INIS-mf--6322 20810160S

COMITETUL DE STAT PENTRU ENERGIA NUCLEARA

INSTITUTUL DE FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA

ANTON VASILE

OPTIMIZAREA SPATIALA SI TEMPORALA A REACTORILOR NUCLEARI CU AJUTORUL PRINCIPIULUI DE MAXIM AL LUI PONTRIAGHIN

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCATOR STIINTIFIC,

PROF. DR. IONEL PURICA

BUCURESTI

1979

COMITETUL DE STAT PENTRU ENERGIA NUCLEARA

INSTITUTUL DE FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA

ANTON VASILE

OPTIMIZAREA SPATIALA SI TEMPORALA A REACTORILOR NUCLEARI CU AJUTORUL PRINCIPIULUI DE MAXIM AL LUI PONTRIAGHIN

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCATOR STIINTIFIC,

PROF. DR. IONEL PURICA

BUCURESTI

1979

CUVINT INAINTE

Exprim, pe această cale, recunoştinţa mea conducătorului ştiinţific Prof. Dr. Ionel Purica pentru stimularea continuă şi competentă a cercetării originale.

Mulţumesc Direcţiunii IRNE pentru sprijinul acordat activităţii mele ştiinţifice.

De asemenea sînt recunoscător colegului Dr. M. Pavelescu pentru colaborare. colegilor Dr. I. Cristian, Dr. V. Cuculeanu, Ing. I. Iftode, Dr. Ing. M. Isbăşescu, G. Vasiliu, H. Dumitrescu, D. Slavnicu, A. Szakats pentru sprijin şi discuţiile fructuoase purtate.

INTRODUCERE

In legătură cu dezvoltarea energeticii nucleare au luat avînt diverse metode de optimizare. Spre deosebire de metoda variantelor, care nu găsește și nici nu demonstrează existența optimului, dar se apropie, ca model, cel mai mult de realitatea fizică examinată, metodele matematice de optimizare introduc anumite simplificări.

Metodele programării liniare și patratice presupun mărimea de optimizat reprezentabilă ca o funcție liniară sau patratică, respectiv. Metoda programării dinamice și principiul de maxim al lui Pontriaghin presupun mărimea fizică de optimizat reprezentabilă ca o funcțională integrală.

Programarea dinamică reduce problema la rezolvarea unei ecuații cu derivate parțiale de ordinul întîi, iar principiul de maxim la maximizarea unei funcții cu rezolvarea unui sistem amplificat de ecuații diferențiale.

In cazul fizicii reactorilor avantajul principiului de maxim constă în posibilitatea abordării analitice și uneori numerice fără a solicita o memorie prea mare a calculatorului.

Autorul a tratat optimizarea mărimilor fizice ale reactorilor nucleari sub variate aspecte.

Lucrarea de doctorat se bazează pe cercetări efectuate în anii 1971-79 ale căror rezultate au fost susținute la reuniuni științifice internaționale și prezentate în lucrările /2/, /3/, /6/, /8/, /11/-/26/.

I. Optimizarea spațială a reactorilor nucleari rapizi cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin

Mărimile fizice caracteristice reactorilor nucleari pot fi reprezentate în anumite cazuri prin funcționale integrale.

$$I=\int_0^T f(x,u,t)\,dt \qquad (1.1)$$

unde $x^* = (x_1,\ldots,x_n)^*$ este vectorul de stare transpus, $u(t)$, funcția de control, iar t este variabila independentă, care poate avea semnificație de timp sau distanță.

In plus $t \in [o,T]$. Se consideră că modelul matematic al fenomenului fizic considerat poate fi caracterizat de un sistem de ecuaţii diferenţiale:

$$dx_i/dt=f_i(x,u,t) \tag{12}$$

cu condiţii la limită sau iniţiale date:

$$x_i(o)=x_i \tag{13}$$

Dacă dorim minimizarea funcţionalei I pe mulţimea funcţiilor de control $u(t) \in U$, unde U este o mulţime convexă, atunci acest lucru se poate obţine din maximizarea unei funcţii numite hamiltonian avînd forma:

$$H=\Psi_0 f_0+\sum_{i=1}^{n} f_i \Psi_i \tag{14}$$

unde $\Psi_0 = -1$, iar Ψ_i sînt variabilele conjugate determinate din rezolvarea sistemului de ecuaţii diferenţiale:

$$d\Psi_i/dt=-\partial H/\partial x_i \tag{15}$$

şi condiţia de transversalitate.

Problemele de statica reactorilor, adică dependente de spaţiu au T (raza critică) nedeterminat (minimizarea masei critice, a dimensiunilor critice) sau determinat (maximizarea puterii). A.P.Rudik /1/ a rezolvat aceste probleme în aproximaţia difuziei mono sau bigrupale, fluxurile şi curenţii mono sau bigrupali constituind componentele vecterului de stare (fază). Rezolvarea problemelor de optimizare spaţială a fost făcută de A.P.Rudik analitic. Autorul tezei a încercat rezolvarea numerică a ecuaţiiloe multigrupale prin metoda măturării /2/, /3/. Programul PONTRI realizat în acest scop, a cărui schemă bloc este dată în fig. 1, a reuşit să pună în evidenţă rezultatul găsit şi în cazul mono sau bigrupal /4/ că structura optimală a unui reactor nuclear rapid de masă critică minimă este bizonală, avînd în zona centrală $u = u_{max}$ şi în cea periferică $u = u_{min}$, unde u este îmbogăţirea combustibilului nuclear în U^{235}.

Secţiunile microscopice mono, bi sau trigrupale au fost preparate cu ajutorul programului BONDAR (fig. 2). De remarcat că prin procedura numerică propusă de autorul tezei se pot aborda toate geometriile monodimensionale (placă, sferă, cilindru infinit).

In cazul aplicării restricţiilor integrale sau algebrice geometria de placă este preferabilă, problema fiind autonomă, adică f_i din (1.2) şi I din (1.1) nu depind explicit de t.

