



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Otto Krickis

GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS KONTROLES METODOLOĢIJA INTENSĪVAJĀ ELEKTROSTATISKAJĀ LAUKĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Otto Krickis

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS
KONTROLES METODOLOĢIJA INTENSĪVAJĀ
ELEKTROSTATISKAJĀ LAUKĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

LZA Goda loceklis, profesors *Dr. habil. sc. ing.*

NAMEJS ZELTIŅŠ

asociētais profesors *Dr. sc. ing.*

SIGURDS JAUNDĀLDERS

RTU Izdevniecība

Rīga 2019

Krickis, O. Gāzveida kurināmā degšanas kontroles metodoloģija intensīvajā elektrostatiskajā laukā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 30 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-12” 2019. gada 17. maija lēmumu Nr. 1/19.

ISBN 978-9934-22-283-2 (print)
978-9934-22-284-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 18. oktobrī plkst. 12.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē Ķīpsalas ielā 6, auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Egils Dzelzītis,
Rīgas Tehniskās universitāte

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Gaidis Klāvs,
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Valdes priekšsēdētājs *Dr. sc. ing.* Normunds Talcis,
AS "Rīgas Siltums", Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Otto Krickis..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 52 attēli, 13 tabulu, kopā 111 lappuse. Literatūras sarakstā ir 112 nosaukumu.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs “Gāzveida kurināmā degšanas kontroles metodoloģija intensīvajā elektrostatiskajā laukā” ir veltīts gāzveida kurināmā degšanas procesa un dūmgāzu emisiju kontrolei intensīva elektrostatiskā lauka ietekmē, kā arī liesmas termoakustiskā efekta izpētei.

Promocijas darba aktualitāti nosaka nepieciešamība izstrādāt tehniskās metodes, kas ļautu mazināt gan sadedzināšanas iekārtu uzturēšanas izmaksas, gan siltumnīcefekta gāzu emisijas atmosfērā un paaugstināt enerģijas izmantošanas tehnoloģiju efektivitāti.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju priekšsamasīta gāzveida kurināmā degšanas un kaitīgo emisiju veidošanās kontrolei intensīvā elektrostatiskā laukā. Tas paredz tehnisko paņēmieni un metožu kopas izstrādi, lietojot elektrostatisko lauku gāzveida kurināmā liesmas formas un CO, NO_x, un CO₂ emisiju ietekmei un dūmgāzu temperatūras kontrolei, kas ļautu nodrošināt labāku kurināmā sadegšanu un primāro energoresursu ietaupījumu.

Promocijas darbu veido ievads, teorētiski analītiskā daļa un metodoloģija jeb pētījumā lietoto iekārtu un to tehnisko īpašību, kā arī eksperimenta plānošanas un datu apstrādes metožu apraksts.

Pirmajā nodaļā (kurināmā degšanas teorētiski analītiskais novērtējums ārējo lauku apstākļos) aprakstīts elektrostatiskā, magnētiskā un elektromagnētiskā lauka izmantošanas efekts uz kurināmā degšanu, aptverot detalizētu jonizācijas procesu un jonu plūsmas teoriju.

Otrajā nodaļā (gāzveida kurināmā degšanas pētījumu metodoloģija elektrostatiskā lauka apstākļos) ir sniegti izmantoto iekārtu galveno komponentu rādītāji, to projektēšanas, izstrādes un regulēšanas procesa apraksts. Sniegts izvērsums par pētījuma metodoloģiju un eksperimenta plānošanu, lietotajām metodēm, eksperimenta procesa laikā iegūto datu apkopošanas kārtību un datu apstrādes algoritmiem, kā arī lietotajām datu apstrādes programmām.

Trešajā nodaļā (gāzveida kurināmā degšanas pētījuma rezultāti elektrostatiskā lauka apstākļos) analizēta intensīva elektrostatiskā lauka ietekme uz dūmgāzu sastāvelementu koncentrāciju, liesmas formas un dūmgāzu temperatūras izmaiņu, kā arī analītiski novērtēta elektrostatiskā lauka ietekme uz liesmas termoakustisko efektu, vienfaktora un daudzfaktoru pētījumā izmantojot gan līdzstrāvu, gan pulsējošo strāvas avotu. Nodaļā apkopoti grafiskie rezultāti un konstatēto korelāciju empīriskie regresijas vienādojumi.

Ceturtajā nodaļā (intensīva elektrostatiskā lauka izmantošanas tehniski ekonomiskais novērtējums) analizēts pētījumu rezultātu tehniski ekonomiskais novērtējums. Promocijas darbā izstrādātās degšanas procesa ietekmes metodes ļauj samazināt uzturēšanas remontu izmaksas Latvijā uzstādītajām lieljaudas sadedzināšanas iekārtām. Ieskaitot tehnoloģijas integrācijas izmaksas, ekonomija varētu sasniegt līdz pat 550 000 eiro 15 gados, papildus nodrošinot siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanos un primāro energoresursu ietaupījumu.

SATURS

SATURS.....	5
IEVADS	6
1. KURINĀMĀ DEGŠANAS TEORĒTISKI ANALĪTISKAIS NOVĒRTĒJUMS ĀRĒJO LAUKU APSTĀKĻOS.....	10
1.1. Elektrostatiskā lauka ietekme uz degšanas procesu	10
1.2. Jonizācijas process.....	10
1.3. Jonu plūsma	11
1.4. Elektrostatiskā lauka ietekme uz kaitīgajām emisijām.....	11
1.5. Termoakustiskais efekts	12
2. GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA ELEKTROSTATISKĀ LAUKA APSTĀKĻOS	13
2.1. Pētījuma veikšanas metodoloģija	14
2.2. Eksperimentālā iekārta	15
2.3. Degšanas procesa analītiskā novērtēšana	18
2.4. Termoakustiskā signāla novērtēšana	19
3. GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS PĒTĪJUMA REZULTĀTI ELEKTROSTATISKĀ LAUKA APSTĀKĻOS	20
3.1. Pētījuma pirmais posms.....	20
3.2. Pētījuma otrais posms	22
3.3. Pētījuma trešais posms.....	26
4. INTENSĪVA ELEKTROSTATISKĀ LAUKA IZMANTOŠANAS TEHNISKI EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS.....	29
SECINĀJUMI	30

IEVADS

Darba aktualitāte

Ņemot vērā līdz šim veiktos pētījumus un globāli izskanējušos zinātnieku secinājumus par draudošajām klimata pārmaiņām, ir izstrādāti vairāki starptautiski, Eiropas Savienības un arī Latvijas likumdošanas akti, kas regulē siltumnīcefekta gāzu emisijas atmosfērā un līdz ar to nosaka šī promocijas darba aktualitāti:

- 2015. gada Parīzes nolīgums klimata pārmaiņu jomā paredz mazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas atmosfērā, un dalībvalstīm tas izvirza prasības līdz 2030. gadam mazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 40 %, salīdzinot ar 1990. gadu;
- Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2012/27/ES par energoefektivitāti paredz paaugstināt enerģijas izmantošanas tehnoloģiju efektivitāti;
- Eiropas Parlamenta 2016. gada 13. septembra rezolūcija ar pamatnostādnēm par Eiropas Savienības stratēģiju apkurei un dzesēšanai (2016/2058 (INI));
- Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2008/50/EK par gaisa kvalitāti un tīrāku gaisu Eiropai, kas jāievēro visā Eiropas Savienībā, lai nodrošinātu vispārēju aizsardzību pret kaitīgu gaisa piesārņojumu;
- Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2010/75/ES par rūpnieciskajām emisijām (piesārņojuma integrēta novēršana un kontrole) ietver noteikumus emisiju mazināšanai gaisā, ūdenī un zemē, lai sasniegtu augstu vides aizsardzības līmeni kopumā;
- saskaņā ar Eiropas Savienības komisijas īstenošanas lēmumu (ES) 2017/1442 un Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvu 2010/75/ES tiek pieņemti secinājumi par labākajiem pieejamajiem tehniskajiem paņēmieniem (LPTP) attiecībā uz lielām sadedzināšanas stacijām;
- Latvijas valsts likums “Par piesārņojumu”, kurā ir definēts – lai samazinātu gaisa piesārņojuma radīto negatīvo ietekmi uz cilvēku veselību un vidi, Latvijai laikposmā no 2020. līdz 2029. gadam un pēc 2030. gada jāsamazina dažādu tautsaimniecības nozaru radītās sēra dioksīda, slāpekļa oksīda un gaistošo organisko savienojumu emisijas.

Ņemot vērā nepieciešamību nodrošināt valsts energoneatkarību, paredzot kurināmā diversifikācijas iespēju vai tā dažādu veidu aizvietošanu ar citu kurināmo ar līdzvērtīgām īpašībām, kļūst īpaši aktuāli rast tehnoloģijas aizvietojošā kurināmā efektīvai un videi draudzīgai izmantošanai, kā arī attīstīt tehnoloģijas, kas nodrošina ekonomiski efektīvāku sadedzināšanas iekārtu ekspluatāciju. Viens no šādiem tehnoloģiskiem risinājumiem, kas atbilstoši veiktajiem pētījumiem ļauj sasniegt augstus rādītājus gan liesmas stabilizācijā, gan kaitīgo izmešu koncentrācijas samazināšanā, ir ārējo lauku lietošana degšanas procesos. Par šo tēmu ir veikti vairāki pētījumi Apvienotajā Karalistē (*Dr. James Wienberg*), Francijā (*Ph. D Memdouh Belhi, Ph. D Pascale Domingo*), Spānijā (*Ph. D. Mario Sánchez-Sanz*), Amerikas Savienotajās Valstīs (*Ph. D. S. D. Marcum, Ph. D. B. N. Ganguly, Ph. D. Sunny Karnani, Ph. D. Aaron M. Drews*), Izraēlā (*Ph. D. Alexander B. Fialkov*), Nīderlandē (*Ph. D. J. D. B. J. van den Boom, Ph. D. A. M. H. H. Verhasselt, Ph. D. E. N. Volkov*), Ķīnā (*Ph. D.*

Y. Wang), Saūda Arābijā (*Ph. D. Fabrizio Bisetti, Ph. D. Dae Geun Park, Ph. D. Suk Ho Chung, Ph. D. Min Suk Cha, Ph. D. M. K. Kim*). Veiktie pētījumi ir veltīti vidējas intensitātes (≈ 150 kV/m) elektrostatiskā lauka ietekmes analīzei uz kurināmā degšanu. Nav veikti pētījumi par intensīva (≥ 1000 kV/m) elektrostatiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu ar deglī integrētiem iekšējiem elektrodiem, nav pētīta oksidētāja sastāva variācijas ietekme uz degšanas stabilitāti elektrostatiskā lauka ietekmē, kā arī nav analizēta intensīva elektrostatiskā lauka izmantošana vidējās jaudas un lieljaudas katlumāju uzturēšanas izmaksu samazināšanai. Kurināmā degšanas aspektus ārējo lauku ietekmē Latvijā ir pētījuši: *Dr. habil. sc. ing.* Namejs Zeltiņš, *Dr. habil. sc. ing.* Daniels Turlajs, *Dr. phys.* Maija Zaķe, *Dr. sc. ing.* Inesa Barmina, *Dr. sc. ing.* Agnese Līckrastiņa, *Dr. sc. ing.* Sergejs Vostrikovs, Raimonds Valdmanis un Modris Purmalis.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju priekšsamsaita gāzveida kurināmā degšanas un kaitīgo emisiju veidošanās kontrolei intensīvā elektrostatiskā laukā. Tas paredz tehnisko paņēmieni un metožu kopas izstrādi, lietojot elektrostatisko lauku gāzveida kurināmā liesmas formas un CO, NO_x, un CO₂ emisiju ietekmei un dūmgāzu temperatūras kontrolei, kas ļautu nodrošināt labāku kurināmā sadegšanu un primāro energoresursu ietaupījumu.

Vairāk nekā puse Latvijas energoresursu tiek patērēti apkurei un karstā ūdens piegādei, tāpēc ir svarīgi analizēt enerģijas patēriņu un kaitīgo emisiju samazināšanas iespējas, kas saistītas ar enerģijas ražošanu. Promocijas darbs ir veltīts degšanas procesa padziļinātai izpētei elektrostatiskā lauka ietekmē, veicot laboratorijas eksperimentus ar pilnizmēra iekārtām, kas izslēdz apkārtējās vides ietekmi uz pētāmo objektu. Darba eksperimentālie pētījumi ir iedalīti trijos posmos, katram posmam paredzot konstruktīvi atšķirīgu eksperimentālo iekārtu izmantošanu ar mērķi noteikt elektrodiu izvietojuma un elektrostatiskā lauka intensitātes, kā arī citu faktoru ietekmi uz tādiem svarīgiem degšanas procesa parametriem kā liesmas formas izmaiņu, CO, CO₂, NO_x kaitīgo emisiju koncentrāciju dūmgāzēs, dūmgāzu temperatūru u. c. Promocijas darbā papildus sniegti detalizēti pētījuma rezultāti par elektrostatiskā lauka ietekmi uz liesmas termoakustisko efektu.

