

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Edgars VĪGANTS

**DŪMGĀZU DZESĒŠANAS KONDENSĀCIJAS
IEKĀRTAS IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Energētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Edgars VĪGANTS

Doktora studiju programmas „Vides zinātne” doktorants

**DŪMGĀZU DZESĒŠANAS KONDENSĀCIJAS
IEKĀRTAS IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. hab. sc. ing., profesors
I. VEIDENBERGS

Dr. hab. sc. ing., profesore
D. BLUMBERGA

Rīga 2012

UDK 621.1.016.4(043.2)

Vī 323 d

Vīgants E. Dūmgāzu dzesēšanas kondensācijas iekārtas izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2012. – 28 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2012. gada 7. septembra lēmumu, protokols Nr. 27.

ISBN 978-9934-507-02-1

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai – 2” vienošanās Nr. 2011/0053/1DP/1.1.2.1.2/11/IPIA/VIAA/003 atbalstu.



**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA
ZINĀTNISKĀ GRĀDA VIDES ZINĀTNES NOZARES APAKŠNOZARĒ
„VIDES INŽENIERZINĀTNE” IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda Vides zinātnes nozares apakšnozarē „Vides inženierzinātne” iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012. gada 30. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 21. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Āris Žīgurs,
AS „Latvenergo” valdes priekšsēdētājs

Profesors, Dr. sc. ing. Lennart Bergstrom,
Stokholmas universitāte, Zviedrija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda Vides zinātnes nozares apakšnozarē „Vides inženierzinātne” iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Edgars Vīgants _____

Datums _____

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, četras nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 60 zīmējumus un ilustrācijas, 3 tabulas, kopā 105 lappuses. Literatūras sarakstā ir 92 nosaukumi.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Jebkuras valsts energosektora ilgtspējīgas attīstības pamatnosacījumi ietver energoresursu nepārtrauktu energoefektivitātes paaugstināšanas procesu un atjaunojamo energoresursu vispusīgu izmantošanu. Tie ir jautājumi, bez kuriem nav iespējama arī Latvijas zaļā izaugsme.

Atjaunojamo energoresursu energoefektīva izmantošana ir svarīga vairākos aspektos. Pirmkārt, tai ir liela nozīme fosilo kurināmo aizstāšanā, kas ļauj mazināt importētā kurināmā patēriņu valsts mērogā, tā nodrošinot valsts enerģētisko neatkarību un paaugstinot energoapgādes drošību. Otrkārt, tai ir pozitīva ietekme uz tautsaimniecību un ekonomikas attīstību kopumā, jo tiek nodrošinātas jaunas darba vietas enerģētiskās koksnes sagatavošanā un piegādē un vietējo resursu pilnvērtīgā apguvē. Vienlaikus atjaunojamo energoresursu izmantošana ir arī globālo reģionālo klimata pārmaiņu samazināšanas jautājums.

Viens no šodienas atjaunojamajiem energoresursiem, kura izmantošana ir tehnoloģiski un ekonomiski pamatots risinājums Baltijas valstu energoavotos, ir enerģētiskā koksne malkas, šķeldas un granulū veidā. Arvien lielāku lomu spēlē šķeldas katlu mājas pilsētu un pagastu centralizētas siltumapgādes sistēmās. Ilgi nav jāgaida brīdis, kad lielākajā daļā dabasgāzes katlu māju fosilo kurināmo aizstās koksnes šķelda. Tam ir vairāki priekšnosacījumi:

- koksnes šķelda ir 2 līdz 3 reizes lētāka par fosilo kurināmo;
- ir iespējama kurināmā piegādātāju diversifikācija, izvēloties dažādas kvalitātes šķeldu;
- ir pieejamas energoefektīvas šķeldas dedzināšanas tehnoloģijas;
- ir iespējama katlu mājas darbības automatizēta vadība;
- ir iespējams paaugstināt šķeldas katlu māju energoefektivitāti.

Lai izpildītu pēdējo nosacījumu, ir jāizstrādā tehnoloģijas, kas ļauj paaugstināt katlu mājas iekārtu lietderības koeficientu. Šāda iekārta varētu būt dūmgāzu sastāvā esošo tvaiku kondensācijas tehnoloģija, kas pieļauj iespēju dedzināt nekvalitatīvu šķeldu ar augstu mitruma saturu, jo tvaiku kondensācijas siltums tiek atgūts gāzu kondensatorā. Termins „gāzu kondensators” tiek lietots, lai uzsvērtu to, ka gāzu skalotnī vissvarīgākie ir fāzu pārejas procesi.

Gāzes kondensatora izstrāde ir Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta kontaktparātu (kondensācijas iekārtu) skolas izpētes un izstrādes rezultāts. Skola veidojās pagājušā gadsimta astoņdesmitajos gados Siltumenerģētikas katedrā, kad notika jauna kontakta tipa aparātu virknes izstrāde. Pirmā zinātņu doktora disertācija tika aizstāvēta 1988.gadā, un iztvaikošanas un kondensācijas procesu izpēte ir turpinājusies arī pēdējo gadu laikā.

DARBA MĒRĶIS

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt dūmgāzu kondensatora rūpniecisko modeli, veikt siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšanu aparātā un veikt tā izpēti biomasas efektīvākai izmantošanai.

Darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi zinātniskās izpētes uzdevumi:

1. matemātiski aprakstīt siltuma un masas apmaiņas procesus gāzes kondensatora iztvaikošanas un kondensācijas daļā;
2. izstrādāt gāzes kondensatora matemātisko modeli un uz tā bāzes izveidot datorprogrammu darbības modelēšanai;
3. veikt rūpniecisko eksperimentu, lai iegūtu gāzes kondensatora darbības parametru mijiedarbības empīrisku modeli;
4. veikt modelēšanas un rūpnieciskā eksperimenta laikā iegūto datu apstrādes rezultātu analīzi un izstrādāt priekšlikumus gāzes kondensatoru darbības efektivitātes paaugstināšanai.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbā izstrādāta tieša kontakta gāzes kondensatora rūpnieciskā eksperimenta plānošanas un datu apstrādes metode un izveidots šīs iekārtas siltuma un masas apmaiņas procesu modelis.

Promocijas darba izstrāde aizsākās ar gāzes kondensatora konstruktīvo aprēķinu un iekārtas skicēm, projektu, izgatavošanu un uzstādīšanu. Eksperimentālās iekārtas izveides metodika ietver konstruktīvo aprēķinu modeļa algoritmu.

Promocijas darbā prezentēta eksperimentālas izpētes metodika, kas aptver iegūto eksperimentālo datu regresijas analīzi un ar datorprogrammas STATGRAPHICS Plus palīdzību iegūto empīrisku modeli gāzes kondensatora darbības parametru noteikšanai.

Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana gāzes kondensatorā veikta iztvaikošanas daļai un kondensācijas daļai atsevišķi, ņemot vērā procesu pakāpeniskumu. Modelis sastāv no vienādojumu sistēmas: aprēķini balstās uz siltuma un masas apmaiņas procesu matemātisko aprakstu un šīs vienādojumu sistēmas risinājumu. Galarezultātā ir izveidots datormodelis, ar kura palīdzību ir iespējams noteikt siltuma un masas apmaiņas procesa parametrus tukšam tieša kontakta gāzes kondensatoram.

Izveidota metode rūpnieciska eksperimenta rezultātā iegūto empīriskā modeļa un izveidotā datormodeļa rezultātu salīdzināšanai.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

Promocijas darbā piedāvāti rūpnieciskās gāzes kondensatora iekārtas eksperimentālās izpētes rezultāti, un darba gaitā iegūtais empīriskais vienādojums parāda iekārtas darbības parametru savstarpējās saites. Iegūts empīriskais modelis, ar kura palīdzību ir iespējams modelēt gāzes kondensatora jaudas noteikšanu mainīgām slodzēm.

Promocijas darbā izstrādāts un aprobēts siltuma un masas apmaiņas procesu datormodelis, ar kura palīdzību iespējams veikt dažādu gāzes kondensatorā notiekošo procesu modelēšanu un izvērtēt iekārtas darbības parametru ietekmi uz šiem procesiem. Aprēķinu modelis ir izveidots *Microsoft Office Excel* vidē.

Promocijas darbā izstrādāta metodika empīriskā modeļa iegūto rezultātu integrēšanai matemātiskajā modelī, kā arī izstrādāta metodika iegūto eksperimentālo un aprēķināto rezultātu salīdzināšanai.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Izstrādāta un patentēta gāzes kondensatora iekārta, kuras sērijveida ražošana ir uzsākta uzņēmumā „Komforts”.

Izstrādātā iekārta ir svarīgs solis energoefektīvai atjaunojamo energoresursu izmantošanai Latvijas un Eiropas energosektorā. Darba rezultātam ir praktiska nozīme gan valstiskā, gan reģionālā un pašvaldību līmenī. Jebkurā katlu mājā, kurā dedzina šķeldu, energoefektivitātes uzlabošanas nolūkā var uzstādīt gāzes kondensatoru un iegūt energoresursu patēriņa samazinājumu līdz 20%.

Promocijas darba rezultāti ir svarīgi arī zinātniskās izpētes turpināšanai un rezultātu ieviešanai. Metodiku un datormodeli var izmantot gāzes kondensatoru darbības regulētāji un šo iekārtu lietotāji, projektētāji un zinātnieki, kā arī inženierzinātņu studiju programmās studējošie.

APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem ir ziņots un tie ir apspriesti 21 vietējās un starptautiskās konferencēs. Promocijas darba rezultāti aprakstīti un analizēti 10 publikācijās, no kurām 4 ir starptautiski citējamas. Darba izstrādes gaitā gāzes kondensatora iekārta ir patentēta, un ir iegūts patents.

