DRAGAN M. DRAMLIĆ[1]
MIROLJUB M. ADŽIĆ[2]

[1]Institut za fiziku, Centar za eksperimentalnu fiziku, Laboratorija za fiziku atmosfere, Zemun

[2]Mašinski fakultet, Laboratorija za goriva i sagorevanje, Univerzitet u Beogradu, Beograd

NAUČNI RAD

662.215.1(547.213/.214):66.082 (661.98/.993)

PROSTORNA RASPODELA KONCENTRACIJA AZOTOVIH OKSIDA I UGLJENMONOKSIDA PRI SAGOREVANJU KOMERCIJALNE C_3H_8/C_4H_{10} SMEŠE

Stalni porast potrošnje energije u svetu praćen je porastom emisije toksičnih produkata sagorevanja koji zagađuju životnu sredinu. To su pre svega azotni oksidi (NO_x), ugljenmonoksid (CO), sumpordioksid (SO_2), ugljendioksid (CO_2), nesagoreli ugljovodonici, čađ i slično. Poznavanjem načina njihovog formiranja, pravilnim izborom i kontrolom parametara sagorevanja, može se uticati na smanjenje njihove emisije i ostvariti značajna ušteda goriva. U radu su prikazani rezultati merenja sastava produkata sagorevanja dobijeni na laboratorijskoj instalaciji snage 20 kW. Dat je opis laboratorijske instalacije za sagorevanje gasovitog goriva na kome su merenja izvršena. Kao gorivo korišćena je mešavina propana i butana. Merene su koncentracije NO_x i CO po preseku i duž komore za sagorevanje pri konstantnom protoku goriva a za različite koeficijente viška vazduha. Analiziran je uticaj pojedinih parametara na emisiju zagađujućih komponenti.

UVOD

Energija kao osnova svih procesa u prirodi i energetika kao nauka o energiji i tehničkom korišćenju izvora energije predstavlja pojmove usko vezane za ekologiju. Civilizacijski razvoj čoveka uglavnom je tekao uporedo s razvojem različitih mogućnosti korišćenja energije.

Prirodni i društveni razvoj, povezuje energiju kao sredstvo, a zagađenje životne sredine kao posledicu tog razvoja, jer se najveći deo proizvedene energije u svetu dobija procesima sagorevanja fosilnih goriva u čijim se produktima nalaze mnoge toksične komponente koje se dimnim i izduvnim gasovima emituju u atmosferi, i samim tim je zagađuju. Stoga razvoj i primena energetskih postrojenja, koji se baziraju na tim procesima, mora se odvijati u razumnom skladu s temeljnim ekološkim zakonima i principima.

Osnovni zagađivači atmosfere koji se stvaraju u procesima sagorevanja su poznati. Danas su, može se reći, poznati i načini smanjenja emisije većine toksičnih produkata sagorevanja. Najveće probleme u savremenoj borbi za čistoću vazduha stvaraju azotovi oksidi (NO_x) i sumpordioksid (SO_2). Oksidi azota sadržani u atmosferi najvećim delom potiču iz procesa sagorevanja pa su stoga glavni izvori njihove emisije termoelektrane, toplane, industrijske peći i transportna sredstva.

Da problemi ove vrste nisu proizvod savremenog društva, kako se može pomisliti, ukazuje i pisani trag sa ovih prostora, koji je pronađen u Dubrovačkom arhivu, a glasi:

"*Trgovci u bosanskom gradu Srebrenici su se žalili Đurđu Brankoviću da je u gradu loša zdravstvena situacija zbog mnogih topionica koje tu rade. Tvrdili su da je to uzrok smrti mnogih dobrih ljudi i podsećali su da je Despot već bio obećao da će narediti premeštanje ovih topioničkih peći*" .

Ovaj citat je iz dokumenta Lettere di Levante 11 fol. 252, od 08.12.1435. god. Možemo reći da je ovaj dokument aktuelan i nakon skoro 565 godina i sam po sebi mnogo govori.

Azotovi oksidi koji se emituju u atmosferu, najčeće se javljaju u vidu azotmonoksida NO, azotdioksida NO_2 i azotsuboksida N_2O. U poslednjih pola veka globalna emisija NO_x i N_2O naglo se povećava, kao posledica ljudske aktivnosti. Neka zapažanja, kao posledica istraživanja koja su sprovedena u razvijenijim industrijskim zemljama, ukazuju da je srednja godinja koncentracija NO_x u relativnoj stagnaciji [1,2]. Neki izveštaji govore da srednja godišnja koncentracija azotovih oksida u urbanim sredinama Amerike iznosi od 41,07 $\mu g/m^3$ do 82,14 $\mu g/m^3$, dok u ruralnim oblastima taj nivo se kreće od 6,16 mg/m^3 – 24,64 $\mu g/m^3$, svedeno na NO_2 [3-5]. Posmatrajući standarde najrazvijenijih zemalja (USA, Japan i Evropska unija) kratko periodične koncentracije u urbanim sredinama mogu dostići nivo i do 307,5 $\mu g/m^3$, obzirom na kratak period poluživota NO_x koji u principu iznosi od nekoliko minuta do nekoliko dana. Međutim predviđanja govore da će se emisija azotovih oksida i u narednom periodu povećavati, tako da neke procene ukazuju da će se godišnja emisija NO_x u USA popeti na $30x10^6$ kg/god. dok će u Evropi dostići nivo od $22x10^6$ kg/god. U Africi, Aziji i Južnoj Americi nivo emisije NO_x predviđa se na oko $18x10^6$ kg/god. Ovolike količine emitovanih azotovih oksida u atmosferu predstavljaju ozbiljnu pretnju ne samo čoveku nego i celom eko sistemu.

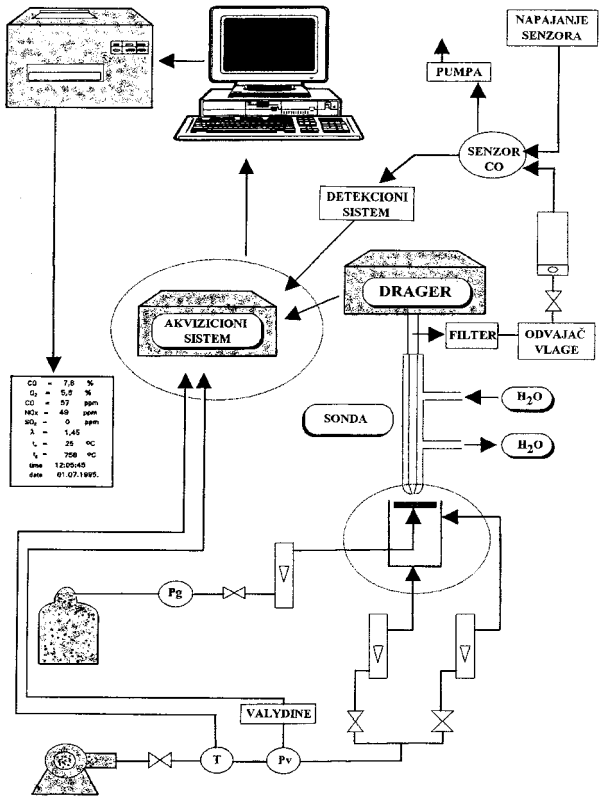
Trenutno stanje je takvo da se skoro 90% potreba za energijom ostvaruje procesima sagorevanja. U strukturi potrošnje preko 50% čine tečna i gasovita goriva. U urbanim sredinama učešće ovih goriva je znatno više. Mehanizmima generisanja, merenja, kontrole i odstranjivanja NO_x i CO posvećuje se velika pažnja kako sa stanovišta efikasnosti sagorevanja tako i sa stanovišta zaštite okoline. Ovaj rad je doprinos u tom pravcu.