Darba zinātniskā novitāte

Autora ieguldījums:

- izstrādāta un aprobēta metodoloģija intensīva elektrostatiskā lauka ģenerēšanai, izmantojot deglī integrētus elektrodus;
- izpētīta intensīva elektrostatiskā lauka ietekme uz gaistošo vielu (CO, CO₂, NO_x) koncentrāciju dūmgāzēs, liesmas formas un dūmgāzu temperatūras izmaiņu;
- izpētīta intensīva elektrostatiskā lauka ietekme uz sašķidrīnātās naftas gāzes (ar propāna molāro frakciju 0,92) liesmas termoakustisko signālu.

Darba praktiskā izmantošana

Promocijas darbā izstrādāto metodoloģiju var lietot jaunu tehnoloģiju attīstībā un esošo iekārtu modernizācijā, tā ilgtermiņā nodrošinot enerģētikas kā tautsaimniecības nozares augstu konkurētspēju. Izstrādātā metodoloģija ļauj panākt gāzveida kurināmā liesmas stabilizāciju, liesmas garuma saīsināšanu un gaistošo vielu (CO, CO₂, NO_x) mazāku koncentrāciju dūmgāzēs. Darbā sasniegtie rezultāti, izstrādātās un aprobētās iekārtas sniedz iespēju šīs tehnoloģijas veiksmīgai integrācijai pilnizmēra sadedzināšanas iekārtās, nodrošinot lielāku konkurētspēju, mazākas ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas, primārā energoresursa ietaupījumu un mazākas izmaksas CO₂ emisiju kvotu segšanai.

Pētījuma rezultāti var tikt izmantoti Latvijas Republikas Ekonomikas ministrijas projektā “Latvijas gāzes infrastruktūras attīstības tendences, izaicinājumi un risinājumi (LAGAS)”. Projekts Nr. VPP-EM-INFRA-2018/1-0003.

Autora zinātniskās publikācijas par darba rezultātiem

1. Krickis, O., Zeltiņš, N. Gas Combustion Efficiency Enhancement: Application Study of Intense Electrostatic Field. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019, issue 4. p. 16.
2. Krickis, O., Jaundālders, S. DC Electrical Field Impact on Propane Combustion By-Products and Acoustic Effect of The Flame. *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2018, pp. 1–7. Available from: doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659832
3. Krickis, O. Effect of Electric Field in the Stabilized Premixed Flame on Combustion Process Emissions. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2017, vol. 251, pp. 1–5. Available from: doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012116>
4. Krickis, O., Jaundālders, S. Impact of electric field in the stabilized premixed flame on NO_x and CO emissions. *In: Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2017, pp. 1–5. Available from: doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124799
5. Krickis, O., Oleksijs, R. Engineering approach for cost effective operation of industrial pump systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing. 2017, vol. 251, pp. 121–129. Available from: doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012129>
6. Krickis, O., Oleksijs, R. Safe operation of the industrial centrifugal pump sets in parallel connection. *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2017, pp.1–7. Available from: doi: <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124774>

Par pētījuma rezultātiem autors ir ziņojis un tie aprobēti zinātniskajās konferencēs

1. 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018, 12–14 Nov., Riga, Latvia.
2. Riga Technical university 59th International Scientific Conference, 2018, 26 Oct., Riga, Latvia.
3. Rīgas Tehniskās universitātes 58. starptautiskā zinātniskā konference, 2017. gads 26. oktobris, Rīga, Latvija.
4. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017, 12–14 Oct., Riga, Latvia. (*Impact of electric field in the stabilized premixed flame on NO_x and CO emissions*).
5. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017, 12–14 Oct., Riga, Latvia. (*Safe operation of the industrial centrifugal pump sets in parallel connection*).
6. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2017, 27–29 Sept., Riga, Latvia. (*Effect of Electric Field in the Stabilized Premixed Flame on Combustion Process Emissions*).
7. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2017, 27–29 September, Riga, Latvia. (*Engineering approach for cost effective operation of industrial pump systems*).
8. Rīgas Tehniskās universitātes 57. starptautiskā zinātniskā konference, 2016. gads 20. oktobris, Rīga, Latvija.

1. KURINĀMĀ DEGŠANAS TEORĒTISKI ANALĪTISKAIS NOVĒRTĒJUMS ĀRĒJO LAUKU APSTĀKĻOS

1.1. Elektrostatiskā lauka ietekme uz degšanas procesu

Degšanas stabilitāte un uzliesmošanas robežu uzlabošana ir viens no aktuālākajiem jautājumiem mūsdienu degšanas iekārtu uzlabošanai. Elektrostatiskā lauka izmantošana liesmas zonā nodrošina risinājumu, kas vienlaikus ir vienkāršs ieviešanā un efektīvs, lai mainītu liesmas struktūru, kā arī sniedz iespēju kontrolēt kaitīgo izmešu koncentrāciju dūmgāzēs.

Elektrostatiskais lauks iespaido liesmas degšanu trijos veidos: ar termisko efektu, kas saistīts ar elektriskās enerģijas konvertāciju siltumā; ar jonu vēja efektu; ar elektriski ķīmisko efektu. Elektriski ķīmiskais efekts rada ātrus elektronus, radikāļus, jonus un ierosinātas molekulas pirms degšanas zonas, kas savukārt ievērojami ietekmē liesmas ķīmiju.

Pulsējošās strāvas avota gadījumā, kad elektrostatiskā lauka frekvence ir zema, joniem un elektroniem ir pietiekami daudz laika, lai sasniegtu elektrodus.

Elektrostatiskā laukā uzlādētas daļiņas var tikt paātrinātas Lorenca spēka ietekmē. Tas var izraisīt trīs liesmas efektus: 1) var uzlaboties uzlādēto daļiņu difūzijas plūsma; 2) impulsa pāreja no paātrinātas uzlādētas daļiņas uz neitrālām molekulām var radīt lielu plūsmu, kas rada jonu vēja parādīšanos; 3) uzlādēto daļiņu uzlabotā kinētiskā enerģija var ietekmēt termokīmisko reakciju rādītājus.

1.2. Jonizācijas process

Degšana vājas degvielas koncentrācijas režīmā ir efektīvs paņēmieni kaitīgo izmešu un degvielas patēriņa mazināšanai. Vairāki veiktie pētījumi priekšsamsaitītai liesmai un difūzijas liesmai gan ar lamināro, gan ar turbulento degšanu elektrostatiskā lauka ietekmē (maiņstrāvas un līdzstrāvas) ir uzrādījuši degšanas uzlabošanu pie maza elektroenerģijas patēriņa, salīdzinot ar degšanas kamerā ievadīto siltuma jaudu. Tomēr atšķirības rezultātos pastāv, tāpēc ir grūti noteikt galveno fizikālo parādību, kas veicina degšanas stabilizācijas uzlabošanu.

Pastāv vairākas ķīmiskās jonizācijas reakcijas, kas veido liesmas jonu ķīmiju. Divas svarīgākās ķīmiskās jonizācijas reakcijas (1.1., 1.2.) ir:



CH_3O^+ koncentrācija ir 2–4 reizes mazāka liesmā nekā C_3H_3^+ jonam. Tiek uzskatīts, ka kvēpu veidošanas procesā galvenais jonu mehānismā ir C_3H_3^+ jons. Papildus tika fiksēts, ka reakcijā starp oksidētāja atomu un degvielu bez liesmas klātbūtnes CHO^+ ir primārās grupas jons.

Nodala šādus procesu laikus, kuros augsti reaktīvie joni atrodas liesmas frontālajā daļā: konvektīvās pārejas laiks (t_k); difūzijas laiks (t_d); iegrimšanas laiks (t_{sf}); pārveidošanās laiks (t_r); raksturīgais laiks (jonu–molekulārās reakcijās laiks starp jonu transformācijām) (t_i).

Atbilstoši zinātnieku pētījumiem ogļūdeņraža liesmas reakcijas zonā, ķīmiskās jonizācijas process un turpmākās reakcijas ir saistītas ar uzlādēto daļiņu pozitīvu jonu (H_3O^+ , $C_3H_3^+$, CH_3^+ , CHO^+), negatīvu jonu (O_2^- , OH^- , O^- , CHO_2^- , CHO_3^- , CO_3^-) un elektronu veidošanos, kas mijiedarbojas Kulona spēku ietekmē, kā rezultātā tie pārveidojas, un minimizējas lokālais elektriskais potenciāls, kurā tie atrodas.

1.3. Jonu plūsma

Tādām molekulām kā O_2 , N_2 , H_2 un līdzvērtīgām molekulām, kas tiek sauktas par nepolārām gāzēm, nav sava dipola momenta. Visām pārējām divatomu molekulām, kas sastāv no dažādiem atomiem (piemēram, CO , OH) vai molekulām ar asimetrisko ģeometrisko struktūru (H_2O , C_6H_6 un citas), ir savs dipola moments. Šādas molekulas tiek sauktas par polārām molekulām. Ārējā elektrostatiskajā laukā gan nepolāras, gan polāras molekulas polarizējas un tiecas izkārtoties gar izveidoto ārējo lauku.

Izmantojot elektrisko lauku (E) ietekmei uz degšanas procesu, Lorencas spēki iedarbojas uz uzlādētām daļiņām, radot to paātrinājumu. Tas rada tieši virzītu uzlādēto daļiņu dreifa ātrumu. Pozitīvie joni virzās katoda virzienā (zemāka potenciāla elektrods) un atkārti elektrostatiskā lauka līnijas, savukārt elektroni un negatīvie joni virzās pretējā anoda virzienā (augstāka potenciāla elektrods). Šāda uzlādēto daļiņu kustība ogļūdeņražu liesmā rada elektrisko strāvu.

Reakcijas zonā pozitīvu jonu skaits ir lielāks, salīdzinot ar negatīviem joniem. Negatīva lādiņa nesēji iekļauj negatīvus jonus un elektronus, tādēļ kopējam negatīvu lādiņu skaitam jābūt vienādam ar pozitīvu lādiņu skaitu. Pozitīvi lādiņi atbild par inerces pārnesi, kas rezultātā veido vienvirziena jonu vēju katoda virzienā.

Pie zemas frekvences maiņstrāvas elektrostatiskā lauka gan pozitīvi, gan negatīvi joni var izraisīt jonu vēja veidošanos abējādi – gan katoda, gan anoda virzienā. Šāds divvirzienu jonu vējš var producēt redzamu efektu, kas atspoguļojas kā plūsmas lauks gadījumos, ja plūsmas ātrums liesmas tuvumā ir mazāks nekā plūsmas ātrums, ko izraisījis jonu vējš.

Inducētais jonu vējš elektrostatiskā lauka ietekmē var palielināt plūsmas ātrumu apkārt liesmai, savukārt maiņstrāvas elektriskais lauks var veicināt siltuma apmaiņu apkārt liesmai, līdz ar to palielinās siltuma izdalīšanās no liesmas. Kamēr liesmas temperatūra palielinās līdz ar elektrostatiskā lauka intensitātes palielinājumu, degviela sadeg intensīvāk, kas kompensē liesmas siltuma zudumus.

1.4. Elektrostatiskā lauka ietekme uz kaitīgajām emisijām

Latvijas pētnieku organizētajā pilnizmēra testā tika analizēta elektrostatiskā lauka lietošana industriālam katlam DKVR-10-13, kā rezultātā tika uzlabota siltuma izdalīšanās par

3,5–8,5 %, industriālā katla efektivitāte palielinājusies vidēji par 2,8 % pie vienlaicīgas termisko NO_x samazināšanās diapazonā 15–20 %.

Virpuļotas degšanas eksperimentālie rezultāti, lietojot elektrostatisko lauku, liecina, ka elektrostatiskā lauka intensificēta radiālā kurināmā masas pāreja veicina gaisa/kurināmā sajaukšanos un kurināmā pilnīgu sadegšanu, tādējādi palielinot liesmas temperatūru un degšanas efektivitāti.

