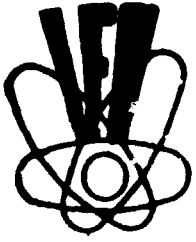


R07600719



COMITETUL DE STAT PENTRU ENERGIA NUCLEARA
INSTITUTUL DE FIZICA ATOMICA

FR-145-1975

C.E.C. - COD DE CALCUL
A EVOLUTIEI COMBUSTIBILULUI PENTRU
REACTORII NUCLEARI TERMICI

L.Biciolla, G.Marcu, G.Mociornită

Bucharest - ROMANIA

C.E.C. - COD DE CALCUL
A EVOLUTIEI COMBUSTIBILULUI PENTRU REACTORII NUCLEARE TERMICE

L. Biciolla, G. Marcu, G. Mociornița
Institutul de fizică atomică, București, România

Studiul de "burnup" sau de ardere a combustibilului nuclear într-un reactor termic, prezintă două aspecte principale, unul economic și altul legat de funcționarea reactorului, stabilitate și control.

În codul C.E.C. - "Calculul Evoluției Combustibilului" scris în limbaj FORTRAN IV, pentru calculatorul I.B.M. 370/135, s-a urmărit schimbarea compoziției izotopice a combustibilului nuclear dintr-un reactor termic în timpul funcționării.

Lucrarea de față cuprinde următoarele capitole :

1. Prezentarea generală a problemelor pe care le implică studiul arderii combustibilului într-un reactor nuclear.

2. Prezentarea ipotezelor de lucru pentru codul C.E.C., lanțul izotopilor considerați în calculul de ardere și metoda de rezolvare a ecuațiilor de evoluție. În continuare, pentru un reactor critic, este descris formalismul difuziei multi-grup utilizat în rezolvarea ecuației Boltzmann.

3. Specificații asupra programului.

4. Organizarea programului.

5. C.E.C. - Input-Output.

6. Anexa I.

1. Considerații generale

Arderea combustibilului nuclear implică studiul nucleizilor fisionabili, a nucleizilor obținuți în urma fisiunilor și a lanțurilor de izotopi pe care aceștia îi generează prin dezintegrare. În funcționarea unui reactor nuclear sînt importanți numai un număr redus dintre produșii de fisiune. Xenonul și samariul avînd secțiuni foarte mari de absorbție pentru neutroni termici, constituie otrăvuri puternice în reactor; acești nucleizi sînt de obicei luați în considerație separat de celelalte produse de fisiune, considerate a forma unul sau două grupe caracterizate printr-o secțiune medie. În reactorii rapizi, toate produsele de fisiune sînt incluse de obicei într-o grupă. Dintre nucleizii de interes deosebit, amintim : U^{235} , Pu^{239} și U^{233} , nucleizii reproducători Th^{232} și U^{238} din care se obțin nucleizii fisili U^{233} și respectiv Pu^{239} , precum și alți nucleizi grei obținuți prin absorbția neutronilor în materialul fisil. La unii reactori trebuie studiată și dispariția de B^{10} , izotop cu o secțiune mare de absorbție pentru neutroni termici. Boroul este folosit pentru mărirea timpului de utilizare a barelor combustibile și pentru asigurarea unei distribuții de flux cît mai uniforme, prin introducerea lui ca otravă consumabilă în compoziția acestora.

Ecuția generală de evoluție a combustibilului este :

$$\frac{dN_i}{dt} = \left[\begin{array}{l} \text{viteza de formare} \\ \text{prin fisiune, de-} \\ \text{zintegrare sau} \\ \text{absorbție de } n_0 \\ \text{termici sau} \\ \text{rezonanți.} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{viteza de dis-} \\ \text{pariție prin} \\ \text{fisiune sau} \\ \text{captură} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{viteza de} \\ \text{dezintegrare} \\ \text{radioactivă } \beta \\ \text{sau } \alpha. \end{array} \right]$$

De obicei se consideră timpi de ardere de săptămâni sau luni pentru a nu se urmări tranzițiile izotopilor de viață scurtă Xe, I, etc... Ecuațiile se consideră pentru o perioadă de timp Δt în care fluxul calculat la $t = t_{\text{initial}}$ este egal cu fluxul la $t = t_{\text{final}}$, adică este constant pe tot intervalul Δt , ceea ce nu este riguros adevărat. Acest flux se obține dintr-un calcul de criticitate ce consideră o configurație și o compoziție dată a reactorului. În studiul arderii trebuie considerată și depresiunea de flux din barele de control, neuniformitate ce scade cu timpul prin ridicarea barelor. Fluxul neuniform duce la ardere neuniforme și acestea duc la schimbarea densității de putere a reactorului.

Studierea procesului de ardere și a fluxului dintr-un reactor conduce la obținerea de soluții pentru aranjarea și manevrarea optimă a combustibilului nuclear.

2. Teorie.

Calculul C.F.C. calculează ardere globală pentru reactori formați din regiuni omogene. Fiecare regiune se caracterizează prin seturi de constante multigrupale, în speță secțiuni microscopice și densități atomice omogenizate. Cu ajutorul unui formalism de difuzie multigrup se aproximează distribuția fluxului mediu pe regiuni, normalizat la puterea de funcționare a reactorului. Utilizând aceste fluxuri în ecuațiile de evoluție se obțin concentrațiile nuclidilor de interes pe fiecare regiune, pentru o perioadă de timp Δt de funcționare continuă a reactorului.

