

# POVEĆANJE HIDRAULIČKOG OTPORA U CEVNOM SISTEMU PROTOČNOG PARNOG KOTLA USLED ZAPRLJANJA: NA PRIMERU PARNOG BLOKA SNAGE 650 MWe KOJI SAGOREVA LIGNIT

Vladimir Stevanović<sup>1)</sup>, Sanja Milivojević<sup>1)</sup>, Milan M. Petrović<sup>1)</sup>, Milica Ilić<sup>2)</sup>,

<sup>1)</sup>Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd,

<sup>2)</sup>Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd;



# Uvod

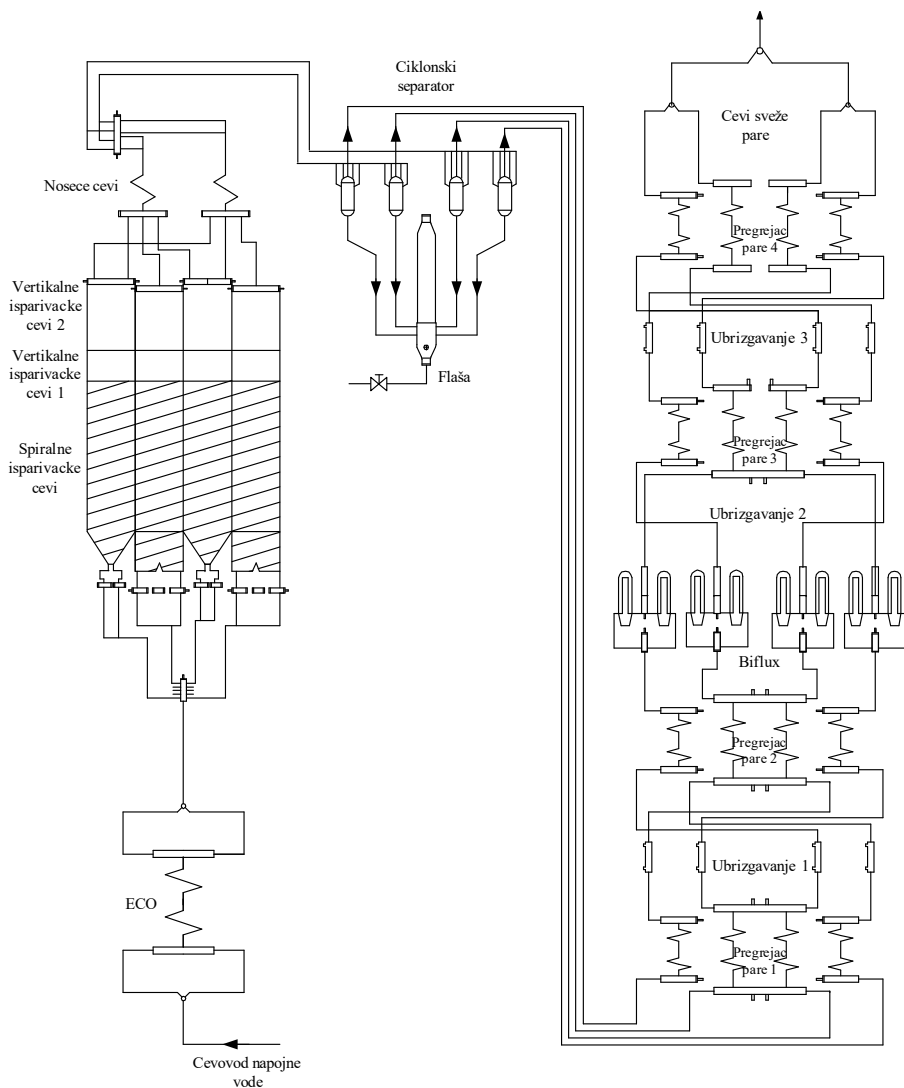
- Jednoprotočni parni kotlovi se najčešće koriste u termoelektranama na uglj velikog kapaciteta.
- Kod njih se javlja povećan pad pritiska u cevnom sistemu tokom radnog veka usled formiranja talasastih slojeva magnetita u cevima u kojima se javljaju velike brzine.
- Ovakvo nepoželjno ponašanje je uočeno u Termoelektrani „Nikola Tesla B“, snage 650 MWe, koja sagoreva sprášeni lignit, nakon dužeg perioda rada bez hemijskog čišćenja cevnog sistema.
- Postoji potreba za kvantifikacijom ovih termohidrauličnih efekata kao podrška održavanju i remontima.



