

MIROLJUB M. ADŽIĆ¹
MARIJA A. ŽIVKOVIĆ²
VASKO G. FOTEV¹
ALEKSANDAR M.
MILIVOJEVIĆ¹
VUK M. ADŽIĆ¹

¹Mašinski fakultet, Univerzitet u
Beogradu, Beograd
²Rudarsko-geološki fakultet, Uni-
verzitet u Beogradu, Beograd

NAUČNI RAD

UDK 662.6:546.172.6

DOI: 10.2298/HEMIND100319019A

UTICAJNI PARAMETRI EMISIJE AZOTNIH OKSIDA VIHORNOG GORIONIKA MIKRO- TURBINE SA PILOT GORIONIKOM

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja emisije oksida azota (NO_x) namenski razvijanog gasnog gorionika sa dva vrtložnika. Ispitivani su uticaj vihornih brojeva, nominalne toplotne snage i koeficijenta viška vazduha. Utvrđeno je da spoljašnji vrtložnik utiče na emisiju NO_x samo u uslovima koeficijenta viška vazduha ispod 1,4. Povećanje vihornog broja smanjuje emisiju NO_x. Utvrđeno je da unutrašnji vrtložnik i toplotna snaga imaju zanemarljiv uticaj na emisiju NO_x. Gorionik je pokazao širok dinamički opseg rada i niske emisije oksida azota i ugljen-monoksida, koje zadovoljavaju najstrožije evropske kriterijume.

Vihorni gorionici predstavljaju tip uređaja sa širokim spektrom primene, uključujući i gasne turbine. Zahvaljujući svojim karakteristikama, vihorno strujanje se intenzivno koristi u procesima sagorevanja jer obezbeđuje konverziju energije u maloj zapremini, sa dobrim performansama u širokom opsegu rada. Proces mešanja koji nastaje kao posledica prirode vihornih struja takođe doprinosi odličnoj stabilnosti plamena [1].

Intenzitet vihora karakteriše bezdimenziona veličina – vihorni broj, S , koja se definiše kao odnos aksijalnog fluksa impulsa tangencijalne komponente struje smeše, aksijalnog potiska smeše i poluprečnika vrtložnika. Za vrednosti vihornog broja manje od 0,4 recirkulacija se opisuje kao slaba. Umerena recirkulacija postiže se kada je vihorni broj u intervalu 0,4–0,6, dok se sa vihornim brojevima većim od 0,6 postiže intenzivna recirkulacija [1].

Brojne studije i istraživanja su pokazali da primena vrtložnika takođe, može značajno da utiče na smanjenje emisije oksida azota. Sa porastom intenziteta vihora smanjuje se temperaturski gradijent, dolazi do razblaženja smeše u odnosu na početne uslove, što za posledicu ima smanjenje emisije NO_x [2,3].

Koncept sagorevanja u uslovima siromašne smeše doživeo je široku primenu u poslednjih 20 godina, posebno u gasnim turbinama kao efikasan način za ispunjenje sve strožijih ekoloških zahteva [4,5]. Takođe za siromašne smeše je značajno održati smanjenu emisiju oksida azota, dobru stabilnost plamena i onemogućiti visoku emisiju ugljen-monoksida [6–8]. Veći broj standarda tretira ovu problematiku propisujući dozvoljene vrednosti emisije oksida azota. Tako su prema standardu DIN 4702 dozvoljene emisije oksida azota 100 ppm (3% O₂), Švajcarskom standardu 40 ppm (3% O₂), Blue Angel 35 ppm (3% O₂) i Hamburškom standardu 8,5

ppm (3% O₂). Sve strožiji ekološki propisi podstiču razvoj novih i unapređenje postojećih gorionika, kako bi proces konverzije energije imao što manji uticaj na životnu sredinu.