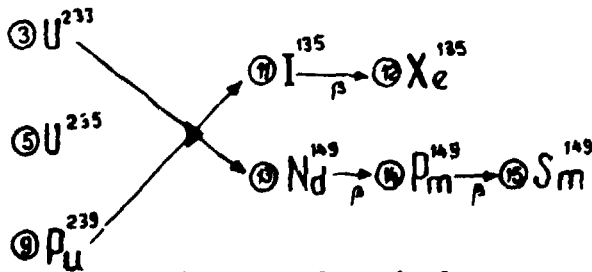
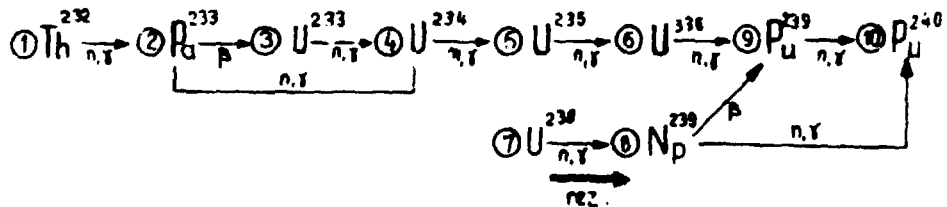
Calculul de ardere se face pentru fiecare regiune în următoarele ipoteze :

a) Puterea și distribuția fluxului în reactor sînt considerate constante pentru intervalul de timp Δt .

b) Modificările survenite într-o regiune după un timp t rezultă în mod unic doar din schimbarea concentrației izotopilor fisili și fertili și a otrăvurilor din combustibil. Intervalul de timp Δt trebuie ales astfel încît ipotezele să rămîni valabile.

c) În cod se presupune că pe toată perioada studiată poate fi folosită aceeași bibliotecă de secțiuni microscopice mediate pe spectru (biblioteca multigrupală); sau se pot folosi mai multe biblioteci multigrup dacă este nevoie.

Codul C.E.C. consideră următoarele lanțuri de ardere :



'1)

Celelalte produse de fisiune au fost neglijate.

Pentru U^{238} a fost considerată și contribuția absorbției de rezonanță la apariția $Np^{239} \rightarrow Pu^{239}$

Evoluția nuclizilor din fiecare regiune omogenă a reactorului este reflectată de ecuația diferențială.

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_k N_k + \sum_j N_j (\sigma_j^C \phi + \sigma_j^{C'} \phi') + \sum_l y_l^i \sigma_l^f \phi N_l - \lambda_i N_i - \sigma_i^a \phi N_i \quad (2)$$

- N_i - densitatea atomică a izotopului i din regiunea omogenă
- ϕ - fluxul termic mediu normalizat la puterea de funcționare a reactorului
- ϕ' - fluxul epitermic mediu normalizat de puterea de funcționare a reactorului
- N_k - densitatea atomică a izotopului k ce prin dezintegrare β trece în izotopul i
- λ_k - constanta de dezintegrare a izotopului k
- N_j - densitatea atomică a izotopului j , ce prin captură termică sau epitermică dă naștere izotopului k
- N_l - densitatea atomică a izotopului l ce prin fisiune termică contribuie la apariția izotopului k
- σ_j^C - secțiunea microscopică de captură termică pentru izotopul j
- σ_j^R - secțiunea microscopică de captură de rezonanță pentru izotopul j
- σ_l^f - secțiunea de fisiune termică pentru izotopul l
- σ_i^a - secțiunea microscopică de absorbție a izotopului i ;

$$\sigma^a = \sigma^C + \sigma^f$$

- y_l^i - fracțiunea de fisiune ; reprezintă contribuția izotopului l la apariția izotopului i .

Această ecuație generală ia o formă particulară pentru fiecare izotop în funcție de procesele ce îl caracterizează, ceea ce se traduce prin lipsa unor termeni pentru fiecare caz în parte. Sistemul de ecuații diferențiale a fost rezolvat folosind transformata Laplace, definită prin următoarea corespondență :

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad s\text{-complex}$$

(3)

Aplicând această relație densității izotonice N_i , se obține :

$$N_i(s) = \int_0^{\infty} (N_i(t)) e^{-st} dt \quad (4)$$

care derivată în raport cu s , dă :

$$\frac{dN_i(s)}{ds} = - \int_0^{\infty} t N_i(t) e^{-st} dt = -s N_i(s) - N_i(0) \quad (5)$$

Folosind transformările (4) și (5) în ecuațiile de ardere, se obține un sistem linear în s de n ecuații cu n necunoscute.

$$(A_i + s) N_i(s) - \sum_{j=1}^n B_j N_j(s) = N_i(0) \quad (6)$$

$N_i(0)$ reprezintă condiția inițială (concentrația izotopului i dată la începutul calculului de ardere).

În A_i sînt incluși toți termenii de dispariție (afecțați de semnul minus în ecuația de bilanț), iar B_j include toți termenii de producere (afecțați de semnul plus în ecuația de bilanț).

Numărul maxim de ecuații este 16 ($i = 1 - 16$; $j = 1, n =$ numărul de izotopi din lanțul de ardere dat mai sus, $n \leq 16$), iar numărul de necunoscute este egal cu numărul de ecuații considerate. Aplicînd transformata Laplace inversă $L^{-1}\{N_i(s)\} = N_i(t)$, soluțiilor $N_i(s)$ ale sistemului de ecuații în s , se obțin densitățile atomice ca funcție de timp

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta_i \{-A_j\}}{\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^n (A_l - A_j)} e^{-A_j t} \quad (7)$$

$A_i (-A_j^{-1})$ este determinantul ce conține densitățile atomice inițiale pe coloană, iar pe diagonală conține elemente de forma $A_k - A_j$ cu $k = 1, \dots, n$.

