

N.Zavaljevski, M.Pešić, P.Strugar
O.Šotić, D.Stefanović, D. Antić

REFERAT

OUR Institut za nuklearnu
energetiku i tehničku fiziku

Institut za nuklearne nauke
"Boris Kidrič" - Vinča

KORIŠĆENJE GORIVA RAZLIČITOG OBOGAĆENJA ZA
DOBIJANJE ŽELJENE RASPODELE NEUTRONSKOG FLUKSA

THE USE OF FUEL OF VARIOUS ENRICHMENT
FOR FLUX SHAPING

SADRŽAJ - Zbor boljeg iskorišćenja nuklearnih reaktora često je potrebno ostvariti željenu prostornu raspodelu fluksa neutrona, posebno maksimalni fluks termalnih neutrona u eksperimentalnim kanalima istraživačkog reaktora ili poravnanje fluksa u energetsom reaktoru. Ovde su prikazani neki eksperimentalni rezultati dobijanje željene raspodele fluksa na reaktoru RB korišćenjem goriva različitog obogaćenja. Postignuto je znatno povećanje termalnog neutronskega fluksa u centralnom eksperimentalnom kanalu reaktora RB i ispitana je mogućnost poravnanja fluksa. Ovi eksperimenti mogu da posluže kao polazna osnova za dalja istraživanja i upoređivanja sa teorijskim modelima.

ABSTRACT - Spatial flux shaping, particularly obtaining the maximal thermal neutron flux in experimental channels of a research reactor or flux flattening in a power reactor, is often desired in nuclear reactor utilization. Some experimental results of flux shaping at the reactor RB by use of the fuel of various enrichment are presented. Considerable increase in thermal neutron flux in central experimental channel is obtained and possibility of flux flattening is investigated. These experiments can serve as a starting point for further investigations as well as for comparison with theoretical models.

1. UVOD

Prilikom eksploatacije nuklearnih reaktora, i energetskih i istraživačkih, često je potrebno ostvariti željenu prostornu raspodelu neutronskega fluksa. Najčešći zadaci su dobijanje maksimalnog fluksa u eksperimentalnim kanalima istraživačkih reaktora i poravnanje fluksa u energetskim reaktorima zbog iskorišćenja goriva i tehnoloških ograničenja.

Reaktor RB u Vinči je istraživački reaktor nulte snage /1/, koji može da koristi kao gorivo prirodni uran kao i 2% i 80% obogaćeni uran. Reaktor je po konstrukciji veoma fleksibilan, pa se pogodnim prostornim rasporedom raspoloživog goriva može ostvariti željena raspodela neutronskog fluksa. Kako je RB reaktor bez biološke zaštite, maksimalni fluks najviše ograničava doza zračenja oko reaktora. Zbog toga su započeta ispitivanja mogućnosti povećanja fluksa pogodnim rasporedom goriva različitog obogaćenja pri ograničenoj dozi zračenja. Ovde su prikazani prvi eksperimentalni rezultati. Takođe su prikazani i neki rezultati poravnanja fluksa. Cilj ovih eksperimenata je da ukaže na pravce daljeg istraživanja i da omogući proveravanje teorijskih modela čiji je razvoj u toku.

2. Maksimalni fluks u centru reaktora RB

Korišćenjem centralnog reflektora može se povećati termalni neutronski fluks /2/. Na reaktoru RB vršeni su eksperimenti povećanja neutronskog fluksa pomoću centralnog horizontalnog reflektora /3/. Pokazano je da se pogodnim izborom debljine ovog reflektora i koraka rešetke može ostvariti znatno povećanje neutronskog fluksa u reflektoru. Ovde je povećanje fluksa ostvareno vertikalnim centralnim reflektorom i pogodnim rasporedom goriva različitog obogaćenja urana.

Problem maksimuma neutronskog fluksa uz sva ograničenja praktične prirode spada u klasu optimizacionih problema koji se mogu rešavati primenom principa maksimuma Pontrjagina /4/. Ovaj princip samo u idealizovanim slučajevima daje dovoljan broj informacija za određivanje optimalne konfiguracije goriva. U praktičnim zadacima neophodno je korišćenje dosta složenih numeričkih optimizacionih programa. Pošto za sada ne posedujemo takve programe, za izvodjenje ovde prikazanih eksperimenata poslužili smo se drugim prilazom.

Kombinacijom fizičkih razmatranja, nekih ranijih optimizacionih rešenja /5/ i statičkih proračuna nuklearnih reaktora /6/ dobijene su preliminarne procene rešenja postavljenog zadatka.

