

mr SLAVICA DEDOVIĆ, ing. PREDRAG RISTIĆ,  
"GOŠA"; RO INSTITUT  
BEOGRAD, Maleška 28 a

REFERAT

PROGRAM ZA PRORAČUN NESTACIONARNOG TEMPERATURSKOG  
POLJA U ZIDU SUDA NUKLEARNOG REAKTORA

COMPUTATIONAL SCHEME FOR TRANSIENT TEMPERATURE  
DISTRIBUTION IN PWR VESSEL WALL

SADRŽAJ - Program TEMPNES je sastavni deo rada na razvijanju kompjuterskih programa za strukturalnu analizu teških sudova pod pritiskom u okviru razvojnog programa Instituta GOŠA. Temperatursko polje se analizira fizičkom diskretizacijom strukture na konačne elemente, nelinearnom formulacijom jednačine konačnog elementa u matičnom obliku i integracionom šemom koju je razvio Wilson (step-by-step procedura). Konvekcijski granični uslov i uticaj apsorpcije radioaktivnog zračenja uzeti u obzir. Nestacionarno polje temperatura u zidu reaktorskog suda se posmatra za slučaj kada opada temperatura vode za hladjenje posle kvara na pumpi. U radu se reaktorski sud posmatra kao aksisimetrično telo, cilindrična posuda sa zavarenim poklopcem i dancetom. Program ima dve mogućnosti za izbor vremenskih inkremenata integracione šeme: a) fiksirani, unapred odredjen vremenski inkrement za ceo interval u kome posmatramo nestacionarnu pojavu i b) automatski izbor dužine vremenskog inkrementa za svaki korak u funkciji brzine promene temperature u čvorovima.

ABSTRACT - Computer code TEMPNES is a part of joint efforts being made in GOŠA industries in achieving the techniques for structural analysis of heavy pressure vessels. Transient heat conduction problems analysis is based on finite element discretization of structures non-linear transient matrix formulation and time integration scheme as developed by Wilson (step-by-step procedure). Convection boundary conditions and the effect of heat generation due to radioactive radiation are both considered. The computation of transient temperature distributions in reactor vessel wall when the water temperature suddenly drops as a consequence of reactor cooling pump failure is presented. The vessel is treated as an axisymmetric body of revolution. The program has two finite time element options: a) fixed predetermined increment and b) an automatically optimized time increment for each step, dependant on the rate of change of the nodal temperatures.

1. UVOD

Osvajanje savremenih proizvodnih tehnoloških postupaka proizvodnje TSPP (procesna, termooprema i oprema za nuklearne elektrane) je sastavni deo razvojnog programa GOŠA. Proizvodjač je dužan da uz ovu opremu podnese brojnu pra-

teću dokumentaciju a analiza naprezanja sudova u radnim i udesnim stanjima jedan je od osnovnih dokumenata. Rezultati ovih analiza koriste se i u procesu projektovanja. Zbog komplikovanosti geometrije i različitog porekla naprezanja do naponsko-deformacijske slike ne može da se dodje konvencionalnim putem. Odlučili smo se za poznat i široko prihvaćen opšti postupak za naponsku analizu složenih komponenti, tj. metodu konačnih elemenata kao numerički postupak za rešavanje. Da bi se skratilo ukupno vreme pripreme i obim potrebnih ulaznih podataka, kod analize termičkih napona koristi se isti model diskretizacije strukture konačnim elementima i za analizu prolaza toplote i analizu napona. Iz ovog razloga MKE koristimo i za proračun nestacionarnih temperaturskih polja. Ovo predstavlja prvu fazu izrade opšteg kompjuterskog programa za kompletan proračun temperature, napona i deformacija kompleksnih struktura u "jednom prolazu".

Analiza napona reaktorskog suda za vrelovodni reaktor (PWR) u stacionarnim i nestacionarnim radnim stanjima (puštanje u rad, zaustavljanje ili promena snage) ili udesnim stanjima (gubitak hladioca, gubitak opterećenja i ostale) počinje analizom prolaza toplote. Pri izradi programa za proračun nestacionarnih temperaturskih polja korišćen je program TEMPEL - za proračun stacionarnih temperaturskih polja /8/, i integracioni postupak poznat kao step-by-step procedura i interpolaciona formula centralnih razlika. Stabilnost i tačnost integracionog step-by-step postupka za izbor dužine vremenskog inkrementa.

