

- Stojan Petelin, Miroslav Gregorič
 Institut "Jožef Stefan"
 Jamova 39,
 61000 Ljubljana

TERMOHIDRODINAMIČNA ANALIZA UPARJALNIKA
 JEDRSKE ELEKTRARNE

TERMOHYDRODINAMICAL ANALYSES OF STEAM GENERATOR
 OF NUCLEAR POWER PLANT

VSEBINA- Razvili smo SMUP, računalniški program za statični model U-cevnega uparjalnika jedrske elektrarne, pri čemer napajalna voda lahko vstopa preko glavne in pomožne napajalne cevi. Sloni na enodimenzionalnem matematičnem modelu. Rezultati dajejo direkten vpogled v fizikalni proces, ki se odvija vzdolž cevi uparjalnika. Posreduje izračune porazdelitev temperatur, kvalitete vode, toplotne prestopnosti, toplotne tokove in drugo. Na osnovi parametrične analize dobljenih rezultatov je mogoče sklepati na ugodnost posameznih rešitev glede toplotnega učinka in varnosti uparjalnika.

ABSTRACT- SMUP, computer code for stationary model of a U-tube steam generator of a PWR nuclear power plant was developed. Feed water flow can enter through main and auxiliary path. The computer code is based on one dimensional mathematical model. Among the results that give an insight into physical processes along the tubes of steam generator are distributions of temperatures, water qualities, heat transfer coefficients, heat transfer rates. Parametric analysis permits conclusions on advantage of each design solution regarding heat transfer effect and safety of steam generator.

1. UVOD

Prerez uparjalnika JE Krško je prikazan na sliki 1. Površino za izmenjavo toplote s primarne na sekundarno stran predstavlja snop U cevi. Priključek glavne napajalne cevi sekundarne vode je na sliki označen z GL, pomožne pa s P. Z osnovnim projektom JE Krško je bilo predvideno celotno napajanje po glavni napajalni cevi. Pomožna napajalna cev je bila predvidena le za napajanje med zagonom z največ 25 % pretokom glavne veje, ali za napajanje preko sistema pomožne napajalne vode. Napajanje uparjalnika se je spremenilo tako, da skozi glavni napajalni vod prihaja največ 70 % celotnega toka (360,5 kg/s), skozi pomožni napa-

jalni vod pa do 30 % (154,5 kg/s) (celotni napajalni tok je 515 kg/s Techn. Manual 1440-C298 /1/). Takšna sprememba napajanja uparjalnika vpliva na termohidravlične razmere v uparjalniku. Zmanjšana količina napajalne vode skozi glavno vejo GL povzroči, da se voda v tem delu prej segreje in prične uparjati.

Na vrhu U cevi se vsa voda še ne upari, prenos toplote v uparjalniku pa se tu že zaključi, zato se voda in para mehansko ločujeta v zgornjem delu uparjalnika. Izločena voda je vrela. Zbira se v bazenu nad U cevmi in se po ozkem obročastem povratnem kanalu vrača v uparjalni del uparjalnika med U cevi. V primeru napajanja skozi pomožno napajalno cev P se izločena voda meša s hladnejšo napajalno vodo in se podhlajuje. Pretok izločene vode v obtoku in vode iz zmožnega napajalnega voda sloni na vzgonu in tlačni razliki med zgornjim bazenom in uparjalnim delom uparjalnika. Razlika tlakov in vzgonski tlak sta v ravnotežju s tlačnimi izgubami toka. Temu ravnotežju se samodejno prilagodi masni tok vode v obtoku.

