

Željko Bogdan i Naim Afgan  
 Fakultet strojarstva i brodogradnje  
 Zagreb, Dj. Salaja 5

TRODIMENZIONALNO MODELIRANJE NUKLEARNOG  
 GENERATORA PARE

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF NUCLEAR  
 STEAM GENERATOR

SADRŽAJ - U radu je prikazan matematički model kojim se simulira stacionarno, termodinamičko i hidrauličko ponašanje U-cijevnog generatora pare za nuklearne elektrane. Model daje trodimenzionalnu raspodjelu temperatura, tlakova, sadržaja pare i brzina u sekundarnom krugu generatora pare. Dvofazno područje modelirano je upotrebom homogenog modela strujanja. ---

Za implementaciju matematičkog modela na računalu izgrađen je program NUGEN. Proračuni su izvedeni uz pretpostavljene rubne uvjete i geometrijske karakteristike koje se baziraju na modelu D-4 (Westinghouse) U-cijevnog generatora pare kakav je ugrađen u NE Krško, pri radu sa 100%-tnim opterećenjem. Rezultati proračuna prikazani su u obliku dijagrama koji daju prostornu raspodjelu varijabli od interesa u sekundarnom krugu.

ABSTRACT - In this paper mathematical model for steady-state simulation of thermodynamic and hydraulic behavior of U-tube nuclear steam generator is described. The model predicts three-dimensional distribution of temperatures, pressures, steam qualities and velocities in the steam generator secondary loop. In this analysis homogenous two phase flow model is utilized.

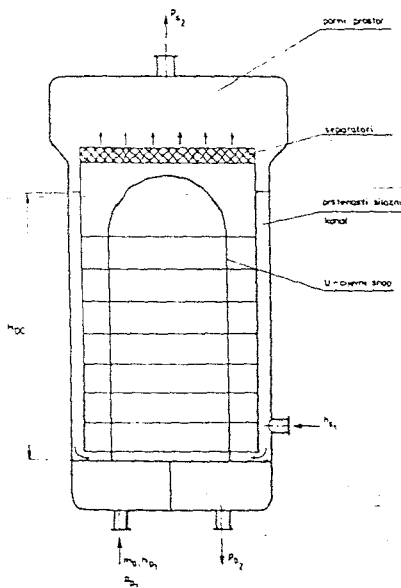
For purpose of the computer implementation of the mathematical model, a special flow distribution code NUGEN was developed.

Calculations are performed with the input data and geometrical characteristics related to the D-4 (Westinghouse) model of U-tube nuclear steam generator built in NPP Krško, operating under 100% load conditions. Results are shown by means of diagrams giving spatial distribution of pertinent variables in the secondary loop.

1. UVOD

Generator pare predstavlja jedan od vitalnih dijelova nuklearnih energetskih postrojenja koja koriste reaktorski sistem s vodom pod visokim tlakom. U njemu se odvija prijelaz topline od primarnog, jednofaznog na sekundarni, dvo-

fazni radni medij. Budući da gradijenti strujnog i temperaturnog polja premašuju za red veličine one koji se susreću kod konvencionalnih energetskih postrojenja, dosadašnja znanja i iskustva stečena pri konstruiranju i korištenju konvencionalne opreme pokazala su se nedovoljnim za uspješnu primjenu na nuklearnim generatorima pare. Izradom programa za simulaciju generatora pare na digitalnom računalu i njegovom primjenom na različitim pogonskim situacijama, znatno bi se unaprijedio uvid u termodinamičko i hidrauličko ponašanje nuklearnih generatora pare. Ovo je naročito značajno sa stajališta sigurnosti generatora pare, jer bi ono omogućilo lokalizaciju kritičnih mjesta za pojavu termičkih napreznja, korozije ili vibracija, odnosno mrtvih kuteva pogodnih za odlaganje materijala. Shematski prikaz modeliranog generatora pare dan je na Sl. 1., odakle se vidi da je to U-cijevni tip poput onog ugrađenog u NE Krško.



