

M.V.Mataušek
I.Žmijarević

REFERAT

Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič" - Vinča
OOUR Institut za nuklearnu energetiku i tehničku fiziku "NET"

SPLET - PROGRAM ZA ODREĐJIVANJE PROSTORNO-LETARGIJSKE
RASPODELE EPITERMALNIH NEUTRONA U ĆELIJI REAKTORSKE REŠETKE

SPLET - A PROGRAM FOR CALCULATING THE SPACE-LETHERGY
DISTRIBUTION OF EPITHERMAL NEUTRONS IN A REACTOR LATTICE CELL

SADRŽAJ - Postupak rešavanja prostorno-ugaono-letargijski zavisne jednačine transporta epitermalnih neutrona u cilindrizovanoj ćeliji reaktorske rešetke razvijen je i predložen u ranijim radovima. Ovde je rezimiran računski algoritam i opisan je program SPLET koji računa prostorno-letargijsku raspodelu ugaonih momenata neutronskega fluksa, kao i odgovarajuće integralne veličine kao što su iznosi reakcija datog tipa i rezonantni integrali.

ABSTRACT - A procedure to solve the space-angle-lethargy dependent transport equation for epithermal neutrons in a cylindrical multiregion reactor lattice cell has been developed and proposed in the earlier papers. Here, the computational algorithm is comprised and the computing program SPLET, which calculates the space - lethargy distribution of the spherical harmonics neutron flux moments, as well as the related integral quantities as reaction rates and resonance integrals, is described.

1. UVOD

Postupak određivanja detaljne prostorno-letargijske raspodele epitermalnih neutrona u cilindrizovanoj više z_{0n} ojoj ćeliji rešetke reaktora predložen je i razvijen u ranijim radovima /1,2/. Problem usporavanja neutrona formulisan je u vidu prostorno-ugaono-letargijski zavisne integro-diferencijalne Boltzmanove jednačine, a anizotropija neutronskega fluksa je tretirana u P-3 aproksimaciji metode sfernih harmonika /3/. Šest postojećih, u posmatranoj geometriji, momenata neutronskega fluksa smatrani su komponent-

tama vektorske funkcije fluksa koja zadovoljava matricnu integro-diferencijalnu jednačinu šestog reda, po prostornoj i letargijskoj promenljivoj.

Da bi se rešila ova jednačina, uz odgovarajuće granične i početne uslove, prvo je integral po letargiji aproksimiran svojim konačno-diferencnim oblikom. Na taj način dobijen je sistem običnih matricnih diferencijalnih jednačina po prostornoj koordinati, sa koeficijentima koji zavise od prostorne koordinate i letargije. Aproksimirajući na podesan način desnu stranu ovih jednačina, izvedeno je zatim aproksimativno analitičko rešenje za prostornu zavisnost vektora fluksa u posmatranoj letargijskoj tački. Takodje su izvedene rekurentne relacije za vektor fluksa u uzastopnim letargijskim tačkama. Postupak je numerički ispitan i dokazan u radu /2/. Kasnije je postupak dopunjen i proširen /4/. Izvedene su rekurentne relacije za faktore koji rezultuju iz numeričkog tretmana integrala po letargiji, i to posebno za brzu a posebno za rezonantnu oblast. Sprovedena je kondenzovana matricna formulacija algoritma. Takodje je predložen efikasan postupak rešavanja sistema algebarskih jednačina, kojima se iskazuju granični uslovi po prostornoj koordinati. Ovaj postupak bazira na podesnom razbijanju matrice koeficijentata na blokove.

U ovom radu sumiran je računski algoritam i opisan je program SPLET /5/, koji računa prostorno-letargijsku raspodelu ugaonih momenata neutronskog fluksa, kao i odgovarajuće integralne veličine - iznose reakcija datog tipa, grupne vrednosti efikasnih preseka i rezonantne integrale.

2. REZIME RAČUNSKOG ALGORITMA

Neka je data cilindrizovana ćelija reaktorske rešetke, sačinjena od P ($p=1,2,\dots,P$) materijalnih zona, spoljašnjeg radijusa r_p ($r_0 = 0$, $r_p = R$). Pretpostavimo da je svaka materijalna zona podeljena na Q_p podzona spoljašnjeg radijusa r_{q_p} ($q_p=1,2,\dots,Q_p$; $r_{Q_p} = r_p$). Pretpostavimo zatim da je posmatrani interval letargije (u_{\min}, u_{\max}) podeljen na veliki broj, N , podjednako udaljenih letargijskih tačaka u_n . Aproksimativno analitičko rešenje za vektor čiji su elementi prostorno i letargijski zavisni momenti neutronskog fluksa je:

$$\underline{F}_{n,q_p}^j(r) = \underline{F}_{q_p}^j(r, u_n) = \underline{\theta}_{n,p}(r) \underline{x}_{n,q_p}^j + \underline{E} \gamma_{n,q_p}^j / \underline{\Sigma}_{o,n,p}$$

za $r_{q_p-1} \leq r \leq r_{q_p}$, $q_p = 1, 2, \dots, Q_p$, $p = 1, 2, \dots, P$ i

$$n = 1, 2, \dots, N; \quad \underline{E} = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T. \quad (1)$$