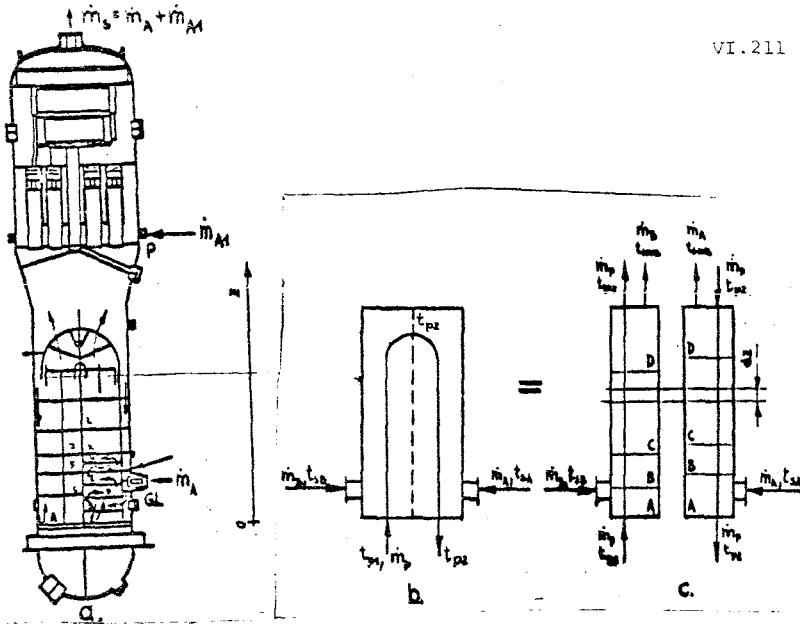
Zaradi domneve, da bo spremenjeno termohidravlično stanje v uparjalniku manj ugodno za prenos toplote, kar vodi k zmanjšanju učinkovitosti naprave, smo se odločili za samostojen razvoj stacionarnega modela uparjalnika. V primeru zmanjšanja učinkovitosti toplotnega menjalnika je potrebno za ohranitev toplotne moči naprave povečati temperaturo izvora toplote. V našem primeru je to temperatura primarne vode.

2. MODEL UPARJALNIKA

Na sliki 1a. je prikazan prerez uparjalnika D4 kakršen je instaliran v JE Krško. Vrisani so tudi tokovi vode. Smer in velikost pretoka skozi ploščo predgrelnika B zavisi od obremenitve in razmerja pretokov \dot{m}_A/\dot{m}_M .

Masni tok vode \dot{m}_A , ki prihaja skozi glavno napajalno vejo GL se pri 100 % moči v večji meri usmerja v predgrelni del uparjalnika in le manjši del te vode gre skozi spodnjo ploščo B "ekonomajzerja" v uparjalni del. Na vrhu U cevi uparjalnika ni suhe pare, temveč mokra ($x \approx 0,4$). V zgornjem delu uparjalnika se voda ločuje od pare in se vrača v uparjalni del uparjalnika. Ta voda primešana z vodo iz pomožnega napajalnega voda P se spušča iz zgornjega bazena v uparjalni del po ozkem obročastem povratnem kanalu ob obodu uparjalnika. Masni tok te vode je na sliki 1 označen z \dot{m}_B .

Do višine oporne ploče H se toka \dot{m}_A in \dot{m}_B ne motita, ker sta ločena s središčno ločilno ploščo. Na zgornji polovici U cevi ni pregrade. Masna toka \dot{m}_A in \dot{m}_B imata podobne termohidravlične karakteristike (t, p, x, w). Na osnovi teh predpostavk lahko uparjalnik ponazorimo v obliki modela prikazanega na sliki 1.b.



Slika 1: Prerez uparjalnika D4 in njegov shematski prikaz

V desnem delu takšnega toplotnega menjalnika imamo protitok med primarno in sekundarno vodo, v levem delu pa istosmerni tok. Tako lahko desni in levi del uparjalnika ločeno modeliramo. Model uparjalnika s slike 1b je detajlnejše in ločeno za desni in levi del prikazan na sliki kjer predstavlja z vzdolžno koordinato uparjalnika. Primarna voda prihaja v uparjalnik s temperaturo t_{p1} in odhaja s t_{p2} . Temperatura izstopa primarne vode levega dela je enaka temperaturi vstopa primarne vode v desni del.

Na sliki 1c oznake A, B, C in D predstavljajo področja z različnimi režimi toka na sekundarni strani uparjalnika

Sekundarna voda \dot{m}_A ali \dot{m}_B prihaja v uparjalnik s temperaturo:

$$t_{SA} \leq t_{SNAS} \quad \text{in} \quad (1)$$

$$t_{SB} \leq t_{SNAS} \quad (2)$$

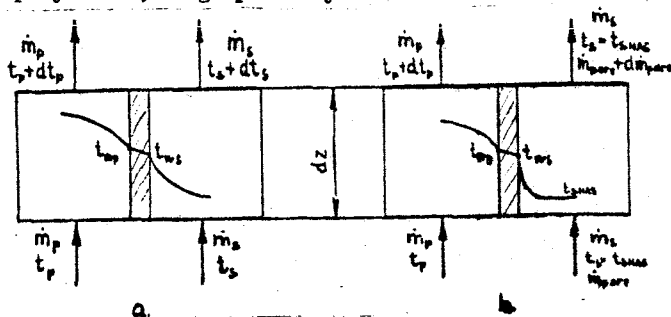
Od temperatur t_{SA} in t_{SB} je odvisno katere spremembe in v koliki meri jih doživlja voda na poti skozi uparjalnik.

