

## PRORAČUN UGAONE RASPODELE KOLIMISANOG $^{252}\text{Cf}$ NEUTRONSKOG IZVORA

Petar Beličev,<sup>1</sup> Saša Ćirković,<sup>1</sup> Boško Bojović,<sup>1</sup> R. Radiša,<sup>2</sup> I. Obradović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorija za fiziku (010), Institut za nuklearne nauke "Vinča", P.P. 522, 11000 Beograd, SCG

<sup>2</sup>LOLA Sistem – Lola Institut, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd, SCG

**Sadržaj** - Proračun ugaone raspodele neutronske fluksa na izlazu iz kompaktnog neutronske kolimatora sa fisijom  $^{252}\text{Cf}$  izvorom neutrona izvršen je Monte Carlo metodom. Analizirana je zavisnost dobijene raspodele od aksijalnog položaja neutronske izvora unutar kolimatora, i data njena analitička aproksimacija. S obzirom da se ovakav tip kolimatora najčešće koristi u rutinskim primenama kao što je neutronska radiografija i ozračavanje biološkog materijala u eksperimentalne svrhe, data zavisnost omogućava brzo i jednostavno podešavanje položaja izvora za zahtevanu ugaonu raspodelu neutrona.

### 1. UVOD

Radionuklidni izvori neutrona imaju veoma široku primenu u nuklearnoj tehnici, tehničkoj dijagnostici, geološkim istraživanjima, medicini i t.d. Energijska i ugaona raspodela neutrona iz ovakvih izvora određena je tipom nuklearne reakcije koja dovodi do oslobađanja neutrona, kao i tehnološko-tehničkim rešenjima primenjenim u postupku elaboracije izvora. Pomenute raspodele, zajedno sa intenzitetom, predstavljaju najvažnije karakteristike neutronske izvora i (osim intenziteta) uglavnom su konstantne tokom njegovog eksploatacionog perioda.

S druge strane, širok opseg primene ovakvih izvora nameće potrebu za raspodelama neutrona koje se veoma često ne poklapaju sa inherentnim raspodelama neutronske izvora. Generalno uzevši, u praksi se uglavnom zahtevaju usmereni snopovi neutrona, dok se originalna ugaona raspodela kod pomenutih izvora u najvećem broju slučajeva može okarakterisati kao bliska izotropnoj.

Da bi se ublažila pomenuta diskrepancija između zahtevanih i inherentnih karakteristika neutronske polja, pribegava se njihovom prilagođavanju u skladu sa specifičnom primenom neutronske izvora. Jedan od veoma rasprostranjenih načina prilagođavanja energetske i ugaone raspodele sastoji se u korišćenju tzv. neutronske kolimatora. S obzirom na funkciju koju treba da ispune, neutronske kolimatori se sastoje od moderatorske dela (obično polietilen, parafin ili voda) koji "omekšava" energijski spektar iz izvora uz što manje gubitke neutrona usled apsorpcije. Kolimisanje ovako usporenih i/ili termalizovanih neutrona, zbog njihove električne neutralnosti, vrši se uklanjanjem iz snopa svih onih neutrona čiji se pravac ne poklapa sa željenim. Ovo se postiže pomoću konusnih/cilindričnih šupljina u moderatoru čije su ose usmerene u željenom pravcu, a zidovi obloženi slojem neutronske apsorbera, najčešće kadmijumom. I pored veoma široke primene neutronske kolimatora, detaljnija analiza uticaja njihovih karakteristika na energijsku i ugaonu raspodelu neutronske polja, u dostupnoj stručnoj literaturi nije sprovedena. Razlog za ovo, verovatno, delimično leži i u činjenici što je upotreba kolimatora najrasprostranjenija u tzv. industrijskim primenama, gde se oni rutinski primenjuju u

standardizovanim postupcima, te se njihovom optimiziranju i ispitivanju karakteristika koje su van interesa konkretne primene ne poklanja posebna pažnja.