Sl. 1. Shematski prikaz generatora pare

stanja radnog medija u stacionarnim uvjetima rada i program URSULA 2 [4] kojim se može simulirati stacionarno i nestacionarno, termo-hidrauličko ponašanje generatora pare.

Primijenjeni numerički postupak rješavanja osniva se na metodi konačnih diferencija. Za rješavanje dobivenog sistema algebarskih jednažbi koristi se

Modeliranju nuklearnih generatora pare prišlo se zadnjih desetak godina, u vrijeme kada se za to ukazala jasna potreba i kada su komercijalno raspoloživa digitalna računala mogla osigurati zahtjeve za velikim memorijskim prostorom i brzinom. Efikasnost tih modela bitno je ovisila o primijenjenom numeričkom postupku za rješavanje sistema diferencijalnih jednažbi.

Ovaj rad se, zbog svog trodimenzionalnog pristupa, priklonio onoj grupi modela koja se bazira na numeričkom rješavaču opisanom u [1] i [2]. U toj grupi poznati su programi CALPSOS [3] koji daje proračun

poseban iterativni postupak s implicitnom shemom.

## 2. MATEMATIČKI MODEL

Za svrhu matematičkog modeliranja generator pare je podijeljen na četiri različita volumena: primarni s unutrašnje strane cijevi, sekundarni, između cijevi i plašta, volumen cijevnih stijenki i parni prostor. Najsloženiji dio sa stajališta modeliranja jeste sekundarni krug. Trodimenzionalne jednadžbe očuvanja mase, količine gibanja i energije dane su slijedećim izrazima.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial R} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho u^2) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (\rho R v u) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial R} - f_{\Theta} - \rho \frac{wv}{R} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho u v) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (\rho R v^2) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho w v) = -\frac{\partial p}{\partial R} - f_R + \rho \frac{wv}{R} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho w) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho u w) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (\rho R v w) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho w^2) = -\frac{\partial p}{\partial Z} - f_Z + \rho g \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h - p) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho u h) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (\rho R v h) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho w h) = q_s \quad (5)$$

Članovi poput  $f_{\Theta}$ ,  $f_R$  i  $f_Z$  odnose se na sile trenja, a  $q_s$  predstavlja toplinski tok od stijenke na sekundarni medij. Njihove vrijednosti dane su empirijskim korelacijama.

Jednodimenzionalna energetska jednadžba primarnog kruga ima oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h - p) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho u h) = -q_p \quad (6)$$

Akumulacija topline u stijenci dana je jednadžbom (7)

$$\rho_{st} c_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = -q_p - q_s \quad (7)$$

Jednadžbe parnog prostora

$$\frac{d}{dt} (V_{PD} \rho_{PD}) = m_P - \frac{m_s Z}{x} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} (V_{PD} \rho_{PD} h_{PD}) = m_P h'' - \frac{m_s Z}{x} h_{PD} \quad (9)$$

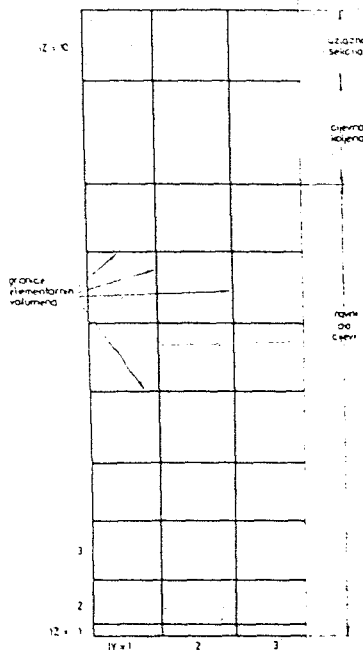
U gornjim jednadžbama uočljivi su i vremenski članovi iako smo se u ovom radu ograničili na proračun stacionarnog stanja. Model je naime zamišljen tako da može reproducirati i tranzijente, a stacionarni se proračun dobiva odabirom dovoljno velikog  $\Delta t$  koji će iznulirati vremenske članove.

Rubni uvjeti u primarnom i sekundarnom krugu su maseni protok, izlazni

tlak i ulazna entalpija.