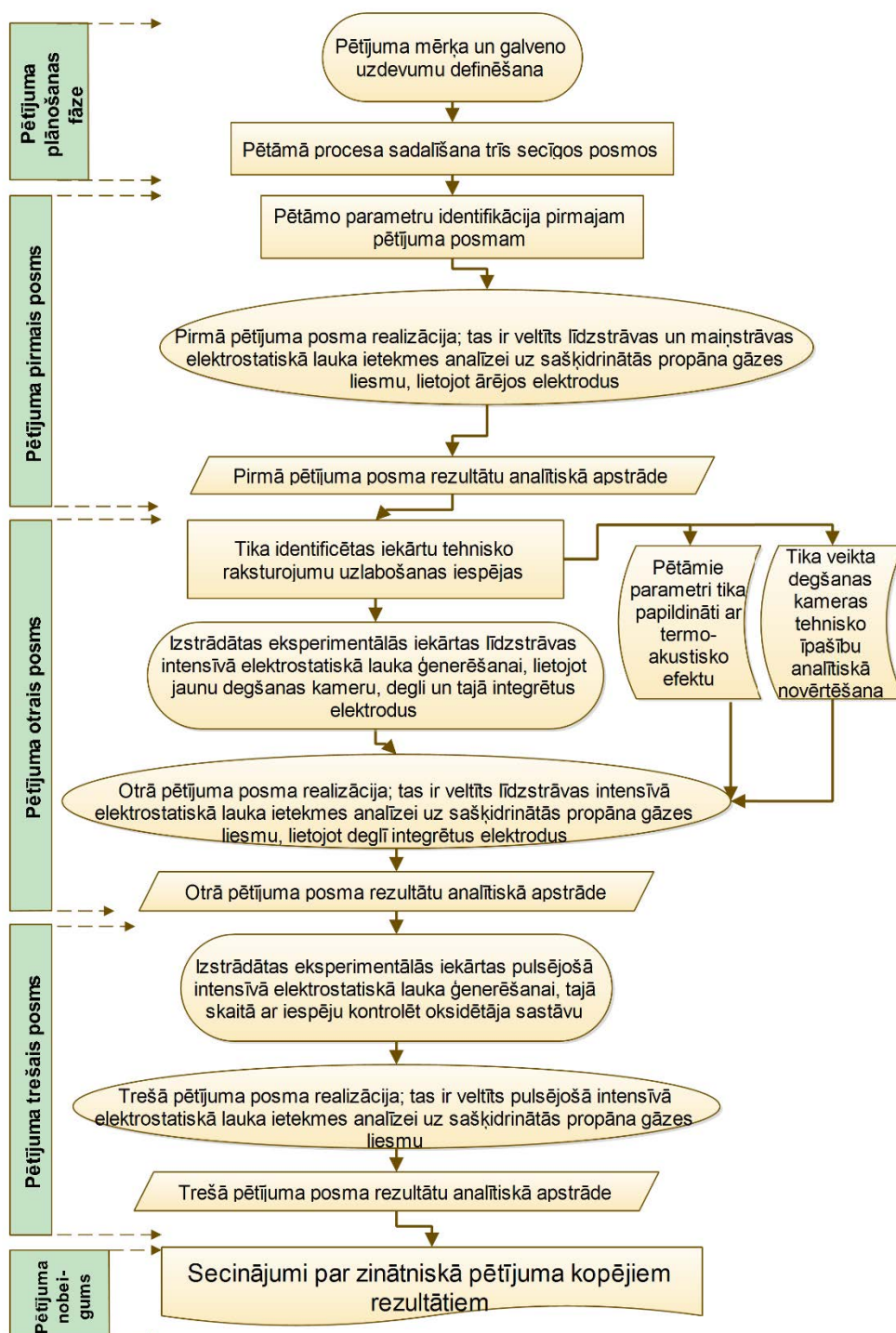
Pētījumos par līdzstrāvas elektrostatiskā lauka ietekmi uz propāna-gaisa liesmu tika konstatēts liesmas temperatūras un CO_2 masas frakcijas samazinājums.

Degšanas procesa pētījumi par sinusoīda maiņstrāvu elektrostatisko lauku lietošanu ar mainīgo frekvenci līdz 10 kHz liecina, ka pie sprieguma 1,0 kV gan CO, gan NO molārā frakcija sasniedz kritisko lielumu, tomēr pie sprieguma diapazonā 1,0–3,0 kV tiek novērota pretēja liesmas reakcija, salīdzinot ar zema sprieguma režīmu. Pie sprieguma virs 3,0 kV liesmas galam izzūd dzeltenais tonis, strauji pieaug CO molārā frakcija un samazinās NO molārā frakcija.

1.5. Termoakustiskais efekts

Liesmas termoakustiskais efekts ir viena no lielākajām lieljaudas degšanas kameru problēmām. To darbības laikā ir novērojamas pašģenerējošas lielas amplitūdas, zemfrekvenču spiediena un siltuma izdalīšanās svārstības. Faktiski akustisko viļņu un siltuma avota apvienojums modulē momentānās siltuma izdalīšanās svārstības fāzē ar spiediena fluktuācijām, kas savukārt degšanas kamerā rada rezonējošu akustisko efektu. Atbilstoši pētnieku eksperimentāliem novērojumiem spiediena un siltuma izdalīšanās jaudas spektrālā analīze var tikt lietota ierosmju pārbaudei nestabilās degšanas sistēmās. Degšanas eksperimentos tika konstatēts, ka metāna termoakustiskā fundamentālā frekvence veido 120 Hz.

2. GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA ELEKTROSTATISKĀ LAUKA APSTĀKĻOS



2.1. att. Pētījuma organizācijas shēma.

Šajā promocijas darbā pētāmais process tika iedalīts trijos posmos ar mērķi noteikt dažādu iekārtu komponējuma un elektrostatiskā lauka ietekmi uz degšanas procesa parametriem un dūmgāžu sastāva izmaiņām, mainoties vienam vai vairākiem eksperimenta faktoriem.

Pētījuma organizācijas shēma ir sniegta 2.1. attēlā. Tā paredz pētījuma plānošanas posmu, pētījuma trīs secīgus posmus un nobeigumu. Katrs nākamais posms ir balstīts uz iepriekšējā pētījuma posma rezultātiem. Visu rezultātu apkopojums sniedz detalizētu informāciju par pētāmo procesu.

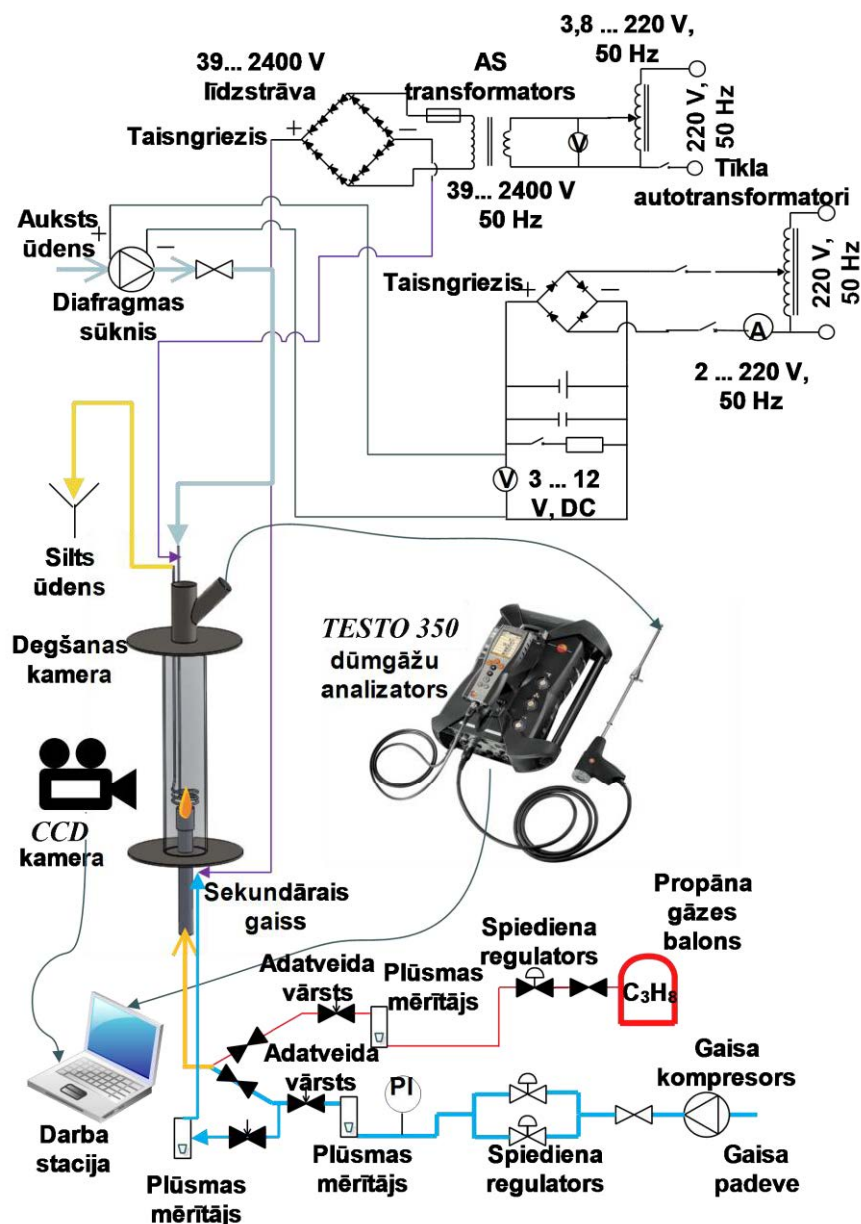
2.1. Pētījuma veikšanas metodoloģija

Pētījuma pirmais posms paredzēja laboratorijas iekārtas izbūvi (2.2. att.), kuras komponējums atbilst elektrostatiskā lauka klasiskā pētījuma shēmai, paredzot elektrostatiskā lauka ģenerēšanu apkārt liesmai. Šim uzdevumam tika izmantota spole no vara materiāla ar iekšējo dzesēšanas kanālu, kas tika pieslēgta augstsprieguma avotam. Pētījumā tika analizēta līdzstrāvas elektrostatiskā lauka ietekme uz propāna degšanu sprieguma diapazonā 0–1800 V. Pētījuma pirmā posma eksperimenta plānošanas pamatā ir viena faktora ietekmes analīze uz vairākām rezultējošām atbildēm. Šī pētījuma eksperimenta realizācijai tika izvēlēti 18 faktoru līmeņi. Par galveno faktoru tika pieņemts līdzstrāvas/tīkla maiņstrāvas avota spriegums. Šis pētījums tika iedalīts divos blokos, pirmajā blokā ietverot piecus eksperimentus ar līdzstrāvas/maiņstrāvas avota spriegumu no 29 V līdz 1800 V, savukārt otrajā pētījuma blokā veicot divus eksperimentus līdzstrāvas sprieguma diapazonā no 29 V līdz 280 V. Kā galvenais faktors tika izmantots spriegums, savukārt kā atbilde tika apstrādāti O_2 , CO un NO_x mērījumi no dūmgāžu analizatora.

Pētījuma otrais posms balstās uz pētījuma pirmajā posmā iegūtajiem datiem. Šie dati tika izmantoti eksperimentālas iekārtas rekonstrukcijai, paredzot jaunu degšanas kameru projektēšanu un izbūvi, jauna degļa konstrukcijas izstrādi, jaunu elektrostatiskā lauka ģenerēšanas iekārtu jeb laboratorijas tipa transformatoru ar mazāku sprieguma regulēšanas soli, kā arī paaugstinošā augstsprieguma transformatora apvienošanu ar augstsprieguma multiplikatoru, kas vienlaikus pilda taisngrieža funkciju. Otrā pētījuma posma pamatā ir dūmgāžu sastāva izmaiņu noteikšana atkarībā no izmantotā līdzstrāvas avota sprieguma, kas tika pielikts pie hibrīda degļa. Šim eksperimentam kontrolējamais faktors ir līdzstrāvas avota spriegums, savukārt atbilde ir dūmgāžu sastāva elementu koncentrācijas un temperatūras vērtības, kas kopumā veido septiņus apskatāmos parametrus. Kontrolējamā faktora vērtības izmaiņas robežas ir no 0 V līdz 2200 V. Otrajam pētījuma posmam tika plānots eksperiments ar vienu faktoru deviņos līmeņos un manuāli veiktu līmeņu diapazona sadalījumu.

Trešajā pētījuma posmā tika analizēta sašķīdinātās propāna gāzes (propāna molārā frakcija 0,92) degšanas, dūmgāžu komponentu koncentrācijas un dūmgāžu temperatūras izmaiņas atkarībā no trim kontrolējamiem ārējiem faktoriem: 1 – pulsējošā strāva (spriegums); 2 – pulsējošās strāvas frekvence (komutācijas frekvence); 3 – ozona ģenerēšanas iekārtas darbības intervāls (komutācijas releja darbības laiks). Visu trīs faktoru savstarpējās mijiedarbības analīze katram faktoram tika veikta 10 līmeņos. Atbilstoši veiktajam eksperimenta plānošanas novērtējumam tika izvēlēta Latvijas zinātnieka V. Eglāja izstrādāta eksperimenta plānošanas metode – latīņu hiperkuba, kas attiecas uz telpas aizpildīšanas eksperimenta plāniem.

