

Dragan Stevanović
 Mašinski fakultet
 27. marta 80, Beograd

PRORAČUN STACIONARNOG DVOFAZNOG STRUJANJA
 POMOĆU MODELA SA DINAMIČKIM KLIZANJEM FAZA

STATIONARY TWO-PHASE FLOW EVALUATION BY THE
 DYNAMIC SLIP MODEL

SADRŽAJ - U radu je dat prikaz jednačina modela sa dinamičkim klizanjem faza, za stacionarno dvofazno strujanje. Data je osnovna procedura rešavanja sistema programom DVOF4. Rezultati su verifikovani na eksperimentu FRIGG 313014. Pored udela pare i temperatura parne i tečne faze, grafički su prikazane i komentarisane sledeće veličine: specifična generacija parne faze, brzina strujanja parne i tečne faze, faktor klizanja između faza, međufazna razdelna površina, napon trenja između faza, dodirne površine između zida i svake od faza, naponi trenja između zida i svake od faza, faktor multiplikacije pada pritiska pri dvofaznom toku i pad pritiska u kanalu.

ABSTRACT - The equations which describe a dynamic slip model for stationary conditions are given in the paper. The basic solving procedure by the code DVOF4 is briefly described. The results are verified on the experiment FRIGG 313014. Besides the void fraction and the vapor and liquid phase temperatures, the following parameters are plotted and explained: vapor phase generation rate, vapor and liquid phase velocities, slip between the phases, interfacial surface, friction drag between the phases, surface area of the each phase in the contact with the wall, friction drag between each phase and the wall, two-phase flow friction multiplier and pressure drop along the channel.

1. UVOD

Model dvofaznog strujanja sa dinamičkim klizanjem faza razvijen je za potrebe novijih verzija programa RETRAN/1,3,4/. Sastoji se od dve jednačine kontinuiteta, dve momentne jednačine i jedne energijske. Time je omogućeno da se dvofazni tok proučava kao nehomogen i neravnotežan, to jest da se prate nezavisno brzine i temperature tečne i parne faze. Jedino postoji ograničenje da jedna od faza (najčešće parna) mora biti u saturaciji zbog nedostatka druge energijske jednačine.

U odnosu na neravnotežni difuzioni ("drift-flux") model /2/, ovaj sadrži jednu parcijalnu diferencijalnu jednačinu više. Ona je zapravo zamena za algebarske veze kojima je korelisana difuziona brzina. Time je omogućeno da se eksplicitno izučavaju efekti međufaznog trenja, što uslovljava mogućnost primene modela na sve režime dvofaznog strujanja. Ova nova jednačina dobija se međusobnim oduzimanjem jednačina za tečnu i parnu fazu. U njoj se pojavljuje brzina klizanja između faza, odnosno relativna brzina:

$$V_{SL} = w_1 - w_2 \quad (1)$$

Model za stacionarno stanje je jednostavniji utoliko što ne sadrži izvode po vremenu, ali sa druge strane sadrži iste konstitutivne zakone. Pomoću njega se mogu pratiti svi efekti neravnoteže i nehomogenosti kao i kod nestacionarnog modela. Pošto se kvantitativni podaci o ovim efektima retko sreću u literaturi, ovde će se najveća pažnja pokloniti njima. Time se dobijaju osnovni preduslovi za kritičko razmatranje modela sa dinamičkim klizanjem faza, kao i korišćenih konstitutivnih zakona.

