

# Modeliranje prelaznih procesa i ponašanja stanice sa tečnim kiseonikom

Mr Ivana Draškić, dipl. inž., PIM-PROJEKT, Čika-Ljubina 8, 11000 Beograd, i  
 dr Milovan Studović, dipl. inž., i  
 dr Vladimir Stevanović, dipl. inž.,  
 Mašinski fakultet, 27. marta 80, 11000 Beograd

*Pouzdanost funkcionisanje opreme počiva na usklađenom odvijanju i međusobnom delovanju termodinamičkih i strujno-dinamičkih procesa i pojava. Na primeru stanice tečnog kiseonika, izložena je metodologija numeričke simulacije ponašanja stanice u realnim uslovima potrošnje gasa, sa ciljem utvrđivanja projektnih podloga za dimenzionisanje sistema, izbora sistema zaštite opreme i sistema regulisanja i upravljanja. Analiza obuhvata strujno-termičke procese i pojave, fazni prelaz i dvofazno strujanje za propisane uslove razmene toplote. Numeričkom simulacijom prelaznih stanja i poremećenih uslova utvrđen je značajan uticaj intenziteta potrošnje gasa, temperature okoline i funkcionisanja sistema regulisanja na parametre procesa u stanici tečnog kiseonika.*

## Nomenklatura

- $c$  – brzina zvuka (m/s)
- $D_H$  – hidraulički radijus (m)
- $f$  – koeficijent trenja između homogenog fluida i zida cevi
- $g$  – gravitaciona konstanta (m/s<sup>2</sup>)
- $h$  – specifična entalpija (J/kg)
- $\theta$  – nagib prema horizontali meren u pozitivnom matematičkom smeru
- $p$  – pritisak (bar)
- $q$  – zapreminski toplotni fluks (W/m<sup>2</sup>)
- $t$  – vreme (s)
- $u$  – brzina fluida (m/s)
- $x$  – prostorna koordinata (m)
- $\rho$  – gustina (kg/m<sup>3</sup>)

## Uvod

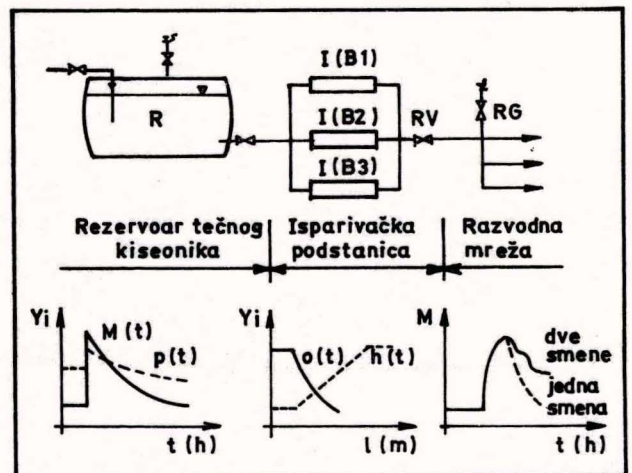
Modelske analize i kompjuterska simulacija pojava i procesa koji se odvijaju u energetske i procesnoj opremi tokom radnih uslova ili poremećenih stanja, su jedna od savremenih metoda koja je sastavni deo projektovanja postrojenja i sigurnosno-zaštitnih i regulacionih sistema, definisanja operativnih procedura pogona i analiza sigurnosti i efikasnosti rada. Objekti modelskih analiza su za transport nosilaca energije (termo i nuklearne elektrane), sistemi za transport nosilaca energije (toplovodi, gasovodi, naftovodi) i tako

dalje [1, 2, 3]. Ovaj rad je posvećen metodama i rezultatima modelske analize promenljivih i prelaznih uslova rada isparivačke stanice tečnog kiseonika. Analize su sprovedene za postrojenje u rečnom brodogradilištu "Sava" u Mačvanskoj Mitrovici. U ovom radu su opisane operativne procedure rada stanice uz sagledavanje uticaja potrošača i okoline.