U ovom radu je ostavljen prostor za uključivanje graničnih uslova i karakteristika materijala kao proizvodnih funkcija vremena, prostora i temperature što omogućuje tretiranje nelinearnog prenosa toplote. Sud je posmatran kao aksisimetrično telo bez otvora i nesimetričnih diskontinuiteta. Ovaj će program da posluži kao osnova za dalji rad. Biće uvedene alternativne interpolacione formule Houbolt-a, Newmark-a i Wilson-a. Tako ćemo izbeći izbor kritičnog vremenskog inkrementa i uključiti postupak za njegov optimalan izbor. Biće uvedene i metode rešavanja trodimenzionih problema koje ćemo koristiti samo za lokalne proračune krupnih diskontinuiteta koji bitno utiču na naponsko-deformacijsku sliku jer su za ove analize veoma skupi kompjuterski programi i računsko vreme. Problem je u fazi testiranja u Ljubljani. Planira se i ispitivanje primenom postupka za verifikaciju /9/ i upoređivanjem sa prihvaćenim rezultatima /4/.

---

## 2. Termički šok u zidu reaktorskog suda

Programom TEMNES izvršeni su proračuni nestacionarnih temperaturnih polja u zidu reaktorskog suda za slučaj kada opada temperatura za hladjenje posle kvara na pumpi. U planu je testiranje programa postupkom za verifikaciju /9/ i upoređivanjem rezultata dobijenih TEMPNES-om i rezultata Eberwein-a /4/ koji je analitički rešio ovaj problem.

## 3. Diskretizacija reaktorskog suda

Idealizovan kao aksisimetrična cilindrična posuda sa zavarenim poklopcem i dancetom reaktorski sud je izdelfen na izoparametarske konačne elemente, trougaone toruse sa čvorovima u temenima. Temperature u elementu su iskazane linearnom funkcijom oblika (prostorne aproksimacije  $b(x,y)$ ,  $a(x,y)$ ) i temperatura u čvorovima ( $T(t)$ ):

$$T(x,y,t) = b(x,y) T(t) \quad (1)$$

$$\dot{T}(x,y,t) = a(x,y) T(t) \quad (2)$$

## 4. Formiranje sistema jednačina nestacionarnog prolaza toplote

Opšta jednačina nestacionarnog prolaza toplote za konačan element može da se dobije na više načina /1/, /6/. Mi smo koristili variacioni postupak /1/.

Za formiranje matrica sistema tj. sakupljanje jednačina konačnih elemenata za celu strukturu postoji više metoda. Sve one imaju za cilj optimiziranje širine pojasa (band width). U programu TEMPNES širina pojasa je unapred određena /8/, /13/.

Matrica sistema gde su  $T$  nepoznate temperature u čvorovima je:

$$C(T,t) \dot{T} + K(T,t) T = Q(t) \quad (3)$$

gde  $C$ ,  $K$  su matrice kapacitivnosti i konduktivnosti sistema respektivno i  $Q(t)$  ulazni toplotni fluks u čvorovima. One su:

$$C = \sum_{m=1}^M C_m; \quad K = \sum_{m=1}^M K_m; \quad Q = \sum_{m=1}^M Q_m \quad (4)$$

gde je  $M$  ukupan broj elemenata,  $C_m$ ,  $K_m$ ,  $Q_m$  su matrice kapacitivnosti, konduktivnosti i vektor toplotnog opterećenja elementa  $m$ . One su:

$$K_m = \int_V \lambda_m^T a_m dV_m; \quad C_m = \int_V c_m^T b_m dV_m$$

$$Q_m = \int_V q_m(v,t) dV_m + \int_S q_{in}^T(s,t) b_m(s) dS_m \quad (5)$$

gde su  $c_m$ ,  $\lambda_m$  specifična toplota i koeficijent konduktivnosti elementa  $m$ ,

$q_m(v,t)$  generacija toplote u elementu i  $q_m(s,t)$  je prenos toplote na graničnu površinu elementa m. Ako je površina elementa m izolovana  $q_m(s,t) = 0$ .