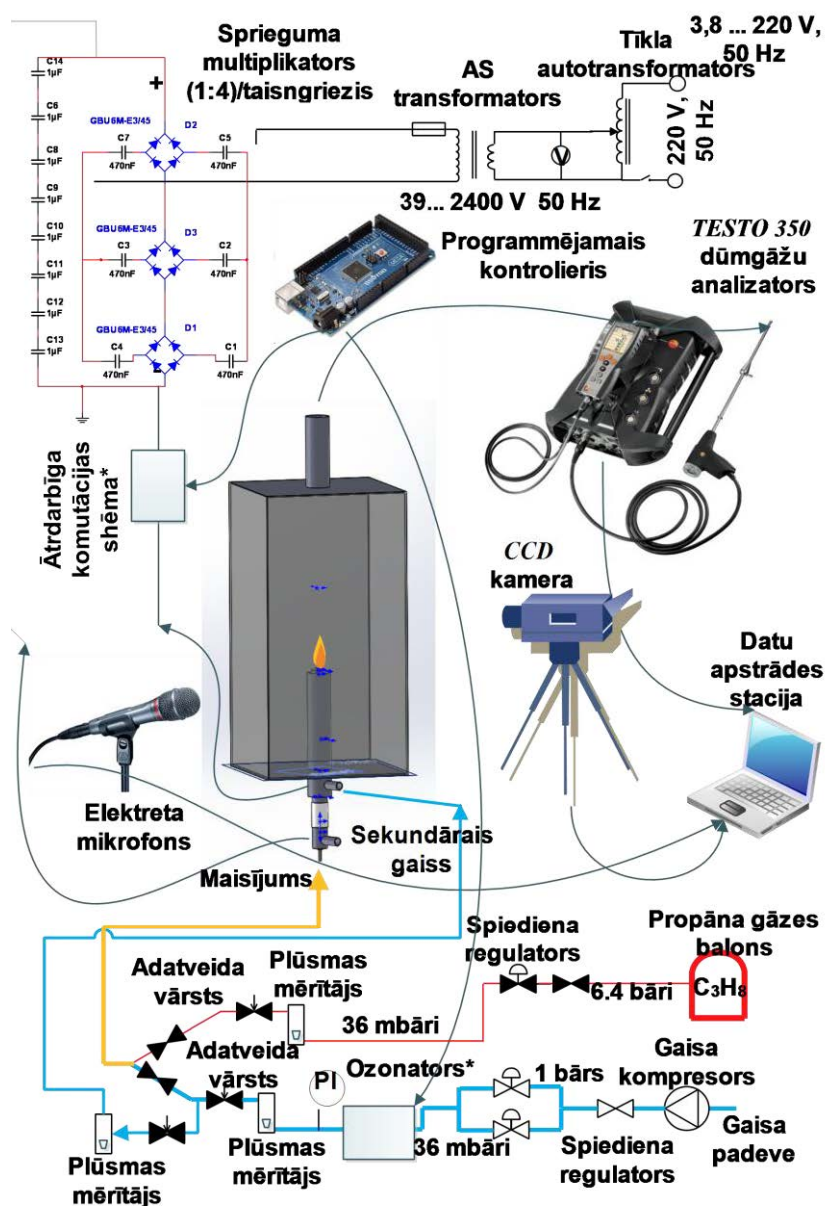
2.2. Eksperimentālā iekārta



2.2. att. Eksperimentālās iekārtas shēma pētījuma pirmajam posmam.

Pētījumam izmantotā eksperimentālā iekārta sastāv no vairākām atsevišķām komponentēm, kuru darbība ir sinhronizēta vienotā procesā pēc laika un ļauj veikt izmērīto datu analīzi vienotam režīmam. Eksperimentālajai iekārtai ir šādas komponentes: liesmas formas izmaiņas vizuālajai analīzei tika izmantota monohroma tipa CCD kamera un ātrdarbīga kamera, industriālā tipa dūmgāzu analizators (*TESTO 350*), liesmas skaņas reģistrācijas iekārta ar skaņas pastiprinātāju, sprieguma regulēšanas mezgls, sprieguma paaugstināšanas un strāvas pārveidošanas mezgls, augstsprieguma aizdedzināšanas iekārta, gaisa padeves, regulēšanas un uzskaites mezgls, deggāzes padeves, maisījuma saplūdes mezgls, degšanas kamera ar gaisa divpakāpju plūsmas sadalīšanos, augstsprieguma aizdedzes iekārta, darbstacija datu apstrādei. Papildus minētajām komponentēm pētījuma trešajā posmā

tika izmantota speciāli projektēta ozona gāzes ģenerēšanas ierīce (ieskaitot ģenerēšanas laika kontroles moduli), speciāli projektēts ātrdarbīgs strāvas komutācijas slēdzis (ar augstsprieguma *MOSFET* tipa tranzistoru) un elektroniskais četrkanālu osciloskops.

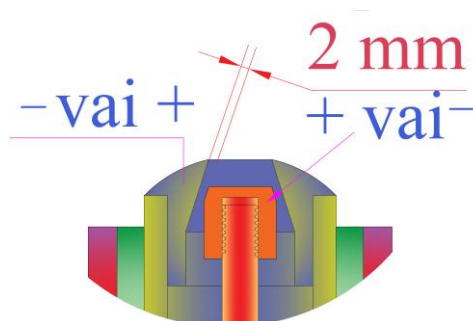
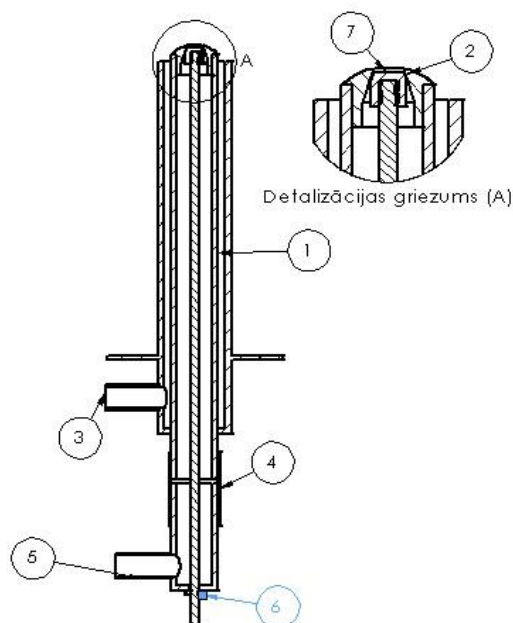


2.3. att. Eksperimentālās iekārtas shēma pētījuma otrajam un trešajam posmam.

Pētījuma pirmajā posmā degšanas kamera sastāvēja no cilindriskas kvarca stikla kolbas ar augstumu 350 mm, ārējo diametru 100 mm un stikla sieniņas biezumu 5 mm. Eksperimentālā shēma ir attēlota 2.2. shēmā. Degšanas kameras iekšpusē tika uzstādīts hermētiski noslēgts deglis. Degšanas kameras augšējā daļa sastāv no metāla loksnes ar diametru 150 mm, pie kuras tika pievienota dūmgāžu izplūdes caurule ar augstumu 500 mm, savukārt 50 mm attālumā no stikla kolbas augšdaļas tika izveidota dūmgāžu probes īscaurule kaitīgo emisiju ekspresmērījumiem 45° leņķī attiecībā pret dūmgāžu plūsmu. Elektrostatiskā lauka ģenerēšanai tika izmantota kapara caurule ar diametru 4 mm, kas veidoja trīs gredzenus (turpmāk – spole) apkārt liesmai. Kapara spoles dzesēšanai tika izmantots ūdens diafragmas

tipa līdzstrāvas sūknis, kura ražība tika regulēta pēc līdzstrāvas sprieguma, izmantojot papildu autotransformatoru un taisngriezi. Kapara spoles pozīcija attiecībā pret degli tika mainīta vertikālā virzienā.

Otrā un trešā pētījuma posma realizācijai tika projektēta atšķirīgas konstrukcijas degšanas kamera un deglis ar gaisa divpakāpju padeves sadalījumu. Papildu deglis tika aprīkots ar iebūvētu izolētu elektrodu elektrostatiskā lauka ietekmes izpētei uz degšanas procesu. Degšanas kamera ir veidota no oglekļa tērauda ar loksnes biezumu 2 mm. Savukārt degšanas procesa vizuālajai analīzei un reģistrācijai degšanas kameras viena vertikālā siena tika izgatavota no ugunsizturīga 5 mm stikla. Degšanas kamera pētījumu laikā tika blīvi izolēta, lai izslēgtu gaisa infiltrāciju. Degšanas kameras apakšpusē tika ievietots speciāli projektēts deglis. Degšanas kameras augšpusē (perpendikulāri dūmgāzu plūsmai) tika iemetināta dūmgāžu probes ņemšanas īscaurule dūmgāžu analizatora pieslēgšanai. Eksperimentālās shēmas principiālais attēlojums ir parādīts 2.3. shēmā (principiālās shēmas attēlojuma unifikācijai tās papildu komponentes, kas tika izmantotas trešajā pētījuma posmā, apzīmētas ar zvaigznīti).



2.4. att. Eksperimentālās iekārtas hibrīda degļa sastāvdaļas atbilstoši numerācijai: 1 – gaisa/deggāzes padeves kanāls; 2 – plūsmas regulēšanas mezgls / elektrostatiskā lauka elektrods; 3 – sekundārā gaisa kanāls; 4 – dielektriskā PVC uzmava; 5 – gaisa/deggāzes padeves īscaurule; 6 – plūsmas regulēšanas stienis ar centrējošiem tekstolīta gredzeniem (gredzeni nav uzrādīti); 7 – profilēta degļa virsdaļas uzmava.

2.5. att. Eksperimentālās iekārtas degļa šķērsngriezums – ņemot vērā 2 mm attālumu starp elektrovadāmām daļām, elektrostatiskā lauka efektīvā intensitāte pēc formulas $E = U/D$ bija 0–1140 kV/m.

Pētījuma realizācijai atbilstoši 2.3 shēmai tika izstrādāts speciālas konstrukcijas deglis (turpmāk – hibrīda deglis) (2.4. un 2.5 att.). Tas tika izgatavots no nerūsējošā tērauda un izmantots elektrostatiskā lauka ģenerēšanai, pieslēdzot pie tā augstsprieguma avotu. Elektrostatiskā lauka ģenerēšanai degļa uzbūve sastāvēja no vairākiem dielektriskiem elementiem, ar kuru palīdzību degļa ārējais apvalks tika nodalīts no degļa centrējošā stienā, kas savukārt pildīja gan gaisa/deggāzes maisījuma padeves regulēšanas, gan liesmas formas korekcijas funkciju. Degļa apakšdaļa un serdenis tika izolēts no augšējā degļa korpusa ar *PVC* ieliktni un dielektriskiem (tekstolīta) centrējošiem gredzeniem. Centrējošo gredzenu ārējais diametrs ir vienāds ar degļa primārās plūsmas kanāla iekšējo diametru, savukārt plūsmas nodrošināšanai tajā ir izveidoti astoņi caurumi ar diametru 3 mm. Serdeņa augšējās daļas ģeometrija ir cieši pielāgota degļa ārējā apvalka augšdaļas ģeometrijai, šādi nodrošinot maisījuma radiālo izplūdi degšanas zonā. Degļa konstrukcija paredzēta sekundārā gaisa pievadīšanai degšanas zonā (degšanas kameras iekšpusē), izmantojot atsevišķu kanālu apkārt primārā maisījuma kanālam. Šāds gaisa padeves izpildījums ļauj izpētīt daļēji samaisītu liesmu, kas ir konstruktīvi līdzvērtīgs industriālo degļu izpildījumam.

Pētījumā izstrādātā hibrīda degļa konstrukcija nodrošina elektrostatiskā lauka efektīvo intensitāti 1140 kV/m, kas vairākas reizes pārsniedz citu zinātnieku pētījumos sasniegtos iekārtu parametrus.