Specifičnost eksploatacije stanice tečnog kiseonika u odnosu na druga procesna postrojenja je u tome što se procesi odvijaju na visokom temperaturnom nivou i sa tečnom i gasovitim fazom, pošto ekonomičnost nalaže transport i skladištenje tečnog kiseonika. To se ostvaruje na niskim temperaturama i uz odgovarajuću izolaciju sudova i komponenti, dok potrošnja zahteva gasoviti kiseonik odgovarajućih parametara, koji se dobija u isparivačima, u kojima adijabatski struji dvofazna mešavina. Rad sa tečnim kiseonikom i potreba održavanja potkritičnih parametara, nalaže posebne sigurnosne mere pri projektovanju i eksploataciji postrojenja, kao i odgovarajuću obučenosť pogonskog osoblja. Analize sprovedene u ovom radu obuhvataju termodinamičke pojave (intenzitet isparavanja tečnog kiseonika), strujno-dinamičke procese u sredini dvofazne mešavine (dvofazna strujanja praćena intenzivnim ubrzanjem, dekompresijom i zagušenjem struje), a termički uslovi su kao granični propisani, saglasno uslovima okoline. Saglasno funkciji isparivačke stanice, idealizovanom fizičkom sistemu i analiziranim uticajnim procesima, pristupilo se analizi koja je modelska i deterministička.

## Funkcionisanje isparivačke podstanice

Na slici 1. je šema sistema stanice tečnog kiseonika. Stanica obuhvata: rezervoar tečnog kiseonika, isparivačke podstanice koje čine baterije isparivača i razvodne mreže gasovitog kiseonika do potrošača. Rezervoar za tečni kiseonik je ver-



Slika 1. Šema fizičkog sistema stanice tečnog kiseonika

tikalni i cilindrični i sastoji se iz dva suda: unutrašnjeg, koji služi za skladištenje tečnog kiseonika, i spoljašnjeg. Između ova dva suda je kvalitetna, nazapaljiva vakuumska izolacija sa suvim perlit-prahom, koja gubitke tečnog kiseonika usled isparavanja u rezervoaru svodi na najmanju moguću meru. Isparivač potrebne količine tečnog kiseonika pretvara u gasnu fazu, koristeći energiju okoline. Svaki isparivač se sastoji iz niza orebrenih cevi koje obrazuju dovoljnu površinu za razmenu toplote. Diskontinualni karakter punjenja rezervoara tečnim kiseonikom (višednevne zalihe) i korišćenje gasovitog kiseonika (tokom prve, druge i eventualno treće smene), menjaju parametre tečnog kiseonika u rezervoaru (slika 1). U zavisnosti od obima korišćenja gasovitog kiseonika tokom dana, kapacitet isparivača može značajno da varira. Ovakva dinamika skladištenja korišćenja kiseonika ukazuje da su strujno-termički procesi u isparivačima i razvodnom cevovodu izrazito nestacionarnog karaktera. Sa stanovišta regulisanja i upravljanja ovakvom opremom, posebni interes predstavljaju vremenske i prostorne promene protoka fluida, kao i prostiranje talasa pritiska uzvodno i nizvodni, pri drastičnim promenama protoka gasa na mestima korišćenja.

### Osnove fizičkog i matematičkog modela

Fizički model procesa u isparivačkoj podstanici podrazumeva: jednofazno, homogeno, jednodimenziono, nestacionarno, dvofazno strujanje, kroz cevi konstantnog poprečnog preseka, krute strukture i kao takvo opisuje se bilansnim jednačinama i jednačinom stanja u sledećem obliku [4, 5]:

Jednačina bilansa mase

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Jednačina količine kretanja

$$\frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f u |u|}{2D_H} + g \sin \Theta = 0$$

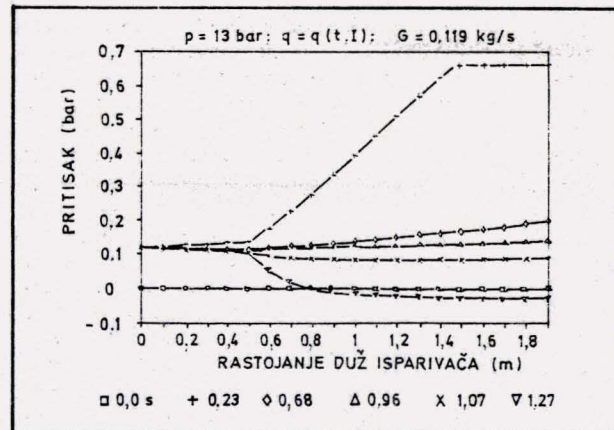
Jednačina bilansa energije

$$\frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt} - \frac{f u^2 |u|}{2D_H} + g u \sin \Theta - \frac{q}{\rho} = 0$$