# Ciljevi

- Razvoj i primena efikasnog modela za predviđanje termohidraulike cevnog sistema kotla i hidrauličke hrapavosti cevi.
- Validacija sračunate hidrauličke i apsolutne hrapavosti zida cevi sa izmerenim padom pritiska i rezultatima mikroskopskog ispitivanja uzoraka cevi.
- Predviđanje debljine sloja zaprljanja, kao podrška planiranju hemijskog čišćenja koje se mora primeniti za čišćenje cevnog sistema.





## Cevni sistem na liniji zagrevanja i isparavanja vode i pregrevanja pare na protočnim kotlovima

### Projektni parametri parnog bloka

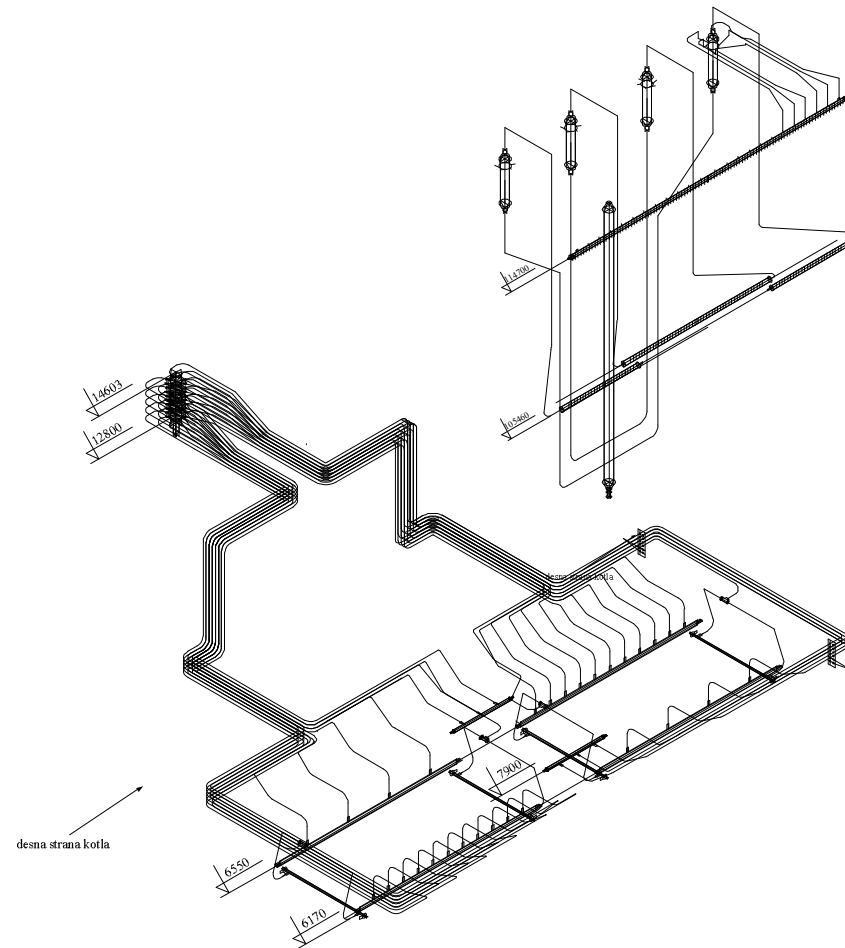
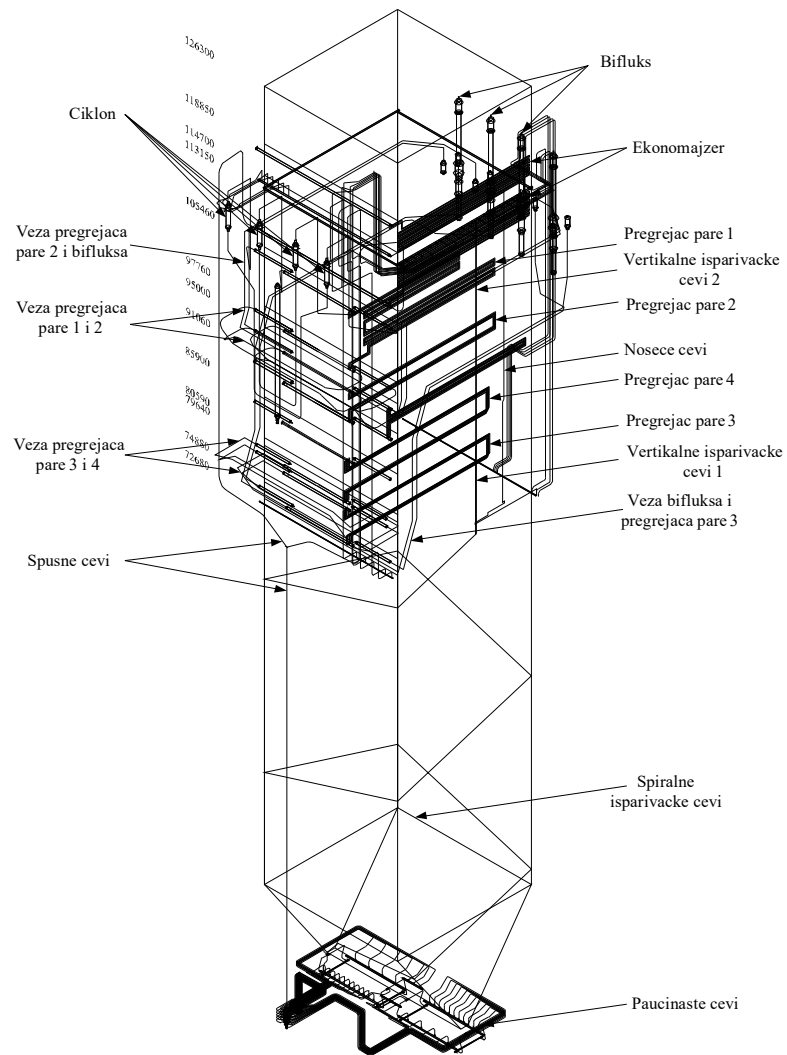
Maseni protok sveže pare	522 kg/s
Pritisak sveže pare	186 bar
Temperatura sveže pare	540 °C
Temperatura napojne vode	260 °C
Maseni protok dogrejane pare	473 kg/s
Pritisak dogrejane pare na izlazu	42 bar
Temperatura dogrejane pare na izlazu	540 °C
Temperatura dimnog gasa na izlazu iz kotla	160 °C