Par darba rezultātiem tika ziņots un tie ir apspriesti:

1. Starptautiskā konferencē „World Scientific and Engineering Academy and Society 1st International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment” (EEETE 12), Tomas Bata University in Zlin, Čehijā, 2012.gada 20.-22. septembrī.
2. Starptautiskā simpozijā “13th International Symposium on District Heating and Cooling”, Kopenhāgenā, Dānijā, 2012.gada 3.-4. septembrī.
3. RTU seminārā “Šķeldas katla gāzes kondensators. No idejas līdz Ludzas katlu mājai”, Rīgā, 1012.gada 7. februārī.
4. Brīvības un solidaritātes fonda, Ziemeļvalstu Ministru padomes un NORDEN forumā “Latvijas zaļās tautsaimniecības potenciāls – Ziemeļeiropas prakses izmantošanas iespējas un šķēršļi”, Rīgā, 2012.gada 14. septembrī.

5. Mācību seminārā „Tehniskās iespējas CO2 emisiju samazināšanā pašvaldībās”, Salaspilī, 2012.gada 20. janvārī.
6. Starptautiskā konferencē „Energy Politics and Climate Protection. Where We Stand 20 Years After Rio?”, Rīgā, 2012.gada 23. februārī.
7. Seminārā “Pašvaldību loma ilgtspējīgas energoapgādes plānošanā”, Rīgā, 2012.gada 9. martā.
8. Ekspertu tikšanās „Latvijas biogāzes tirgus nākotnes attīstības virzieni”, Rīgā, 2012.gada 29. jūnijā.
9. Seminārā „Green Energy Roads in Latvia: from Technical Solutions to Policy”, Rīgā, 2011.gada 14. decembrī.
10. 52. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē „Enerģijas resursi 2011.”, Rīgā, 2011.gada 12.-13. oktobrī.
11. Apvienotajā Pasaules Latviešu zinātnieku 3. Kongresā, sekcijā „Enerģētika un elektrotehnika”, Rīgā, 2011.gada 25. oktobrī.
12. Konferencē „Daudznozaru regulēšana – šodien un nākotnes izaicinājumi”, Rīgā, 2011.gada 10 jūnijā
13. Apmācību kursā „AER koģenerācijas tehnoloģiskie risinājumi”, Rīgā, 2011.gada 13. maijā.
14. Seminārā „Bioenerģijas tehnoloģijas”, Rīgā, 2011.gada 20. aprīlī.
15. EEA Grants programmas „Vides politikas integrācijas programmas Latvijā” noslēguma konferencē, Rīgā, 2011.gada 14. aprīlī.
16. Fizikālās Enerģētikas institūta, Latvijas Zinātņu akadēmijas un RES-H Policy projekta seminārā „Atjaunojamo energoresursu izmantošanas siltumapgādē Latvijā politikas ietvara pilnveidošana”, Rīgā, 2011.gada 30. martā.
17. Seminārā „Saule un biokurināmais no A līdz Z”, Rīgā, 2010.gada 7. decembrī.
18. LATO publiskajā diskusijā „Enerģētikas risinājumi Latvijā: Baltijas jūras reģiona perspektīvas”, 2010.gada 21. decembrī.
19. Ar referātu „Valsts atjaunojamo energoresursu rīcības plāns un vides projektu iespējas Latgales reģionā”, seminārā Līvānos, 2010.gada 8. jūlijā.
20. Konferencē „Multi-Sectoral Regulation – Present and Future Challenges”, 2010.gada 10. jūnijā.
21. Seminārs „Atjaunojamie energoresursi ēku siltumapgādei”, 2010.gada 24. februārī.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS

1. Vīgants E., Blumberga D., Veidenbergs I. Climate Technology in a Wood Chips Boiler House // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. - 6. sēj. (2011), 127.-131. lpp.
2. Blumberga D., Vīgants E., Veidenbergs I. Analysis of Flue Gas Condenser Operation // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 4 (48). (2011) 58.-65. lpp.
3. Vīgants Ģ., Ivanova P., Vīgants E., Veidenbergs I. Analysis of Diversification of Fuel in DH Sources. Potential of Reduction of GHG // 13th international symposium on district heating and cooling, Dānija, Copenhagen, 3.-4. septembris, 2012. - 1.-7. lpp.
4. Vīgants E., Blumberga D., Veidenbergs I., Vīgants Ģ., Rochas C. Experimental Research of Flue Gas Condensing Unit // Advances in Environment, Biotechnology and Biomedicine, Čehija, Tomas Bata University in Zlin, 20.-22. septembris, 2012. - 179.-189. lpp.
5. Blumberga D., Vīgants E., Veidenbergs I., Vīgants Ģ., Vītoliņš V. Eco-intensity Analysis for a Chip-fuelled Boiler House // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. - x. (2012) 1.-8. lpp. (in press)
6. Blumberga D., Romagnoli F., Rošā M., Veidenbergs I., Vīgants E. Uncertainty Analysis of Primary Resource Savings at Cogeneration // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 5. (2008) 33.-40. lpp.
7. Blumberga A., Circene B., Haemekoski K., Jurkans J., Karklins A., Klapare S., Kulovesi K., Letachowitz B., Matsuki T., Peszko G., Ruza S., Vīgants E. Latvia's Participation in International Emmissions Trading // The World Bank, ECSSD Sustainable Development Paper Nr.47. - Vašingtona, AMERIKAS SAVIENOTĀS VALSTIS: The World Bank, 2007. - 1.-160. lpp.
8. Vīgants E., Veidenbergs I., Blumberga D., Romagnoli F. The Potential Cogeneration Thermal Capacity Choice for Heat Source Group // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. - 3. sēj. (2009), 119.-128. lpp.
9. Veidenbergs I., Blumberga D., Vīgants E., Kozuhars G. Heat and Mass Transfer Processes in Scrubber of Flue Gas Heat Recovery Device // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. - 4. sēj. (2010), 109.-115. lpp.
10. Blumberga D., Kuplais Ģ., Romagnoli F., Vīgants E. CHP or Power Station: Question for Latvia // District Heating and Cooling: Conference Proceedings, Igaunija, Tallin, 5.-7. septembris, 2010. - 30.-36. lpp.

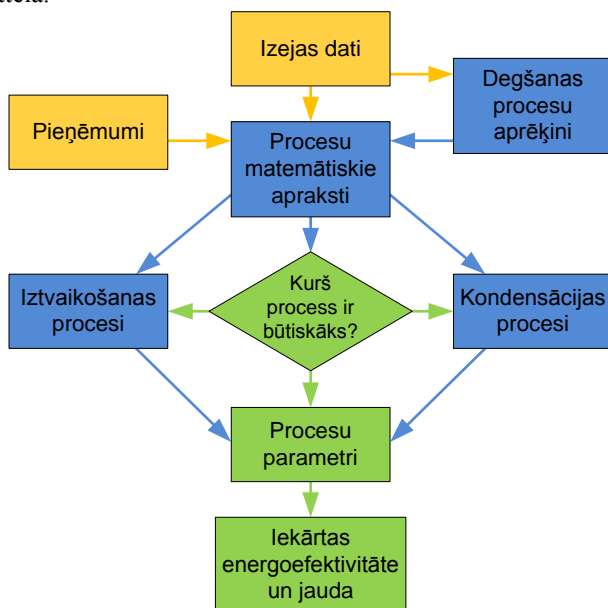
DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām un secinājumiem. Tajā ir 105 lappuses, t.sk. 60 attēli, 3 tabulas un literatūras saraksts ar 92 literatūras avotiem. Literatūras saraksts šajā kopsavilkumā nav iekļauts.

1. KONDENSATORA APRĒĶINA MODELIS UN MODELĒŠANAS REZULTĀTU ANALĪZE

1.1. Kondensatora aprēķina modelis

Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana tieša kontakta gāzes kondensatorā notiek, balstoties uz pakāpeniskuma principu: ejot soli pa solim no izejas datiem uz procesu matemātisko aprakstu, procesu būtiskuma noteikšanu un pieņēmumu atlasī līdz procesu parametru izmaiņu noteikšanai, energoefektivitātes un jaudas aprēķiniem. Siltuma un masas apmaiņas procesu aprēķina modeļa algoritms ilustrēts 1.1. attēlā.



1.1. att. Siltuma un masas apmaiņas procesu aprēķina modeļa algoritms

Izejas datu bloks ietver datus par šķeldas katla darbību, šķeldas sastāvu, mitruma un pelnu saturu, ūdens temperatūrām katla ievadā un izvadā, degšanas procesu parametrus un citus datus.

Pieņēmumu datu bloks ietver lielumus, bez kuriem nav iespējami tālāki aprēķini, bet to lielumi nav zināmi, piemēram, gaisa patēriņa koeficients katlā.

Degšanas procesu aprēķinu bloks ietver degšanas procesa aprēķinus, ar kuru palīdzību nosaka dūmgāzu sastāvu un dūmgāzu un gaisa entalpijas gāzes kondensatora ievadā stehiometriskas degšanas gadījumā un reālos degšanas procesos.

Matemātisko vienādojumu procesu bloks ietver vienādojumu sistēmas, kas matemātiski apraksta siltuma un masas apmaiņas procesus tieša kontakta gāzes kondensatorā.

Iztvaikošanas procesu bloks ietver iztvaikošanas procesu matemātiskā apraksta vienādojumu sistēmas risinājumu virknē saslēgtos elementos, kuru augstums tiek definēts pieņēmumu blokā.

Kondensācijas procesu bloks ietver kondensācijas procesu matemātiskā apraksta vienādojumu sistēmas risinājumu virknē saslēgtos elementos, kuru augstums tiek definēts pieņēmumu blokā.

Procesu parametru noteikšanas bloks ietver siltuma un masas apmaiņas procesu parametru vērtību noteikšanu visā gāzu – tvaika maisījuma ceļā no ievada gāzes kondensatorā līdz izvadam no tās un grafisku parametru izmaiņu ilustrāciju.