Jednačina stanja

$$\rho = \rho(p, h)$$

Ovo je sistem kvazilinearnih, parcijalnih, diferencijalnih jednačina hiperboličnog tipa, gde su zavisno-promenljive brzina, pritisak i entalpija, a nezavisno-promenljive vreme i prostorna koordinata. Sistem jednačina se dopunjava početnim i graničnim uslovima. Na ovaj način zaokružen problem se rešava primenom neke od numeričkih metoda, a kao vrlo pogodan je metod karakteristika. Rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina duž karakterističnih pravaca dobijaju se



Slika 3. Model KISEONIK – dijagram protoka

vrednosti parametara duž cevovoda tokom vremena. Promene se prate u prostorno-vremenskoj koordinatnoj ravni, pri čemu su prostorni i vremenski korak integracije povezani preko Courantovog kriterijuma stabilnosti rešenja:

$$\Delta t = \min \left( \frac{\Delta x}{c_j + |u_j|} \right)$$

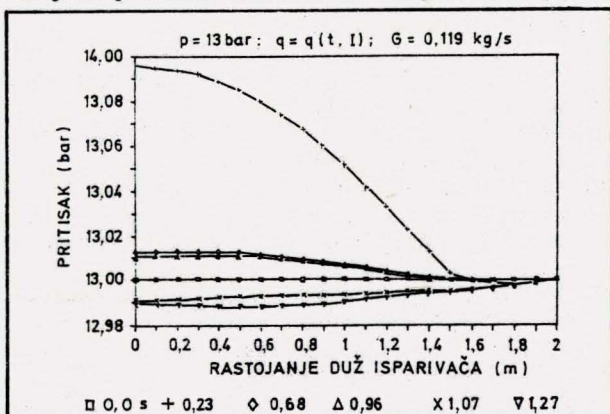
Postupak rešavanja je eksplicitan, jer se vrednosti parametara u prethodnom vremenskom trenutku ( $t$ ) koriste kao početne vrednosti za određivanje parametara u narednom vremenskom trenutku ( $t + \Delta t$ ).

### Rezultati modelske analize

Sprovedena je simulacija u cilju praćenja dva značajna fenomena: prostiranje talasa pritiska i prostiranje fronta isparavanja u isparivačkoj podstanici. Specificiran je granični uslov koji definiše konstantni maseni protok na mestu spoja isparivača sa rezervoarom, dok je pritisak na izlazu iz isparivačke sekcije konstantan. Vrednost zapreminskog toplotnog fluksa u isparivačima se menja prema:

$$q(t) = \begin{cases} 185 t & (\text{MW/m}^3); & 0 \leq t \leq 0,2 \text{ s} \\ 37 & (\text{MW/m}^3); & 0,2 \text{ s} < t < 1,0 \text{ s} \\ 222 + 185 t & (\text{MW/m}^3); & 1,0 \text{ s} \leq t \leq 1,2 \text{ s} \end{cases}$$

Za uslove intenzivnog zapreminskog toplotnog fluksa odvija se ispravanje i pritisak struje mešavine raste duž isparivača (slika 2 – vremenski trenutak  $t = 0,23$  s). Na slici 3. uočava se da vrednosti protoka odgovaraju promenama pritiska. Osnovni motiv za simulaciju ponašanja isparivačke stanice tečnog kiseonika je bio da se za propisane uslove izvora toplote (zapreminski toplotni fluks) oceni efikasnost delovanja isparivača i mogućnost nastajanja i prostiranja talasa pritiska duž isparivačke podstanice. Rezultati numeričke simulacije potvrđuju veoma izražen uticaj izvora toplote na efikasnost rada isparivačke podstanice. Prostiranje poremećaja pritiska duž isparivačkog dela dovodi do pozitivnog gradijenta pritiska, pa i povratnog strujanja ( $t = 0,96$  s; slike 2. i 3), s obzirom da potrošač ne može da prihvati sav generisani gasovit kiseonik. Imajući u vidu da u isparivačkom kanalu postoji intenzivna promena gustine mešavine i visoka vrednost zapreminske koncentracije parne faze, kompjuterski program KISEONIK zahteva veoma mali prostorni korak, u cilju obezbeđenja stabilnosti rešavanja, a s tim u vezi i mali vremenski korak integracije. Ova ograničenja i potreba za analizom stacionarnih uslova i sporih prelaznih procesa (delovanje poremećaja niskog intenziteta), bili su motiv da