Adresa autora: D. M. Dramlić, Institut za fiziku, Centar za eksperimentalnu fiziku, Laboratorija za fiziku atmosfere Pregrevica 118, 11080 Zemun
Rad primljen: Septembar 15, 1999.
Rad prihvaćen: Mart 30, 2000.

OPIS EKSPERIMENTALNE APARATURE I RADNIH USLOVA

Osnovni sklopovi i podsklopovi korišćene eksperimentalne aparature prikazani su na slici 1 [6]. Osnovni delovi su:

– gorionik
– sistem za napajanje gorivom (smeša propan–butan)
– sistem za napajanje vazduhom
– predkomora sa komorom za sagorevanje
– merači protoka
– sonda za uzimanje uzoraka produkata sagorevanja
– linija za analizu produkata
– analizator produkata sagorevanja
– akvizicioni sistem
– personalni računar



Slika 1. Blok šema eksperimentalne aparature
Figure 1. Block diagram of experimental set–up

Gorionik je laboratorijskog tipa male snage (približno 20 KW) kojim se ostvaruje delimično predmešan plamen. Ipak, obzirom na veoma kratko vreme mešanja goriva i vazduha možemo ga tretirati kao difuzioni gorionik. Gorionik je napravljen od nerđajućeg čelika. Stabilizacija plamena se ostvaruje po principu opstrujavanog tela, kružne ploče debljine 2 mm. Gorivo se uvodilo kroz 6 simetričnih mlaznica neposredno smeštenih ispod diska za stabilizaciju plamena, tako da se proces sagorevanja praktično odvija u difuzionoj oblasti. Gorionik omogućava varijaciju brzine strujanja gasne smeše i ima mogućnosti uvođenja primarnog i sekundarnog vazduha. U ovom radu nije predviđeno uvođenje sekundarnog vazduha kao uticajnog parametra. Na gorionik se nadovezuje predkomora, prečnika 40 mm i dužine 55 mm, koja se nastavlja u cilindričnu plamenu cev (komoru za sagorevanje). Sagorevanje se obavlja u komori prečnika 200 mm i dužine 400 mm čiji zidovi nisu prinudno hlađeni. Na komori se nalaze otvori za uvođenje i pozicioniranje sonde u istoj vertikalnoj ravni, a na rastojanjima od 30 mm (slika 2). Takođe pri dnu komore, nalazi se otvor sa zatvaračem koji se koristi za uvođenje inicijalnog plamena za startovanje gorionika. Iznad komore se nalazi metalno ogledalo pomoću kojeg je moguće videti gorionik i plamen odozgo u horizontalnoj ravni. Predkomora i komora zajedno mogu da se pozicioniraju do visine od 50 mm u odnosu na ravan gorionika odnosno stabilizatora plamena. Geometrija predkomore i komore za sagorevanje je relativno složena, što za posledicu ima relativno složenu strujnu sliku.

Vazduh potreban za proces sagorevanja obezbeđuje se iz komore opremljene ventilatorom koga pokreće motor snage 1 KW. Elektromotor se napaja preko varijaka napona kojim se obezbeđuju različiti režimi rada ventilatora, a samim tim i različite količine vazduha za različite režime rada. Iz komore vazduh se sistemom creva određenih prečnika razvodi kroz instalaciju. Primarni vazduh se uvodi direktno po celom prečniku gorionika vertikalno naviše. Regulacija protoka goriva i vazduha ostvaruje se odgovarajućim prigušnim ventilima. Postoje dva merača protoka i to jedan za gorivo a drugi za vazduh. Za gas je korišćen merač protoka P. A. Hillton Ltd. Engineers serije N° 5510 engleske proizvodnje dok je za vazduh korišćena merna blenda namenski razvijena i konstruisana po Britanskom standardu. Merna blenda obezbeđuje dovoljan pad pritiska u širokom mernom opsegu koji je bio neophodan za izvođenje eksperimenta. Pad pritiska na mernoj blendi meren je diferencijalnim meračem pritiska Valydine, model MC1–333–X, sa tri kanala i digitalnim displejem.

Obzirom na koncepciju eksperimentalne aparature (mala snaga i dimenzije gorionika) konstruisana je specijalna sonda za uzorkovanje od kvarca, malih dimenzija. Sonda predstavlja mali razmenjivač toplote, (slično suprotnosmernim razmenjivačima toplote) intezivno hlađen vodom, što omogućuje dovoljno brzo hlađenje produkata sagorevanja kako bi njihov sastav ostao praktično nepromenjen, uz istovremeno obezbeđenje temperature uzorka produkata sagorevanja prema predviđenom radnom režimu gasnog analizatora.

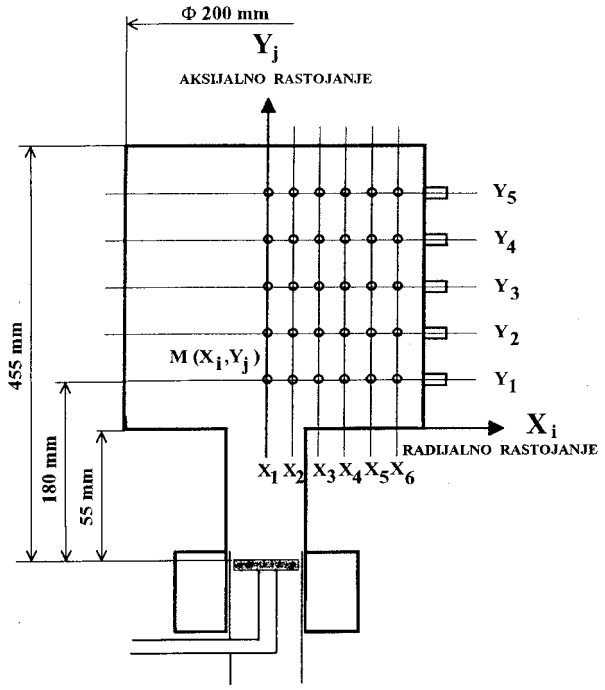
Za analizu produkata sagorevanja korišćen je Gas Analysis Computer MSI–2000 Drager koji omogućava kontinualno merenje koncentracija CO, O_2, NO_x, SO_2, dok se CO_2 računa automatski za izmerenu koncentraciju O_2 uz unapred zadati sastav goriva. Analizator ga-

sova meri ukupnu sumu azotovih oksida, tako da nije praćena posebno koncentracija NO i NO_2. Analizator gasova opremljen je sopstvenim procesnim računarom za izračunavanje koeficijenta viška vazduha i stepena sagorevanja goriva. Pored toga, meri i temperaturu produkata sagorevanja i temperaturu vazduha za sagorevanje.