Kadar pride voda v uparjalnik dovolj podhlajena, preide skozi vse faze A, B, C in D označene na sliki 1c. V primeru manj podhlajene vode se področje A zmanjša ali celo izgine, tako da se proces prične nekje v področju B ali celo s C. Para se prične tvoriti na začetku področja C. V področju B in C je intenzivnost

prenosa toplote neodvisna od masnega pretoka \dot{m}_A ali \dot{m}_B in prav tako od kvalitete vode x /2/. S povečanjem količine pare oziroma x postane intenzivnost prenosa toplote odvisna od masnega toka. To je v področju D. Mejo prehoda iz področja C v D je težje z gotovostjo določiti, ker je odvisna tudi od kvalitete površine.

2.1. Področje A: prisilno konvekcijo enofaznega toka

V splošnem imamo lahko področje A na desni kakor tudi na levi strani uparjalnika, kar je prikazano tudi na sliki 1c. V modelu upoštevamo vzdolžno koordinato uparjalnika z , torej popišemo uparjalnik z enodimenzionalnim matematičnim modelom. Diferencialne enačbe, ki skupaj z algebraičnimi popisujejo fizikalni proces v uparjalniku integriramo numerično. Za postavitev teh enačb potrebujemo zapis ravnotežja na diferencialnem izrezu uparjalnika, ki ga prikazuje slika 2.



Slika 2: Diferencialni izrez iz uparjalnika

a - v področju A ali B
b - v področju C ali D

V področju A imamo prisilno konvekcijo ene faze. V tem področju sta toplotni prestopnosti primarne in sekundarne strani konstantni in prav tako toplotna prehodnost k .

Za izračun toplotne prestopnosti s primarne vode na notranjo steno U cevi uporabimo Ditus-Boelter-jevo enačbo /2/, /3/.

$$Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

ki je veljavna za vsa področja A, B, C in D.

Za toplotno prestopnost na sekundarni strani pa Donohoueovo enačbo /6/.

$$Nu = C Re^{0.6} Pr^{0.33} \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (4)$$

Zapis ravnotežnih enačb za diferencialni izrez s slike 2. nas privede do sistema štirih linearnih enačb, ki jih podajamo v matričnem zapisu.

$$\begin{pmatrix} 1 & -m_p C_p & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -m_s C_s & 0 \\ 1 & -\frac{K}{2} dA & +\frac{K}{2} dA & 0 \\ 1 & 0 & \frac{d_s}{2} dA & -d_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q \\ \frac{dT_p}{dA} \\ \frac{dT_s}{dA} \\ T_{ws} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K(t_p - t_s) \\ -d_s t_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

Izpeljane enačbe in tudi slika 2 veljajo za istosmerni in tudi za protismerni tok, le da je pri protismernem toku m negativen.

2. Področje B: Podhlajeno vrenje

Jedro toka sekundarne vode se tu še ni segrelo do nasičenja, medtem ko je temperatura na steni višja od temperature nasičenja. Mehurčki, ki se tvorijo na steni kondenzirajo v jedru toka. Področje B se prične, kadar za dan toplotni tok q dosežemo na steni nadgretje, ki ga podaja Jens-Lotesova enačba [2]. S preureditvijo Jens-Lotesove enačbe dobimo naslednji izraz za toplotno prestopnost v področju podhlajenega vrenja.

$$d_s = \frac{1949,232 \exp(0,022988 p_s) (t_{ws} - t_{snas})^2}{(t_{ws} - t_s)}, \quad p_s [\text{bar}] \quad (6)$$

Toplotna prestopnost pri podhlajenem vrenju ni vnaprej podana in je funkcija lokalne temperature stene t_w in lokalne temperature sekundarne vode t_s .

V področju B podhlajenega vrenja sistem enačb 5 še vedno velja, le da je enačbam potrebno priljučiti še enačbo 6, ker smo pridobili dodatno neznancko d_s , ki ni konstanta. Novi sistem petih enačb ni več linearen in je za rešitev potrebno uporabiti iterativni postopek.