Slika 2. Model KISEONIK – distribucija pritiska

se razviju drugi matematički modeli (HOST - za simuliranje stacionarnih uslova i HONT - za simuliranje nestacionarnih uslova), kod kojih pojava prostiranja talasa pritiska nema značajnijeg uticaja na parametre procesa u isparivačkom kanalu. Saglasno osnovnim bilansnim jednačinama termohidrauličnih procesa i stava da za stacionarne uslove važi  $\partial p/\partial t = \partial u/\partial t = \partial h/\partial t = 0$ , formiran je matematički model HOST (4). Program HOST je iskorišćen za sprovođenje numeričkih eksperimenata, za utvrđivanje parametara procesa u isparivačkoj podstanici, za promenljive režime potrošnje gasovitog kiseonika. Sproveden je numerički eksperiment povećavanja potrošnje, sa ciljem da se utvrde veličine stanja gasa i maksimalni protok isticanja i oceni dinamika pražnjenja rezervoara tečnog kiseonika. Otvor na mestu isticanja odgovara punom poprečnom preseku cevovoda na liniji isparivača ( $r^* = 37$  m), a vrednost ulazne brzine tečnosti iz rezervoara povećana je do nivoa dok na mestu isticanja nije uspostavljeno kritično strujanje, koje je detektovano jednakošću brzine strujanja i brzine prostiranja zvuka u struji mešavine ( $u^* = c^*$ ). Simulacija je takođe sprovedena za tri vrednosti toplotnog fluksa, sa ciljem da se utvrdi uticaj meteoroloških uslova na maksimalni protok pri isticanju. Bez obzira na navedene varijacije, maksimalni protoci na mestu isticanja su vrlo bliski ( $G \approx 0,4$  kg/s). U svim eksperimentima lokalni pritisak na mestu isticanja iznosi  $p^* = 2,41$  bara (slika 4).

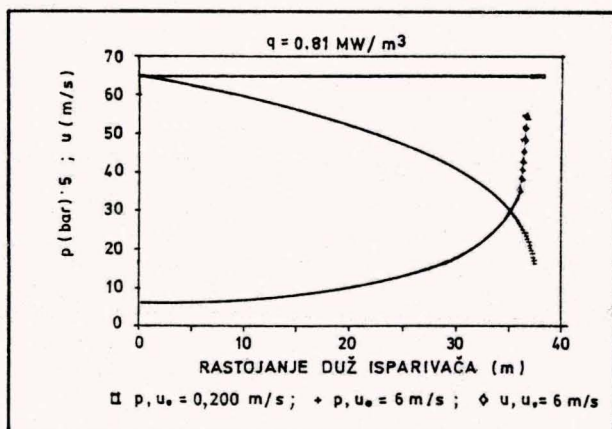
Za simulaciju sporih prelaznih termohidrauličnih procesa bilansne jednačine su transformisane saglasno sledećim pretpostavkama:  $\partial u/\partial t \approx 0$ ;  $\partial p/\partial t \approx 0$  (model HONT (4)). HONT polazi od stava da će se analizirati spori poremećaji, u cilju praćenja fronta entalpije mešavine i da se promena pritiska kroz struju mešavine prenosi trenutno. Simulirana je dinamika zatvaranja ventila iza isparivačke sekcije, takva da se protok na ulazu u razvodnu instalaciju menja od nominalne vrednosti do potpunog zatvaranja i potom ponovnog otvaranja ventila, prema:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{10-t}{2} \text{ [m/s];} & 0 \leq t \leq 10 \text{ s} \\ \frac{t-10}{2} \text{ [m/s];} & 10 \leq t \leq 20 \text{ s} \end{cases}$$

