R07901108

COMITETUL DE STAT PENTRU ENERGIA NUCLEARA
INSTITUTUL DE FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA

I L I E   P E T R E

CONTRIBUTII LA ELABORAREA UNUI SET DE DATE NUCLEARE PENTRU REACTORII RAPIZI

Rezumatul tezei de doctorat

Conducător ştiinţific

Dr. Sevastian Răpeanu

B U C U R E S T I

1 9 7 7

C U P R I N S

CUVINT INAINTE

Este un sentiment de adîncă satisfacţie pe care-l încerc recunoscînd că reuşita acestui studiu prezentat pentru obţinerea titlului de doctor în fizică se datoreşte în cea mai mare măsură faptului că am avut privilegiul să beneficiez de îndrumarea profesională extrem de competentă a conducătorului meu ştiinţific, Dr. Sevastian Râpeanu.

In încheiere, doresc să adresez sentimente de recunoştinţă tuturor celor care prin discuţii şi observaţii au sprijinit direct sau indirect realizarea studiului de faţă.

I. INTRODUCERE

Lucrarea de față își propune ca studiu elaborarea prin calcul a unui set de date nucleare, pentru reactorii rapizi, bazat pe "cel mai bun acord" cu datele experimentale.

Acest set de date nucleare permite o abordare superioară a unui proiect de reactor rapid deoarece în elaborarea sa s-au utilizat atît informațiile diferențiale cît și cele integrale.

Procedeul matematic utilizat constă în modificarea datelor diferențiale în scopul obținerii unei discrepanțe minime între mărimile integrale calculate și măsurate.

In primul capitol al lucării sînt prezentate cauzele care determină neconcordanța dintre valorile calculate și măsurate ale datelor integrale pentru reactorii rapizi, utilizîndu-se în special informațiile acumulate din exploatarea reactorilor rapizi de tipul ZPR - III.

In capitolul doi al lucrării este descris formalismul matematic care stă la baza elaborării setului de secțiuni ameliorate, contribuția originală constînd în fundamentarea statistică a metodei. In acest scop s-a demonstrat o teoremă de minim, s-a investigat comportarea statistică a vectorului multiplicatorilor Lagrange, precum și a setului estimat de secțiuni, demonstrîndu-se calitatea de estimator nedeplasat.

In capitolul trei este descris formalismul de calcul al coeficienților de sensibilitate. Contribuțiile originale constau în dezvoltarea metodei variaționale, în generalizarea metodei Swanlake și în exprimarea calculelor de sensibilitate sub formă compatibilă cu codul ANISN. Astfel s-a arătat că utilizarea principiului variațional Pomraning permite exprimarea calculelor de sensibilitate pentru mărimile de interes din proiectarea reactorilor rapizi sub formă unică, diferențele apărînd numai în forma ecuațiilor adjuncte.

In capitolul patru este descris codul de calcul al setului ameliorat de date nucleare utilizîndu-se ca exemplu de calcul elementul U^{235}. Acest cod de calcul este operabil pe calculatoarele I.B.M. - 370 și P.D.P. - 15 (cu un număr restrîns de date integrale).

Capitolul 5 al lucrării este rezervat unor concluzii generale.

CAPITOLUL I

COMPARAREA DATELOR INTEGRALE CALCULATE SI MASURATE PENTRU REACTORII RAPIZI

Principalele cauze care contribuie la discrepanța dintre valorile calculate și măsurate ale datelor integrale sînt:

- erori introduse de modelele de calcul,
- erori datorate metodelor de elaborare a seturilor de secțiuni multigrupale,
- erori în datele nucleare de bază,
- erori experimentale.

Metodele matematice de calcul ale principalelor date integrale din reactorii rapizi /1/, /2/, /3/ sînt afectate de incertitudini mici ce nu pot constitui principala sursă a discrepanțelor dintre valorile experimentale și calculate pentru principalele mărimi de interes din reactorii rapizi. Astfel, eroarea în factorul de multiplicare efectiv, datorată modului de soluționare a ecuației Boltzmann /4/, are o valoare mai mică de 0.3 %.

Eroarea introdusă în procesul de elaborare al unui set de secțiuni multigrup este în general greu de precizat datorită complexității formalismului și a interferenței cu erorile conținute în bilioteca de date primare. Testarea codurilor de generare a seturilor multigrupale de secțiuni se face prin utilizarea ca bază de calcul a unei biblioteci de date primare și a unui decupaj energetic unic pentru toate codurile. După elaborarea setului de secțiuni se pot calcula datele integrale de interes și compara cu experimentul.

La o primă analiză, discrepanța dintre seturi este explicabilă. Astfel, în unele coduri secțiunile (n,2n) sînt scăzute din secțiunea de absobție iar în altele nu.

Totuși, neconcordanța dintre seturile de date în domeniile (1-300 ev) și (300 ev-25 Kev) nu este complet explicată cerînd investigații mai detailate. Chiar unul dintre cele mai utilizate sisteme de generare a constantelor multigrupale ETOE - MC^2 /5/ furnizează secțiuni de transport pentru ^{238}U, în anumite grupe energetice, incorecte. In general,discrepanțele dintre seturile multigrupale sînt semnificative la energii superioare a 4 MeV și inferioare a 15 KeV. Acestea sînt corelate cu parametrii integrali calculați, dar nu la un nivel semnificativ.