Calculul distribuției fluxului în reactor s-a făcut cu ajutorul unui formalism de difuzie multigrup. Ecuația de difuzie multigrup este:

$$(-\text{div } D_g(r) \text{ grad } \phi(r) + \Sigma_g(r) \phi(r) = \sum_{q'=1}^{g-1} \Sigma_{q' \rightarrow q}^{(3)}(r) \phi_{q'}(r) + \frac{\chi_q}{\lambda} \sum_{q=1}^G \nu \Sigma_g^f(r) \phi_g(r) \quad (8)$$

$g=1, \dots, G$

$$\Sigma_g(r) = \Sigma_g^a(r) + \sum_{g' < g}^G \Sigma_{g \rightarrow g'}^s(r) + D_g^{(3)}(r) B_g^{(3)}(r)$$

$$\Sigma_g^a = \Sigma_g^c + \Sigma_g^f$$

$D_g(r)$ - coeficient de difuzie

$D_g^{(3)}(r)$ - coeficientul de difuzie pe a treia direcție

$\phi_g(r)$ - fluxul corespunzător grupei g

$\Sigma_g(r)$ - secțiunea macroscopică totală

$\Sigma_g^a(r)$ - secțiunea macroscopică de absorbție

$\Sigma_{g' \rightarrow g}^s(r)$ - secțiunea macroscopică de trecere de la grupul $g' \rightarrow g$

$\Sigma_g^f(r)$ - secțiunea macroscopică de fisiune

$\Sigma_g^c(r)$ - secțiunea macroscopică de captură

$\nu \Sigma_g^f(r)$ - numărul mediu de neutroni din fisiune

$B_g^{(3)}(r)$ - bucklingul geometric pe cea-de a treia direcție

λ_0 - spectrul de fisiune

λ - factorul efectiv de multiplicare ; $\lambda = \frac{1}{k_{eff}}$

Sistemul de ecuații este definit pentru un domeniu dreptunghiular R în geometrie $X - Y$ sau $R - Z$.

- Regiunea R este divizată într-un număr finit de subregiuni R_j astfel ca $D_{qj}, \Sigma_{qj}, \Sigma_{qj}^a, \Sigma_{qj}^f$ să fie constante în fiecare subregiune.

- Sînt considerate doar împrîștirile neutronilor de la o energie mai mare la o energie mai mică (down-scattering).

- $\phi_n(r)$ este continuu în R_j iar curenții $D_{qj}(r) \frac{\partial \phi_{qj}(r)}{\partial n}$ este continuu la interfețe ($\frac{\partial \phi_{qj}(r)}{\partial n}$ se referă la derivata după direcția normalei).

- La suprafața S a domeniului R , $\phi_g(r) = 0, \frac{\partial \phi_g(r)}{\partial n} = 0$

cu
$$R_i \cap R_k = \emptyset \quad i \neq k \quad \text{și} \quad R = \bigcup_{k=1}^n R_k$$

Problema ce urmează să fi rezolvată este de găsire a funcțiilor proprii corespunzătoare valorii proprii λ celei mai mari. Rezolvarea sistemului de ecuații se face numeric trecînd de la cazul continuu la un caz discret prin împărțirea fiecărei subregiuni R_j într-o rețea neuniformă de segmente paralele cu axele.

O formulă cu diferențe finite pentru fiecare punct de intersecție, conduce la un sistem algebric.

Se ajunge la sistemul de ecuații:

$$\lambda_g \bar{\phi}_g = \sum_{j=1}^{g-1} P_{jg} \bar{\phi}_j + X_g \bar{\psi} \quad (9a)$$

$$\bar{\psi} = -\frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^G F_k \bar{\phi}_k \quad (9b)$$

unde A_g, P_j, X_q, F_k sînt matrici nesingulare, cu elemente matriciale.

(9b) se poate scrie:

$$\Gamma \bar{\Psi} = \lambda \bar{\Psi} \quad (10)$$

Codul C.E.C. utilizînd metoda iterativă "power iterative method" aproximează vectorii și valorile proprii $\bar{\Psi}(l)$ și $\bar{\lambda}(l)$, unde l reprezintă indicele iterației exterioare. Deoarece valorile proprii converg mai repede decît vectorii proprii, este necesar să se accelereze convergența vectorilor proprii, utilizîndu-se în acest scop o dezvoltare în polinoame Cebîșev a lui $\bar{\Psi}(l)$. În scopul obținerii lui Γ , pentru fiecare iterație exterioară este necesar să se rezolve sistemul de ecuații (9a) ceea ce înseamnă rezolvarea ecuației matriciale:

$$A\tilde{\Phi} = F \quad (11)$$

Codul folosește pentru aceste ecuații o altă metodă iterativă, "the block (successive) overrelaxation method" care constituie iterația interioară.

3. Specificații asupra programului

În programul C.E.C. pentru calcularea distribuției de flux, se rezolvă ecuația de difuzie multigrup.

Ecuația poate fi rezolvată pentru două geometrii X-Y sau R-Z. Pentru geometria X-Y se face corecția de scurgere a neutronilor pe a treia direcție Z.

Numărul maxim de puncte spațiale este de 2500, cîte 50 de puncte pe fiecare direcție.

Numărul maxim de intervale distincte pe fiecare axă este 40.

Numărul maxim de grupe energetice este 4.

Numărul de regiuni și compoziții este 40 (NPREG \leq 40, NEMFD \leq 40).

Numărul de izotopi este de maxim 40.

Numărul maxim de pași în timp este 10.