Introducerea restricţiei integrale:

$$I_{n+1} = \int_0^T f_{n+1}(x,u,t)dt \tag{1.6}$$

conduce la apariţia unei noi variabile de stare x_{n+1} determinată din ecuaţia:

$$dx_{n+1}/dt = f_{n+1}(x,u,t) \tag{1.7}$$

cu condiţiile $x_{n+1}(o) = o$, $x_{n+1}(T) = I_{n+1}$, precum şi la extensia hamiltonianului:

$$H = \sum_{i=0}^{n+1} f_i \Psi_i \tag{1.8}$$

unde Ψ_{n+1} = ct deoarece H nu depinde de x_{n+1}.

II. Aplicarea analizei dimensionale generale la probleme de optimizare rezolvate cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin

In acest capitol se încearcă găsirea unei relaţii sub forma egalităţii a două funcţii monomiale /5/ între valoarea funcţionalei minimizate cu principiul de maxim şi valorile variabilelor de stare $x_i(T)$ în extremitatea din dreapta a intervalului de variaţie al variabilei independente:

$$I_{min}^{a_0} x_{i_1}^{a_1}(T) \ldots\ldots x_{i_\ell}^{a_\ell}(T) = k\, x_{i_{\ell+1}}^{a_{\ell+1}}(T) \ldots\ldots x_{i_n}^{a_n}(T)\, I_{n+1}^{a_{n+1}} \tag{2.1}$$

unde k este un coeficient determinat din problema de optim rezolvată, iar I_{n+1} o restricţie integrală. Variabilele de stare $x_i (i = 1,\ldots,\ell)$ sînt acelea a căror creştere produc o descreştere a valorii I_{min} a funcţionalei.

In cazul minimizării masei critice a unui reactor nuclear cu restricţii asupra puterii:

$$\int_0^{x_{cr}} \Sigma_f x_1 dx = P_0 \tag{2.2}$$

şi a densităţii de putere:

$$\sum_f x_1 \leq p_{max} \qquad (2.3)$$

se obţine prin rezolvarea în numere întregi pozitive şi minime a unui sistem de ecuaţii liniare algebrice următoarea relaţie (în cazul geometriei de placă şi aproximaţiei difuziei monogrupale):

$$M_{cr,min} = K x_{cr} U_5^2(x_{cr})(P_0/p_{max}) \qquad (2.4)$$

unde u_5 este densitatea liniară de fisil (g/cm), iar p_{max} este densitatea liniară de putere maximă.

De remarcat că în cazul problemei duale a maximizării puterii cu restricţii asupra încărcării critice şi a densităţii de putere relaţia (2.4) se conservă ca formă, dar se schimbă semantic:

$$P_{max} = K' M_{cr} p_{max} / (x_{cr} \cdot U_5^2(x_{cr})) \qquad (2.5)$$

unde k' = 1/k.

In continuare se găsesc relaţii asemănătoare pentru problema minimizării dimensiunii critice a unui reactor nuclear cu restricţii asupra puterii P_0 şi a densităţii de putere precum şi a problemei duale corespunzătoare /6/. De asemenea se tratează şi problema distribuţiei optimale a absorbanţilor.

Relaţiile deduse pot fi utile în problemele de optimizare zise "necorect puse", în care, de exemplu, se minimizează amîndouă funcţionalele I şi I_{n+1}. In acest caz se poate minimiza la început funcţionala I cu restricţii asupra funcţionalei I_{n+1} şi apoi se variază I_{n+1} pentru a găsi un minim al problemei "necorect puse". Cu ajutorul relaţiilor deduse problema minimizării a două funcţionale se poate reduce la minimizarea a două funcţii.

III. Calculul coeficienţilor de difuzie anizotropă în cavităţi cilindrice şi de formă generalizată XY

Dat fiind dificultatea elaborării unor programe de calcul bazate pe ecuaţia transportului de neutroni în aproximaţia multigrupală şi pentru geometrii tridimensionale s-a încercat extensia aplicabilităţii ecuaţiei difuziei neutronilor pentru medii pronunţat heterogene sau conţinînd cavităţi prin redefinirea coeficientului de difuzie în aceste cazuri.

M. Michelini /7/ a arătat că în geometriile descriptibile prin coordonate ortogonale putem scrie:

$$D_i = \int \Omega_i^2 d\Omega \int_0^\infty f_i e^{-\widetilde{\Sigma R}} dR \qquad (3.1)$$

unde Ω_i este componenta i a versorului pe direcţia R, iar $\widetilde{\Sigma R}$ este drumul optic pe aceeaşi direcţie. Se poate lua f_i independent de punct după reţeta:

$$f_i = \begin{cases} 3\, D_i \Sigma_i, & \text{dacă interfaţa este perpendiculară pe direcţia i;} \\ 1 & \text{pentru interfaţa paralelă la i;} \\ 1 & \text{în vid.} \end{cases}$$

De notat că Σ reprezintă secţiunea macroscopică totală de interacţie a neutronilor cu mediul. Această abordare poartă numele de aproximaţia difuziei anizotrope. Ea permite atribuirea unui coeficient de difuzie finit unei cavităţi spre deosebire de difuzia obişnuită, unde acesta devine infinit.

In acest capitol al tezei se dezvoltă o metodă numerică pentru calculul coeficientului de difuzie anizotropă la cavităţi de geometrie oarecare aproximată printr-o reţea de dreptunghiuri cu laturi paralele la axele de coordonate /8/. Procedura a fost programată pe un calculator la Centrul de Studii Nucleare de la Casaccia (Italia) pentru a fi încorporată în programul de calcul TRUD /9/. De asemenea în capitol se dau formule ale coeficientului de difuzie anizotropă D_i deduse analitic sau analitico-numeric pentru cavităţi cilindrice uzuale, precum şi o metodă diferenţială numerică pentru calculul lui D_i într-o cavitate de formă oarecare. De remarcat că valorile lui D_i sînt medii pentru cavităţile considerate sau porţiuni ale lor.

