

Igor Zmijarević, Ivan Petrović  
 Institut za nuklearne nauke "B.Kidrić", Vinča

VAMPIR - DVOGRUPNI DVODIMENZION I DIFUZIONI PROGRAM ZA  
 PRORAČUN IZGARANJA NUKLEARNOG GORIVA UJEZGRU REAKTORA

VAMPIR - A TWO-GROUP TWO-DIMENSIONAL DIFFUSION  
 COMPUTER CODE FOR BURN-UP CALCULATION

SADRŽAJ - VAMPIR je računarski program za simulaciju izgaranja goriva u jezgru reaktora. Računa raspodelu neutronskog fluksa, gustine snage i izgaranja pri čemu se uzimaju u obzir prostorne varijacije temperature i zatovanja ksenonom. Difuzioni proračun se vrši u aproksimaciji konačnim razlikama u X-Y ili R-Z geometriji. Koristi biblioteku dvogrupnih ćelijskih konstanti u funkciji izgaranja dobijenih proračunom programom WIMS-D4 koje su tabelirane za različite vrednosti ostalih parametara relevantnih za proračun reaktora. U radu su prikazane osnovne karakteristike i mogućnosti programa.

ABSTRACT - VAMPIR is a computer code which simulates the burnup within a reactor core. It computes the neutron flux, power density distribution and burnup taking into account spatial variations of temperature and xenon poisoning. Its overall reactor calculation uses diffusion theory with finite differences approximation in X-Y or R-Z geometry. Two-group macroscopic cross-section data are prepared by the lattice cell code WIMS-D4 and stored in the library form of multi entry tabulation against the various parameters that significantly affect the physical conditions in the reactor core. Herein, the main features of the program are presented.

## 1. UVOD

Osnovna aproksimacija koja se vrši prilikom proračuna reaktora je razdvajanje ćelijskog i globalnog proračuna. Ćelijski parametri se računaju pod pretpostavkom da gorivo izgara u sredini sa nepromenljivim uslovima (gustina snage, temperatura, gustina hladioca, zatovanje). Ovo nije realno stanje u jezgru reaktora te je potrebno uzeti u obzir prostornu varijaciju grupnih konstanti. Uobičajena aproksimacija prilikom proračuna izgaranja nuklearnog goriva je podela jezgra na određeni broj zona u kojima se smatra da gorivo izgara uniformno tj. izloženo je neutronskom fluksu koji je konstantan u prostoru i nepromenljiv u toku određenog perioda vremena. Pri tome, grupne konstante koje karakterišu jednu određenu zonu jezgra moraju odgovarati lokalnim vrednostima navedenih parametara. Na ovaj način višedimenzioni proračun raspodele snage u jezgru pret-

stavlja iterativni postupak koji se sastoji u sukcesivnom određivanju grupnih konstanti na osnovu zadate raspodele snage i temperatura po zonama i ponovnom određivanju ovih raspodela na osnovu novodobijenih grupnih konstanti. Da bi se izbegao veliki broj ćelijskih proračuna neophodno je izvršiti određene aproksimacije.

Program VAMPIR koristi unapred izračunate dvogrupne ćelijske konstante u funkciji izgaranja koje su tabelirane za različite vrednosti parametara koji znatno utiču na neutronske fizičke karakteristike jezgra (temperatura, gustina hladioca) i smeštene su u biblioteci. Grupne konstante koje odgovaraju lokalnim uslovima u određenoj zoni jezgra računaju se u programu tako što se vrednosti koje odgovaraju određenom izgaranju i temperaturi hladioca određuju interpolacijom podataka u biblioteci, a uticaj zatrovanja ksenonom uzima se obzir preko korekcije makroskopskog efokasnog preseka za apsorpciju na osnovu razlike između lokalne gustine snage u zoni i referentne koja je data u biblioteci. Program je još u fazi razvoja i ne sadrži modul za proračun termo-hidrodinamičkih efekata, već se raspodela temperatura zadaje na ulazu.

## 2. OPIS PROGRAMA

VAMPIR je dvogrupni difuzioni program za simulaciju izgaranja u jezgru reaktora. Računa prostornu raspodelu neutronske fluksa, gustine snage i izgaranja u funkciji vremena rada reaktora. Pri tome su moguća dva osnovna tipa proračuna:

- proračun efektivnog faktora umnožavanja neutrona u funkciji vremena i
- proračun položaja kontrolnih šipki za zadati faktor umnožavanja koji se održava konstantnim u toku izgaranja.