2. SISTEM JEDNAČINA ZA STACIONARNO STANJE

Osnovni sistem od pet diferencijalnih jednačina čine sledeće jednačine (izvedene na osnovu jednačina korišćenih u RETRAN-u):

- jednačina kontinuiteta za mešavinu

$$\frac{d}{dz} (\rho w) = 0 \quad (2)$$

- jednačina kontinuiteta za parnu fazu

$$\frac{d}{dz} (\alpha \rho_2 w_2) = I \quad (3)$$

- momentna jednačina za mešavinu

$$\frac{d}{dz} (\rho w^2) + \frac{d}{dz} \frac{\alpha(1-\alpha)\rho_1\rho_2}{\rho} V_{SL}^2 + \frac{dp}{dz} = -\frac{1}{2} f \frac{G^2}{100 D_h \rho_1} \epsilon_{DF}^2 - \rho g \quad (4)$$

- jednačina dinamičkog klizanja

$$-\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \frac{dp}{dz} - \frac{\rho \alpha_1 \tau_1}{\alpha(1-\alpha)\rho_1\rho_2} - \frac{\alpha_2 \tau_2 z_1}{(1-\alpha)\rho_1} + \frac{\alpha_2 \tau_2 z_2}{\alpha \rho_2} - w_1 \frac{dw_1}{dz} + w_2 \frac{dw_2}{dz} = 0 \quad (5)$$

- energijska jednačina za mešavinu

$$\frac{d}{dz} \rho w(i+k+\phi) = \frac{q_L}{A} \quad (6)$$

Sve gore navedene jednačine napisane su za jednodimenziono strujanje vertikalno naviše, kroz kanal konstantnog poprečnog preseka.

Pored jednačine (1), sistem čine i sledeće algebarske veze:

$$p = (1-\alpha) p_1 + \alpha p_2 \quad (7)$$

$$pw = (1-\alpha) p_1 w_1 + \alpha p_2 w_2 \quad (8)$$

$$pu = (1-\alpha) p_1 u_1 + \alpha p_2 u_2 \quad (9)$$

$$i = u + \frac{p}{\rho} \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{2} w^2 \quad (11)$$

$$\phi = g z \quad (12)$$

kao i jednačine stanja:

$$p_1 = p_1(u_1, p) \quad (13)$$

$$p_2 = p_2(p) \quad (14)$$

Kao što se vidi iz sistema jednačina (2) do (6) model sa dinamičkim klizanjem faza uključuje sledeće konstitutivne zakone:

- specifičnu generaciju parne faze T ;
- faktor multiplikacije pada pritiska pri dvofaznom toku Φ^2_{DF} ;
- koeficijent trenja u jednofaznom toku tečnosti f_{10} ;
- silu otpora između faza $a_1 \cdot T_1$;
- silu trenja između zida i svake od faza $a_{z1} T_{z1}, a_{z2} T_{z2}$.

Ovde su korišćeni konstitutivni zakoni istovetni onim u RETRAN-u, odnosno programu RELAP5/MOD1 6/ (sila otpora između faza). Zbog ograničenosti prostora neće se dati izrazi za navedene konstitutivne zakone (dati su i u referenci /11/).

3. REŠAVANJE SISTEMA JEDNAČINA

Zbog svoje jednostavnosti diferencijalna jednačina (2) je odmah rešena i prevedena u algebarsku jednačinu:

$$pw = \text{const} \quad (15)$$

Time je ostao da se reši sistem od četiri diferencijalne jednačine (3) do (6) po nepoznatim veličinama: α, p, w_2, i .

Uz korišćenje algebarskih veza (7) do (12) sistem je preveden u oblik:

$$\frac{dU}{dz} = f(U, z) \quad (16)$$

gde je U vektor nepoznatih.

Za numeričko rešavanje ovog problema sačinjen je program DVDF4 (zajedno sa podprogramima za termodinamičke veličine), od oko hiljadu fortraskih linija. Za rešavanje sistema u obliku (16), ovaj program poziva sistemski podprogram DGEAR, i to njegovu implicitnu varijantu.

4. PRIMENA PROGRAMA DVOF4 NA USLOVE EKSPERIMENTA FRIGG 313014

Radi verifikacije programa DVOF4 uzeti su podatci o geometriji i termodinamičkim parametrima eksperimenta FRIGG 313014/3.5/.