2.3. Degšanas procesa analītiskā novērtēšana

Apskatāmās sistēmas pilnvērtīgai novērtēšanai otrajā un trešajā pētījuma posmā tika veikta degšanas kameras un hibrīda degļa darbības režīmu analīze, kas balstās uz liesmas un degšanas parametru novērtēšanu, kā pamatā ir priekšsamaisītas liesmas degšanas analīze elektrostatiskā lauka ietekmē. Liesmas vairāku raksturīgo parametru noteikšanai tika veikta analītiskā apstrāde, kas balstīta uz savstarpēji saistītiem parametriem, tādiem kā kurināmā reducētā masas daļa Y un reducēta temperatūra Θ , kas ir izteicamas ar 2.1. un 2.2. formulu:

$$Y = \frac{Y_F}{Y_F^1}; \quad (2.1.)$$

$$\Theta = \frac{c_p(T - T_1)}{Q \cdot Y_F^1} = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}. \quad (2.2.)$$

Lai veiktu liesmas ātruma skaitlisko analīzi, iespējams izmantot Zeldoviča, Franka Kamenetskī un fon Kārmāna (2.3. formula) vai Viliama (2.4. formula) piedāvāto analītisko formulu, kurā siltuma difūzija svaigā gāzē ir $D_{th}^1 = \lambda/\rho_1 \cdot c_p$:

$$s_L = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{\beta}{2\theta_a}} (2 \cdot |B_1| \cdot T_1^{\beta_1} \cdot D_{th}^1)^{\frac{1}{2}}; \quad (2.3.)$$

$$s_L = \frac{1}{\beta} \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{2\theta_a}\right) \left(2 \cdot |B_1| \cdot T_1^{\beta_1} \cdot D_{th}^1\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{1,344 - 3\theta_a}{\beta}\right). \quad (2.4.)$$

Izklāstītais degšanas procesa analītiskais novērtējums tika lietots kurināmā izdegšanas novērtēšanai un liesmas ātruma noteikšanai. Šis analītiskais novērtējums tika apvienots ar

degšanas procesa skaitlisko analīzi, šim uzdevumam lietojot degšanas kinētikas novērtēšanu *CHEMKIN* un *Ansys Fluent* simulācijas datorprogrammās. *CHEMKIN* parametriskai un modeļa analīzei tika izmantoti no mērlīdzekļu rādījumiem iegūti ievaddati, kas papildus tika matemātiski apstrādāti. Propāna degšanas novērtēšanai tika izmantots Kalifornijas Universitātes *San Diego* ķīmiski kinētiskais mehānisms (ietver propāna oksidācijas reakcijas), savukārt metāna degšanas analīzei tika izmantots standarta *Grimech 3.0* mehānisms (ietver metāna oksidācijas reakcijas).

2.4. Termoakustiskā signāla novērtēšana

Pētāmā procesa padziļinātai analīzei tika veikta liesmas termoakustiskā signāla novērtēšana intensīva elektrostatiskā lauka ietekmē. Liesmas termoakustiskā signāla apstrādes pamatā ir signāla digitalizācija un diskretā Furjē transformācija (turpmāk – DFT). Diskrētās DFT pamatā ir 2.5. formula:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{mn}, \text{ kur } m = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.5.)$$

Balstoties uz diskreto DFT signāla apstrādes algoritmu, tika veikta akustiskā signāla sadalīšana attiecīgajās diskreta daļās, veikta akustiskā signāla digitalizācija ar turpmāko DFT transformāciju ar mērķi noteikt liesmas fundamentālo harmoniku un tās stiprumu atkarībā no ārējā elektrostatiskā lauka intensitātes.

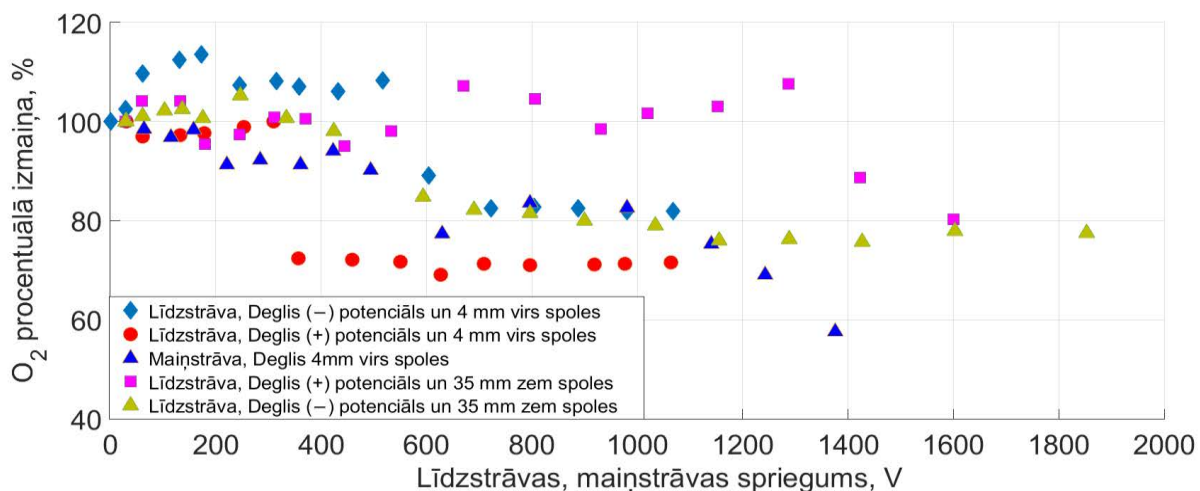
3. GĀZVEIDA KURINĀMĀ DEGŠANAS PĒTĪJUMA REZULTĀTI ELEKTROSTATISKĀ LAUKA APSTĀKĻOS

3.1. Pētījuma pirmais posms

Pētījuma pirmā posma pamatā ir elektrostatiskā lauka ietekmes analīze uz sašķidrīnātās propāna gāzes degšanu, lietojot līdzstrāvas un maiņstrāvas avotu, kura viens potenciāls tika pievienots pie ārējā elektroda, savukārt otrs – pie degļa korpusa. Papildus tika nodrošināta ārējā elektroda pozīcijas maiņa vertikālā virzienā ar mērķi noteikt labāko elektroda izvietojuma variantu, kas sniedz lielāku ietekmi uz dūmgāzu koncentrācijas izmaiņu.

Elektrostatiskā lauka ģenerēšanai apkārt liesmai tika izvietota kapara caurules spole, kas sastāvēja no trim tinumiem. Tās dzesēšanai tika izmantots diafragmas tipa ūdens sūknis ar konstantu ūdens ieplūdes temperatūru. Kaitīgo izmešu koncentrācijas izmaiņas elektrostatiskā lauka ietekmē tika analizētas divās fāzēs. Pirmajā fāzē tika analizēts pilns līdzstrāvas un maiņstrāvas sprieguma diapazons, sākot no 30 V līdz 1800 V. Savukārt otrajā fāzē tika analizēts zemsprieguma diapazons (30–280 V) ar mazāku sprieguma iestatīšanas soli.

Pētījuma grafiski analītiskie rezultāti demonstrē skābekļa satura samazināšanos dūmgāzēs. Sākotnējam stāvokli atbilst 100 %, un atbilstoši 3.1. attēlam skābekļa saturs dūmgāzēs samazinājās par 23 %, salīdzinot ar sākotnējo degšanas režīmu bez elektrostatiskā lauka. Lielākais skābekļa samazinājums dūmgāzēs tika sasniegts pie maiņstrāvas ar tīkla frekvenci 50 Hz.

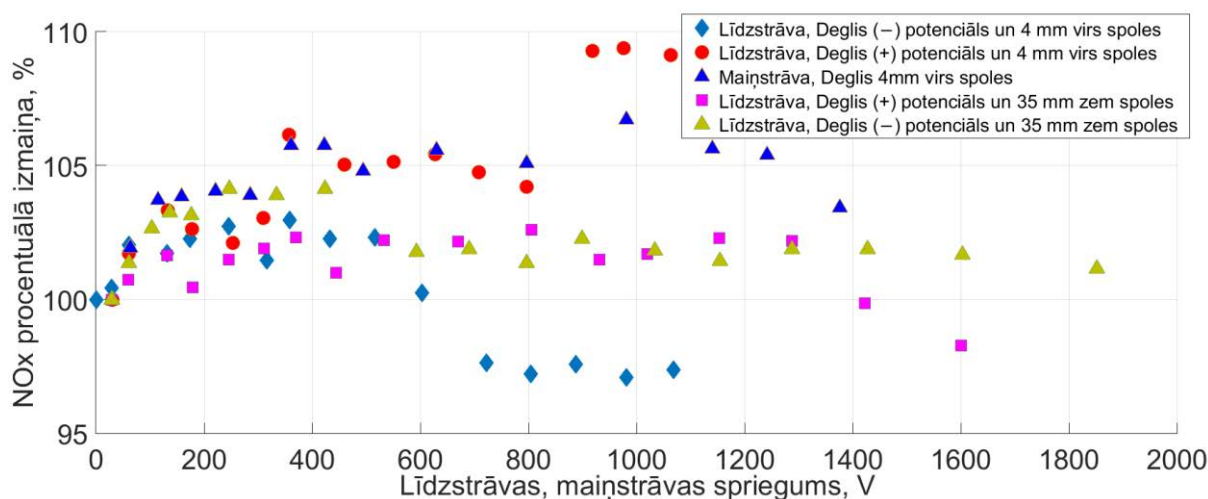


3.1. att. Elektrostatiskā lauka ietekme (0–1800 V) uz skābekļa (O₂) saturu dūmgāzēs.

Salīdzinot maiņstrāvas un līdzstrāvas elektrostatisko lauku ietekmi uz skābekļa saturu dūmgāzēs, tika secināts, ka maiņstrāvas elektrostatiskā lauka ietekmē skābekļa samazinājums ir stabilāks.

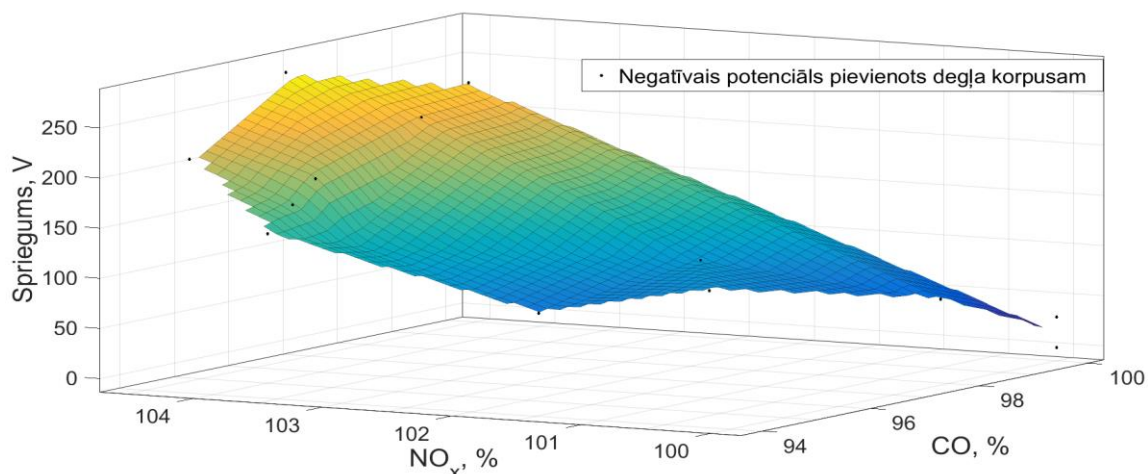
Pētījuma rezultāti liecina, ka elektrostatiskā lauka lietošana, izmantojot ārējo elektrodu, kam tiek nodrošināta pastāvīga temperatūra un minimizēta palielinātas pretestības ietekmes iespēja, atkarībā no elektrostatiskā lauka veida (maiņstrāvas vai līdzstrāvas) veicina skābekļa

molārās frakcijas samazināšanos – tas savukārt liecina par degšanas procesa efektivitātes uzlabošanos. Tomēr pretēji skābekļa molārās frakcijas vidējām samazinājumam tika reģistrēts NO_x izmešu emisiju pieaugums, kas atsevišķos gadījumos veidoja 5 %, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli (3.2. att.). Šāds NO_x izmešu pieaugums varētu būt saistīts ar lokālo liesmas frontes temperatūras pieaugumu, kas intensificē termisko NO_x izmešu formāciju atbilstoši Zeldoviča mehānismam. Tikai diapazonā pie ievērojama skābekļa tilpuma daļas samazināšanās dūmgāzēs NO_x koncentrācija samazinājusies par 3 %.



3.2. att. Elektrostatiskā lauka ietekme (0–1800 V) uz slāpekļa oksīdu (NO_x) koncentrāciju dūmgāzēs.

Sprieguma diapazonā no 400 V līdz 1800 V tika konstatēts CO izmešu straujš kāpums, kas saistīts ar brīvā skābekļa samazināšanos dūmgāzēs.



3.3. att. Elektrostatiskā lauka ietekme ar negatīvu polu (0–280 V) uz CO un NO_x koncentrāciju dūmgāzēs.

Pētījuma otrajā fāzē pie sprieguma diapazona 30–400 V oglekļa monoksīda molārā frakcija samazinās, savu minimumu sasniedzot pie 150 V sprieguma, kad negatīvais potenciāls ir savienots ar degļa korpusu (3.3. att.).