Problem se može definisati u X-Y ili R-Z geometriji. Ostale mogućnosti programa su:

- automatska zamena i izneštanje goriva,
- proračun promene reaktivnosti jezgra po zaustavljanju reaktora usled nagomilavanja ksenona.

Biblioteka podataka koju koristi program VAMPIR rezultat je niza ćelijskih proračuna transportnim programom WIMS-D4. Sadrži dvogrupne makroskopske efikasne preseke u funkciji izgaranja koji mogu biti tabelirani za različite vrednosti ostalih parametara relevantnih za proračun reaktora kao što su gustina snage odnosno izgaranja goriva, temperatura goriva, hladioca i/ili moderatora. Jedan niz grupnih konstanti u funkciji izgaranja, pri čemu ostali parametri imaju konstantnu vrednost, rezultat je jednog proračuna programom WIMS-D4. Ovakav niz podataka smešten je u jednom bloku u biblioteci koja je, da bi se ostvarila što veća brzina prenoša podataka, organizovana kao bibli-

oteka sa direktnim pristupom. Biblioteka se formira posebnim pomoćnim programom koji reorganizuje podatke koji se nalaze na posebnom izlazu programa WIMS-D4 u vidu binarnog zapisa.

Modul za dvodimenzioni difuzioni proračun preuzet je iz programa EREBUS i ima zadovoljavajuću brzinu proračuna u sadašnjoj fazi razvoja programa. Sistem difuzionih jednačina koji pretstavlja problem sa sopstvenom vrednošću preveden u formu konačnih razlika rešava se na uobičajeni način dvostrukim iterativnim postupkom. Spoljašnje iteracije se ubrzavaju Čebiševljevim ekstrapolacionim metodom, a za ubrzanje unutrašnjih iteracija koristi se metod sukcesivne nadrelaksacije sa promenljivim faktorima nadrelaksacije, tzv. Čebiševljev ciklični metod. Granični uslovi na spoljašnjim granicama sistema definišu se jednačinom

$$a_i \phi_i + b_i D_i \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$

gde se konstante  $a_i$  i  $b_i$  zadaju na ulazu za svaku grupu posebno. Unutar reaktora moguće je zadati granične uslove na granicama pojedinih zona (naprimer kontrolne šipke) oblika

$$D_i \frac{\partial \phi}{\partial n} = -C_i \phi_i$$

tako što se definiše materijal koji zauzima ovu zonu i kome se pridružuju konstante  $C_i$ . U ovom slučaju raspodela neutronskog fluksa se ne računa u onoj grupi u kojoj je  $C_i \neq 0$ . U suprotnom fluks u određenoj grupi računa se kao u običnom difuzionom materijalu.

Dijagram toka programa prikazan je na slici 1. Parametar kojim se opisuje stanje goriva u određenoj zoni jezgra i koji se koristi za korekciju čelijskih parametara je brzina izgaranja koja se u programu izračunava prema

$$R = ( E_1 \Sigma_{f1} \phi_1 + E_2 \Sigma_{f2} \phi_2 ) / M$$

gde je  $E$  energija oslobodjena pri fisiji,  $\phi$  je srednji fluks neutrona u zoni normiran na zadatu snagu, a  $M$  je srednja gustina goriva u ćeliji reaktorske rešetke (odnosi se na početnu masu teških nuklida).

Proračun započinje tako što se za zadato početno izgaranje i raspodelu temperatura hladioca po zonama traže odgovarajuće vrednosti grupnih konstanti linearnom interpolacijom podataka u biblioteci. Zatim se na osnovu pretpostavljene raspodele brzine izgaranja vrši korekcija grupnih konstanti usled zatro-

vanja ksenonom. Po završenom difuzionom proračunu, raspodela neutronskog fluksa se normira na zadatu snagu i određuju se srednje vrednosti brzina izgaranja po zonama. Ovako dobijena raspodela brzina izgaranja pretstavlja ulaz za sledeću iteraciju tj. koristi se za ponovnu korekciju grupnih konstanti. Iterativni postupak se prekida kada maksimalna greška u razlici prostorne raspodele gustine snage u dve sukcesivne iteracije postane manja od zadate.

Izgaranje se računa pod pretpostavkom da je raspodela snage konstantna u toku određenog intervala vremena te se izgaranje u svakoj zoni izražava kao proizvod brzine izgaranja i dužine vremenskog intervala:

$$B(t + \Delta t) = B(t) + R \Delta t.$$

Proračun se zatim ponavlja za nove vrednosti ćelijskih parametara koji se određuju interpolacijom.

