
Degiklio žiočių formos įtaka NO_x susidarymui besisukančioje metano ir oro liepsnoje

Aiveta Lapienienė,
Ričardas Šležas

*Lietuvos energetikos institutas,
Degimo procesų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas*

Tirta, kaip degiklio žiočių forma veikia kuro sudegimą ir azoto oksidų susidarymą besisukančioje metano ir oro liepsnoje. Degimo stende matuotos CO , NO_x , O_2 koncentracijos bei temperatūra, keičiant žiočių formą, mišinio riebumą ($\phi = 0,65\text{--}0,95$) bei dujų tiekimo aukštį žiotyse. Eksperimentai atlikti su tiesiomis, įgaubtomis ir išgaubtomis žiotimis. Gauti NO_x ir CO išėigos skirtumai pagrindžiami, remiantis stebimais liepsnos ir tekėjimo lauko [13] pokyčiais. Nustatyta, kad kuro sudegimą ir azoto oksidų išėigą labiausiai veikia sukimosi ašies precesija ir mišrus degimas. Dėl precesijos padidėja NO_x išėiga esant išgaubtomis žiotims bei nesudegimas – išgaubtomis ir įgaubtomis žiotims. Dėl mišraus kuro degimo sumažėja NO_x išėiga esant įgaubtomis žiotims. Darbe pateikiami CO , NO_x , O_2 koncentracijų bei temperatūros matavimo duomenys, liepsnos nuotraukos ir liepsnos struktūros analizė.

Raktažodžiai: NO_x , NO_x mažinimas, mišrus degimas, sukimosi ašies precesija, degiklio žiotys, žiočių forma

1. ĮVADAS

Besisukančios srovės su vidinėmis recirkuliacijos zonomis yra plačiai taikomos įvairiuose deginimo įrenginiuose. Pradėta naudoti kaip priemonė, garantuojanti stabilų degimą, šiuo metu plačiai taikoma teršalų susidarymo kontrolei. Recirkuliuojantys karšti degimo produktai palaiko degimo stabilumą. Derinant recirkuliacijos stiprumą ir tiekiamo kuro kiekį, labai stabiliai ir gerai sudega kuras. Recirkuliacijos stiprumas besisukančioje srovėje tiesiogiai priklauso nuo srovės susukimo ir srauto greičio, todėl visai nesudėtinga jį valdyti. Tai įgalina konstruoti deginimo įrenginius, kurie gali stabiliai dirbti esant dideliu našumų intervalui.

Visame pasaulyje nuolat griežtinami gamtos saugos reikalavimai iš įrenginiuose deginamo kuro išsiskiriantiems teršalams. Ypač daug dėmesio skiriama mažinant NO_x išlakų kiekius. Degimo produktų valymas nuo NO_x yra technologiškai sudėtingas ir brangus procesas, todėl dauguma NO_x išlakų kiekių mažinimo šiuolaikinių tiriamųjų darbų skirta degimo procesui valdyti siekiant kontroliuoti susidarančių NO_x kiekius. Pastaraisiais dešimtmečiais ypač susidomėta recirkuliacijos panaudojimu susidarančių NO_x kiekiams mažinti. Parenkant recirkuliacinės zonos formą ir vietą degiklio srovėje, galima valdyti liepsnos formą, temperatūrų pasiskirstymą liepsnoje ir degimo kameroje bei kartu turėti įtakos teršalų susida-

rymui. Kasmet skelbiama nemažai publikacijų apie recirkuliacijos valdymą, taip pat jos poveikį degimo proceso stabilumui ir teršalų (dažniausiai NO_x) formavimuisi. Autoriai dažnai tiria tokius parametrus, kaip susukimo ir recirkuliacijos stiprumas [7, 8, 10], kuro ir oro santykis [9, 11, 12]. Daug dėmesio pasaulinėje spaudoje skiriama sudegimui (CO koncentracijai) ir NO_x susidarymui. Gana nuodugnai išnagrinėtos cheminės degimo reakcijos, kurių metu formuojasi ir skyla NO_x [1–5]. Labai daug sukaupta informacijos apie tai, kaip kinta NO_x susidarymas deginant gamtines dujas. Plačiai išnagrinėtas ir santykinis vieno ar kito NO_x susidarymo mechanizmo indėlis NO_x išėigai, keičiant ekvivalentinį santykį, slėgį, susukimą, pridėdant slėgio dažnio moduliacijas, panaudojant pakopinį deginimą.

Šiame darbe analizuojama galimybė valdyti degimo procesą ir kontroliuoti susidarančių NO_x kiekius panaudojant mažus tekėjimo lauko pokyčius, t. y. keičiant slėgio ir greičio pasiskirstymą degimo kameroje, tačiau nekeičiant integralinių besisukančios srovės parametrų. Panaudojus konfuzorių arba difuzorių, keičiamas ašinis ir tangentinis greičių pasiskirstymas išilgai degimo kameros, tačiau lieka nekeičiami integraliniai parametrai – Re ir S . Palyginus su tokiais konstrukciniais sprendimais, kaip kuro tiekimo vietos parinkimas, užsukimo stiprumas, degimo kameros matmenys, mažų pokyčių tekėjimo lauke poveikis beveik nenagrinėtas.

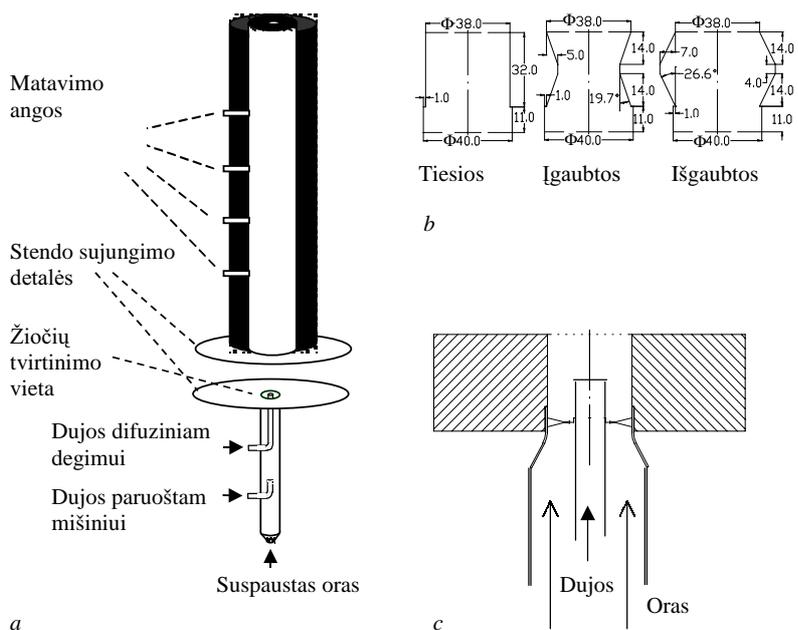
Atlikto darbo tikslas buvo ištirti, kokią įtaką degiklio žiočių forma turi recirkuliacinės zonos formai, vietai bei struktūrai ir kaip dėl recirkuliacinės zonos pokyčių reaguojančiame sraute kinta kuro sudegimas bei azoto oksidų susidarymas.

2. EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA

Degimo eksperimentas atliktas vertikaloje, išklotoje, cilindro formos degimo kameroje, kurios aukštis – 100 cm, skersmuo – 14,4 cm (1 pav., a). Dūmai iš degimo kameros išeina per viršuje esančią 3,6 cm skersmens angą. Dujos ir oras į degimo kamerą patenka per 38 mm skersmens keramines žiotis kameros apačioje. Žiotys tvirtinamos ant prijungiamos apatinės degimo stendo dalies. Oro srautui susukti prieš žiotis buvo įtvirtintas ašinis suktuvas su dvylika mentelių. Suktuvo įtvirtinimo ir dujų bei oro tiekimo schema parodyta 1 pav., c. Oro srovės susukimo laipsnis $S = 0,77$ apskaičiuotas pagal formulę [6]:

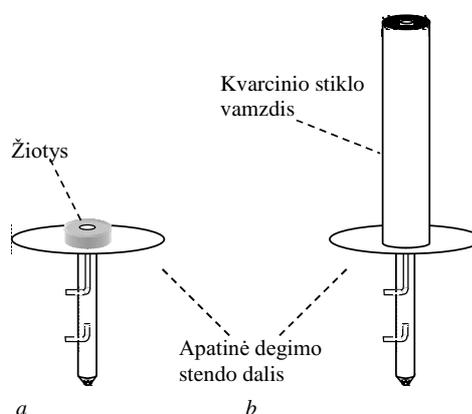
$$S = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right) \cdot \text{tg}\varphi;$$

čia $d = 38$ mm – išorinis suktuvo skersmuo; $d_h = 16$ mm – užblokuoto suktuvo centro skersmuo; $\varphi = 45^\circ$ – suktuvo mentelių pasukimo kampas. Kinetinio degimo eksperimente dujos buvo tiekiamos per perforuotą vamzdelį 25 cm atstumu prieš suktuvą. Difuziniam degimui dujos buvo tiekiamos per 12 mm skersmens vamzdelį, įtvirtintą žiočių centre. Degimo produktų koncentracijos ir temperatūros profiliai buvo matuojami 14, 31, 46 ir 63 cm aukštyje nuo žiočių.



1 pav. Degimo stendas. a – degimo kamera bei dujų ir oro tiekimo schema; b – tirtų žiočių matmenys mm; c – dujų ir oro įtekėjimo į žiotis schema

Tirtos trijų formų žiotys: tiesios, įgaubtos ir išgaubtos. Įgaubtos žiotys susideda iš tolygiai sujungtų konfuzorinės, tiesios ir difuzorinės dalių. Išgaubtos žiotys susideda iš tolygiai sujungtų difuzorinės, tiesios ir konfuzorinės dalių. Visos žiotys buvo vienodų 32 mm ilgio ir 38 mm ištekėjimo skersmens. Žiočių schemas ir pagrindiniai matmenys – 1 pav., b. Visų formų žiočių atvejais buvo tiriamas paruošto dujų ir oro mišinio degimas bei nesumaišytų dujų degimas, kai jos tiekiamos per vamzdelį žiočių apačioje, viduryje ir viršuje. Dujų debitas visais atvejais buvo vienodas ir lygus $0,44 \text{ m}^3/\text{val}$. Oro debitas buvo keičiamas nuo 3,7 iki $5 \text{ m}^3/\text{val}$. Oro srovės Re skaičius, apskaičiuotas pagal vidutinį oro greitį $u_{\text{vid}}^{\text{oro}}$ ir žiočių ištekėjimo skersmenį, kinta intervale $(2,7-3,8) \cdot 10^3$. Oro ir dujų debitai buvo matuojami ro-



2 pav. Liepsnos vizualizacijos stendai. a – liepsna stebima atviroje aplinkoje; b – liepsna stebima kvarcinio stiklo vamzdyje

tametais, degimo produktų temperatūra – platina – platinarodžio aušinama termopora, O_2 , CO , NO ir NO_2 koncentracijos – TESTOTERM elektrocheminiu analizatoriumi.

Liepsnos atviroje aplinkoje vizualizacijai buvo panaudota apatinė degimo stendo dalis (2 pav., a). Siekiant patikrinti, ar atviroje aplinkoje stebimi struktūriniai liepsnos dariniai atsikartoja degimo kameroje, panaudotas kvarcinio stiklo vamzdis. Apatinė degimo stendo dalis buvo sujungta su 14 cm vidinio skersmens ir 0,7 m aukščio 5 mm kvarcinio stiklo vamzdiu, kurio viršutinė dalis dengta metaline plokšte su 3,6 cm anga dūmams išeiti (2 pav., b). Liepsnos stebėjimas vamzdyje yra sudėtingas dėl prastinio matomumo ir būtinybės dažnai aušinti stendą, kad kvarcinis stiklas neperkaistų.

3. REZULTATŲ APTARIMAS

Tiriant degiklio žiočių formos įtaką NO_x susidarymui buvo taikyti du metodai. Pirmiausia degimo stende buvo matuota temperatūra bei degimo produktų sudėtis ir analizuotos degiklio žiočių formos bei dujų tiekimo vietos poveikis NO_x susidarymui. Vėliau buvo stebėta liepsnos atviroje aplinkoje forma ir struktūra, siekiant paaiškinti, kokie degimo ir tekėjimo pokyčiai nulėmė išmatuotus NO_x susidarymo skirtumus. Liepsnos forma ir dinamika atvira ore ir degimo kameroje nėra identiškos. Todėl papildomai buvo tikrinta, ar stebimi liepsnos prisijungimas ir struktūriniai dariniai, kuriais grindžiami teršalų matavimo rezultatai, pasikartoja ir degimo kameros dydžio kvarcinio stiklo vamzdyje. Darbe remiamasi tais liepsnos prisijungimo ir koherentinių struktūrų liepsnoje dinamikos dėsniniais, kurie pasikartoja ir kvarcinio stiklo kameroje.

Atviroje aplinkoje ir degimo stende atlikti keletas eksperimentų, keičiant žiočių formą, dujų tiekimą ir oro kiekį (greitį). Dujų kiekis yra pastovus, todėl standartinėmis sąlygomis apskaičiuota NO_x koncentracija vienareikšmiai atitinka azoto oksidų emisijos indeksą EI (kg NO sudeginus 1 kg CH₄), parodantį azoto oksidų išėigą iš kuro vieneto. Nors eksperimentuose dujų ir oro kiekiai buvo matuojami rotametrais, siekiant atsiriboti nuo dujų bei oro kiekio matavimo neapibrėžčių, rezultatai pateikiami kaip priklausomybė nuo

ekvivalentinio santykio $\phi = \frac{21 - O_2}{21}$, kuris apskaičiuojamas pagal O₂ koncentraciją degimo kameros centre aukščiausiam pjūvyje (63 cm atstumu nuo žiočių).

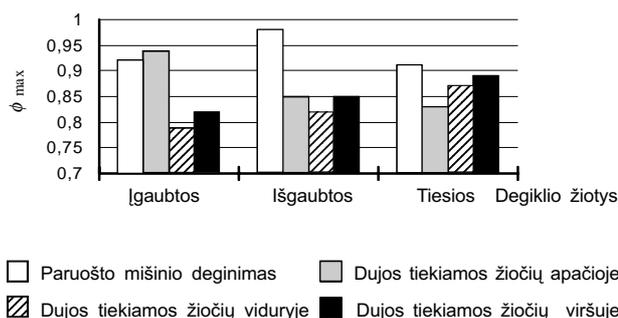
Ekvivalentinis santykis ϕ_{max} , kai kuras visiškai sudega degimo kameroje, priklauso nuo žiočių formos ir kuro tiekimo vietos (3 pav.). Darbe remiamasi taršos matavimo rezultatais, kai $\phi \leq \phi_{max}$. Visi eksperimentai atlikti su didesniu nei stochiometrinis oro kiekiu. Ekvivalentinis santykis visur mažesnis už vienetą ir mažėja, didinant oro kiekį. Jeigu nenurodyta kitaip, tai CO, NO_x, O₂ koncentracijų ir T matavimai yra atlikti degimo kameros centre, 63 cm atstumu nuo žiočių. Atviroje aplinkoje neįmanoma nustatyti ekvivalentinio santykio, todėl, pateikiant liepsnos vaizdus, nurodoma, koks buvo oro greitis juos filmuojant. Oro greitis apskaičiuotas pagal formulę

$$u_{vid}^{oro} = \frac{V^{oro}}{3600 \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_h}{2} \right)^2 \right)} ;$$

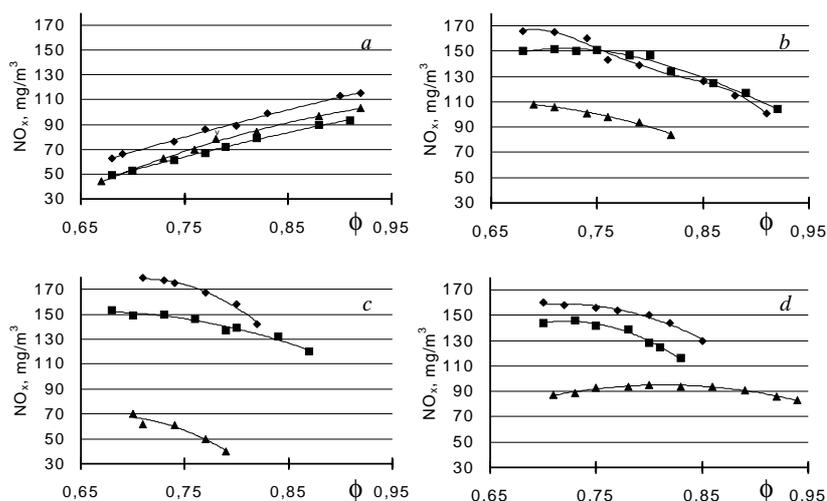
čia V^{oro} – oro kiekis m³/val., išmatuotas rotometru, $d = 38$ mm – suktuvo skersmuo, $d_h = 19$ mm – užblokuoto suktuvo centro skersmuo.