U ovom radu analiziran je sistem sa radionuklidnim izvorom na bazi spontane fisije  $^{252}\text{Cf}$  i kolimatorom sa fiksnim materijalnim sastavom koji kao moderator koristi polietilen, dok se kao zaštitni materijali koriste parafin, bor i olovo (sl.1). Ispitan je uticaj aksijalnog položaja izvora na ugaonu raspodelu neutrona na izlazu iz kolimatora. Slična analiza, vezana za uticaj na intenzitet termičkog, intermedijarnog i brzog neutronske fluksa, sprovedena je u [1]. Analiza je sprovedena pomoću za tu svrhu razvijenog računarske programa CF\_KOLIMA [2], baziranog na Monte Carlo metodi.

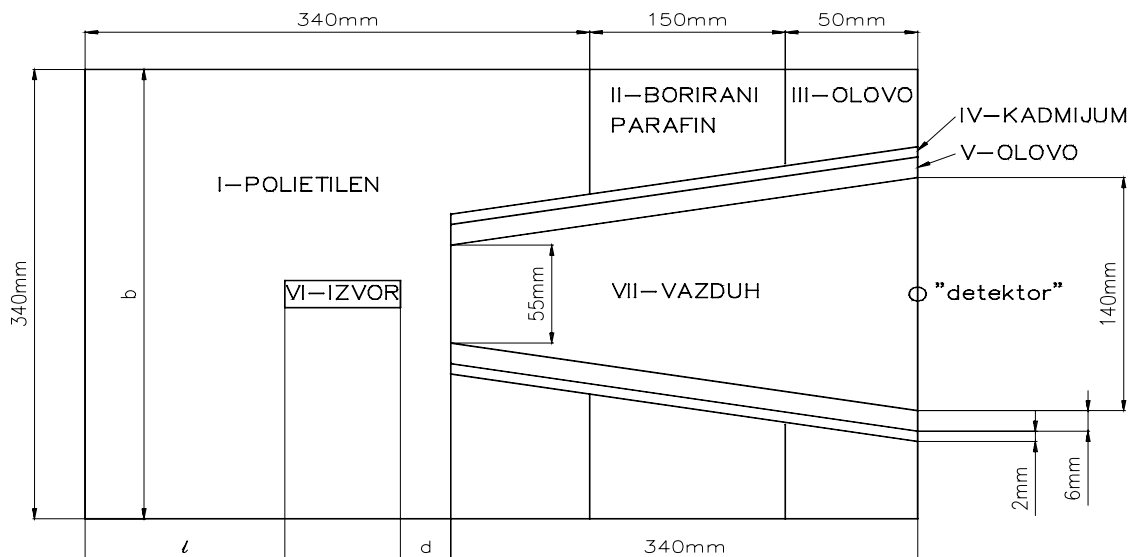
### 2. MATERIJALI I METODE

S geometrijske stanovišta neutronske kolimator predstavlja kvadar sa kvadratnom osnovom i konusnom šupljinom (sl.1). Sa stanovišta konstrukcionih materijala razlikujemo sedam materijalnih zona, na sl.1 obeleženih rimskim brojevima.

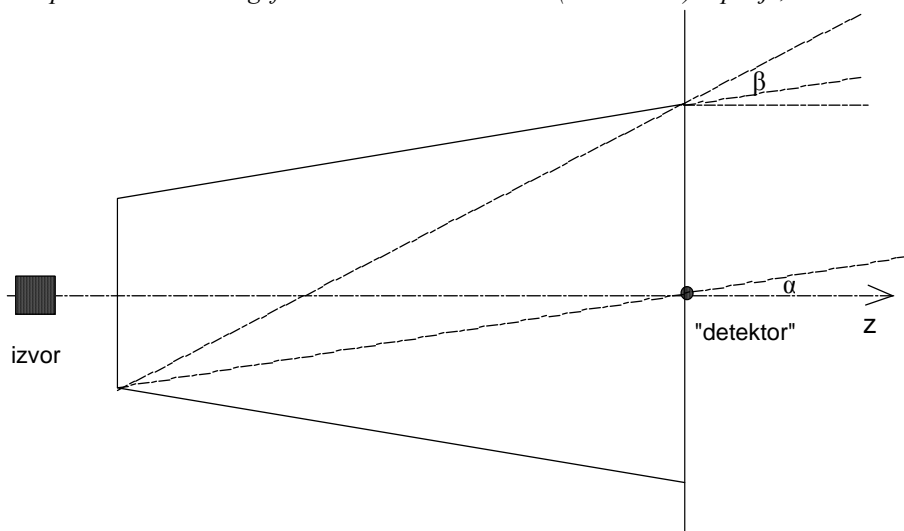
Prva zona se sastoji od polietilena koji hemijski predstavlja smešu ugljovodoničnih lanaca različitih dužina koji su opisani formulom  $(\text{CH}_2)_n$ . Ova zona, zbog povoljnih moderatorske osobine polietilena, ima za cilj termalizaciju neutrona iz izvora. Druga zona predstavlja smešu parafina i borne kiseline, u težinskom odnosu 9:1. Hemijski, parafin predstavlja ugljovodonik opisan formulom  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ , dok je borna kiselina opisana formulom  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Broj n se u formuli za parafin kreće od 19 do 35, a za potrebe proračuna usvojeno je  $n = 27$ . Zadatak ove zone je da apsorbira termičke neutrone i time u najvećoj mogućoj meri smanji "zagađenje" kolimisanog snopa termičkim neutronima čiji pravci kretanja sa osom konusne šupljine zahvataju ugao veći od ugla izvodnica konusa ( $\approx 7.5^\circ$ ).