Jedan primer analize maksimalnog fluksa prikazan je u /5/. Ako se u formulaciji problema izostavi termičko ograničenje, koje ovde nije važno, raspodela goriva u reaktoru sastoji se od centralnog reflektora, goriva maksimalne koncentracije i beskonačnog perifernog reflektora. Pretpostavke modela (konstantan izotopski sastav goriva i nezavisnost rezonantne apsorpcije od funkcije upravljanja) uslovljavaju da se u našem slučaju ovaj model može realizovati samo visokoobogaćenim gorivom. Trenutno ovog goriva nemamo dovoljno, pa smo pribegli kompromisnom rešenju.

Na osnovu procena i odgovarajućih statičkih proračuna na reaktoru RB su formirana jezgra prikazana na slici 1. Iskustva ranijih eksperimenata /3/ poslužila su nam za izbor koraka rešetke reaktora. Smanjenje koraka utiče na povećanje termalnog pika u centralnom reflektoru, pa se izborom koraka od 8 cm u centru postižu dobri uslovi za povećanje fluksa, a izborom koraka 8,2 cm na periferiji dobre moderacione osobine u zoni sa prirodnim uranom.

Radijalna raspodela termalnog neutronskeg fluksa za sva jezgra merena je ozračivanjem Dy folija u horizontalnom eksperimentalnom kanalu reaktora RB pri snazi od 10 W u toku 10 minuta. Rezultati merenja obradjeni su programom ACTIVITY /7/ i prikazani su na slici 2. U Tabeli 1 date su eksperimentalne vrednosti formfaktora. Iz rezultata se vidi da se predloženim jezgrima postiže znatno povećanje neutronskeg fluksa.

TABELA 1. Vrednosti form-faktora dobijene na osnovu merenja radijalne raspodele fluksa

Broj jezgra	Maksimalni fluks			Poravnanje fluksa	
	I	II	III	IV	V
ϕ_{max}/ϕ	2,75	4,66	5,08	1,62	1,75

3. Poravnanje neutronskeg fluksa

Zadatak poravnanja fluksa rešavan je korišćenjem principa maksimuma Pontjagina /4/. Težište je na zaključcima o prirodnoj optimalnoj komponenti. Zbog složenosti optimizacionog aparata, model nuklearnog reaktora je najjednostavniji: jednogrupna jednačina golog homogenog reaktora u cilindričnoj geometriji

(oznake iste kao u /8/)

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\phi}{dr} \right) + \frac{k_{\infty} - 1}{M^2} = 0 \quad (1)$$

gde je

$$k_{\infty, \min} \leq k \leq k_{\infty, \max} \quad (2)$$

uz granične uslove

$$\phi'(0) = 0 ; \phi(R) = 0 \quad (3)$$

Funkcija upravljanja $u(r) = k(r)$ se određuje tako da se minimizira funkcional:

$$J = \int_0^R (\phi(r) - \bar{\phi})^2 2\pi r dr \quad (4)$$

pod uslovom da je

$$= \frac{2}{R^2} \int_0^R \phi(r) r dr = \text{const} \quad (5)$$

Ovakav zadatak spada u klasu neautonomnih optimizacionih problema sa fiksiranom konačnom vrednošću nezavisno promenljive. Korišćenjem formalizma Pontrjagina /4/ dobija se sledeći sistem jednačina faznih koordinata x_i i pridruženih funkcija ψ_i :

$$\frac{dx^{(0)}}{dr} = (x^{(1)})^2 \cdot r$$

$$\frac{dx^{(1)}}{dr} = x^{(2)}$$

$$\frac{dx^{(2)}}{dr} = \frac{1-u(r)}{M^2} x^{(1)} - \frac{1}{r} x^{(2)} \quad (6)$$

$$\frac{dx^{(3)}}{dr} = x^{(1)} \cdot r$$

$$\frac{dx^{(4)}}{dr} = 1$$

$$\psi^{(0)} = \text{const}$$

$$\frac{d\psi^{(1)}}{dr} = -2x^{(1)} \cdot r\psi^{(0)} + \frac{u(r)-1}{M^2}\psi^{(2)} - r\psi^{(3)} \quad (7)$$

$$\frac{d\psi^{(2)}}{dr} = -\psi^{(1)} + \frac{1}{r}\psi^{(2)}$$

$$\psi^{(3)} = \text{const}$$

$$\frac{d\psi^{(4)}}{dr} = - (x^{(1)})^2\psi^{(0)} - \frac{1}{r^2}x^{(2)}\psi^{(2)} - x^{(1)}\psi^{(3)}$$

Hamiltonijan je linearan po upravljanju:

$$H = \left\{ \psi^{(0)} (x^{(1)})^2 r + \psi^{(1)} x^{(2)} + \frac{1}{M^2} \psi^{(2)} x^{(1)} - \frac{1}{r} \psi^{(2)} x^{(2)} + \psi^{(3)} x^{(1)} \cdot r + \psi^{(4)} \right\} - \frac{1}{M^2} \psi^{(2)} x^{(1)} \cdot u$$