Energoefektivitātes un jaudas noteikšanas bloks ietver katlu iekārtas un gāzes kondensatora energoefektivitātes noteikšanu un īpatnējās jaudas izvērtēšanu tieša kontakta gāzes kondensatoram atkarībā no modelī iepriekš noteiktajiem siltuma un masas apmaiņas parametriem.

Kondensatora aprēķinu modelis sastāv no trim daļām. Pirmajā daļā veic kurināmā degšanas procesu aprēķinu [2.1., 2.2.] mainīgam kurināmā sastāvam un katlu slodzēm. Tā rezultātā iegūst izejas datus gāzes kondensatora procesu aprēķiniem. Otrajā daļā modelē procesus gāzu skalotnī iztvaikotājā, kurā veic no katla izvadīto dūmgāzu apstrādi, tās attīrot, dzesējot un mitrinot. Tālāk trešajā daļā veic gāzu skalotņa kondensatora procesu modelēšanu un nosaka dūmgāzu siltuma kondensatora jaudu un izejas parametrus pēc dūmgāzu kondensatora. Otrās un trešās aprēķinu daļas procesi ir sadalīti vairākos posmos atbilstoši pieņemtajam dūmgāzu temperatūru izmaiņu solim. Aprēķinu modelis ir izveidots *Microsoft Office Excel* vidē. Aprēķins tiek veikts reālajā laikā, t.i., rezultātu izvide notiek uzreiz pēc izejas datu ievades. Modelī ir iespējams mainīt gan izejas datus, gan arī nepieciešamības gadījumā veikt aprēķinu formulu korekciju.

1.2. Modelēšanas rezultāti

Darbā izveidots dūmgāzu kondensatora siltuma un masas apmaiņas procesus aprakstošs aprēķinu modelis *Microsoft Office Excel* vidē. Modelēšana veikta kondensatoram, kurš uzstādīts pēc 6 MW šķeldas katla, ja dūmgāzu temperatūra kondensatora vertikālā skalotņa ievadā ir 90 °C, iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} ir 55 °C un apsmidzināšanas blīvumi ir 12 kg/m²·s un 16 kg/m²·s.

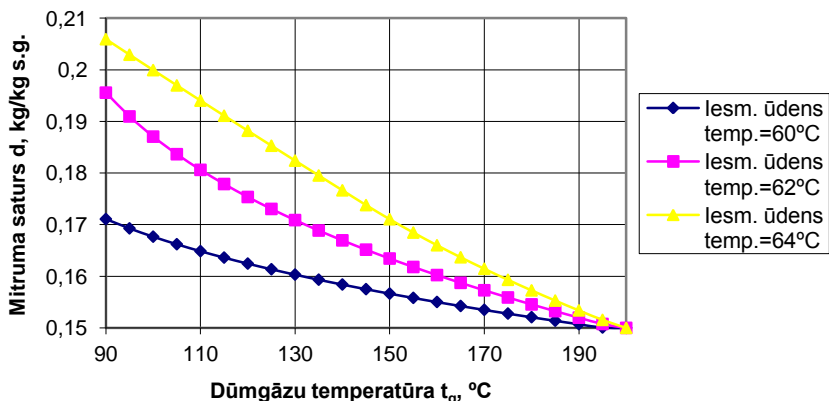
Izveidotais aprēķinu modelis sastāv no 3 daļām:

- kurināmā degšanas procesu aprēķina mainīgam kurināmā sastāvam un katlu slodzēm;
- iztvaikošanas procesu aprēķina gāzu skalotnī bez pildījuma;
- kondensācijas procesu aprēķina gāzu skalotnī ar pildījumu.

Kopumā izveidotais aprēķinu modelis nodrošina iespēju modelēt siltuma un masas apmaiņas procesus dūmgāzu kondensatorā, nosakot tā siltuma jaudu dažādas kvalitātes kurināmā, katla jaudu, kā arī siltumnesēju parametru izmaiņu gadījumā.

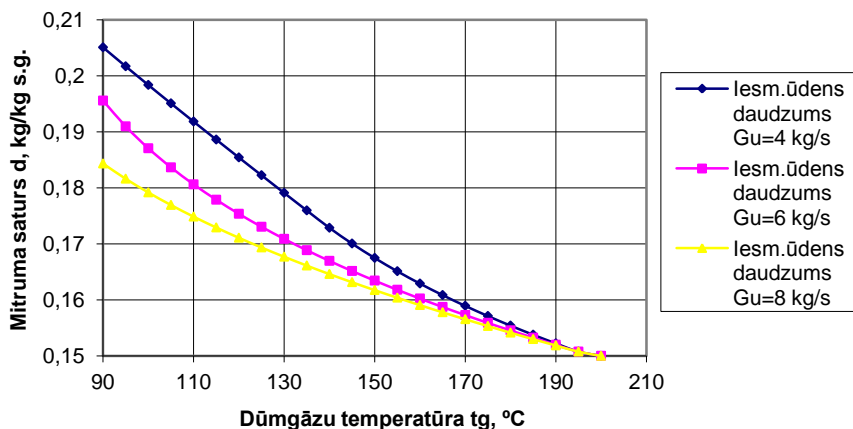
Dūmgāzu kondensatora pirmās daļas (gāzu skalotnis iztvaikotājs) procesu modelēšanas rezultātu analīzē noskaidrots, ka maksimāli iespējamās otrajā daļā ievadāmo dūmgāzu mitruma satura vērtības sasniedzamas, ja:

- palielinās iesmidzināmā ūdens temperatūra (skat. 1.2. attēlu); palielinot iesmidzināmā ūdens temperatūru no $t_{iesm}=60\text{ °C}$ līdz $t_{iesm}=64\text{ °C}$, mitruma saturs pieaug par 21% un no $d=0,17\text{ kg/kg s.g.}$ līdz $d=0,205\text{ kg/kg s.g.}$;



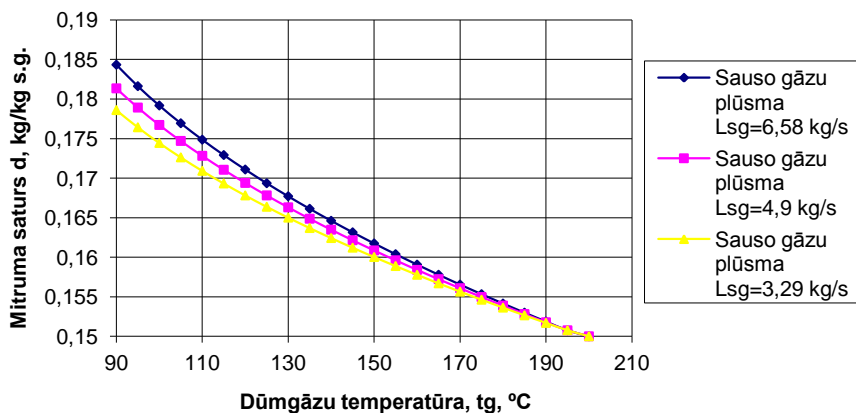
1.2. att. Mitruma satura izmaiņas atkarībā no dūmgāzu temperatūras dažādu iesmidzināmā ūdens temperatūru gadījumā

- samazinās iesmidzināmā ūdens daudzums (skat. 1.3. attēlu); samazinot iesmidzināmā ūdens daudzumu no $G_{\bar{u}}=8\text{ kg/s}$ līdz $G_{\bar{u}}=4\text{ kg/s}$, mitruma saturs pieaug par 11% un mainās no $d=0,185\text{ kg/kg s.g.}$ līdz $d=0,205\text{ kg/kg s.g.}$;



1.3. att. Gāzu mitruma satura izmaiņas atkarībā no dūmgāzu temperatūras atšķirīga iesmidzinātā ūdens daudzuma gadījumā

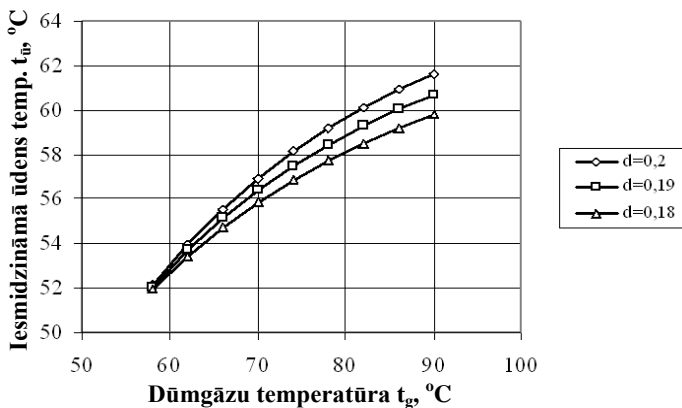
- pieaug sauso gāzu plūsma (skat. 1.4. attēlu); Palielinot sauso dūmgāzu plūsmu no $L_{sg}=3,29$ kg/s (50% katla slodze) līdz $L_{sg}=6,58$ kg/s (100% katla slodze), mitruma saturs palielinās par 3%.