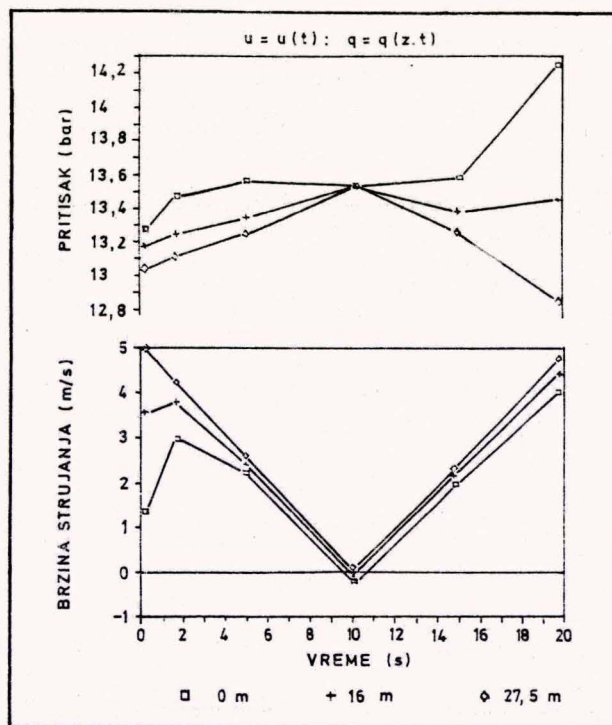
Tokom ovog eksperimenta istovremeno je varirana veličina zapreminskog toplotnog fluksa, sa ciljem da se simulira ponašanje isparivačke sekcije, pomoću kvazistacionarnog modela za navedene poremećaje u isparivaču:

$$q(t) = \begin{cases} -0,6t + 1,35 \text{ (MW/m}^3\text{);} & 0 \leq t \leq 2 \text{ s} \\ 0,135 \text{ (MW/m}^3\text{);} & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

Rezultat na slici 5. pokazuje smanjivanje brzine strujanja usled intenzivnog smanjivanja vrednosti zapreminskog top-



Slika 4. Model HOST - "zagušenje" dvofazne mešavine



Slika 5. Model HONT - regulacija protoka

lotnog fluksa i smanjenja isparavanja. Pritisak raste usled zatvaranja ventila do 10 s. Značajnije uvećanje pada pritiska duž isparivača pri kraju eksperimenta je posledica dva istovremena efekta: povećanja gustine i protoka mešavine.

## Zaključak

Razvijeni matematički modeli i kompjuterski programi se mogu koristiti za potrebe projektovanja sistema i opreme sa stanovišta analize pogonskih uslova postrojenja kao podloge za projektovanje. Razvijenim modelima omogućena je simulacija strujno-termičkih procesa za uslove vrlo intenzivnih (model KISEONIK), ili sporih poremećaja (model HONT), kao i u stacionarnim uslovima rada (model HOST). Dalji razvoj modelskog izučavanja ponašanja stanice tečnog kiseonika treba usmeriti na uključivanje u analizu termičkih efekata, pre svega razmene toplote između strukture i okoline, sa ciljem utvrđivanja efekata akumulacije energije u strukturi opreme i sredini fluida i sračunavanja stvarnog toplotnog fluksa na granici zid-fluid, duž isparivačke podstanice, za odgovarajuće uslove okoline.

## Literatura

- [1] MONEIM, M. T. A., Chang, J. M., Fistedis, S. H.: *Computer Modeling of Piping Components for Transient Hydrodynamic-Structural Response*, Nuclear Engineering and Design, Vol.49, 1978.
- [2] SEROV, E. P., Koroljkov, B. P.: *Dinamika parogeneratorov*, Energoizdat, Moskva, 1981.
- [3] STUĐOVIĆ, M., Stevanović, V., Stevanović, D., Pavlović, Ž., Draškić, I.: *Numerička simulacija i analiza termo-hidrauličkih procesa i ponašanja opreme pri udesu loma parovoda na TE Drmno (1)*, studija, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [4] DRAŠKIĆ, I.: *Modeliranje ponašanja sistema razvoda kiseonika u okviru stanice tečnog kiseonika*, magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd, 1992.