2.3. Področje C: Nasičeno vrenje

Jedro sekundarnega toka je v tem področju že segreto na $t_s = t_{snas}$ temperaturo nasičenja. Mehurčki pare, ki se tvorijo na steni, ne kondenzirajo več v jedru toka. Takšen vrelni proces imenujemo nasičeno vrenje. Temperatura nasičenega vrenja $t_{snas} = t_s$ ostaja ves čas konstantna, tvori pa se para. Takšen proces je prikazan na sliki 2.b diferencialnega izreza.

Če zapišemo ravnotežne enačbe za takšen proces dobimo naslednji sistem enačb.

$$\begin{pmatrix} 1 & -m_p C_p & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -r_w & 0 \\ 1 & -\frac{K}{2} d_A & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -d_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q \\ \frac{dt_p}{dA} \\ \frac{dm_{\text{pare}}}{dA} \\ t_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K(t_p - t_s) \\ -d_s t_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$d_s = 1949,232 \exp(0,022988 p_3) (t_{ws} - t_{sms}) \quad p_3 [\text{bar}]$$

Intenzivnost prenosa toplote v področjih B in C je neodvisna od masnega toka sekundarne vode m_c in od kvalitete vode x .

2.4. Področje D: prisilna konvekcija dvofaznega toka

Vzdolž področja C količina pare narašča. V začetku, ko je x pare še majhen, količina pare in masni tok vode ne vplivata na intenzivnost prenosa toplote. Pri večjih količinah pare naraste tudi hitrost pare v jedru toka in mehanizmi prenosa toplote se spremenijo. Proces v področju D imenujemo prenos toplote s prisilno konvekcijo dvofaznega toka. Mejo med področjema C in D je v realnih primerih razmeroma težko določiti, ker je odvisna od številnih faktorjev, med katerimi so tudi vrsta in kvaliteta površine.

Za področje D vrenja s prisilno konvekcijo smo uporabili Chen-ovo korelacijo /2/, /3/ in /4/.

Masni tok obtočne vode v levem delu uparjalnika smo določili s pomočjo Bernulijeve enačbe na osnovi ravnotežja sil vzgona in tlačnih izgub in razlike tlakov med bazenom uparjalnika in prostorom nad cevmi. Pri tem smo zanemarili tok, ki vdira iz desnega dela v levi del uparjalnika skozi horizontalno pregrado B na sliki 1.a.

Za izračun izgube tlaka smo uporabili Loçkart-Martinelli korelacijo /2/, /7/.

3. REZULTATI-IZRAČUNOV

Z razvitim računalniškim programom SMUP smo izvedli nekatere izračune z različnimi napajanja uparjalnika. V tabeli 1 so zbrani nekateri rezultati za 100 % obremenitev uparjalnika.

t_{p1}	t_{p2}	t_{sB}	\dot{m}_A	\dot{m}_{A1}	\dot{m}_B	x	$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B}$
°C	°C	°C	kg/s	kg/s	kg/s	-	-
328,76	292,67	279	515	0	723	0,41	1/0
329,09	293,14	274,5	463,5	51,5	682	0,42	9/1
329,40	293,47	272,2	412	103	866	0,37	8/2
329,75	293,92	268	360,5	154,5	602,5	0,46	7/3
330,09	294,35	263,7	309	206	562	0,47	6/4

Tabela 1: Rezultati izračunov za različna napajanja in za 100% obremenitev uparjalnika ($t_{sA} = 221^\circ\text{C}$, $\dot{m}_p = 4479\text{kg/s}$, $p_s = 63,17\text{ bar}$, $p_p = 157\text{ bar}$)

Veličine t_{sA} , \dot{m}_A , \dot{m}_{A1} , \dot{m}_p , p_p , p_s , so podatki vhodnega modela. Masni tok \dot{m}_p smo določili s predpostavko, da je vdor vode iz desnega dela v levi del uparjalnika zanemaren.

V tabeli 1 so v prvi vrstici navedeni rezultati za osnovni projekt sistema napajanja. Absolutne vrednosti temperatur se ne ujemajo povsem s projektnimi. Vzroki teh odstopanj so v izboru korelacij za toplotne prestopnosti in v izboru rutin za snovske lastnosti vode. Omeniti velja še, da koncentracija bora v vodi ni upoštevana. Važnejše od samih absolutnih temperatur so primerjave posameznih izračunov za različna napajanja uparjalnika. V tabeli 1 lahko opazimo, da se srednje temperatura primarnega hladila pri spremembi napajanja s 100/0 na 70/30 pri 100% moči uparjalnika dvigne za $1,45^\circ\text{C}$.