1.4. att. Mitruma satura izmaiņas atkarībā no gāzu temperatūras dažādu sauso gāzu plūsmu gadījumā

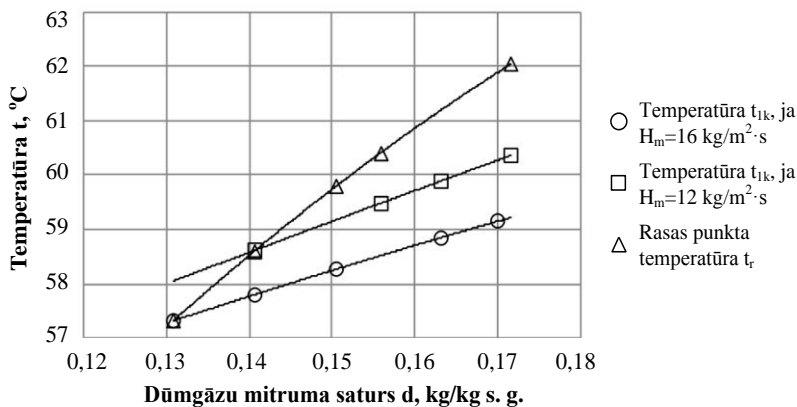
Kondensācijas iekārtas otrās daļas (gāzu skalotnis kondensators) procesu modelēšanas rezultātu analīze rāda, ka:

- pilnīgāku dūmgāzu dzesēšanu un lielāku iekārtas siltuma jaudu panāk, iesmidzinot ūdeni ar iespējami zemāku temperatūru. Analīze rāda, ka, pazeminot iesmidzinātā ūdens temperatūru no $t_{iesm}=56$ °C līdz $t_{iesm}=52$ °C, siltuma jauda pieaug no $Q=1100$ kW līdz $Q=1580$ kW vai par 44%;



1.5. att. Iesmidzināmā ūdens temperatūras izmaiņas atkarībā no gāzu temperatūras dažāda sākuma mitruma satura gadījumā

- palielinot ievadāmo gāzu mitruma saturu, palielinās kondensēto tvaiku daudzums un palielinās kondensatora siltuma jauda. Analizējot kondensatora siltuma jaudas izmaiņas atkarībā no gāzu mitruma satura ievadā, konstatēts, ka pie mitruma satura ievadā $d=0,18$ kg/kg s.g. kondensatora siltuma jauda $Q=1350$ kW, bet gadījumā, kad mitruma saturs ievadā ir $d=0,2$ kg/kg s.g., kondensācija iekārtas siltuma jauda $Q=1620$ kW, kas ir par 20% vairāk;
- iesmidzinātā ūdens beigu temperatūra nedrīkst pārsniegt rasas punkta temperatūru dūmgāzu ievadā (skat. 1.6. attēlu). Pretējā gadījumā veidojas procesa aprites siltums, kas palielina iekārtas izmērus.

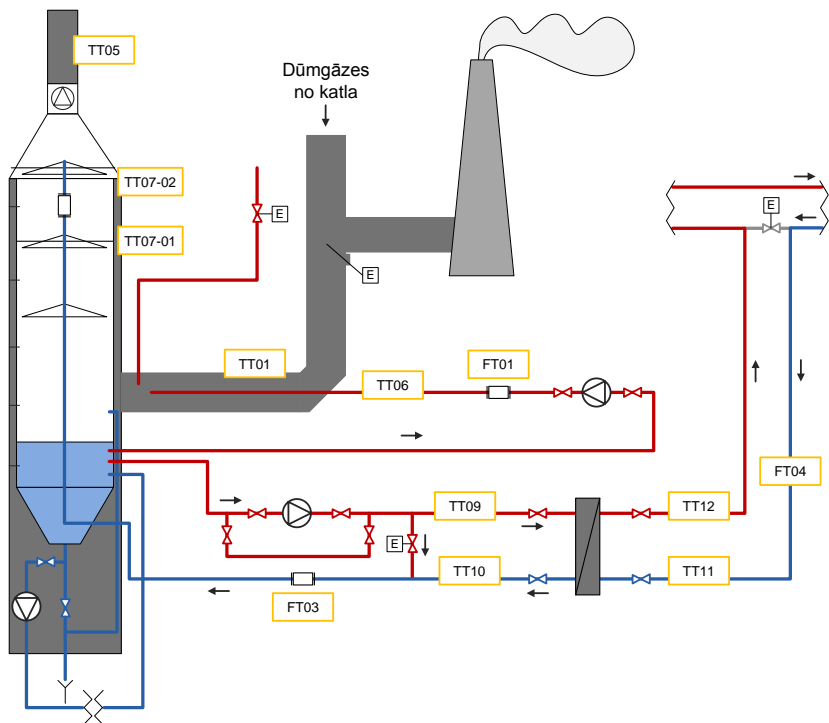


1.6. att. Ūdens temperatūras pēc kondensatora izmaiņas atkarībā no dūmgāzu mitruma satura vertikālā gāzu skalotņā ievadā

Izstrādātā kondensācijas iekārtas aprēķina metodika dod iespēju kvantitatīvi izvērtēt aparātos notiekošos procesus, to īpatnības un meklēt šādu iekārtu darbības tehniski ekonomisko parametru uzlabošanas iespējas. Veicot dūmgāzu siltuma utilizācijas iekārtas un darbināšanas režīmu optimizāciju, tiek panākts kurināmā resursu patēriņa samazinājums, kas ļauj samazināt ražošanas izmaksas un palielināt uzņēmumu konkurētspēju. Turklāt tiek panākta arī efektīvāka dūmgāzu attīrīšana no putekļiem, sēra, slāpekļa oksīdiem un citiem kaitīgiem savienojumiem, kā rezultātā samazinās izmešu daudzums apkārtējā vidē.

2. DŪMGĀZU KONDENSATORA EKSPERIMENTĀLA IZPĒTE UN DARBA REZULTĀTU ANALĪZE

Kondensatora iekārta ir iebūvēta dūmenī un uzstādīta katlu mājas ārpusē. Daļa mēraparātu ir iebūvēta kondensatorā, citi izvietoti iekārtās katlu mājā. Mēraparātu rādītāji ir izvadīti uz vadības paneļa, kur tiek nolasīti mērījumi. Mēraparātu izvietojums iekārtas shēmā parādīts 2.1. attēlā.



2.1. att. Eksperimenta principiālā shēma

Empīrisko datu apstrāde veikta, izmantojot datu statistiskās apstrādes metodes: korelācijas un regresijas analīzi. Ar korelācijas analīzi noteikta divu lielumu

savstarpējā saite un tās ciešums. Regresijas analīze izmantota daudzfaktoru regresijas modeļa un tā koeficientu statistiskās nozīmības noteikšanā.

Darbā datu statistiskā apstrāde un daudzfaktoru empīriskā modeļa izveide veikta ar datorprogrammas *STATGRAPHICS Plus* palīdzību.

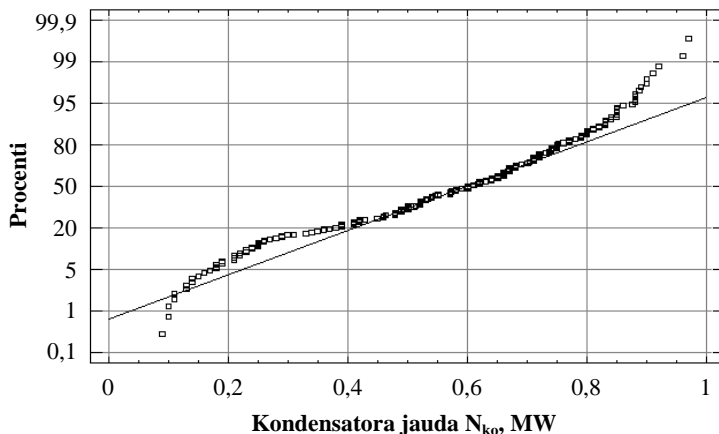
Regresijas analīzes mērķis ir iegūt daudzfaktoru empīrisku vienādojumu, kas kvantitatīvi aprakstītu kondensatora jaudu atkarībā no katlu iekārtas darbībai raksturīgajiem un statistiski nozīmīgajiem rādītājiem un kalpotu par pamatu iekārtas darbināšanas režīmu rezultātu prognozei un izvērtējumam.

Regresijas analīze nosaka gadījuma lielumu izmaiņu precīzus kvantitatīvus parametrus, t.i., ar funkcionālām sakarībām izsaka stohastiskās saites nozīmību.

Darbā regresijas analīze veikta šādā secībā:

- pārbaudīts atkarīgā mainīgā lieluma kondensatora jaudas N_{ko} sadalījuma likums;
- noteikts regresijas vienādojums, izmantojot mazāko kvadrātu metodi;
- veikta iegūto rezultātu statistiskā analīze.

Regresijas analīze sākas ar atkarīgo mainīgo lielumu sadalījuma noteikšanu un analīzi var turpināt, ja sadalījums atbilst normālam sadalījuma likumam. Sadalījuma likuma pārbaudes rezultāti redzami 2.2. attēlā.



2.2. att. Kondensatora jaudas vērtību sadalījums

Izpētes rezultātā ir iegūts regresijas vienādojums, kas nosaka kondensatora jaudu atkarībā no dūmgāzu mitruma satura d , apsmidzināšanas blīvuma H_m , katla jaudas N_k , dūmgāzu temperatūras pirms kondensatora t_{1g} , ūdens temperatūras pēc kondensatora t_{1k} , tīkla ūdens atgaitas temperatūras t_{1t} un kondensatorā iesmidzināmā ūdens temperatūras t_{2k} .

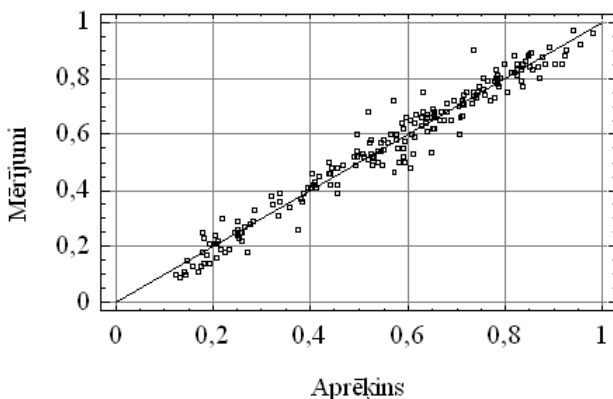
$$N_{ko} = -0,763 + 1,126 \cdot d + 0,0423 \cdot H_m + 0,02 \cdot N_k + 0,00051 \cdot t_{1g} + 0,0183 \cdot t_{1k} - 0,0213 \cdot t_{1t} + 0,0092 \cdot t_{2k} \quad (2.1.)$$

Izveidotā empīriskā modeļa datu statistiskās apstrādes rezultātā noteiktā R^2 vērtība ir 0,96. Tas nozīmē, ka izveidotais modelis (2.1.) skaidro 96 % no analizējamo datu izmaiņām. Pārējie 4% attiecināmi uz vienādojumā neiekļauto vai darbā nedefinēto neatkarīgo mainīgo vai to savstarpējās iedarbības efektu rēķina.

