

Predviđanje dvofaznog strujanja sa generacijom pare oko cevi u snopu u isparivačima i generatorima pare

B. Maslovarić, V. Stevanović, S. Milivojević, M. M. Petrović

U hemijskoj industriji i energetici se koriste isparivači i generatori pare sa ključanjem na spoljašnjoj površini cevi koje formiraju cevni snop. Pri ključanju fluida dešavaju se složeni procesi prenosa toplote i mase koji određuju polje brzina obe faze, polje pritiska i raspored zapreminskog udela parne faze u ovim komponentama. Velike vrednosti zapreminskog udela pare mogu da izazovu krizu razmene toplote, koja se javlja u promenljivim ili prelaznim režimima kada je deo cevnog snopa okružen samo parnom fazom. Takođe, veliki protok dvofazne mešavine može da dovede do vibracija cevi isparivača ili generatora pare, dok recirkulacija tečnosti može da izazove taloženje primesa u pojedinim delovima generatora. Model predstavljen u ovom radu je podrška projektovanju i analizama rada generatora pare i isparivača. Zasnovan je na rešavanju bilansnih jednačina za svaku od faza u dvofaznom toku, uz primenu odgovarajućih konstitutivnih korelacija i omogućava izračunavanje brzinskog polja, polja pritiska i zapreminskog udela pare oko horizontalnog ili vertikalnog cevnog snopa, kao i predviđanje položaja dvofazne mešavine

I. Uvod

Generisanje pare u energetskim postrojenjima se može odvijati oko cevi u snopu kroz koje struji predajnik toplote, koji može biti dimni gas, vrela voda, vodena para ili fluid iz nekog tehnološkog procesa na visokoj temperaturi. U hemijskoj industriji i manjim energetskim postrojenjima koriste se isparivači u kojima su smeštene U-cevi kroz koje struji topliji fluid koji zagreva i dovodi do ključanja hladnijeg fluida oko cevi u snopu. Cevi su potopljene u dvofaznu mešavinu hladnijeg fluida. Parna faza dvofazne mešavine se odvodi iz isparivača, a zasićena tečnost se vraća u prostor oko cevi. Raspored zapreminskog udela pare u strujnom prostoru ovih uređaja određuje prelaz toplote sa cevi na okolni fluid, masu tečne faze u isparivaču i nivo dvofazne mešavine [1].

Pouzdanost predviđanje nivoa dvofazne mešavine je od značaja za sigurnost i pouzdanost rada generatora pare i isparivača. Nizak položaj dvofazne mešavine može dovesti do toga da cevi nosioca toplote budu okružene parnom fazom, što smanjuje površinu za razmenu toplote, odnosno generaciju pare, dok visok položaj vodi ka odnošenju kapi sa strujom pare iz generatora pare odnosno isparivača i povećanja vlažnosti pare koja se odvodi iz generatora pare ili isparivača.

Zapreminski udeo pare takođe utiče na količinu tečne

faze koja se nalazi u isparivaču ili generatoru. Ukoliko je masa tečne faze mala, u slučaju poremećaja sa prestankom dovodenja tečne faze u generator pare, veća je mogućnost da dođe do oštećenja generatora [2]. Maseni fluks utiče na koeficijent prelaza toplote, a njegove velike vrednosti mogu da izazovu vibracije cevi [3].

U dosadašnjim istraživanjima koja se mogu naći u literaturi prikazano je nekoliko modela za kompjutersku simulaciju termohidrauličkih procesa u isparivačima i generatorima pare. Poznavanje termohidrauličkih parametara je potrebno radi sigurnosnih analiza rada, projektovanja uređaja i definisanja operativnih uslova rada, a posebno su bitni parametri čije je merenje teško. Pri ovim simulacijama je izuzetno važno primeniti odgovarajuće konstitutivne korelacije kojima se definišu procesi razmene mase i energije na međufaznoj razdelnoj površini. Jedan od prvih ovakvih modela predstavljen je u [4], gde je na dvofazni tok primenjen model dva fluida dok je na deo strujnog prostora ispunjenim cevnom snopom primenjen metod porodne sredine. Takođe, pokazan je i značaj primenjenih konstitutivnih korelacija. Urađena je parametarska analiza različitih izraza za silu međufaznog trenja uz pretpostavku da se može primeniti ista vrednost koeficijenta međufaznog trenja, koji figuriše u izrazima za silu, za sve oblike dvofaznog toka. U [5] je pokazano da ovakva pretpostavka ne može biti prihvaćena. Međutim, oba ova modela kao granični uslov koriste unapred određen položaj nivoa dvofazne mešavine, na osnovu položaja prelivne ploče u isparivaču.

Model dva fluida za dvofazni tok je primenjen u isparivaču ispunjenim rashladnim fluidom R113 koji ključa [6], a u model je uključena relacija za međufazno trenje koja je ranije primenjivana za vodu i vodenu paru, i za vodu i vazduh [7, 8]. Cilj modela predstavljenog u ovom radu jeste da se obezbedi predviđanje nivoa dvofazne mešavine, umesto da se unapred zadaje ovaj podatak kao u [4, 5, 6, 9], i da se oblast primene korelacije za međufazno trenje koja je već korištena u [7,8] proširi i na druge fluide.

II. Matematički model

Termohidraulički proces koji se odvija na sekundarnoj strani isparivača je opisan nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačinama zakona održanja mase, količine kretanja i energije. Jednačine održanja mase i količine kretanja su napisane za svaku fazu posebno, dok je jednačina održanja energije napisana samo za tečnu fazu jer je usvojena pretpostavka da se para nalazi u stanju zasićenja, pa je

njeno stanje određeno pritiskom dvofazne mešavine.