### 5. Granični uslovi

#### 5.1. Temperaturski granični uslovi

U čvorovima na graničnim površinama može da se propisuje temperatura, ista u svim ili sa određenim prostornim i vremenskim rasporedom.

Za propisivanje temperatura može da se koristi postupak po Wilsonu /1/ ili /2/. Mi smo koristili postupak /2/ koji je efikasniji. Da bi propisali temperaturu u čvoru i,  $T_i$ , dijagonalan element  $k_{ii}$  matrice konduktivnosti K zamenjujemo sa  $k_c = k_{ii}$  ( $k_c$  je proizvoljna veličina) i propišemo ulazni toplotni fluks u čvoru i,  $Q_i = k_c T_i$ . Tako rešavajući kasnije sistem jednačina (3) u čvoru i imamo unapred propisanu temperaturu  $T_i$ .

Radi pojednostavljenja u radu je na unutrašnjoj površini suda za sve čvorove propisana ista temperatura za određeni vremenski inkrement. U realnom sudu ova raspodela je drugačija.

#### 5.2. Konvekcijski granični uslov

Fluid u kretanju dodiruje zid pri čemu dolazi do razmene toplote izmedju njih; toplotni fluks izmedju njih kroz graničan sloj je:

$$q = h (T_e(t) - T(t))$$

gde je h koeficijent prelaza toplote i funkcija je  $T_e(t)$ ,  $T(t)$  i v; T je temperatura na površini zida,  $T_e$  temperatura fluida i v brzina fluida. U radu je ovaj efekat uveden po Wilsonu /1/; uveo ga je F.Kramer /5/ za slučaj odvodjenja toplote prirodnom konvekcijom sa spoljne površine zida suda.

#### 5.3. Radijacioni granični uslovi

U ovom radu je zanemaren uticaj unutrašnje generacije toplote u zidu suda usled apsorpcije radioaktivnog zračenja. U programu TEMPNES ostavljen je prostor za njegovo uključivanje.

### 6. Početni uslovi

Temperatursko polje na početku vremenskog intervala u kome se posmatra prolaz toplote predstavlja početni uslov. U radu je ovo polje određeno tako što je, za  $t = 0$ , u jednačini (3) matrica kapacitivnosti

$$C(T,0) = N$$

gde je N - nula matrica.

Rešavanjem jednačine

$$K(T, 0) T = Q(0) \quad (6)$$

odredjene su temperature u svim čvorovima kao da je pojava stacionarna. Ove temperature predstavljaju početni uslov za proračun za  $t=0$ .

#### 7. Izbor vremenskog inkrementa za step-by-step proceduru rešavanja

Na početku programa korisnik bira između dve opcije u pogledu izbora koraka i to:

7.1. vremenski inkrement je konstantan za ceo interval u kome posmatramo pojavu i unapred je odredjen na osnovu neke procene

7.2. automatski izbor vremenskog inkrementa

Podprogramom STEPOP automatski se optimizira dužina vremenskog koraka za step-by-step postupak. Ova optimizacija vrši se za svaki korak i to na sledeći način. Računajući od trenutka  $t$ , i počevši od koraka  $h$  računa se  $T(t+h)$  kao i  $T(t + 2 \frac{h}{2})$  pa se ove dve temperature upoređuju. Ako je razlika manja od neke dozvoljene vrednosti znači da je  $h$  dobar korak te se dalje napreduje ( $t' = t+h$ ) sa novim duplo većim korakom  $2h$  tj. upoređuju se nove  $T(t'+2h)$  i  $T(t'+2 \frac{2h}{2})$  itd. Ako razlika ne zadovolji znači da je potrebno plovljenje koraka te se ponavlja provera ali za duplo manji početni korak, tj. traži se razlika  $T(t+h/2)$  i  $T(t+2h/4)$ . Podprogram ima mogućnost da 10 puta prepolovi ili duplira osnovni korak tj. može da smanji ili poveća isti za 3 reda veličine ( $2^{10} \approx 1000$ ).