Cei 15 izotopi din lanțurile de ardere sînt specificați printr-un număr simbolic, ce apare în (1), iar ceilalți izotopi sînt însoțiți de un număr ce trebuie dat în input.

Pentru un k_{eff} calculat, se obține distribuția fluxului în punctele de discretizare și pe grupe de energie. În continuare se calculează distribuția fluxului normalizat la puterea de funcționare a reactorului pentru fiecare punct după formula: (sau pentru fiecare regiune).

$$\phi_{gj}^{**} = 3.3 \times 10^{10} \times \phi_{gj} \times P / \sum_k \sum_g \sum_{gk}^f \phi_{gk} V_k \quad (12)$$

unde :

ϕ_{gj} - reprezintă fluxul în punctul considerat sau fluxul mediu dintr-o regiune ($n/cm^2.s$).

V_k - volumul din jurul punctului k (cm^3).

P - puterea reactorului (W).

Numitorul expresiei de mai sus reprezintă integrala de fișiere, sumarea făcîndu-se pe tot volumul reactorului și toate grupele de energie. Fluxul mediu pe regiuni se calculează cu următoarele formule:

a) Pentru geometrie X-Y și regiunea 1, de volum V_1 .

$$\bar{\phi}_q^2 = \sum_{i,j} \frac{c_{i,j}}{4} \left[\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i+1,j+1} \right] \times \dots / V_2 \quad (13)$$

δ_1 - fiind pasul pe direcția OX între punctele i și $i+1$ și Δ_j pasul pe direcția OY între punctele j și $j+1$, iar h este înălțimea zonei.

a) Pentru geometrie R-Z și regiunea I de volum V_1 avem:

$$\bar{\phi}_q^2 = \sum_{i,j} \frac{\pi}{4} (R_{i+1}^2 - R_i^2) \Delta_j (\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i+1,j+1}) / V_2 \quad (14)$$

cu R_i și R_{i+1} raza pînă la punctul i și respectiv $i+1$, iar Δ_j pasul pe direcția OZ între punctele j și $j+1$.

În această geometrie, calculul se face cu simetrie la stînga. Sumarea se face pe toate punctele i,j din regiunea I. Fluxurile mediate și normalizate pe fiecare regiune sînt utilizate în calculul de ardere.

Programul calculează arderea pe fiecare regiune a reactorului pentru un timp Δt_1 sau pentru mai mulți pași de timp Δt_1^i considerînd în toate cazurile aceeași densitate atomică inițială; rezultatele se tipăresc. Densitățile atomice calculate pentru unul din pașii de timp dinainte stabilit (în input) sînt singurele modificări ce apar la începerea calculului următor.

La reînceperea calculului, locul și mărimea unor regiuni se poate modifica. Această modificare este specificată în input. Prin aceste modificări se urmărește menținerea reactorului în stare critică. Se poate înlocui reflectorul, se pot schimba regiuni în care arderea a fost mai intensă cu regiunile mai slab arse de la mar -

dinca zonei active, se pot introduce sau scoate barele de reglaj, etc.

Barele de reglaj sînt simulate prin condiția de corp negru numai pentru grupa termică:

$$\frac{D_{th}}{\phi_{th}} \cdot \left. \frac{\partial \phi_{th}}{\partial n} \right|_{Y_1} = - C \quad (15)$$

Y_1 - suprafața barei de reglaj

C - constantă pozitivă

$\frac{\partial \phi_{th}}{\partial n}$ - derivata după normală la bară - direcția ființei de la exterior spre interior.

Codul calculează în continuare K_{eff} , fluxurile și arderile pentru un nou pas de timp Δt_2 , s.a.m.d. Astfel se poate urmări funcționarea unui reactor, în ipotezele deja arătate, un timp suficient de lung, eventual pînă la arderea combustibilului din sarcină inițială.

Pe parcursul unor rulări pot fi folosite mai multe seturi de constante multigrup, ca date de input pentru diferiți pași de timp; durata unei rulări crește foarte mult prin folosirea mai multor biblioteci, de aceea nu se recomandă.

Memoria necesară 140 K și o unitate de disc.

- Timpul de lucru cu programul C.E.C. la calculatorul IBM 370/165 este de :

a) 15' pentru un caz simplu - reactor cu 2 regiuni, 5 puncte de discretizare pe fiecare direcție, 3 grupe de energie și un pas de timp.

b) 1 h 15' pentru un reactor cu 24 regiuni, 21 puncte de discretizare pe axa OX și 12 pe OY, 4 grupe de energie și doi pași de timp cu un calcul de criticitate după primul pas de timp.

4. Organizarea programului

Codul C.E.C. constă din programul principal și subrutine.

Schema bloc este dată în figura 1.

Programul principal organizează programul și dă ordinea în care sînt chemate subrutinele de lucru.

- INTR - citește datele de intrare
- BIBLI - organizează datele de intrare, fiind folosită atunci cînd programul utilizează aceeași bibliotecă multigrup pentru calcularea mai multor configurații critice.
- VERIF - verifică datele de intrare
- MACRO - calculează secțiunile macroscopice
- CRAMA - determină toate elementele de matrice ale ecuației cu diferențe finite
- BARE - calculează termenii din elementele matricii pentru punctele de pe suprafețele barelor de control (condiția de corp negru)
- RELAX - TRINV - rezolvă ecuațiile de grup utilizînd metoda iterativă "block overrelaxation method" aceasta constituînd iterațiile interioare. Calculul iterativ se încheie în momentul în care se atinge numărul de iterații impus sau este satisfăcut criteriul de eroare.