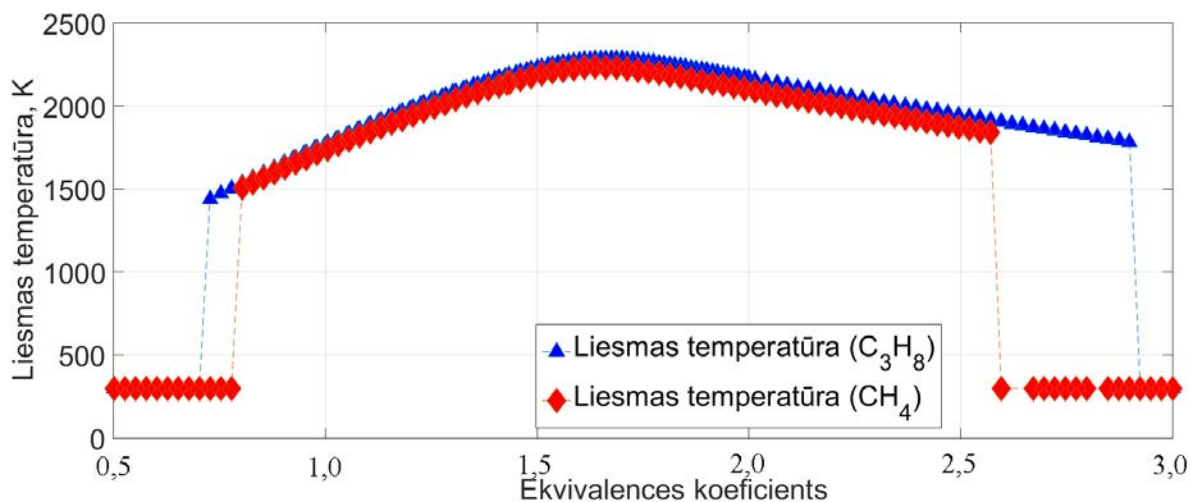
Lielākais reģistrētais CO samazinājums veidoja 6 %, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli, savukārt NO_x koncentrācija iepriekšminētajam spriegumam palielinājās par 3,5 %. Ņemot vērā, ka CO īpatnējais samazinājums ir lielāks par NO_x koncentrācijas izmaiņu, var secināt, ka zemsprieguma (30–280 V) līdzstrāvas elektrostatisks lauks pozitīvi ietekmē emisijas.

3.2. Pētījuma otrais posms

Pētījuma otrā posma pamatā ir intensīva elektrostatisks lauka ietekmes analīze uz sašķidrīnātās propāna gāzes degšanu, ietverot liesmas frontes vizuālo reģistrāciju un salīdzināšanu, dūmgāzu komponentu koncentrācijas izmaiņas analīzi, kā arī termoakustiskā signāla apstrādi, izmantojot DFT.

Pētījuma otrajā un trešajā posmā tika izmantota vienādas konstrukcijas degšanas kamera, līdz ar ko papildus tiešajiem mērījumiem tika veikta degšanas procesa skaitliskā analīze, lietojot simulācijas metodi, kas balstās uz reāliem ķīmiski kinētiskiem mehānismiem. Šai skaitliskajai analīzei eksperimenta veikšanas laikā tika izmantotas faktiskās reģistrētās gaisa un deggāzes plūsmas.

Degšanas procesa pilnvērtīgai analīzei un eksperimenta sagatavošanai ir nepieciešama gan procesa skaitliski analītiskā analīze, gan fiziskā eksperimenta empīrisku datu apstrāde. Šādu divu darbību apvienojums vienkāršo laboratorijas eksperimenta realizāciju, kā arī palielina izmērīto datu precizitāti un uzlabo novērojamā procesa fizikālā pamatojuma kvalitāti. Procesā analīzē tika lietots eksperimentam identisks modelis bez pieņemtiem vienkāršojumiem ar mērķi izmantot skaitliski aprēķinātus datus kā papildinājumu empīriskiem datiem.



3.4. att. Liesmas maksimālā temperatūra degšanas zonā atkarībā no kurināmā/gaisa maisījuma stehiometriskās proporcijas.

Datorsimulācijas skaitliskās analīzes precizitātes paaugstināšanai *Ansys Fluent* standarta degšanas procesa reakcijas tika aizstātas ar datorprogrammas *Ansys CHEMKIN-PRO SanDiego* degšanas procesa 270 ķīmiskām reakcijām. Papildus ķīmisko vielu termodinamiskās īpašības tika noteiktas ar *CHEMKIN* termodinamisko datubāzi. Pētījumā, izmantojot datorsimulācijas rīkus, tika analizēts degšanas process bez elektrostatisks lauka izmantošanas, nosakot galvenos degšanas procesa rādītājus, ko fiziski izmērīt konkrētajos

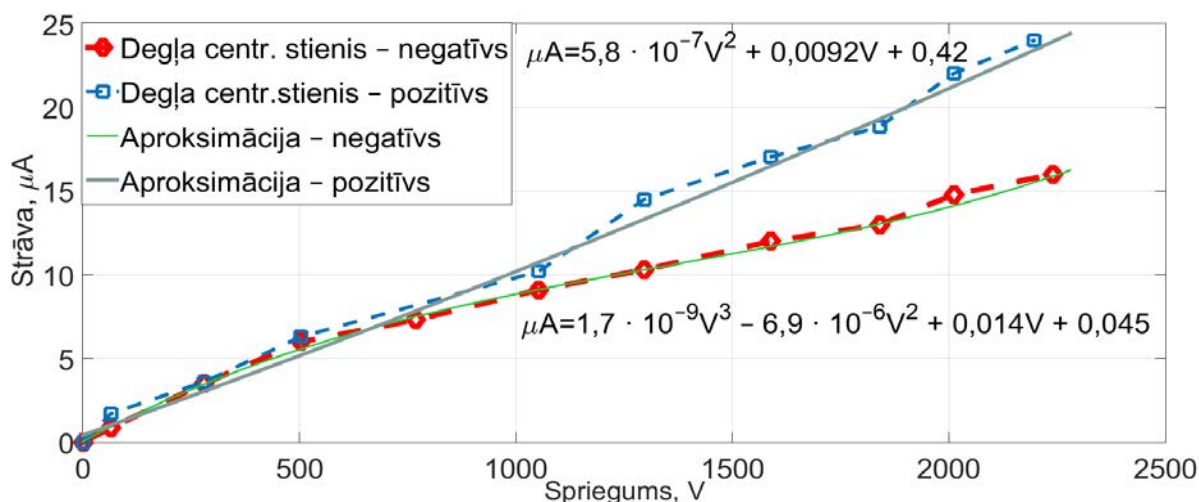
apstākļos nebija iespējams. Skaitliskās metodes apvienojums ar empīriskiem datiem sniedz iespēju iegūt plašu pētāmā objekta raksturojumu.

Degšanas procesa skaitliskās analīzes rezultāti liecina, ka šajā darbā uzkonstruētais deglis spēj nodrošināt propāna degšanu plašā ekvivalences koeficienta diapazonā no $\phi = 0,73$ līdz $\phi = 2,90$ (tiek noteikts pēc kurināmā/gaisa proporcijas reakcijas kamerā), kas ir ekvivalents propāna molārās frakcijas diapazonam $W_{C_3H_8} = 0,029 \dots 0,108$. Ekvivalences koeficienta atkarība no maksimālas temperatūras degšanas zonā ir parādīta kā parametriskās variācijas funkcija 3.4. attēlā.

Papildus iepriekš minētajam temperatūras sadalījumam atbilstoši *CHEMKIN* degšanas procesa simulācijas rezultātiem ir secināms, ka elektrostatiskā lauka ietekme uz degšanas procesu tika veikta pie $\phi = 1,28$ (O_2 saturs dūmgāzēs $\sim 3,4\%$, kas savukārt atbilst skābekļa molārajai koncentrācijai dūmgāzēs atbilstoši reģistrētiem datiem ar *TESTO 350* dūmgāžu analizatoru.

Pamatojoties uz *Ansys CHEMKIN-PRO* rezultātiem, papildus tika veikta liesmas degšanas parametru analīze *Ansys Fluent Flow* simulācijas datorprogrammā ar mērķi precīzāk aprakstīt liesmas degšanas īpašības konkrētajā eksperimentālajā iekārtā. Atbilstoši *Ansys Fluent Flow* datorsimulācijas rezultātiem var secināt, ka liesmas ātrums liesmas saknē ir vienāds ar $s_L = 0,492453$ m/s, savukārt liesmas virsdaļā liesmas ātrums samazinās līdz $s_L = 0,37665$ m/s.

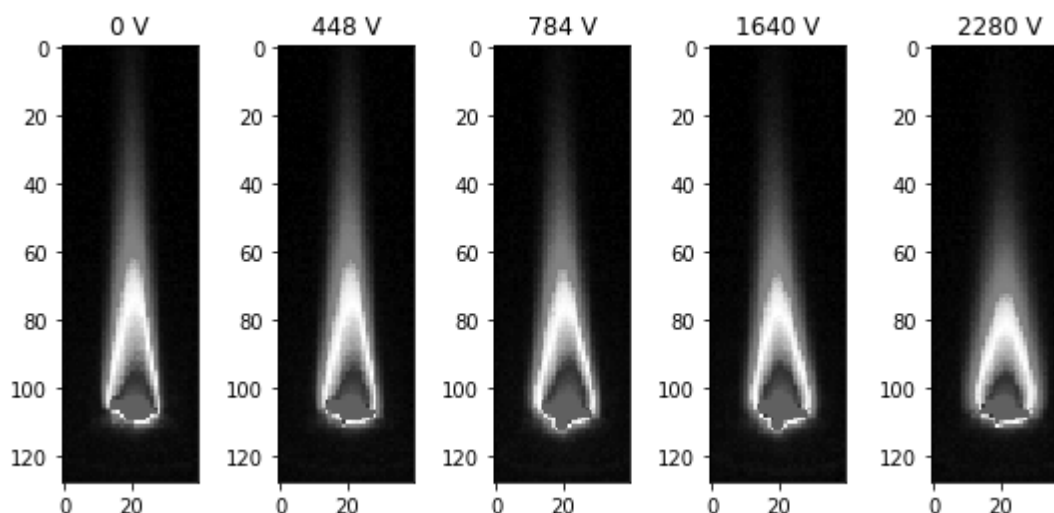
Atkarībā no līdzstrāvas pievienojuma shēmas tika veikta divu vizuālo datu kopumu apstrāde – ar pozitīvu un ar negatīvu pieslēgtu potenciālu centrējošajam stienim. Pie šiem apstākļiem tika veikta sprieguma paaugstināšana, visus pārējos parametrus saglabājot nemainīgus. Šajā pētījuma posmā kurināmā ievadītā jauda bija $0,17$ kW_{th}. Par liesmas formas atskaites punktu tika izmantots liesmas attēls bez elektrostatiskā lauka lietošanas. Lai noteiktu liesmas formas deviācijas, uzņemtās bildes tika papildinātas ar bilžu pikseļu koordinātēm.



3.5. att. Sprieguma-strāvas eksperimenta raksturlīknes.

Pētījumā maksimālā liesmas patērētā reģistrētā strāva bija $24 \mu A$ variantā ar pozitīvu pieslēgtu elektrodu pie degļa centrējošā stieņa. Atbilstoši sprieguma-strāvas raksturlīkņu apkopojumam (3.5. att.) ir secināms, ka patērējamā strāva ievērojami pieaug, sākot no 1300 V, kas ir pamatojams ar jona vēja efekta parādīšanos. Šiem rezultātiem ir korelācija ar liesmas formas frontes izmaiņas apkopojumu (3.6. att.).

Atbilstoši liesmas formas un garuma izmaiņas analīzei var secināt, ka elektrostatiskā lauka ietekme uz liesmas formas izmaiņu pie negatīva pieslēgta potenciāla centrējošajam degļa stienim ir minimāla. Tas saistīts ar centrējošā stieņa, kas pildīja elektroda funkciju, salīdzinoši mazo virsmas laukumu (12 mm^2). Ņemot vērā, ka centrējošā stieņa elektrods tika izvietots zemāk par liesmas izplatīšanas sakni, liesmas pozitīvu jonu kustība pie negatīvā elektroda no liesmas frontes praktiski nav sasniedzama. Šie rezultāti liecina, ka šāds elektroda izvietojums un līdzstrāvas avota pieslēgums veicina liesmas saknes formas minimālu izmaiņu, salīdzinot ar degšanas režīmu bez elektrostatiskā lauka lietošanas.



3.6. att. Liesmas formas grafiskais salīdzinājums sprieguma diapazonā 0–2280 V ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu centrējošajam stienim un negatīvu pieslēgtu potenciālu degļa apvalkam.

