

ANALIZA RADA VENTILA SIGURNOSTI U USLOVIMA PREGREVANJA U ZATVORENIM SISTEMIMA CENTRALNOG GREJANJA**ANALYSIS OF THE SAFETY VALVE OPERATION UNDER OVERHEATING CONDITIONS IN CLOSED HEATING SYSTEMS**

Željko Vlaović, Borivoj Stepanov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast- MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – Cilj rada jeste analiza sigurnosnih ventila u uslovima pregrevanja, za koje nisu projektovani. Njihov radni temperaturski opseg je do 110 °C. Pri pregrevanju u sistemu temperatura može porasti preko 110°C i sistem može ući u oblast ključanja. U tim uslovima, prilikom ekspanzije do atmosferskog pritiska dolazi do isparavanja u ventilu, koje dovodi do smanjenja masenog fluksa, što je izračunato raspoloživim metodama, koje su detaljno opisane.

Ključne reči: pregrevanje u sistemu centralnog grejanja, isparavanje u ventilu, povećanje pritiska.

Abstract – The aim of this study is the analysis and evaluation of safety valves in conditions of overheating, for which they are not designed. Their working temperature range is up to 110°C and the system may enter the boiling region. Under these conditions, during expansion to atmospheric pressure, flashing may occur in valve, which lead to decrease of the mass flux. The mass flux is calculated with the available methods, which are described in detail.

Keywords: overheating in central heating system, flashing in safety valve, pressure increase.

1. UVOD

Standard SRPS EN 303-5:2016 (Kotlovi za grejanje na čvrsta goriva, ručno i automatski loženi, nazivne toplotne snage do 500 kW – Terminologija, zahtevi, ispitivanje i obeležavanje) propisuje kada se mogu ugraditi kotlovi na čvrsto gorivo u zatvorene sisteme grejanja. Jedino onda kada se proizvodnja toplote može brzo regulisati. To nije moguće u standardnoj konstrukciji kotla koja potiče iz 70tih godina prošlog veka. Kotlovi na pelet mogu da budu brzo regulisani.

Inženjerska praksa u Srbiji ne prati ovu odrednicu standarda. Sigurnosni ventili ne mogu biti projektovani za takve uslove zato što u slučaju pojave pregrevanja oni nastoje da održe pritisak u dozvoljenim granicama, ali nisu u stanju da odvedu toplotu, čime se pregrevanje ne zaustavlja. Pregrevanje se može definisati kao razlika između proizvedene toplote u kotlu i toplote predate korisniku putem radijatora.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Borivoj Stepanov, docent.

Problem koji može da se desi jeste povećanje temperature u kotlu. Uzrok povećanja temperature u kotlu može biti otkaz rada regulatora promaje. Kod kotlova koji sagorevaju čvrsto gorivo, dovod vazduha se reguliše pomoću regulatora promaje, zatvaranjem klapne za vazduh. U slučaju povećanja temperature, regulator temperature prigušuje dovod vazduha, kako bi smanjio produkciju toplote. Čak i da regulator zatvori klapnu, određeni deo vazduha će se infiltrirati. Drugi uzrok može biti otkaz rada cirkulacione pumpe. Određen deo prirodne cirkulacije će još uvek postojati na osnovu razlike gustina, ali će se deo proizvedene toplote zadržavati unutar kotla, jer ne može biti prosleđen do potrošača. Takođe, postoji mogućnost da se vazduh nađe u sistemu formirajući vazdušni čep. Vazdušni čep predstavlja barijeru cirkulaciji. Pumpa nije u stanju da održava cirkulaciju i sistem proizvodnje toplote (kotao) je u potpunosti odvojen od sistema prijema toplote (radijatori).

Maksimalno pregrevanje je određeno maksimalnom snagom samog kotla. Usled povećanja temperature, u sistemu raste i pritisak. Pri temperaturama preko 100°C prilikom havarije dolazi do parne eksplozije. Svaki kotao je dimenzionisan da izdrži određen pritisak i ukoliko taj pritisak naraste preko maksimalnog dozvoljenog pritiska, u posudi dolazi do havarije. Sigurnosni ventil je poslednja linija zaštite. On reguliše pritisak u posudi, ali nema mogućnost regulacije temperature, odnosno mogućnost odvođenja toplote.