- EXITF - rezolvă ecuațiile cu diferențe finite prin metoda iterativă "the power iterative method", accelerată cu polinoame Cebîșev.
- SUP - construiește termenul de sursă
- OUT - tipărește distribuția de flux într-o formă standard
- CONEX - normalizează fluxurile
- TIP - tipărește distribuția fluxurilor și a surselor
- BURN - calculează arderea izotopilor din lanțul considerat cu ajutorul subrutinelor INPUT, CHA, NU"IT.

Calcululele, atât pentru dimensiunile critice cât și pentru căutarea compoziției critice se termină dacă

$$|\lambda_{\text{calculat}} - \lambda_{\text{dat}}| \leq \epsilon$$

sau este atins numărul impus de iterații.

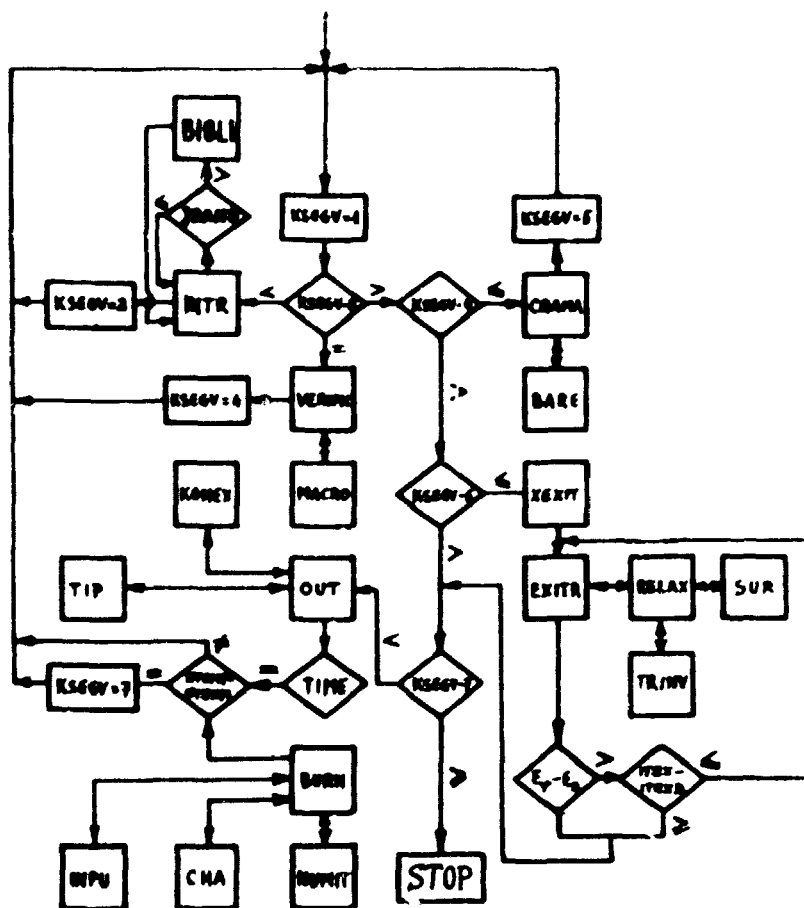


Fig. 1

5. C.E.C. - Input-Output

I N P U T

Datele de intrare sînt citate de subrutinele INTR și BIBLI.

Fiecare set de cartele este precedat de o cartelă ce conține un întreg ce prin valorile pe care le ia ($I = 1, \dots, 16$) dă ordinea de citire a datelor. Aceasta evită stocarea unei cantități prea mari de date în memoria calculatorului și dă posibilitatea programatorului de a combina problemele ce pot fi rezolvate de mod, în maniera dorită.

Dăm mai jos o descriere a "INPUTULUI" pentru C.E.C.

Cartela	Format	Variabila	De scriere
1	I2	I	- $I = 1$
2	10AB	REC(J,	- Conține orice comentariu
3	I2	I	- $I = 2$
4	3I3	J	- Geometrie ($1/2 = X-Y/R-Z$)
		JC	- Natura problemei; pentru compoziție și dimensiuni date se caută valoarea proprie cea mai mare, $JC = 1$.
		JBAND	- $JBAND=0$ indică citirea constantelor pentru fiecare regiune în INTR. - $JBAND \neq 0$ indică citirea specițiilor pentru fiecare regiune în INTR; constantele de grup pentru fiecare izotop în BIBLI.
5			- pentru $JC = 1$, cartela 5 lipsește

Cartela	Format	Variabila	Descriere
6	I2	I	- I = 3
7	I3	IGEO	- numărul grupelor de energie
8	I2	I	- I = 4
9	2I3	NRLIGN	- numărul intervalelor distincte pe linie
		NRCOL	- numărul intervalelor distincte pe coloană
10	I3, Flo.6 5(I3, Flo.6)	KHH(K)	- numărul curent al unui punct de discretizare de pe axa orizontală
		PASHH(K)	- pasul dintre KHH(K) și KHH(K+1), unde KHH(K) și KHH(K+1) nu sînt în mod necesar puncte alăturate.
		LHH(NRL)	- numărul curent al ultimului punct de pe linie (NRL=NRLIGN+1) $K_{max} = NRLIGN$ (mai multe cartele)
11	I3, Flo.6, 5(I3, Flo.6)	KVV(K)	- numărul curent al unui punct de discretizare de pe axa verticală
		PASVV(K)	- pasul între KVV(K) și KVV(K+1), unde KVV(K) și KVV(K+1) nu sînt în mod necesar puncte alăturate.
		KVV(NRC)	- numărul curent al ultimului punct de pe coloană (NRC=NRCOL+1) $K_{max} = NRCOL$ (mai multe cartele)
12	I2	I	- I = 5
13	I3	NRREG	- numărul regiunilor
14	26I3	IREG(K)	- numărul regiunii K (regiunea se definește de la exterior spre interior)
		J1(K), J2(K)	- limitele regiunii după axa orizontală
		I1(K), I2(K)	- limitele regiunii după axa verticală $K_{max} = NRREG$ (mai multe cartele)