Procedurile expuse permit abordarea prin formalismul difuziei anizotrope a problemelor de optimizare a reactorilor conţinînd cavităţi şi utilizarea principiului de maxim al lui Pontriaghin în aceste cazuri. Pînă acum asemenea cazuri nu au fost abordate. Este de aşteptat, totuşi, în aceste cazuri, apariţia neliniarităţii faţă de funcţia de control datorită dependenţei coeficientului de difuzie anizotropă de natura şi dimensiunile zonei considerate şi ale zonelor vecine.

IV. Considerarea anizotropiei coeficienților de difuzie: abordare tensorială

In acest capitol al tezei se utilizează metoda lui V. C. Boffi /1o/ inspirată din difuzia căldurii în solide. Acesta deduce pentru coeficientul difuziei anizotrope a neutronilor o formulă de calcul într-un punct dat arătînd că acesta este un tensor simetric de ordinul doi.

Autorul tezei a aplicat /11/ formula lui V.C.Boffi la cazul cavităților de formă strat plan paralel, sferică și cilindru infinit înconjurate de un mediu omogen infinit, precum și pentru cilindru infinit plin. In cazul cavității sferice de rază R raportul coeficientului de difuzie în centrul sferei de raza R și al celui de rază nulă are o dependență liniară de R și secțiunea macroscopică totală Σ de interacție a neutronilor cu mediul înconjurător:

$$D^i{}_i(R,0)/D^i_i(0,0)=1+\Sigma R \qquad (4.1)$$

In celelalte cazuri formulele sînt mai complicate pentru a fi redate în acest rezumat. De notat că, spre deosebire, de capitolul precedent aici se dau valori punctuale ale coeficientului de difuzie anizotropă. De aceea compararea rezultatelor din aceste două capitole este dificilă. De notat că metoda lui V. C. Boffi este mai puțin eficace, deși mai elaborată matematic față de aceea a lui M. Michelini.

V. Condensarea secțiunilor eficace multigrupale zonale

In acest capitol se generalizează la cazul multizonal rezultatele din lucrarea /12/, unde s-a descris o procedură de calcul al spectrelor de neutroni în reactorii rapizi bizonali și aplicată apoi în alte lucrări /13/-/16/ pentru condensarea (colapsarea) secțiunilor eficace multigrupale cu considerarea autoecranării. Se analizează cazul static și apoi cel evolutiv.

In primul se impune conservarea valorilor lui k_{ef} la trecerea de la setul multigrupal G la setul în puține grupe Γ. Din condiția de conservare a ratelor de reacție se obțin în cazul static formule de condensare de tipul:

$$\sigma_{x,\gamma}=\sum_{g\in\alpha_\gamma}\sigma_{x,g}\phi_g\Big/\sum_{g\in\alpha_\gamma}\phi_g \qquad (5.1)$$

pentru x = c, f. Se vede că medierea are loc pe fluxul multigrupal ϕ_g . In cazul evolutiv se impune condiţia conservării variaţiei k_{ef}. In acest caz în formulele de condensare apare şi fluxul adjunct /17/.

$$\sigma_{t,\gamma}=\sum_{g\in\alpha_\gamma}\sigma_{t,g}\phi_g\phi_g^{+}\Big/\Big(\sum_{g\in\alpha_\gamma}\phi_g\cdot\sum_{g\in\alpha_\gamma}\phi_g^{+}\Big) \qquad (5.2)$$

De notat că α_γ reprezintă mulţimea grupelor g din setul G, care se condensează în grupul γ din setul Γ .

Programul BONDAR realizează condensarea secţiunilor eficace multigrupale pentru reactori rapizi /18/. Schema logică a acestui program este prezentată în fig. 2, iar în fig. 3 se dau spectrele zonei active şi reflectorului unui reactor rapid de putere zero cu combustibil vitroceramic (U^{235} - 8o%, U^{238} - 2o%) calculate cu acest program.

In teză se dau tabele cu secţiuni mono, bi şi trigrupale obţinute prin condensarea pe aceste spectre a setului ABBN de 26 grupe.

VI. Condensarea secţiunilor eficace multigrupale în probleme de optimizare rezolvate cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin

In acest capitol se expune o procedură de condensare specifică problemelor de optimizare spaţială, în care se impune condiţia egalităţii valorilor hamiltonienilor în cele două seturi de secţiuni şi nu egalitatea valorilor lui k_{ef}/19/.

In acest mod se diferenţiază problemele de optimizare, în care apare un şir convergent de stări critice pe mulţimea funcţiilor de control admisibile, de problema unui simplu calcul static, în care conservarea lui k_{ef} este naturală. Relaţiile de condensare se deduc punctual şi zonal, discutîndu-se diverse tipuri de funcţionale integrale de minimizat sau restricţii.

Pentru secţiunea de absorbţie rezultă formula următoare:

$$\sigma_{a\gamma,1}=\sum_{g\in\alpha_\gamma}\sigma_{a,g}\overline{\phi_g}\,\overline{\Psi_{G+g}}\Big/\Big(\sum_{g\in\alpha_\gamma}\overline{\phi_g}\cdot\sum_{g\in\alpha_\gamma}\overline{\Psi_{G+g}}\Big) \qquad (6.1)$$

De notat că medierea este dublă: pe variabila de stare $x^{(g)} = \phi_g$ și pe variabila conjugată ψ_{G+g}. Bara superioară marchează media pe zona ℓ a reactorului. Variabila conjugată este interpretabilă ca o "importanță" a neutronilor definită de o ecuație diferențială de tip (1.5) și nu de o relație integrală ca "importanța" uzuală. De menționat că datele nucleare utilizate în setul G pot fi rafinate utilizînd metoda subgrupală /2o/.

VII. Optimizarea spectrului neutronic cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin

In acest capitol se încearcă, pe baza unui model matematic simplu al arderii combustibilului nuclear, să se rezolve problema apropierii maximului spectrului neutronic al unui reactor nuclear termic funcționînd cu uraniu îmbogățit de rezonanța de la o,3 eV a secțiunii de fisiune a izotopului Pu^{239} apărut în reactor /21/. Considerarea spectrului neutronic ca fiind de tip maxwellian și adoptarea drept funcție de control a temperaturii neutronilor conduc la o problemă de optimizare neliniară în raport cu această funcție.