### 3. NUMERIČKI POSTUPAK

U svrhu dobivanja jednadžbi konačnih diferencija, na sekundarni je krug primijenjena trodimenzionalna mreža prilagodjena cilindričnoj geometriji generatora pare. To je tzv. glavna mreža, prikazana na slikama 2. i 3., pomoću koje se računaju varijable poput  $p$ ,  $h$ ,  $x$ ,  $\rho$  itd.



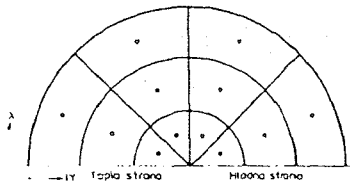
Sl.2 Aksijalni presjek glavne mreže

je maseni tok ulazan, granična vrijednost je jednaka vrijednosti u čvoru susjednog elementa iz kojeg dolazi.

Sve jednadžbe konačnih diferencija, indeksirane prema Sl.4., mogu se simbolički napisati u obliku

$$\phi_P = \frac{a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_H \phi_H + a_L \phi_L + a_P \phi_P + S_u}{a_N + a_S + a_E + a_W + a_H + a_L + a_P + S_p} \quad (10)$$

gdje " $\phi$ " predstavlja bilo koju od računatih varijabli, "a" su koeficijenti koji su konstantni unutar jedne iteracije, " $a_p$ " je vremenski član iz prošlog vremenskog koraka, a  $S_u$  i  $S_p$  su izvorni članovi. Za izvode koeficijenata vidi [2].



Sl.3. Poprečni presjek glavne mreže

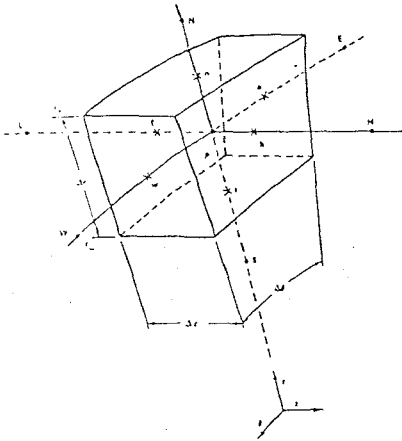
Za dobivanje komponenti brzine u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom smjeru koriste se pomoćne mreže koje su pomaknute u odnosu na glavnu mrežu za pola prostornog koraka, tako da komponente brzine padaju na granične plohe glavne mreže. Vrijednosti transportiranih veličina na graničnim ploham elementarnog volumena određuju se prema masenim tokovima kroz te plohe. Ukoliko je maseni tok izlazni iz elementa, vrijednost na granici je jednaka onoj u centralnom čvoru. Ukoliko

je maseni tok ulazan, granična vrijednost je jednaka vrijednosti u čvoru susjednog elementa iz kojeg dolazi.

Sve jednadžbe konačnih diferencija, indeksirane prema Sl.4., mogu se simbolički napisati u obliku

$$\phi_P = \frac{a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_H \phi_H + a_L \phi_L + a_P \phi_P + S_u}{a_N + a_S + a_E + a_W + a_H + a_L + a_P + S_p} \quad (10)$$

gdje " $\phi$ " predstavlja bilo koju od računatih varijabli, "a" su koeficijenti koji su konstantni unutar jedne iteracije, " $a_p$ " je vremenski član iz prošlog vremenskog koraka, a  $S_u$  i  $S_p$  su izvorni članovi. Za izvode koeficijenata vidi [2].

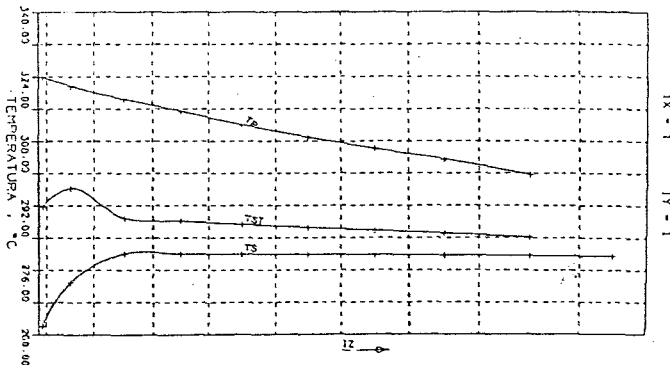


Sl. 4. Elementarni volumen

## 4. REZULTATI

Matematički model nuklearnog generatora pare i numerički postupak za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi realizirani su u vidu programa NUGEN.