Bilans mase za tečnu fazu

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \vec{u}_1) = -\Gamma_{isp} + \Gamma_{kond} + \dot{M}_{1,ul} \quad (1)$$

Bilans mase za parnu fazu

$$\frac{\partial(\alpha_2 \rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \vec{u}_2) = \Gamma_{isp} - \Gamma_{kond} \quad (2)$$

Bilans količine kretanja za tečnu fazu

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1 \vec{u}_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \vec{u}_1 \vec{u}_1) = -\alpha_1 \nabla p + \alpha_1 \rho_1 \vec{g} \quad (3)$$

$$+ \vec{F}_{21} - \vec{F}_{31} - (\Gamma_{isp} - \Gamma_{kond}) \vec{u}_{1i} + \dot{M}_{1,ul} \vec{u}_{1,ul}$$

Bilans količine kretanja za parnu fazu

$$\frac{\partial(\alpha_2 \rho_2 \vec{u}_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \vec{u}_2 \vec{u}_2) = -\alpha_2 \nabla p + \alpha_2 \rho_2 \vec{g} \quad (4)$$

$$- \vec{F}_{21} - \vec{F}_{32} + (\Gamma_{isp} - \Gamma_{kond}) \vec{u}_{1i}$$

Bilans energije za tečnu fazu

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1 h_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 h_1 \vec{u}_1) = \quad (5)$$

$$\alpha_1 \frac{\partial p}{\partial t} - (\Gamma_{isp} - \Gamma_{kond}) h'' + \dot{M}_{1,ul} h_{1,ul} + \dot{q}_{31}$$

Zbir zapreminskih udela tečne i parne faze i zapreminskog udela cevi je jednak jedinici

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (6)$$

Sila međufaznog trenja je određena sledećim izrazom:

$$\vec{F}_{21} = \frac{3}{4} \alpha_2 \rho_1 \frac{C_D}{D_p} |\vec{u}_2 - \vec{u}_1| (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \quad (7)$$

Korelacije za koeficijent međufaznog trenja su preuzete iz literature [7,8] pošto su se već ranije pokazale pogodnim za predviđanje dvofaznog toka vode i vodene pare, kao i dvofaznog toka vode i vazduha, pri strujanju dvofazne mešavine preko cevi u snopu sa koridornim ili šahovskim rasporedom. Nerovnov i dr [10] su analizirali mogućnost primene različitih modela za simulaciju dvofaznog strujanja koji su dostupni u literaturi. Pokazano je da model iz [7,8] pogodan za primenu pri masenim fluksevima ispod 250 kg/(m²s). Ova korelacija je primenjena i u [11]. McNeil [9] je pokazao da korelacija iz [7,8] nije primenljiva na dvofazni tok fluida R113, pa je stoga korelacija izmenjena kako bi se omogućila njena primena na više fluida, i uveden je član ($\sigma_{fluid}/\sigma_{H_2O}$) koji uzima u obzir površinski napon fluida čiji se dvofazni tok simulira i površinski napon vode na istoj temperaturi kao i posmatrani fluid [12].

Za vrednosti zapreminskog udela manje od 0,3, odnosno za mehurasti tok, odnos koeficijenta međufaznog trenja i poluprečnika mehura je računat kao:

$$\frac{C_D}{D_p} = 0,267 \cdot \left\{ \frac{g \Delta \rho}{\sigma_{fluid}} \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1 + 17,67 \cdot (f(\varphi))^{\frac{6}{7}}}{18,67 \cdot f(\varphi)} \right]^2 \frac{\sigma_{fluid}}{\sigma_{H_2O}} \quad (8)$$

dok je za vrednosti zapreminskog udela pare veće od 0,3 primenjen izraz:

$$\frac{C_D}{D_p} = 1,487 \cdot \left\{ \frac{g \Delta \rho}{\sigma_{fluid}} \right\}^{\frac{1}{2}} (1 - \varphi)^3 (1 - 0,75 \cdot \varphi)^2 \frac{\sigma_{fluid}}{\sigma_{H_2O}} \quad (9)$$

Pad pritiska usled otpora cevi u snopu je određen tako što je uzet u obzir pad pritiska obe faze. Pad pritiska pri strujanju tečne faze preko snopa cevi je određen za deo kontrolne zapremine u kome se nalazi tečna faza (1- φ)

$$\Delta p_{1,e} = \zeta_{1,e} \frac{\rho_1 u_{1,e}^2}{2} (1 - \varphi) \quad (10)$$

gde je sa $\zeta_{1,e}$ određen koeficijent lokalnog otpora u e (e = x,y,z) pravcu. Slična jednačina je napisana i za parnu fazu

$$\Delta p_{2,e} = \zeta_{2,e} \frac{\rho_2 u_{2,e}^2}{2} \varphi \quad (11)$$

Sila otpora strujanju dvofazne mešavine oko snopa cevi se računa kao zbir sile koja potiče od parne faze i sile koja potiče od tečne faze [13]

$$\vec{F}_{3i} = (1 - \alpha_3) \frac{\Delta p_{1,e}}{\Delta e} \vec{e} \quad (12)$$

gde je Δe dimenzija kontrolne zapremine u e pravcu, \vec{e} jedinični vektor, a indeks i može imati vrednost 1 za tečnu ili 2 za parnu fazu.

Brzina isparavanja se računa kada je entalpija tečne faze veća od entalpije saturacije, kao:

$$\Gamma_e = \frac{\alpha_1 \rho_1}{\tau_e} \frac{h_1 - h'}{h'' - h'} \quad (13)$$

Kondenzacija unutar kontrolne zapremine se dešava ako je entalpija tečne faze niža od entalpije satiracije.

Toplotna snaga koju primi jedinica zapremine fluida se određuje na osnovu toplotnog fluksa i geometrijskih parametara isparivača kao

$$q_{31} = \frac{q_A \cdot A_q}{V_q} \quad (14)$$

gde V_q predstavlja zapreminu proračunskog domena u kojoj se toplota prelazi sa cevi na sekundarni fluid, a A_q predstavlja površinu preko koje se toplota predaje sekundarnom fluidu.

III. Numerički model

Sistem od sedam skalarnih jednačina održanja, koje slede iz jednačina (1), (2) i (5) i projekcija jednačina količine kretanja za tečnu i parnu fazu na ose Dekartovog koordinatnog sistema u slučaju dvodimenzijskog toka, je rešen metodom kontrolnih zapremina. Diskretizacija ovih jednačina se vrši njihovom integracijom po kontrolnim zapreminama, i to u pomerenim kontrolnim zapreminama za brzinu, a u sklarinim kontrolnim zapreminama za skalarne veličine (pritisk, entalpiju i zapreminski udeo parne faze). Polje pritiska se računa metodom SIMPLE [14], koja je izvedena za uslove dvofaznog toka. Rezultujuće diskretizovane jednačine su rešene iterativno, po sledećem redosledu:

1. Izračunavanje zapreminskog udela parne faze i en-

talpije tečne faze u skalarnim kontrolnim zapreminama na osnovu sistema jednačina koje se dobijaju iz jednačina (1) i (5).

