je jedna šipka uronjena do visine od 38,5 cm od dna reaktorskog suda (SŠ1) i kada je druga šipka uronjena do visine od 46 cm od dna suda (SŠ2), prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1. Kritične visine moderatora pri eksperimentima

Tip jezgra	Kritična visina (cm)
1	135
2	152,4
3	151,1

Rezultati proračuna programom TRITON, odnosno vrednosti efektivnog faktora umnožavanja neutrona koje odgovaraju kritičnim visinama moderatora za sva tri eksperimenta prikazani su u Tabeli 2. Za prvi eksperiment, slučaj kada ni jedna sigurnosna šipka nije potopljena u moderator, izvršeni su proračuni dvema različitim mrežama sa finim korakom (a) i (b). Iz Tabele 2 se vidi da se za oba koraka mreže koji su manji od difuzione dužine neutrona u jezgru dobija praktično isti rezultat. Odstupanja izračunate vrednosti efektivnog faktora umnožavanja neutrona od oko 0,5% u odnosu na eksperimentalnu vrednost najvećim delom potiče od stepena tačnosti biblioteke osnovnih nuklearnih podataka, a ipak manjim delom od modela i numeričkih metoda kojima su vršeni ćelijski i

Tabela 2. Efektivni faktori umnožavanja neutrona izračunati programom TRITON

Tip jezgra	$k_{eff}$
1(a)	1,0054636
1(b)	1,0054216
2	0,9998504
3	1,0000525

globalni proračun.

Sigurnosne šipke računane su kao <sup>super</sup>ćelije odnosno kao četiri susedne ćelije sa gorivnim kanalima i okolnim moderatorom, u čijoj se sredini nalazi sigurnosna šipka. Pri proračunu ćelije na njenim granicama se postavlja reflektorski granični uslov, odnosno predpostavlja se da su susedne ćelije iste kao i ona koja se proračunava. Ovo znači da je gradijent neutronskog fluksa, odnosno ulazna struja, na granici jednaka nuli što nije realno za super ćeliju koja sadrži apsorber, ali je znatno manja aproksimacija nego da je računat apsorber kao samostalna ćelija. Otuda je jasno da je sigurnosna šipka precenjena kao

apsorber, pa greška modela ćelijskog proračuna kompenzuje grešku od nuklearnih podataka što čini rezultate dobijene proračunom bliže eksperimentalnim vrednostima.

U Tabeli 3 prikazan je efektivni faktor umnožavanja neutrona izračunat programima VAMPIR i KONEL u X-Y geometriji za kritične visine moderatora dobijene iz eksperimenta. Prikazani su rezultati za oba tipa proračuna; za reaktor sa stepenastom granicom i za slučaj kada je prostor između stepenaste granice reaktora i ravnih ivica primenjenog prostornog modela ispunjen teškom vodom kao reflektorom.

Tabela 3. Efektivni faktor umnožavanja neutrona izračunat programima VAMPIR i KONEL u X-Y geometriji

Tip jezgra	$k_{eff}$			
	VAMPIR		KONEL	
	uvećani reflektor	stepenasta granica	uvećani reflektor	stepenasta granica
1	1,019743	1,0091896	1,0173633	1,0058355
2	1,0163114	1,0015392	1,0131585	-
3	1,0138967	0,9993488	1,0107724	-

Posmatrajući rezultate dobijene za stepenastu granicu proračunom sa oba programa za konfiguraciju jezgra kada sigurnosna šipka nije potopljena u moderator vidi se da je greška proračuna u odnosu na trodimenzioni proračun u očekivanim granicama za numeričke metode. Greška proračuna programom VAMPIR iznosi manje od 0,4% a programom KONEL oko 0,04%. Ne treba zaboraviti da su proračuni u X-Y geometriji jako osetljivi na vrednost aksijalnog baklinga, pa se greška ovih proračuna u odnosu na eksperimentalne vrednosti mogu pripisati u najvećoj meri tačnosti osnovnih nuklearnih podataka kao i nepreciznom poznavanju aksijalnog baklinga. Greške korišćenih modela proračuna i numeričke metode su ovde od manjeg značaja.

Analizirajući dalje rezultate proračuna sa uronjenim šipkama, za slučaj sa stepenastom granicom uočljivo je, da je greška u odnosu na trodimenzioni proračun za jednu konfiguraciju jezgra 0,17% a za drugu 0,08%. Obe greške su u granicama tolerancije. Pri ovim proračunima celo jezgro je računato sa istim aksijalnim baklingom u svim materijalnim zonama, ali različitim za svaku konfiguraciju. Kako u obe konfiguracije postoje lokalni apsorberi, sigurnosne šipke, finiji proračun bi tražio poznavanje baklinga i za zonu koja sadrži šipku. I u ovim proračunima sigurnosne šipke su precenjene kao apsorberi što je ranije objašnjeno, pa je otuda na izgled tako dobro slaganje efektivnog faktora umnožavanja neutrona sa eksperimentom.