Erorile în datele nucleare de bază constituie principala cauză a neconcordanței dintre valorile măsurate și calculate.

Un studiu întreprins cu principalele biblioteci de date primare arată că datele de bază pentru ^{235}U, ^{239}Pu, ^{238}U şi ^{240}Pu sînt nesatisfăcătoare, fiind necesară o îmbunătăţire a acurateţei măsurătorilor pentru $\sigma_f(^{235}U)$, $\sigma_f(^{239}Pu)$ şi $\sigma_c(^{239}Pu)$ la energii superioare a 300 eV, pentru σ_c (^{238}U) la energii mai mari de 4 KeV şi pentru $\sigma_c(^{240}Pu)$ la energii superioare a 1 KeV.

Deşi în analiza efectuată datele experimentale au constituit standardul de comparare, nu trebuie omis faptul că şi ele sînt afectate de erori.

Datorită perfecţionării tehnicilor experimentale aceste erori sînt mici încît se poate considera că valorile experimentale au calitatea necesară de a fi utilizate ca referinţă în compararea cu calculele.

In concluzie, putem afirma că în majoritatea cazurilor metodele teoretice sînt adecvate pentru o analiză a rezultatelor experimentale din ansamblele critice. Pe de altă parte, datele nucleare disponibile nu permit un calcul al parametrilor reactorului cu acurateţea dorită, ceea ce implică utilizarea informaţiilor experimentale pentru proiectele de reactori rapizi.

CAPITOLUL II

ELABORAREA SETULUI DE SECTIUNI AMELIORATE

Considerăm un set J de cantităţi integrale, INTj, pentru o clasă de reactori rapizi. Dacă se cunosc valorile adevărate ale secţiunilor grupale, σ_i, cu ajutorul unui model matematic adecvat mărimile integrale se pot exprima în funcţie de secţiuni sub forma:

$$INT_j = INT_j(\sigma_1, \sigma_2, \cdots\cdots, \sigma_I) \qquad (j = 1, 2, \ldots, J) \qquad (II.1)$$

Vom introduce în continuare ipoteza că mărimile integrale INTj sînt dezvoltabile în serie Taylor în jurul valorilor cunoscute $\sigma_{o1}, \sigma_{o2}, \ldots.\sigma_{oI}$ şi în plus termenii de ordinul doi şi superiori din dezvoltare se pot neglija. Deci:

$$INT_j = INT_j(\sigma_{o1}, \sigma_{o2}, \ldots\ldots, \sigma_{oI}) + \sum_{i=1}^{I} \left.\frac{\partial INT_j}{\partial \sigma_i}\right|_{\sigma_{oi}} (\sigma_i - \sigma_{oi}) \qquad (II.2)$$

Considerînd o clasă de mărimi integrale diferite, astfel încît ecuațiile (II.2) să fie linear independente, cu notațiile:

$$INT_j^o = INT_j(G_{o1}, G_{o2}, \ldots, G_{oI}) \tag{II.3}$$

$$\frac{INT_j - INT_j^o}{INT_j^o} = y_j \qquad (j = 1, 2, \ldots, J) \tag{II.4}$$

$$\frac{G_i - G_{oi}}{G_{oi}} = y_{J+i}, \qquad (i = 1, 2, \ldots, I) \tag{II.5}$$

$$-\delta_{ji} = x_{ji} \qquad (j = 1, 2, \ldots, J) \quad (i = 1, 2, \ldots, I) \tag{II.6}$$

unde δ_{ji} reprezintă simbolul Kroeneker,

$$G_{oi} \frac{1}{INT_j^o} \left. \frac{\partial INT_j}{\partial G_i} \right|_{G_{oi}} = x_{j\,J+i} \tag{II.7}$$

$$x_{jo} = 0 \qquad (j = 1, 2, \ldots, J) \tag{II.8}$$

ecuațiile (II.2) se pot pune sub forma:

$$y_j = \sum_{i=1}^{I} x_{j\,J+i}\, y_{J+i} \tag{II.9}$$

sau:

$$x_{jo} + \sum_{i=1}^{I+J} x_{ji}\, y_i = 0 \tag{II.10}$$

Presupunem existența unor relații de legătură între mărimile Y_i de forma :

$$x_{J+h\,o} + \sum_{i=1}^{I+H} x_{J+h\,i}\, y_i = 0 \qquad (h = 1, 2, \ldots, H) \tag{II.11}$$

In scriere matricială relațiile (II.10) și (II.11) devin:

$$X_0 + XY = 0 \tag{II.12}$$

Fie, $INTj^{EXP}$, σ_i^{EXP}, Y_k^{EXP} valori experimentale cunoscute. In concordanţă cu (II.4) şi (II.5) se obţine :

$$\frac{INT_j^{EXP} - INT_j^{o}}{INT_j^{o}} = y_j^{EXP} \qquad (j = 1,2,\ldots,J) \qquad \text{(II.13)}$$

$$\frac{\sigma_i^{EXP} - \sigma_{oi}}{\sigma_{oi}} = y_{J+i}^{EXP} \qquad (i = 1,2,\ldots I) \qquad \text{(II.14)}$$

Presupunem o distribuţie normală a erorilor pentru mărimile experimentale şi vom nota prin B_y matricea de covarianţă a vectorului Y^{EXP}, pe care o considerăm de formă diagonală, ceea ce implică necorelarea măsurătorilor integrale şi a secţiunilor experimentale.