#### 8. Step-by-step procedura rešavanja

U ovom radu smo koristili integracioni metod centralne razlike /3/ koji, za analizu nestacionarnog temperaturnog polja, pretpostavlja linearnu promenu temperature u  $i$ -tom vremenskom intervalu; matrice konduktivnosti, kapacitivnosti ( $K, C$ ) i granični uslovi se menjaju sa temperaturom i vremenom. Zato se efektivna matrica krutosti sistema ( $\hat{K}$ ) i efektivni vektor opterećenja ( $\hat{Q}$ ) računaju nekoliko puta za jedan vremenski inkrement. Jednačina koju proračunavamo pretpostavlja termičku ravnotežu u vremenskom inkrementu  $t$ :

$$\hat{K}_i^{(j)} T_{si}^{(j)} = \hat{Q}_i^{(j)} \quad (7)$$

gde je  $T_{si}$  srednja temperatura u  $i$ -tom intervalu tj.  $T_{si} = \frac{T(t_i) + T(t_{i-1})}{2}$

a  $T(t_i)$  je temperatura na kraju  $i$ -tog vremenskog intervala tj. u vremenu  $t_i = i\Delta t$ .

Jednačina (7) se rešava iterativnim (Gauss Seidel-ovim) postupkom za svaki

vremenski interval. Iz dobijenih temperatura (usrednjeni za svaki element) određujemo veličinu koeficijenta konduktivnosti ( $\lambda$ ) i specifične toplote ( $c$ ) (proizvoljne funkcije temperature) koje koristimo za popravku matrica  $K$  i  $C$  te se vraćamo na jednačinu (4). Ovaj postupak se ponavlja sve dok dobijene vrednosti  $\lambda$  i  $c_p$  ne konvergiraju (a najviše  $j = IIMAX$  puta) kada poslednje proračunate temperature usvajamo za  $T_{si}$ .

Šematski prikaz ovog postupka izgleda, po koracima, ovako:

Korak 1 generisanje početnih uslova tj. proračun temperatura  $T(0)$

Korak 2 formiranje matrica

$$K_i^{(j)} = K_i^{(j)} + \frac{2}{\Delta t} C_i^{(j)}$$

$$Q_i^{(j)} = Q_i^{(j)} + \frac{2}{\Delta t} C_i^{(j)} T(t_{i-1})$$

Korak 3 uključivanje graničnih uslova (kao u poglavlju 4)

Korak 4 rešavanje sistema linearnih jednačina (4) postupkom Gauss Seidel-a

Korak 5 na osnovu  $T_{si}^{(j)}$  određujemo:

$$\lambda^{(j+1)} = f(T_{si}^{(j)})$$

$$c_p^{(j+1)} = f(T_{si}^{(j)})$$

te poredimo vrednosti za  $(j)$  i  $(j+1)$ . U slučaju da konstante nisu konvergirale proračun se ponavlja od koraka 2 a ako jesu,

korak 6 izračunavanje:

$$T(t_i) = 2T_{si} - T(t_{i-1})$$

Korak 7 izbor koraka  $\Delta t$  (automatska korektura ili fiksna vrednost) te nastavak, za sledeći inkrement od koraka 2.

#### 9. Ulaz i izlaz podataka

U cilju ubrzanja i pojednostavljenja procesa unošenja podataka kao i njihove provere za program TEMPNES su razvijeni podprogrami MESH, NODAL i CRTA koji automatski generišu mrežu konačnih elemenata i obezbeđuju njen crtež na plotteru. Ulazni podaci - opterećenja, također se generišu automatski (podprogramom BOUND) a rezultati (temperature) dobijaju se tabelarno i na nekoliko različitih grafika.

#### 10. Program TEMPNES

Program TEMPNES je kompjuterski program za analizu nestacionarnih tempe-

ratorskih polja u zidu reaktorskog suda, metodom konačnih elemenata i step-by-step procedurom. Program je modularno organizovan i sastoji se iz više podprograma: MESH, NODAL, BOUND, SOLVE, COND i CRTA (iz TEMPEL-a /13/), FORMKH koji formira efektivne matrice krutosti i toplotnog opterećenja ( $\hat{K}_1, \hat{Q}_1$ ) i inicira početne temperature za podprogram za rešavanje GS metodom, SPHEAT koji računa specifičnu toplotu u funkciji temperature, GRAFIKA koja generiše, na crtaču, grafički prikaz promene temperatura u kontrolnim čvorovima i STEPOP za automatski izbor dužine vremenskog inkrementa.