Vienādojums (2.1.) ir adekvāts un lietojams analizējamo datu aprakstam to izmaiņu robežās:

- katla jauda N_k no 1 līdz 6,5 MW;
- dūmgāzu temperatūra pirms kondensatora t_{1g} no 140 līdz 230 °C;
- iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} no 50 līdz 60 °C;
- ūdens temperatūra pēc kondensatora t_{1k} no 50 līdz 65 °C;
- tīkla ūdens atgaitas temperatūra t_{1t} no 45 līdz 56 °C;
- kondensatora apsmidzināšanas blīvums H_m no 11 līdz 16 kg/m².s;
- dūmgāzu mitruma saturs d no 0,042 līdz 0,16 kg/kg s.g.

Empīriskā vienādojuma adekvātuma pārbaudei ir salīdzināti empīriskie un aprēķinātie dati. Datu salīdzinājums grafiski parādīts 2.3. attēlā.



2.3. att. Jaudas empīrisko un aprēķinu datu salīdzinājums

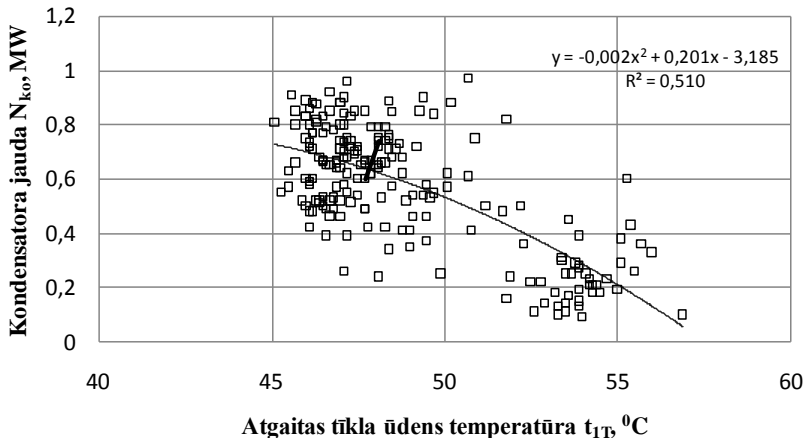
Kā redzams 2.3. attēlā, vērojama laba korelācija starp abām datu kopām. Ja mērījumu rezultātam precīzi atbilstu aprēķinātā vērtība, punkti atrastos uz attēlā redzamās taisnes. Vērojama palielināta punktu izkļiede pie kondensatora jaudas vidējām vērtībām.

Kondensatora rūpnieciskā eksperimenta datu statistiskajā apstrādē, izmantojot regresijas analīzes metodes, ir noteikti būtiskākie iekārtas darbību raksturojošie faktori jeb neatkarīgie parametri. Sakarību starp kondensatora jaudu un to ietekmējošiem parametriem nosaka datu apstrādes gaitā iegūtais regresijas vienādojums. Regresijas

analīzes gaitā katrā tās posmā izdarītas pārbaudes par veiktā soļa pareizību un iespēju pāriet pie analīzes nākamā posma. Veiktā analīze rāda, ka:

- datu regresijas analīzes lietojums ir korekts, jo atkarīgie mainīgie lielumi pakļaujas normālam sadalījuma likumam;
- mazāko kvadrātu metodes lietojums lielumu noteikšanā ir pamatots, un šo lielumu vērtības nav izkropļotas, jo noteiktās DW kritērija vērtības ir lielākas par pieļaujamajām robežvērtībām;
- regresijas vienādojuma koeficientu novērtējums ir korekts, jo starp tiem nav vērojama korelācija;
- datu novērtējuma standarta kļūda ir novērtēta korekti, jo atlikumu sadalījums atbilstoši konkrētajam atkarīgajam un neatkarīgajiem mainīgajiem ir vienmērīgs.

Dūmgāzu dziļai dzesēšanai un siltuma atguvei ir sava specifika. Nevar aprobežoties tikai ar katla un paša kondensatora, kurā noris dziļa dūmgāzu dzesēšana, darbības analīzi. Atgūtā siltumenerģija ir ar zemu potenciālu (temperatūru), un tai jāatrod patērētājs. Šāds patērētājs var būt siltumapgādes sistēmas, kurās atgūto siltumu izmanto tīkla ūdens primārai uzsildīšanai. Siltumapgādes sistēmas ietekme utilizētā siltuma izmantošanā ir saistīta ar temperatūras līmeni siltumtīklos. Būtiska ietekme ir atgaitas temperatūrai. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no tīkla atgaitas temperatūras vērojamas 2.4. attēlā.

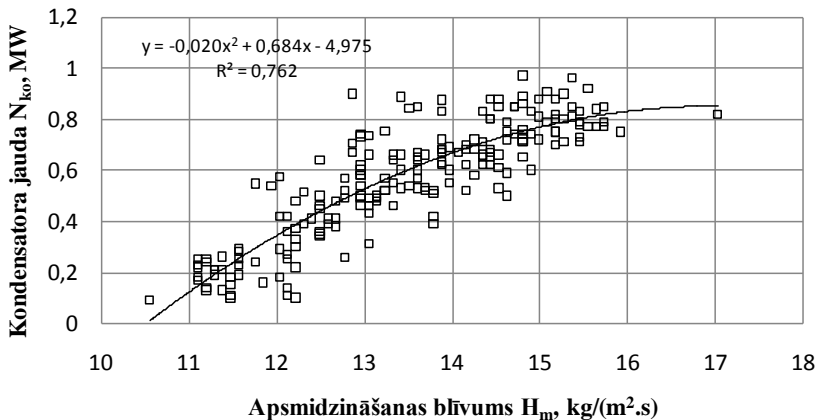


2.4. att. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no tīkla ūdens atgaitas temperatūras

Pieaugot tīkla ūdens atgaitas temperatūrai, kondensatora siltuma jauda samazinās, jo pasliktinās siltuma apmaiņa starp siltumtīklu un kondensatora ūdens kontūriem tīkla ūdens siltummainī. Kondensatorā uzsildīto ūdeni tīkla siltummainī sliktāk atdzesē un ar augstāku temperatūru iesmidzina caur sprauslām kondensatorā. Paaugstinātas iesmidzināmā ūdens temperatūras gadījumā pasliktinās gan sausā

siltuma apmaiņa starp pilieniem un dūmgāzēm, gan masas apmaiņa. Kondensācijas gadījumā uz ūdens piliena virsmas ūdens tvaika parciālais spiediens ir zemāks nekā parciālais spiediens dūmgāzēs. Pieaugot ūdens piliena temperatūrai, pieaug arī tvaika parciālais spiediens uz piliena virsmas un samazinās parciālo spiedienu starpība. Tā rezultātā pasliktinās kondensācijas process un dūmgāzes no kondensatora tiek izvadītas ar augstāku mitruma saturu. Pasliktināta sausā siltuma apmaiņa ir saistīta ar paaugstinātu izvadāmo dūmgāzu temperatūru. Kopumā mazāk intensīvas siltuma un masas apmaiņas gadījumā sliktāka ir dūmgāzu siltuma utilizācija un pazeminās katlu mājas lietderības koeficients.

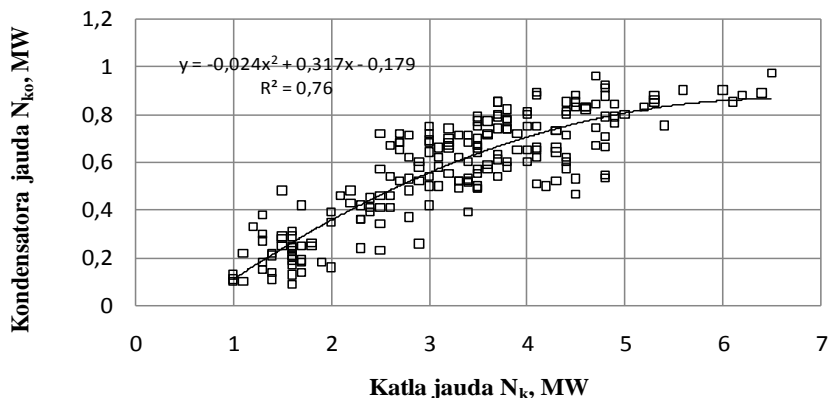
Ūdeni, ko silda tieša kontakta siltummainī, iesmidzina ar sprauslu palīdzību aparāta augšējā daļā. Dūmgāzes un iesmidzinātais ūdens pārvietojas pretplūsmā, un visā kondensatora augstumā notiek siltuma un masas apmaiņa starp abām vidēm. Iesmidzinātā ūdens daudzumu raksturo apsmidzināšanas blīvums. Eksperimentāli noteiktās kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no apsmidzināšanas blīvuma redzamas 2.5. attēlā.