Karakteristike rada gasnih turbina bile su predmet brojnih istraživanja, ali je mali broj onih koje se bave problematikom mikro gasnih turbina. Karakteristično je da su istraživanja koja su dostupna u literaturi, vršena uglavnom za postrojenja velike i srednje snage [7–15]. Zbog toga je eksperimentalno istraživanje prikazano u ovom radu, rađeno sa ciljem boljeg razumevanja procesa i analize uticajnih parametara rada mikroturbine: snage, koeficijenta viška vazduha i intenziteta vihora. Karakteristike rada modela gasne mikroturbine sa vihornim gorionikom sa jednim vrtložnikom i promenljivim položajem centralnog tela detaljno su prikazani u našim prethodnim radovima [16,17]. Gorionik je sa dva vihora: unutrašnjim i spoljašnjim. Unutrašnji gorionik opremljen je vrtložnikom koji indukuje unutrašnji vikor i ima ulogu pilot plamena. Spoljašnji gorionik je postavljen koaksijalno i strujanjem gorive smeše kroz spoljašnji vrtložnik indukuje se spoljašnji vikor. Dobijeni rezultati i analiza uticajnih parametara vihornog broja spoljašnjeg i unutrašnjeg vrtložnika, koeficijenta viška vazduha i snage, prikazani su u ovom radu. Kao gorivo korišćena je komercijalna smeša propan–butan a mešanje goriva i vazduha je obavljeno pre procesa sagorevanja.

OPIS MERENJA

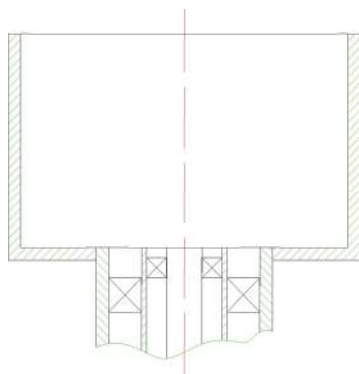
Konstrukcija gorionika je takva da se prethodno ostvarena goriva smeša vazduha i goriva dovodi odvojeno u unutrašnji gorionik i koaksijalno postavljen spoljašnji gorionik. Svaki od gorionika konstruisan je tako da sadrži vrtložnik čiji je zadatak da indukuje vihornu struju. Unutrašnji gorionik ima ulogu pilota i pri svim režimima rada za koje su vršena merenja nominalna snaga je održavana na 1 kW, pri koeficijentu viška vazduha 1,2 (primarna smeša). Skica gorionika prikazana je na slici 1.

Autor za prepisku: M.A. Živković, Rudarsko–geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Đušina 7, 11000 Beograd.

E-pošta: zivkovic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 19. mart 2010.

Rad prihvaćen: 27. april 2010.



Slika 1. Skica gorionika.
Figure 1. Schematics of the combustor.

Nominalna snaga i koeficijenti viška vazduha spoljašnjeg gorionika su varirani (sekundarna smeša) i to: snage, 4, 8 i 12 kW, koeficijenti viška vazduha: $\lambda_2 = 1,2$; 1,4; 1,6 i 1,8.

Kako bi se istraživao uticaj vihornog broja (intenziteta vihora) na emisiju oksida azota korišćeni su sledeći vrtložnici: unutrašnji, $S_1 = 0$; 0,84 i 1,98 i spoljašnji, $S_2 = 0$; 0,73 i 1,13.

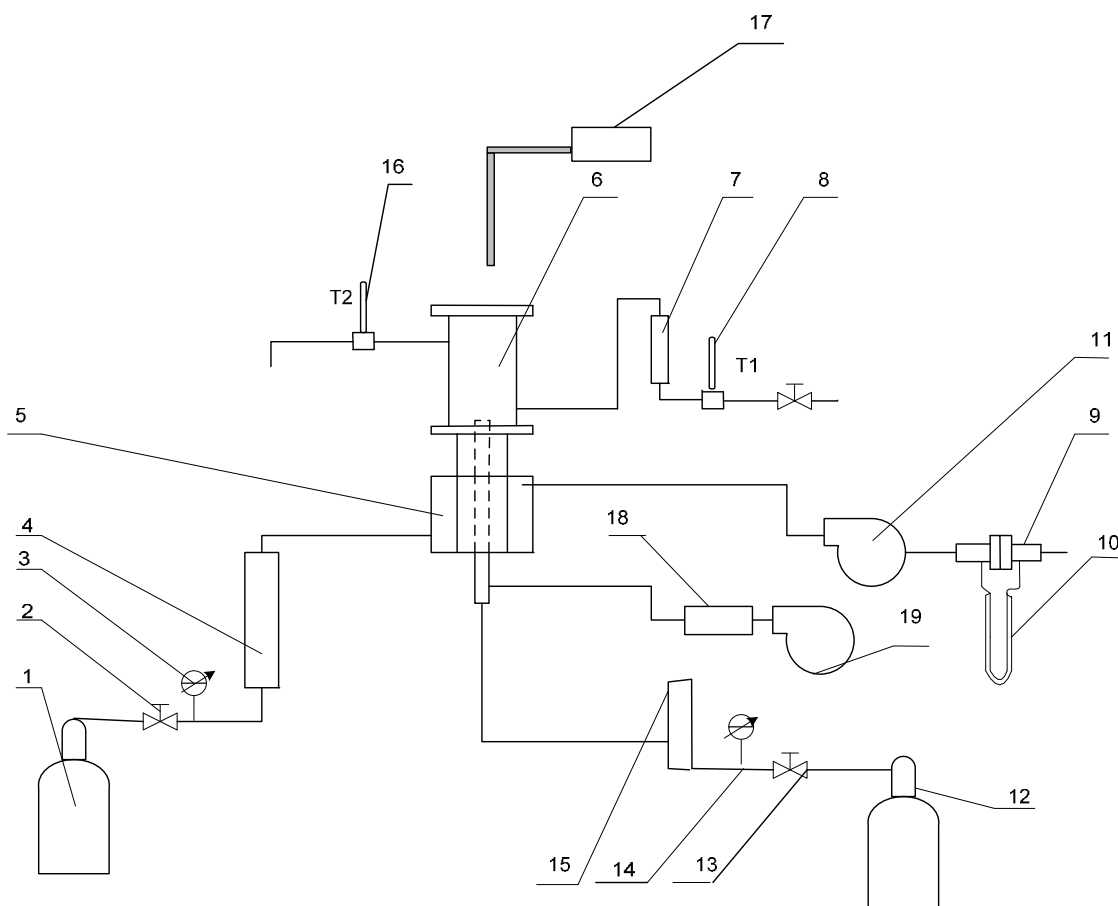
Zidovi komore za sagorevanje su hlađeni vodom čime se postiže održavanje konstantnih graničnih uslova kao i merenje toplotnog fluksa kroz zidove komore.