Ovde j označava korak iteracije, jer se u opštem slučaju kada posmatrani letargijski opseg obuhvata i brzu i rezonantnu oblast problem mora rešavati iterativno. Matrice $\underline{\theta}_{n,p}(r)$ zavise od nuklearnih karakteristika zone p i imaju sledeći oblik

$$\underline{\theta}_{n,1}(r) = (\underline{a}_{n,1}^1 \quad \underline{a}_{n,1}^2 \quad \underline{a}_{n,1}^3), \quad (2)$$

$$\underline{\theta}_{n,p}(r) = (\underline{a}_{n,p}^1 \quad \underline{a}_{n,p}^2 \quad \underline{a}_{n,p}^3 \quad \underline{g}_{n,p}^1 \quad \underline{g}_{n,p}^2 \quad \underline{g}_{n,p}^3),$$

$$p = 2, 3, \dots, P, \quad (3)$$

gde su $\underline{a}_{n,p}^k$ i $\underline{g}_{n,p}^k$ vektori kolone šestog reda.

Veličina $\gamma_{n,p}^j$ je vrednost integrala po letargiji i spoljašnjeg izvora neutrona izračunata u iteracionom koraku j , letargijskoj tački u_n i podzoni q_p :

$$\gamma_{n,q_p}^j = \gamma_{se,n,q_p}^j + \gamma_{si,n,q_p}^j + \gamma_{f,n,q_p}^j + \bar{S}_{n,q_p}^j \quad (4)$$

gde su γ_{se,n,q_p}^j , γ_{si,n,q_p}^j i γ_{f,n,q_p}^j srednji prinosi neutrona letargije u_n u podzoni q_p od p elastičnog rasejanja, neelastičnog rasejanja i fisije, respektivno, a \bar{S}_{n,q_p}^j je spoljašnji izvor neutrona letargije u_n usrednjen po zapremini podzone q_p . Detaljni izrazi za veličine $\underline{\theta}_{n,p}$, jedn. (2) i (3), γ_{n,q_p}^j , jedn. (4), i efektivni efikasni presek $\underline{\Sigma}_{o,n,p}$, jedn. (1), dati su⁹ u radu /4/.

U jedn. (1), \underline{x}_{n,q_p}^j je vektor čiji su elementi nepoznate integracione konstante. Da bi se odredila prostorno-letargijska raspodela vektora momenata neutronskog fluksa, $\underline{F}(r, u)$, nepoznate integracione konstante treba odrediti rešavanjem sistema od $6Q-3$ algebarske jednačine ($Q = \sum_p Q_p$) kojima su iskazani uslovi kontinuiteta momenata fluksa na graničama između podzona i granični uslovi, i to za svaku letargijsku tačku u_n i u svakom koraku j iteracionog

postupka, ukoliko se problem mora rešavati iterativno. Uslov kontinuiteta momenata neutronskeg fluksa na granicama izmedju zona i podzona daje 6Q-6 algebarskih jednačina:

$$\Theta_{-n,q_p}(r_{q_p}) \underline{x}_{n,q_p}^j + E \frac{\gamma_{n,q_p}^j}{\Sigma_{0,n,q_p}} = \Theta_{-n,q_p+1}(r_{q_p}) \underline{x}_{n,q_p+1}^j + E \frac{\gamma_{n,q_p+1}^j}{\Sigma_{0,n,q_p+1}}$$

$$\text{za } q_p = 1, 2, \dots, Q_p, \quad p = 1, 2, \dots, P-1 \quad \text{i} \quad q_p = 1, 2, \dots, Q_p-1. \quad (5)$$