Sigurnosni ventili koji se najčešće ugrađuju u zatvorene sisteme centralnog grejanja, jesu italijanskog proizvođača "Calleffi". U tehničkoj dokumentaciji sigurnosnog ventila koju je proizvođač propisao, radni opseg temperature je do 110°C.

Pod pretpostavkom da je promena izobarna (da ventil sigurnosti uspeva da održi pritisak na zadatom nivou) izvršena je analizu kapaciteta sigurnosnog ventila na osnovu proračunatog masenog fluksa. Predstavljene su neke od metoda za određivanje masenog fluksa i maksimalnog masenog protoka u odnosu na različite početne temperature i stepene suvoće. Takođe, predstavljeno je poređenje dobijenih rezultata [1].

2. DVOFAZNO STRUJANJE KROZ VENTIL

Postoje različite metode za proračunavanje masenog fluksa. Veoma bitan parametar je karakter strujanja kroz ventil. Da li je jednofazno, voda ili para ili dvofazno. Mnogi proračunski modeli za predviđanje dvofaznog strujanja kroz idealnu mlaznicu su dostupni u literaturi. Metode za proračun dvofaznog strujanja koje se trenutno smatraju najpogodnijim za dimenzionisanje ventila

sigurnosti, zasnovane su na homogenom ravnotežnom ili homogenom neravnotežnim modelu. Homogeni ravnotežan model implicira da je fluid koji struji kroz ventil dvofazna (gas-tečnost) mešavina, da je ona “dobro” izmešana da može da se predstavi kao jednofazni fluid sa svojstvima koje su kombinacija obe faze, pri tom da su te dve faze u mehaničkoj i termodinamičkoj ravnoteži. Ove pretpostavke su neophodne, ali ne i dovoljne za proračun, uz njih potrebno je i proračunati gustinu fluida u funkciji od pritiska i stepena suvoće [2].

2.1. Termodinamička ravnoteža

Uobičajena pretpostavka je da su gasna ili parna faza u termodinamičkoj ravnoteži sa tečnom fazom, što znači da su osobine smeše funkcija samo temperature, pritiska i njihovih udela. Drugim rečima, kada se pritisak u tečnosti smanjuje na pritisak zasićenja, isparavanje će se pojaviti odmah, ako je sistem u ravnoteži. Međutim, isparavanje je zapravo proces koji zahteva određeno vreme (npr. nekoliko milisekundi) da se u potpunosti razvije. Za to vreme tečnost može da struji i nekoliko centimetara u mlaznici ventila. Pod tim uslovima, količina proizvedene pare je mnogo manja nego što bi ona bila pod ravnotežnim uslovima, a gustina mešavine i maseni fluks su srazmerno veći. Eksperimentalni podaci su pokazali da je u velikom broju pojedinačnih jednodimenzionalnih sistema, dužina mlaznice od minimum 10 cm dovoljna da se uspostavi ravnoteža, što implicira na to da se strujanje u mlaznicama kraćim od 10 cm može smatrati neravnotežnim strujanjem [3].

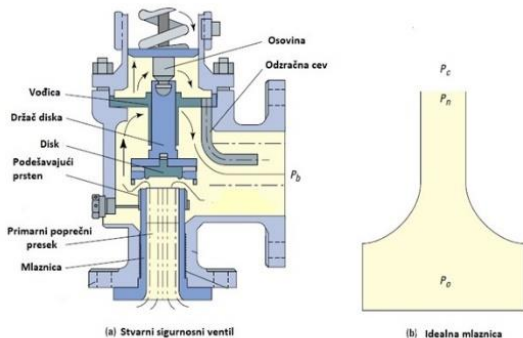
2.1.1 Pojava isparavanja u sigurnosnom ventilu

Radi lakšeg objašnjenja termina isparavanja u ventilu, najpre se mora definisati termin napon pare. Napon pare ili pritisak zasićene pare je pritisak iznad nivoa tečnosti. Na tom pritisku je uspostavljena ravnoteža između molekula koji isparavaju i onih koji se kondenzuju. Kada lokalni pritisak opadne ispod napona pare, tečnost će početi intenzivno da isparava [4].