Na slici 1 mogu se uporediti rezultati (α) dobijeni merenjima na eksperimentalnoj instalaciji, zatim oni dobijeni najnovijom verzijom RETRAN-a (takođe modelom sa dinamičkim klizanjem faza), rezultati koje su dobili Lellouche i Zolotar /5/ ugradnjom svog mehanicističkog modela generacije parne faze, i programom DVOF4. Odstupanja su značajnija na početku kanala, u području podhladjenog ključanja, jer u programu DVOF4 (kao ni u RETRANU) nije ugrađen odgovarajući model. U radovima /5,9/ se može videti kako model podhladjenog ključanja daje dobre rezultate u ovom području za uslove istog eksperimenta. Međutim, ovo početno odstupanje ne utiče bitnije na vrednost udela pare na izlazu iz kanala.

Na slici 2 se vidi odlično slaganje rezultata ovog programa sa temperaturama tečne faze dobijenih eksperimentom. Takođe je prikazana temperatura tečne faze koja se dobija homogenim ravnotežnim modelom (T_1 ne prelazi temperaturu saturizacije T_s). Upoređenjem slika 1 i 2 uočava se gotovo istovetni karakter promene temperature tečne faze T_1 i specifične generacije parne faze Γ . To je i za očekivati, pošto pri približno konstantnoj temperaturi saturacije i temperaturi zida, Γ zavisi uglavnom od T_1 .

Pomoću ovih dveju slika dobijeni su podaci o slaganju, odnosno odstupanju programa DVOF4 u odnosu na eksperiment. U literaturi se osim podataka za α i T_1 ne nalaze drugi rezultati sa serije eksperimenata FRIGG. Međutim, ovde će biti prikazani i oni rezultati koji su dobijeni programom DVOF4 za uslove istog eksperimenta, koji se ne mogu verifikovati, ali daju zanimljive podatke o fenomenima neravnoteže i nehomogenosti toka.

Tako su na slici 3 date brzine tečne i parne faze, kao i relativna brzina između njih. Vidi se da duž kanala, sa porastom α rastu brzine w_1 i w_2 . Daleko je značajnije zapaziti da pri mehurastom toku nehomogenost nije izražena i da se naglo povećava pri kraju čepastog i u toku razvoja penastog toka. O anularnom toku se ne mogu izvući neki vredniji zaključci, zbog njegovog kratkog trajanja tokom ovog eksperimenta. Nagli skok brzine V_{SL} javlja se u trenutku otpočinjanja neto generacije parne faze (uporedi sa slikom 1). Slični podaci o nehomogenosti toka mogu se dobiti i sa slike 4, gde je prikazan faktor klizanja (odnos w_2 i w_1). Takođe je radi poredjenja ucrtan faktor klizanja po Thom-ovoj korelaciji:

$$s = 0,93 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{0,11} + 0,07 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{0,561} \quad (17)$$

Odstupanja su znatna, jer po ovoj korelaciji s ima vrednost iznad 1,8 dok po programu DVOF4, faktor klizanja ne prelazi vrednost 1,2. Mada se u literaturi /12/ navodi da se Thom-ova korelacija odlično slaže sa eksperimentom, treba pri-

metiti da po korelaciji (17) s zavisi samo od pritiska, a ne i od α , kao što bi se očekivalo (i kao što pokazuju rezultati DV0F4). Sa slika 3 i 4 takodje se može naslutiti da pri pojavi anularnog toka prestaje dalji porast nehomogenosti. Očekivalo bi se suprotno, pa je možda ovo manifestacija manjkavosti modela. Na slici 4 je takodje prikazano medjusobno odstupanje strujnog kvaliteta pare i kvaliteta pare pri termodinamičkoj ravnoteži.