Treća i peta zona sadrže olovo, čiji je zadatak da oslabe prateće gama zračenje iz  $^{252}\text{Cf}$  neutronske izvora i time dobije što čistiji neutronske snop. Četvrta zona je od kadmijuma, koji s obzirom na veliki mikroskopski efektivni presek za apsorpciju u oblasti energija ispod 0.5 eV, sprečava prolazak termičkih neutrona iz druge i treće u sedmu zonu i time poboljšava kolimisanost snopa neutrona termičkih energija. Šesta zona u stvari predstavlja sam neutronske izvor baziran na spontanoj fisiji radionuklida  $^{252}\text{Cf}$  koji se nalazi u čeličnoj kapsuli oblika šupljeg cilindra. Za potrebe proračuna smatra se da je neutronske izvor tačkast i smešten u sredini kapsule koja je od homogenog materijala bez unutrašnje šupljine. Sedma zona predstavlja unutrašnju šupljinu kolimatora ispunjenu vazduhom, pomoću koje se ekstrahuje kolimisan neutronske snop. Za rešavanje postavljenog problema korišćene su dve nuklearne datoteke. Svi za ovaj

problem relevantni nuklearni podaci, osim diferencijalnog efektivnog preseka za elastično



Sl. 1. Geometrija i materijalne zone sistema neutronske izvora-kolimatora. Geometrijski parametri čiji se uticaj na ugaonu raspodelu neutronskega fluksa na izlazu kolimatora ("detektor") ispituje, obeleženi su sa  $d$ ,  $l$  i  $b$ .



Sl. 2. Uz izračunavanje ugaone raspodele fluksa neutrona.

rasejanje, uzeti su iz datoteke BNAB-78, koja u 28 energijskih grupa pokriva opseg od termičkih energija do 14.5 MeV [3]. S obzirom na svoju pouzdanost i kompaktnost, ona pruža najadekvatniji kompromis između veličine nuklearnih datoteka kojima treba manipulirati u toku proračuna, i detaljnosti opisivanja nuklearnih procesa. Problem određivanja tzv. faktora samozaklanjanja u rezonantnoj oblasti energije, prevaziđen je korišćenjem podgrupne aproksimacije [4]. Odgovarajući podgrupni efektivni preseki takođe su uzeti iz gore pomenute datoteke nuklearnih podataka. Diferencijalni efektivni presek za elastično rasejanje uzet je iz ENDF/B-4 datoteke nuklearnih podataka [5]. Interakcija neutrona na termičkim energijama tretirana je preko modela jednoatomske slobodnog gasa.