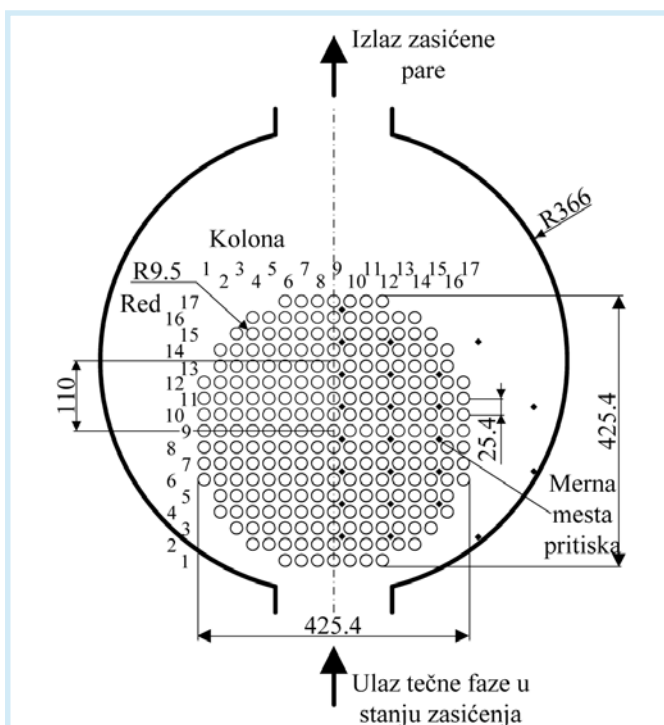
2. Izračunavanje komponenata brzina tečne i parne faze iz pomerenih kontrolnih zapremina, na osnovu projekcija jednačina (3) i (4).
3. Rešavanje jednačine pritiska dobijene kombinovanjem jednačine održanja mase i količine kretanja za tečnu i parnu fazu.
4. Kraci 2 i 3 se ponavljaju dok suma desnih strana jednačina (1) i (2) ne bude manja od greške predviđene za svaku skalarnu kontrolnu zapreminu.
5. U narednom vremenskom trenutku novodobijene vrednosti iz prethodnog trenutka se usvajaju za početne vrednosti i proračun se ponavlja od koraka 1.

Električni grejači, spoljašnjeg prečnika 9,5 mm i dužine 51 mm, su smešteni u svakoj cevi. Merači pritiska su postavljene na sekundarnoj strani isparivača da bi se odredio pad pritiska između dva merna mesta. Merači su postavljeni jedan iznad drugog, na međusobnom vertikalnom rastojanju od dva koraka cevi (50,8 mm) u prostoru unutar cevnog snopa, dok je za merače postavljene izvan cevnog snopa ovo rastojanje četiri koraka cevi. Greška merenja pri određivanju pada pritiska između dva merna mesta je +10 Pa.

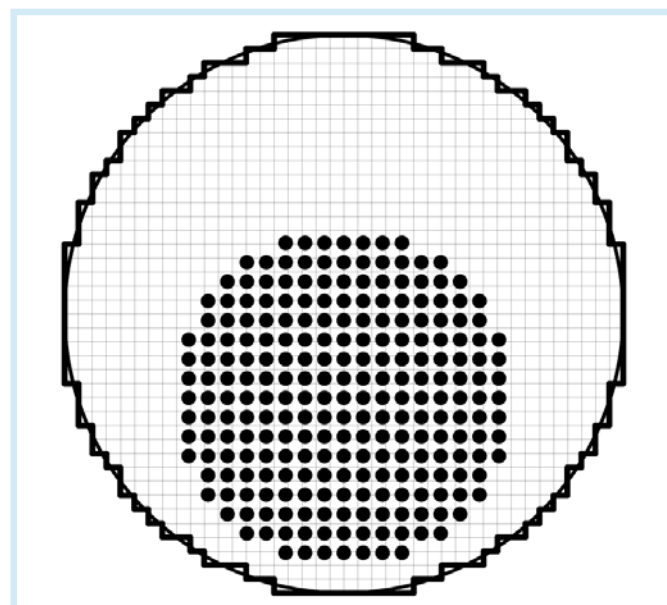
Na prednjoj strani isparivača se nalazi staklo da bi se u toku eksperimenta mogao posmatrati dvofazni tok. Fluid (R113, odnosno n-pentan) ulazi u isparivač u stanju zasićenja, dok cevni snop ne bude potopljen u zasićeni fluid. Pri strujanju preko snopa cevi u uslovima prirodne cirkulacije, fluid isparava i potom napušta isparivač.

Proračunski domen je određen omotačem isparivača. Sekundarna strana isparivača je podeljena kontrolnim zapreminama međusobno istih dimenzija (slika 2). Krivolinijske površine aproksimirane su pravougaonim površinama u Dekartovom koordinatnom sistemu. U model je uključen snop cevi koji je smešten u isparivaču.

Protok uticanja tečne faze je određen na osnovu termofizičkih karakteristika fluida koji utiče, pritiska koji vlada u isparivaču (tabela 1), površine za razmenu toplote (broju cevi isparivača, dimenzija cevi) i podataka o površinskom toplotnom fluksu.



Slika 1. Raspored cevi u cevnom snopu isparivača sa ucrtanim pozicijama merača pritiska (kvadrati)



Slika 2. Sekundarna strana isparivača izdeljena na kontrolne zapremine

IV. Opis eksperimenta i numeričko modeliranje strujnog prostora

Posmatrano je ključanje dvofazne mešavine oko cevi u snopu jednog isparivača [15]. U prvom slučaju je isparivač napunjen fluidom R113, a u drugom slučaju n-pentanom. Unutrašnji prečnik isparivača je 732 mm, a dubina je 56 mm (pri proračunu strujanje je posmatrano kao dvodimenzionalno, pošto je dubina znatno manja od prečnika). U centralnom delu isparivača je smešten snop od 241 cevi spoljašnjeg prečnika 19 mm. Cevi su raspoređene u 17 redova i 17 kolona u koridornom rasporedu, sa razmakom u horizontalnom i vertikalnom pravcu od 25,4 mm (slika 1).