Za sprovedene proračune pri kojima je uvećana debljina reflektora važe isti komentari za izvore grešaka kao za prethodno analizirane rezultate iz iste tabele, s tim što je povećanje greške kod poslednjih rezultata za oko 1% posledica povećanja reflektorskog sloja, odnosno jezgra su reaktivnija pošto je umicanje neutrona manje.

Što se tiče brzine proračuna, program KONEL ima oko 2 puta kraće vreme proračuna, a iz tabele se vidi da daje i tačnije rezultate.

Programom VAMPIR u R-Z geometriji izvršena su tri tipa proračuna za eksperimentalno dobijene kritične visine teške vode. Izračunate vrednosti efektivnog faktora umnožavanja neutrona prikazane su u Tabeli 4. U slučaju kada jezgro reaktora u aksijalnom pravcu ima različite materijale, zatim kada je zona koja sadrži 2% i 80% obogaćeno uranijumsko gorivo homogenizovano u aksijalnom pravcu i na kraju kada je homogenizovano u aksijalnom pravcu i super ćelija koja sadrži sigurnosnu šipku, odnosno kada je postignuta potpuna aksijalna homogenizacija jezgra.

Uticao sigurnosnih šipki se ne proračunava u R-Z geometriji obzirom da cilindrizacija predstavlja lošu aproksimaciju lokalnih efekata ovih šipki. Medjutim u prvoj aproksimaciji R-Z geometrija zadovoljava.

Tabela 4. Efektivni faktor umnožavanja neutrona izračunat programom VAMPIR u R-Z geometriji

Tip jezgra	Aksijalni pravac		
	nehomogenizovano jezgro	delimično homogenizovano jezgro	potpuno homogenizovano jezgro
	$k_{eff}$	$k_{eff}$	$k_{eff}$
1	1,0104198	-	-
2	1,0046740	1,0074053	1,0028629
3	1,0050955	1,0076132	1,0005989

Posmatrajući rezultate za nehomogenizovano jezgro iz Tabele 4. vidi se da je greška proračuna znatno veća nego pri proračunima programom TRITON. Medjutim, međusobni odnos vrednosti je sličan kao kod prethodnih programa. Ovakva greška za sva tri tipa jezgra objašnjava se pored greške koja potiče od tačnosti osnovnih nuklearnih podataka i greškom zbog cilindrizacije kvadratne reaktorske rešetke, odnosno zbog samog proračuna u R-Z geometriji. Smanjenje greške za drugi i treći tip jezgra u odnosu na prvi, potiče kao i pri ranijim proračunima od precenjene apsorpcione moći sigurnosnih šipki.

U slučaju proračuna delimično homogenizovanog jezgra iz Tabele 4, povećanje greške u odnosu na nehomogenizovano, za tip jezgra kada su sigurnosne šipke uronjene u moderator, potiče od toga što je 80% obogaćeno uranijumsko gorivo koje se realno nalazi kao poslednji segment na gornjem kraju gorivnih kanala spoljašnje zone jezgra, aksijalnom homogenizacijom usrednjeno u celoj spoljašnjoj zoni jezgra. Na taj način je povećan uticaj 80% obogaćenog uranijumskog goriva u spoljašnjoj zoni jezgra u proračunu, pa je time i samo jezgro reaktivnije.

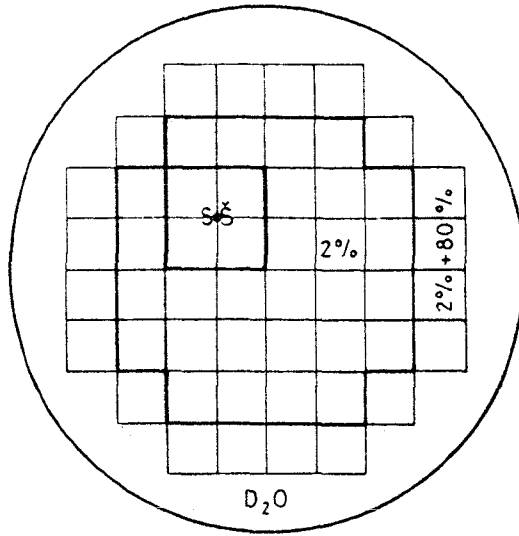
Kada je izvršena potpuna aksijalna homogenizacija jezgra, odnosno kada su i superćelije sa sigurnosnim šipkama homogenizovane u aksijalnom pravcu, iz Tabele 4. se vidi da se greška proračuna smanjuje u odnosu na prethodna dva načina proračuna u R-Z geometriji. Smanjenje greške izazvano je drugim greškama suprotnog smera. Osim greške izazvane precenjivanjem apsorbujućih svojstava kadmijumskih šipki, pojavljuje se i greška od aksijalne homogenizacije i cilindrizacije superćelije sa sigurnosnim šipkama. Obe ove greške imaju isti smer pa se sabiraju i u odnosu na ranije navedene smanjuju ukupnu grešku.