Broj i dužina koraka izgaranja se zadaje na ulazu ili se može koristiti jedna od sledećih mogućnosti za završetak procesa izgaranja: zadaje se dužina vremenskog intervala a proračun se prekida kad

- $k_{\text{eff}}$  postane manje od zadate vrednosti  $k_{\text{min}}$  ili kad se
- u slučaju proračuna položaja kontrolnih šipki za zadatu vrednost  $k_{\text{eff}}$  dogodi da izvlačenje šipki ne može održati zahtevanu vrednost reaktivnosti.

U slučaju a) vrši se novi proračun reaktora odnosno raspodele snage koja odgovara kraju "života" jezgra ( $t = t(k_{\text{min}})$ ) pri čemu se izgaranje određuje linearnom interpolacijom tako što se  $\Delta t$  množi faktorom

$$x = (k_{\text{eff}}(t + \Delta t) - k_{\text{min}}) / (k_{\text{eff}}(t) - k_{\text{eff}}(t + \Delta t))$$

pa se veličina  $x \Delta t$  dodaje kao sledeći vremenski interval. U oba slučaja proračun se može nastaviti zamenom i izmeštanjem goriva.

### 3. ZATROVANJE KSENONOM

Neravnomernost zatrovanja goriva u jezgru reaktora, koja je rezultat prostorne zavisnosti brzine izgaranja utiče na prostornu varijaciju grupnih konstanti. Biblioteka grupnih konstanti u funkciji izgaranja formirana pomoću programa WIMS-D4 sadrži podatke koji odgovaraju srednjoj brzini izgaranja u jezgru pa su u njim uključeni efekti koji odgovaraju ovoj referentnoj vrednosti brzine izgaranja.

Uticaj zatrovanja ksenonom na prostornu varijaciju grupnih konstanti moguće je u programu uzeti u obzir korekcijom makroskopskog efikasnog preseka za apsorpciju u termalnoj grupi. Ova korekcija se vrši u svakoj zoni izgaranja.

Razlika ravnotežne koncentracije ksenona koja odgovara stvarnoj brzini izgaranja u zoni i koncentracije koja odgovara referentnoj brzini izgaranja, za koju je formirana biblioteka, računa se prema izrazu

$$\Delta N_x = \frac{\gamma_{MR}}{E} \left( \frac{1}{\lambda_x + \sigma_x \phi_2} - \frac{R^L}{\lambda_x R + \sigma_x \phi_2 R^L} \right),$$

gde su  $R$  i  $R^L$  stvarna brzina izgaranja u zoni i brzina izgaranja u biblioteci respektivno,  $\gamma = \gamma_I + \gamma_x$  prinos joda i ksenona iz fisije,  $\lambda_x$  i  $\sigma_x$  su konstanta radioaktivnog raspada i efektivni mikroskopski presek za apsorpciju ksenona,  $\phi_2$  je termalni neutronsni fluks. Vrednost makroskopskog preseka za apsorpciju iz biblioteke,  $\Sigma_{a2}^L$ , zamenjuje se vrednošću

$$\Gamma_{a2} = \Sigma_{a2}^L + \Delta N \sigma_x$$

Efektivni mikroskopski presek za apsorpciju ksenona  $\sigma_x$  takodje se nalazi u biblioteci kao rezultat proračuna programom WIMS-D4.

#### 4. PRELAZNA STANJA POSLE ZAUSTAVLJANJA REAKTORA

Program ima mogućnost proračuna reaktivnosti jezgra u zavisnosti od vremena posle zaustavljanja reaktora. Po završenom proračunu raspodele snage posle bilo kog koraka izgaranja program može odrediti promenu koncentracija ksenona po zonama u zavisnosti od vremena  $t$ , pri čemu se smatra da je u trenutku  $t = 0$  snaga trenutno oborena sa prethodno zadate vrednosti na nulu. Uticaj nagomilavanja ksenona na apsorpciju u gorivu takodje se računa prema gornjem izrazu pri čemu je promena koncentracije data izrazom

$$\Delta N_x = \frac{\gamma_I MR}{\lambda_x - \lambda_I} \left[ e^{-\lambda_I t} + e^{-\lambda_x t} \right] + N^L \left[ \frac{e^{-\lambda_x t}}{1 + \frac{\lambda_x E}{\gamma_H} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R^L} \right) N^L} - 1 \right]$$

gde je  $N^L$  vrednost ravnotežne koncentracije ksenona koja je data u biblioteci.