3. DIMENZIONISANJE SIGURNOSNOG VENTILA

Potreban poprečni presek mlaznice se određuje na osnovu masenog protoka i masenog fluksa:

$$A = \frac{\dot{m}}{K_D \cdot G_0} \quad (1)$$



Slika 1. Stvarni sigurnosni ventil (levo) i idealna mlaznica (desno) [2]

Vrednost masenog fluksa je izračunata preko jednačine za izentropsku mlaznicu, pomoću usvojenog modela i pomnožena sa vrednošću koeficijenta isticanja, kako bi se

dobio stvaran maseni fluks. Kako je prikazano na slici 1, postoje sličnosti i razlike između idealne i stvarne mlaznice [5].

4. METODOLOGIJA PRORAČUNA POMOĆU DIREKTNE NUMERIČKE INTEGRACIJE

Prilikom proračuna ovom metodom, neophodno je poznavanje veličine termodinamičkih stanja. Ovde gustina predstavlja zavisnost promene pritiska, računata pomoću konstantne entropije, u opsegu od P_0 do P_a . Maseni fluks se izračunava korišćenjem formule [2]:

$$G_0 = \rho_n \cdot \left(-4 \sum_{P_0}^{P_n} \frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (2)$$

Što je manji usvojeni korak smanjenja pritiska, rezultati su precizniji. Da bismo odredili pritisak na kom dolazi do zagušenja, postupak proračuna ponavljamo smanjujući pritisak za usvojen korak, sve dok ne dobijemo maksimalni maseni fluks, počevši od $P_0 = P_n$. Ukoliko se maksimalni maseni fluks postigne tek na izlazu iz ventila ($P_n = P_a$), gde je P_a pritisak na izlazu iz ventila sigurnosti, atmosferski, neće doći do zagušenja protoka u samom ventilu. Ovaj metod ima široku primenu i primenljiv je na sve vrste fluida, pod bilo kojim uslovima. Metod se može proširiti i za neravnotežna strujanja, gde su dužine mlaznice kraće od 10 cm. Efekat neravnotežnog strujanja jeste da pojava isparavanja se neće desiti odmah kada pritisak opadne ispod pritiska zasićenja odnosno, kada pritisak dostigne pritisak zasićenja, isparavanje se neće u potpunosti razviti jer stepen suvoće ima manju vrednost od onog koji bi to imao za ravnotežno strujanje. Kako je gustina za ravnotežno dvofazno strujanje direktno zavisna od stepena suvoće, ona se računa po formuli:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{(1-x)}{\rho_L} \quad (3)$$

Za neravnotežne uslove, gde je dužina mlaznice kraća od 10 cm, moramo pretpostaviti da stepen suvoće dostiže ravnotežno stanje x_e kako se dužina mlaznice približava dužini od 10 cm. Za mlaznice koje su manje od 10 cm, stepen suvoće u mlaznici se računa kao:

$$x = x_0 + (x_e - x_0) \cdot \frac{L}{10} \quad (4)$$

Kako se pritisak ispred mlaznice (P_n) bude smanjivao, maseni fluks (G_0) će rasti. Ukoliko dostigne svoj maksimum pre nego što pritisak u mlaznici opadne do atmosferskog, doći će do pojave zagušenja masenog protoka. Za početne uslove od 3,5 bara apsolutnog pritiska, temperature od 110°C, izračunavamo maseni fluks. Treba imati u vidu da se vrednost maksimalnog masenog fluksa izračunava pomoću formule:

$$G_n = \frac{G_0 \cdot K_D}{0,9} \quad (5)$$

gde je vrednost 0,9 preporučeni sigurnosni faktor [3].