## 5. ZAKLJUČAK

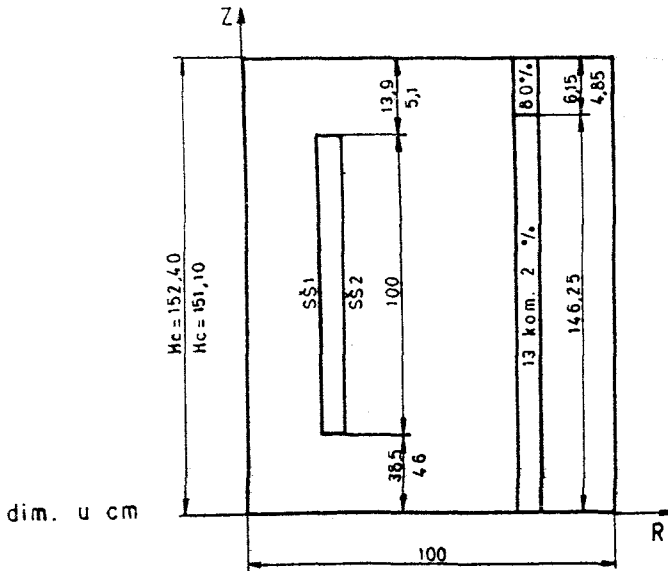
Na osnovu sprovedenih eksperimenata i proračuna mogu se izvesti sledeći zaključci. Odstupanje proračuna od eksperimenata, posmatrano sa sigurnosnog aspekta, nalazi se sa sigurne strane greške i iznosi manje od 1% što je zadovoljavajuće. To znači da na osnovu proračuna nuklearni reaktor postaje kritičan na manjoj visini moderatora nego što to pokazuju eksperimentalne vrednosti. Prema tome mogućnost akcidenta zbog loše izračunate kritične visine teške vode je svedena na najmanju moguću meru. Medjusobna razlika primenjenih numeričkih metoda kao i geometrija proračuna nije veća od 0,4% što je u granicama tolerancije. Najveću grešku unosi biblioteka osnovnih nuklearnih podataka. Treba uvek težiti što boljoj cilindrizaciji jezgra reaktora, što u slučaju jedne super ćelije sa sigurnosnom šipkom sa ekscentričnim položajem nije najadekvatnije i izaziva znatnu grešku pri proračunima u R-Z geometriji. Aksijalna homogenizacija gorivnih kanala koji kao poslednji segment sadrže 80% umesto 2% obogaćeno uranijumsko gorivo, pokazala se nepovoljnom, jer je na taj način povećan uticaj 80% obogaćenog goriva na celo jezgro, pa je ono reaktivnije. Pokazalo se i da je proračun u X-Y geometriji jako zavisao od vrednosti aksijalnog baklinga.

## 6. LITERATURA

1. M.V. Mataušek i dr., Uputstvo za korišćenje programa WIMSD/4, IBK-1576, 1983.
2. A. Daneri, G. Maggioni, E. Salina, TRITON - A multigroup Diffusion-depletion program in three dimensions, FN-E-97 (NEA 0415), 1968.
3. I. Zmijarević, I. Petrović, VAMPIR - Dvogrupalni dvodimenzioni difuzioni program za proračun izgaranja nuklearnog goriva u jezgru reaktora, XXIX Jug.konf. ETAN-a, Niš, jun 1985.
4. I. Petrović, Primena metode konačnih elemenata na rešavanje višegrupne dvodimenzione difuzione jednačine i računarski program KONEL, XXX Jug. konf. ETAN-a, Herceg Novi, jun 1986.
5. M. Mataušek, N. Marinković, M. Pešić, S. Avdić, Reaktorsko jezgro nehomogeno u aksijalnom pravcu. Eksperimentalna verifikacija teorijskog tretmana, XXX Jug. Konf. ETAN-a, Herceg Novi, jun 1986.
6. Interna dokumentacija reaktora RB.



Sl. 1 Horizontalni presek reaktora RB



Sl. 2 Vertikalni presek reaktora RB