2.5. att. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no apsmidzināšanas blīvuma

Pieaugot apsmidzināšanas blīvumam, nelineāri pieaug kondensatora jauda. Nelielu apsmidzināšanas blīvumu gadījumos jaudas pieaugums ir straujāks, tas samazinās un tiecas uz piesātinājuma stāvokli lielāku vērtību gadījumos. Palielinoties iesmidzināmā ūdens daudzumam, pazeminās tā uzsildīšanas beigu temperatūra t_{1K} un iesmidzināšanas temperatūra t_{2K} . Ar zemākas temperatūras iesmidzināšanas ūdeni dūmgāzes dziļāk atdesēs un ir zemāka to temperatūra pēc kondensatora. Pilnīgāka dūmgāzu dzesēšana nodrošina intensīvāku sauso siltuma apmaiņu. Zemākas piliena virsmas temperatūras gadījumā tvaika parciālais spiediens uz virsmas ir zemāks, palielinās parciālo spiedienu starpība uz piliena virsmas un dūmgāzēs un intensificējas masas pārnese. Kā sausās siltuma apmaiņas, tā arī masas pārnese procesu norise ir tāda, ka dūmgāzes tiek dziļāk dzesētas un palielinās siltuma atguve kondensatorā.

Rūpnieciskā eksperimenta laikā šķeldas katla jauda mainījās no 1 līdz 6,5 MW. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no katla jaudas parādītas 2.6. attēlā.

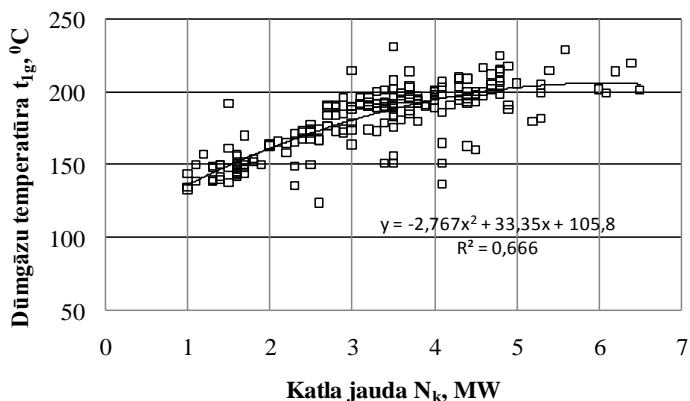


2.6. att. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no katla jaudas

Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no katla jaudas galvenokārt ietekmē divi faktori: izvadāmo dūmgāzu apjoma un dūmgāzu temperatūras izmaiņas. Intensificējas arī siltuma un masas apmaiņa starp dūmgāzēm un iesmidzināmo ūdeni, kas arī palielina kondensatora jaudu. Palielinoties katla jaudai, pieaug kurināmā patēriņš. Saglabājot nemainīgu skābekļa daudzumu dūmgāzēs un kurināmā mitruma saturu, dūmgāzu apjoms ir tieši proporcionāls kurināmā patēriņam, kurš, savukārt, ir apgriezti proporcionāls katla lietderības koeficientam.

Palielinoties dūmgāzu daudzumam, pieaug gāzu ātrumi kondensatorā. Tā kā starp iesmidzināmo ūdeni un dūmgāzēm ir pretplūsma, tad, palielinoties gāzu ātrumam, ir vērojama intensīva gāzu ūdens maisījuma turbulizācija. Tās rezultātā intensificējas siltuma un masas apmaiņa starp abām vidēm un palielinās kondensatorā atgūtais siltums.

2.6. attēlā redzams, ka kondensatora jaudas izmaiņas ir nelineāras. Tas skaidrojams ar katla lietderības koeficienta un dūmgāzu temperatūras izmaiņu raksturu atkarībā no katla jaudas. Eksperimentā noteiktās dūmgāzu temperatūras pēc katla jaudas izmaiņas redzamas 2.7. attēlā.

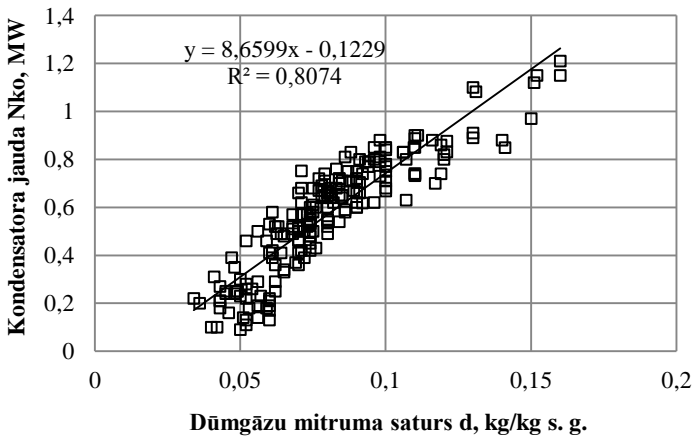


2.7. att. Dūmgāzu temperatūras izmaiņas atkarībā no katla jaudas

Lielākas katla jaudas gadījumā kurtuvē vienlaikus sadeg lielāks kurināmā daudzums, izdalās lielāks siltums, pieaug degšanas temperatūra, un tā rezultātā pieaug arī aizvadāmo dūmgāzu temperatūra.

Kopumā var teikt, ka, palielinoties katla jaudai, palielinās utilizējamā siltuma potenciāls – palielinās siltuma daudzums dūmgāzēs un temperatūra, kā rezultātā nelineāri pieaug kondensatora jauda. Kondensatora jauda ir 17% no katla jaudas mazu katla jaudu gadījumā un 14%, ja katla jauda ir 6 MW.

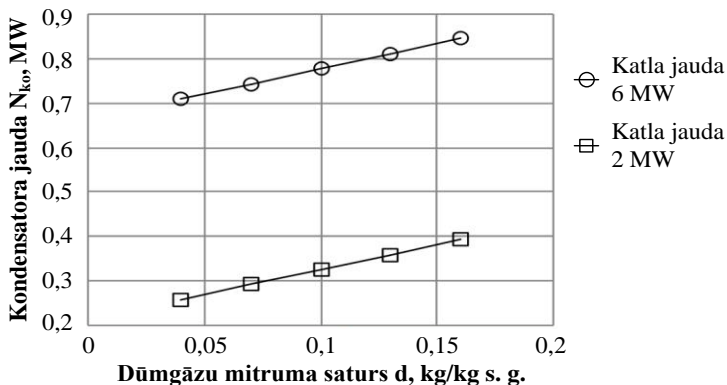
Kondensatoru darbība ir saistīta ar dūmgāzu dzesēšanu zemāk par rasas punkta temperatūru. Tik dziļas dūmgāzu dzesēšanas rezultātā noris mitruma kondensācija un tiek atgūts fāzu pārejas (iztvaikošanas) siltums. Tas, cik daudz siltuma var atgūt kondensācijas rezultātā, ir atkarīgs no mitruma satura dūmgāzēs, iesmidzināmā ūdens temperatūras, apsmidzināšanas blīvuma, dūmgāzu uzturēšanās laika kondensatorā un citiem apstākļiem. Rūpnieciskā eksperimenta gaitā iegūtie dati par kondensatora jaudas izmaiņām, mainoties dūmgāzu mitruma saturam pēc katla (kondensatora ievadā), parādīti 2.8. attēlā.



2.8. att. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no dūmgāzu mitruma satura

Ir redzama jaudas pieauguma tendence, palielinoties dūmgāzu mitruma saturam. Vērojama arī datu izkliede, kas skaidrojama ar citu augstāk minētu parametru vienlaicīgu ietekmi. Lai atdalītu citu parametru ietekmi, izmantojams eksperimentālo datu apstrādes rezultātā iegūtais regresijas vienādojums. Aprēķinos citi parametri uzskatāmi par nemainīgiem.

Dūmgāzu mitruma satura ietekmes uz kondensatora siltuma jaudu novērtējums ar regresijas vienādojuma palīdzību redzams 2.9. attēlā.



2.9. att. Kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no dūmgāzu mitruma satura pēc katla

Mitruma satura ietekmes novērtējums veikts divām katla jaudām: 2 MW un 6 MW. Iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} abos gadījumos ir 55 °C. Dūmgāzu temperatūra kondensatora ievadā pieņemta atbilstoši katla jaudām no 2.7. attēla. Apsmidzināšanas ūdens blīvums ir 12 kg/m²·s katlam ar jaudu 2 MW un 16 kg/m²·s, ja katla jauda ir 6 MW.

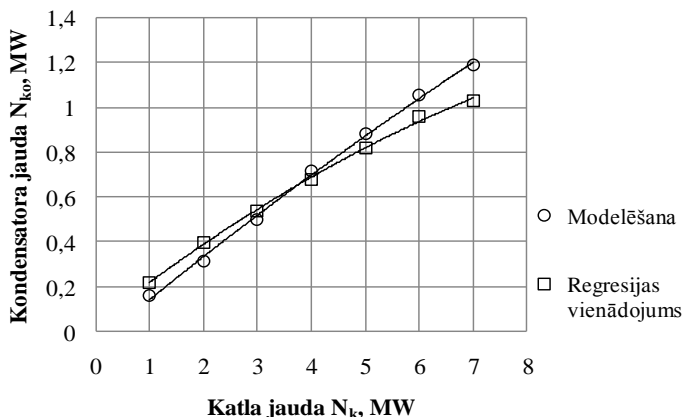
Attēlā redzams, ka, palielinoties dūmgāzu mitruma saturam, palielinās kondensatora jauda, jo dūmgāzes satur lielāku tvaika daudzumu, kuru kondensējot atgūst lielāku daudzumu fāzes pārejas siltuma. Taču, lai notiktu tvaiku kondensācija, ir jārada tam piemēroti apstākļi. Iesmidzināmā ūdens temperatūrai ir jābūt tādai, lai tvaiku parciālais spiediens uz iesmidzināmā ūdens pilienu virsmas būtu mazāks par piesātinātu tvaiku parciālo spiedienu gāzēs. Ūdeni iesmidzina kondensatora augšējā daļā, kur izvada atdzesētas dūmgāzes (skat. 2.1. attēlu). Iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} ir ap $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, un to ietekmē siltuma apmaiņa tīkla ūdens sildītājā. Jo zemāka ir tīkla ūdens atgaitas temperatūra, jo labāk tiks atdzesēts iesmidzināmais ūdens un zemāka būs temperatūras t_{2k} vērtība. Zemāko temperatūras t_{2k} vērtību nosaka tīkla ūdens atgaitas temperatūra t_{1T} un siltuma apmaiņai siltummaiņī nepieciešamā temperatūru starpības summa. Lai notiktu kondensācija, iesmidzināmā ūdens temperatūrai ir jābūt zemākai par dūmgāzu rasas punkta temperatūru t_r ūdens iesmidzināšanas vietā. Dūmgāzu rasas punkta temperatūru nosaka dūmgāzu temperatūra un to mitruma saturs. Tieša kontakta siltummaiņos dūmgāzu un ūdens pretplūsmas gadījumā dūmgāzu temperatūra ir par $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ augstāka par ūdens temperatūru. Zemākā temperatūru starpība vērojama kondensatoros ar pildījumu.