Za svaku od kombinacija unutrašnjeg i spoljašnjeg vrtložnika varirana je nominalna snaga i koeficijent viška vazduha, a za svaki od radnih režima meren je sastav produkata sagorevanja. Skica merne aparature prikazana je na slici 2.

REZULTATI I DISKUSIJA

Uticaj intenziteta spoljašnjeg vihora

Uobičajena je praksa savremenih gorionika gasnih turbina korišćenje vrtložnika u sistemima sa predhodno



Slika 2. Skica merne aparature: 1. Boca sa gorivom; 2. Regulacioni ventil; 3. Manometar; 4. Rotametar za gorivo sekundarne smeše; 5. Mešna komora; 6. Komora za sagorevanje; 7. Rotametar za vodu; 8. Termometar; 9. Merna blenda; 10. U cev; 11. Ventilator za vazduh sekundarne smeše; 12. Boca sa gorivom; 13. Regulacioni ventil; 14. Manometar; 15. Rotametar za gorivo primarne smeše; 16. Termometar; 17. Gasni analizator; 18. Kontroler protoka vazduha primarne smeše; 19. Ventilator za vazduh primarne smeše.
Figure 2. Experimental set-up: 1. Pressurized gas cylinder; 2. Flow regulation valve; 3. Pressure gage; 4. Gas flow meter for the secondary mixture; 5. Mixing chamber; 6. Combustion chamber; 7. Water flow meter; 8. Thermometer; 9. Measuring orifice plate; 10. U-tube; 11. Air fan for the secondary mixture; 12. Pressurized gas cylinder; 13. Flow regulation valve; 14. Pressure gage; 15. Gas flow meter for the primary mixture; 16. Thermometer; 17. Gas analyzer; 18. Air flow controller for the primary mixture; 19. Air fan for the secondary mixture.

ostvarenom gorivom siromašnom smešom. Razvijenu vihornu struju karakteriše toroidalna recirkulaciona zona i povećana turbulencija, što dovodi do produženja raspoloživog vremena za hemijske reakcije (vremena boravka), intenziviranja prenosa toplote i mase, čime se poboljšava stabilnost plamena [8].

Uticaj vihornog broja spoljašnjeg vrtložnika prikazan je na slikama 3–5. Očigledno je da postoji uticaj intenziteta vihora spoljašnjeg gorionika na emisiju oksida azota, koji je izraženiji pri manjim koeficijentima viška vazduha. Takođe, može se uočiti da se sa povećanjem koeficijenta viška vazduha ova razlika smanjuje i da postaje zanemarljiva već pri koeficijentu viška vazduha 1,4. Pri koeficijentima viška vazduha većim od 1,4 temperature su takve da dovode do inhibicije termičkog (Zeljovičevog) mehanizma. Temperatura u zoni reakcije koja izrazito utiče na emisiju NO_x snižava se uvođe-

njem prethodno ostvarene siromašne smeše [18].