Cartela	Format	Variabila	Descriere
15	I2	I	- $I = 6$
16	3Flo.6	XK P H	- $XK = 0$ - puterea reală a reactorului în wați - înălțimea zonei combustibile în cm
17	I2	I	- $i = 7$
18	2I3	NRMED NRCOMP	- numărul mediilor de compoziție diferită NRMED \leq NRREG (Pot exista mai multe regiuni cu aceeași compoziție) - numărul total al izotopilor
19	4I3	NINA(K), ICA(K) NRIZM(K) JABS(K)	- numărul simbolic minim și maxim al izotopilor din lanțul de ardere pentru mediul K - numărul izotopilor din lanțul de ardere din mediul K - $JABS(K) \geq 2$ compoziție de corp negru (bare de reglaj)
20	I2	I	- $I = 8$ Se prepară setul de date doar dacă se face un singur calcul de criticitate.
21	I3	JMED(K)	- numărul de identificare a compoziției $F(K_{\max} = NRMED)NRMED$ se confundă cu NRREG în acest set.
22	8Flo.6	XYM(KL)	- Constantele de grup: $D_g^1, D_g^2, \Sigma_g^t, \nu \Sigma_g^f, \Sigma_{1+g}, \Sigma_{2+g}, \dots, \Sigma_{g-1,g}, \Sigma_g^f, \Sigma_g^a$, pentru fiecare grup. Cartelele se repetă pentru fiecare compoziție pe grupe de energie.

Cartela	Format	Variabila	Descriere
23	I2	I	- I = 9 Pentru JBAND=0 se prepară întregul set de cartele de mai jos ; dacă JBAND ≠ 0 se prepară cartele pentru BIBLI; Organizarea acestora se dă la sfârșit și ele își au locul începând de la cartela 24.
24	I3, A4, I4, I3, 5Flo.6 2I3	JCOMP(K)	- numărul de identificare a regiunii ce conține izotopul K
		RMULT(K)	- numele izotopului
		IMA(K)	- masa atomică a izotopului
		NRIZ(K)	- numărul izotopului
		RABS(K)	- densitatea atomică a izotopului (10^{-24} at/cm ³)
		XABS(K)	- constanta de dezintegrare a izotopului K (zile ⁻¹)
		FRAC3(K)	- fracțiunea din fisiunea U ²³³ pentru izotopul K
		FRAC1(K)	- fracțiunea din fisiunea U ²³⁵ pentru izotopul K
		FRAC9(K)	- fracțiunea din fisiunea Pu ²³⁵ pentru izotopul K
		NAB(K)	- numărul simbolic din lanțul de ardere cu NAB(K) ≤ 16 (Ceilalți izotopi pot avea orice număr inclusiv 0)
		NRZIL	- NRZIL = 0 K _{max} = NRCOMP (Cartelele se repetă pentru toți izotopii)

Cartela	Format	Variabila	Descriere
25	8Flo.6	XY*(KL)	- constantele microscopice de grup : $\sigma_g^{tr.1}, \sigma_g^{tr.2}, \sigma_g^t, \sigma_g^f, \sigma_{1+q}, \dots$ $\sigma_{g-1,+q}, \sigma_q^f, \sigma_q^j$ pentru fiecare grup. Citirea se repetă pentru fiecare regiune.
26	I2	I	- I = 10
27	8Flo.6	XXSI(N)	- XXSI(N) = χ_g - spectru de fisiune (N _{max} = IGMAX)
28	I2	I	- I = 11
29	2Flo.6, I3,Flo.6 2(I3, Flo.6)	C1, C2 ITEXD, EPSIL1 ITID, EPSIL2 ITEK, EPSIL3	- parametrii de calcul pentru itera- ția exterioară (se recomandă C1 = 0, C2 = 1) - numărul maxim de iterații exterioare și eroarea iterației exterioare - numărul maxim de iterații inte- rioare și eroarea iterației inte- rioare - pentru IC=1, ITEK=0 și EPSIL 3=C
30	I2	I	- I = 12
31	4I3	JSB JSS JSST JSD	- JSB > 1 simetrie jos - JSS > 1 simetrie sus - JSST > 1 simetrie stînga - JSD > 1 simetrie dreapta
32	I2	I	- I=13 STOP. Această cartelă indică terminarea programului; se pune doar la sfîrșitul tuturor datelor, după I=14, 15 sau 16.

Cartelă	Format	Variabilă	Descriere
33	I2	I	- I=14. INCEPF CALCULUL. Cartela se pune după orice set de date necesare unui calcul
34	I2	I	- I = 15
35	I3I3	NTEMP	- numărul pașilor de timp
		LSD	- LSD \neq 0, în lanțul de ardere se consideră și otrăvurile (Sm și Xe)
		NIHRT	- NIHRT \neq 0 tipărește harta reactorului
		NDFLUX	- NDFLUX \neq 0 tipărește fluxurile din fiecare punct
		NDSURS	- NDSURS \neq 0 tipărește sursele de fisiune
		NVOL	- NVOL \neq 0 tipărește volumele
		NFLINT	- NFLINT \neq 0 tipărește fluxurile integrale pe regiuni
		NFLINM	- NFLINM \neq 0 tipărește fluxurile mediate pe volum
		INTEG	- INTEG \neq 0 tipărește integrala de fisiune și captură
		NFLIN	- NFLIN \neq 0 tipărește pentru fiecare regiune fluxurile integrale mediate pe volume și normalizate la puterea de funcționare a reactorului.
		NDPLN	- NDPLN \neq 0 tipărește distribuția fluxurilor normalizate pentru fiecare punct
		NSEC	- NSEC \neq 0 tipărește secțiunile microscopice pe regiuni.