Pri sprovođenju eksperimenta, neophodno je merenje i kontinualno praćenje većeg broja mernih veličina, koje je potrebno naknadno obrađivati i analizirati. Iz tog razloga izvršeno je opremanje eksperimentalne aparature akvizicionim sistemom (šesnaestokanalni komercijalni akvizicioni sistem PSLD 789) za prikupljanje, obradu i prikazivanje merenih veličina. Ovaj akvizicioni sistem omogućuje kontrolu sprovedenog eksperimenta na licu mesta uvidom u izmerenu veličinu, izbor načina merenja, u smislu pojedinačnog ili kontinualnog za sve veličine, i obradu merenih veličina, odmah ili kasnije, korišćenjem namenski razvijenih programa. Program za akviziciju vrši akviziciju za unapred određeni broj mernih tačaka i određenu brzinu uzimanja uzorka, definisanu preko vremena zadržavanja na mernom kanalu. Merni podaci prikupljeni tokom eksperimenta upisuju se u odgovarajući dokument i naknadno obrađuju i analiziraju. Za prikupljanje i čuvanje podataka akvizicije korišćen je personalni računar.

METODOLOGIJA MERENJA

Vršena su merenja komponenata produkata sagorevanja (NO_x i CO) komercijalne smeše propan–butan po preseku i duž komore za sagorevanje za razne



Slika 2. Presek komore
Figure 2. Chamber cross section

režime rada. Treba napomenuti da su sva merenja obavljena u stacionarnim uslovima. Merenja su vršena za šest režima rada u pet aksijalnih preseka u odnosu na stabilizator plamena. U svakom aksijalnom preseku vršena su merenja u poprečnom (radijalnom) pravcu na šest različitih rastojanja od ose komore. Aksijalni pomeraj je bio konstantan i iznosio je ΔY= 30 mm dok je poprečni (radijalni) iznosio ΔX= 15 mm. Skica mesta za uvođenje sonde i mernih tačaka, kao i presek komore, dat je na slici 2.

Radijalna rastojanja (u odnosu na osu komore) i aksijalnih "mernih preseka" (u odnosu na stabilizator plamena) bila su: Radijalna rastojanja X_i su:

X_1 = 0 mm
X_2 = 15 mm
X_3 = 30 mm
X_4 = 45 mm
X_5 = 60 mm
X_6 = 75 mm

Aksijalna rastojanja Y_j su:

Y_1 = 180 mm
Y_2 = 210 mm
Y_3 = 240 mm
Y_4 = 270 mm
Y_5 = 300 mm

Kao što se sa slike 2 vidi, ima 30 mernih tačaka prostorno raspoređenih. U svakoj mernoj tački M (X_i, Y_j) vršeno je kompletno merenje neophodnih parametara za svih šest režima rada. Paljenjem gorionika, postavljanjem radnih parametara za željeni režim rada i pozicioniranje sonde u tačku $M_{1,1}(X_1,Y_1)$, instalacija se pusti da radi do uspostavljanja stacionarnih uslova, odnosno dok gasni analizator ne počne pokazivati ustaljene vrednosti za očitavane parametre. Tada se startuje akvizicioni sistem, koji merenja prati kontinualno dok memorisanje podataka vrši u intervalu na svakih 5 sekundi. Nakon snimljenih 12 podataka u stacionarnom režimu u pozicioniranoj tački, akvizicija se zaustavlja i sonda se pozicionira u sledeću tačku $M_{2,1}(X_2,Y_1)$ i nakon ustaljenog pokazivanja analizatora, opet se uključi akvizicija snimi 12 podataka i procedura se ponavlja dok se ne "iskaniraju" sve merne tačke na aksijalnom preseku Y_1. Nakon merenja na tom aksijalnom preseku pređe se na sledeće aksijalno rastojanje i tako redom za sve merne tačke, koje predstavljaju "matricu" preseka komore za sagorevanje.

Ovakav pristup numeraciji mernih tačaka biće dosledno prezentiran i u tabeli 1 gde su dati zbirni rezultati merenja. U prezentaciji dobijenih rezultata pošlo se od predpostavke da je sistem osno simetričan tj. da merenja u jednoj tački reprezentativno predstavljaju vrednosti u svim tačkama na kružnici istog radijalnog rastojanja u posmatranom aksijalnom preseku. Ovo je doprinela i želja da se vizuelno pojača efekat osne simetrije. Ova predpostavka predstavlja idealizovani slučaj merenih profila u komori za sagorevanje, koji zbog složene strujno dinamičke slike vertovatno odstupa od realne slike, što bitno ne utiče na analizu dobijenih rezultata.

DOBIJENI REZULTATI I NJIHOVA ANALIZA

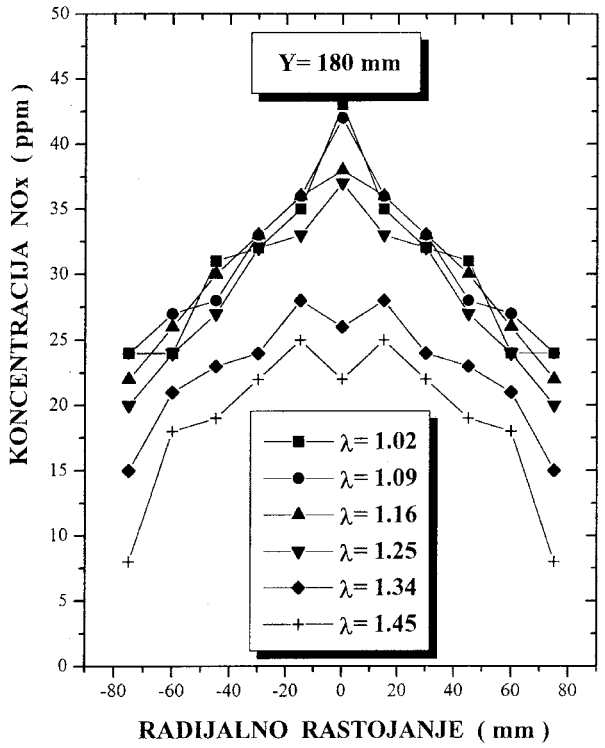
U svakoj mernoj tački na slici 2 merene su komponente za šest različitih režima rada odnosno koeficijenata vika vazduha. Rezultati na svim aksijalnim rastojanjima Y_j za šest koeficijenta viška vazduha dati su u tabeli 1, na slikama 3 do 7 dati su zbirni rezultati za NO_x a na slikama 8 do 12 zbirni rezultati za ugljenmonoksid.