Analiza postavljenog problema je sprovedena primenom neanalogne Monte Karlo metode, koja je u ovom slučaju najpogodnija s obzirom na veoma malu verovatnoću da neutronska istorija započeta u neutronske izvora završi na izlazu iz kolimatora (izračunata vrednost je oko  $10^{-5}$ ). Korišćene su sledeće neanalogne tehnike [6]: *tehnika*

*prisilne interakcije* (forced collision) koja veštački skraćuje slobodne puteve neutrona, ne dozvoljavajući im da umaknu iz sistema, čime se povećava broj interakcija u prvoj materijalnoj zoni i time favorizuju "važnije" neutronske istorije; *tehnika statističkih težina neutrona* kojom se sprečava apsorpcija neutrona; *tehnike ruskog ruleta* i *energetskog praga* za prekid neutronske istorije sa niskom statističkom težinom i energijom; *ocena tačastog detektora* primenom koje svaka neutronska istorija daje doprinos veličini koja se računa (u našem slučaju, fluksu neutrona).

### 3. REZULTATI PRORAČUNA

U cilju proučavanja uticaja pojedinih geometrijskih parametara kolimatorskog sistema na ugaonu raspodelu neutrona, izvršen je niz proračuna uz variranje geometrijskih parametara koji su od interesa. Nakon analize problema, odlučili smo se za tri parametra (sl. 1): rastojanje neutronske izvora od ulaza u konusni deo kolimatora -  $d$ , debljinu moderatorskeg sloja iza neutronske izvora -  $l$ , poprečne

dimenzije kolimatora - b. Ostali geometrijski parametri, kao što su dimenzije II, III i V zone, interesantni su uglavnom sa aspekta rešavanja problema zaštite od neutrona i gama zračenja u prostoru ispred kolimatora, dok je njihov uticaj na veličine koje nas interesuju od drugorazrednog značenja.

Ugaona raspodela neutronskega fluksa izračunata je za dve energetske grupe: brzu (0.465eV-10.5MeV) i termičku (0.001eV-0.465eV). Rezultati su prikazani u obliku gustine neutronskega fluksa  $\Phi_f(\mu)$  i  $\Phi_{th}(\mu)$  po jediničnom intervalu kosinusa ugla  $\mu$ , gde je ugao  $\arccos(\mu)$  meren u odnosu na Z osu (sl. 2). Za razliku od energetske raspodele fluksa, ugaona raspodela značajno zavisi od položaja tačke "detektora" u kojoj se ona izračunava. Ukoliko ovu tačku pomeramo po kružnoj površini na izlazu kolimatora, menjaju se maksimalni i minimalni uglovi pod kojima neutroni iz moderatora mogu da direktno, ne presecajući kadmijumski konusni sloj, stignu u tačku "detektora". Na sl. 2 ilustrovana su dva ekstremna slučaja kada je "detektor" u centru i na periferiji kruga.

Da bi se dobila kompletnija informacija o ugaonoj raspodeli neutrona po celoj površini na izlazu iz kolimatora, izvršeni su proračuni u šest različitih tačaka detektora koji su raspoređeni radialno na rastojanjima jednakim: 0, 1.4, 2.8, 4.2, 5.6 i 7cm od Z ose. Pretpostavljajući azimutalnu simetriju ugaone raspodele u odnosu na Z osu, izvršeno je usrednjavanje dobijenih rezultata sa težinskim faktorima jednakim površinama kružnih prstenova koji su definisani gore navedenim rastojanjima. Pri tome se smatra da je raspodela unutar prstenova konstantna i jednaka aritmetičkoj sredini raspodele na unutrašnjoj i spoljnoj ivici kružnog prstena.

Na sl.3 i 4 prikazane su ugaone raspodele termičkog i brzog fluksa u zavisnosti od parametra d. Kao što se i moglo očekivati, ugaona raspodela termičkog fluksa ima maksimum u oblasti  $\mu > 0.96$ , što je jednako kosinusu maksimalnog graničnog ugla  $\beta$  na sl. 2. Vrednosti ugaone raspodele fluksa za  $\mu < 0.96$  su skoro za dva reda veličine manje i sa velikom disperzijom, zato što su, statistički gledano, neutroni sa ovakvim pravcima kretanja, veoma retki. Ugaona raspodela fluksa u brzom energetskoj oblasti takodje ima maksimum pri malim uglovima, s tim što je broj neutrona sa uglovima kretanja većim od maksimalnog graničnog ugla  $\beta$  veći u odnosu na termički fluks. Povećanjem rastojanja d, oblik raspodele u brzom oblasti se bitno ne menja što pokazuje da glavni doprinos fluksu daju neutroni koji na izlaz kolimatora stižu ili direktno iz izvora ili nakon relativno malog broja sudara u blizini Z ose kolimatora. Standardna devijacija rezultata obeležena je za svaki energijski kanal.