Problema se rezolvă cu ajutorul procedurii lui Gamkrelidze. Funcționala de optimizat este următoarea:

$$I=(1/t_f)\int_0^{t_f}dt\int_0^{\infty}(E-E_r)^2\phi(E,T(t))dt \qquad (7.1)$$

unde E_r = o,3 eV, iar:

$$\phi(E,T(t))=\phi_0(E/(kT)^2)\exp(-E/kT) \qquad (7.2)$$

cu condiția ca: $\int_0^{\infty}\phi(E)dE=\phi_0$

Ecuațiile evoluției izotopilor U^{235} și Pu^{239} sînt:

$$dN_5/dt=-\lambda_5 N_5 \qquad (7.3)$$

$$dN_9/dt=\lambda'_5 N_5+\lambda_8 N_8-\lambda_9 N_9 \qquad (7.4)$$

unde s-a presupus: $N_8(t)\approx N_8^0$.

Regimul optim de funcționare al reactorului este dat în fig. 4, adică un regim "glisant", utilizînd trei temperaturi neutronice: T_1 = 32o°K, T_2 = 35o°K, T_3 = 38o°K.

Problema prezintă interes pentru reactorii cu deplasare de spectru.

VIII. Minimizarea unei mulţimi finite de funcţionale cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin

In numeroase ocazii apare necesitatea minimizării concomitente a două sau mai multor funcţionale reprezentînd mărimi fizice de interes: masa critică şi volumul critic al reactorului nuclear, maximizarea gradelor de ardere zonale şi a factorilor de uniformitate zonală a fluxului neutronic sau puterii.

In acest caz se poate construi o funcţională ca o combinaţie liniară convexă a funcţionalelor de minimizat. In lucrare se arată că, în anumite condiţii, aceasta revine la maximizarea combinaţiei liniare convexe a hamiltonienilor problemelor minimizării funcţionalelor luate individual cu aceleaşi ponderi:

$$H=\sum_{m=1}^{M} p_m H_m \qquad (81)$$

Minimul funcţionalei compuse este, în condiţii determinate, combinaţia liniară cu ponderi identice a minimurilor funcţionalelor luate izolat /22/:

$$I_{min}=\sum_{m=1}^{M} p_m I_{m,min} \qquad (82)$$

In lucrare se discută condiţiile matematice şi fizice necesare aplicării procedurii precum şi enunţul problemelor duale în cazul considerării restricţiilor funcţionale integrale. Procedura se aplică în capitolul unsprezece.

IX. Determinarea caracteristicilor pseudoproduşilor de fisiune

In evaluarea unor mărimi fizice importante, care caracterizează procesul arderii combustibilului în reactorii nucleari, considerarea tuturor produşilor de fisiune este dificilă dat fiind numărul mare al acestora (peste 800) /23/. In mod obişnuit se iau în considerare numai cei cu secţiune de captură relativ mare, iar ceilalţi se înlocuiesc prin aşa numiţii pseudoproduşi. In acest capitol se deduc relaţii pentru determinarea a trei caracteristici ale pseudoproduşilor de fisiune: secţiunea de captură, constanta de dezintegrare şi randamentul de fisiune.

$$\sigma_c^{\ell}=\sum_{k\in I_\ell}(\sigma_c^{k}N_k-\sigma_c^{k-1}N_{k-1})/\sum_{k\in I_\ell}N_k \qquad (9.1)$$

$$\lambda_\ell=\sum_{k\in I_\ell}(\lambda_k N_k-\lambda_{k'}N_{k'})/\sum_{k\in I_\ell}N_k \qquad (9.2)$$

$$\gamma_\ell^{i}=\sum_{k\in I_\ell}\gamma_k^{i} \qquad (9.3)$$

unde I_ℓ este mulţimea produşilor de fisiune care se înlocuiesc prin pseudoprodusul ℓ. Se vede că primele două mărimi sînt medii discrete pe densităţile de nuclee ale produşilor de fisiune pe care îi reprezintă şi depind astfel de fluxul neutronic integral (fluenţa). De asemenea se arată că aceste relaţii fiind deduse din condiţia de conservare a ratelor de captură, fisiune şi dezintegrare conservă în acelaşi timp şi mărimile k_∞, k_{ef} şi gradul de ardere.

X. Abordarea multigrupală a ecuaţiilor de ardere a combustibilului nuclear

Capitolul de faţă exploatează similitudinea între modurile de definire a caracteristicilor fizice ale pseudoproduşilor de fisiune şi a condensării secţiunilor eficace multigrupale: conservarea ratelor de reacţie /24/. De asemenea necesitatea abordării multigrupale a ecuaţiilor de ardere se explică prin dependenţa de energie a randamentului de fisiune γ (A) (A = numărul de masă)în special între cele două maxime.

In acest capitol se dau formule de condensare pentru secţiunile de captură, fisiune şi randamentele de fisiune.De exemplu:

$$\sigma_{c,g}^{k}=\sum_{G\in I_g}\sigma_{c,G}^{k}N_{k,G}\phi_G/(\sum_{G\in I_g}\phi_G\cdot\sum_{G\in I_g}N_{k,G}) \qquad (10.1)$$

De asemenea se prezintă formule de definire a caracteristicilor multigrupale ale pseudoproduşilor de fisiune prin condensare în puţine grupe. De exemplu:

$$\sigma_{c,g}^{\ell}=\sum_{k\in I_\ell}\sum_{G\in I_g}\sigma_{c,G}^{k}N_{kG}\phi_G/(\sum_{G\in I_g}\phi\ \sum_{k\in I_\ell}\sum_{G\in I_g}N_{kG}) \qquad (10.2)$$

Capitolul se încheie prin compararea acestor ultime formule cu cele din cazul monogrupal.

XI. Optimizarea regimului de funcţionare al unui reactor nuclear termic cu c.e.f. utilizînd principiul de maxim al lui Pontriaghin

In acest capitol se utilizează rezultatele din capitolele opt şi nouă la maximizarea sarcinii pe cei doi electrozi ai celulei convertoare în energie electrică a energiei de fisiune (c.e.f.) apărută din migraţia produşilor de fisiune de la catodul celulei către anod şi din migraţia electronilor de la anod (unde apar prin dezintegrarea β^- a fragmentelor de fisiune) spre catod /25/. Se construieşte deci o funcţională compusă ca o combinaţie liniară convexă a funcţionalelor ce dau sarcinile celor doi electrozi.