Granični uslovi na mestu isticanja pare:

$$\frac{\partial v_2}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0$$

Granični uslovi na mestu uticanja tečne faze:

$$\dot{M}_{1,in} = \frac{q_A \cdot A_Q}{h''(p) - h'(p)} \frac{1}{V_m}$$

$$v_1 = v_2 = u_1 = u_2 = 0$$

Protok uticanja (tabela 1) se zadaje na donjoj granici proračunskog domena kao izvorni član sa brzinom uticanja jednakom nuli. Protok isticanja pare je rezultat proračuna. Na mestu isticanja nema promene brzine parne i tečne faze u vertikalnom pravcu. U stacionarnim uslovima u isparivaču protok uticanja će biti jednak produkciji pare. Usvojena je pretpostavka da nema trenja između fluida i prednjeg i zadnjeg zida isparivača.

Proračun je sproveden za dve vrednosti toplotnog fluksa i dva radna fluida (tabela 1). Prvo je simuliran slučaj kada su isparivačke cevi grejane konstantnim toplotnim fluksom od 10 kW/m^2 i za količinu tečnosti u isparivaču koja odgovara uslovima eksperimenta. Za ovu vrednost toplotnog fluksa i fluid R113 sproveden je proračun sa finijom mrežom (80×80) veličine kontrolne zapremine $9,15 \text{ mm} \times 9,15 \text{ mm}$. Da bi se proverila mogućnost korišćenja grublje mreže (40×40) sa kontrolnim zapreminama veličine $18,3 \text{ mm} \times 18,3 \text{ mm}$ i smanjilo vreme računanja u ostalim simulacijama, ponovljen je proračun za isti fluid i isti toplotni fluks. Pošto se rezultati proračuna ne razlikuju mnogo, za ostale simulacije je korišćena grublja mreža.

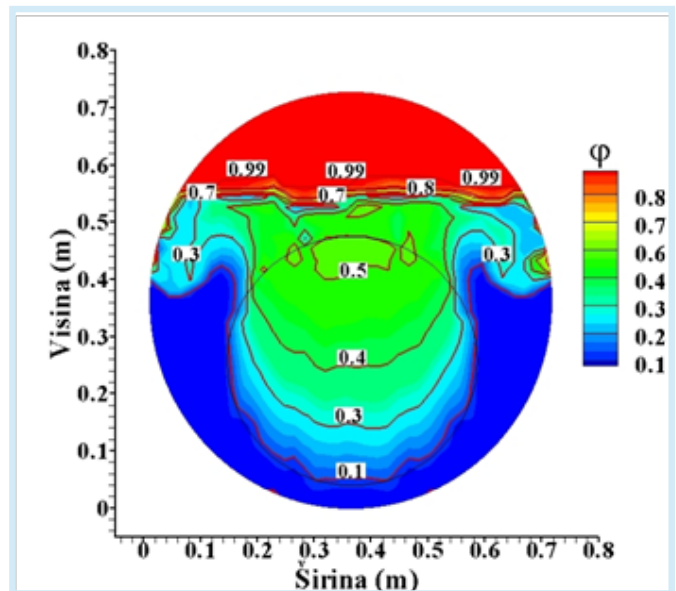
Tabela 1. Vrednosti površinskog toplotnog fluksa i odgovarajući protoci uticanja fluida

Površinski toplotni fluks (kW/m^2)	q_A	10 / 40
Maseni protok uticanja zasićene tečne faze R113 (kg/s)	$M_{1,ul}$	0,056 / 0,224
Maseni protok uticanja zasićene tečne faze n-pentana (kg/s)		0,0225 / 0,090
Temperatura fluida R113 na ulazu ($^{\circ}\text{C}$)	T_{sat}	47,6
Temperatura fluida n-pentan na ulazu ($^{\circ}\text{C}$)		36,2
Pritisak u parnom domu (MPa)	p	0,1

V. Rezultati

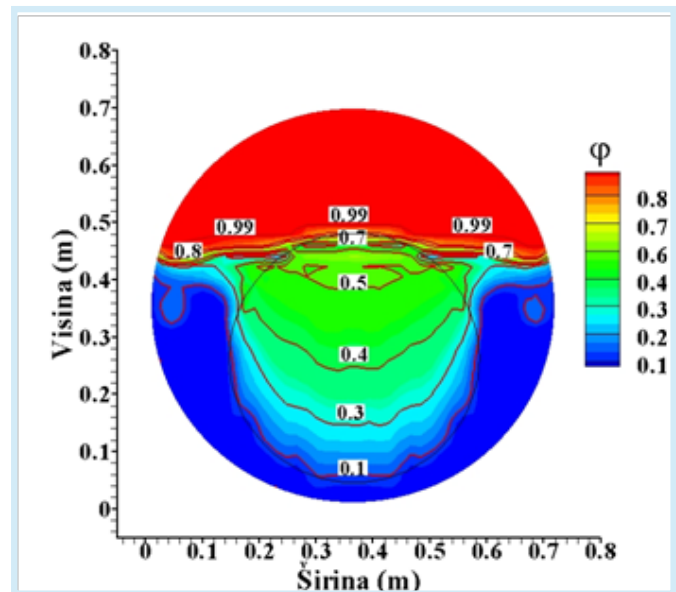
Na slici 3 je prikazan zapreminski udeo pare za dve vrednosti mase tečne faze, a istu vrednost toplotnog fluksa (10 kW/m^2). Proračun je sproveden za dve vrednosti mase tečne faze ($14,6 \text{ kg}$ i $18,6 \text{ kg}$) da bi se video uticaj mase odnosno položaja nivoa dvofazne mešavine na strujnu sliku. Položaj nivoa koji odgovara masi od $18,6 \text{ kg}$ je isti kao u sprovedenom eksperimentu [15]. Ako se uporede iste pozicije u isparivaču, vidi se da se u slučaju manje količine tečne faze javljaju veće vrednosti zapreminskog udela pare, pa tako na primer, zapreminski udeo pare na vrhu cevnog snopa iznosi oko $0,5$ pri masi tečne faze od $18,6 \text{ kg}$, dok je oko $0,7$ pri masi tečne faze od $14,6 \text{ kg}$. Takođe se i nivo tečnosti

u isparivaču razlikuje. Pri većoj masi tečnosti u isparivaču ($18,6 \text{ kg}$) nivo tečnosti je oko 105 mm iznad cevnog snopa, dok je pri masi tečne faze od $14,6 \text{ kg}$ ovaj nivo postavljen neposredno iznad cevnog snopa. Položaj razdelne površine tečne i parne faze se određuje na osnovu predstavljenog modela u odeljku 2, što znači da njegov položaj zavisi od recirkulacije tečne faze i njenog izdvajanja iz vertikalnog toka dvofazne mešavine usled gravitacije.