Imajući u vidu da u teoriji ne postoji analitičko rešenje za razmatranu ugaonu raspodelu, postavljanje bilo kakve analitičke funkcije kroz izračunate tačke na sl. 3 i 4 nema posebnog smisla. Kako je za praktične potrebe od interesa stepen kolimisanosti izlaznog snopa neutrona, na osnovu dobijenih rezultata izvršen je proračun srednjeg kosinusa  $\langle \mu \rangle$  u zavisnosti od parametra d. Ova veličina, za brzu i termičku oblast energija prikazana je na slici 5. Pored srednje vrednosti ugaone promerljive, izračunat je i kosinus  $\mu_{90}$ , definisan tako da za 90% fluksa u izlaznom snopu važi  $\mu_{90} < \Omega k < 1$ , gde je  $\Omega$  pravac kretanja neutrona, a  $k$  ort Z ose. Zavisnost  $\mu_{90}$  od d prikazana je na sl. 6. Analizom prikazanih dijagrama može se zaključiti da je kolimisanost termičkog fluksa veoma dobra, i da ona, za rastojanja  $d \geq 4$ cm ne zavisi od d. Srednja vrednost ugla neutrona, u oblasti  $d \geq 4$ cm iznosi oko  $8^\circ$ , što je blisko uglu izvodnice konusnog dela kolimatora ( $\approx 7.5^\circ$ ). Širina snopa

termičkih neutrona izražena u ugaonoj promerljivoj takodje pokazuje tendenciju neosetljivosti na promenu d, u oblasti  $d \geq 4$ cm. Najveću divergenciju snopa imamo za  $d = 0$ cm koja iznosi  $\theta_{90} = \arccos(\mu_{90}) \approx 17^\circ$ , a zatim se u oblasti  $d \geq 4$ cm ustaljuje na oko  $12^\circ$ , što je blisko maksimalnom graničnom uglu  $\beta$  na sl.2. Postojanje granične vrednosti za rastojanje izvora ( $d=4$ cm) nakon koje je kolimisanost snopa termičkih neutrona nepromerljiva, trebalo je i očekivati s obzirom da kod malih vrednosti d (ispod 4cm) značajan deo termalizovanih neutrona koji stižu na izlaz kolimatora potiče od neutrona koji se termalizuju na većim rastojanjima od Z ose pa zato i njihovi pravci kretanja zahvataju relativno velike uglove sa osom. Povećanjem d, povećava se udeo onih neutrona koji se termalizuju u sloju moderatora između izvora i ulaza u konusni deo kolimatora, a koji, iz geometrijskih razloga, zahvataju manje uglove sa Z osom.

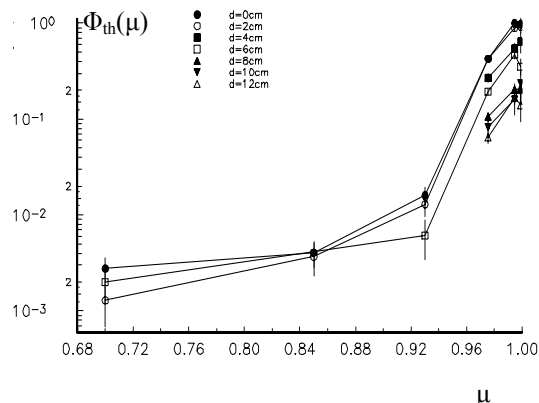
Kolimisanost neutrona u brzom oblasti je slabija u odnosu na termičku. U ovoj oblasti ne postoji granična vrednost za rastojanje izvora d, nakon koje se vrednosti  $\langle \mu \rangle$  i  $\mu_{90}$  ne menjaju. Povećanje rastojanja izvora d dovodi do povećanja  $\langle \mu \rangle$  i  $\mu_{90}$  što znači i poboljšanje kolimisanosti snopa. Najveću divergenciju snopa imamo za  $d = 0$ cm i iznosi  $\theta_{90} = 32^\circ$ , a zatim dolazi do sužavanja snopa tako da za  $d = 12$ cm imamo širinu snopa od oko  $16^\circ$ . Poboljšanje kolimisanosti snopa brzih neutrona sa povećanjem rastojanja izvora d može se objasniti činjenicom da veliki udeo u brzom fluksu imaju neutroni koji ili direktno iz izvora, ili nakon malog broja interakcija stižu na izlaz kolimatora. S obzirom da se sa povećanjem d smanjuje prostorni ugao pod kojim se iz izvora "vidi" kružni otvor na izlazu kolimatora, logično je očekivati da će snop brzih neutrona postajati "paralelniji" sa porastom rastojanja izvora d.