Funcţia de verosimilitare a vectorului y poate fi scrisă sub forma /6/:

$$\mathcal{L}\{y|y^{EXP}\} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}(\det B_y)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(y^{EXP}-y)^T B_y^{-1}(y^{EXP}-y)} \qquad \text{(II.15)}$$

şi devine maximă dacă se alege un estimator $\tilde{y}$ al lui Y astfel încît:

$$(y^{EXP} - \tilde{y})^T \cdot B_y^{-1} \cdot (y^{EXP} - \tilde{y}) = \text{minim} \qquad \text{(II.16)}$$

şi în plus

$$X_o + X\tilde{y} = 0 \qquad \text{(II.17)}$$

Introducînd notaţiile:

$$V = y - y^{EXP} \qquad \text{(II.18)}$$

$$\tilde{V} = \tilde{y} - y^{EXP} \qquad \text{(II.19)}$$

$$X_o + X y^{EXP} = M \qquad \text{(II.20)}$$

relaţiile (II.16) şi (II.17) devin:

$$\tilde{v}^T \cdot B_y^{-1} \cdot \tilde{v} = \text{minim} \tag{II.21}$$

$$M + X\tilde{v} = 0 \tag{II.22}$$

Rezolvînd această problemă de minim, cu legături, prin metoda multiplicatorilor Lagrange, obţinem:

$$\tilde{y} = y^{EXP} + \tilde{v} = y^{EXP} - B_y \cdot X^T \cdot G^{-1} \cdot M \tag{II.23}$$

unde :

$$G = X \cdot B_y \cdot X^T \tag{II.24}$$

Estimatorul $\tilde{v}$, verifică proprietatea de minim, adică oricare ar fi matricea V, satisfăcînd condiţia:

$$M + XV = 0 ,$$

$$V^T \cdot B_y^{-1} \cdot V \geq M^T \cdot (X \cdot B_y \cdot X^T)^{-1} \cdot M = \tilde{v}^T \cdot B_y^{-1} \cdot \tilde{v} \tag{II.25}$$

Estimatorul $\tilde{y}$ este nedeplasat şi are matricea de covarianţă:

$$B_{\tilde{y}} = (I - B_y \cdot X^T \cdot G^{-1} \cdot X) \cdot B_y \cdot (I - B_y \cdot X^T \cdot G^{-1} \cdot X)^T \tag{II.26}$$

unde I reprezintă matricea unitate.

Cantitatea aleatoare $Q = \tilde{v}^T \; By^{-1}\tilde{v}$ este distribuită χ^2_q, unde $q = J + H$.

Dacă notăm prin K vectorul multiplicatorilor Lagrange, se demonstrează că acesta are speranţa matematică şi matricea de covarianţă date de:

$$E(K) = 0 \tag{II.27}$$

şi

$$B_K = G^{-1} \tag{II.28}$$

Pazy A. /7/ a dezvoltat o metodă care permite înglobarea în calcule a unor cantităţi integrale continue de forma INT$\{E', \sigma(E)\}$, unde INT este o funcţie de E' astfel încît pentru fiecare punct E', INT este o funcţională de σ(E). Metoda comportă însă dificul-

tăţi de calcul deoarece soluţia se obţine prin rezolvarea unei ecuaţii integrale a cărei soluţie nu poate fi redusă la aceea a unui sistem finit de ecuaţii lineare. Pentru corectitudinea formalismului de mai sus este necesară luarea în consideraţie a corelaţiei dintre secţiunile grupale. Un prim tip de corelaţie apare datorită faptului că majoritate secţiunilor măsurate sînt raportate la un standard. Mitani H. şi Kuroi H. /8/ au introdus un nou tip de corelaţie bazat pe faptul că secţiunile grupale pot include un număr comun de parametrii, astfel încît modificarea unei secţiuni grupale afectează celelalte secţiuni. Dragt J.B. /9/ a dezvoltat un formalism bazat pe teorema lui Bayes /10/ iar Gadini A. şi Salvatores M. /11/ au introdus o metodă bazată pe corectarea directă a parametrilor nucleari într-un mod consistent cu modelele teoretice adoptate de codurile utilizate pentru generarea de secţiuni grupale. In formalismul expus s-a utilizat principiul verosimilităţii maxime. Funcţia de verosimilitate este formal identică cu distribuţia lui y^{EXP}, cu diferenţa că în timp ce în această distribuţie y^{EXP} este un vector de parametrii variabili, în funcţia de verosimilitate y^{EXP} reprezintă un vector fix.