Slika 3a.

Raspodela zapreminskog udela pare za R113 i masu tečne faze od $18,6 \text{ kg}$ za toplotni fluks od 10 kW/m^2

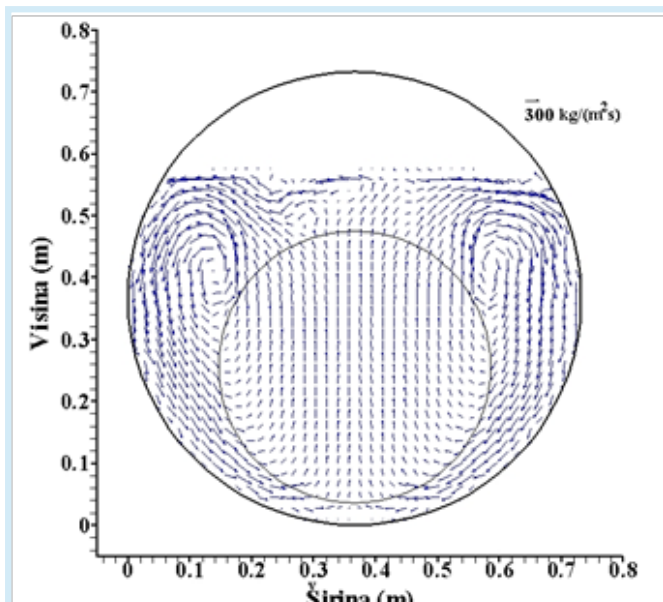


Slika 3b.

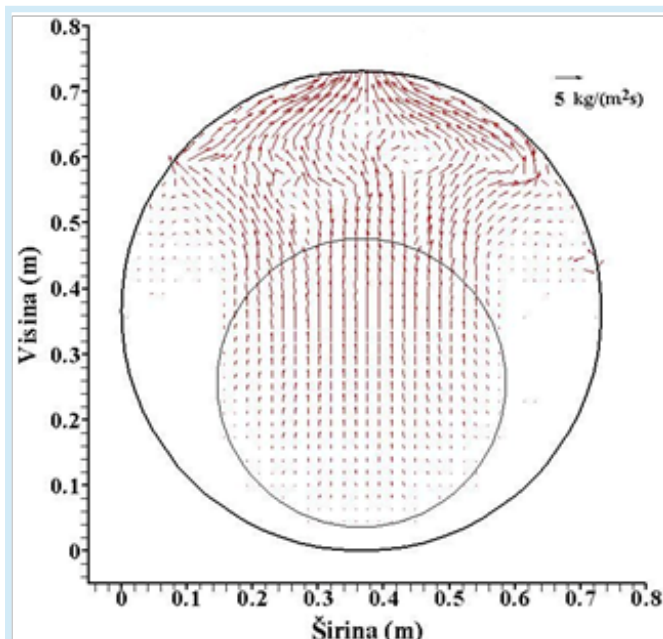
Raspodela zapreminskog udela pare za R113 i masu tečne faze od $14,6 \text{ kg}$ za toplotni fluks od 10 kW/m^2

Zapreminski udeo pare raste duž vertikalnog pravca unutar cevnog snopa i njegova vrednost iznad površine dvofazne mešavine je veća od $0,99$. Primećuje se i da je u delu izvan cevnog snopa zapreminski udeo pare niži. Ovo od-

govara eksperimentalnim rezultatima što se vidi na snimku zabeleženom u toku eksperimenta [15]. Neposredno uz nivo dvofazne mešavine uočavaju se niže vrednosti zapreminskog udela pare, što se slaže sa ranijim istraživanjima [16], gde je primećeno da se pri nižim snagama javlja lokalni maksimum u zapreminskom udelu pare u regionu neposredno iznad cevi.



Slika 4a. Raspodela masenog fluksa tečne faze za R113 i masu tečne faze od 18,6kg



Slika 4b. Raspodela masenog fluksa parne faze za R113 i masu tečne faze od 18,6kg

Maseni fluks tečne i parne faze (određen kao $\alpha \rho v_i$) je prikazan na slici 4. Ovi rezultati su dobijeni istom numeričkom simulacijom kao i rezultati za zapreminski udeo pare na slici 3 (levo), pri toplotnom fluksu od 10 kW/m² i masi tečne faze

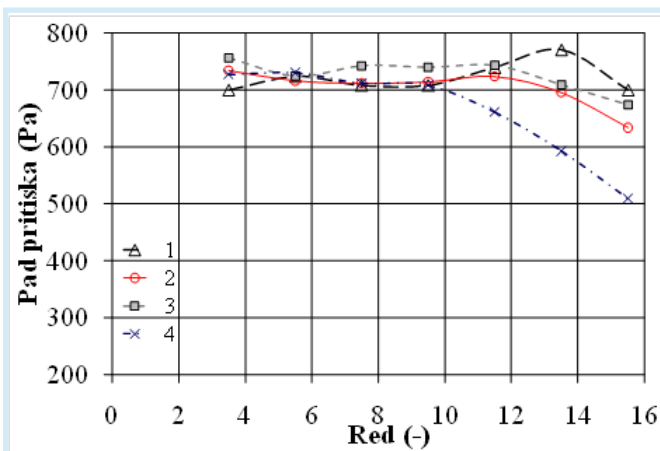
od 18,6 kg. Primećuje se da se tečna faza, koja nije isparila, vraća u isparivač, u prostor između snopa cevi i omotača isparivača. Tečna faza se kroz cevni snop kreće uglavnom vertikalno naviše, i najveće vrednosti masenog fluksa u centralnom delu cevnog snopa dostižu vrednost od 200 kg/m²s. U delu strujnog prostora gde se javljaju vrtlozi i strujanje vertikalno naniže, vrednosti masenog fluksa mogu biti i veće. Para napušta isparivač kroz otvor na vrhu, a usled sile međufaznog tenja i horizontalnih strujnica tečne faze iznad nivoa dvofazne mešavine, jedan deo pare od centra se kreće ka periferiji strujnog prostora.