**SET**  
SAMIT ENERGETIKE TREBINJE

**Procesing '22 1–3. jun 2022, Beograd**

# Izometrijski prikaz cevnog sistema kotla



**SET**  
SAMIT ENERGETIKE TREBINJE

**Procesing '22 1-3. jun 2022, Beograd**

# Termohidraulički model strujanja u cevnom sistemu jednoprotičnog kotla

- Bilans mase

$$\frac{d(\alpha_1 \rho_1 u_1)}{dx} = \Gamma_{21} - \Gamma_{12} \quad \frac{d(\alpha_2 \rho_2 u_2)}{dx} = -\Gamma_{21} + \Gamma_{12}$$

- Bilans količine kretanja

$$\frac{d(\alpha_1 \rho_1 u_1^2)}{dx} + \alpha_1 \frac{dp}{dx} = a_{21} \tau_{21} - a_{1z} \tau_{1z} + \Gamma_{21} u_2 - \Gamma_{12} u_1 - \alpha_1 \rho_1 g \sin \theta$$

$$\frac{d(\alpha_2 \rho_2 u_2^2)}{dx} + \alpha_2 \frac{dp}{dx} = -a_{21} \tau_{21} - a_{2z} \tau_{2z} + \Gamma_{12} u_1 - \Gamma_{21} u_2 - \alpha_2 \rho_2 g \sin \theta$$

- Bilans energije

$$\frac{d(\alpha_1 \rho_1 h_1 u_1)}{dx} = (\Gamma_{21} - \Gamma_{12}) h'' + \dot{q}_{v1} \quad \frac{d(\alpha_2 \rho_2 h_2 u_2)}{dx} = (\Gamma_{12} - \Gamma_{21}) h'' + \dot{q}_{v2}$$