Analizom dobijenih rezultata merenja produkata sagorevanja može se uočiti nekoliko osnovnih karakteristika. Izmereno temperatursko polje u komori, karakteriše lokalni maksimum u osi komore i izražen pad prema zidu komore. Sa porastom rastojanja od stabilizatora plamena duž ose komore, uočava se manja zavisnost temperature od radijalne koordinate. Obzirom da su ispitivanja rađena za nadstehiometrijsku smešu ($\lambda>1$) uočava se dosta visok sadržaj kiseonika koji se kretao u granicama od 6 zap.% do približno 17 zap.%. To ukazuje da se sagorevanje odvijalo u uslovima visokog viška vazduha što ukazuju i rezultati merenja λ pomoću analizatora produkata sagorevanja, što u suštini nije ništa drugo nego lokalni koeficijenat viška vazduha, koji se kretao u granicama od 1,4 do $\approx$ 3,3, u zavisnosti u kom je aksijalnom preseku vršeno merenje. Integralni koeficijent viška vazduha (koji je korišćen za prezentaciju rezultata) računat je na osnovu protoka vazduha i goriva i on je uslovna veličina zbog dopunskog vazduha koji je ejekcijom uvođen u komoru. Naročito izražena tendencija povećanja O_2 u produktima sagorevanja primećena je u perifernim zonama, u odnosu na osu plamena, to jest pri zidovima komore. To je i razumljivo s obzirom na ejekciju vazduha i uticaj relativno hladnih zidova komore.

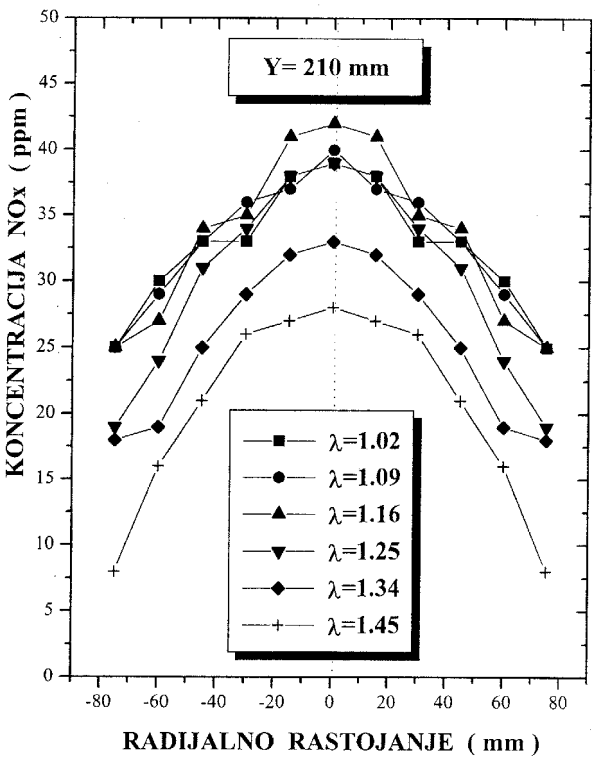
Iz teorije je poznato da azotni oksidi neposredno nastaju u post–reakcijskoj zoni, gde je temperatura rela-

Tabela 1. Dobijeni rezultati
Table 1. The rsults obtained

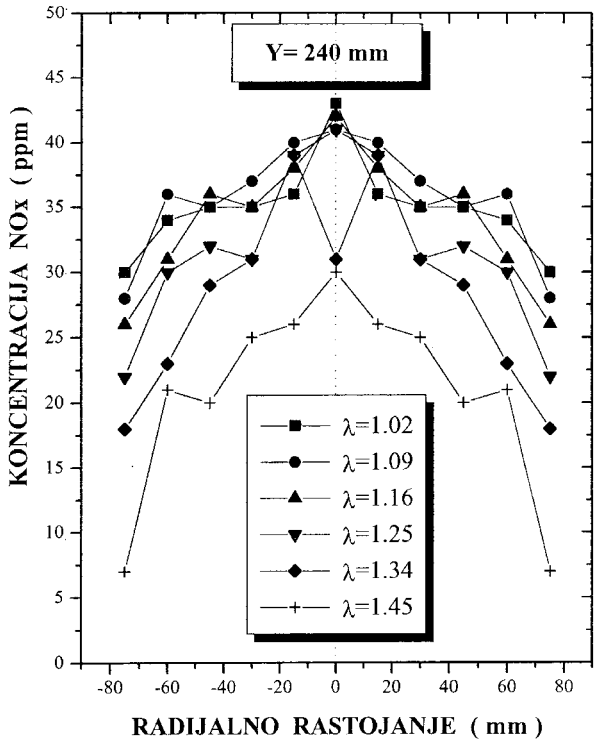
		Y_1		Y_2		Y_3		Y_4		Y_5	
	λ	NO_x	CO	NO_x	CO	NO_x	CO	NO_x	CO	NO_x	CO
		ppm									
X_1	1.02	43	2000	39	2950	40	420	39	180	39	76
	1.09	42	175	40	600	39	182	4	57	40	41
	1.16	38	74	42	67	38	58	42	31	39	23
	1.25	37	55	39	44	36	25	39	16	35	12
	1,34	26	41	33	36	29	16	33	11	29	11
	1,45	22	59	28	77	27	21	24	12	24	15
X_2	1,02	35	550	38	1800	36	236	37	72	37	62
	1.09	36	133	37	213	40	80	39	33	38	20
	1.16	36	73	41	62	38	38	39	19	36	12
	1,25	33	46	48	41	39	23	36	11	30	10
	1,34	28	33	32	22	29	15	27	8	23	9
	1,45	25	32	27	25	26	19	25	10	22	10
X_3	1.02	32	300	33	135	35	98	36	59	37	32
	1.09	33	98	36	66	37	40	37	33	35	20
	1.16	33	64	35	33	36	22	34	15	35	12
	1.25	32	38	34	20	35	14	31	9	29	9
	1.34	24	23	29	14	31	11	25	6	22	9
	1.45	22	19	26	15	25	12	23	8	20	10
X_4	1.02	31	77	33	59	35	42	33	27	34	14
	1.09	28	48	33	35	35	23	31	13	34	12
	1.16	30	32	34	20	36	12	31	9	33	9
	1.25	27	20	31	12	32	9	28	6	27	9
	1.34	23	14	25	10	29	7	25	6	22	8
	1.45	19	14	21	10	20	9	20	6	19	8
X_5	1.02	24	28	30	23	34	16	31	11	29	12
	1.09	27	20	29	13	36	11	30	7	28	8
	1.16	26	16	27	10	31	7	29	6	25	8
	1.25	24	13	24	7	30	6	27	5	21	8
	1.34	21	12	19	7	23	6	20	5	17	8
	1.45	18	16	16	7	21	7	17	4	16	8
X_6	1.02	24	31	25	8	30	8	25	4	25	9
	1.09	24	28	25	6	28	6	27	2	24	8
	1.16	22	25	25	6	26	6	25	2	23	7
	1.25	20	26	19	5	22	5	22	2	19	7
	1.34	15	24	18	6	18	3	11	2	14	7
	1.45	8	23	8	14	7	8	6	9	6	10