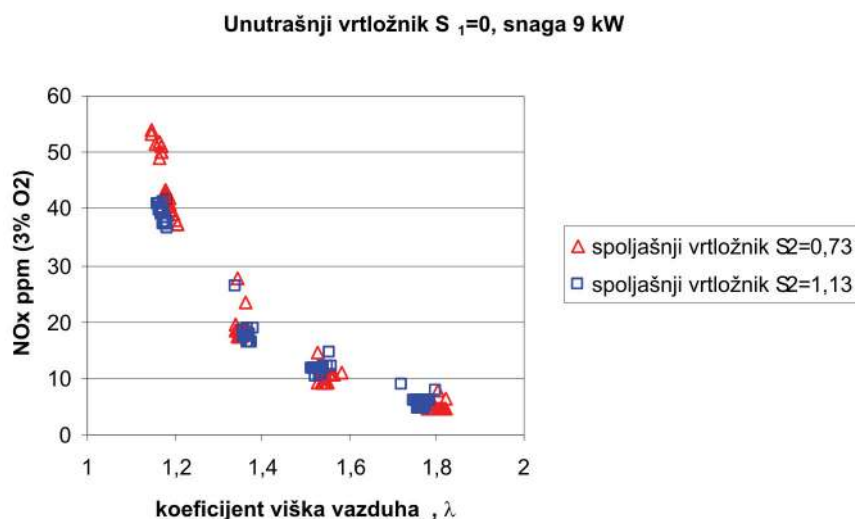
Fotografije plamena u slobodnom prostoru prikazane su na slikama 6 i 7.

Fotografije prikazane na slikama 6 i 7 ukazuju da pri identičnim ostalim uslovima, spoljašnji vikor, $S_2 = 1,13$, obezbeđuje uslove za ostvarenje intenzivnije recirkulacije čime se obezbeđuje razblaženje gorive smeše i redukcija emisije NO_x , ali i produžava vreme boravka koje obezbeđuje ostvarenje potpunog sagorevanja.

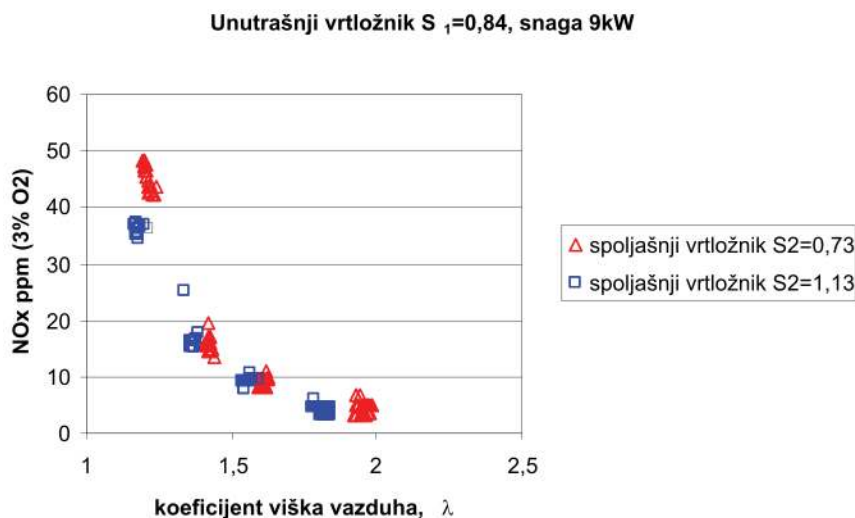
Uticaj intenziteta vihora unutrašnjeg gorionika (pilot gorionika)

Uticaj intenziteta vihora unutrašnjeg gorionika pri nepromenjenom vihoru spoljašnjeg gorionika prikazan je na slikama 8 i 9.