CAPITOLUL III

CALCULUL COEFICIENTILOR DE SENSIBILITATE

Pentru calculul setului ameliorat de secţiuni este necesară cunoaşterea coeficienţilor (II.7), numiţi şi coeficienţi de sensibilitate. Aceşti coeficienţi se pot calcula prin metode directe (care solicită însă un timp mare de calcul), teoria perturbaţiei generalizate /12/, metoda variaţională /13/ şi metoda Swanlake /14/. In cele ce urmează se va considera metoda variaţională.
Fie ecuaţia Boltzmann sub forma operaţională:

$$H\Psi = S \tag{III.1}$$

Conform principiului variaţional introdus de Pomraning G.C. /15/ pentru estimarea funcţionalei lineare $G[\Psi]$ se poate utiliza funcţionala:

$$R[\Phi^{+},\Phi] = G[\Phi] + \langle \Phi^{+}, S - H\Phi \rangle \tag{III.2}$$

unde Φ este funcţie de aproximaţie pentru (III.1) iar Φ^{+} aproximează soluţia ecuaţiei:

$$H^{+}\Psi^{+} = G'[\Psi] \qquad \text{(III.3)}$$

Vom considera funcţii de aproximaţie care diferă de soluţia exactă prin termeni de ordinul unu.
Pentru ca funcţionala (III.2) să conducă la o bună estimaţie a cantităţii $G[\Psi]$, vor trebui satisfăcute relaţiile:

$$\delta R[\Psi^{+}, \Psi] = 0 \qquad \text{(III.4)}$$

şi

$$R[\Psi^{+}, \Psi] = G[\Psi] \qquad \text{(III.5)}$$

ceea ce denotă că erorile de ordinul unu în soluţiile directe şi adjuncte conduc la erori de ordinul doi în rezultatul final şi că funcţionala (III.2) conduce la un rezultat exact pentru $G[\Psi]$ în situaţia cînd se utilizează soluţia exactă pentru problemele directe şi adjuncte. Relaţia (III.5) este evidentă iar (III.4) rezultă din (III.3).
Din principiul variaţional Pomraning se pot obţine coeficienţii de sensibilitate ai diferitelor mărimi integrale, utilizînd o alegere adecvată a ecuaţiei adjuncte.
Astfel, sensibilitatea unui raport de rate de reacţie de forma:

$$G = \frac{\langle \Sigma_1, \Psi \rangle}{\langle \Sigma_2, \Psi \rangle} \qquad \text{(III.6)}$$

se obţine utilizînd ecuaţia adjunctă :

$$H^{+}\Psi^{+} = \frac{\Sigma_1}{\langle \Sigma_1, \Psi \rangle} - \frac{\Sigma_2}{\langle \Sigma_2, \Psi \rangle} \qquad \text{(III.7)}$$

şi funcţionala :

$$R[\Phi^{+}, \Phi] = \frac{\langle \Sigma_1, \Phi \rangle}{\langle \Sigma_2, \Phi \rangle}\left[1 + \langle \Phi^{+}, S - H\Phi \rangle\right] \qquad \text{(III.8)}$$

Modificările în cantitatea (III.6) datorate modificărilor parametrilor sistemului se obţin din:

$$\delta G = R' - R \qquad \text{(III.9)}$$

unde R' se obţine din (III.8) utilizîndu-se valorile perturbate.

De remarcat că atît R' cît şi R se calculează cu aceleaşi funcţii de aproximaţie (de obicei soluţiile problemei neperturbate).
Din (III.9) rezultă:

$$\frac{\delta G}{G} = \frac{\langle \delta\Sigma_1, \phi \rangle}{\langle \Sigma_1, \phi \rangle} - \frac{\langle \delta\Sigma_2, \phi \rangle}{\langle \Sigma_2, \phi \rangle} + \langle \phi^+, \delta S - \delta H \phi \rangle \tag{III.10}$$

Estimînd (III.9) direct din (III.6) considerînd fluxul perturbat egal cu cel neperturbat se obţine:

$$\frac{\delta G}{G} = \frac{\langle \delta\Sigma_1, \phi \rangle}{\langle \Sigma_1, \phi \rangle} - \frac{\langle \delta\Sigma_2, \phi \rangle}{\langle \Sigma_2, \phi \rangle} \tag{III.11}$$

Astfel, în estimarea variaţională apare un termen în plus care ţine cont de efectul perturbaţiei asupra fluxului. Expresia (III.10) se poate obţine şi prin teoria perturbaţiei generalizate sau metoda Swanlake.

Utilizarea principiului variaţional în calculele de sensibilitate este preferabil unei estimări a lui (III.9) bazată pe (III.6) chiar cu flux perturbat, el fiind puţin influenţat de perturbaţie.

Sensibilitatea fluxului se poate obţine utilizînd o ecuaţie adjunctă de forma:

$$H^+ \Psi^+ = \frac{\delta(\bar{R} - \bar{R}_0)}{\langle \delta(\bar{R} - \bar{R}_0), \Psi \rangle} \tag{III.12}$$

şi funcţionala:

$$R[\phi^+, \phi] = \langle \delta(\bar{R} - \bar{R}_0), \phi \rangle [1 + \langle \phi^+, S - H\phi \rangle] \tag{III.13}$$

unde $\delta\ (R - R_0)$ reprezintă funcţia Dirac iar $\bar{R}$ şi $\bar{R}_0$ coordonate generalizate. In final:

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\langle \delta[\delta(\bar{R} - \bar{R}_0)], \phi \rangle}{\langle \delta(\bar{R} - \bar{R}_0), \phi \rangle} + \langle \phi^+, \delta S - \delta H \phi \rangle \tag{III.14}$$

Asemănător cu (III.10) sensibilitatea unei rate de reacţie este dată de:

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\langle \delta\Sigma, \phi \rangle}{\langle \Sigma, \phi \rangle} + \langle \phi^+, \delta S - \delta H \phi \rangle \tag{III.15}$$

Dacă în expresiile (III.10), (III.14) şi (III.15) se utilizează soluţii ale ecuaţiei Boltzmann obţinute prin metoda ordonatelor discrete sub forma dată de codurile ANISN şi DTF- IV, trebuie avut în vedere următoarele:

a) variaţia spaţială şi dependenţa energetică a fluxului se divide într-un număr dat de intervale, respectiv grupe, astfel încît fluxul unghiular pentru intervalul spaţial J şi grupul energetic I este dat de :

$$\Phi_{J,I}(\Omega) = \frac{1}{2}\left[\Phi_{J,I}(\Omega) + \Phi_{J-1,I}(\Omega)\right] \qquad \text{(III.16)}$$

b) integrala pe unghi a fluxului se înlocuieşte cu o formulă de cuadratură Gauss /16/, astfel încît fluxul pentru intervalul J, unghiul K şi grupul I se reprezintă prin:

$$\Phi_{J,K,I} \cdot W(K) = \int_{\Delta\Omega_K} d\Omega \cdot \Phi_{J,I}(\Omega) \qquad \text{(III.17)}$$

unde W(K) reprezintă ponderea atribuită fluxului în formula de cuadratură.

c) fluxurile adjuncte sînt date în ordine inversă după grupurile energetice şi direcţiile unghiulare.

CAPITOLUL IV

CALCULUL UNUI SET DE SECTIUNI PENTRU ^{235}U UTILIZIND METODA MULTIPLICATORILOR LAGRANGE

In acest capitol este descris codul de calcul utilizat pentru calculul setului ameliorat de date nucleare împreună cu un exemplu de calcul. Programul de calcul este operabil pe calculatorul I.B.M.-370 - I.F.I.N. şi este conceput pe baza formalismului dezvoltat în capitolul doi al lucrării. Datele integrale utilizate în acest calcul sînt reprezentate de coeficienţii efectivi de multiplicare ai sistemelor ZPR - III - 24, 29, 31, 34 şi 35.

Datele nucleare sînt alcătuite din secţiunile multigrupale de transport (σ_{tr}), captură (σ_c), fisiune (σ_f), încetinire (σ_{SD}) şi numărul mediu de neutroni emişi pe fisiune ($\bar{\nu}$) pentru elementul ^{235}U. In calcule s-a utilizat un decupaj energetic în şase grupe (10 - 0.82 MeV, 820-183 KeV, 183-41 KeV, 41-9.1 KeV, 9.1-0.75 KeV şi 750-0.04 ev).

In tabelul 1 sînt prezentate rezultatele obţinute sub formă de corecţii absolute în datele nucleare. Rezultatele obţinute sînt asemănătoare celor publicate de H.Haggblom /17/. In setul de corecţii publicat de H.Haggblom, apare surprinzătoare descreşterea mare în secţiunea de încetinire în primul grup energetic (-0.126). Acest lucru a fost atribuit utilizării în calcule a ansamblulu. Godiva, al cărui coeficient de multiplicare nu este cunoscut cu precizie bună. In exemplul considerat nu a fost inclus sistemul Godiva şi totuşi rezultatul este asemănător (-0.113), ceea ce denotă independenţa rezultatului de utilizarea în calcule a ansamblului Godiva.

Descreşterea destul de mare în secţiunea de fisiune în grupul trei, rezultată din calculele lui Haggblom nu se confirmă în această lucrare, unde corecţiile în secţiunea de fisiune se aseamănă mai mult cu cele publicate în /18/. Din inspectarea rezultatelor conţinute în tabelul 1 se desprinde necesitatea unor îmbunătăţiri în secţiunea inelastică în domeniul 10 -0.82 MeV, precum şi în secţiunea de fisiune la energii superioare a 40 KeV.

CAPITOLUL V

C O N C L U Z I I

In acest capitol se prezintă o analiză a rezultatelor originale obţinute în cadrul lucrării de faţă, scoţînd în evidenţă valoarea ştiinţifică a tematicii abordate, în contextul cercetărilor pe plan mondial în domeniul reactorilor rapizi. Una din principalele caracteristici ale procesului de elaborare a setului de secţiuni ameliorate constă în dependenţa rezultatului final de reactorul considerat. Astfel, corecţiile în secţiuni, calculate pentru sisteme ZPR-III de 400 Kg masa critică (tabelul 1) diferă de cele corespunzătoare sistemelor de 150 Kg (tabelul 2) sau 200 Kg (tabelul 3). Din analiza celor trei exemple de calcul se constată diferenţe semnificative, apărînd chiar unele anomalii. Astfel, secţiunea de fisiune în primul grup energetic diferă mai mult între sistemele de 200 şi 150 Kg decît între cele de 200 şi 400 Kg, masă critică. Analiza acestor exemple arată că setul de corecţii nu are caracter extrapolativ. Mai mult, datele nucleare corectate nu au semnificaţie individuală, semnificativ fiind numai ansamblul total de date nucleare ameliorate. In tabelul 4 sînt prezentate rezultatele unui calcul în care s-au utilizat coeficienţii efectivi de multiplicare ai sistemelor ZPR - III - 5 (156 kg), 16(202 kg), 23(249 kg), 30(377 kg), 29(402 kg) şi 24(456 kg). In alcătuirea acestui exemplu s-a avut în vedere utilizarea unor reactori din diverse clase. Setul de corecţii rezultat prezintă asemănări cu cel corespunzător sistemelor de 200 Kg, lucru ce se explică prin ponderea mai mare în calcul a sistemelor ZPR-16 şi 23 faţă de sistemele 29 şi 24.