Promene medjufazne razdelne površine i napona trenja (otpora) izmedju faza date su na slici 5, a promene dodirne površine izmedju zida i svake od faza, kao i odgovarajućih napona trenja, na slici 6. Da bi se ovi rezultati mogli komentarisati bilo bi potrebno uporediti ih sa rezultatima drugih modela, kojih na žalost u literaturi nema.

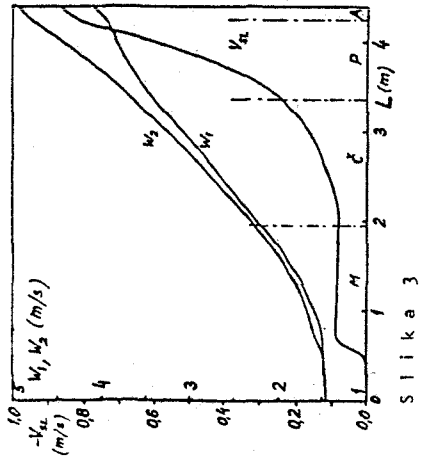
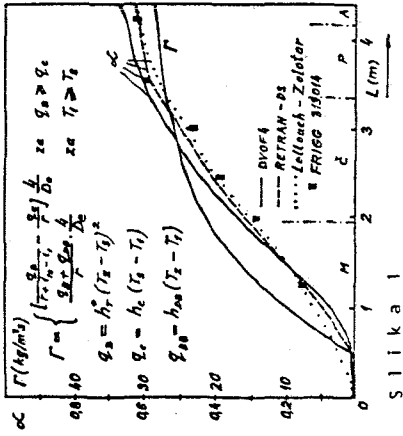
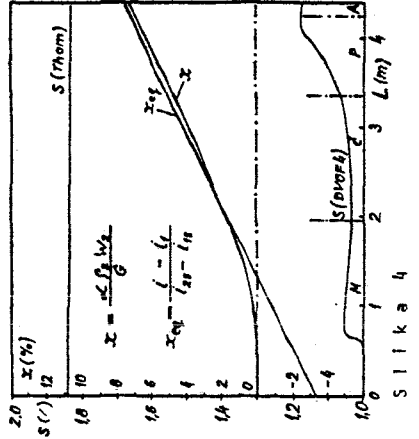
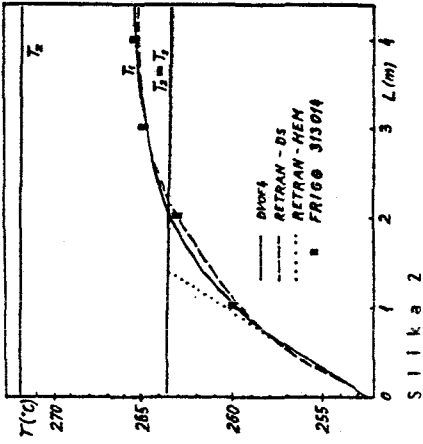
Na kraju, slika 7 pokazuje pad pritiska duž kanala, kao i vrednost faktora multiplikacije pada pritiska pri dvofaznom toku, po korelacijama koje je dao Beattie/4/. Prve dve korelacije se relativno glatko smenjuju, dok pri nastupanju anularnog toka vrednost ϕ_{DF}^2 skokovito opadne za oko 25%, što se može smatrati realnim. Pad pritiska dobijen po ovom programu dobro se slaže sa onim dobijenim programom RETRAN. Do ovog zaključka se dolazi na osnovu podudarnosti temperatura saturacija (slika 2).