Na slikama 5 – 8 je prikazano poređenje izmerenih i izračunatih vrednosti pada pritiska između dva susedna merna mesta u centralnom delu isparivača (slika 1, merna mesta između 9. i 10. kolone) za fluide R113 i n-pentan pri toplotnim fliksevima 10 i 40 kW/m².

Za fluid R113, kada je toplotni fluks 10 kW/m² i ukupna masa tečne faze 18,6 kg, pad pritiska između mernih mesta duž centralne kolone je skoro konstantan (slika 5). Isti karakter promene je dobijen za sprovedeni proračun sa grubljom (40x40), kao i sa finijom (80x80) podelom mreže. Razlika u izračunatim vrednostima za pad pritiska u ova dva slučaja ne prelazi 5%, pri čemu je najveća razlika dobijena za najviše merno mesto (red 15,5). Za ostala merna mesta razlika je manja od 3%, zbog čega je radi smanjenja vremena izračunavanja korištena grublja mreža. Vrednost pada pritiska između dva susedna merna mesta se kreće oko 700 Pa. S obzirom da u ukupnom padu pritiska najveću komponentu čini hidrostatički pritisak, ovo ukazuje da se promena hidrostatičkog pritiska ne menja mnogo na rastojanju od dva vertikalna koraka (50,8 mm). Dobijeni rezultati su u skladu sa očekivanjima. Pri manjim vrednostima toplotnog fluksa nisu velike promene zapreminskog udela pare po visini (slika 3, levo), pa posledično ni promena vrednosti hidrostatičkog pritiska na navedenom rastojanju nije značajna. Sa smanjenjem ukupne mase tečne faze pri istoj snazi, vidi se da je promena pritiska između mernih mesta značajnija. Pad pritiska između mernih mesta koja su bliža dnu isparivača je veći u odnosu na merna mesta na većoj visini jer su zapreminski udeli pare pri dnu manji, pa je dominantniji uticaj hidrostatičkog pritiska (slika 3, ukupna masa tečne faze 14,6 kg). Pri manjoj količini tečnosti u isparivaču i istoj snazi, a sa istim graničnim uslovima (isti je i maseni protok uticanja tečne faze i produkcija pare), raspodela zapreminskog udela se razlikuje. Ovo je naročito vidljivo u višim redovima cevi, bližim nivou dvofazne mešavine (slika 3), što se odražava na vrednosti ukupnog pada pritiska. Odavde se vidi da položaj nivoa dvofazne mešavine ima uticaja na pad pritiska, pa je određivanje položaja nivoa računskim putem, a ne njegovo pretpostavljenje pre početka proračuna, bitno za dobijanje realnih rezultata.

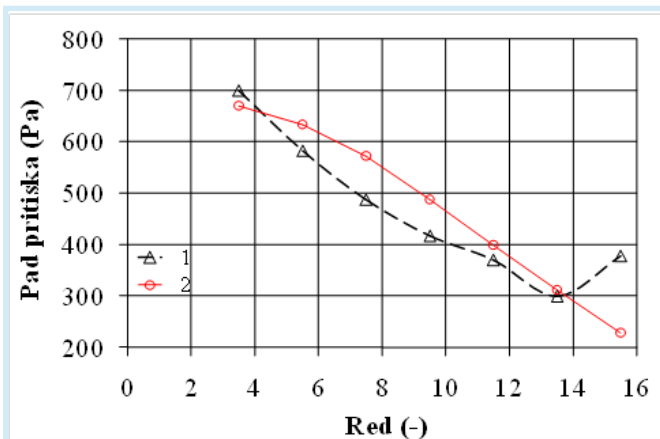
Pri većoj vrednosti toplotnog fluksa veće su i vrednosti zapreminskog udela pare, pa je pad pritiska između dva

susedna merna mesta manji (slika 6). Odstupanja izračunatih od izmerenih vrednosti su u granicama od $\pm 20\%$, osim za najvišu tačku u strujnom prostoru. Veće odstupanje je uslovljeno složenosti penastog turbulentnog dvofaznog toka koji je izražen pri većim snagama u gornjim delovima cev-nog snopa. Masa tečne faze u ovom numeričkom eksperimentu je 10 kg. Veća masa fluida R113 bi uticala na podizanje nivoa dvofazne mešavine i isticanje tečne faze kroz otvor na vrhu isparivača (slika 1), jer veće vrednosti toplotnog fluksa utiču na povećanje zapreminskog udela pare i podizanje nivoa dvofazne mešavine.



Slika 5. Pad pritiska duž središnje kolone isparivača za R113 i za toplotni fluks od 10 kW/m^2

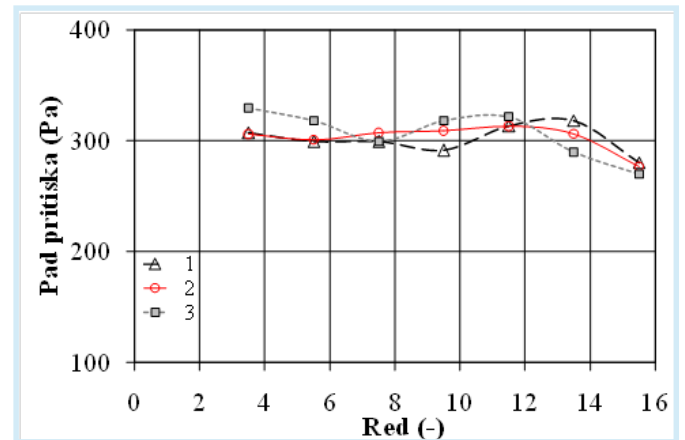
- 1-eksperimentalne vrednosti,
- 2-izračunate vrednosti sa grubljom mrežom i masom tečne faze od $18,6 \text{ kg}$,
- 3- izračunate vrednosti sa finijom mrežom i masom tečne faze od $18,6 \text{ kg}$,
- 4- izračunate vrednosti sa grubljom mrežom i masom tečne faze od $14,6 \text{ kg}$