Pirminei žiočių poveikio analizei pasirinkta NO_x išėigos priklausomybė nuo ekvivalentinio santykio (4 pav.). Visais tirtais dujų tiekimo atvejais žiočių forma daro poveikį NO_x išėigai. Pasirinkus atramine NO_x išėigą tiesių žiočių atveju, apskaičiuotas NO_x išėigos pokytis esant išgaubtomis ir įgaubtomis žiotims.

Deginant paruoštą mišinį, visame tirtame oro kiekio diapazone kuras visiškai sudega degimo kameroje. NO_x išėiga esant tiesioms ir įgaubtomis žiotims yra panaši ir kinta matavimo paklaidų ribose. Esant išgaubtomis žiotims visame tirtame oro kiekio diapazone stebima vidutiniškai 26% didesnė azoto oksidų išėiga nei tiesių žiočių atveju. Toks padidėjimas susijęs su žiočių nulemtais recirkuliacinės zonos skirtumais. Išgaubtose žiotyse, skirtingai nei kitais atvejais, recirkuliacinė zona yra įtraukta giliai į žiotis (7 pav., a). Giliai žiotyse įtraukta recirkuliacinė zona veikia liepsnos vietą ir tūrį. Reaguojantis mišinys su-



3 pav. Kuro sudeginimo efektyvumas



4 pav. NO_x koncentracijos degimo produktuose priklausomybė nuo ekvivalentinio santykio 63 cm atstumu nuo žiočių visais žiočių atvejais. a – paruošto mišinio degimas; b – dujos tiekiamos žiočių viršuje; c – dujos tiekiamos žiočių viduryje; d – dujos tiekiamos žiočių apačioje, ■ – tiesios žiotys, ▲ – įgaubtos žiotys, ◆ – išgaubtos žiotys

siduria su recirkuliacine zona ir yra spaudžiamas priešuktuvo bei žiočių kraštų. Todėl mišinys sudega mažesniame tūryje, lokalinė temperatūra yra aukštesnė ir daugiau susidaro terminių NO_x . Be to, kuras deginamas su didesniu nei stochiometrinis oro kiekiu, todėl degimo produktuose yra perteklinio deguonies. Dėl papildomo deguonies tiekimo į degimo zoną su recirkuliuojančiais degimo produktais taip pat daugiau susidaro terminių NO_x . Išsamus terminių NO_x susidarymo degimo procese aprašymas pateikiamas literatūroje [1–3]. Visų žiočių atvejais NO_x išeiga didėja, didėjant ekvivalentiniam santykiui (4 pav., a).

Tiekiant dujas tiesių ir išgaubtų žiočių apačioje kuras nespėja sudegti degimo kameroje, kai oro kiekiai maži. Kuras visiškai sudega, kai ekvivalentinis santykis mažesnis už 0,85. Tuo tarpu įgaubtų žiočių atveju kuras visiškai sudega degimo kameroje esant bet kuriam ekvivalentiniam santykiui. Žiočių forma turi įtaką ne tik sudegimui, bet ir NO_x išeigai bei NO_x koncentracijos kitimui. Tiesių ir išgaubtų žiočių atveju stebimas difuziniam degimui būdingas azoto oksidų išeigos mažėjimas, didėjant ekvivalentiniam santykiui. Tačiau išgaubtų žiočių atveju NO_x išeiga yra vidutiniškai 18% didesnė nei tiesių žiočių atveju. Tuo tarpu įgaubtų žiočių atveju stebima ne tik iki 40% mažesnė NO_x išeiga, bet ir išskirtinis NO_x koncentracijos kitimas: didėjant ekvivalentiniam santykiui, NO_x koncentracija iš pradžių didėja, o paskui ima mažėti. Tiekiant dujas išgaubtų ir įgaubtų žiočių viduryje, kuras sudega degimo kameroje tik kai ekvivalentinis santykis atitinkamai mažesnis už 0,85 ir 0,80. Dujų tiekimas įgaubtų žiočių viduryje išsiskiria ypač maža NO_x išeiga: azoto oksidų esant skirtingiems oro kiekiams, susidaro nuo 50 iki 75% mažiau nei tiesių žiočių atveju. Tiesių ir išgaubtų žiočių atveju NO_x išeiga labai panaši, kai ekvivalentinis santykis yra didelis. Didinant oro kiekį ir mažėjant ekvivalentiniam santykiui, NO_x koncentracija išgaubtų žiočių atveju didėja greičiau nei tiesių žiočių atveju ir esant mažiausiam ekvivalentiniam santykiui ji 18% didesnė. Tiekiant dujas žiočių viršuje, visų trijų žiočių atvejais stebimas NO_x išeigos mažėjimas, didėjant ekvivalentiniam santykiui. Ir šiuo atveju per visą ekvivalentinių santykių diapazoną mažiau azoto oksidų susidaro įgaubtų žiočių atveju, tačiau skirtumas (40%) ne toks didelis, kaip tiekiant dujas žiočių ir išgaubtų žiočių atvejais yra panaši.

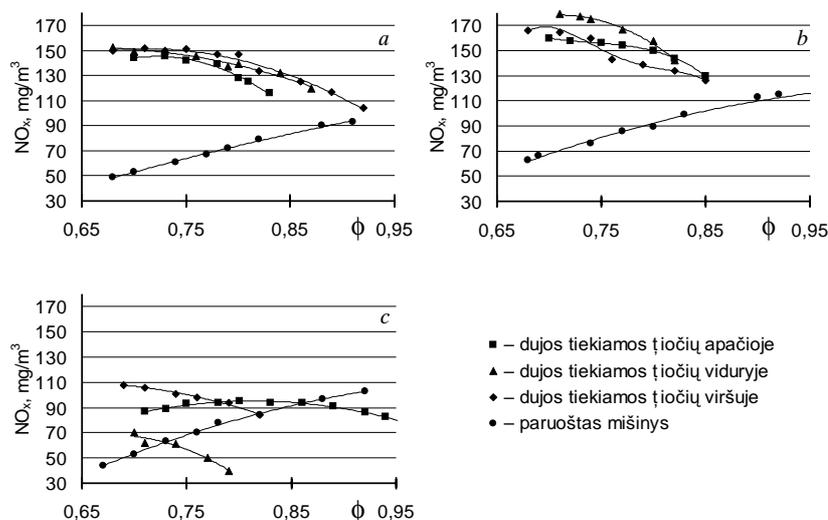
Priklausomai nuo žiočių formos keičiasi NO_x išeigos jautrumas kuro tiekimo vietai (5 pav.). Esant

tiesioms ir išgaubtoms žiotims NO_x išeiga kinetinio degimo atveju yra gerokai mažesnė nei difuzinio degimo atveju. Be to, dėl kuro tiekimo aukščio žiotyse keitimo difuzinio degimo atveju esant tiesioms žiotims nekinta NO_x išeiga, o esant išgaubtoms žiotims NO_x išeiga mažai keičiasi. Tuo tarpu esant įgaubtoms žiotims nėra tokio ryškaus skirtumo tarp NO_x išeigos difuzinio ir kinetinio degimo atvejais. Tačiau NO_x išeigos pokyčiai esant skirtingiems kuro tiekimo aukščiams difuzinio degimo metu yra daug didesni nei tiesių ir išgaubtų žiočių atvejais.