Analizom zadovoljenja principa maksimuma Pontrjagina pokazuje se i bez rešavanja (6) i (7) da se u klasi deo po deo konstantnih funkcija optimalno upravljanje može realizovati samo korišćenjem zona sa u_{\min} i u_{\max} (relejno upravljanje) i zona sa u_{\max} mora biti na periferiji. Broj, raspored i dimenzije zona ne mogu se a priori odrediti, već je potrebno korišćenje optimizacionih programa. Ovi zaključci se slažu sa zaključcima iz literature /8/, /9/ za ravnu geometriju. Zona sa $k_{\infty} = 1$ koja se praktično često realizuje ne može se dobiti ovim jednostavnim modelom u klasi deo po deo konstantnih funkcija, ali je u /10/ pokazano da ona zadovoljava princip maksimuma Pontrjagina i za ovaj model, ali u klasi izmerivih funkcija.

Kombinacijom goriva raznog obogaćenja pogodno je realizovati relejne komponente. Treba naglasiti da je gornji model samo gruba aproksimacija stvarne situacije jer:

- a) neadekvatno tretira uticaj reflektora,
- b) ne uzima u obzir striktna ograničenja u pogledu kritične visine sistema,
- c) ne uračunava ograničenja na broj gorivnih segmenata i fiksni korak rešetke.

Uzimajući sve ovo u obzir izvršili smo proračun nekoliko jezgara i odabrali dva (slika 3) koja su dala najbolje pravnjenje. Eksperimenti su vršeni na isti način kao i prilikom merenja maksimalnog neutronskog fluksa. Rezultati su prikazani na slici 4.

Ova dva primera pokazuju da je do sada ostvarena zona ravnog fluksa u eksperimentima na reaktoru RB mala, ali ukazuju na način kako se ona može povećati.

4. Zaključci

Rezultati prikazani u ovom radu ukazali su na nekoliko interesantnih pitanja koja treba rešiti u daljem istraživanju.

Za rešavanje problema maksimalnog fluksa treba pre svega formulisati optimizacioni kriterijum. S obzirom da je RB reaktor bez biološke zaštite, ispravan kriterijum je maksimalan fluks pri ograničenoj dozi zračenja oko reaktora. U ovakvoj formulaciji je važno ispitati uticaj perifernog reflektora na maksimalni fluks neutrona. Takodje treba odrediti optimalni poluprečnik centralnog vertikalnog reflektora.

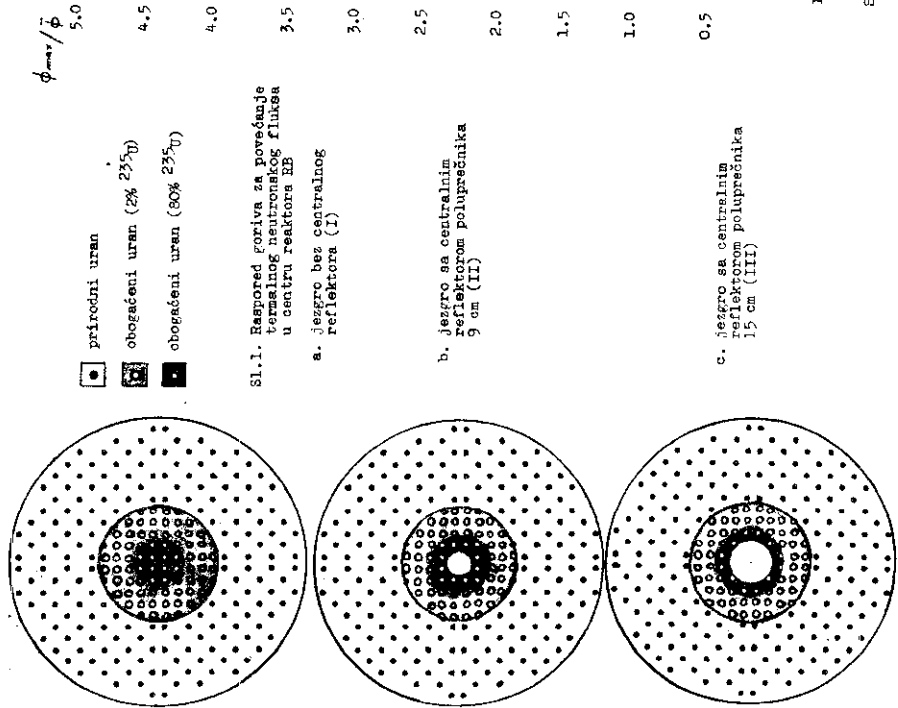
Bolje poravnanje fluksa može se postići sa rasporedom goriva kao u prikazanim eksperimentima uz povećanje zone prirodnog urana.