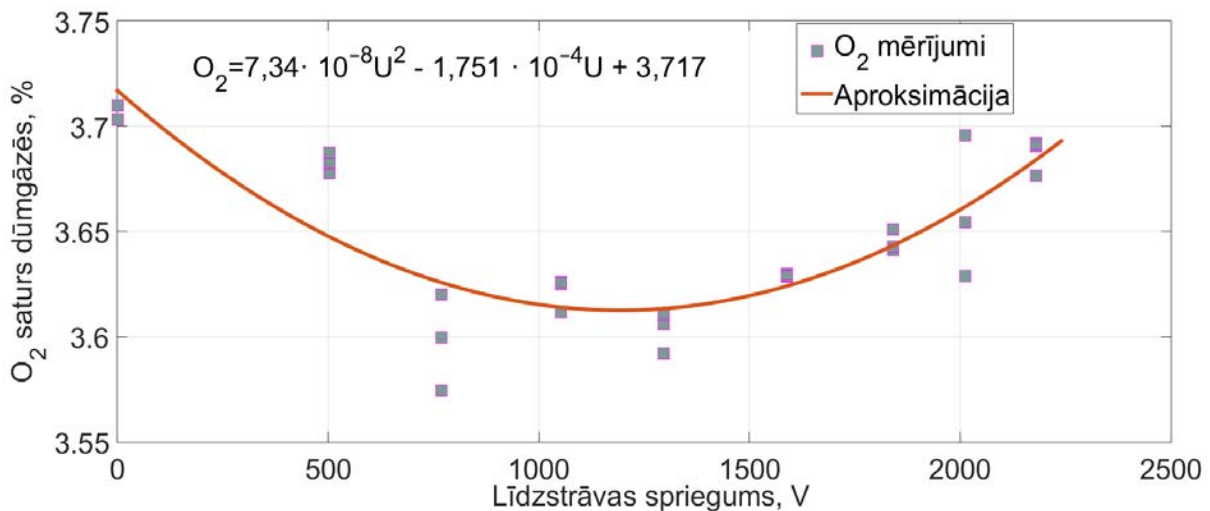
Atbilstoši grafiskajiem rezultātiem ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu pie degļa centrālā elektroda ir secināms, ka, sākot no 400 V, liesmas kodola garums samazinās, savukārt no 700 V ir novērojams liesmas saknes paplašinājums, kas ir izskaidrojams ar pozitīvu jonu dreifu pie degļa apvalka, kam tika pieslēgts negatīvais potenciāls. Elektrostatiskā lauka ietekme (3.6 att.) uz liesmas garuma izmaiņu ir ievērojama – tā saīsinājums veido 24 %, salīdzinot ar degšanas režīmu bez elektrostatiskā lauka lietošanas. Tomēr liesmas saknes paplašinājums ir 27 %. Šie rezultāti liecina, ka elektrods, kura diametrs ir 2,5 reizes lielāks par liesmas diametru, veido proporcionālo liesmas kodola garuma samazinājumu un liesmas saknes paplašinājumu. Šāda formas izmaiņa, saglabājoties nemainīgiem pārējiem parametriem, veicina degšanas procesu, vienlaikus samazinot CO emisijas atmosfērā un palielinot lokālo liesmas temperatūru.

Pētījumā tika veikta dūmgāzu sastāva analīze, izmantojot speciāli tam paredzētu probes ņemšanas punktu degšanas kamerā. Probes ņemšanas punkts tika izveidots degšanas kameras vertikālas sieniņas augšdaļā, kas nodrošināja dūmgāzu analizatora *TESTO 350* probes izvietošanu tieši perpendikulāri dūmgāzu plūsmai.

Mērījumos tika reģistrēti tādi parametri kā: skābekļa procentuālais sastāvs dūmgāzēs O_2 ; oglekļa monoksīda koncentrācija dūmgāzēs CO; oglekļa dioksīda saturs dūmgāzēs CO_2 ;

slāpekļa oksīda koncentrācija dūmgāzēs NO; slāpekļa dioksīda koncentrācija dūmgāzēs NO₂; slāpekļa oksīdu koncentrācija dūmgāzēs NO_x; dūmgāžu temperatūra.

Eksperimentā, kad degļa apvalks tika izmantots par anodu, ir novērojams skābekļa satura pieaugums dūmgāzēs, sākot no 4,14 % līdz 4,35 %; savukārt otrajā eksperimentā, kad degļa apvalks tika izmantots par katodu, sprieguma diapazonā 0–1300 V skābekļa saturs paraboliski samazinās no 3,72 % līdz 3,6 %; tomēr, sākot no 1300 V, skābekļa saturs pieaug līdz tā sākotnējam stāvoklim (3.7. att.).

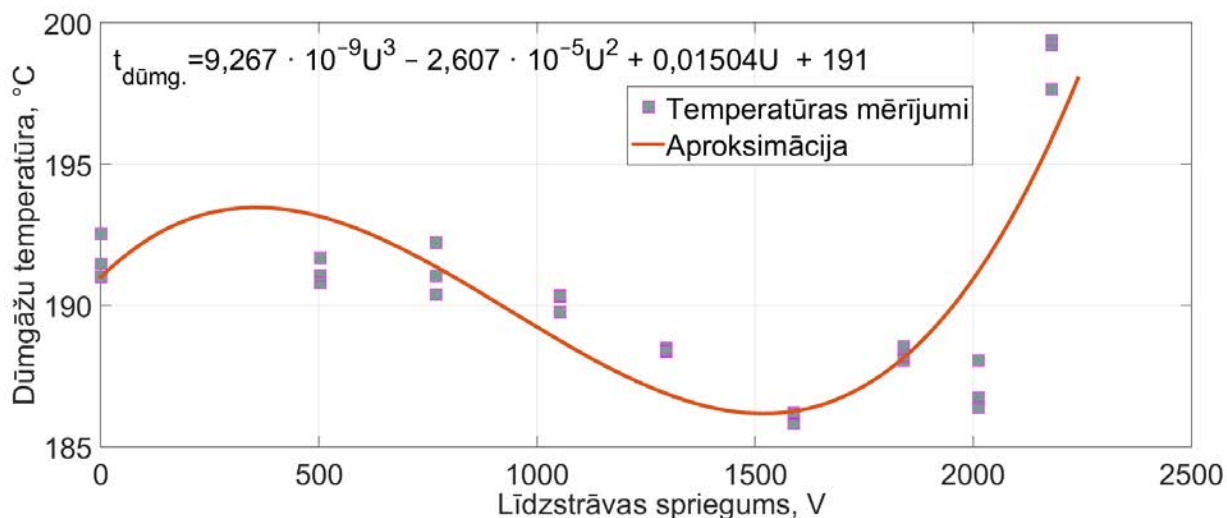


3.7. att. Skābekļa saturs dūmgāžu sastāvā elektrostatiskā lauka ietekmē ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu degļa centrējošajam stienim.

Dūmgāžu temperatūra ir tieši proporcionāla liesmas degšanas temperatūrai, līdz ar ko liesmas temperatūras izmaiņas noteikšanai tika veikta dūmgāžu temperatūras reģistrācija ar dūmgāžu analizatora zondē integrētu termopāri. Atbilstoši mērījumu rezultātiem pirmajā eksperimentā (degļa apvalks tika izmantots kā anods) dūmgāžu temperatūra vienmērīgi dila, kas korelē ar skābekļa satura izmaiņu dūmgāzēs. Pie maksimālās elektrostatiskā lauka intensitātes tika konstatēts dūmgāžu temperatūras samazinājums par 7,5 °C, kas veido 3,5 %, salīdzinot ar degšanas režīmu bez elektrostatiskā lauka lietošanas. Otrajā eksperimentā ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu degļa centrējošajam stienim (degļa apvalks tika izmantots kā katods – 3.8. att.) tika konstatēts, ka, sākot no 1300 V, dūmgāžu temperatūra sāk paraboliski palielināties, sasniedzot savu maksimumu (199 °C) pie maksimālās elektrostatiskā lauka intensitātes 1140 kV/m.

Atbilstoši pētījuma rezultātiem maksimālais slāpekļa oksīdu (NO_x) koncentrācijas īpatnējais pieaugums veidoja 10 % pie 525 kV/m elektrostatiskā lauka intensitātes, kad degļa apvalks tika izmantots kā anods. Savukārt šajos apstākļos maksimālais oglekļa monoksīdu (CO) koncentrācijas samazinājums sasniedza 35 mg/m³, kas ir ekvivalents īpatnējam samazinājumam 5,2 % apjomā. Tomēr, kad degļa apvalks tika izmantots kā katods, savukārt degļa centrējošais stienis kā anods, NO_x emisiju maksimālais pieaugums bija 5,3 %, tomēr CO emisiju koncentrācijas samazinājums sasniedza 7,1 %, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli. Degšanas procesa uzlabošana tika konstatēta eksperimentā ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu degļa centrējošajam stienim, kad pie līdzstrāvas elektrostatiskā lauka intensitātes 525 kV/m

oglekļa dioksīda (CO₂) saturs dūmgāzēs palielinājās par 0,07 %, kas ir ekvivalents īpatnējam pieaugumam 0,6 % apjomā.



3.8. att. Dūmgāžu temperatūra elektrostātiskā lauka ietekmē ar pozitīvu pieslēgtu potenciālu degļa centrējošajam stienim.

Liesmas termoakustiskais signāls elektrostātiskā lauka ietekmē tika analizēts, izmantojot elektreta mikrofonu skaņas diapazonam 0,02–16 kHz, kas tika izvietots vienā līmenī ar liesmas vidējo plakni. Pētījumā tika veikta signāla spektrogrammas novērtēšana laika un frekvences apgabalā, savukārt signāla īpatnējai izmaiņu novērtēšanai tika izmantota ātrā DFT frekvences apgabalā.

Pamatojoties uz akustiskā signāla apstrādātajiem rezultātiem pilnā frekvences diapazonā 0–25 kHz, ir secināms, ka liesmas akustiskā signāla amplitūdas izmaiņa nav novērojama, sākot ar 2 kHz. Fundamentālā reģistrēta harmonika atbilstoši akustiskā signāla DFT analīzei ir 150 Hz. Jāatzīmē, ka šī paša fundamentālā harmonika tika reģistrēta pie abām polaritātes slēguma variācijām.

No DFT analīzes ir konstatējams, ka līdzstrāvas pozitīvā potenciāla pievienošana pie degļa centrējošā stieņa un vienlaicīga negatīvā potenciāla pievienošana pie degļa apvalka (korpusa) rada ievērojamu iespaidu uz liesmas akustiskā signāla (trokšņa) pastiprinājumu, kas atbilstoši amplitūdu pieauguma salīdzinājumam pie maksimāla sprieguma (2280 V) sasniedz 115 reižu lielāku amplitūdu, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli.

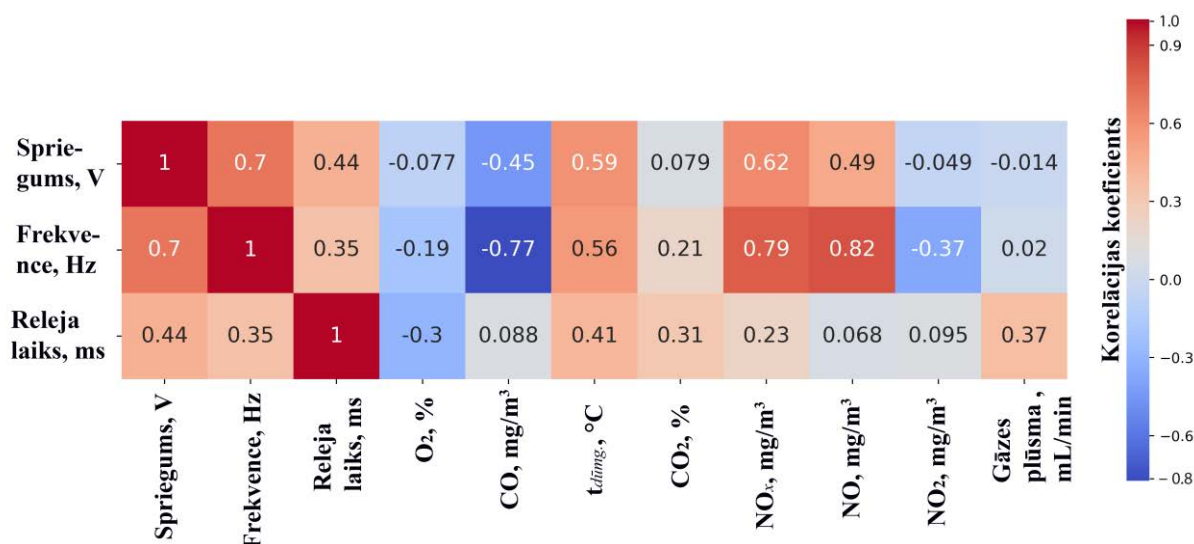
No iepriekš minētajiem rezultātiem ir secināms, ka elektrostātiskais lauks papildus ietekmei uz liesmas frontālas formas izmaiņu un kaitīgo emisiju formāciju iespaido arī liesmas akustisko efektu, kas ir izsakāms kā liesmas akustiskā signāla pastiprinājums atkarībā no elektrostātiskā lauka intensitātes palielināšanas, kas savukārt nerada papildu ietekmi uz skaņas frekvenču diapazonu un signāla harmoniku skaitu.

3.3. Pētījuma trešais posms

Pētījuma trešā posma mērķis ir noteikt daudzfaktoru mijiedarbības ietekmi uz liesmas degšanas produktu sastāvu. Daudzfaktoru ietekmes analīzes pamatā ir dūmgāžu sastāva

variācijas analīze atkarībā no trim faktoriem: pulsējošās strāvas sprieguma; pulsējošās strāvas frekvences; ozona ģenerēšanas ierīces ieslēgšanas intervāla.