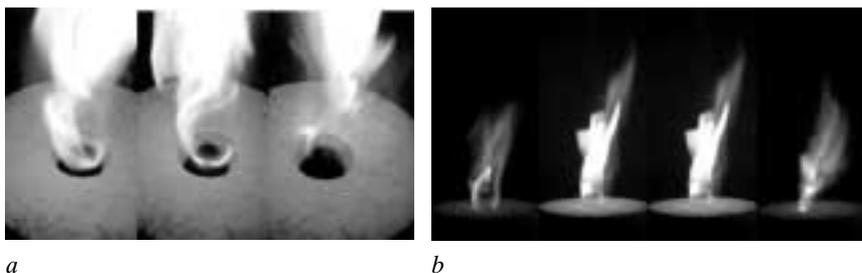
Palyginus CO, NO_x bei temperatūros matavimų rezultatus ir liepsnos vaizdus, nustatyta, kad žiočių forma degimą ir teršalų susidarymą labiausiai veikia per sukimosi ašies precesiją ir mišrų kuro degimą.

Sukimosi ašies precesija apibūdinama kaip priverstinis periodinis besisukančios srovės sukimosi ašies judėjimas aplink besisukančios žiedinės srovės simetrijos ašį ir yra vyraujanti periodinė trimatė koherentinė struktūra besisukančioje srovėje. Šios struktūros kilmė nėra visiškai aiški, tačiau labiausiai tikėtina, kad ji išsivysto dėl atsitiktinių fluktuacijų recirkuliacinės zonos pradžioje stiprinimo turbulentiame vidiniame slyties sluoksnyje tarp besisukančios srovės ir recirkuliacinės zonos. Žiočių formos poveikis precesijos atsiradimui bei dėl precesijos atsirandantis tekėjimo struktūros pokyčiai išsamiai aprašomi [13].

Vykstant precesijai centre tiekama dujų srovė susukama į spiralinį sūkurį ir dėl maišymosi netolygumų [13] atsiranda degimo pulsacijos. Spiralinis dujų srovės judėjimas ir degimo pulsacijos stebimi liepsnos vaizduose (6 pav.). Atliktuose eksperimentuose precesija pasireiškia įgaubtų ir išgaubtų žiočių, kuriose panaudota konfuzorinė dalis, atvejais. Įgaubtoms žiotims konfuzorius susiaurina pradinį srovės



5 pav. NO_x koncentracijos degimo produktuose priklausomybė nuo ekvivalentinio santykio 63 cm atstumu nuo žiočių skirtingais dujų tiekimo atvejais. a – tiesios žiotys; b – išgaubtos žiotys; c – įgaubtos žiotys



6 pav. Spiralinis dujų srovės judėjimas ir degimo intensyvumo pulsacijos esant išgaubtomis žiotims. *a* – dujos tiekiamos žiočių viršuje, oro greitis lygus 1,49 m/s; *b* – dujos tiekiamos žiočių viduryje, oro greitis lygus 1,49 m/s

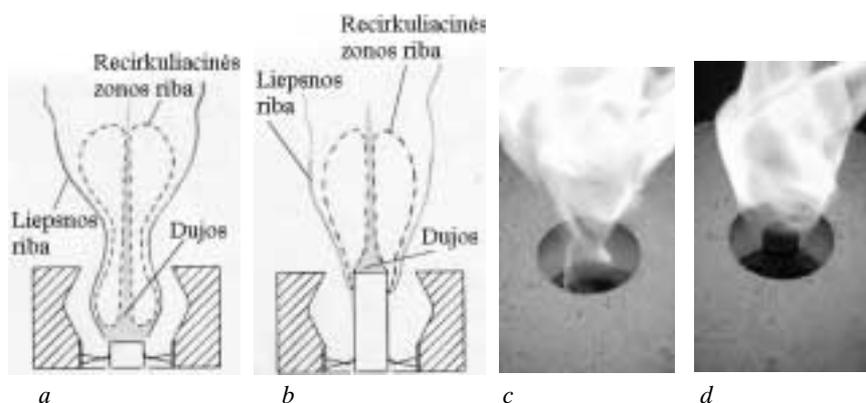
skersmenį ir visais dujų tiekimo atvejais stebima stipri precesija. Išgaubtomis žiotims konfuzorius atstato pradinį srovės skersmenį ir precesija yra silpnesnė. Tačiau esant išgaubtomis žiotims degimo procesą veikia precesija bei mišrus degimas, taigi sunku išskirti vieno iš procesų indėlį degimo kokybei ir teršalų susidarymui. Todėl precesijos poveikį teršalų susidarymui patogiau nagrinėti esant išgaubtomis žiotims.

Esant išgaubtomis žiotims, recirkuliacinės zonos forma ir tipas priklauso nuo dujų tiekimo vietos. Jei dujų tiekimo vamzdelis neįterpiamas į žiotis (deginant paruoštą mišinį ir tiekiant dujas žiočių apačioje), grįžtamas tekėjimas giliai įtraukiamas į žiotis. Dėl difuzorinės ir konfuzorinės dalių poveikio formuojasi netaisyklingos persmaugto burbulo formos, su nedideliu išsiplėtimu žiotyse, ilgu kaklu ir stambiu išsiplėtimu virš žiočių recirkuliacinė zona (7 pav., *a*). Tiekiant dujas išgaubtų žiočių apačioje, daugiausia dujų įteka į recirkuliacinę zoną ir grįžta į degimo zoną jau persimaišiusios su karštais degimo produktais. Tik nedaug dujų apteka recirkuliacinę zoną iš išorės, nunešamos kartu su greita besisukančia oro srove. Dėl išsiplėtimo žiotyse sunku stebėti liepsnos prisijungimo vietą, tačiau labai tikėtina, kad esant dideliame oro greičiui ir geram sumaišymui liepsna prisijungia prie dujų tiekimo vamzdelio, o esant prastesniam sumaišymui liepsna prisijungia recirkuliacinės zonos apačioje. Pakėlus dujų tiekimo vamzdelį į žiotis, recirkuliacinės zonos forma kinta. Pakeltas dujų vamzdelis ir dujų srovė išnaikina apatinę recirkuliacinės zonos dalį žiotyse. Formuojasi išstęsto burbulo formos recirkuliacinė zona (7 pav., *b*). Tiekiant dujas išgaubtų žiočių viršuje, dujos patenka į recirkuliacinę zoną. Jos su recirkuliuojančiais degimo produktais spaudžiamos žemyn ir liepsna stabiliai prisijungia prie

recirkuliacinės zonos apačios. Tiekiant dujas išgaubtų žiočių viduryje, apatinė recirkuliacinės zonos dalis smarkiai paveikiama. Degimo zona apatinėje žiočių dalyje išnaikinama, bet dėl išplatėjimo atsiradęs pasiurbimas į žiotis išlieka ir veikia kaip veiksnys, garantuojantis stabilų liepsnos prisijungimą prie dujų tiekimo vamzdelio. Visais atvejais dėl konfuzoriaus poveikio susiformavusi recirkuliacinės zonos dalis virš išgaubtų žiočių ištekėjimo plokštumos yra spiralinio tipo. Jai būdinga sukimosi ašies precesija, dėl kurios centre tiekiamą dujų srovę susukama į spiralinį sūkurį ir atsiranda degimo pulsacijos.