In general se constată că mărirea numărului de date integrale corespunzătoare unei anumite clase de reactori conduce la apariţia în setul de corecţii a unor trăsături caracteristice clasei respective, dar acest lucru este influenţat şi de valorile coeficienţilor de sensibilitate, deoarece datele integrale cu coeficienţi mici de sensibilitate influenţează în mai mică măsură rezultatul final.

O altă particularitate a formalismului de calcul utilizat se desprinde din analiza rezultatelor prezentate în tabelele 5 şi 6. Tabelul 5 conţine un calcul în care s-au utilizat 19 date integrale (ZPR-III-2A,5, 9A, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 şi 36), iar tabelul 6 cuprinde rezultatele unui calcul cu 18 date integrale (s-a exclus sistemul ZPR - III - 36).

De data aceasta, între cele două seturi de date există o mare asemănare, ceea ce sugerează ideea că la un număr mai mare de date integrale, prezenţa sau absenţa unei date integrale nu are repercursiuni importante asupra rezultatului final.

In tabelul 7 sînt date rezultatele unui calcul cu 19 date integrale (aceleaşi date ca în cazul reprezentat în tabelul 5) modificîndu-se numai abaterea standard în secţiunea de fisiune în grupul trei de la $4 \cdot 10^{-2}$ la $7 \cdot 10^{-2}$. Această modificare a unei singure abateri standard dintr-un set de 30 şi într-o proporţie mică, justificată din punct de vedere fizic, conduce la o modificare a rezultatului final mult mai importantă decît în cazul eliminării din calcule a unei date integrale.

Un studiu întreprins de H.Mitani indică o dependenţă mai redusă a datelor nucleare calculate, funcţie de abaterile standard, decît cea obţinută în lucrarea de faţă. Totuşi, nivelul la care abaterile standard influenţează rezultatul final nu poate fi precizat cu exactitate deoarece depinde de mai mulţi factori (schema grupată utilizată, setul de date nucleare considerat, numărul de date integrale, felul lor, precizia cu care sînt măsurate, etc...).

După cum s-a arătat, obţinerea setului de date nucleare ameliorate implică cunoaşterea coeficienţilor de sensibilitate. Calculele de sensibilitate pot fi utilizate şi independent de calculele de ameliorare în datele nucleare. Astfel, ele pot servi ca ghid evaluatorului de date nucleare sau la precizarea incertitudinii ΔR într-un parametru de interes, datorată unei incertitudini într-o anumită dată nucleară. Fie $\{\sigma_i\}$ un set de secţiuni grupale şi R parametrul de interes, rezultat dintr-un calcul care utilizează setul de secţiuni $\{\sigma_i\}$. Notînd prin R abaterea standard a parametrului R, derivată din ansamblul valorilor posibile ale secţiunilor, se obţine:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = \sum_{i,j}\left\{\frac{\sigma_i}{R}\frac{\partial R}{\partial \sigma_i}\right\}\cdot\left\{\frac{\sigma_j}{R}\frac{\partial R}{\partial \sigma_j}\right\}\cdot\frac{\mathrm{cov}(\sigma_i,\sigma_j)}{\sigma_i\sigma_j} \qquad \text{(V.1)}$$

unde $\mathrm{cov}(\sigma_i,\sigma_j)$ reprezintă elementul matricii de covarianţă.

In relaţia (V.1) toate informaţiile legate de incertitudinile din secţiuni sînt conţinute în termenul $[\mathrm{cov}(\sigma_i,\sigma_j)]/\sigma_i\sigma_j$ în timp ce informaţiile referitoare la sensibilitate apar în produsul $\left\{\frac{\sigma_i}{R}\cdot\frac{\partial R}{\partial \sigma_i}\right\}\cdot\left\{\frac{\sigma_j}{R}\frac{\partial R}{\partial \sigma_j}\right\}$

Presupunînd coeficientul de corelaţie egal cu unitatea şi incertitudini constante în secţiuni, expresia (V.1) ia forma simplificată:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_i \left|\frac{\sigma_i}{R}\cdot\frac{\partial R}{\partial \sigma_i}\right| \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)_{MAX} \qquad \text{(V.2)}$$