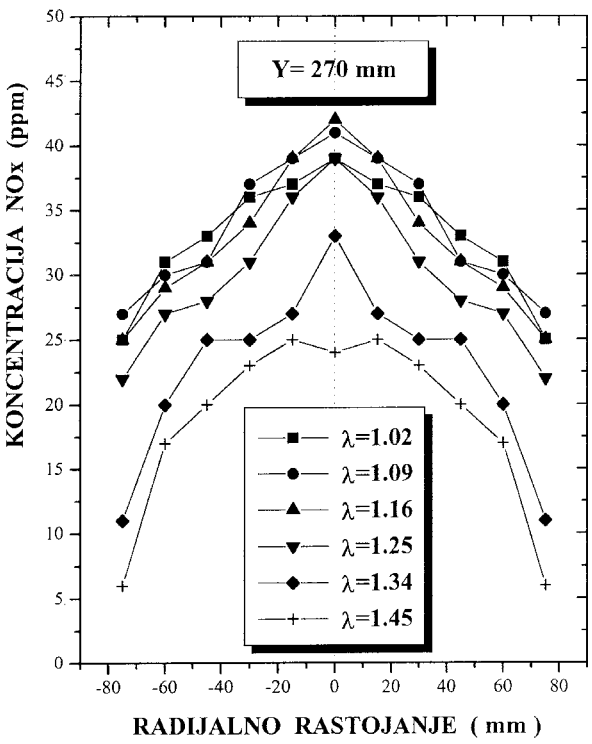
Slika 3. Koncentracijsko polje azotovih oksida u aksijalnom preseku Y = 180 mm
Figure 3. Concentration field of nitrogen oxides at the cross section Y = 180 mm



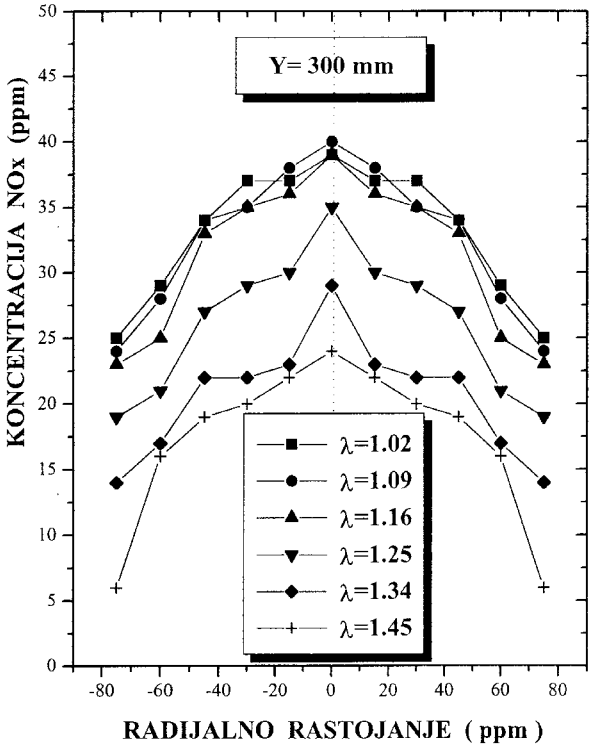
Slika 4. Koncentracijsko polje azotovih oksida u aksijalnom preseku Y = 210 mm
Figure 4. Concentration field of nitrogen oxides at the cross section Y = 210 mm



Slika 5. Koncentracijsko polje azotovih oksida u aksijalnom preseku Y = 240 mm
Figure 5. Concentration field of nitrogen oxides at the cross section Y = 240 mm



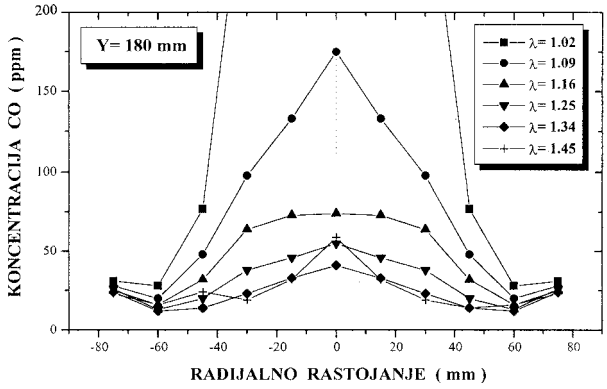
Slika 6. Koncentracijsko polje azotovih oksida u aksijalnom preseku Y = 270 mm
Figure 6. Concentration field of nitrogen oxides at the cross section Y = 270 mm



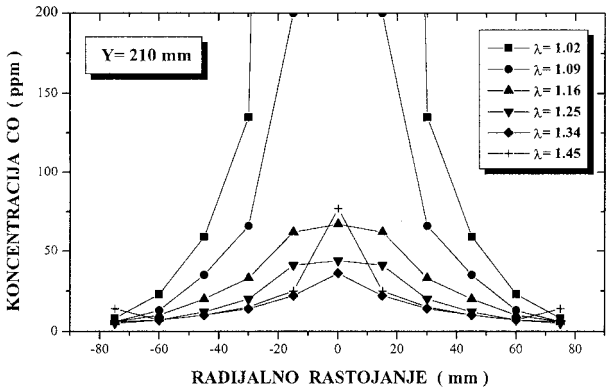
Slika 7. Koncentracijsko polje azotovih oksida u aksijalnom preseku Y = 300 mm
Figure 7. Concentration field of nitrogen oxides at the cross section Y = 300 mm

tivno bliska svom maksimumu i gde je koncentracija atomskog kiseonika značajna. Približavajući se osi plamena, značajno se povećava temperatura tako da se ostvaruje superavnotežno stanje atoma kiseonika [7,8] koje pogoduje oksidaciji molekula azota, odnosno formiranju azotovih oksida. Izvan zone neposrednog plamena, usled smanjenja temperature, opada koncentracija atomskog kiseonika na račun povećanja rekombinovanih molekula kiseonika, što doprinosi kočenju oksidacije molekula azota. To ukazuje na veliki uticaj koeficijenta viška vazduha i temperature na količinu produkovanih azotovih oksida. Izmereni podaci pokazuju relativno nisku koncentraciju NO_X u svim mernim tačkama. Distribucija NO_X ima tendenciju praćenja temperaturskog polja. Azotovi oksidi, kao što je i očekivano, formiraju se u recirkulacionoj zoni neposredno iza stabilizatora plamena. Uočeno je da do zamrzavanja reakcije dolazi neposredno ispred prvog aksijalnog preseka, tako da posle toga dolazi do tendencije homogene raspodele koncentracije NO_X po preseku komore. Najniže vrednosti azotnih oksida izmerene su na radijalnim rastojanjima 60 i 75 mm, što je i očekivano obzirom da se radi o spoljnoj zoni mešanja [9,10].