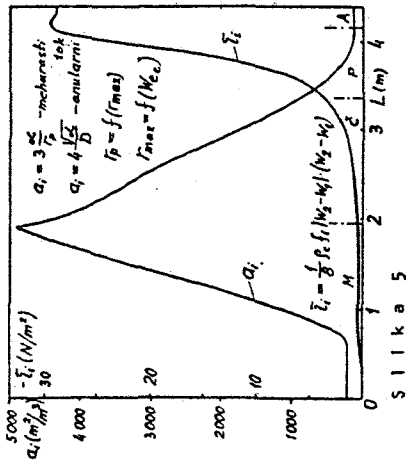
5. ZAKLJUČAK

Rezultati su ukazali na značaj uključivanja modela podhladjenog ključanja, ukoliko se žele tačni podaci o udelu pare duž celog kanala. Ukoliko se žele podaci samo na kraju kanala, onda je to nepotrebno, jer ne doprinosi bitno tačnosti, a usložnjava model. Drugo rešenje je uključivanje neke korelacije za Γ (poput one Lellouche-a i Zolotar-a) koja važi u svim režimima, a daje dobre rezultate i u zoni podhladjenog ključanja.

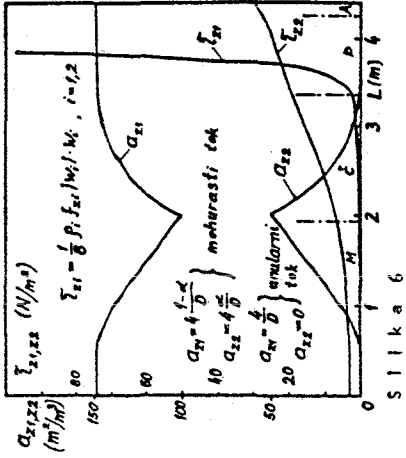
Da bi se doneli konkretni sudovi o brojnim vrednostima: specifične generacije parne faze, brzina w_1 , w_2 i V_{SL} , specifične razdelne površine izmedju faza, kao i izmedju zida i svake od faza, bilo bi potrebno u program DV0F4 ugraditi i druge modele za konstitutivne zakone (na primer one date u literaturi /7/ i /8/). Uz uporedjenje sa malobrojnim eksperimentalnim podacima, bila bi time omogućena komparativna analiza ovih modela, a zatim korigovanje odredjenih članova.

Prikazana metodologija biće verifikovana na fizičkom eksperimentu - laboratorijskom modelu generatora pare koji će biti postavljen na Mašinskom fakultetu u Beogradu /10/.