Bazat pe acest formalism se arată că la un calcul al factorului de multiplicare efectiv cu o acurateţe de 0.3% sînt necesare abateri standard de 2% în secţiunea de fisiune a ^{235}U la 1 MeV, 5% la 1 KeV şi abateri de sub 2% în numărul mediu de neutroni emişi pe fisiune, în cazul reactorului ZPR - III- 48. In această lucrarea s-a optat pentru o cuplare a calculelor de sensibilitate cu codul ANISN deoarece acest cod este utilizat de majoritatea centrelor nucleare din lume, fiind testat pe o mare varietate de probleme. Codul ANISN utilizează un procedeu iterativ de obţinere a fluxului adjunct de forma:

$$\begin{aligned} A^+\Psi^+_{(0)} &= S \\ A^+\Psi^+_{(1)} &= F^+\Psi^+_{(0)} + S \\ &\cdots\cdots\cdots \\ A^+\Psi^+_{(n)} &= F^+\Psi^+_{(n-1)} + S \end{aligned} \qquad \text{(V.3)}$$

In care A^+ reprezintă suma operatorilor adjuncţi de absobţie şi scurgere iar F^+ adjunctul operatorului de fisiune. In final fluxul adjunct se obţine din:

$$\lim_{n \to \infty} \Psi^+_{(n)} = \Psi^+ \tag{V.4}$$

Codurile de sensibilitate bazate pe metoda Usachev, utilizează fluxuri adjuncte calculate printr-un procedeu iterativ de forma:

$$A^+ \Psi^+_{(0)} = S$$

$$A^+ \Psi^+_{(1)} = F^+ \Psi^+_{(0)}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$A^+ \Psi^+_{(n)} = F^+ \Psi^+_{(n-1)}$$

cu:

$$\lim_{n \to \infty} \Psi^+_n = 0 \quad ; \quad \Psi^+ = \sum_i \Psi^+_{(i)} \tag{V.5}$$

In concluzie, metoda de ameliorare a datelor nucleare conduce în final la elaborarea unui set de date nucleare care au calitatea de a micşora discrepanţa calcul - experienţă, lucru esenţial în proiectarea reactorilor rapizi.

R E F E R I N T E

1. Pavelescu M., Ilie P. şi Purica I., Metodă Matricială de Calcul a Masei Critice a unui Reactor Rapid - Studii şi Cercetări de Fizică, Tom 24, 8, (921-928), (1972)

2. Pavelescu M. şi Ilie P., ORSI FORTRAN ICL - 1905 IFA - FR - 27 (1970)

3. Pavelescu M.şi Ilie P., PAUL FORTRAN ICL - 1905 IFA - FR - 28 (1970)

4. Hemment P.C.E. and Pendlebury E.D., The Optimization of Neutron Cross Section Data Adjustments to Give Agreement with Experimental Critical Sizes, A.N.L. - 7320, p.88, Argonne National Laboratory (1966)

5. Toppel B.J. et al., MC^2 A Code to Calculate Multigroup Cross Sections, USAEC Report ANL-7318, Argonne National Laboratory, 1967

6. Linnik J.V., Méthode des Moindres Carrés, Paris - 1963

7. Pazy A., Rakavy G., Reiss I., Wagschal J.J. and Ya'ari Atara, Nuclear Science and Engineering, 55, 280-295 (1974)

8. Mitani H. and Kuroi H., J. Nucl.Sci.Technol., 7 (1), 56 (1970)

9. Dragt J.B., Statistical Consideration on Techniques for Adjustment of Differential Cross Sections with Measured Integral Parameters. 1970 (RCN - 122) p.85

10. Ventsel H., Théorie des Probabilités, Editions Mir 1973

11. Gandini A. and Salvatores M., Nuclear Data and Integral Measurements Correlation for Fast Reactors. Consistent Method RT/FI (74), 3, (1974)

12. Gandini A., J.Nucl. Energy, Pts. A/B, R1, 755 (1967)

13. Selengut D.S., Variational Analysis of Multi-Dimensional Systems, Hanford Quarterly Report, HW-59126, 89, Hanford Laboratories (1959)

14. Silver E.G., Oblow E.M., Kallfelz J.M., Weisbin C.R., Bartine D.E., Flanagan G.F. and Mynatt F.R., Generalized Reactor Sensitivity Analysis at ORNL, Trans.Am.Nucl.Soc., 18, 341 (1974)

15. Pomraning G.C., A Variational Principle for Linear Systems, J.Soc.Indust.Appl. Math., 13, 511 (1965)

16. Engle W.W., A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering, USAEC, Report K-1693, Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, 1967

17. Haggblom H., Adjustment of Neutron Cross Section Data by a Least Square Fit of Calculated Quantities to Experimental Results. AE-439 (1971)

18. Rowlands J.L. and MacDougall J.D., The Use of Integral Measurements to Adjust Cross Sections and predict Reactor Properties. Physics of Fast Reactor Operation and Design. Intern. Conf. at the Inst. of Civil Engineers, London 24-26 June, 1969.