Cartelă	Format	Variabila	Descriere
		NSECM	- NSECM#0 tipărește secțiunile macroscopice pe regiuni
36	I2	I	- I = 16
37	I3	KOMPX	- numărul pașilor de timp intermediari
8Flo.6		TTEMP(K)	- timpul intermediar ($K_{\max} = KOMPX$)

Orice set de cartele se poate repeta pentru rezolvarea unei probleme complexe. Limitările tin doar de timpul de reluare. Cartela I = 13 se pune o singură dată la sfârșitul seturilor de date dacă este nevoie, altfel lipsește.

Organizarea cartelelor pentru JBAND $\neq 0$:

Cartela	Format	Variabila	Descriere
24	I3	IBI	- numărul izotopilor din bibliotecă
25	A4, I3, Flo.6, I3, 3(Flo.6)	NUMF(I)	- numele izotopului
		IMAI(I)	- masa atomică
		LAMDA(I)	- constanta de dezintegrare
		IBM(I)	- numărul simbolic de identificare
		FRC3(I)	- fracțiunea de fisiune din U^{233} pentru izotopul I
		FRC(I)	- fracțiunea de fisiune din U^{235} pentru izotopul I
		FRC9(I)	- fracțiunea de fisiune din Pu^{239} pentru izotopul I
			$I_{\max} = IBI$ (cartelele se repeta pentru toți izotopii)

Cartela	Format	Variabila	Descriere
25*	BF10.6	XX(PL)	<p>- constantele microscopice de grup:</p> $\sigma_{g, \text{tr.1}}^{\text{tr.1}}, \sigma_{g, \text{tr.2}}^{\text{tr.2}}, \sigma_{g, \text{tr.3}}^{\text{tr.3}}, \nu \sigma_{g, \text{tr.4}}^{\text{tr.4}}, \sigma_{1-g}^{\text{tr.4}}, \dots$ $\sigma_{g-1-g}^{\text{tr.4}}, \sigma_{g, \text{tr.5}}^{\text{tr.5}}, \sigma_{g, \text{tr.6}}^{\text{tr.6}}.$ <p>Citirea datelor se repetă pentru fiecare izotop pe grupe de energie</p>
26	

OUTPUT

- Codul C.E.C. tipărește :
- toate datele de intrare
 - valorile proprii ale matricii L_{ω} (the block successive over relaxation matrix) și valorile lui ω ($1 < \omega < 2$; factorul de relaxare pentru fiecare grup) necesare iterației interioare
 - pentru fiecare iterație exterioară se tipărește numărul iterației, $(\frac{1}{\lambda})$ calculat, valorile $(\frac{1}{\lambda})$ minim și $(\frac{1}{\lambda})$ maxim și eroarea de calcul asupra lui $\bar{\psi}$ (din ecuația 10).
 - K_{eff} pentru configurația dată (JC=1) și numărul iterației
 - planul reactorului în două dimensiuni
 - distribuția spațială a fluxului pentru fiecare grup energetic

- distribuția spațială a sursei de fisiune

$$\left(\bar{S} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^G F_k \delta_{\mathbf{r}} \right) \quad (9.b)$$

- volumul fiecărei regiuni
- fluxul integral în fiecare regiune pe grupe de energie.
- fluxul integral în fiecare regiune mediat pe volumul regiunii, pe grupe energetice.
- integrala de fisiune, integrala de captură și constanta de normalizare $(C = 3,3 \times 10^{10} \text{ P} / \sum_{k=1}^{\text{NREG}} \sum_{g=1}^G \Gamma_{g,k} \phi_{g,k} V_k)$
- fluxul integral pe regiuni mediat pe volumul regiunii și normalizat la puterea de funcționare a reactorului.
- distribuția spațială a fluxului normalizat, pe grupe energetice.

Dacă timpul (TIME) este zero, se termină calculul sau se începe un nou calcul pentru o altă rețea de puncte spațiale, pentru o nouă aranjare a regiunilor reactorului sau pentru alt reactor ; se tipăresc doar noile date de input și pașii de timp intermediari, dacă e cazul. Pentru pași de timp intermediari se calculează arderea, adică valorile densităților atomice pe regiuni după timpul indicat, se tipăresc, dar nu se păstrează în memoria calculatorului și nici nu se lucrează în continuare cu ele.

Dacă primul pas de timp este diferit de zero se calculează arderea pentru timpul indicat și se tipărește pentru fiecare regiune :

a) - timpul, regiunea (mediul), volumul și numărul izotopilor din lanțul de ardere din regiune (numărul izotopilor din lanțul de ardere poate fi zero).

b) - fluxul termic, limitele energetice ale domeniului termic, fluxul epitermic, limitele energetice ale domeniului epitermic și secțiunea de captură a U^{238} pentru domeniul epitermic.

c) - lista izotopilor (numărul simbolic din lanțul de ardere, numele izotopului, masa atomică), secțiunile microscopice termice de captură, fisiune, secțiunea totală (în barni), constanta de dezintegrare (zile^{-1}).

- lista izotopilor (număr simbolic, numele izotopului, masa atomică), densitatea atomică inițială și densitatea atomică după pasul de timp dat.