#### 5. PRIMER PRORAČUNA

Izvršen je proračun parametara jezgra reaktora RA sa 44 gorivna kanala. Visina jezgra iznosila je 10 gorivnih segmenata od 80% obogaćenog uranijuma, što odgovara 162,5 cm. Dvogrupni efikasni preseći korišćeni kao ulazni podaci odgovaraju gorivu sa ravnotežnom koncentracijom ksenona. Proračun je vršen u R-Z geometriji, pri snazi od 5,2 MW a uzeta je srednja brzina izgaranja od 1,227 MW/kg. Iz razloga simetrije izvršen je proračun jedne polovine jezgra, pri čemu je tretirano 74 zone od toga u gorivu 70 (10 aksijalnih i 7 radijalnih). Gustina snage računata je u 33x16 tačaka. Na slikama 2 i 3

prikazana je radijalna i aksijalna raspodela gustine snage u jezgru u funkciji izgaranja u nekontrolisanom reaktoru dok tabela pokazuje zavisnost reaktivnosti u funkciji izgaranja.

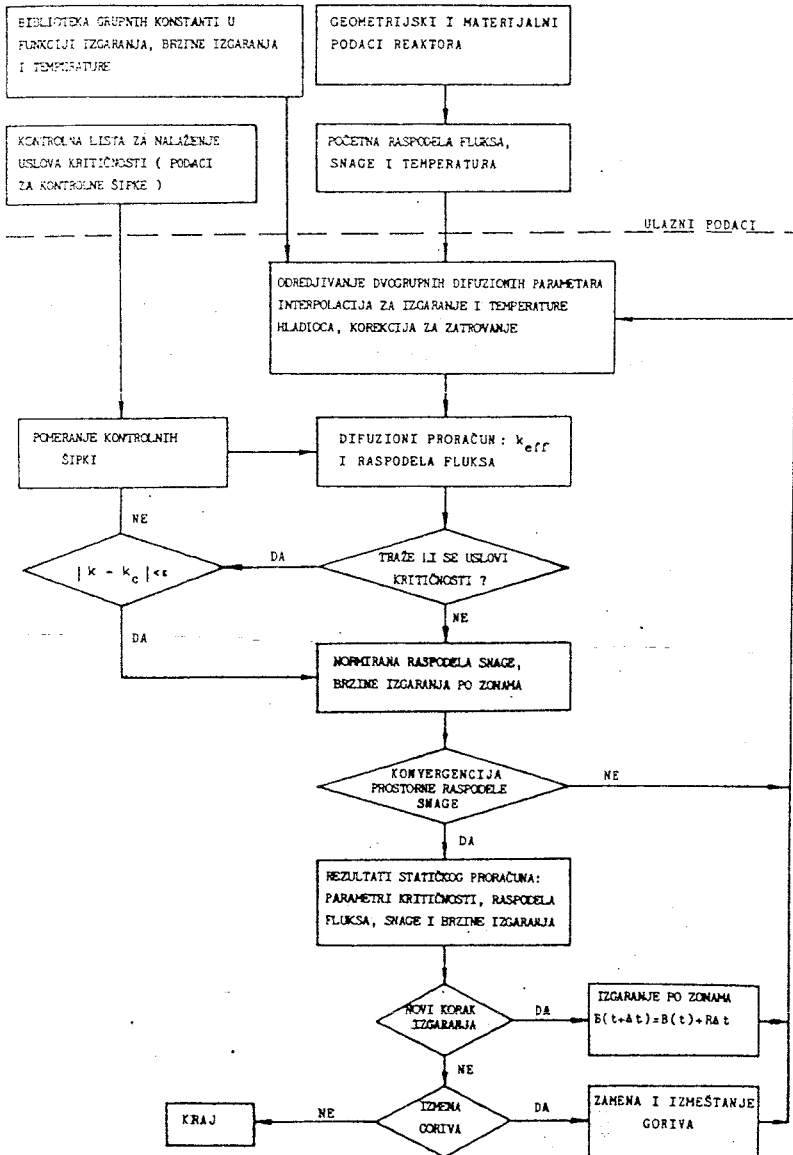
## 6. ZAKLJUČAK

Program VAMPIR omogućava analizu uslova ostvarivanja kritičnosti u zavisnosti od izgaranja i načina izmeštanja goriva. Može se koristiti za proračun istraživačkih reaktora snage kao i za preliminarne analize izgaranja kod energetskih vodom hladjenih reaktora pre detaljnog trodimenzionog proračuna. Iterativni postupak kojim se tretiraju lokalni uslovi u jezgru povećava vreme proračuna ali na račun smanjenja ukupnog vremena proračuna za formiranje biblioteke grupnih konstanti, koje u ovoj vrsti proračuna predstavlja i onako veliki problem. Korekcija ćelijskih parametara omogućava korišćenje jednih te istih grupnih konstanti u funkciji izgaranja za proračun reaktora na različitim snagama.