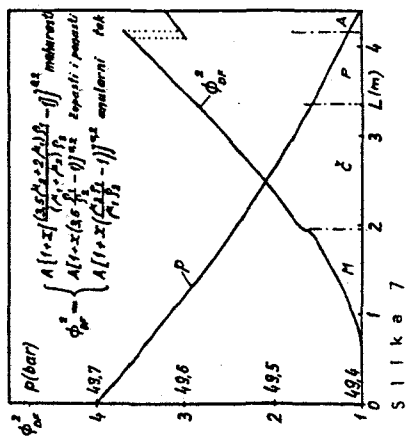




Slika 5



Slika 6



Slika 7

NOEKLATURA

- A - površina poprečnog preseka
- a - specifična generacija parne faze
- D₁ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₂ - spec. potencijalna energija
- D₃ - faktor trenja
- D₄ - specifični protok
- D₅ - gravitaciona konstanta
- D₆ - entalpija
- D₇ - specifična kinetička energija
- D₈ - pritisek
- D₉ - vertikalna koordinata
- D₁₀ - površina razdalne površine
- D₁₁ - hidraulički radijus
- D₁₂ - faktor trenja
- D₁₃ - specifični protok
- D₁₄ - gravitaciona konstanta
- D₁₅ - entalpija
- D₁₆ - specifična kinetička energija
- D₁₇ - pritisek
- D₁₈ - vertikalna koordinata
- D₁₉ - površina poprečnog preseka
- D₂₀ - specifična generacija parne faze
- D₂₁ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₂₂ - spec. potencijalna energija
- D₂₃ - faktor trenja
- D₂₄ - specifični protok
- D₂₅ - gravitaciona konstanta
- D₂₆ - entalpija
- D₂₇ - specifična kinetička energija
- D₂₈ - pritisek
- D₂₉ - vertikalna koordinata
- D₃₀ - površina poprečnog preseka
- D₃₁ - specifična generacija parne faze
- D₃₂ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₃₃ - spec. potencijalna energija
- D₃₄ - faktor trenja
- D₃₅ - specifični protok
- D₃₆ - gravitaciona konstanta
- D₃₇ - entalpija
- D₃₈ - specifična kinetička energija
- D₃₉ - pritisek
- D₄₀ - vertikalna koordinata
- D₄₁ - površina poprečnog preseka
- D₄₂ - specifična generacija parne faze
- D₄₃ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₄₄ - spec. potencijalna energija
- D₄₅ - faktor trenja
- D₄₆ - specifični protok
- D₄₇ - gravitaciona konstanta
- D₄₈ - entalpija
- D₄₉ - specifična kinetička energija
- D₅₀ - pritisek
- D₅₁ - vertikalna koordinata
- D₅₂ - površina poprečnog preseka
- D₅₃ - specifična generacija parne faze
- D₅₄ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₅₅ - spec. potencijalna energija
- D₅₆ - faktor trenja
- D₅₇ - specifični protok
- D₅₈ - gravitaciona konstanta
- D₅₉ - entalpija
- D₆₀ - specifična kinetička energija
- D₆₁ - pritisek
- D₆₂ - vertikalna koordinata
- D₆₃ - površina poprečnog preseka
- D₆₄ - specifična generacija parne faze
- D₆₅ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₆₆ - spec. potencijalna energija
- D₆₇ - faktor trenja
- D₆₈ - specifični protok
- D₆₉ - gravitaciona konstanta
- D₇₀ - entalpija
- D₇₁ - specifična kinetička energija
- D₇₂ - pritisek
- D₇₃ - vertikalna koordinata
- D₇₄ - površina poprečnog preseka
- D₇₅ - specifična generacija parne faze
- D₇₆ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₇₇ - spec. potencijalna energija
- D₇₈ - faktor trenja
- D₇₉ - specifični protok
- D₈₀ - gravitaciona konstanta
- D₈₁ - entalpija
- D₈₂ - specifična kinetička energija
- D₈₃ - pritisek
- D₈₄ - vertikalna koordinata
- D₈₅ - površina poprečnog preseka
- D₈₆ - specifična generacija parne faze
- D₈₇ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₈₈ - spec. potencijalna energija
- D₈₉ - faktor trenja
- D₉₀ - specifični protok
- D₉₁ - gravitaciona konstanta
- D₉₂ - entalpija
- D₉₃ - specifična kinetička energija
- D₉₄ - pritisek
- D₉₅ - vertikalna koordinata
- D₉₆ - površina poprečnog preseka
- D₉₇ - specifična generacija parne faze
- D₉₈ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₉₉ - spec. potencijalna energija
- D₁₀₀ - faktor trenja
- D₁₀₁ - specifični protok
- D₁₀₂ - gravitaciona konstanta
- D₁₀₃ - entalpija
- D₁₀₄ - specifična kinetička energija
- D₁₀₅ - pritisek
- D₁₀₆ - vertikalna koordinata
- D₁₀₇ - površina poprečnog preseka
- D₁₀₈ - specifična generacija parne faze
- D₁₀₉ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₁₁₀ - spec. potencijalna energija
- D₁₁₁ - faktor trenja
- D₁₁₂ - specifični protok
- D₁₁₃ - gravitaciona konstanta
- D₁₁₄ - entalpija
- D₁₁₅ - specifična kinetička energija
- D₁₁₆ - pritisek
- D₁₁₇ - vertikalna koordinata
- D₁₁₈ - površina poprečnog preseka
- D₁₁₉ - specifična generacija parne faze
- D₁₂₀ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₁₂₁ - spec. potencijalna energija
- D₁₂₂ - faktor trenja
- D₁₂₃ - specifični protok
- D₁₂₄ - gravitaciona konstanta
- D₁₂₅ - entalpija
- D₁₂₆ - specifična kinetička energija
- D₁₂₇ - pritisek
- D₁₂₈ - vertikalna koordinata
- D₁₂₉ - površina poprečnog preseka
- D₁₃₀ - specifična generacija parne faze
- D₁₃₁ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₁₃₂ - spec. potencijalna energija
- D₁₃₃ - faktor trenja
- D₁₃₄ - specifični protok
- D₁₃₅ - gravitaciona konstanta
- D₁₃₆ - entalpija
- D₁₃₇ - specifična kinetička energija
- D₁₃₈ - pritisek
- D₁₃₉ - vertikalna koordinata
- D₁₄₀ - površina poprečnog preseka
- D₁₄₁ - specifična generacija parne faze
- D₁₄₂ - faktor multiplikacije pada pritiska
- D₁₄₃ - spec. potencijalna energija
- D₁₄₄ - faktor trenja
- D₁₄₅ - specifični protok
- D₁₄₆ - gravitaciona konstanta
- D₁₄₇ - entalpija
- D₁₄₈ - specifična kinetička energija
- D₁₄₉ - pritisek
- D₁₅₀ - vertikalna koordinata