Aplūkotajā gadījumā kondensatora jaudas noteikšanas relatīvā paplašinātā nenoteiktība ir $3,2\%$.

3. KONDENSATORA DARBĪBAS IZPĒTES REZULTĀTU ANALĪZE

3.1. Modelēšanas un eksperimentālo datu salīdzinājums

Šajā darbā ir izmantotas divas metodes dūmgāzu kondensatora procesus raksturojošo parametru izmaiņu izpētei. Tās ir eksperimentālā izpēte un kondensatora siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana. Eksperimentālās metodes trūkums ir nespēja noteikt kondensatora lokālos parametrus horizontālā gāzu skalotņa garumā un vertikālā gāzu skalotņa augstumā. Tas ir saistīts ar ūdens dūmgāzu maisījuma parametru mērīšanu. Lokālie parametri darbā noteikti ar *Microsoft Office Excel* vidē izveidotu modeli. Metodes viena otru papildina un ļauj iegūt pilnīgāku priekšstatu par kondensatora procesiem. Analizējot modelēšanas rezultātus, vienmēr ir aktuāls jautājums, cik adekvāti modelēšanas rezultāti apraksta reālos procesus. Lai rastu atbildi uz šo jautājumu, veikts modelēšanas un ar regresijas vienādojumu noteikto parametru salīdzinājums. Salīdzinātas ar abām metodēm noteiktās kondensatora jaudas izmaiņas atkarībā no katla jaudas. Salīdzināmās izmaiņas ir redzamas 3.1. attēlā.



3.1. att. Kondensatora jaudas modelēšanas un aprēķina ar regresijas vienādojumu rezultātu salīdzinājums

Aprēķinos ar regresijas vienādojumu un modelēšanā izmantotas eksperimentā novērotās katlu jaudai raksturīgās parametru vērtības. Attēlā vērojama laba rezultātu sakritība jaudu diapazonā no 3 MW līdz 5 MW. Mazu katlu jaudu gadījumā ar regresijas vienādojumu noteiktās kondensatora jaudu vērtības ir augstākas. Rezultātu starpība katla jaudai 1 MW attiecināta pret vērtību, kura noteikta ar regresijas vienādojumu, ir 15%. Katlu jaudai 7 MW atšķirība ir 18%. Rezultātu salīdzinājums liecina, ka sakritība ir apmierinoša un modelēšanas rezultāti izmantojami kondensatora lokālo parametru izmaiņu skaidrojumam.

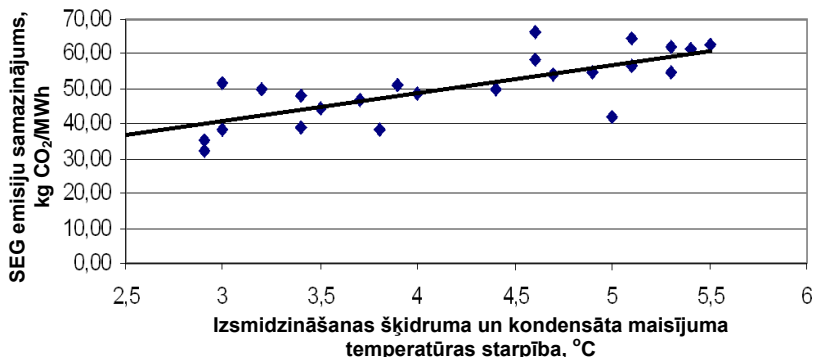
3.2. Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājuma analīze

SEG emisiju samazinājuma modelēšana ir nepieciešama, lai izvērtētu ne tikai tehnoloģisko risinājumu iespējas, bet arī būtu iespējams prognozēt, kādi ir nepieciešamie klimata tehnoloģiju līdzfinansējuma apjomi, lai panāktu efektīvāku to ieviešanu.

Dūmgāzu kondensatora rūpnieciskais eksperiments veikts Ludzas siltumapgādes sistēmas katlu mājā. Katlu mājā ir uzstādīts šķeldas katls ar jaudu 8 MW. Ārpus katlu mājas ir uzstādīts divpakāpju kondensators, kura horizontālajā daļā gāzu plūsmas centrā ir ierīkota izsmidzināšanas sprausla, bet vertikālajā daļā ir uzstādīta cita sprauslu grupa, kas arī izsmidzina šķidrums, kurš nonāk tiešā kontaktā ar dūmgāzēm.

Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājums ir atkarīgs no gāzes kondensatora konstruktīvajiem un darbināšanas parametriem. Kopējais neatkarīgo mainīgo skaits pārsniedz divus desmitus.

Eksperimentālo datu matemātiskās apstrādes rezultāti izmantoti SEG emisiju rezultātu regresijas analīzē, kas ilustrēta 3.2. attēlā.



3.2. att. Īpatnējo SEG emisiju samazinājums atkarībā no izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūras starpības

Eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultātā iegūta empīriskā sakarība, kas apmierinoši korelē ar eksperimentālajiem datiem (korelācijas koeficients ir $R^2=0,1316$).

Iegūtais empīriskais modelis apraksta sakarību starp īpatnējo SEG emisiju samazinājumu un izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūras starpību. Tā matemātiskā izteiksme ir šāda:

$$\Delta CO_2 = 1,39 \cdot (t_1^k - t_2^k) + 51,69, \frac{tCO_2}{MWh} \quad (3.1.)$$

kur

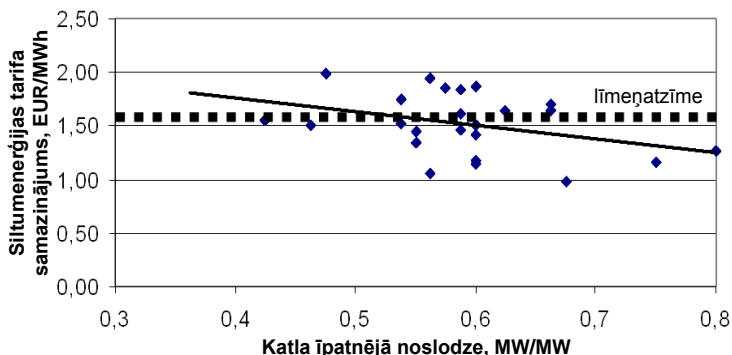
t_1^k – izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūra pirms sprauslām, °C;

t_2^k – izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūra pēc sprauslām, °C.

SEG emisiju samazinājums ir atkarīgs no izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūras starpības pēc un pirms sprauslām. Eksperimentālie dati rāda, ka pat nelielas temperatūras starpības gadījumā (2–3 °C), ja šķidruma caurplūde ir nemainīga, ir iespējams sasniegt siltumnīcefekta gāzu emisiju īpatnējo samazinājumu 25–30% apjomā.

Īpatnējais SEG emisiju samazinājuma ieguvums uz saražoto siltumenerģijas vienību katlu mājā ir atkarīgs no siltumnīcefekta gāzu emisiju kvotu cenas emisiju tirgū. 2010. un 2011. gadā to cenas svārstījās diapazonā no 12 līdz 15 EUR/tCO₂. Eiropas Savienības speciālisti prognozē, ka nākamajā emisiju tirdzniecības periodā 2013.–2020. gadam SEG emisiju cena varētu būt diapazonā no 30 līdz 50 EUR/tCO₂. Balstoties uz šo prognozi, ir izstrādāta SEG emisiju kvotu sadales shēma trešajam emisiju tirdzniecības periodam.

Īpatnējais SEG emisiju samazinājuma ieguvums analizēts, izmantojot gāzes kondensatora eksperimentālos mērījumu datus un matemātiskās apstrādes rezultātus. Īpatnējā SEG emisiju samazinājuma ieguvuma piemērs atkarībā no katlu noslodzes ir ilustrēts 3.3. attēlā, kurā pieņemts, ka emisiju cena emisiju tirgū ir 30 EUR/tCO₂.



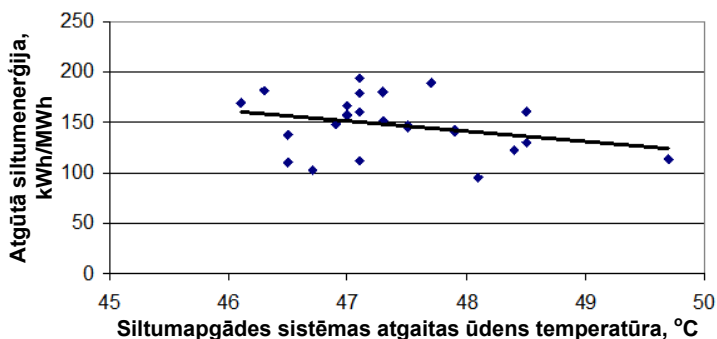
3.3. att. Īpatnējais SEG emisiju samazinājuma ieguvums atkarībā no katla īpatnējās noslodzes

Īpatnējais SEG emisiju samazinājuma ieguvums ir noteikts eksperimentālo datu matemātiskās apstrādes rezultātā tukšam gāzu skalotnim. Īpatnējais ieguvums samazinās, pieaugot katla noslodzei. Šī tendence iegūta datu regresijas analīzes rezultātā un skaidrojama ar palielinātu gāzes ātrumu gāzes kondensatorā, kas, savukārt, rada kondensācijas procesa pasliktināšanos.