## Konstitutivne korelacije u modelu dvofaznog strujanja

Mehurasti tok (zapreminski udeo pare $\leq 0,3$ )	
Koncentracija razdelne površine fluida i zida	$a_{kz} = \frac{4\alpha_k}{D_h}, \quad k=1,2, \quad D_h = \frac{4A}{S}, \quad k=1,2 \quad (15)$ $A = \pi D^2 / 4, \quad S = \pi D$
Napon trenja na zidu	$\tau_{kz} = \frac{1}{4} f_{kz} \frac{\rho_k  u_k  u_k}{2}, \quad k=1,2, \quad (16)$ $f_{kz} = \frac{1}{\left( -1.8 \log_{10} \left( \frac{6,9}{\text{Re}_k} + \left( \frac{\varepsilon}{3,7 D_h} \right)^{1,11} \right) \right)^2} [7]$ $\text{Re}_k = \frac{\rho_k u_k D_h}{\mu_k}$
Koncentracija razdelne površine vode i pare	$a_{21} = 6 \frac{\alpha_2}{D_B} \quad (17)$ <p>maksimalni prečnik mehura <math>D_{B,\max} = 31,68 D_h^{2/5} \left( \frac{\sigma}{\rho_2} \right)^{3/5} \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/5} u_m^{6/5}</math></p> <p>srednji prečnik mehura <math>D_B = 0.0615 D_{B,\max}</math></p> <p>srednja brzina dvofaznog strujanja <math>u_m = (\alpha_1 \rho_1 u_1 + \alpha_2 \rho_2 u_2) / \rho_m</math></p> $\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$
Napon međufaznog trenja	$\tau_{21} = \frac{1}{8} \rho_1 f_{21}  u_2 - u_1  (u_2 - u_1) \quad (18)$ $f_{21} = \frac{24}{\text{Re}_B} (1 + 0.15 \text{Re}_B^{0,687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \cdot 10^4 \text{Re}_B^{-1,16}},$ $\text{Re}_B = \frac{ u_2 - u_1  D_B \rho_1}{\mu_1}$



## Konstitutivne korelacije u modelu dvofaznog strujanja

Brzina isparavanja	$\Gamma_{21} = \frac{1}{\tau_e} \frac{h_1 - h'}{h'' - h'} \quad (19)$
Prelazni oblik (zapreminski udeo pare > 0,3)	
Koncentracija razdelne površine fluid-zid	Isti model kao u slučaju mehurastog toka, jed. (15)
Napon trenja na zidu	Isti model kao u slučaju mehurastog toka, jed. (16)
Međufazno trenje	$a_{21}\tau_{21} = \frac{3}{4}\alpha_1\rho_2\frac{C_D}{D_p} u_1 - u_2 (u_1 - u_2), \quad (20)$ $C_D = 0.7D_p\left(\frac{(\rho_2 - \rho_1)g}{\sigma}\right)^{0.5}(1 - \alpha_1)^3(1 - 0.75\alpha_1)^2$
Brzina isparavanja	Isti model kao u slučaju mehurastog toka, jed. (19)

Na mestima diskontinuiteta su formirani konačni bilansi.