6. ZAHVALNOST

Rad je deo magistarske teze "Prilog proučavanju nestacionarnih strujno-dinamičkih procesa u generatoru pare sa prinudnom cirkulacijom", koji se realizuje pod mentorstvom profesora Milorada Ristića. Svim kolegama iz Kabineta za nuklearne elektrane i opštu energetiku Mašinskog fakulteta, kao i asistentu Mirku Lukiću, zahvaljujem se na korisnim diskusijama i pomoći tokom rada.

L I T E R A T U R A

1. J.H. Mc Fadden, M.P. Paulsen, G.C. Gose, "RETRAN Dynamic Slip Model", Nuclear Technology, Vol. 54, September 1981.
2. E.D. Hughes, M.P. Paulsen, L.J. Agee, "A Drift-Flux Model of Two-Phase Flow for RETRAN", Nuclear Technology, Vol. 54, September 1981.
3. M.P. Paulsen, E.D. Hughes, "RETRAN Nonequilibrium Two-Phase Flow Model for Operational Transient Analyses", Nuclear Technology, Vol. 61, May 1983.
4. J.H. McFadden, E.D. Hughes, R.E. Narum, G.C. Gose, RETRAN-02-A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, Vol. 1: Equations and Numerics, EPRI np 1850, May 1981.
5. G.S. Lellouche, B.A. Zolotar, Mechanistic Model for Predicting Two-Phase Void Fraction for Water in Vertical Tubes, Channels and Rod Bundles, EPRI, February 1982.
6. RELAP 5/MOD 1 Code Manual, Vol. 1: System Models and Numerical Methods, EG&G Idaho, March 1982.
7. M. Studović, Adijabatsko isparavanje u struji zagrejane tečnosti, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd 1982.
8. M. Ristić i dr., Pogonske karakteristike nuklearnih elektrana, elaborat Mašinskog fakulteta, Beograd 1983.
9. J. Riznić, Termohidrauličko ponašanje grejnog kanala vodovodnog reaktora u poremećenim uslovima rada, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd 1983.
10. Z. Manojlović, D. Stevanović, "Dimenzionisanje laboratorijskog modela generatora pare sa U-cevima sa stanovišta izučavanja prelaznih procesa", XXIX Jugoslovenska konferencija ETAN - a, Niš 1985.
11. D. Stevanović, "Modeliranje neravnotežnih uslova u isparavačkom kanalu", Savremeni problemi nelinearne mehanike kontinuuma, Godišnja konferencija Srpskog društva za mehaniku, Vrnjačka Banja 1985.
12. R.H.S. Winterton, Thermal Design of Nuclear Reactors, Oxford, Pergamon Press 1981.