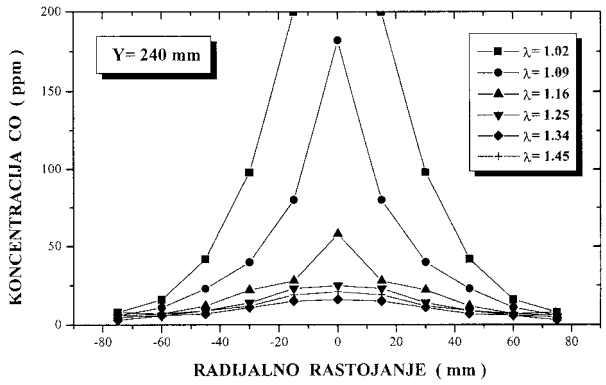
Koncentracija CO gasa u produktima sagorevanja zavisi od temperature, koeficijenta viška vazduha i strujnih uslova. Izmerene vrednosti za CO prikazane su na slikama 8 do 12 i primećuje se da su dobijeni rezultati u saglasnosti sa teorijskim predviđanjima za produkciju CO iz procesa sagorevanja gasovitih goriva [11,12,13]. Najviše izmerene vrednosti su u osi plamena za sva aksijalna rastojanja što je i logično, obzirom da su tu najviše temperature i da nivo koncentracija opada što se povećava radijalno rastojanje. Ukoliko λ opada, opada i CO sve dok se ne približi vrednostima stehiometrijskih uslova kada koncentracija CO naglo raste što se vidi i sa slika. Taj mehanizam je najizraženiji u presecima Y_1 i Y_2 i to za λ = 1,02 (slike 8 i 9) gde su i izmerene najviše vrednosti. Ukoliko se aksijalno rastojanje povećava, primećena je tendencija ka uravnoteženju koncentracija po svim X_i što je naročito izraženo za presek Y_5. To se može objasniti najdužim raspoloživim vremenom za formiranje ugljendioksida koje je u direktnoj vezi sa aksijalnim rastojanjem merne tačke. Ukoliko je to rastojanje veće utoliko je i raspoloživo vreme duže. Najveće koncentracije CO izmerene su u aksijalnim presecima koji leže najbliže recirkulacionoj zoni. Sa povećanjem aksijalnog rastojanja koncentracija CO opada da bi dostigla najnižu vrednost u preseku 300 mm. Sa slika se vidi da u blizini zidova komore (X_6 = 75 mm), koeficijenat viška vazduha nema bitan uticaj na produkciju CO. Ilustracija prostorne raspodele CO unutar komore za sagorevanja za aksijalni presek Y_1 i režim rada λ = 1,02 prikazana je na slici 13.



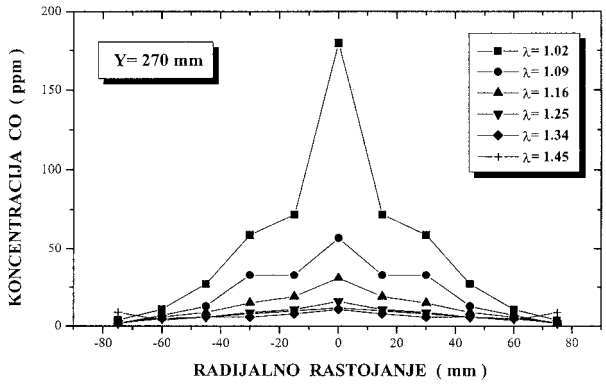
Slika 8. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u aksijalnom preseku Y = 180 mm
Figure 8. Concentration field of carbonmonoxide at the cross section Y = 180 mm



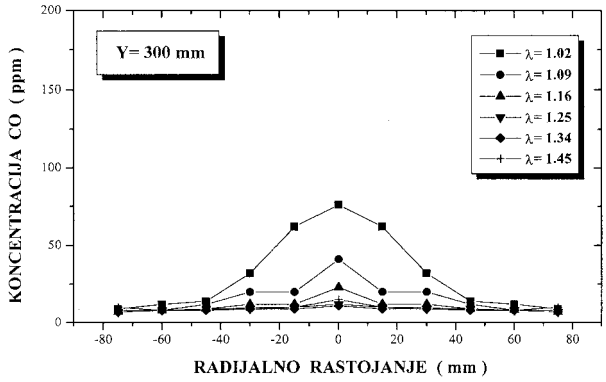
Slika 9. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u aksijalnom preseku Y = 210 mm
Figure 9. Concentration field of carbonmonoxide at the cross section Y = 210 mm



Slika 10. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u aksijalnom preseku Y = 240 mm
Figure 10. Concentration field of carbonmonoxide at the cross section Y = 240 mm

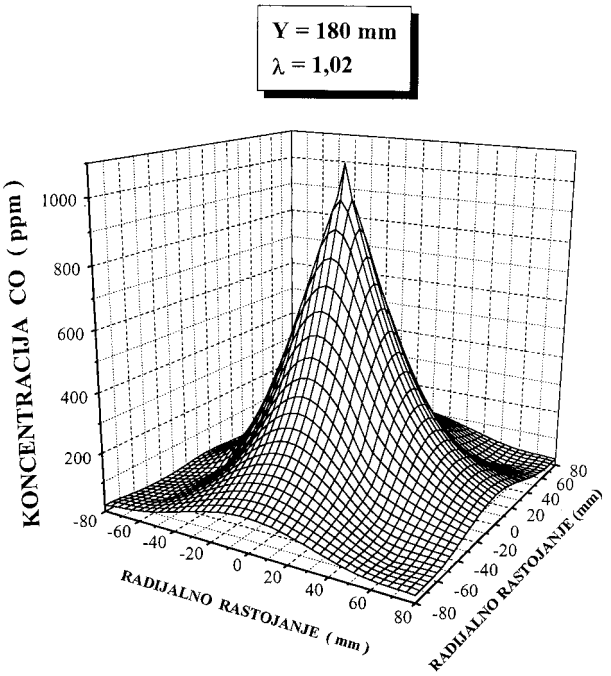


Slika 11. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u aksijalnom preseku Y = 270 mm
Figure 11. Concentration field of carbonmonoxide at the cross section Y = 270 mm

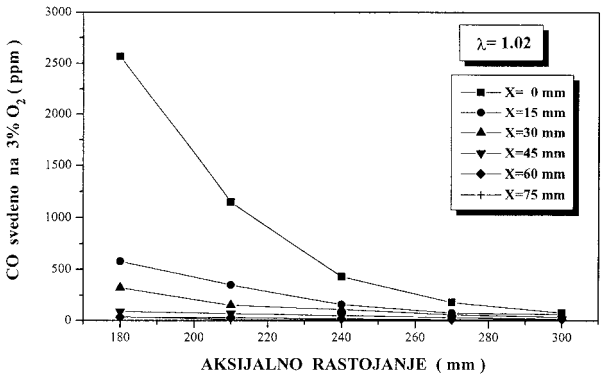


Slika 12. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u aksijalnom preseku Y = 300 mm
Figure 12. Concentration field of carbonmonoxide at the cross section Y = 300 mm