Za praktične potrebe, ugaonu raspodelu termičkih neutrona možemo aproksimirati tzv. step funkcijom, pri čemu smatramo da su neutroni uniformno raspodeljeni u oblasti  $0^\circ < \theta < \theta_{90}$ , gde je  $\theta_{90} = 12^\circ$  za  $d \geq 4$ cm, dok se u oblasti  $0 \leq d < 4$ cm može usvojiti  $\theta_{90} \approx 15^\circ$ .

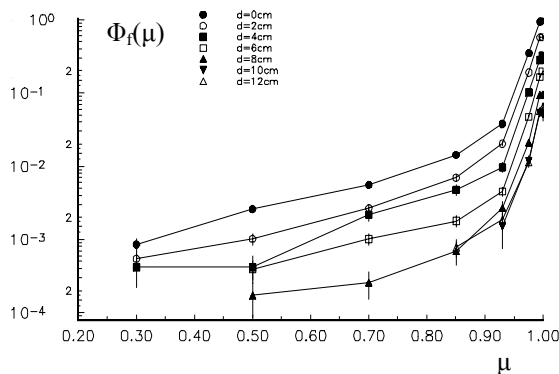
U brzom energetskoj oblasti, mogu se koristiti sledeći aproksimativni izrazi za  $\langle \mu \rangle$  i  $\mu_{90}$

$$\langle \mu(d) \rangle = 3 \cdot 10^{-3} d + 0.94 \quad d \leq 12 \text{ cm} \quad (1)$$

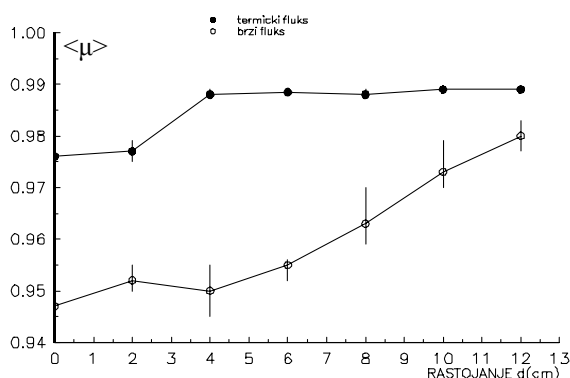
$$\mu_{90}(d) = 9.4 \cdot 10^{-3} d + 0.84$$



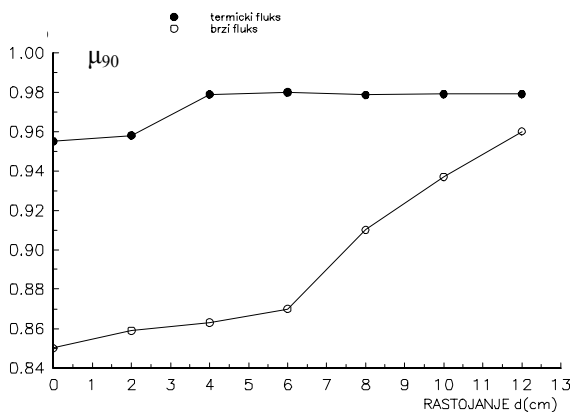
Sl. 3. Zavisnost gustine ugaone raspodele termičkog fluksa na izlazu iz kolimatora za različita rastojanja izvora d.



Sl. 4. Zavisnost gustine ugaone raspodele brzog fluksa na izlazu iz kolimatora za različita rastojanja izvora  $d$ .