Ecuaţiile arderii utilizează pseudoprodusul de fisiune definit ca în capitolul nouă, utilizînd programul de calcul PSEUDOP. Rezultatele se utilizează în programul MAXIQ, folosit la maximizarea sarcinii electrice pe electrozii celulei. Se constată că regimul optimal este cel în care fluxul neutronic este constant pe porţiuni de timp alternînd valorile mari, în care se acumulează produşi de fisiune pe anod cu valori mici, în care electronii pot migra spre catod.

XII. Un model optimal pentru arderea combustibilului în reactorii nucleari

In locul ordonării produşilor de fisiune după secţiunea de captură, în acest capitol se propune un criteriu mai cuprinzător /26/:

$$c_k = \lambda_k + \sigma_c^k \phi \,, \qquad k \in [1, k_m] \qquad (12.1)$$

unde k_m este numărul de specii nucleare considerate în procesul arderii. Dacă A este o funcţională de interes la arderea combustibilului, atunci ea poate fi sensibilă la variaţii ale numărului k_m şi ale datelor nucleare $a_k = \left\{ \sigma_c^k, \gamma_k^i, \lambda_k, \sigma_f^k \phi \right\}$

Dacă aceste variaţii se pot liniariza prin sensibilităţile S şi S_k, respectiv, atunci k_m trebuie ales astfel ca:

$$\delta k_m \geqslant \sum_{k=1}^{k_f} S_k \, \delta_{a_k} / S \tag{12.2}$$

adică variaţia produsă de creşterea numărului speciilor considerate în procesul arderii (δA_{k_m}) să nu fie mai mică decît variaţia produsă de erorile datelor de intrare (δA_{a_k}).

In particular se poate utiliza o funcţie, care să descrie variaţia funcţionalei A cu valorile lui k_m.

$$A = A_\infty (e^{-ak_m} + 1/(1+k_m)) \tag{12.3}$$

unde $\lim_{k_m \to 0} A = o$ şi $\lim_{k_m \to \infty} A = A_\infty$. Valoarea constantei "a" poate fi determinată din condiţia:

$$\partial A / \partial k_m \big|_{k=k_f} = 0 \tag{12.4}$$

unde k_f este numărul speciilor nucleare fisionabile (fig. 5).

Exemplele numerice pentru programele PROCIONE, FEVER şi FUELCYC dau rezultate bune, ţinînd seama de simplitatea funcţiei (12.3).

XIII. Concluzii

1. S-a extins printr-o procedură numerică aplicarea principiului de maxim la mai multe grupe de energie şi s-a realizat o tratare unitară pentru toate geometriile unidimensionale (placă, sferă, cilindru infinit) a problemelor de optimizare spaţială.

2. A fost aplicată pentru prima oară analiza dimensională generală la problemele de optimizare cu dependenţă spaţială rezolvate cu principiul de maxim, găsindu-se relaţii utile la minimizarea concomitentă a două funcţionale.

3. S-au dezvoltat două proceduri pentru calculul coeficienţilor de difuzie anizotropă pentru cavităţi de forme variate şi care pot fi utile în optimizarea reactorilor nucleari cu cavităţi menţinînd formalismul difuziei multigrupale la aplicarea principiului de maxim.

4. A fost extinsă la cazul multizonal o procedură monozonală utilizată curent pentru condensarea secţiunilor eficace multigrupale şi s-a prezentat o procedură de condensare speci-

fică problemelor de optimizare spaţială rezolvate cu principiul de maxim.

5. S-a rezolvat problema optimizării spectrului neutronic al unui reactor nuclear termic alimentat cu uraniu îmbogăţit astfel ca să poată fi consumat pe loc izotopul Pu^{239} apărut în cursul arderii.

6. A fost dezvoltată o procedură pentru minimizarea mai multor funcţionale utilizînd principiul de maxim.

7. S-au dedus proceduri generale pentru determinarea caracteristicilor pseudoproduşilor de fisiune în cazurile monogrupal şi multigrupal.

8. A fost abordată problema regimului optim de funcţionare a unui reactor nuclear termic cu celule convertoare a energiei de fisiune în energie electrică, utilizînd principiul de maxim.

9. S-a expus un procedeu de micşorare a numărului de ecuaţii de ardere a combustibilului nuclear, realizîndu-se astfel un model matematic optimal pentru acest proces.

10. Problemele de optimizare cu restricţii funcţionale abordate în capitolele II, VI, VII, VIII, XI cuprind consideraţii privind problemele duale corespunzătoare.

11. Cu toate simplificările de model matematic, rezolvările problemelor de optimizare expuse prezintă interes în ilustrarea valenţelor principiului de maxim precum şi la orientarea căutării optimului prin metoda variantelor.

12. Observaţiile, care însoţesc fiecare capitol, indică posibilităţi de continuare a cercetării în viitor.

Bibliografie selectată

/ 1/ A. P. Rudik, Iadernîe reaktorî i printsip maksimuma Pontriaghina, M. Atomizdat, 1971.

/ 2/ V. Anton, M. Pavelescu, Optimizarea spaţială a reactorilor nucleari rapizi cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin, Protocol IFA-FR-73 (1973).

/ 3/ V. Anton, M. Pavelescu, Maximizarea puterii unui reactor nuclear rapid cu ajutorul principiului de maxim al lui Pontriaghin, Protocol IFA-RT-9 (1974).

/ 4/ P. Goldschmidt and J. Quenon, Minimum Critical Mass in Fast Reactors with Bounded Power Density, Nucl. Sci. Eng., 39, 311 (197o).

/ 5/ C. I. Stanciu, Analiza dimensională generală, Ed. Tehnică, 1976, Bucureşti.

/ 6/ V. Anton, Application of General Dimensional Analysis to Optimization Problems Solved by Means of Pontryagin Maximum Principle in Nuclear Reactor Physics, IRNE-143-1979, Grupa tematică VVER, Moscova, 1979.