Fukcionalna zavisnost CO i NO_X od aksijalnih rastojanja za karakteristične režime rada, data je na slikama 14 do 19. Radi komparacije rezultati su svedeni na 3 zap.% kiseonika (njihove vrednosti nisu date u tabeli 1). Kao što je poznato CO je relativno brzi međuprodukt. Na visokim temperaturama ima ga u značajnim količinama

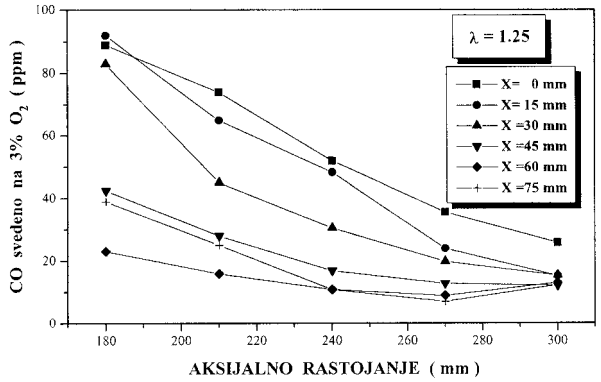


Slika 13. Prostorna raspodela ugljenmonoksida unutar komore za sagorevanje
Figure 13. Space distribution of CO in the combustion chamber

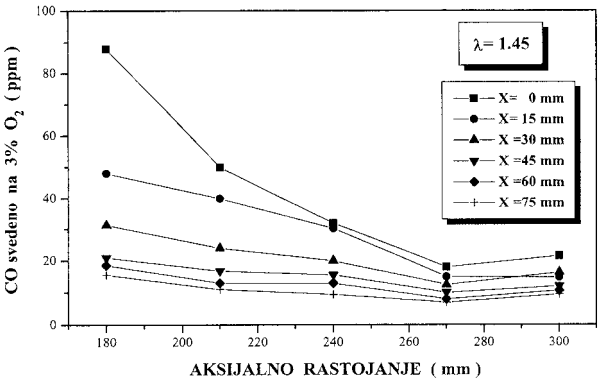


Slika 14. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.02
Figure 14. Concentration field of carbonmonoxide as a function of the axial cross section for λ = 1.02

što ukazuje da se on formira u zonama plamena i prelazi (oksiduje) u CO_2 u hladnijim zonama. Prema tome neophodno je da postoji dovoljno vreme da se CO oksiduje u CO_2. Na slici 14 prikazana je zavisnost koncentracijskog polja CO u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za različita radijalna rastojanja pri koeficcijentu viška vazduha 1,02. Vidi se da ukoliko je koordinata Y aksijalnih preseka veća utoliko je koncentracija CO sve manja i manja nezavisno od radijalnih rastojanja i da teži jednoj uravnoteženoj koncentraciji na rastojanju Y = 300 mm. Ukoliko bi se aksijalno rastojanje ekstrapoliralo na rastojanje Y= 400 mm (što predstavlja i kraj komore za sagorevanje) uočili bi jednu uravnoteženu i relativno nisku koncentrciju CO za sva radijalna rastojanja i sve



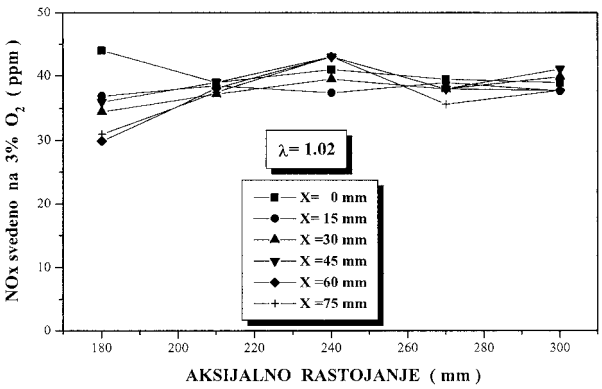
Slika 15. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.25
Figure 15. Concentration field of carbonmonoxide as a function of the axial cross section for λ = 1.25



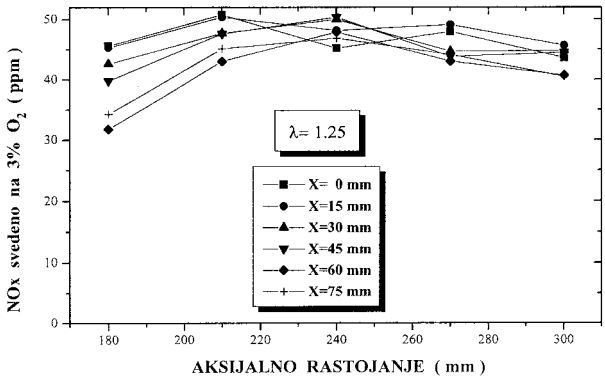
Slika 16. Koncentracijsko polje ugljenmonoksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.45
Figure 16. Concentration field of carbonmonoxide as a function of the axial cross section for λ = 1.45

režime rada što ukazuje da geometrija komore za sagorevanje i brzinsko polje omogućuju dovoljno vreme za oksidaciju CO u CO_2 [14-17]. Sa slika se takođe primećuje da su najveće produkcije CO u osi plamena (X = 0 mm) pri svim režimima rada i da ukoliko se radijalno rastojanje povećava uticaj λ opada. Vidi se da u tim oblastima (X > 60 mm) koeficijenat viška vazduha nema odlučujući uticaj na produkciju CO već da njegova produkcija pretežno zavisi od temperature.

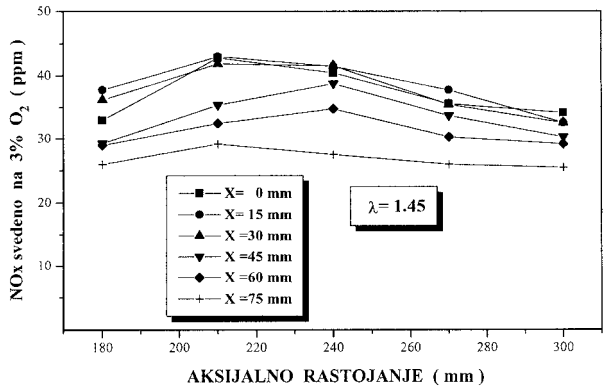
Što se tiče NO_x oni se formiraju u zonama reakcije sa najviim temperaturama i potom nema njihove dalje reakcije. Produkciju NO_x pospešuje visoka temperatura i dugo vreme boravka tj. dugo živeći vrtlozi odnosno male brzine strujanja [6,18-20]. Funkcionalna zavisnost NO_x od aksijalnih rastojanja za karakteristične režime rada data je na slikama 17,18 i 19. Na slici 17 uočljivo je da nema bitne razlike u koncentraciji NO_x za sve radijalne preseke to ukazuje na to da su se NO_x formirali pre preseka Y = 180 mm i da se ne menjaju. Koncentracija NO_x se bitno ne menja ni u zavisnosti od radijalnih rastojanja što se objašnjava time da njihovo formiranje podržavaju dugoživeći vrtlozi na ivici plamena. Ujednačenost koncentracija u presecima 210, 270 i 300 mm ukazuju na to da je u tim presecima i temperatursko polje uravnoteženo. Sa slika se primećuje da pri porastu koeficijenta viška vazduha koncentracija NO_x ima tendenciju neznatnog opadanja.