Neka pitanja se mogu rešiti metodom "trial and error", kao u ovom radu, ali je jedino ispravno rešenje postavljenih zadataka egzaktno formulisanje optimizacionih kriterijuma i formiranje numeričkog optimizacionog programa opštije primene koji može da rešava klasu problema formulisanih u ovom radu. Metodologija ovog programa mogla bi, naročito u slučaju poravnanja fluksa različitim obogaćenjem goriva, da se primeni i na energetske nuklearne reaktore. Pri tome eksperimenti i statički proračuni treba da budu pouzdani način provere dobijenih teorijskih rezultata.

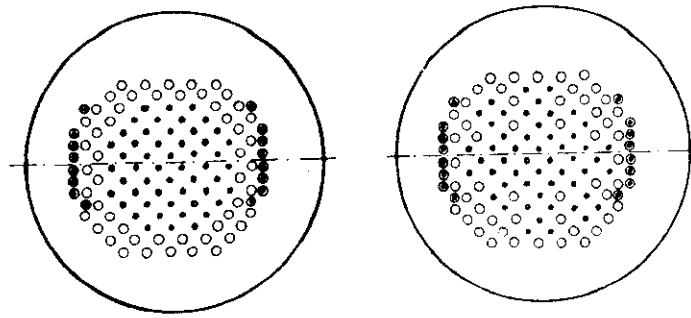
5. Literatura

- /1/ O. Šotić, S.Vranić: "Istraživački reaktor RB", Konf. o korišćenju nuklearnih reaktora u Jugoslaviji, Beograd, 1978.
-

- /2/ Osredkar M, Stephenson R., "Thermal flux in Central moderator zone of thermal and fast reactor", A/Conf. 10/p/2411,1958.
 - /3/ P. Strugar et al: "Split Core Experiments", IBK-235,1965.
 - /4/ L.S. Pontrjagin et al: "Matematičeskaja teorija optimaljnih procesov", Moskva, Nauka, 1969.
 - /5/ P. Strugar: "Maximum Neutron Flux in Thermal Research Reactors", JOTA, Vol. 5, No.4, 1970.
 - /6/ A. Kocić et al: "Uputstvo za korišćenje programa FOTO", IBK-1374, 1977.
 - /7/ Z. ^Dimitrijević, O. Šotić: "ACTIVITY, program za obradu podataka aktivacionih merenja", IBK-1281,1974.
 - /8/ Terney W.B.: "Analytic Solution to the Flat Flux Problem", Nucl.Sci. and Eng., Vol.45, N.2,1971.
 - /9/ Koga R. et al: "Optimal Control of Steady State Neutron Flux Distribution in Slab Reactors", J.Nucl.Sci. and Technol. Vol.8, No.5, 1971.
 - /10/ A.M. Pavlovičev: "Zadaci o minimume srednjekvadratnogo otklonjenija teplovideljenija i maksimume mošnosti jadernogo reaktora", Preprint ITEF, No. 108, Moskva, 1976.
-



Sl. 2. Izmerene raspodele termalnog neutronskog fluksa

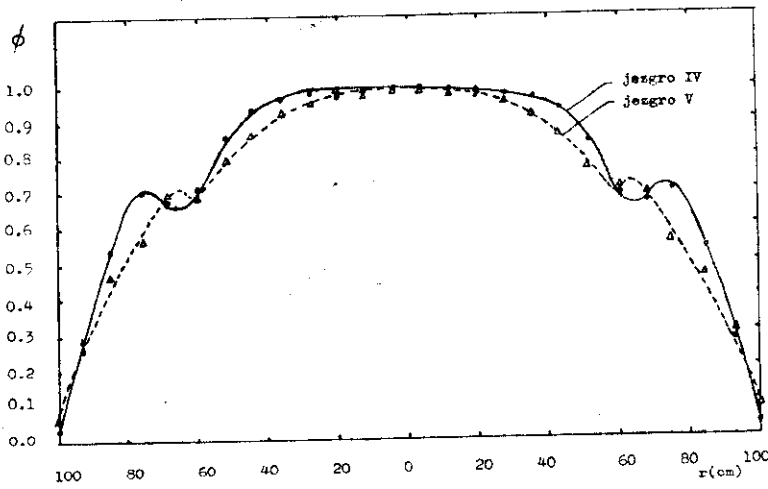


a. jezgro IV

b. jezgro V

- prirodni uran
- obogaćeni uran (2% ^{235}U)
- ⊙ obogaćeni uran (80% ^{235}U)

Sl.3 Raspored goriva za poravnanje fluksa



Sl.4. Izmerene raspodele termalnog neutronsog fluksa