/ 7/ M. Michelini, Energia Nucleare, 15, 7 (1968).

/ 8/ V. Anton, Calcolo dei coefficienti di diffusione anisotropa in cavità cilindriche e di forma generalizzata XY, CNEN, RT/FI (73) 6.

/ 9/ A. Daneri, M. Michelini, G. Toselli, CNEN-RT/FI (72)1.

/1o/ V. C. Boffi, T. Trombetti, The Neutron Diffusion Coefficients as Second-order Tensor-theory and Calculations, Nucl. Sci. and Eng., 5o, 2oo-2o7 (1973).

/11/ V. Anton, Uciot anizotropii koeffiţientov diffuzii, Simpozium VVER, Zakopane, 1973.

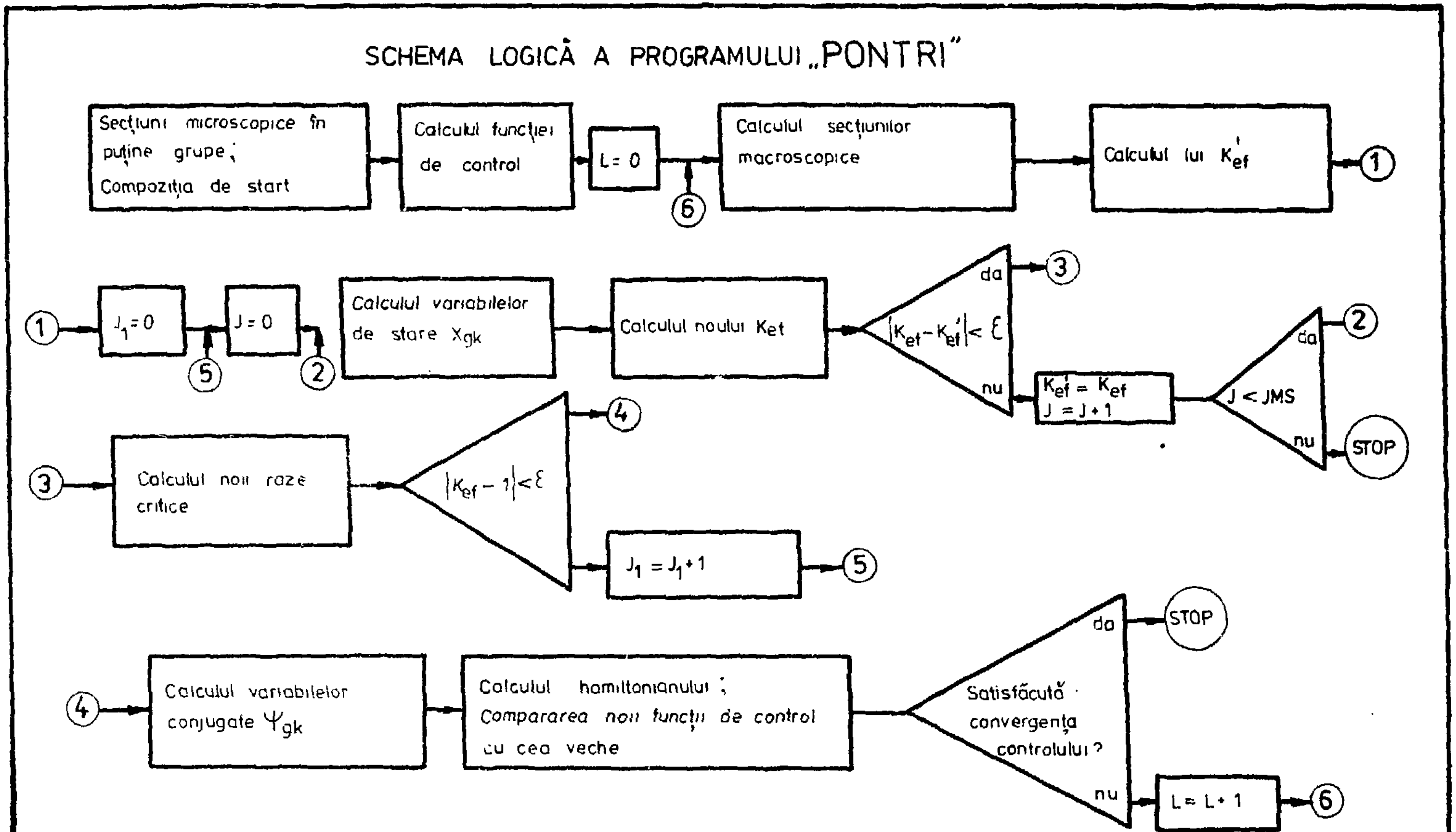
/12/ V. Anton, M. Pavelescu, Dezvoltarea metodei de colapsare pentru reactorii rapizi multizonali, Preprint IFA-FR-125-1975.

/13/ M. Pavelescu, V. Anton, S. Adam, Metoda de colapsare a secţiunilor multigrupale pentru reactorii rapizi cu considerarea autoecranării, Simpozion Obninsk, URSS, 1973.

/14/ M. Pavelescu, S. Adam, V. Anton, S. Ghilea, Studiu de fizica reactorului rapid de putere cu combustibil