Bilans mase

$$\Delta(\rho u A) = 0$$

Bilans količine kretanja

$$\Delta\left(\frac{\rho u^2}{2}\right) + \Delta p = \Delta p_l$$

Bilans energije

$$\Delta\left(h + \frac{1}{2}u^2\right) = 0$$

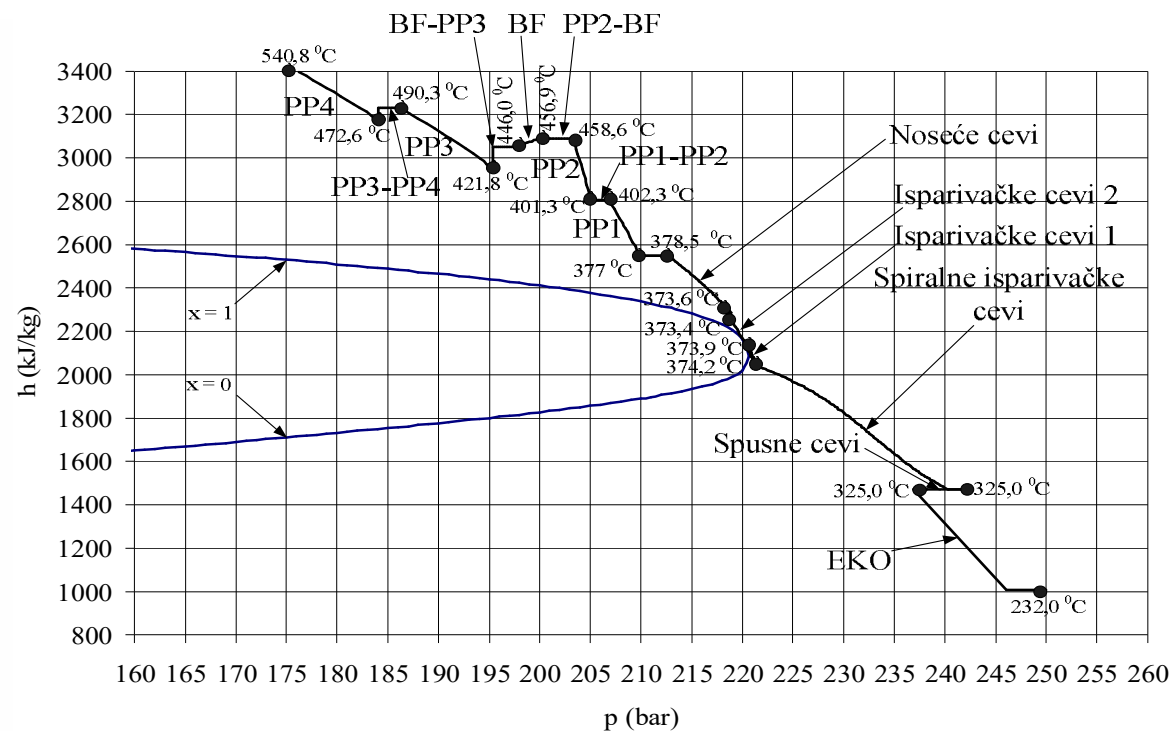
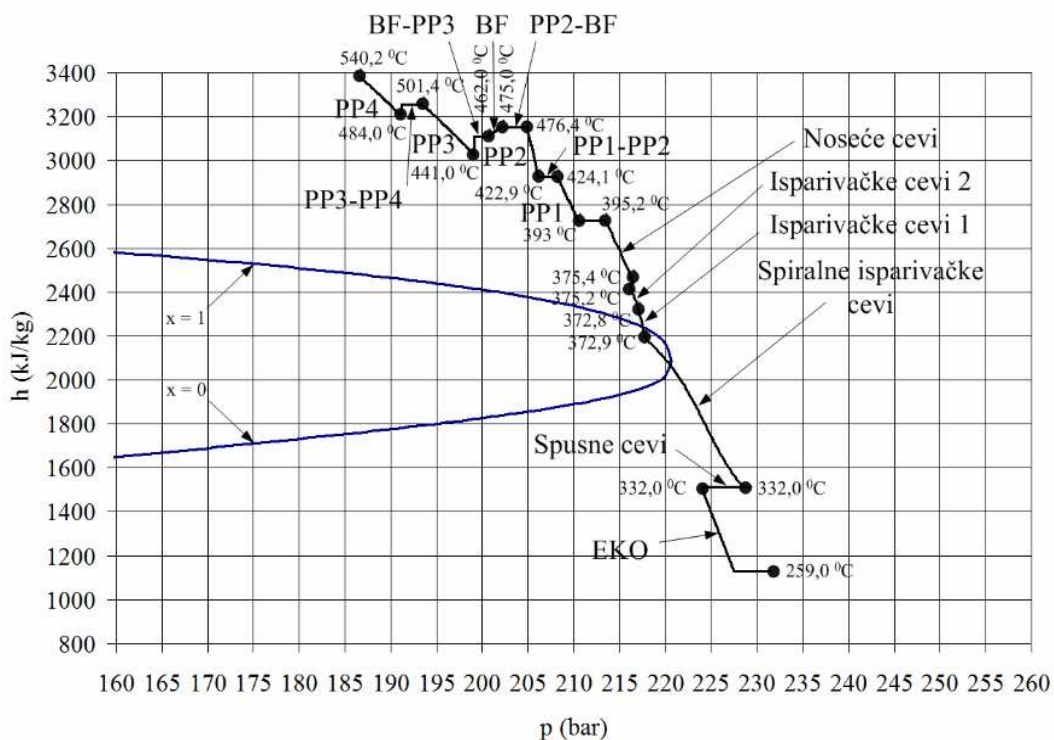
Dvofazno strujanje je posmatrano kao homogeno na mestima lokalnog otpora.