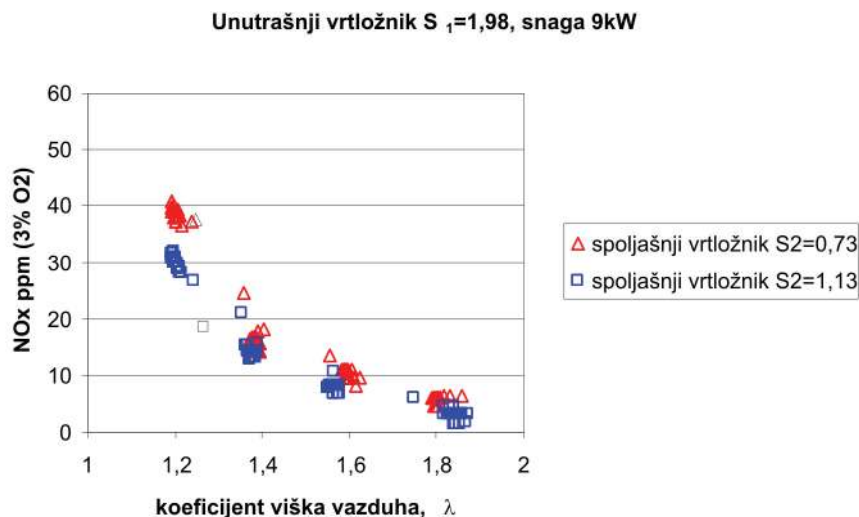
Može se zaključiti da uticaj intenziteta unutrašnjeg vihora-pilota na emisiju oksida azota praktično ne postoji pri nepromenjenom spoljašnjem vihoru.



Slika 3. Zavisnost emisije NO_x od intenziteta vihora spoljašnjeg gorionika, nominalna snaga 9 kW, unutrašnji vrtložnik, $S_1 = 0$.
Figure 3. Influence of the outer swirl number on NO_x emissions for nominal power 9 kW and the inner swirl number, $S_1 = 0$.



Slika 4. Zavisnost emisije NO_x od intenziteta vihora spoljašnjeg gorionika, nominalna snaga 9 kW, unutrašnji vrtložnik, $S_1 = 0,84$.
Figure 4. Influence of the outer swirl number on NO_x emissions for nominal power 9 kW and the inner swirl number $S_1 = 0,84$.



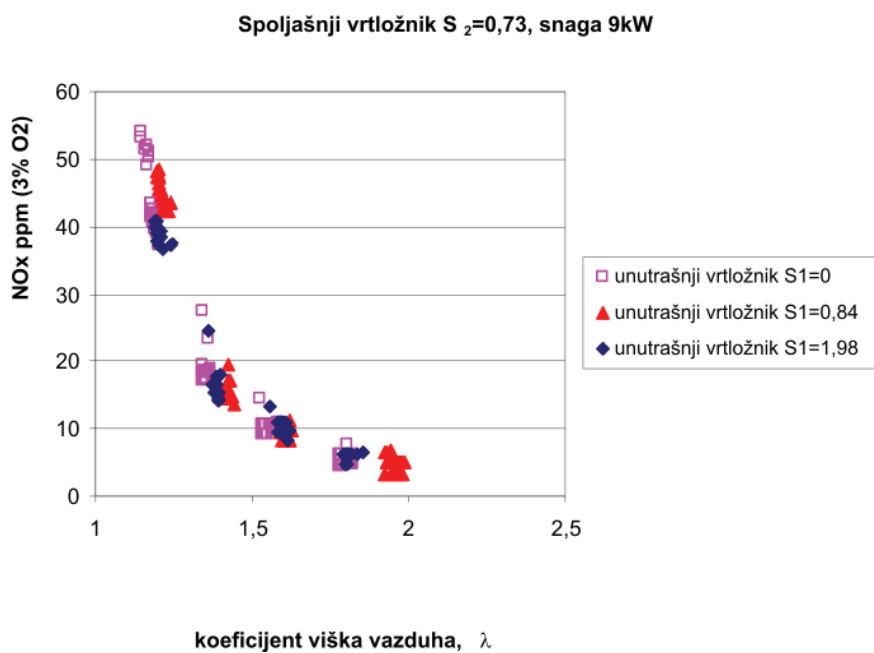
Slika 5. Zavisnost emisije NO_x od intenziteta vihora spoljašnjeg gorionika, nominalna snaga 9 kW, unutrašnji vrtložnik, $S_1 = 1,98$.
Figure 5. Influence of the outer swirl number on NO_x emissions for nominal power 9 kW and the inner swirl number, $S_1 = 1,98$.