vitroceramic, Protocol IFA-FR-68-1973.
/15/ V. Anton, Secţiuni mono, bi şi trigrupale pentru trei reactori de tip ZPR, Raport intern IFA-1973.
/16/ V. Anton, Secţiuni mono, bi şi trigrupale pentru reactori FFTF cu plutoniu şi uraniu în suport vitroceramic, Raport intern IFA-1973.
/17/ V. Anton, Condensarea secţiunilor multigrupale cu considerarea autoecranării, Referat de doctorat,1975.
/18/ V. Anton, M. Pavelescu, Descrierea programului BONDAR de condensare a secţiunilor eficace multigrupale la reactorii rapizi, Protocol IFA-FR-68-1973.
/19/ V. Anton, The Collapsing of Multigroup Cross Sections Solved by Means of Maximum Principle of Pontryagin, Simpozion VVER, Praga, 1978; IRNE-139-1979.
/2o/ V. Anton, Calculul secţiunilor eficace multigrupale cu considerarea autoecranării; Metoda subgrupală şi aplicaţii. St. Cerc. Fiz. tom. 29, nr. 8, p. 851-863, 1977.
/21/ I. Purica, V. Anton, The Optimization of Neutron Spectrum by Means of the Pontryagin Maximum Principle, Preprint IFA-FR-16o-1976, Grupa tematică VVER, Moscova, 1977.
/22/ V. Anton, The Minimization of Finite Functional Set by Means of the Pontryagin Maximum Principle, Simpozion VVER, Praga 1978; IRNE-142-1979.
/23/ V. Anton, The Determination of the Characteristics of Fission Pseudo-products, Simpozion VVER, Bucureşti, 1977; IRNE-138-1979.
/24/ V. Anton, Multigroup Approach of the Burnup Equations, Simpozion VVER, Bucureşti, 1977; IRNE-14o-1979.
/25/ I. Purica, V. Anton, Optimizarea regimului de funcţionare al unui reactor nuclear termic cu c.e.f. utilizînd principiul de maxim al lui Pontriaghin, Raport intern IFA-1977.
/26/ V. Anton, An Optimal Model for Fuel Burnup in Nuclear Reactors, Grupa tematică VVER, Moscova, 1978; IRNE-141-1979.

C U P R I N S



SCHEMA LOGICĂ A PROGRAMULUI „PONTRI”
Secțiuni microscopice în puține grupe; Compoziția de start
Calculul funcției de control
L = 0
Calculul secțiunilor macroscopice
Calculul lui K'_{ef}
1
6
1
$J_1 = 0$
5
J = 0
2
Calculul variabilelor de stare X_{gk}
Calculul noului Ket
$|K_{ef} - K'_{ef}| < \varepsilon$
da
3
nu
$K'_{ef} = K_{ef}$
J = J + 1
J < JMS
da
2
nu
STOP
3
Calculul noii raze critice
$|K_{ef} - 1| < \varepsilon$
4
$J_1 = J_1 + 1$
5
4
Calculul variabilelor conjugate Ψ_{gk}
Calculul hamiltonianului; Compararea noii funcții de control cu cea veche
Satisfăcută convergența controlului?
da
STOP
nu
L = L + 1
6

Fig. 1

SCHEMA LOGICĂ A PROGRAMULUI „BONDAR"

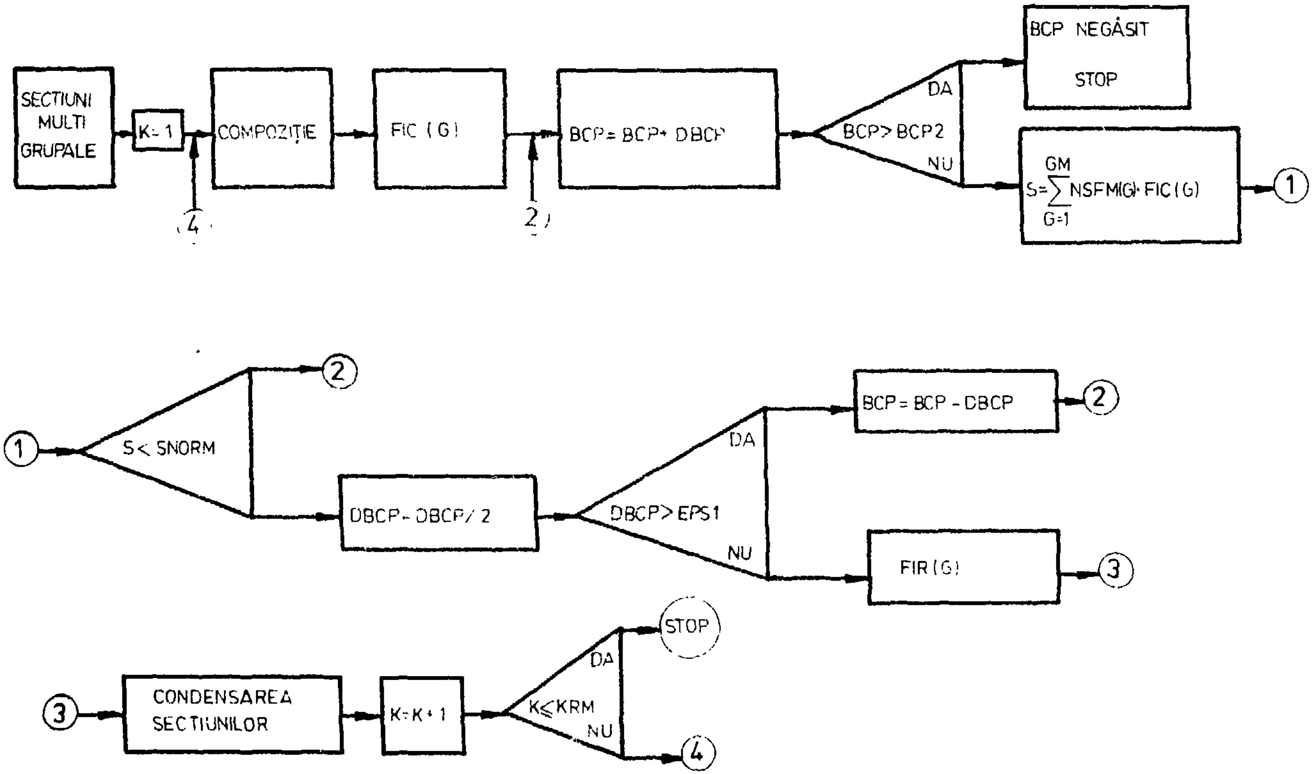
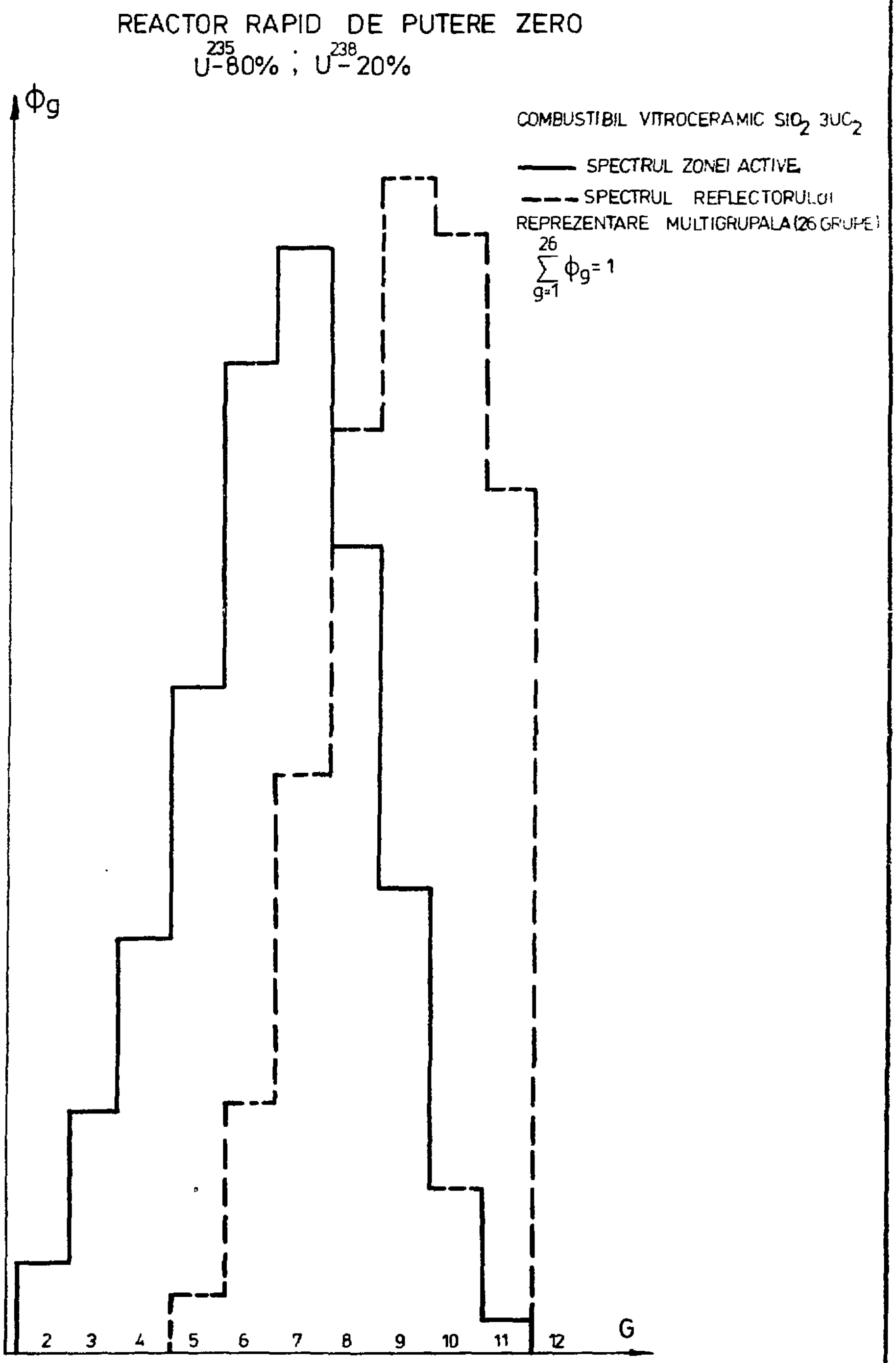