Dacă există pași de timp intermediari, se tipăresc pentru fiecare regiune datele de mai sus (a, b, c).

6. Anexa 1

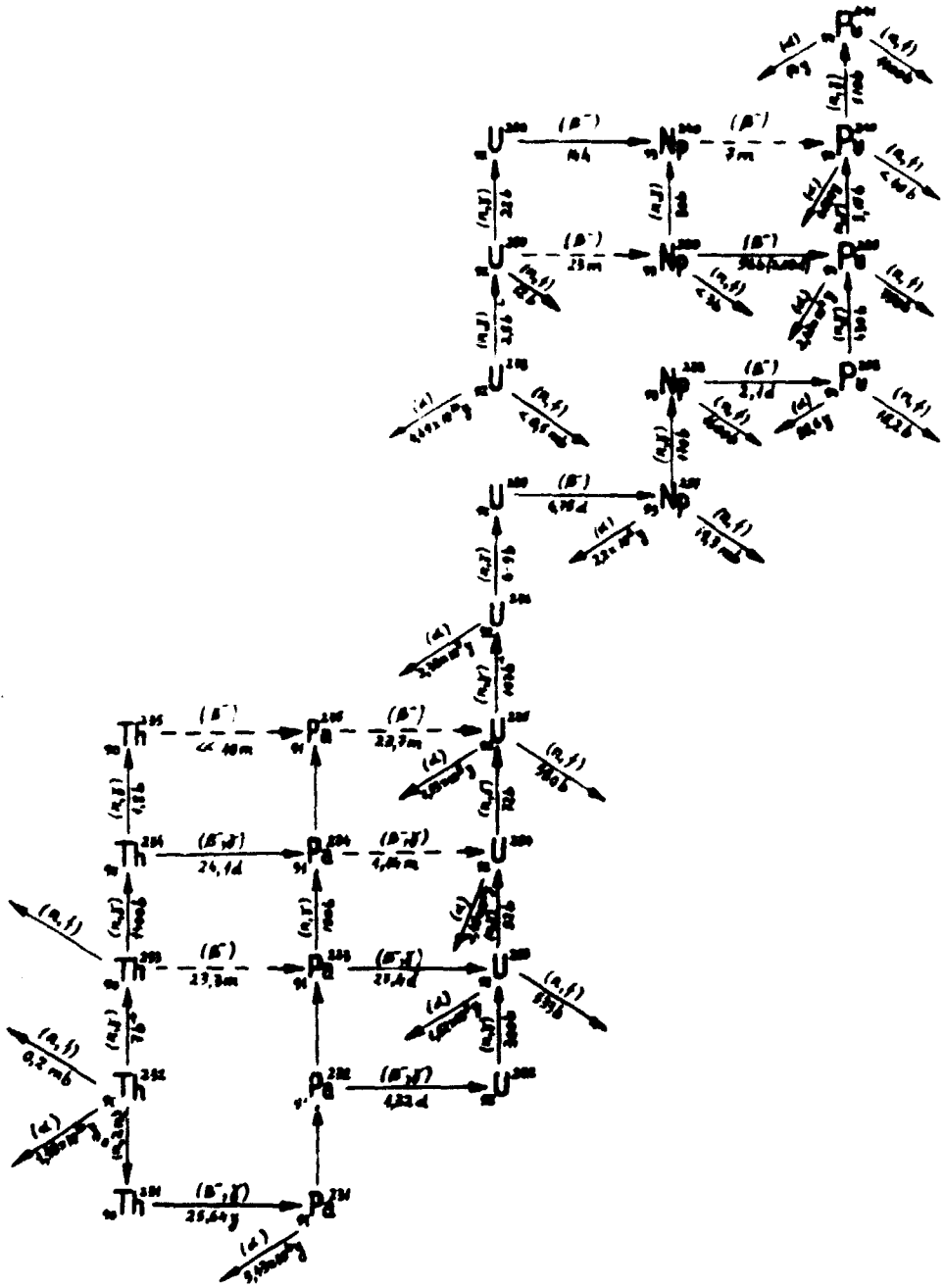
Lanțul ** nuclizilor fisionabili $Th^{232} - U^{233} - U^{235} - U^{238} - Pu^{239}$

* Reacția $n-2n$ pentru neutroni rapizi $E_n > 6,3 \text{ MeV}$ (0,002 - 0,013)b este o secțiune termică; ea este funcțiune de raportul dintre neutronii rapizi și cei termici.

+ Reacțiile au loc și cu neutroni de rezonanță

**

Din Benedict M. și Pigfort Th. "Nuclear Chemical Engineering
Chapter 7.



B I B L I O G R A F I E

- /1/ Richard S.Varga, "Matrix Iterative Analysis, "Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New-Jersey, 1962
- /2/ Richard S.Varga, "Numerical Solution of the Two-Group Diffusion Equations in X-Y Geometry", IRE, Transactions of nucleare science, Vol.NS-4. Nr.2, December 1957
- /3/ J.P.Rayard et al., "Specification d'un code de diffusion multigrup a deux dimensions; ALCI", CEA-R 2747.
- /4/ L.A.Hageman "Numerical methods and techniques used in the two-dimensional neutron diffusion program PDQ-5", WAPD-TM-364/UC-32 : Mathematics and Computers ; TID-4500/18th.Ed.), Feb.1963.
- /5/ M.Benedict and T.H.Pigford, "Nuclear Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Company, Inc., New-York, 1957
- /6/ G.Marcu, "CDM-1, a two-dimensional multigrup neutron diffusion code", Preprint IFA FR-111-1973