Na efektivnoj granici reaktorske ćelije, tj. za $r = r_{Q_p} = r_p = R$ uslov da gradijent skalarnog neutronskeg fluksa i neutronska struja postaju jednaki nuli daje još 3 algebarske jednačine:

$$\underline{n}_n \underline{x}_{n,Q_p}^j = 0, \quad (6)$$

gde je \underline{n}_n matrica reda (3x6) za čije elemente su detaljni izrazi dati u radu /4/. Iz sistema jednačina (5)-(6) sledi:

$$\underline{x}_{-n,1}^j = \sum_{q=1}^{Q-1} \left(\frac{\gamma_{n,q+1}^j}{\Sigma_{0,n,q+1}} - \frac{\gamma_{n,q}^j}{\Sigma_{0,n,q}} \right) \underline{x}_{-n,q}^j, \quad (7)$$

$$\underline{x}_{-n,q}^j = \psi_{-n,q-1} \underline{x}_{-n,q-1}^j - \left(\frac{\gamma_{n,q}^j}{\Sigma_{0,n,q}} - \frac{\gamma_{n,q-1}^j}{\Sigma_{0,n,q-1}} \right) \underline{x}_{-n,q}^j, \quad (8)$$

$$q = 2, 3, \dots, Q,$$

gde je q opšta oznaka za zonu ili podzonu.

Ovde je

$$\underline{\Sigma}_{n,q} = [\Theta_{-n,q}(r_{q-1})]^{-1} E, \quad q = 2, 3, \dots, Q; \quad (9)$$

$$\psi_{-n,q} = [\Theta_{-n,q+1}(r_q)]^{-1} \Theta_{-n,q}(r_q), \quad q = 1, 2, \dots, Q-1, \quad (10)$$

$$\underline{\Sigma}_{n,q} = [\lambda_{-n,1} \Theta_{-n,1}(r_1)]^{-1} \lambda_{-n,q} E, \quad q = 1, 2, \dots, Q-1, \quad (11)$$

gde je:

$$\lambda_{n,Q-1} = -\frac{\eta_{n,Q}}{\theta_{n,Q}} \left[\frac{\theta_{n,Q}}{\theta_{n,Q}} (r_{Q-1}) \right]^{-1}, \quad (12)$$

$$\lambda_{n,q} = \lambda_{n,q+1} \frac{\theta_{n,q+1}}{\theta_{n,q}} (r_{q+1}) \left[\frac{\theta_{n,q+1}}{\theta_{n,q}} (r_q) \right]^{-1},$$

$$q = Q-2; Q-3, \dots, 2, 1. \quad (13)$$

Važno je uočiti da se vektori $\xi_{n,q}$ i $\zeta_{n,q}$ i matrica $\psi_{n,q}$ ne menjaju u toku iterativnog rešavanja.

3. OPIS PROGRAMA SPLET

Program SPLET programiran je za računar CDC 3600 u FORTRAN IV jeziku. Kao ulazne podatke koristi geometrijske i materijalne karakteristike ćelija reaktorske rešetke i letargijski zavisne efikasne preseke za nuklide koji ulaze u sastav posmatrane ćelije. Detaljni opis ulaza dat je u radovima /5/ i /6/. Organizacija programa prikazana je na slici 1.

Za datu reaktorsku ćeliju i interval letargije prvo se na osnovu nuklearnih karakteristika materijala, koji ulaze u sastav ćelije, određuju poluprečnici podzona r_q , ukupni broj zona i podzona Q i letargijske tačke u_n . U brznoj oblasti, $u_{\min} \leq u \leq u_f$, u kojoj se moraju uzeti u obzir i efekti brze fisije, problem se rešava iterativno. Za započinjanje iterativnog postupka pretpostavlja se da je skalarni neutronska fluks prostorno ravan i da ima istu letargijsku raspodelu kao fisioni spektar. Za sve letargijske tačke u_n u brznoj oblasti, tj. za $u_{\min} \leq u_n \leq u_f$, program prvo računa matrice i vektore koji se ne menjaju u toku iterativnog postupka. To su veličine $\xi_{n,q}$, $\zeta_{n,q}$ i $\psi_{n,q}$, definisane jednačinama (9)-(13), (2), (3) i (6). Iterativni postupak sastoji se od ponovljenog računanja veličina $\gamma_{n,q}^j$, $x_{n,q}^j$ i $E_{n,q}^j(r)$, prema jednačinama (4), (7)-(8) i (1).

Pošto se završi proračun za $u \leq u_f$, i ako je $u_{\max} > u_f$, vrši se neiterativni proračun za letargijske tačke $u_f < u_n \leq u_{\max}$, koristeći rezultate iterativnog tretmana kao početni uslov po letargiji. Ovde se veličine $\xi_{n,q}$, $\zeta_{n,q}$ i $\psi_{n,q}$ ne memoriraju već se računaju sukcesivno, uporedo sa veličinama $\gamma_{n,q}$, $x_{n,q}$ i $E_{n,q}(r)$. Isti neiterativni tretman primenjuje se odmah ukoliko je $u_{\min} > u_f$. U tom slučaju može se pretpostaviti da je za $u < u_{\min}$ skalarni neu-

tronski fluks prostorno ravan i da ne zavisi od letargije.