Slika 17. Koncentracijsko polje azotovih oksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.02
Figure 17. Concentration field of nitrogen oxides as a function of the axial cross section for λ = 1.02



Slika 18. Koncentracijsko polje azotovih oksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.25
Figure 18. Concentration field of nitrogen oxides as a function of the axial cross section for λ = 1.25



Slika 19. Koncentracijsko polje azotovih oksida u zavisnosti od aksijalnih rastojanja za λ = 1.45
Figure 19. Concentration field of nitrogen oxides as a function of the axial cross section for λ = 1.45

ZAKLJUČAK

Izvršena merenja koncentracije ugljenmonoksida i azotovih oksida, potvrdila su očekivanu prostornu raspodelu koja se slaže sa teorijskim predviđanjima koja daju opšte prihvaćeni mehanizmi i kinetika njihovog nastajanja u procesima sagorevanja gasovitih goriva. Dobijeni rezultati su poređeni sa literaturnim podacima i pokazali su zadovoljavajući stepen slaganja.

Konstatovano je da se azotovi oksidi (NO_x) formiraju neposredno u plamenoj zoni. Merenja su pokazala da nema bitne razlike u koncentraciji NO_x za sve aksijalne preseke, što ukazuje na to da su se oni formirali pre prvog aksijalnog preseka (Y = 180 mm) i da se dalje njihova koncentracija ne menja. Bitno se ne menja ni u zavisnosti od radijalnih rastojanja, što potvrđuje pretpostavku da njihovo formiranje podržavaju dugoživeći vrtlozi na ivicama plamena.

Dobijeni rezultati potvrđuju da je ugljenmonoksid brzonastajući međuproizvod koji se formira na visokim temperaturama, gde ga ima u značajnim količinama, i sporije prelazi u CO_2 u zonama nižih temperatura. Distribucija koncentracije ugljenmonoksida pokazuje da CO ima pogodne uslove, tj. dovoljno vreme boravka i dovoljno visoku temperaturu da se obavi transformacija u CO_2.

ZAHVALNICA

Ovaj rad urađen je u okviru projekta br. 02M14 "Modeliranje kontrola i zaštita životne sredine" na podprojektu "Fizika atmosfere" koji je delom finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije.

LITERATURA

[1] C.T. Bowman, 24 th Symp. (Int.) Combust. pp 859–878 The Combustion Institute, Pittsburgh (1995)
[2] J.P. Smart, P.A. Roberts, G.G. Soete, J. Inst. Energy, Semptember (1990) 131–135
[3] R.K. Lyon, J. A. Cole, Combustion & Flame, **77** (1989) 139–143
[4] A.K. Gupta, D.G. Lilley, J. Propul. Pow., 2 March (1994)
[5] D.M.Dramlić, Hem. Ind., **51** (2) (1997) 62–73
[6] D.M.Dramlić, Istraživanje procesa sagorevanja gasovitih goriva i mogućnost kontrole korišćenjem senzora za pojedine komponente dimnih gasova, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
[7] J.A. Miller, C.T.Bowman, Prog. Energy Combust. Sci., **15** (1989) 287–338.
[8] C.F. Fenimore, Combustion & Flame, **28** (1976) 249–256
[9] D.M. Dramlić, M. M. Adžić, R. A. Savić, Zbornik radova JUNG 95, Vrnjačka banja, (1995) 325–332
[10] D.M. Dramlić, M. M. Adžić, R. A. Savić, Zbornik radova JUNG 95, 10 Vrnjačka banja, (1995) 310–319
[11] W.G. Ormerod, A.W. Read, J. Inst. Energy, March (1979) 23–26
[12] F.C. Lockwood, Combust. Sci. Tech., 17 (1977) 105–107.
[13] A.A. Westenberg, Combust. Sci. tech., **4** (1971) 59–64.
[14] S.L. Plee, A.M. Mellor, Combustion & Flame, **35** (1979) 61–80.
[15] J.H. Tuttle, M.B. Colket, R.W. Bilger, A.M.Mellor, 16 th. Symp. (Int.) Combust., pp. 209–219. The Combustion Institute, Pittsburgh (1977).
[16] D.C.J. Hammond, J.Energy, vol.1, July–Aug. (1977) 250–256.
[17] D. M. Dramlić, M. M. Adžić, Procesna Tehnika, **14** (2–3) (1998) 198–203
[18] K. M. Kundu, D. Banerjee, D. Bhaduri, Combust. Sci. Techn., **17** (1977) 153–162.
[19] J. F. Driscoll, R. H. Chen, Y.Yoon, Combustion & Flame, **88** (1992) 37–49
[20] D. M. Dramlić, M. M. Adžić, R. A. Savić, Zbornik radova "Industrijska energetika 96", Herceg Novi, (1996) 461–464

SUMMARY

SPACE DISTRIBUTION OF NITROGEN OXIDES AND CARBON MONOXIDE CONCENTRATION IN COMMERCIAL C_3H_8/C_4H_{10} MIXTURE COMBUSTION

(Scientific paper)

Dragan M. Dramlić[1], Miroljub M. Adžić[2]
[1]Institute of Physics, Center for Experimental Physics, Atmospheric Physics Laboratory, Pregrevica 118, 11080 Zemun, P.O.Box 68
[2]Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory for Fuel and Combustion,University of Belgrade, 27 Mart 80, 11000 Beograd

Growing energy consumption wordwide is accompanied by the increased emission of toxic combustion products polluting the environment. These are primarly nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), sulfurdioxide (SO_2), carbon dioxide (CO_2), unburt hydrocarbons, soot, etc. Knowledge of their formation, as well as the appropriate selection and control of combustion parameters may reduce their emission and contribute to significant fuel economy. The paper deals with the results obtained by measuring the combustion product composition on the 20 kW laboratory equipment. The description of a laboratory set-up for gas fuel combustion is given. A propane–butane mixture was used as a fuel. The combustor radial and axial concentration profiles of NO_x and CO were measured, under conditions of constant fuel flow and variable air/fuel ratios. The paper includes an analysis of the influence of the parameters on toxic component emission.

Key words: Nitrogen oxides • Carbonmonoxide • Combustion • Gas fuel •
Ključne reči: azotni oksidi • ugljenmonoksid • gasovito gorivo •