Precesijos poveikis NO_x susidarymui yra dvejopas. Dėl degimo pulsacijų formuojasi aukštesnės temperatūros zonos ir didėja terminių NO_x išeiga [1–3]. Kartu kuras dega netolygiai, ilgėja kuro sudegimo kelias. Nesudegęs kuras patenka į degimo kameros viršų, kur maišosi su degimo produktais ir skatina NO_x redukciją per HCN mechanizmą. Išsamus NO_x redukcijos degimo metu aprašymas pateikiamas literatūroje [2–5]. Precesijos poveikio stiprumas priklauso nuo kuro tiekimo vietos išgaubtose žiotyse. Tiekiant dujas išgaubtų žiočių apačioje dujos skverbiasi per ilgą, dvigubą recirkuliacinę zoną, kurioje intensyviai maišosi su recirkuliuojančiais degimo produktais ir oru. Viršutinę recirkuliacinės zonos dalį pasiekusi dujų srovė jau būna smarkiai išsklaidyta ir susimaišiusi su oru, todėl į spiralinį sūkurį susukamas šiek tiek oksiduotas kuras. Degimo pulsacijos neprailgina kuro sudeginimo kelio ir nesukelia vietinių temperatūros pulsacijų. Stebėtas NO_x išeigos padidėjimas sietinas su geresniu kuro ir

recirkuliacinės zonos dalis virš išgaubtų žiočių ištekėjimo plokštumos yra spiralinio tipo. Jai būdinga sukimosi ašies precesija, dėl kurios centre tiekiamą dujų srovę susukama į spiralinį sūkurį ir atsiranda degimo pulsacijos.



7 pav. Recirkuliacinės zonos schema ir liepsnos vaizdas esant išgaubtomis žiotims. *a* – recirkuliacinės zonos schema tiekiant dujas žemiau žiočių įtekėjimo plokštumos; *b* – recirkuliacinės zonos schema tiekiant dujas žiotyse; *c* – liepsnos vaizdas tiekiant dujas žiočių apačioje, oro greitis lygus 1,49 m/s; *d* – liepsnos vaizdas tiekiant dujas žiočių viršuje, oro greitis lygus 1,49 m/s

oro sumaišymu dėl recirkuliacinės zonos dalies žiotyse. Tiekiant dujas išgaubtų žiočių viršuje į recirkuliacinę zoną įterptas dujų tiekimo vamzdelis mažina precesijos poveikį. Dujos įteka aukščiau stagnacijos taško ir spiralinis vidinio šlyties sluoksnio sukūrys susuka bei sumaišo dujas, degimo produktus ir orą. Spiralinio sukūrio centre susukto šviežio kuro yra nedaug ir maišymosi netolygumai nesukelia stiprių degimo intensyvumo pulsacijų, todėl NO_x išeiga tiekiant dujas žiočių viršuje tiesių ir išgaubtų žiočių atvejais labai panaši. Tačiau kuras, su spiraliniu sukūriu nunešamas aukščiau, nespėja visiškai sudegti degimo kameroje, todėl jo nesudega daugiau nei tiesių žiočių atveju. Labiausiai precesija pasireiškia tiekiant dujas išgaubtų žiočių viduryje. Dėl precesijos poveikio tiekiant dujas išgaubtų žiočių viduryje labai prastai sudega kuras (3 pav.), gerokai keičiasi NO_x susidarymas ir redukcija. Palyginus NO_x koncentracijos pasiskirstymą per degimo kameros aukštį tiesioms ir išgaubtoms žiotims tiekiant kurą žiočių viduryje, aiškiai matyti tiek NO_x susidarymo, tiek NO_x redukcijos padidėjimas išgaubtų žiočių atveju (8 pav.). Jau žemiausiame matavimo taške 14 cm atstumu nuo žiočių esant išgaubtoms žiotims išmatuota 30 mg/m^3 didesnė NO_x koncentracija nei esant tiesioms žiotims. Toki koncentracijos padidėjimą sukelia terminių NO_x susidarymo dėl precesijos veikiamų degimo pulsacijų išgaubtų žiočių recirkuliacinės zonos srityje.

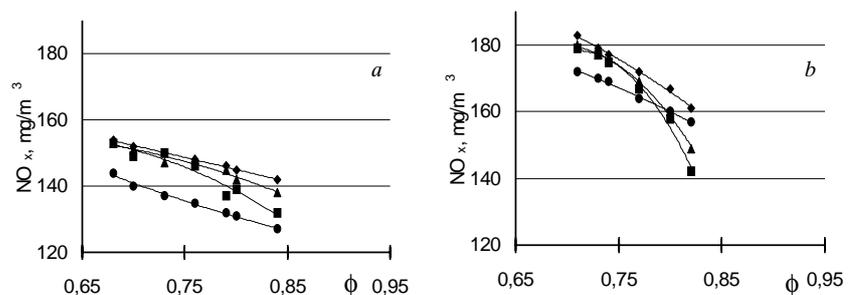
Tiesių žiočių atveju visame tirtame ekvivalentinių santykių diapazone stebimas tipinis difuzinis degimas. Esant dideliame oro greičiui ir mažam ekvivalentiniam santykiui, kuras ir oras intensyviai maišosi, dauguma NO_x susidaro apatinėje degimo kameros dalyje ir NO_x redukcija labai silpna. Didinant ekvivalentinį santykį prastėja kuro ir oro maišymasis bei ilgėja kuro sudegimo kelias. Kartu santykinai daugiau susidaro NO_x tarp pirmo ir antro matavimo taškų bei intensyvėja NO_x redukcija degimo kameros viršuje. Tuo tarpu esant išgaubtoms žiotims precesija keičia NO_x susidarymą ir redukciją degimo kameroje. Dėl precesijos spiraliniame sukūryje susuktos dujos dega netolygiai ir formuojasi intensyvaus degimo pliūpsnio produktų bei nesudegusio kuro sluoksniai, kurie maišosi degimo kameros viršuje. Todėl net esant mažam ekvivalentiniam santykiui išgaubtų žiočių atveju stebima NO_x redukcija degimo kameros viršuje. Didėjant ekvivalentiniam santykiui bei prastėjant kuro ir oro susimaišymui daugiau dujų patenka į spiralinį sukūrį. Precesijos poveikis stiprėja. Degimo pulsacijos intensyvėja, todėl šiek tiek daugiau NO_x susidaro degimo kameros apačioje. Santykinai

daugiau nesudegusio kuro maišosi su degimo produktais. Dėl sustiprėjusios NO_x redukcijos mažiau padidėja NO_x koncentracija tarp pirmo ir antro matavimo taškų ir labai intensyviai mažėja NO_x koncentracija degimo kameros viršuje.

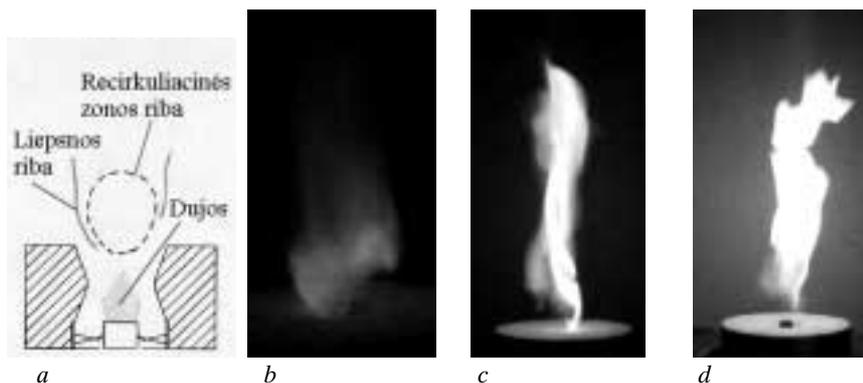
CO ir NO_x koncentracijų matavimai rodo, kad precesija prastina degimo kokybę ir didina NO_x išeigą. Dėl precesijos kuro sudegimo kelias yra ilgesnis ir kuro sudegimo efektyvumas mažėja. Precesijos sukeltas NO_x redukcijos padidėjimas degimo kameros viršuje nekompensuoja terminių NO_x susidarymo padidėjimo dėl degimo pulsacijų. Todėl išgaubtų žiočių atveju NO_x išeiga yra didesnė nei tiesių žiočių atveju.

Mišriu kuro degimu vadinamas tarpinis tarp kinetinio ir difuzinio degimo variantas, kai šiek tiek tiekiamas kuro susimaišo su oru prieš užsidegdamas ir sudega kinetiškai, o likęs kuras sudega difuziškai. Tokios sąlygos susidaro tiekiant nesumaišytą kurą, kai kuro tiekimo ir liepsnos prisijungimo vieta skiriasi. Atliktuose tyrimuose mišrus kuro degimas nustatytas visais difuzinio degimo atvejais išgaubtose žiotyse ir tiekiant dujas tiesių žiočių apačioje, kai kuro perteklius buvo didesnis už 0,8.