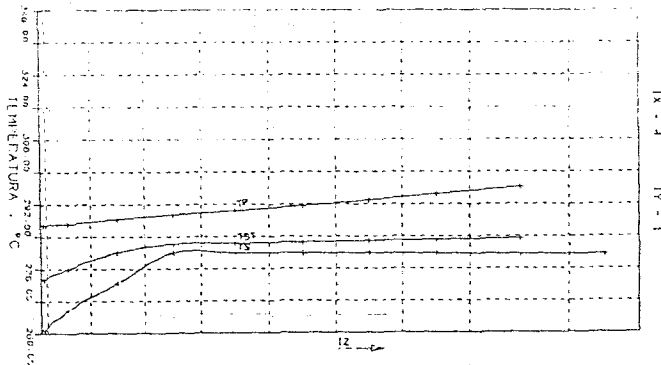
Proračun stacionarnog stanja izvršen je za rubne uvjete koji odgovaraju 100%-tnom opterećenju generatora pare u NE Krško. U tu svrhu je upotrebljena mreža  $4 \times 3 \times 10 = 120$  elementarnih volumena. Implementacija programa je izvršena na računaru IBM 4341. Uz upotrebu dvostruke preciznosti za proračun stacionarnog stanja potrošeno je oko 3 minute CPU vremena.



Sl. 5. Temperaturni profil tople strane

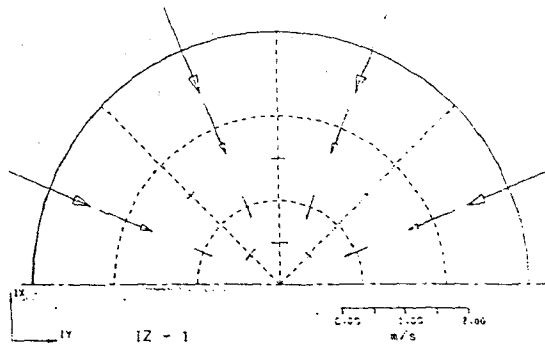
Iteracijski postupak rješavanja obradjuje horizontalne slojeve od najdonjeg prema najgornjem. Rubni uvjeti za jedan sloj jesu maseni utok na donjoj granici i tlakovi iz gornjeg sloja. Kada se zadovolje uvjeti konvergencije u jednom sloju, prelazi se na gornji sve do vrha i postupak se ponavlja od prvog sloja dok se ne postigne zadovoljavajuće rješenje.

Na Sl.5. prikazani su temperaturni profili primara, stijenke i sekundara uzduž jednog cijevnog snopa. U prvom sloju dolazi do utoka pothladjene vode iz silaznog kanala zbog čega je temperatura stijenke relativno niža. U gornjem sloju zbog intenzivnijeg prijenosa topline od strane primara temperatura stijenke raste. Ulaskom sekundara u zasićeno područje intenzivira se odvodjenje topline i temperatura stijenke prati temperaturu zasićenja. U IZ = 9 nalazi se U-cijevni dio tako da temperature primara i stijenke sežu samo do ovog nivoa. Sl.6. predstavlja hladnu stranu gdje dolazi do protusmjernje izmjene topline.