$$\Delta p_l = \zeta \frac{\rho u^2}{2} = \zeta \frac{G^2}{2\rho'} \left[ 1 + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]$$





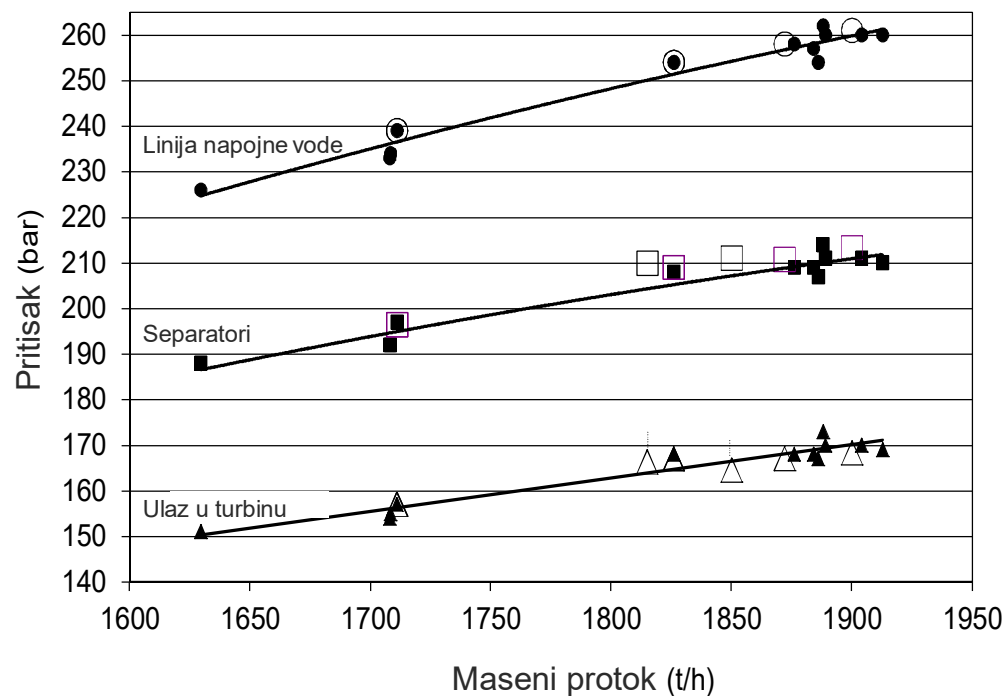
# Rezultati



Promena pritiska u cevnom sistemu kotla pri nominalnoj snazi i projektnim uslovima (levo) i uslovima sa zaprljanim cevnom sistemom (desno)