Išgaubtoms žiotims recirkuliacinės zonos formą ir vietą nulemia konfuzorinės ir difuzorinės dalių sąveika. Difuzoriui būdinga giliai į žiotis įtraukta recirkuliacinė zona. O konfuzorinė žiočių dalis pastūmėja recirkuliacinę zoną tolyn nuo žiočių sąsmaukos. Formuojasi tarpinė recirkuliacinė zona, kuri yra nedaug įtraukta į žiotis (9 pav., a). Dėl žiočių apačioje panaudotos konfuzorinės dalies besisukanti oro srovė labai pagreitėja. Ašinis greitis oro ir dujų maišymosi sluoksnyje yra didesnis už liepsnos plitimo greitį, liepsna nupučiama ir prisijungia ten, kur greitis pakankamai sumažėja. Formuojasi nesimetriška spiralinė recirkuliacinė zona ir labai ryški sukimosi ašies precesija. Tokioje recirkuliacinėje zonoje momentinis greitis sistemos ašies atžvilgiu yra itin netolygus ir smarkiai pulsuoja. Toje pusėje, kur formuojasi spiralinio sukūrio vija, šlyties sluoksnyje tarp besisukančios oro srovės išorinio apvalkalo ir centrinio sukūrio iš dujų bei oro mišinio susidaro mažo



8 pav. NO_x koncentracijos kitimas degimo kameroje tiekiant dujas žiočių viduryje. a – tiesios žiotys; b – išgaubtos žiotys, ■ – 63; ▲ – 46; ◆ – 31; ● – 14 cm



9 pav. Recirkuliacinė zona ir liepsnos prisijungimas esant įgaubtomis žiotims. *a* – recirkuliacinės zonos schema; *b* – liepsnos vaizdas tiekiant dujas žiočių apačioje, oro greitis lygus 1,30 m/s; *c* – liepsnos vaizdas tiekiant dujas žiočių viduryje, oro greitis lygus 1,15 m/s; *d* – liepsnos vaizdas tiekiant dujas žiočių viršuje, oro greitis lygus 1,49 m/s

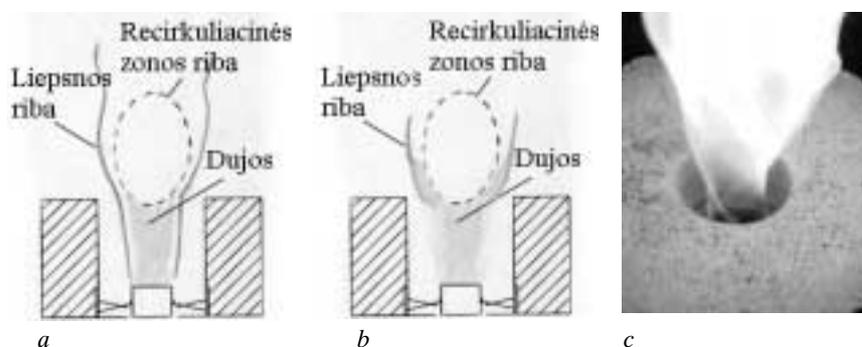
greičio zona, palanki liepsnai prisijungti. Priešpriešinėje srovės pusėje mažesnio greičio zona yra aukščiau. Formuojasi įstrižai nupjautos tūtos formos liepsna, kurios žemiausias prisijungimo taškas sukasi aplink recirkuliacinę zoną. Vizualiai toks netolygus liepsnos prisijungimas ryškiai matomas tiek tiekiant dujas žemiau recirkuliacinės zonos žiočių apačioje ir viduryje, tiek žiočių viršuje, kai dujos įpučiamos į recirkuliacinę zoną (9 pav., *b*, *c* ir *d*). Toks liepsnos prisijungimas lemia kuro maišymosi su oru ir mišinio oksidacijos procesų išsiskyrimą laike. Kuras ir oras pradeda maišytis dujoms įtekėjus į oro srautą (tiekiant dujas žiočių apačioje ir viduryje) ar recirkuliuojančius degimo produktus (tiekiant dujas žiočių viršuje). O liepsna stabiliai prisijungia tik nutolusi nuo žiočių (9 pav., *a*). Todėl visais dujų tiekimo atvejais esant išgaubtomis žiotims kuro degimas yra mišrus visame tirtame ekvivalentinių santykių diapazone.

Esant tiesioms žiotims visame ekvivalentinių santykių diapazone formuojasi burbulo tipo recirkuliacinė zona (10 pav.). Išskyrus atvejį, kai dujos tiekiamos žiočių apačioje, liepsna prisijungia prie dujų tiekimo vamzdelio ir vyksta difuzinis degimas. Tiekiant dujas žiočių apačioje stebėti du skirtingi liepsnos prisijungimo atvejai. Esant dideliems oro greičiams, kuro ir oro sumaišymas yra intensyvus, o susidariusio degaus mišinio pakanka degimo reakcijai tarp dujų tiekimo vietos ir recirkuliacinės zonos palaikyti. Liepsna prisijungia prie dujų tiekimo vamzdelio (10 pav., *a*). Kai oro greičiai mažesni, recirkuliacinė zo-

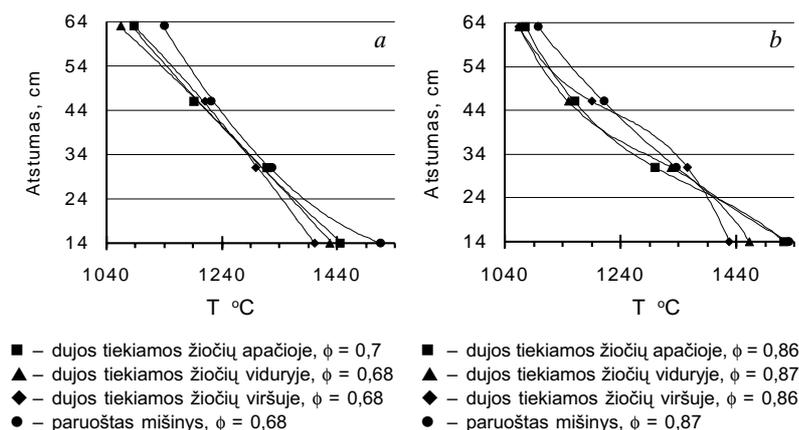
na silpniau įtraukiama į žiotis ir atstumas tarp dujų tiekimo vamzdelio bei recirkuliacinės zonos didėja. Be to, dėl prastesnio kuro ir oro maišymosi degant išsiskiriančios šilumos nepakanka stabiliai degimo reakcijai prie dujų tiekimo vamzdelio palaikyti ir liepsna prisijungia recirkuliacinės zonos apačioje (10 pav., *b*), t. y. didinant ekvivalentinį santykį, degimo režimas kinta iš difuzinio į mišrų. Degimo režimo pokytį patvirtina temperatūros matavimai. Dėl difuzinio degimo perėjimo į mišrų keičiasi temperatūros pasiskirstymas degimo kameroje (11 pav.).

Esant mažam ekvivalentiniam santykiui, difuzinio deginimo temperatūra degimo kameroje tolygiai mažėja ir visais dujų tiekimo atvejais yra labai panaši bei skiriasi nuo paruošto mišinio deginimo temperatūros. Kai ekvivalentinis santykis didelis, temperatūros pasiskirstymas degimo kameroje keičiasi ir priklauso nuo dujų tiekimo vietos. Tiekiant dujas žiočių viduryje ir viršuje, temperatūra degimo kameros apačioje mažėja lėčiau, o degimo kameros viršuje – greičiau. Tuo tarpu tiekiant dujas žiočių apačioje, temperatūros pasiskirstymas degimo kameros apačioje yra artimesnis kinetinio degimo temperatūros pasiskirstymui.