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	8.468E-2	6.906E-2	9.651E-4	-5.04E-3	1.822E-5	1.092E-5
σ_c	-2.0E-3	1.45E-2	2.231E-2	1.022E-2	-2.33E-2	-7.5E-3
σ_f	1.781E-1	-4.71E-2	-3.57E-2	-6.03E-3	9.249E-2	8.21E-3
$\bar{\nu}$	5.389E-3	-5.85E-3	-8.72E-3	3.297E-3	3.297E-3	5.297E-4
$\sigma_{S.D.}$	-1.12E-1	1.336E-2	1.081E-3	-2.02E-4	3.839E-5	2.073E-6

Tabelul nr.1
Corecţiile absolute în datele nucleare
- ZPR - III - 24, 29, 31, 34, 35 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	-1.05E-2	4.425E-3	-1.40E-3	-1.75E-3	4.665E-5	1.5E-5
σ_{c}	5.658E-3	-6.99E-3	-6.73E-3	-2.89E-2	-1.06E-2	-5.78E-3
σ_{f}	-8.01E-2	7.697E-2	4.997E-2	-3.41E-2	-2.42E-2	-8.07E-3
$\bar{\nu}$	-2.75E-3	5.192E-3	1.895E-3	8.789E-4	1.837E-5	8.58E-5
$\sigma_{s.D.}$	-8.36E-2	7.567E-3	6.912E-4	3.595E-4	6.7E-5	5.9E-6

Tabelul nr.2
Corecţiile absolute în datele nucleare
- ZPR - III - 2A, 5, 9A, 10, 14, 17 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	1.192E-1	1.09E-1	-2.33E-3	-9.30E-3	2.496E-4	-1.76E-6
σ_{c}	2.71E-2	5.204E-2	4.558E-2	-6.196E-2	-6.08E-4	9-402E-3
σ_{f}	1.181E-1	6.262E-4	-1.94E-2	1.97E-2	2.92E-2	-2.08E-2
$\bar{\nu}$	1.215E-3	-1.37E-2	-1.02E-2	-3.89E-3	7.161E-4	-9.06E-4
$\sigma_{S.D.}$	-3.57E-1	3.702E-2	1.458E-3	3.442E-4	5.011E-4	-3.92E-7

Tabelul nr.3
Corecţiile absolute în datele nucleare
- ZPR - III - 11, 16, 23, 32, 33, 36 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	1.291E-1	1.23E-1	-3.75E-3	-1.46E-2	1.64E-4	2.226E-5
σ_c	3.436E-2	4.965E-2	4.228E-2	3.975E-2	-1.87E-2	-4.75E-3
σ_f	6.474E-2	2.495E-2	-2.14E-2	9.433E-3	7.018E-2	9.161E-3
$\bar{\nu}$	-2.73E-3	-1.22E-2	-9.78E-2	-3.0E-3	2.575E-3	4.274E-4
$\sigma_{S.D.}$	-3.32E-1	4.362E-2	5.56E-3	9.39E-5	2.24E-5	8.24E-7

Tabelul nr.4
Corecţiile absolute în datele nucleare
ZPR - III - 5, 16, 23, 24, 29, 30 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	1.857E-1	1.808E-1	-2.79E-3	-1.58E-2	5.549E-4	8.961E-5
σ_{c}	4.046E-2	5.29E-2	4.183E-2	-7.03E-2	-7.06E-2	-1.37E-2
σ_{f}	7.179E-2	2.017E-2	-5.30E-2	-1.65E-2	1.165E-1	-5.93E-2
$\bar{\nu}$	-8.48E-4	-1.35E-2	-1.42E-2	2.714E-3	6.371E-3	-7.05E-4
$\sigma_{S.D.}$	-7.45E-1	5.258E-2	5.391E-3	1.038E-3	2.284E-4	1.387E-5

Tabelul nr.5
Corecţiile absolute în datele nucleare
- ZPR - III - 2A, 5, 9A, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	1.861E-1	1.816E-1	-4.28E-3	-1.56E-2	5.255E-4	6.95E-5
σ_{c}	3.239E-2	4.549E-2	3.704E-2	-7.30E-2	-6.65E-2	-1.21E-2
σ_{f}	8.039E-2	3.56E-3	-5.29E-2	-5.75E-3	1.071E-1	-6.02E-2
$\bar{\nu}$	4.161E-4	-1.23E-2	-1.34E-2	3.159E-3	5.943E-3	-8.0E-4
$\sigma_{S.D.}$	-7.187E-1	5.243E-2	3.554E-3	9.198E-4	2.21E-4	1.345E-5

Tabelul nr.6

Corecţiile absolute în datele nucleare

- ZPR - III - 2A, 5, 9A, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 23. 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 -

DATA NUCLEARA	GRUP ENERGETIC					
	1	2	3	4	5	6
σ_{tr}	1.794E-1	1.728E-1	-2.68E-1	-1.55E-2	5.323E-4	8.015E-5
σ_c	4.103E-2	5.191E-2	3.961E-2	-6.23E-2	-6.35E-2	-1.20E-2
σ_f	6.285E-2	4.284E-2	-1.25E-1	1.784E-2	1.009E-1	-5.72E-2
$\bar{\nu}$	-1.158E-3	-1.22E-2	-1.214E-2	3.009E-3	5.649E-3	-7.37E-4
$\sigma_{S.D.}$	-7.41E-1	4.791E-2	4.547E-3	9.563E-4	2.251E-4	1.34E-5

Tabelul nr.7

Corecţiile absolute în datele nucleare

$\Delta\sigma_{f,3} = 7.10^{-2}$