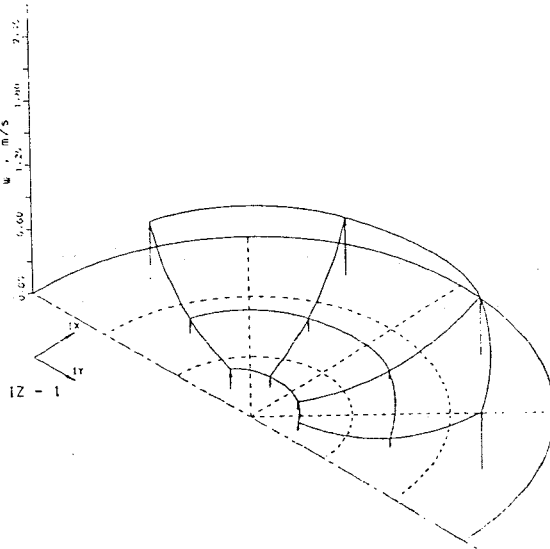


Sl.6. Temperaturni profil hladne strane

Na slikama 7. i 8. prikazane su komponente brzine u prvom sloju, gdje na vanjskoj granici postoji utok zbog napajanja i recirkulacije.

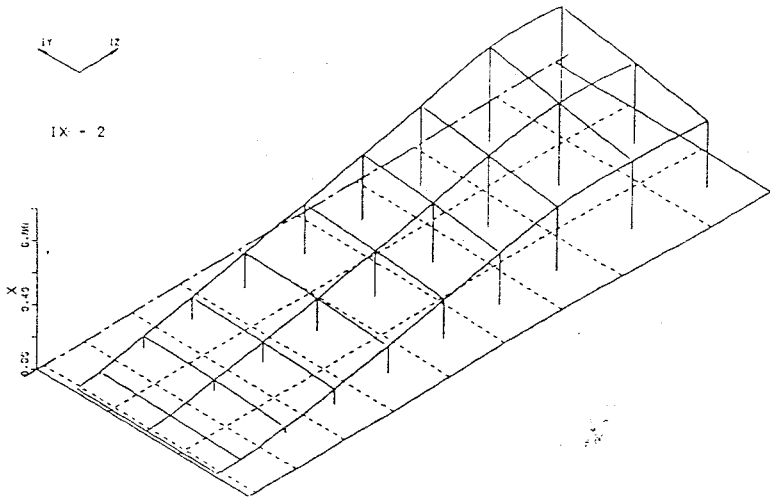


Sl.7. Radijalne i tangencijalne brzine



Sl. 8. Aksijalne brzine

Na Sl. 9. prikazan je aksijalni profil masenog sadržaja pare za ravninu koja prolazi kroz čvor  $1x = 2$ .



Sl. 9. Aksijalni profil masenog sadržaja pare

## 5. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u ovom radu pokazuju da su način matematičkog modeliranja i primijenjena numerička metoda rješavanja primjereni zadatku koji obraduju. Upotrebljeni iterativni postupak za rješavanje trodimenzionalnog sistema jednačbi pokazuje dobru konvergenciju k ravnotežnom stanju za stacionarni slučaj pogona. No još uvijek ostaje prostora za njegovo dotjerivanje kako bi se smanjilo potrebno vrijeme kada se predje na nestacionarnu simulaciju.

Oznake		Indeksi	
A	- površina presjeka	DC	- silazni kanal
c	- specifična toplina	P	- para
h	- entalpija	PD	- parni prostor
m	- maseni tok	p	- primar
p	- tlak	s	- sekundar
R, $\theta$ , Z	- cilindrične koordinate	st	- stijenka
T	- temperatura	V	- voda
t	- vrijeme	1	- ulaz
u, v, w	- komponente brzine	2	- izlaz
x	- maseni sadržaj pare		
$\xi$	- gustoća		

## LITERATURA

- [1] S.V.Patankar, "A Calculation Procedure for Twodimensional Elliptic Situations", Numerical Heat Transfer, vol. 4, pp. 409-425, 1981,
- [2] S.V.Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mc Graw-Hill Book Company, 1980,
- [3] R.W.Fanselan at al. "CALIPSOS Code Report", EPRI NP-1391, vol. 1, April 1980,
- [4] A.K.Singhal, D.B.Spalding, "The URSULA 2 Computer program", EPRI NP-1315, vol. 1, January 1980,
- [5] Ž.Bogdan, N.Afgan, "Modeliranje generatora pare za nuklearne elektrane" FSB, Zagreb, siječanj 1985.