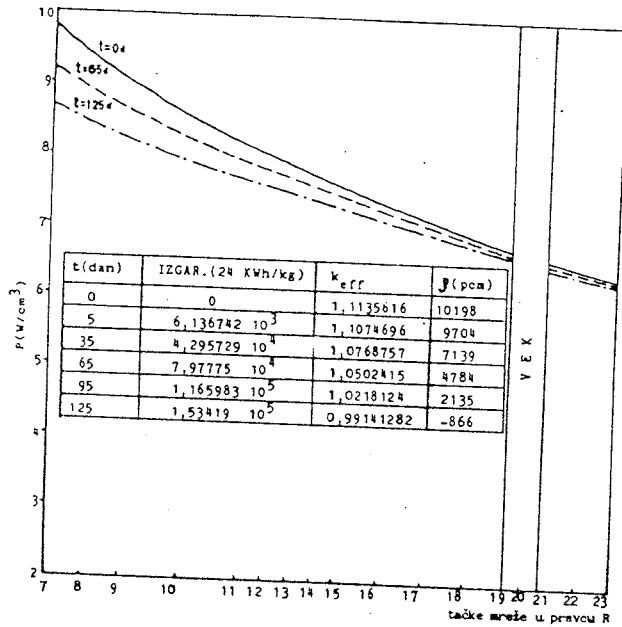
Program je u fazi razvoja i organizovan je tako da se jednostavno može ugraditi modul za proračun efekata prenosa toplote i raspodele temperatura na nivou ćelije reaktorske rešetke. Od opštosti ovog modula uveliko zavisi na koje će tipove reaktora program biti primenljiv.

## 7. LITERATURA

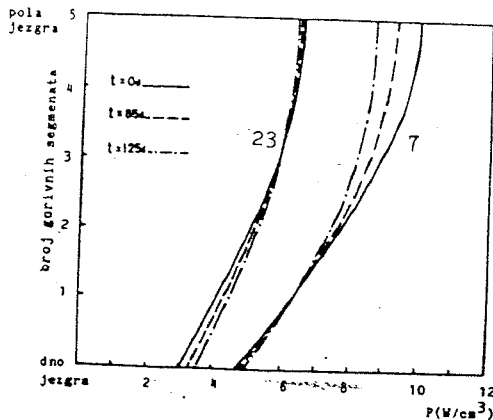
1. M.Console, A.Daneri, E.Salina, EREBUS - A Multi-Group Diffusion-Depletion Program in Two Dimensions for the IBM-360, FN-E-88, Nov. 1967.
2. M.J.Halsall, The Use of WIMS-D4 and LWRWIMS, READWT and FILSIX, to Generate Two-Group Data for Reactor Calculations, AEEW-M 1785.
3. M.J.Halsall, A Summary of WIMSD4 Input Options, AEEW-M 1327.
4. M.J.Roth A Review of the Equations Solved by the Computer Program JOSHUA, AEEW-R 1165.
5. E.Kaloinen, R.Terasvirta, P.Siltanen, HEXBU-3D, A Three-Dimensional PWR-Simulator Program for Hexagonal Fuel Assemblies, VTT Research Reports 7/1981.
6. S.V.G.Manon, D.C.Khandekar, M.S.Trasi, Iterative Solution of Finite Difference Diffusion Equations, B.A.R.C - 1129, Bombay 1981.
7. M.Pešić, O.Šotić, Nuklearni podaci za materijale reaktora RB, IBK-1430.



Slika 1. Dijagram toka programa VAMPIR.



Slika 2. Radijalna raspodela gustine snage na polovini jezgra reaktora RA u funkciji izgaranja



Slika 3. Aksijalna raspodela gustine snage u donjoj polovini jezgra reaktora RA u zavisnosti od izgaranja (7 i 23 odgovaraju položajima gorivnih elemenata u pravcu R kao na slici 2.)