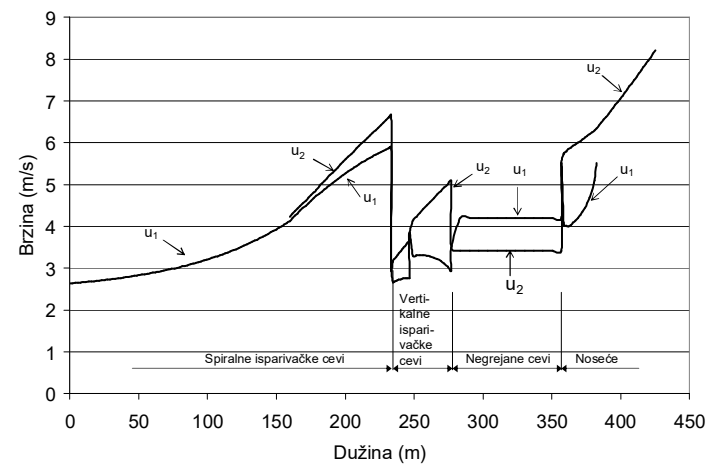
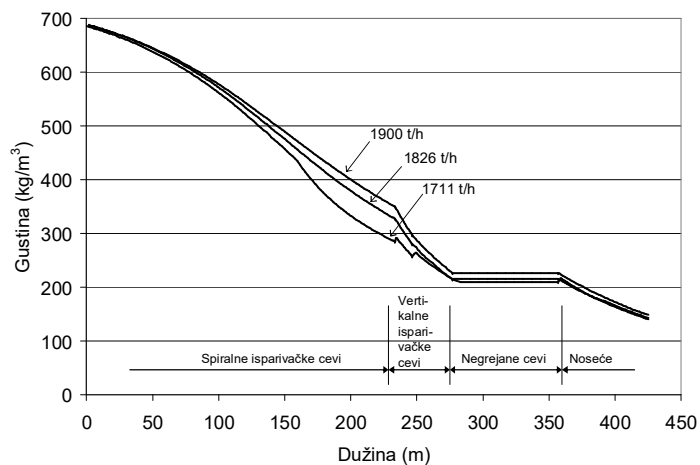
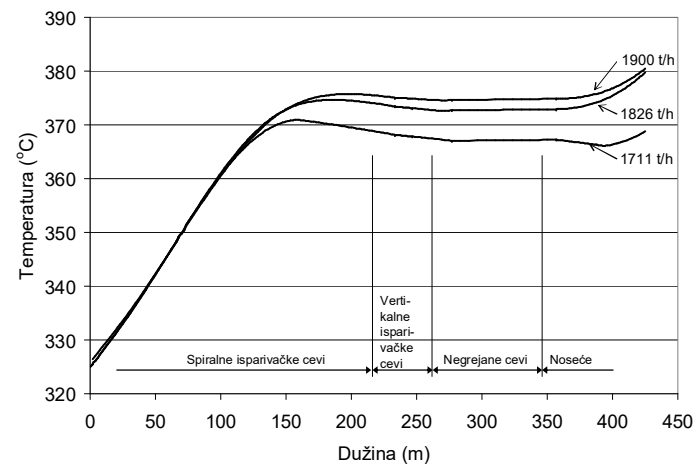
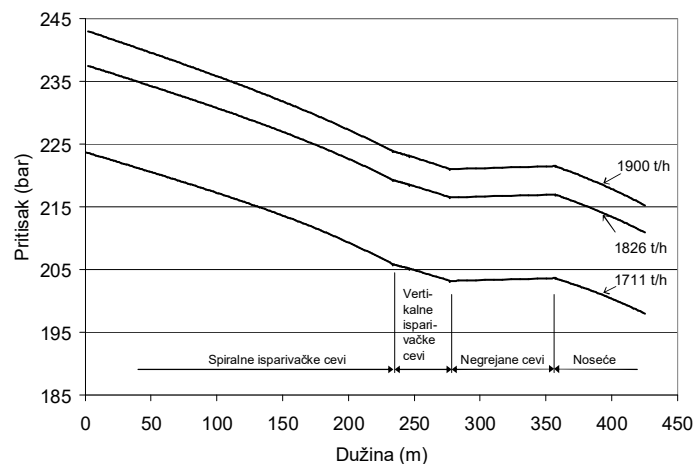
# Rezultati-izmereni i sračunati pritisak



Izmereni i sračunati pritisak u cevnom sistemu kotla u zavisnosti od masenog protoka sveže pare ( □ - izmereno u liniji napojne vode posle regulacionog ventila, o – sračunato za liniju napojne vode posle regulacionog ventila, ■ – izmereno u separatorima, □ - sračunato za separatore, ▲ – izmereno ispred turbine, △- sračunato za ulaz u turbinu)