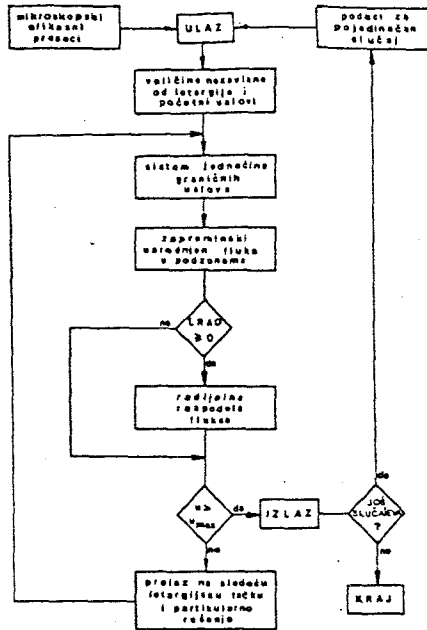
Ukoliko se to posebno zahteva, izlaz počinje štampanjem ulaznih podataka, za svaki pojedinačni slučaj počinje štampanjem glavnog naslova i promenljivog naslova koji zadaje korisnik. Zatim, slede opšti podaci o posmatranom opsegu letargije, odnosno energije, ukupnom broju letargijskih integracionih tačaka, ukupnom broju zona i podzona, kao i poluprečnici podzona.

Za svaku l -tu (l specificira korisnik) letargijsku tačku program daje odgovarajuću vrednost energije, makroskopske efikasne preseke za pojedine materijalne zone i vrednosti skalarnog neutronskeg fluksa usrednjene po zapremeni pojedinih podzona. Za određene vrednosti letargije, odnosno energije, specificirane na ulazu, program daje detaljnu radijalnu raspodelu skalarnog fluksa u onoliko tačaka koliko to korisnik želi. Pri štampanju radijalne raspodele fluksa, granične vrednosti pojavljuju se dva puta. Kontinualnost momenata neutronskeg fluksa, koja se tako uočava, predstavlja evidentni test tačnosti proračuna.

Izlaz se završava štampanjem integralnih veličina kao što su iznosi reakcija u pojedinim zonama, grupne konstante za pojedine materijale i rezonantni integrali. Jedan primer ulaza dat je na slici 2. Odgovarajući izlaz prikazan je na slici 3.

4. REFERENCE

1. M.V.Mataušek, "Usporavanje neutrona u rezonantnoj oblasti", Zbornik radova sa XV jugoslovenske konferencije ETAN-a (1971).
2. M.V.Mataušek, "Spherical Harmonics Treatment of Epithermal Neutron Spectra in Reactor Lattices", Nucl.Sci.Eng. 49, 49 (1972).
3. B.Davison, "Neutron Transport Theory", Oxford University Press, London (1958).
4. M.V.Mataušek, "On the Spherical Harmonics Treatment of Epithermal Neutron Spectra in Reactor Lattices - Further Developments and Improvements", Nucl.Sci.Eng., 65, 161 (1978).
5. M.V.Mataušek, "SPLET-A Programme for Calculating the Space-Lathargy Distribution of Epithermal Neutrons in a Reactor Lattice Cell", IBX-1055.
6. I.Zmijarević, "Odredjivanje prostorno energetske raspodele rezonantnih neutrona u ćeliji reaktorske rešetke i proračun rezonantnih integrala", diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1980.



Slika 1. Dijagram toka programa SPLET

INSTITUT ZA INŽENJERSKE NAUKE
JOSIP JOSEF VEIČKA

FORTRAN - Obrazac za pisanje numeričkih podataka

PROGRAM SPLET	Instrukcije za listanje	Stranica 1
SAMPLE PROBLEM DATA	Prepisano	od 1
Programer M. V. Matančić	Datum	
	Iskazi	

Redni no.	
1.	1210. 210. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
2.	
3.	0.000000. 0.000000. 0.000000. 0.000000. 0.000000. 0.000000.
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
11.	
12.	
13.	
14.	
15.	
16.	
17.	
18.	
19.	
20.	
21.	
22.	
23.	
24.	
25.	
26.	
27.	
28.	
29.	
30.	
31.	
32.	
33.	
34.	