Maksimālais pulsējošās strāvas spriegums tika ierobežots ar 900 V, pulsējošās strāvas frekvence – ar 10 000 Hz un ozona ģenerēšanas ierīces darbības intervāls – ar 2000 ms. Izvērtējot shēmas drošības un hermētiskuma aspektus, ozona ģenerēšanas ierīce tika integrēta gaisa plūsmas kanālā pirms samaisīšanās ar deggāzi.

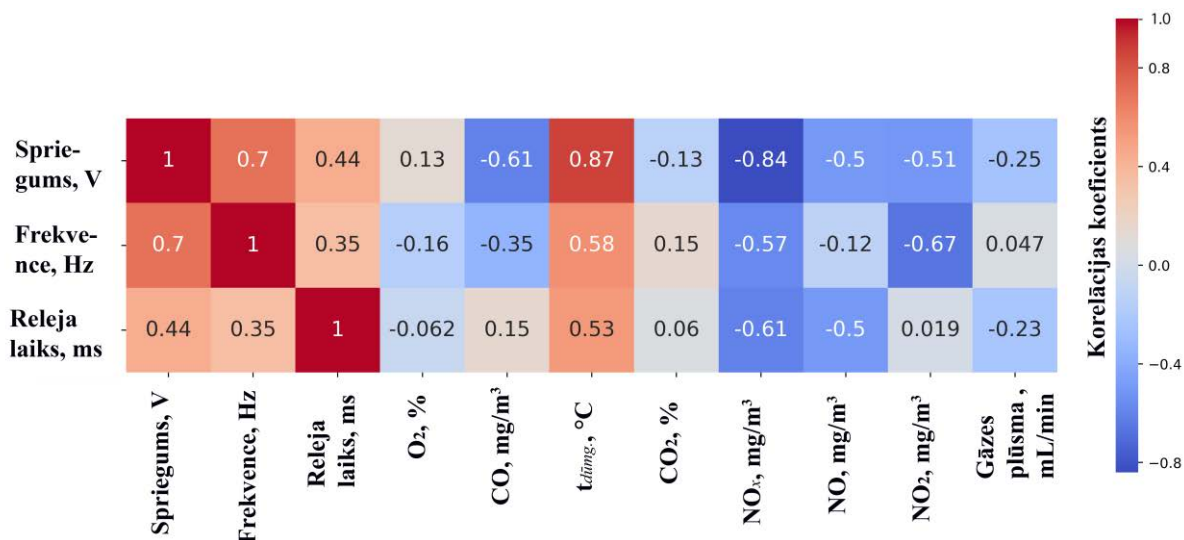


3.9. att. Daudzfaktoru korelācijas siltuma karte eksperimentam ar negatīvu pieslēgtu pulsējošās strāvas potenciālu degļa centrējošajam stienim.

Trīs faktoru savstarpējās ietekmes analīzei uz vairākām reģistrētām atbildēm tika veikta savstarpēja korelācijas koeficienta noteikšana katram mainīgajam un katrai atbildei. Aprēķinātie lineārās korelācijas koeficienti katram faktoram un atbildei tika apkopoti grafiskā veidā, izmantojot siltuma kartes metodi. Šīs savstarpējās mijiedarbības analīzes rezultāti ir sniegti 3.9. un 3.10. attēlā.

Atbilstoši 3.9. attēlā sniegtajiem rezultātiem iespējams secināt, ka nevienam no faktoriem tomēr netika konstatēta lineāra korelācija ar skābekļa saturu dūmgāzēs, tomēr tika konstatēta ievērojama pulsējošās strāvas frekvences ietekme uz oglekļa monoksīda (CO) koncentrācijas izmaiņu. Šie rezultāti liecina, ka secīga skābekļa aizstāšana ar ozona gāzi ar negatīvu pieslēgtu pulsējošās strāvas potenciālu degļa centrējošajam stienim nerada ietekmi uz apskatāmajiem mērījumiem. Jāatzīmē, ka šajā daudzfaktoru eksperimentā tika konstatēta pulsējošās strāvas iestatītās frekvences ietekme uz NO_x un NO emisijām.

Eksperimentā ar pieslēgtu pozitīvu pulsējošās strāvas potenciālu degļa centrējošajam stienim (3.10. att.) tika konstatēts, ka sprieguma diapazonā līdz 900 V ir laba korelācija starp visiem trim ietekmējošiem faktoriem uz dūmgāžu temperatūru, kā arī NO_x koncentrācijas izmaiņu. Korelācijas koeficientu siltuma karte liecina par pastāvošo likumsakarību starp spriegumu un NO₂ koncentrāciju dūmgāzēs, kā arī starp pulsējošās strāvas frekvenci un NO₂ koncentrāciju dūmgāzēs. Turklāt CO koncentrācijas izmaiņa dūmgāzēs visvairāk ir atkarīga no sprieguma palielināšanās.



3.10. att. Daudzfaktoru korelācijas siltuma karte eksperimentam ar pozitīvu pieslēgtu pulsējošās strāvas potenciālu degļa centrējošajam stienim.

Dūmgāzu temperatūras izmaiņas novērtējums atkarībā no trim faktoriem pierāda pulsējošās strāvas un daļējās ozona gāzes izmantošanas augsto potenciālu. Katra faktora nākamais augstākais līmenis palielina dūmgāzu temperatūru, turklāt apvienojumā ar CO analīzes datiem tas liecina par pilnvērtīgāku degšanu un labāku siltuma novadišanu no liesmas.

Pamatojoties uz šiem rezultātiem, ir secināms, ka pulsējošās strāvas avota elektrostatisks lauks, tā pulsācijas frekvence, kā arī deggāzes oksidētāja daļēja aizstāšana ar aktīvāku oksidētāju (ozonu) uzlabo propāna liesmas degšanu un siltuma izdalīšanos no liesmas, kas ir pierādāms ar dūmgāzu temperatūras palielinājumu. Veiktajā eksperimentā konstatēts, ka pulsējošās strāvas spriegumam, pulsāciju frekvencei un ozonam ir tieša ietekme uz ātro NO_x formācijas procesu nevis uz termiskiem NO_x.

4. INTENSĪVA ELEKTROSTATISKĀ LAUKA IZMANTOŠANAS TEHNISKI EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS

Pamatojoties uz šajā darbā veiktā pētījuma rezultātiem, ir secināms, ka intensīvs elektrostatiskais lauks pozitīvi ietekmē deggāzes degšanas procesu, kas ir izsakāms ar gāzes/gaisa maisījuma pilnvērtīgāku degšanu un dūmgāžu temperatūras pieaugumu, kas kopumā uzlabo degšanas sistēmas darbības efektivitāti un nodrošina primāro energoresursu ekonomiju. Pamatojoties uz elektrostatiskā lauka ietekmes mehānismiem, ir secināms, ka pētījumā sasniegtos dūmgāžu komponentu koncentrācijas izmaiņas un liesmas formas rādītājus, lietojot intensīvu elektrostatisko lauku, iespējams attiecināt uz lielāka mēroga iekārtām, kurās par pamatkurināmo tiek izmantots gāzveida kurināmais.

Ņemot vērā, ka Latvijā uzstādīto lieljaudas gāzveida sadedzināšanas iekārtu siltuma jauda pārsniedz 1200 MW_{th}, ir svarīgi, lai šo iekārtu uzturēšanas izmaksas būtu pēc iespējas mazākas. Šajās izmaksās ietilpst sildvirsmu nomaiņa atbilstoši iekārtu stāvoklim. Tomēr promocijas darbā izstrādātā metode un pētījuma rezultāti liecina, ka, lietojot intensīvu elektrostatisko lauku, var samazināt liesmas garumu, kas ļauj ierobežot augstas lokālas temperatūras kurtuvē un negatīvu ietekmi uz ekrāncaurulēm. Šīs tehnoloģijas integrācijas izmaksas vienam ūdens sildīšanas katlam ar jaudu ap 100 MW_{th} varētu sasniegt 50 000 eiro. Savukārt paredzamā ekonomija 15 gados veido līdz pat 100 000 eiro. Ņemot vērā kopējo uzstādīto lieljaudas sadedzināšanas iekārtu (116 MW_{th}) skaitu Rīgā, potenciālais uzturēšanas izmaksu samazinājums, lietojot darbā izstrādāto metodi, varētu sasniegt līdz pat 550 000 eiro 15 gadu periodā – izmaksu samazinājums uz uzstādīto jaudu veidotu līdz pat 30,5 EUR MW_{th} gadā. Savukārt šī metode sadedzināšanas iekārtām ar 25 % nominālās jaudas izmantošanas intensitāti un pie gaisa pārpilnības vērtības $\alpha = 1,14$ spēj nodrošināt primārā energoresursa ekonomiju 7100 m³ gadā un vienlaikus samazināt siltumnīcas efektu izraisošās gāzes (CO₂) emisijas atmosfērā par 16 tonnām gadā. Papildus ir secināms, ka piedāvātā degšanas procesa kontroles metode lieljaudas iekārtām spētu uzlabot gan lokālo dūmgāžu recirkulāciju kurtuvē, šādi nodrošinot iespēju turpmāk samazināt NO_x emisijas atmosfērā, gan iekārtu darbības parametrus atbilstoši nākotnes iespējamām stingrākām emisiju prasībām.

SECINĀJUMI

Pamatojoties uz promocijas darbā veikto pētījumu par intensīva elektrostatiskā lauka ietekmes novērtēšanu uz sašķidrīnātās propāna gāzes degšanu, lietojot līdzstrāvu, maiņstrāvu un pulsējošo strāvu, īpaši vērtējot liesmas formas (garuma un platuma) un gaistošo vielu (CO , CO_2 , NO_x) koncentrāciju izmaiņas tendenci un oksidētāja satura izmaiņu dūmgāzēs, tajā skaitā par intensīva elektrostatiskā lauka ietekmi uz liesmas termoakustisko efektu, izdarīti vairāki secinājumi.

1. Zemsprieguma elektrostatiskā lauka pētījumā, lietojot apkārt liesmai izvietotu ārējo elektrodu, sprieguma diapazonā 30–280 V tika konstatēts slāpekļa oksīdu NO_x emisiju koncentrācijas pieaugums par 3 % un oglekļa monoksīdu CO emisiju koncentrācijas samazinājums par 6 %.
2. Pētījuma rezultātā tika izstrādāts hibrīda deglis, kas spēj nodrošināt intensīvu elektrisko lauku ar ievērojami augstāku intensitāti par citos pētījumos lietoto iekārtu rādītājiem – virs 1000 kV/m.
3. Eksperimentāli tika pierādītas liesmas formas izmaiņas intensīvā līdzstrāvas elektrostatiskā lauka ietekmē, kas sākas pie intensitātes no 200 kV/m. Pie elektrostatiskā lauka intensitātes 1140 kV/m liesmas garuma samazinājums veido 24 %, liesmas saknes paplašinājums – 27 %.
4. Pētījuma rezultātā tika konstatēts, ka intensīvais līdzstrāvas elektrostatisks lauks palielina NO_x emisijas vidēji par 5,3 %, savukārt CO emisiju koncentrācijas samazinājums sasniedz 7,1 %, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli.
5. Eksperimentāli analītiskie rezultāti pierada, ka intensīvais līdzstrāvas elektrostatisks lauks ietekmē liesmas termoakustisko efektu, ievērojami palielinot harmoniku amplitūdu. Rezultāti liecina, ka elektrostatisks lauks neveicina liesmas akustisko rezonējošo efektu.
6. Darba rezultātā tika pierādīts, ka pulsējošās strāvas elektrostatisks lauks apvienojumā ar oksidētāja (brīvā skābekļa un trīs atomu skābekļa) secīgu variāciju ļauj sasniegt NO_x emisiju samazināšanos dūmgāzēs par 3,6 %, saglabājot nemainīgu CO emisiju koncentrāciju.
7. Pētījumā tika konstatēts, ka pulsējošās strāvas elektrostatiskā lauka lietošana gāzveida kurināmā degšanas procesos spēj nodrošināt dūmgāžu temperatūras pieaugumu par 8,1 %, kas liecina par siltumapmaiņas intensifikāciju.
8. Izstrādātā metode ļauj samazināt lieljaudas gāzes sadedzināšanas iekārtu uzturēšanas izmaksas (katliem ar uzstādīto jaudu no 50 MW_{th} līdz 116 MW_{th}) par 30,5 EUR/ MW_{th} gadā pie 25 % nominālās jaudas izmantošanas intensitātes, vienlaikus nodrošinot primāro energoresursu ekonomiju un siltumnīcas efekta izraisīto emisiju samazinājumu (CO_2 , NO_x) atmosfērā.