5. METODOLOGIJA PRORAČUNA MASENOG FLUKSA POMOĆU OMEGA METODE

Ovaj metod je opisan u standardu API 520-1, i može se koristiti prilikom dimenzionisanja sigurnosnih ventila za

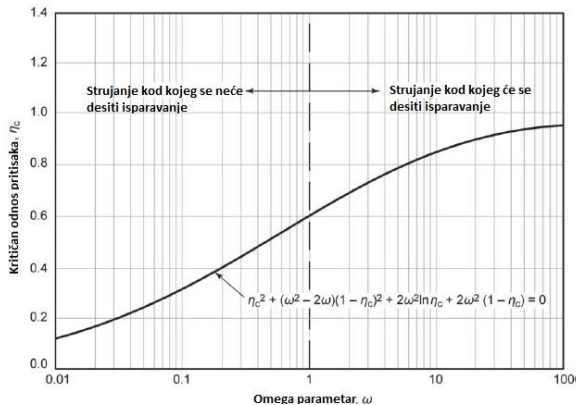
dvofazna strujanja. Metod koristi parametar omegu pomoću kojeg se određuje stanje:

$$\omega = \frac{x_0 \cdot v_{G0}}{v_0} + \frac{C_{f0} \cdot T_0 \cdot P_0}{v_0} \left(\frac{v_{fgo}}{v_0} \right)^2 \quad (6)$$

gde su:

- x_0 - početni stepen suvoće
- v_{G0} - specifična zapremina pare na početku $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$
- C_{f0} - specifična toplota pri konstantnom pritisku $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
- T_0 - temperatura fluida na ulazu u ventil $[K]$
- v_{fgo} - promena specifične zapremine $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$
- P_0 - pritisak na ulazu u ventil $[Pa]$
- v_0 - specifična zapremina tečnosti na početku $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$

Za slučaj kada je na početku tečnost suvozasiceana, udeo pare jednak je nuli. Omega parametar se izračunava iz formule (6). Na osnovu omega parametra i odnosa kritičnih pritisaka, konstatujemo da će doći do isparavanja tokom strujanja kroz ventil.



Slika 2. Odnos kritičnog pritiska i omega parametra [6]

Ukoliko je ispunjen uslov da je pritisak zasićenja veći od pritiska na izlazu iz ventila, tada se maseni fluks računa po formuli [5]:

$$\frac{G_c}{\sqrt{P_0}} = \frac{\eta_c}{\sqrt{\omega}} \quad (7)$$

5.1. Metodologija proračuna za pothlađenu oblast sa visokim stepenom pothlađenja

Za slučaj kada je fluid na ulazu pothlađena tečnost, neophodna je provera uslova da li je tečnost sa slabim ili visokim pothlađivanjem. Formula za izračunavanje omega parametra je ista samo bez prvog člana, pošto je stepen suvoće jednak nuli. Za visoki stepen pothlađivanja maseni fluks se računa na osnovu formule [7]:

$$G_c = \sqrt{2 \cdot \rho_{fo} (P_0 - P_s)} \quad (8)$$

5.2. Metodologija proračuna pomoću alternativne omega metode

Predstavljena metoda se može iskoristiti za projektovanje sigurnosnih ventila koji rukovode sa pothlađenom (uključujući i zasićenu) tečnošću na ulazu. Na ulazu ne

sme biti prisutna kondenzujuća para ili nekondenzujući gas. U zavisnosti od režima strujanja, tečnost će isparavati pre ili posle mlaznice. Korišćene formule se mogu primeniti na sve tečnosti. Formula za izračunavanje omega parametra je:

$$\omega_s = 9 \cdot \left(\frac{\rho_{l0}}{\rho_g} - 1 \right) \quad (9)$$

Na osnovu režima protoka i strujanja fluida, prema standardu API 520-1, za visoko pothlađeni režim strujanja [6]:

$$G = 1,414 \sqrt{\rho_{l0} (P_0 - P)} \quad (10)$$

6. REZULTATI PRORAČUNA

Na osnovu dobijenih rezultata iz tabele 1 možemo primetiti da je najveća vrednost masenog fluksa dostignuta na pritisku od 1,45 bara ($16893 \frac{kg}{s \cdot m^2}$), što implicira da će doći do pojave zagušenja protoka u ventilu na tom pritisku.