Sl. 5. Zavisnost srednjeg kosinusa ugla neutronskog snopa od rastojanja izvora  $d$ .



Sl. 6. Zavisnost kosinusa ugla divergencije neutronskog snopa od rastojanja izvora  $d$ .

pri čemu je srednja kvadratna greška u oba izraza manja od  $10^{-3}$ .

Koristeći ove zavisnosti, i u ovoj oblasti ugaonu raspodelu možemo aproksimirati već pomenutom step funkcijom, pri čemu važ  $\mu_{90} < \mu < 1$ , gde je vrednost za  $\mu_{90}$  izračunata prema jednačini 1. U još grubljoj aproksimaciji možemo smatrati da su svi neutroni na izlazu iz kolimatora paralelni i zahvataju ugaon  $\text{accos}(\langle \mu \rangle)$  sa  $Z$  osom, gde je  $\langle \mu \rangle$  dat jednačinom (1). Na osnovu rezultata iz [1, 2], gde je pokazano da parametar  $b$  ne utiče na energetska raspodelu fluksa a da parametar  $l$  utiče samo na termički fluks (sl. 2), sledi da ovi parametri ne utiču na ugaonu raspodelu fluksa na izlazu iz kolimatora.

## 4. ZAKLJUČAK

Analizom zavisnosti ugaone raspodele neutrona od rastojanja izvora  $d$ , može se uočiti veoma dobro kolimisanje termičkog neutronskog fluksa na izlazu iz kolimatora, koje je skoro u potpunosti definisano uglom njegove konusne šupljine. Slično se može zaključiti i za kolimisanje brzih neutrona, s tim što je njihova divergencija značajno veća od termičkih. U uprošćenju interpretaciji rezultata preko prvog momenta raspodele i konusa koji sadrži 90% neutronskog fluksa, efekti kolimisanja ostaju isti, ali je fizičko objašnjenje olakšano. Naime, u termičkoj oblasti pojavljuje se granična vrednost za rastojanje izvora od izlaza iz kolimatora posle koga kolimisanost snopa dostiže svoj maksimum. Kod brzih neutrona ovaj se efekat ne pojavljuje. Obe pojave se jednostavno objašnjavaju samim procesom termalizacije, kao i specifičnom geometrijom kolimatora.

Za praktične potrebe, određeni su linearni fitovi parametara ugaonih raspodela u funkciji rastojanja  $d$ , što omogućava jednostavno proračunavanje položaja izvora unutar kolimatora, radi dobijanja željene kolimisanosti snopa.

## LITERATURA

- [1] P. Beličev, B. Bojović, "Proračun neutronskog fluksa kolimisanog  $^{252}\text{Cf}$  izvora", *XLIV ETRAN*, 2000, Soko Banja, pp. 93-96.
- [2] P. Beličev, *Primena Monte Karlo metode u određivanju energetske i ugaone raspodele kolimisanih neutronskih izvora*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beogradu, 1992.
- [3] L.P. Abagian, N.O. Bazazjanc, I.I. Bondarenko, M.N. Nikolaev, *Grupповые константы длины расчёта ядерных реакторов*, Energoizdat, Moskva, 1981.
- [4] D.E. Cullen, "Application of the Probability Table Method to Multigroup Calculations of Neutron Transport", *Nucl. Sci. Eng.*, 55, pp. 378-400, 1974.
- [5] *ENDF-102 Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF*, Information Analysis Center Report, BNL, Upton, New York, 1975.
- [6] L.L. Carter, E.D. Cashwell, *Particle-Transport Simulation with Monte Carlo Method*, Technical Information Center, U.S. Energy Research and Development Administration, 1975.

**Abstract** - The Monte Carlo neutron transport simulation method is used to analyse the influence of the neutron collimator geometry on neutron flux angular distribution of a collimated  $^{252}\text{Cf}$  neutron source. Linear dependence between the distribution parameters and the geometric collimator parameters is given.

### NEUTRON FLUX ANGULAR DISTRIBUTION CALCULATION OF THE COLLIMATED $^{252}\text{Cf}$ NEUTRON SOURCE

P. Beličev, S. Ćirković, B. Bojović, R. Radiša, I. Obradović