Fig. 2



REACTOR RAPID DE PUTERE ZERO
U^{235}-80% ; U^{238}-20%
ϕ_g
COMBUSTIBIL VITROCERAMIC SiO_2 $3UC_2$
SPECTRUL ZONEI ACTIVE
SPECTRUL REFLECTORULUI
REPREZENTARE MULTIGRUPALA (26 GRUPE)
$\sum_{g=1}^{26} \phi_g = 1$
2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
G

Fig. 3

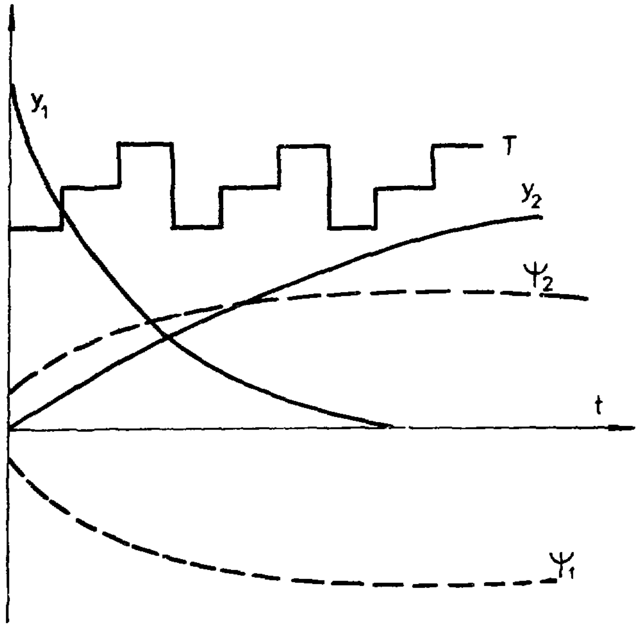


Fig. 4

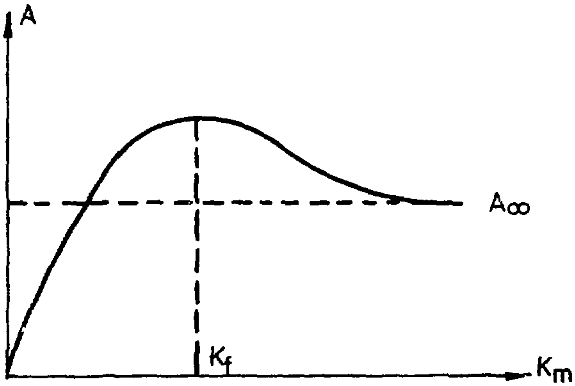


Fig.5