Slika 6. Pad pritiska duž središnje kolone isparivača za R113 za toplotni fluks od 40 kW/m^2

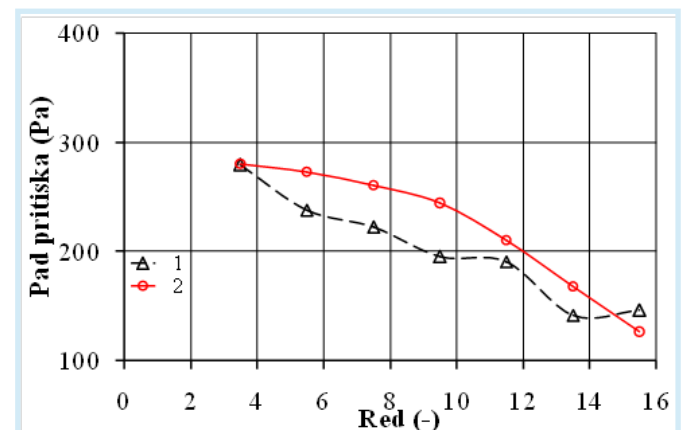
- 1-eksperimentalne vrednosti, 2-izračunate vrednosti sa grubljom mrežom i masom tečne faze od $10,0 \text{ kg}$

Veoma dobro slaganje izmerenih i izračunatih vrednosti je dobijeno i za n-pentan. Pad pritiska pri toplotnom fluk-su od 10 kW/m^2 je skoro konstantan (slika 7). Pri većem toplotnom fluk-su, uočava se manji pad pritiska (slika 8) po vertikali isparivača, što je takođe posledica povećanog zapreminskog udela pare i pada gustine dvofazne mešavine, odnosno pada hidrostatičkog pritiska između mernih mesta. Masa tečne faze fluida u isparivaču je manja u slučaju većeg toplotnog fluksa, da ne bi došlo do odnošenja kapi sa strujom pare iz isparivača.



Slika 7. Pad pritiska duž središnje kolone isparivača za n-pentan toplotni za fluks od 10 kW/m^2

- 1 - eksperimentalne vrednosti, 2 - izračunate vrednosti sa grubljom mrežom, 3 - izračunate vrednosti sa finijom mrežom. Masa tečne faze je $7,5 \text{ kg}$



Slika 8. Pad pritiska duž središnje kolone isparivača za n-pentan i za toplotni fluks od 40 kW/m^2

- 1 - eksperimentalne vrednosti, 2 - izračunate vrednosti sa grubljom mrežom pri masi tečne faze $5,0 \text{ kg}$.

VI. Zaključak

U radu je prikazan model za simulacije i analize dvo-faznog strujanja sa ključanjem u generatorima pare i isparivačima na strani prijemnika toplote. Postupak je zas-

novan na numeričkom rešavanju modela dva fluida, kojim je opisano dvofazno strujanje tečne i parne faze. Model dva fluida se sastoji od bilansnih jednačina mase, količine kretanja i energije za svaku od faza i od konstitutivnih korelacija za određivanje razmene bilansnih veličina na razdelnim površinama tečne i parne faze. Predviđanje zapreminskog udela parne faze u dvofaznom toku u velikoj meri zavisi od pouzdanosti modela za određivanje međufaznog trenja tečnosti i gasne faze. U ovom radu su primenjene poznata korelacije za određivanje koeficijenta međufaznog trenja, koje su ranije korišćene u simulacijama strujanja vode i vodene pare i vode i vazduha, čiji je oblik unapređen tako da je omogućena njihova primena na različite vrste fluida sa različitim termofizičkim karakteristikama. Razvijeni analitički modeli i numerički postupak su validirani za eksperimentalne uslove sprovedene u isparivaču sa horizontalnim cevnom snopom i sa ključanjem rashladnog fluida R113 i n-pentana.

Razvijeni model je primenjen za simulaciju celokupnog strujnog prostora na strani prijemnika toplote u isparivaču, pa je na ovaj način numeričkim simulacijama određen i položaj nivoa dvofazne mešavine i masa tečne faze u isparivaču. Položaj nivoa dvofazne mešavine je određen samo na osnovu rešavanja bilansnih jednačina primenjenog modela dva fluida i odgovarajućih modela razmene bilansnih veličina na razdelnim površinama faza, što omogućava predviđanje gravitacionog razdvajanja pare koja struji dominantno naviše i tečnosti koja recirkuliše na površini dvofazne mešavine. Razvijeni postupak je unapređenje u odnosu na do sada poznate modelske pristupe, koji su zasnovani na unapred zadatom položaju nivoa dvofazne mešavine i na pretpostavkama o zapreminskom udelu pare na granici dvofazne mešavine prema parnom domu koji se nalazi iznad. U okviru validacije razvijenih modela i numeričkog postupka, upoređene su sračunate i izmerene vrednosti promene pritiska duž centralne kolone između redova cevi koje se nalaze u linijskom rasporedu u cevnom snopu. Dobijeno je dobro slaganje, što ukazuje na pouzdano predviđanje i prostorne raspodele zapreminskog udela pare. Naime, promene pritiska u uslovima prirodne cirkulacije su određene pre svega gustinom dvofazne mešavine, pri čemu gustina zavisi od zapreminskog udela pare.

Takođe, dobijeni numerički rezultati pokazuju očekivanu zavisnost da povećanje toplotnog fluksa na cevima u snopu dovodi do povećanja zapreminskog udela pare, tako da se sa povećanjem toplotne snage i protoka generisane pare mora smanjiti masa tečnosti na sekundarnoj strani generatora pare kako ne bi došlo do povećanja nivoa dvofazne mešavine i povećanja vlažnosti pare na izlazu iz generatora pare. Takođe, smanjenje mase tečnosti na sekundarnoj strani generatora pare dovodi do povećanja zapreminskog udela pare u gornjem delu snopa cevi i obratno, sa povećanjem

mase tečnosti smanjuje se zapreminski udeo pare.

Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da razvijeni postupak proračuna termohidrauličkih uslova na sekundarnoj strani isparivača omogućava potpuno sagledavanje polja brzina tečne i parne faze, polja pritiska, prostorne raspodele zapreminskog udela pare, kao i određivanje položaja nivoa dvofazne mešavine i mase tečnosti. Ovi rezultati su neophodna podloga za termohidrauličke analize sigurnosti rada generatora pare i isparivača, odnosno za projektovanje i definisanje operativnih procedura pogona generatora pare u cilju ostvarenja visoke pouzdanosti i efikasnosti rada.

NOMENKLATURA

Aq	površina za prenos toplote sa predajnika na prijemnik toplote
a	međufazna razdelna površina,
C_D	koeficijent međufaznog trenja
D	prečnik
F	sila po jedinici kontrolne zapremine
f	Fanning-ov koeficijent
G	maseni fluks
g	ubrzanje zemljine teže
h	entalpija
M	izvor mase
p	pritisak
q	zapreminski toploni fluks
q_A	površinski toplotni fluks
T	temperatura
t	vreme
$\vec{u} (u, v)$	brzina
V_{in}	predstavlja ukupnu zapreminu kontrolnih zapremina kroz koje se uvodi tečna faza

Grčki simboli

α	zapreminski udeo pare
Γ	brzina isparavanje/kondenzacije,
ζ	koeficijent lokalnog otpora
μ	dinamička viskoznost
ρ	gustina
σ	površinski napon
τ	relaksaciona konstanta
φ	zapreminski udeo pare u prostoru u kome se nalazi samodvofazna mešavina

indeksi

H_2O	voda
isp	isparavanje
$kond$	kondenzacija
ul	ulaz
1	tečna faza
2	parna faza
3	cevi
'	ključala tečnost
“	zasićena para

Literatura

- [1] **Gebbie, J.G., Jensen, M.K.**, *Void fraction distributions in a kettle reboiler*, *Experimental Thermal Fluid Science* 14 (1997) 297–311
- [2] **Stevanovic, V., Stosic, Z., Kiera, M., Stoll, U.**, *Numerical Simulation and Analyses of the Loss-of-Feedwater Transient at the Unit 4 of Kola NPP*, *Proceedings of the Tenth International Conference on Nuclear Engineering*, ASME, Washington, D.C., USA, 2002, pp. 781-792.
- [3] **Khushnood, S., Khan, Z. M., Malik, M. A., Koreshi, Z. U., Khan, M. A.**, *A review of heat exchanger tube bundle vibrations in two-phase cross-flow*, *Nuclear Engineering and Design* 230 (2004) 233–251.
- [4] **Edwards, D.P., Jensen, M.K.**, *A two-dimensional numerical model of two-phase heat transfer and fluid flow in a kettle reboiler*, *Phase Change Heat Transfer ASME* 159, (1991) 9-16
- [5] **Rahman, F.H., Gebbie, J.G., Jensen, M.K.**, *An interfacial friction correlation for shell-side vertical two-phase cross-flow past horizontal in-line and staggered tube bundles*, *International Journal of Multiphase Flow* 22 (1996) 753–766.
- [6] **Pezo, M., Stevanovic, V., Stevanovic, Z.**, *A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (7-8) (2006) 1214-1224
- [7] **Stosic, Z. Stevanovic, V.**, *Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries*, *Numerical Heat Transfer, Part A* 41 (2002) 263–289.
- [8] **Simovic, Z., Ocokoljic, S., Stevanovic, V.**, *Interfacial friction correlation for two phase flow across tube bundle*, *International Journal of Multiphase flow* 33 (2007) 217-226.
- [9] **McNeil, D. A., Bamardouf, K., Burnside, B. M.**, *Two-dimensional flow modelling of a thin slice kettle reboiler*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 1907-1923.
- [10] **Nerovnov, A. A., Parfenov, Yu. V., Melikhov, V. I., Melikhov, O. I.**, *A comparative analysis of the calculation expressions for a two-velocity model describing two-phase flow of steam-water mixture across a tube bundle*, *Thermal Engineering* 59 (9) 2012 762-729
- [11] **Melikhov, V., Melikhov, O., Parfenov, Yu., Nerovnov, A.**, *Simulation of the Thermal Hydraulic Processes in the Horizontal Steam Generator with the Use of the Different Interfacial Friction Correlations*, *Science and Technology of Nuclear Installations* 2011 (2011), Article ID 181393 (doi:10.1155/2011/181393)
- [12] **Maslovaric, B., Stevanovic, V., Milivojevic, S.**, *Numerical Simulation of Two-Dimensional Kettle Reboiler Shell Side Thermal-Hydraulics with Swell Level and Liquid Mass Inventory Prediction*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75 (2014) 109-121
- [13] **Maslovarić, B., Stevanović, V., Prica, S., Stošić, Z.**, *Vertical Steam Generator Thermal-Hydraulics: CMFD Numerical Simulation and Verification*, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Nuclear Engineering*, ASME, Tokyo, Japan, 2003, Paper ICONE 11-36491.
- [14] **Patankar, S.V.**, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere*, New York, 1980
- [15] **McNeil, D. A., Bamardouf, K., Burnside, B. M., Almeshaal, M.**, *Investigation of flow phenomena in a kettle reboiler*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (2010) 836-848
- [16] **Schrage, D.S., Hsu, J.T., Jensen, M.K.**, *Void fractions and two-phase Friction Multipliers in a Horizontal Tube Bundle*, *AIChE Symposium Series*, 257 (83) (1987) 1-8.

Autor

Blaženka MASLOVARIĆ,
 Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet,
 Kraljice Marije 16, Beograd
 bmaslovaric@mas.bg.ac.rs

Vladimir STEVANOVIĆ,
 Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet,
 Kraljice Marije 16, Beograd
 vstevanovic@mas.bg.ac.rs

Sanja MILIVOJEVIĆ
 Inovacioni centar
 Mašinskog fakulteta u Beogradu,
 Kraljice Marije 16, Beograd
 smilivojevic@mas.bg.ac.rs

Milan M. PETROVIĆ
 Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet,
 Kraljice Marije 16, Beograd
 mlpetrovic@mas.bg.ac.rs