PROGRAMME S P L E T. SPACE-LETHARGY DISTRIBUTION OF EPITHERMAL NEUTRONS IN CASE 1

SAMPLE PROBLEM. URANIUM - GRAPHITE CELL

LOWER BOUNDARY OF THE ENERGY RANGE CONSIDERED 1.000 EV
 UPPER BOUNDARY OF THE ENERGY RANGE CONSIDERED 14.000 EV
 LOWER BOUNDARY OF THE LEHARGY RANGE CONSIDERED 13.449
 UPPER BOUNDARY OF THE LEHARGY RANGE CONSIDERED 18.118
 TOTAL NUMBER OF LEHARGY INTEGRATION POINTS 785

NUMBER OF FUEL SURZONES 1
 NUMBER OF MODERATOR SUBZONES 1
 FUEL SURZONES MAJ01 (CM) 1.7320
 MODERATOR SURZONES MA011 (CM) 7.2088

ENERGY IN EV	LETHARGY	ABSORPTION CROSS SEC. IN FUEL	TOTAL CROSS SEC. IN FUEL	TOTAL CROSS SEC. IN MODERATOR	VOLUME AVERAGED FLUX IN FUEL	VOLUME AVERAGED FLUX IN MODERATOR
1.40000+001	1.34700+001	1.42050+002	4.92372+002	3.85440+001	1.14800+000	1.08800+000
1.19740+001	1.36437+001	1.14585+002	5.72749+002	3.85440+001	9.44303+001	9.94199+001
1.00274+001	1.38118+001	1.24881+002	6.99039+002	3.85440+001	8.77893+001	9.92090+001
0.84427+000	1.39799+001	1.47948+001	1.38185+001	3.85440+001	8.24494+001	9.76112+001
7.17172+000	1.41479+001	1.32780+000	1.37348+000	3.85440+001	2.28916+001	9.43180+001
4.85223+000	1.43160+001	1.13554+000	1.14994+000	3.85440+001	2.46917+001	9.34817+001
5.12438+000	1.44841+001	9.25950+002	1.12240+001	3.85440+001	8.37754+001	9.61349+001
4.33102+000	1.46522+001	4.86944+002	6.96412+002	3.85440+001	8.95597+001	9.64895+001
3.80150+000	1.48202+001	1.46920+002	9.02346+002	3.85440+001	8.40911+001	9.50820+001
3.39525+000	1.49883+001	5.39014+002	1.58716+002	3.85440+001	8.62297+001	9.66890+001
2.61024+000	1.51564+001	2.93493+002	5.15458+002	3.85440+001	8.18034+001	9.61763+001
2.21149+000	1.53244+001	2.97818+002	5.21213+002	3.85440+001	8.14992+001	9.62463+001
1.80937+000	1.54925+001	3.06418+002	5.30195+002	3.85440+001	8.14404+001	9.56953+001
1.59017+000	1.56606+001	3.11577+002	5.42259+002	3.85440+001	8.11110+001	9.57904+001
1.33571+000	1.58286+001	3.16141+002	4.11372+002	3.85440+001	8.03349+001	9.55350+001
1.12907+000	1.59967+001	3.20425+002	1.11971+001	3.85440+001	8.23076+001	9.47402+001

SPATIAL FLUX DISTRIBUTION AT E=6.6820+000EV

RADIUS	FLUX
7.20880+000	5.83070+005
5.77333+000	5.03070+005
1.15467+000	5.03178+005
1.73200+000	5.41053+005
1.73200+000	5.41053+005
2.62560+000	8.52877+005
3.91970+000	9.35512+005
5.21280+000	9.62007+005
6.16640+000	9.72050+005
7.20880+000	9.76280+005

SPATIAL FLUX DISTRIBUTION AT E=6.7154+000EV

RADIUS	FLUX
0.00000+000	1.00000+000
5.77333+001	1.00000+000
1.15467+000	1.00000+000
1.73200+000	5.41220+001
1.73200+000	5.41000+001
2.62560+000	8.53064+001
3.91970+000	9.35680+001
5.21280+000	9.62179+001
6.16640+000	9.72220+001
7.20880+000	9.76450+001

TOTAL ABSORPTION RATE IN FUEL 1.97327+006 (1.73200+000 CM)
 TOTAL REACTION RATE IN FUEL 2.54664+006 (2.20000+000 CM)
 TOTAL REACTION RATE IN MODERATOR 1.50880+002 (7.20880+000 CM)
 RESONANCE INTEGRAL Z38 3.33781+000 (8400)
 RESONANCE INTEGRAL Z39 1.41823+000 (80000)