Toks degimo režimo pokytis tiekiant dujas tiesių žiočių apačioje įgalina įvertinti mišraus degimo poveikį teršalų susidarymui. Tiekiant dujas žiočių apačioje, kuro sudegimo efektyvumas tiesių žiočių atveju buvo prasčiausias (3 pav.). Nuo dujų įtekėjimo vietos žiočių apačioje iki užsidegimo vietos žiočių viršuje dujos maišosi su oru ir dujų srovės kraštuose formuojasi degus mišinys. Liepsnos prisijungimo vie-

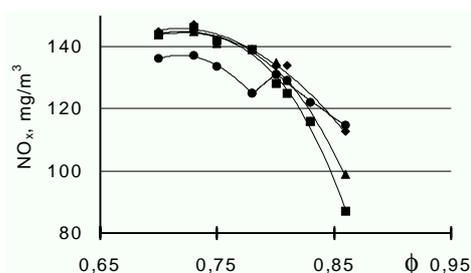


10 pav. Recirkuliacinės zonos ir liepsnos prisijungimo schema bei liepsnos vaizdas tiekiant dujas tiesių žiočių apačioje. *a* – recirkuliacinės zonos, kai liepsna prisijungia prie dujų tiekimo vamzdelio, schema; *b* – recirkuliacinės zonos, kai liepsna prisijungia recirkuliacinės zonos apačioje, schema; *c* – liepsnos vaizdas, kai vidutinis oro greitis lygus 1,49 m/s



11 pav. Temperatūros pasiskirstymas per degimo kameros aukštį tiesių žiočių atveju. *a* – esant mažam ekvivalentiniam santykiui; *b* – esant dideliame ekvivalentiniam santykiui

toje šis mišinys užsidega ir sudega greitu kinetiniu degimu. Kinetinio degimo produktai pasiskirsto tarp dujų srovės bei oro ir slopina tolimesnį difuzinį dujų srovės degimą. Tuo pačiu ilgėja kuro sudegimo kelias ir prastėja sudegimo efektyvumas. Dėl tokio mišraus degimo kinta azoto oksidų susidarymas. Pirmiausia degant susidariusiam mišiniui išauga maksimali temperatūra arti žiočių ir padidėja azoto oksidų koncentracija degimo kameros apačioje. 12 pav. pavaizduotoje azoto oksidų koncentracijos kreivėje žemiausiam matavimo taške (14 cm atstumu nuo žiočių) yra šuolinis koncentracijos padidėjimas, kai kuro perteklius $\phi = 0,8$. Be to, dėl kinetinio degimo produktų pasiskirstymo tarp besisukančios oro srovės ir centre esančio nesusimaišiusio kuro difuzinis degimas slopinamas, kuras maišosi su kinetinio degimo produktais ir skatina jau susidariusio NO redukciją per HCN mechanizmą [2–5]. NO_x koncentracijos matavimai rodo, kad, pasikeitus režimui ir atsiradus mišriam degimui, žemiausiam matavimo taške išmatuota koncentracija išlieka nepakitusi, arba sumažėja (12 pav.). Tai patvirtina, kad azoto oksidų susidarymą dėl difuzinio likusios kuro dalies degimo kompensuoja arba viršija azoto oksidų redukcija. Dėl to didėjant kuro pertekliui stebimas stai-

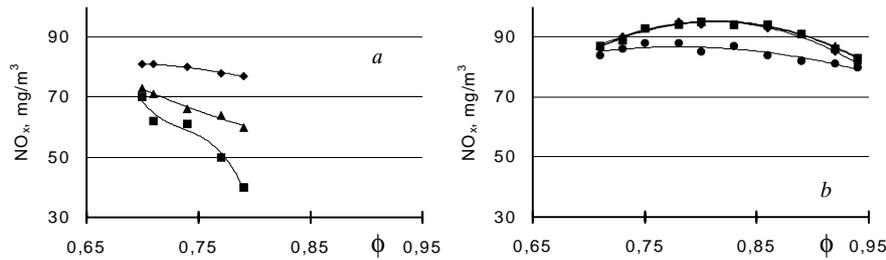


12 pav. NO_x koncentracijos kitimas degimo kameroje tiekiant dujas tiesių žiočių apačioje, ■ – 63; ▲ – 46; ◆ – 31; ● – 14 cm

gisnis azoto oksidų išėigos mažėjimas nei tiekiant dujas tiesių žiočių viduryje ir viršuje (5 pav., *a*).

Įgaubtose žiotyse kuras ir oras susimaišo intensyviau, todėl daugiau kuro susimaišo į degų mišinį ir mišraus degimo poveikis stipresnis. Tiekiant dujas įgaubtų žiočių apačioje, apatinė žiočių dalis veikia kaip kuro bei oro susimaišymo kamera ir beveik visas kuras susimaišo į degų mišinį prieš užsidegdamas. Dėl degimo arti žiočių daugiausia azoto oksidų susidaro kameros apačioje, iki pirmo matavimo taško (13 pav., *b*). Azoto oksidų kiekis deginant paruoštą mišinį priklauso nuo ekvivalentinio santykio. Jei mišinyje esantis oro kiekis mažesnis nei

stochiometrinis, dėl deguonies trūkumo formuojasi mažiau NO_x ir didinant oro kiekį didėja NO_x išėiga. Jei mišinyje oro yra daugiau už stochiometrinį, papildomas oras veikia kaip balastas, dėl kurio mažėja temperatūra ir kartu NO_x išėiga. Mišraus degimo atveju vietinio kuro ir oro mišinio ekvivalentinis santykis skiriasi nuo bendro degimui tiekiamo kuro ir oro ekvivalentinio santykio. Didinant degimui tiekiamo oro kiekį, susidarantis mišinys keičiasi nuo labai riebaus su nedegia centrine dalimi iki lieso, kai oro kiekis mišinyje yra didesnis nei stochiometrinis. Esant mažam oro greičiui dujos su oru maišosi lėtai, gautas mišinys yra labai riebus ir NO_x išėiga iš šio mišinio yra maža. Todėl didelių ekvivalentinių santykių diapazone ($\phi > 0,85$) NO_x išėiga mišriam degimui tiekiant dujas įgaubtų žiočių apačioje yra mažesnė nei paruoštam mišiniui (5 pav., *c*). Didinant degimui tiekiamo oro kiekį bei greitį, dujos ir oras maišosi greičiau. Mažėja deguonies trūkumas susidarantiame mišinyje ir kartu didėja NO_x išėiga iš mišraus degimo. Kai ekvivalentinis santykis apytikriai lygus 0,8, susidaro artimas stochiometriniam kuro bei oro mišinys ir gaunama didžiausia NO_x išėiga. Toliau didinant degimui tiekiamo oro greitį papildomai į mišinį įterpiamas oras veikia kaip balastas, mažindamas NO_x išėigą. Dėl anksčiau minėto netolygaus oksidatoriaus pasiskirstymo mišraus degimo metu susidarantiame mišinyje didžiausia NO_x išėiga beveik nekinta keičiant ekvivalentinį santykį nuo 0,78 iki 0,86. NO_x išėigos pradeda mažėti nuo to momento, kai mišinys bet kurioje srovės vietoje turi daugiau oro nei reikia kurui sudegti. Kadangi tiekiant dujas įgaubtų žiočių apačioje daugiau kuro sudega kinetiškai, šviežio kuro neįmaišoma į kinetinio degimo produktus ir azoto oksidų redukcija degimo kameros viršuje silpna. Azoto oksidų koncentracija tarp pirmo ir antro matavimo taškų nedaug padidėja, o po to nesikeičia (13 pav., *b*). Tuo tarpu tiekiant dujas



13 pav. NO_x koncentracijos kitimas degimo kameroje įgaubtų žiočių atveju. *a* – tiekiant dujas žiočių viduryje; *b* – tiekiant dujas žiočių apačioje, ■ – 63; ▲ – 46; ◆ – 31; ● – 14 cm