# Rezultati-Termohidraulički parametri



**SET**  
SAMIT ENERGETIKE TREBINJE

**Procesing '22 1-3. jun 2022, Beograd**

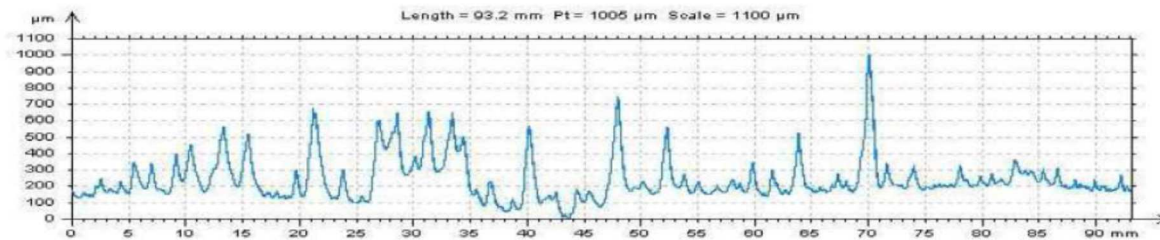
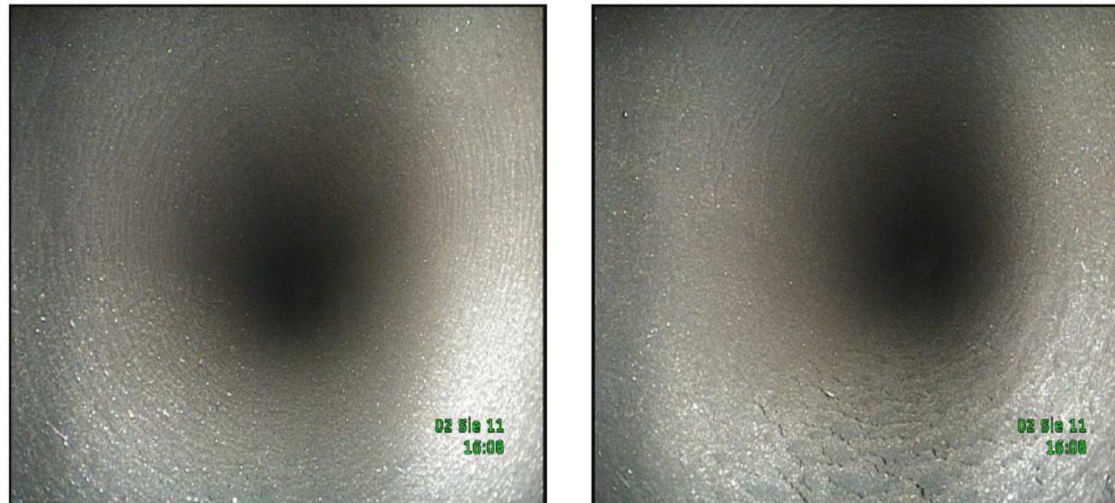
# Ukupna promena pritiska i povećanje hrapavosti

Ukupna promena pritiska u cevnom sistemu kotla za projektne uslove i posle dužeg perioda rada sa zaprljanjem cevi (maksimalno kontinuirano opterećenje)	Pad pritiska (bar) (% povećanja u odnosu na projektnu vrednost)	
	Projektni uslovi	Zaprljani cevni sistem
Od ulaza u ekonomajzer do separatora (bar)	-20	-39 (95%)
Od separatora do izlaza iz pregrejača pare 4 (bar)	-25	-35 (40%)
Od ulaza u ekonomajzer do izlaza iz pregrejača pare 4 (bar)	-45.4	-74 (63%)

Apsolutna hrapavost unutrašnje površine cevi u pojedinim sekcijama cevnog sistema	Hrapavost (mm)		
	Ekonomajzer, spusne cevi, paučinaste sevi	Isparivač	Pregrejači pare 1,2,3,4 i bifluks
Zaprljani cevni sistem	0,7	0,7	0,28
Projektni uslovi	0,05	0,05	0,05



# Mikroskopski dokaz



Izmerena apsolutna hrapavost u isparivačkoj cevi.



# Zaključak

- Razvijen je efikasan numerički metod za predviđanje termohidrauličkih parametara cevnog sistema kotla.
- Metod se zasniva i na modelu jednofaznog strujanja i na modelu dvofaznog strujanja, modelu dva fluida, sa odgovarajućim konstitutivnim korelacijama za predviđanje procesa na razdelnoj površini između vode i pare i zida i fluida.
- Razvijena metoda je primenjena za simulaciju i analizu uslova rada protočnog parnog kotla.
- Pokazano je da do značajnog povećanja pada pritiska dolazi u cevima u kojima se voda zagreva i isparava, usled nastanka slojeva magnetita posle dužeg perioda eksploatacije, dok je zaprljanje manje u liniji pregrevanja pare.



# Zaključak

- Apsolutna hrapavost zidova cevi se određuje poređenjem sračunatih i izmerenih vrednosti pada pritiska.
- Numerička integracija sa malim prostornim koracima integracije, je pogodna i pouzdana za predviđanje parametara strujanja u kotlu, posebno u termodinamičkom domenu pare i vode u blizini kritične tačke.
- Razvijena metoda se može primeniti prilikom projektovanja parnih kotlova, analiza uslova rada pri različitim opterećenjima, kao i pri planiranju održavanja cevnog sistema parnog kotla. Iterativni numerički proračuni omogućavaju predviđanje debljine sloja zaprljanja, kao podršku planiranju hemijskog postupka koji se mora primeniti za čišćenje cevnog sistema.





Hvala na pažnji!



Procesing '22 1–3. jun 2022, Beograd