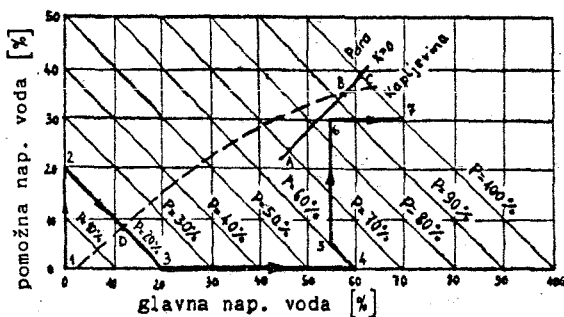
To lahko pomeni, da bo voda v primarnem sistemu manj podhlajena, ali pa da bo potrebno dvigniti tlak v primarnem sistemu približno za 2,5 bar, da bi obdržali enako stopnjo podhlajenosti.

Na sliki 1a. opazimo, da večji del vode, ki prihaja v uparjalnik po glavni napajalni veji GL gre skozi predgrelnik (ekonomajzer), ki ga tvorijo pregrade B, D, E, G in H. Resna omejitev je, da se para med predgradami še ne sme tvoriti zaradi možnosti vodnega udara. To se lahko zgodi ob zagonu, ko napajamo uparjalnik preko pomožne napajalne veje, nato pa preklonimo na glavno vejo, ki vsebuje podhlajeno vodo.

S programom SMUP smo poiskali načine napajanj pri katerih se pod zadnjo ploščo H že prične tvoriti mehurčki pare za različne moči sistema. Rezultati so zbrani na sliki 3 in jih predstavlja polno izvlečena krivulja ABC.

Polno izvlečena krivulja na sliki 3 je izračunana z modelom, ki ne upošteva prehoda vode skozi pregrado B uparjalnika s slike 1. Pri večjih masnih tokovih napajalne vode skozi glavno vejo GL del te vode odhaja skozi pregrado B, kot nakazujejo puščice na sliki 1.a. Pri manjših pretokih napajanja skozi glav-

no vejo pa pride do povratnega toka, ko obtočna voda vdira v predgrelnik in se meša z napajalno vodo. Na osnovi tega razmisleka je na sliki 3 vrisana nova krivulja omejitve obratovanja uparjalnika (označena črtkano), ki ima le kvalitativen značaj. Zaključimo, da je izračunana krivulja ABC lahko konzervativna le na področju AB, dočim je na področju BC, pri večjih močeh uparjalnika lahko manj ugodna. Obratovanje uparjalnika je dovoljeno le pod krivuljo ABC, oziroma črtkano krivuljo. Pri večjih močeh ni posebne nevarnosti, da bi prešli nad črtkano krivuljo. Vedno se pa to zgodi pri manjših močeh med zagonom sistema. Potek zagona je na sliki 3 vrisan z lomnjeno krivuljo 1234567. Pri manjših močeh med zagonom, ki ga ponazarja krivulja 12D, imamo v ekonomajzerju vedno prisotno tudi paro.



Slika 3: Mejna krivulja nastanka pare pod ploščo H.

4 ZAKLJUČEK

Razvili smo računalniški program za statični model uparjalnika SMUP. Kljub temu da program še nima končne oblike in bo sledil še nadaljni razvoj v smislu izpopolnjevanja in dopolnjevanja modela, smo dobili že nekateré-zanimive in kositne rezultate.

Pri spremenjenem projektu napajanja 70/30, glede na osnovi projekt, kjer je bilo napajanje predvideno le skozi glavno vejo, se srednja temperatura primarnega hladila pri 100% moči dvigne za 1,45 °C, kar ni zanemarljivo.

Razviti računalniški program sloni na enoizmernem matematičnem modelu. Rezultati takšnega modela nam dajejo direkten vpogled v celoten fizikalni proces, ki se odvija vzdolž cevi uparjalnika. Sledimo lahko vsem temperaturam uparjalnika vzdolž cevi (t_p , t_s , t_{wp} , t_{ws}) kvaliteti vode x , toplotnim prestopnostim α , toplotnemu toku q in drugim. S primerjavo rezultatov te vrste je lažje sklepati na ugodnost posamezne rešitve v smislu varnostnih analiz.