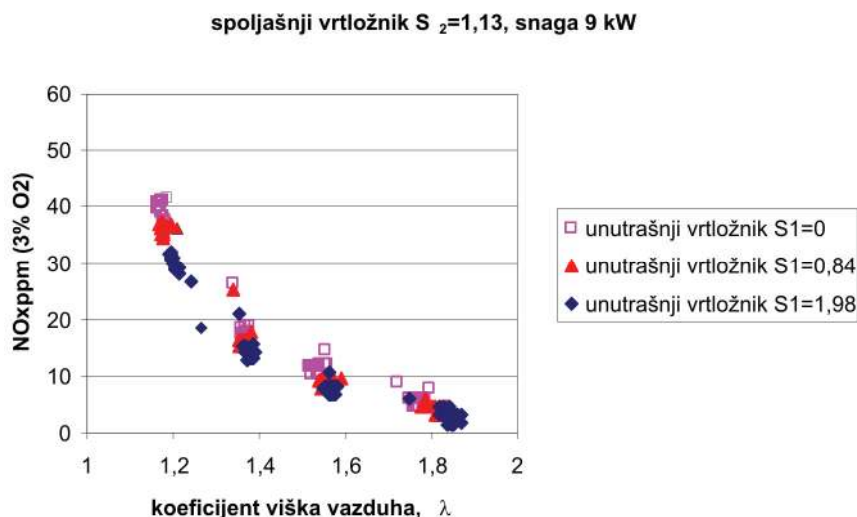
Slika 6. Fotografije plamena u slobodnom prostoru, nominalna snaga, 9 kW, $S_2 = 0,73$, $S_1 = 1,98$ $\lambda_2 = 1$, $\lambda_1 = 1,2$.
Figure 6. Typical image of the swirling flame, nominal power, 9 kW, $S_2 = 0,73$, $S_1 = 1,98$ $\lambda_2 = 1$, $\lambda_1 = 1,2$.



Slika 7. Fotografije plamena u slobodnom prostoru, nominalna snaga, 9 kW, $S_2 = 1,13$, $S_1 = 1,98$ $\lambda_2 = 1$, $\lambda_1 = 1,2$.
Figure 7. Typical image of the swirling flame, nominal power, 9 kW, $S_2 = 1,13$, $S_1 = 1,98$ $\lambda_2 = 1$, $\lambda_1 = 1,2$.



Slika 8. Zavisnost emisije NO_x od intenziteta vihora unutrašnjeg gorionika, pri spoljašnjem vihoru, $S_2 = 0,73$; nominalna snaga, 9 kW.
Figure 8. Influence of the inner swirl number on NO_x emissions for $S_2 = 0,73$ and nominal power 9 kW.



Slika 9. Zavisnost emisije NO_x od intenziteta vihora unutrašnjeg gorionika, pri spoljašnjem vihoru, $S_2 = 1,13$, nominalna snaga 9 kW.
Figure 9. Influence of the inner swirl number on NO_x emissions for $S_2 = 1.13$ and nominal power 9 kW.

Uticao nominalne snage

Istraživanje emisije NO_x vršeno je za tri nominalne snage: 5, 9 i 13 kW pri svim kombinacijama unutrašnjih i spoljašnjih vrtložnika. Rezultati su prikazani na slikama 10 i 11.

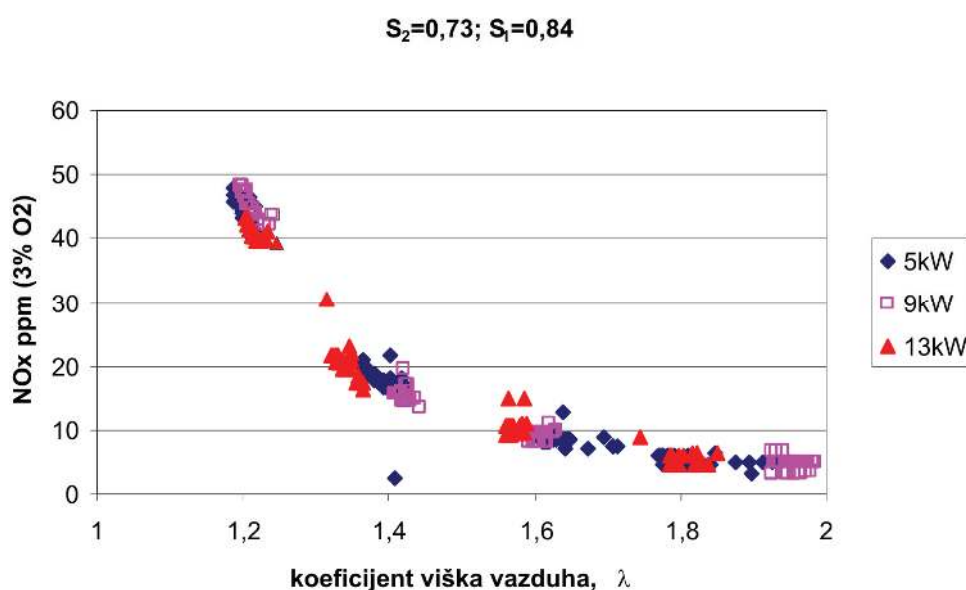
Rezultati ukazuju na to da promena snage praktično ne utiče na emisiju oksida azota, dok porast vhornog broja smanjuje emisiju NO_x u uslovima koeficijenta viška vazduha nižim od 1,4. U osnovi na obrazovanje oksida azota utiču temperatura i vreme boravka. Sa povećanjem snage raste maseni protok što skraćuje vreme boravka, dok temperatura produkata sagorevanja raste usled manjih toplotnih gubitaka, tako da zajedno posmatrajući ova dva uticaja se praktično poništavaju. Kao re-