Tabela 1. Dobijeni rezultati numeričkom integracijom za ravnotežno strujanje

P_N [bar]	ρ_n $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\frac{\Delta P}{\rho}$	$\Sigma \frac{\Delta P}{\rho}$	G_N $\left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$
3,5	951,05	0	0	0
3,45	951,05	-5,26	-5,26	2683,46
2,8	951,02	-5,26	-73,6	9871,9
1,45	950,9	-5,26	-215,5	16893,16
1,40	662,84	-13,34	-228,91	6859,40

U zavisnosti od toga u kakvom je stanju početna tečnost, maseni fluks će varirati. Uticaj temperature u pothlađenoj oblasti na maseni fluks kroz ventil je prikazan u tabeli 2, a uticaj stepena suvoće na maseni fluks kroz ventil je prikazan u tabelama 3, 4 i 5. Možemo zaključiti da sa povećanjem i temperature i stepena suvoće maksimalni fluks se smanjuje.

Tabela 2. Maksimalni maseni fluks u zavisnosti od početne temperature

t	99	110	114,5	119	124	137
Gn	17575	16893	15801	14635	13117	4516

Tabela 3. Maksimalni maseni fluks za korak promene stepena suvoće pare 0,001

x_e	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
Gn	2229	2220	2183	2146	2118	2098

Tabela 4. Maksimalni maseni fluks za korak promene stepena suvoće pare 0,01

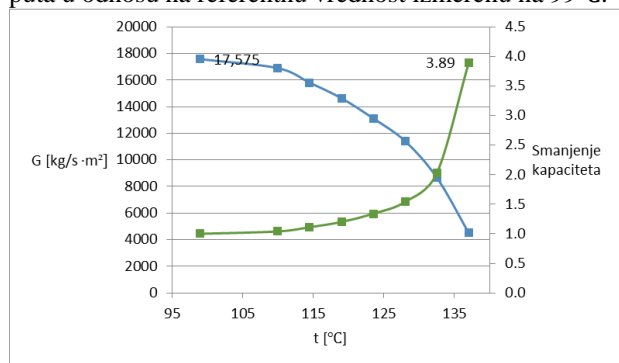
x_e	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Gn	1985	1785	1643	1534	1448	1376	1314

Tabela 5. Maksimalni maseni fluks za korak promene stepena suvoće pare 0,1

x_e	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Gn	1169	905	766	677	613	564	526	494

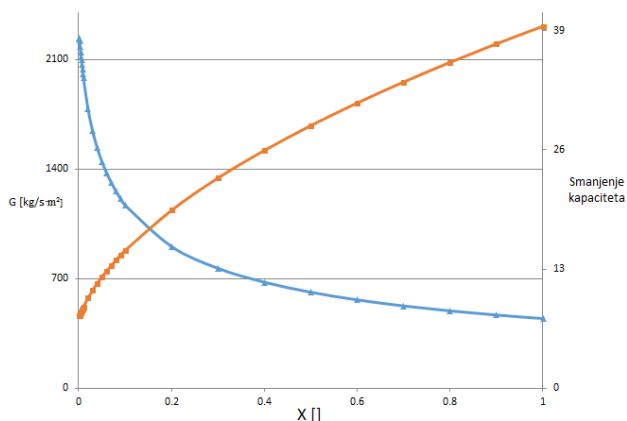
U tabeli 5 su prikazani rezultati maksimalnog masenog fluksa za različite početne temperature.

Sa povećanjem početne temperature u sistemu, maksimalni maseni fluks opada, što se može videti na slici 3 jer tečnost pri ekspanziji dostiže uslove za pojavu isparavanja. Istovremeno, kapacitet ventila se smanjuje i do 3,9 puta u odnosu na referentnu vrednost izmerenu na 99°C.



Slika 3: Dijagram zavisnosti maksimalnog masenog fluksa od povećava početne temperature u sistemu i smanjenja kapaciteta ventila u odnosu na referentnu vrednost izmerenu na 99°C.

Analogno tome, slika 4 nam prikazuje rezultate maksimalnog masenog fluksa u odnosu na različit početni stepen suvoće. Zaključujemo da u prelaznoj oblast kapacitet ventila drastično opada.