įgaubtų žiočių viduryje kinetiškai ir difuziškai sudegančio kuro balansas mišraus degimo atveju yra ypač palankus azoto oksidų išėigai mažinti. Tiekiant dujas įgaubtų žiočių viduryje, dujų srovė įpučiama žemiau recirkuliacinės zonos. Atstumas tarp dujų įtekėjimo ir liepsnos prisijungimo vietos šiuo atveju yra trumpesnis nei tiekiant dujas žiočių apačioje ir tik šiek tiek dujų spėja susimaišyti į riebų mišinį dar prieš užsidegdamas. Dėl trumpesnio maišymosi kelio gaunamas riebesnis mišinys ir mažesnė NO_x išėiga nei tiekiant dujas žiočių apačioje. Dėl didelių CO kiekių degant riebiam mišiniui matavimai žemiausiame taške nebuvo atlikti, ir maksimali išmatuota NO_x koncentracija yra 80 mg/m³, t. y. 15 mg/m³ mažesnė nei maksimali išmatuota NO_x koncentracija tiekiant dujas tiesių žiočių apačioje. Nesumaišytas kuras susukamas į spiralinį precesuojantį sūkurį. Toliemesnį difuzinį kuro degimą slopina tiek kinetinio degimo produktų sluoksnis tarp precesuojančio kuro sūkurio ir oro srovės, tiek precesijos sukeltos maišymosi pulsacijos. Todėl šiuo atveju NO redukcija ypač stipri ir azoto oksidų koncentracija kai kuriais atvejais sumažėja daugiau kaip 50% (13 pav., *a*). Tačiau šiuo atveju pasireiškia ir neigiamas precesijos poveikis kuro sudegimui. Kuro sudegimo efektyvumas tiekiant dujas įgaubtų žiočių viduryje yra prasčiausias (3 pav.) ir degimo kameros viršuje nesudega, kai $\phi > 0,8$.

4. IŠVADOS

Degimo procesą, kuro sudegimą ir azoto oksidų išėigą nagrinėtu atveju labiausiai veikia sukimosi ašies precesija ir mišrus degimas.

Kanfuzorinės dalies panaudojimas žiotyse sukelia sukimosi ašies precesiją. Dėl precesijos sukeltų maišymosi netolygumų bei degimo pulsacijų didėja azoto oksidų išėiga ir daugiau kuro nesudega. Dėl precesijos išgaubtų žiočių atveju gauta vidutiniškai 18% didesnė azoto oksidų išėiga nei tiesių žiočių atveju. Įgaubtų ir išgaubtų žiočių atvejais dėl precesijos nesudegimas degimo kameros viršuje pasireiškia esant mažesniai ekvivalentiniam santykiui nei tiesių žiočių atveju.

Žiočių forma turi įtaką recirkuliacinės zonos formai ir vietai. Derinant recirkuliacinės zonos vietą ir kuro tiekimo vietą difuzinio degimo atveju galima sukurti sąlygas mišriam degimui, kai šiek tiek kuro susimaišo su oru į degų riebų mišinį prieš užsidegant ir sudega kinetiškai, o kitas kuras baigia degti difuziškai. Mišraus degimo atveju ypač efektyviai mažėja azo-

to oksidų išėiga dėl mažos azoto oksidų išėigos iš riebaus mišinio, difuzinio degimo slopinimo ir azoto oksidų redukcijos skatinimo maišantis likusiam kuroi ir kinetinio degimo produktams. Dėl mišraus kuro degimo tiekiant dujas įgaubtų žiočių viduryje gauta nuo 50 iki 75% mažesnė azoto oksidų išėiga nei tiesių žiočių atveju.

Optimizuojant žiočių formą bei kuro tiekimo vietą galima sukurti sąlygas mišriam degimui, taip pat sumažinti azoto oksidų išėigą 50% ir daugiau, užtikrinant gerą kuro sudegimą.

Gauta
2001 10 09

Literatūra

1. Зельдович Й. Оксидация азота в процессе горения и взрыва // Акта физиохимика СССР. Академия наук СССР, 1946. Т. XXI (4).
2. Hill S. C., Douglas Smoot L. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems // Progress in Energy and Combustion Science. 2000. Vol. 26. P. 417–458.
3. Bowman C. T. Gas-phase reaction mechanisms for nitrogen oxide formation and removal in combustion // Pollutants from combustion formation and impact on atmospheric chemistry. 13–26 September 1998. Maratea, Italy. P. 123–144.
4. Miller J. A., Melius C. F., Glarborg P. Some chemical kinetics issues in reburning: the branching ratio of the HCCO+NO reaction // The Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburg, 1998. P. 235–243.
5. Smoot L. D., Hill S. C., Xu H. NO_x control through reburning // Progress in Energy and Combustion Science. 1998. Vol. 24. P. 385–408.
6. Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. Swirl Flows // Abacus press. 1984.
7. Fujii S., Eguchi K., Gomi M. Swirling jets with and without combustion // AIAA Journal. 1981. Vol. 19, No. 11. P. 1438–1442.
8. Chen R.-H., Driscoll J. F. The role of the recirculation vortex in improving fuel-air mixing within swirling flames // Twenty-second Symposium on Combustion. The Combustion Institute, 1988. P. 531–540.

9. Cheng R. K. Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl // *Combustion and Flame*. 1995. N 101. P. 1–14.
10. Cha M. S., Lee D. S., Chung S. H. Effects of swirl on lifted flame characteristics in nonpremixed jets // *Combustion and Flame*. 1995. N 117. P. 636–645.
11. Abbas T., Costen P., Hassan M. A., Lockwood F. C. The effect of the near burner aerodynamics on pollution, stability and combustion in a PF-fired furnace // *Combustion Science and Technology*. 1993. N 93. P. 73–90.
12. Bradley D., Gaskell P. H., Gu X. M. et al. Premixed turbulent flame instability and NO formation in a lean-burn swirl stabilized burner // *Combustion and Flame*. 1998. N 115. P. 515–538.
13. Lapienienė A., Šležas R. Tūtos formos įtaka užsuktos srovės struktūrai // *Energetika*. 2001. Nr. 3. P. 24–31.

Aiveta Lapienienė, Ričardas Šležas

THE INFLUENCE OF NOZZLE SHAPE ON NO_x FORMATION IN SWIRLING METHANE AND AIR FLAME

S u m m a r y

The influence of nozzle shape on fuel burnout and NO_x formation in swirling methane and air flame was studied. The CO, NO_x, O₂ concentration and temperature measurements were made for different sets of nozzle shape, height of fuel injection and equivalence ratio ($\phi = 0,65–0,95$). Three different nozzle types were examined: straight, concave (first converging and then diverging), and convex (first diverging and then converging). The flame structure and flow field [13] analysis was used to explain the obtained differences in NO_x and CO output. The results showed that the vortex center precession and the partially premixed combustion exerted the strongest impact on fuel burnout and NO_x output. Due to precession an

increase in NO_x outlet for the convex nozzle was obtained. Precession also increased the incompleteness of combustion for the concave and convex nozzle. The partially premixed combustion decreased the NO_x outlet for the concave nozzle. The article is illustrated with the results of CO, NO_x concentration and temperature measurements, the images of flame and flame structure schemes.

Key words: NO_x, NO_x reduction, partially premixed combustion, vortex center precession, nozzle, nozzle shape

Айвета Лапенене, Ричардас Шляжас

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АМБРАЗУРЫ ГОРЕЛКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ГОРЕНИИ МЕТАНА В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

Р е з ю м е

Исследовалось влияние формы амбразуры на интенсивность горения метана и образование оксидов азота в закрученной струе воздуха. В камере горения измерены концентрации CO, NO_x, O₂ и температура в зависимости от формы амбразуры, избытка воздуха и местоположения вдува метана. Эксперименты проведены с цилиндрической, конфузорной и диффузорной амбразурами. Полученные зависимости образования NO_x и CO связываются с измерениями структуры пламени и поля течения [13]. Установлено, что на интенсивность горения метана и образование оксидов азота наибольшее влияние оказывают прецессия оси закрученной струи и смешанный режим горения. Из-за прецессии увеличивается образование NO_x для диффузорной амбразуры. Из-за смешанного режима горения снижается формирование NO_x для конфузорной амбразуры.

Ключевые слова: NO_x, оксиды азота, NO_x редукция, смешанный режим горения, прецессия оси закрученной струи, форма амбразуры горелки