zultat uticaj snage na emisiju oksida azota je praktično zanemarljiv.

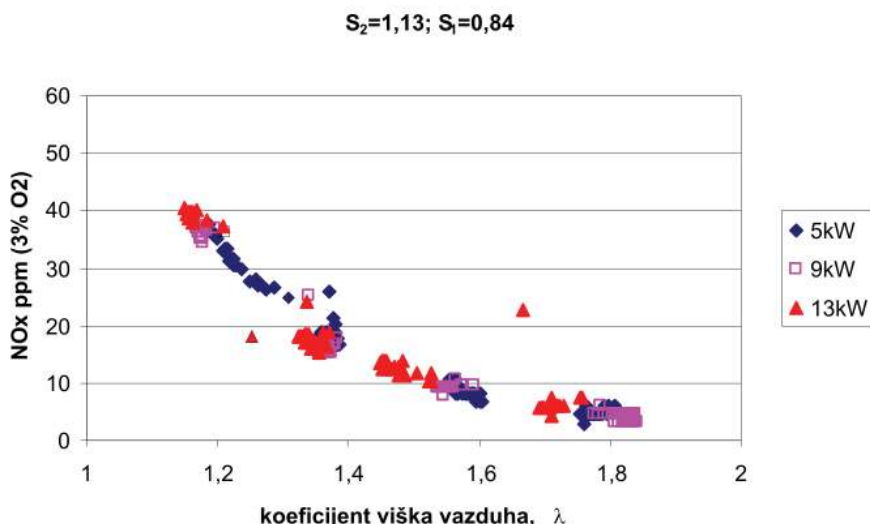
ZAKLJUČAK

U radu je prikazano ekperimentalno istraživanje uticajnih parametara na emisiju oksida azota vhornog gorionika mikroturbine sa pilotom: intenziteta spoljašnjeg vihora, intenziteta unutrašnjeg vihora i snage. Analiza rezultata dovodi do sledećih zaključaka:

- uticaj intenziteta vihora spoljašnjeg gorionika postoji i on je izraženiji ukoliko je goriva smeša bliža stehiometrijskoj;
- intenzivnijem vihoru odgovara niži nivo emisije i obratno. Već pri koeficijentima viška vazduha većim od



Slika 10. Uticaj snage na emisiju oksida azota za $S_1 = 0,84$ i $S_2 = 0,73$.
Figure 10. Influence of power on NO_x emissions for $S_1 = 0.84$.



Slika 11. Uticaj snage na emisiju oksida azota za $S_1 = 0,84$ i $S_2 = 1,13$.

Figure 11. Influence of power on NO_x emissions for $S_1 = 0.84$ and $S_2 = 1.13$.

1,4 ovaj uticaj postaje zanemarljiv zahvaljujući takvom razblaženju smeše koja inhibira termički mehanizam formiranja oksida azota;

– rezultati pokazuju da su uticaji intenziteta unutrašnjeg viora kao i uticaj nominalne snage praktično zanemarljivi.

Dobijeni rezultati su korisni za dalja istraživanja i razvoj uređaja koja će zadovoljiti zahteve za što efikasnijom konverzijom energije uz ispunjenje sve strožijih ekoloških normi.