#### REZULTATI

Proračuni i crtanje se izvode u Institutu "Jožef Štefan" u Ljubljani, na terminalu računara Republičkog Računskog Centra, CYBER 72. Rezultati će biti posebno prezentirani.

#### Zaključci i dalji rad

Rad je deo opsežnih ispitivanja na analizi naprežanja teških sudova pod pritiskom u radnim i udesnim stanjima. Prednosti odabrane metode konačnih elemenata u odnosu na ostale numeričke metode su: mogućnost uvodjenja promenljivih termičkih osobina i graničnih uslova u funkciji geometrije i temperature i potpuna kompatibilnost ovog postupka sa metodom (konačnih elemenata) za analizu termičkih napona tj. oba problema mogu da se reše u "jednom prolazu". Step-by-step procedura rešavanja se pokazala efikasnom. Stabilnost i efikasnost proračuna zavisi od izbora vremenskog inkrementa. Program je u fazi ispitivanja. Rezultati će biti posebno prezentirani.

Dalji rad će se odvijati u formiranju novih integracionih postupaka uključivanjem interpolacionih formula Houbolta, Newmarka i Wilsona /3/ u TEMPENES. Tako ćemo formirati postupak izbora optimalnog konstantnog vremenskog inkrementa i dobiti stabilna i efikasna rešenja. Planiraju se: testiranje programa postupkom za verifikaciju /9/ i poredjenjem sa podacima Eberweina /4/, razvijanje novih ulazno-izlaznog podprograma za prikazivanje rezultata, dalje razvijanje podprograma koji generišu granične uslove i unapredjenje podprograma za rešavanje sistema linearnih jednačina tj. zamena interaktivnog nekim drugim postupkom kombinovano sa podprogramom za automatsko optimiziranje širine pojasa.

L I T E R A T U R A

- (1) Wilson, E.L. Nickell, R.E., "Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis", Nuclear Engineering and Design, vol.4, pp 276-286, 1966.
  - (2) Wilson, E.L. Bathe, K.J., Peterson, F.E., "Finite Element Analysis of Linear and Nonlinear Heat Transfer", Proc. 2th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, paper L1/4, Berlin, September, 1973.
  - (3) Bathe, K.J., Wilson, E.L., Numerical Methods in Finite Element Analysis, New Jersey, Prentice-Hall, 1976.
  - (4) Eberwein, J., "Transient Temperature Distribution in Reactor Vessel Wall by Failure of a Reactor Cooling Pump", Nuclear Engineering and Design, Vol. 16, pp 137-150, 1971.
  - (5) F. Kramer, Robni pogoji tretje vrste na površini posode jedrskega reaktorja NE Krško, diplomatska naloga, VTS Maribor, 1978.
  - (6) Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method Mc Graw Hill Book Company, 1977.
  - (7) Alujevič, A., Prenos toplote II VTS Maribor, 1975.
  - (8) Eysink, B., Alujevič, A., TEMPEL - program za analizu stacionarnog temperaturnog polja u ravanskim i aksisimetričnim slučajevima.
  - (9) American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel and Piping /1972 Programs Verification, ASME United Engineering Center, New York, 1972.
  - (10) Sandsmark, N., Medonos, S., Aamodt, B., "Efficient Formulation of the Finite Element Method for Heat Conduction in Solids", Proc. 4th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper B2/9, San Francisco, August, 1977.
  - (11) Leimbach, K.R., Engelke, V.H., "Effectiveness of Simple Computational Schemes for Transient Temperature Distributions in Structural Components", Proc. 5th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper 33/7, San Francisco, August, 1979.
  - (12) Desai C.S., Abel, J.F., Introduction to the Finite Element Method a Numerical Method for Engineering Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
  - (13) Ristić, P., Petelin, S., "Uporedjenje rezultata programa temperaturnog polja u reaktorskom sudu (PWR), grubom i finom mrežom konačnih elemenata", Drugi jugoslavanski simpozij o metodi konačnih elementov in računalniškem projektiranju, oktobar, 1979.
-