Slika 4: Vrednosti maksimalnog masenog fluksa u zavisnosti od početnog stepena suvoće dobijenih i smanjenja kapaciteta ventila u odnosu na referentnu vrednost izmerenu na 99°C.

7. ZAKLJUČAK

Izvršena je analiza rada sigurnosnog ventila u zatvorenom sistemu centralnog grejanja pri pregrevanju. Zaključujemo da u slučaju otkaza rada regulacione opreme ili zastoja u cirkulaciji, sigurnosni ventil nije u stanju da reguliše povećanje temperature u zatvorenom sistemu. Sigurnosni ventil ne može da odvede toplotu iz sistema, on reguliše samo pritisak. U slučaju povećanja temperature preko 100°C, postoji opasnost od parne eksplozije. Sigurnosni ventil u takvim okolnostima ne poseduje dovoljan kapacitet da adekvatno odreguje. Na osnovu proračuna masenog fluksa u zavisnosti od početne temperature i stepena zasićenja, možemo zaključiti da će doći do isparavanja u sigurnosnom ventilu što dovodi do zagušenja protoka u ventilu. Vrednost masenog fluksa direktno zavisi od početnih uslova, pre svega temperature i pritiska na kom se sigurnosni ventil otvara.

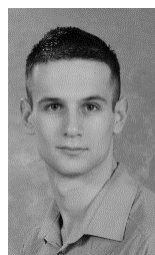
Sa povećanjem početne temperature u sistemu, maksimalna vrednost masenog fluksa opada, što negativno utiče na protok u samom ventilu. Isparavanje se dešava kada pritisak u mlaznici opadne ispod napona pare, prilikom strujanja kroz suženje mlaznice ("vena contracta").

U suštini, pojava isparavanja u sigurnosnom ventilu ograničava kapacitet ventila, i on nije u stanju da istisne zahtevanu količinu tečnosti. Kako stepen suvoće raste, maseni fluks opada, a srazmerno opada i kapacitet ventila. Na gornjoj graničnoj krivi kapacitet ventila opada do 38 puta. Na donjoj graničnoj krivi kapacitet ventila opada 7 puta. Dostizanje stanja na donjoj graničnoj krivi je u praksi realnije, što implicira da ventil koji je početno bio namenjen za kotlove do 72 kW, može podneti snagu od približno 10 kW. Ukoliko pretpostavimo da je prosečan kotao snage 30 kW, rezultat može biti ozbiljno ugrožavanje bezbednosti.

8. LITERATURA

- [1] SRPS EN 303-5:2016 - Kotlovi za grejanje na čvrsta goriva, ručno i automatski loženi, nazivne toplotne snage do 500 kW
- [2] Darby, R., Meiller, P. R., & Stockton, J. R. (2001). Select the Best Model, (May).
- [3] Darby, R., C. (2005). Size Safety-Relief Valves for Any Conditions, Published in Chemical Engineering, 112, (9), 42-50.
- [4] Bolle, L., Downar-Zapolski, P., Franco, J., & Seynhaeve, J. M. (1996). Experimental and theoretical analysis of flashing water flow through a safety valve. *Journal of Hazardous Materials*, 46(2-3), 105-116.
- [5] Darby R., & Raj P.C. (2004). Chemical engineering fluid mechanics, third edition, chapter 11, 291-301.
- [6] American Petroleum Institute. (2008). Sizing, Selection and Installation of Pressure Relieving Devices in Refineries, Part I - Sizing and Selection. API Standard 520, (December 2008).
- [7] Lees, F. P. (1996). Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control, 1, 3776.

Kratka biografija:



Željko Vlaović rođen je u Subotici 1994. god. Završio gimnaziju „Isidora Sekulić“ u Novom Sadu 2013. godine, iste godine upisao osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinstva – Energetika i procesna tehnika. Odbranio diplomski rad na temu Upravljanje energetske performansama rashladnih postrojenja 2017. god. Trenutno student master studija na smeru Energetika i procesna tehnika.



Borivoj Stepanov rođen je u Novom Sadu 1976. Doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka 2014 god., a od 2003 god. predaje predmete koji se bave termoenergetskim postrojenjima.