LITERATURA

- [1] N. Syred, J.M. Beer, Combustion in Swirling Flows: A Review, *Combust. Flame* **23** (1974) 143–201.
- [2] T.S. Cheng, Y.C. Chao, D.C. Wu, T. Yuan, C.C. Lu, C.H. Cheng, J.M. Chang, Effects of fuel air mixing on flame structures and NO_x emissions in swirling methane jet flames, Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, Colorado, 1998, pp. 1229–1237.
- [3] A. Coghe, G. Solero, G. Scribano, Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **28** (2004) 709–714.
- [4] A.H. Lefebvre, *J. Eng. Gas Turb. Power* **117** (1995) 617–654.
- [5] S.M. Correa, *Power Generation and Aero Propulsion Gas Turbines: From Combustion Science to Combustion Technology*, The Combustion Institute, 1998, pp. 1793–1807.
- [6] *Advanced Microturbine Systems*, US Department of Energy, 2000.
- [7] A.H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, Philadelphia, 1998.
- [8] Y. Huang, V. Yang, Effect of swirl on combustion dynamics in a lean premixed swirl stabilized combustor, *P. Combust. Inst.* **30** (2005) 1775–1782.
- [9] A.W. Court, K.R. Pullen., C. B. Besant, Small gas turbine design: a total technology educational experience, *IMEchE, Part A* **213** (1999) 339–347.
- [10] J. Peirs, D. Reynaerts, F. Verplaetsen, F. Norman, S. Lefever, Development of a micro gas turbine for electric power generation, MME 2003, The 14th Micromechanics Europe Workshop, Delft, The Netherlands, 2003, pp. 215–218.
- [11] R.K. Cheng., D.T. Yegian, M.M. Miyasato, G.S. Samuelson, C.E. Benson, R. Pellizzari, P. Loftus, Scaling and development of low-swirl burners for low emission furnaces and boilers, *P. Combust. Inst.* **28** (2000) 1305–1313.
- [12] J. Galpin, A. Naudin, L. Vervisch, C. Angelberger, O. Colin, P. Domingo, Large-eddy simulation of a fuel-lean premixed turbulent swirl-burner, *Combust. Flame* **155** (2008) 247–266.
- [13] D. Cabot, B. Vauchelles, A. Taupin, A. Boukhalfa, Experimental study of lean premixed combustion in a scaled gas turbine chamber, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **18** (2004) 683–690.
- [14] T. Furuhashi, S. Amano, K. Yotoryama, M. Arai, Development of can-type low NO_x combustor for micro gas turbine (fundamental characteristics in a primary combustion zone with upward swirl), *Fuel* **86** (2007) 2463–2474.
- [15] T. Rutar, M. Scott, D.G. Nicol, P.C. Malte, D.T. Pratt, Effect of incomplete mixing on NO_x formation at gas turbine engine conditions, ASME paper No. 97-GT-335, 1997.
- [16] M. Adžić, V. Fotev, M. Živković, A. Milivojević, Effect of a microturbine combustor type on emissions at lean premixed conditions, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento, USA, 2006, pp. 4160–4176.
- [17] M. Adžić, M. Živković, V. Fotev, A. Milivojević, Emission characteristics of a lean premixed swirl combustor, 14. Simpozijum Termičara Srbije, Sokobanja, 2009, str. 571–576.
- [18] H.S. Kim, V.K. Arghode, A.K. Gupta, Combustion characteristics of a lean premixed LPG–air combustor, *Int. J. Hydrogen Energ.* **34** (2009) 1045–1053.

SUMMARY**INFLUENTIAL PARAMETERS OF NITROGEN OXIDES EMISSIONS FOR MICROTURBINE SWIRL BURNER WITH PILOT BURNER**Miroljub M. Adžić¹, Marija A. Živković², Vasko G. Fotev¹, Aleksandar M. Milivojević¹, Vuk M. Adžić¹¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia²Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Swirl burners are the most common type of device in wide range of applications, including gas turbine combustors. Due to their characteristics, swirl flows are extensively used in combustion systems because they enable high energy conversion in small volume with good stabilization behavior over the wide operating range. The flow and mixing process generated by the swirl afford excellent flame stability and reduced NO_x emissions. Experimental investigation of NO_x emission of a purposely designed micro-turbine gas burner with pilot burner is presented. Both burners are equipped with swirlers. Mixtures of air and fuel are introduced separately: through the inner swirler – primary mixture for pilot burner, and through the outer swirler – secondary mixture for main burner. The effects of swirl number variations for the both burners were investigated, including parametric variations of the thermal power and air coefficient. It was found that the outer swirler affects the emission of NO_x only for the air coefficient less than 1.4. The increase of swirl number resulted in decrease of NO_x emission. The inner swirler and thermal power were found to have negligible effect on emission.

Ključne reči: Gorionik • Vihor • Oksidi azota

Key words: Burner • Swirl • Nitrogen oxides