Īpatnējā SEG emisiju samazinājuma ieguvuma modelēšanas metode ietver līmeņatzīmes (punktēta līnija) noteikšanu, kura ir izmantojama šāda tipa kondensatoriem un noteiktām emisiju cenām emisiju tirgū. Šī metode ir aprobēta, ja emisiju cena emisiju tirgū ir 30 EUR/tCO₂.

3.3. Gāzes kondensatora darbība siltumapgādes sistēmā

Jebkura siltumapgāde ir kompleksa atsevišķu tās elementu tehnoloģisko risinājumu kopa, kas ir jāaplūko kā vienota sistēma. Tā ir sistēma, kuras efektīva darbība ir atkarīga no ekonomiski pamatotu un videi draudzīgu tehnoloģisko risinājumu izveides.



3.4. att. Gāzes kondensatora ekointensitāte atkarībā no siltumapgādes sistēmas atgaitas ūdens temperatūras

Kā redzams 3.4. attēlā, regresijas analīze liecina, ka eksperimentālie dati slikti korelē ar empīrisko modeli (taisni). Tomēr skaidri iezīmējas tendence, ka gāzes kondensatorā iegūtais īpatnējais siltums ir lielāks, ja siltumtīklu atgaitas ūdens temperatūra ir zemāka, un otrādi – iegūtais siltuma daudzums krītas, temperatūrai pieaugot.

Tas apliecina iepriekš izteikto viedokli, ka kurināmā ietaupījums ir atkarīgs no visas sistēmas darbības kopumā, kurā viens elements ir gāzes kondensators. Savukārt tā darbība ir atkarīga no siltumapgādes sistēmai pieslēgto enerģijas lietotāju energoefektivitātes un ūdens ātrumiem, un caurplūdes parametriem visos siltumtīklu elementos, ieskaitot siltummaiņus ēku siltuma mezglos. Lai palielinātu gāzes kondensatorā iegūto siltumenerģijas daudzumu, ir jāsamazina siltumtīklu atgaitas temperatūra, kas ir iespējams, modelējot siltumapgādes sistēmu kvalitatīvi kvantitatīvos regulēšanas režīmus.

Katlu mājas darbināšanas, izmantojot gāzes kondensatoru, ekointensitātes pieaugums ir vērtējams arī no slāpekļa oksīdu emisiju daudzuma samazināšanās viedokļa. Tas notiek divu iemeslu dēļ:

- samazinās kurināmā patēriņš un samazinās kopējais slāpekļa oksīdu emisiju daudzums no katlu mājas skursteņa;
- notiek dažu slāpekļa oksīdu komponentu daļēja absorbcija ar izsmidzināšanas šķidrums: 10% no kopējā NO_x apjoma uztver izsmidzināšanas šķidrums.

SECINĀJUMI

1. Dūmgāzu siltuma atguve dziļas dūmgāzu dzesēšanas siltumnesēju tieša un netieša kontakta ceļā pētījumu apskats liecina, ka tieša kontakta gadījumā kondensatorā ievadāmo ūdeni iespējams uzsildīt līdz temperatūrai, kura ir par 10–15 °C augstāka nekā netieša kontakta aparātos. Paaugstināta ūdens temperatūra ir ļoti svarīga, ja atgūto siltumu izmanto patērētāja komunālo siltuma slodžu segšanai.
2. Balstoties uz siltumnesēju tieša kontakta siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšanas rezultātiem, ir izstrādāta un patentēta inovatīva dūmgāzu kondensatora konstrukcija, kas sastāv no divām daļām: iztvaikotāja un kondensatora. Šī iekārta ir uzstādīta Ludzas katlu mājā, un ir veikta tās eksperimentāla izpēte, darbinot iekārtu bez pildījuma. Rūpnieciskā eksperimenta datu apstrādes rezultāti liecina, ka kondensatora jauda ir 17% no katla jaudas daļējas katla slodzes gadījumā un 14%, ja katla slodze pieaug līdz 0,75 no nominālās.
3. Lai paaugstinātu iesmidzināmā ūdens temperatūru un attīrītu dūmgāzes no cietajām daļiņām, dūmgāzu kondensatora iztvaikošanas daļā iesmidzina uzsildītu ūdeni no kondensatora ūdens tilpuma, kas iztvaiko un palielina dūmgāzu mitruma saturu. Iztvaikotāja siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana rāda, ka mitruma saturs d palielinās par 0,03–0,05 kg/kg s. g., kā rezultātā par 3–5 °C palielinās rasas punkta t_r un mitrā termometra t_m temperatūra. Iesmidzināmā ūdens uzsildīšanas temperatūras robežvērtību

iztvaikotājā nosaka mitrā termometra temperatūras vērtība, un ūdens temperatūra nevar pārsniegt 66 °C. Lai veicinātu iztvaikošanas procesu, apsmidzināšanas blīvums H_m ir 6–8 kg/m².s, un tas ir mazāks par apsmidzināšanas blīvumu iekārtas kondensācijas daļā.

4. Kondensācijas daļā notiek dūmgāzu dzesēšana zemāk par rasas punkta temperatūru. Dūmgāzu temperatūru pēc kondensatora, galvenokārt, ietekmē iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} , ievadāmo dūmgāzu temperatūra t_{1g} un apsmidzināšanas blīvums H_m . Dūmgāzu un ūdens pretplūsmas gadījumā dūmgāzes var atdzesēt līdz temperatūrai, kuru nosaka aptuvena sakarība $t_{2g}=t_{2k}+(5-10)$ °C. Augstākas dūmgāzu temperatūras vērtības atbilst kondensatoram bez pildījuma. Iesmidzināmo ūdeni kondensatorā var uzsildīt ne augstāk par rasas punkta temperatūru t_r kondensatora ievadā. Modelējamās apstākļos t_r ir 60–64 °C, un to būtiski ietekmē dūmgāzu mitruma saturs pēc iztvaikotāja.
5. Dūmgāzu kondensatorā uzsildītā ūdens temperatūra ir iesmidzināmā ūdens pēc iztvaikotāja un iesmidzināmā ūdens pēc kondensācijas daļas sajaukšanās temperatūra. Modelēšanas rezultātā iegūtās augstākās ūdens temperatūras vērtības ir 65 °C, kas ir tuvas rūpnieciskajā eksperimentā mērītajai augstākajai temperatūras vērtībai 63,8 °C.
6. Rūpnieciskā eksperimenta datu regresijas analizēs rezultātā ir iegūts daudzfaktoru empīrisks vienādojums, kas kvantitatīvi nosaka kondensatora jaudu atkarībā no katla iekārtas un kondensatora darbībai raksturīgajiem un statistiski nozīmīgajiem rādītājiem un kalpo par pamatu iekārtas darbināšanas režīmu rezultātu prognozei un izvērtējumam. Regresijas vienādojuma koeficientu nozīmīguma pārbaude rāda, ka kondensatora jaudu būtiski ietekmē šādi faktori:
 - dūmgāzu mitruma saturs d ;
 - apsmidzināšanas blīvums H_m ;
 - katla jauda N_k ;
 - dūmgāzu temperatūra pirms kondensatora t_{1g} ;
 - ūdens temperatūras pēc kondensatora t_{1k} ;
 - tīkla ūdens atgaitas temperatūra t_{1t} ;
 - kondensatorā iesmidzināmā ūdens temperatūra t_{2k} .

Eksperimentālo datu vērtības apmierinoši korelē ar modelēšanas rezultātiem.

7. Ludzas katlu mājas eksperimentālo datu analīzes rezultātā iegūts vienādojums, kas raksturo īpatnējo SEG emisiju samazinājumu uz saražotās enerģijas vienību atkarībā no izsmidzināšanas šķidruma un kondensāta maisījuma temperatūru starpības. Eksperimentālie dati liecina, ka pat nelielas temperatūras starpības (2–3 °C) gadījumā, ja šķidruma caurplūde ir nemainīga, ir iespējams sasniegt siltumnīcefekta gāzu emisiju īpatnējo samazinājumu 25–30% apjomā.

8. Īpatnējo emisiju samazinājuma ekonomiskais novērtējums veikts, izmantojot īpatnējo SEG emisiju samazinājuma ieguvumu uz saražoto siltumenerģijas vienību rādītāju. Eksperimentālo datu matemātiskās apstrādes rezultāti liecina, ka īpatnējais ieguvums samazinās, pieaugot katla noslodzei. Tas skaidrojams ar palielinātu gāzes ātrumu gāzes kondensatorā, kas, savukārt, saistīts ar kondensācijas procesa pasliktināšanos. Īpatnējo SEG emisiju samazinājuma ieguvuma izvērtēšanas metode ietver līmeņatzīmes noteikšanu, kura ir izmantojama šāda tipa kondensatoriem un noteiktām emisiju cenām emisiju tirgū. Līmeņatzīmes vērtība ir 1,5 EUR/MWh, ja emisiju cena emisiju tirgū ir 30 EUR/tCO₂.
9. Katlu mājas ar uzstādītu gāzes kondensatoru darbību būtiski ietekmē visas siltuma apgādes sistēmas darbības rādītāji. Sistēmas darbināšanas efektivitātes novērtējums veikts, izmantojot ekointensitātes indikatoru, kas saista sistēmas darbības rādītājus ar kurināmā patēriņa un radīto emisiju samazinājumu. Darbā piedāvāts modelis siltuma apgādes sistēmas ekointensitātes indikatora analītiskam novērtējumam. Modeļi veido četru vienādojumu sistēma, kas apraksta siltuma apgādes sistēmas elementu un būtiskāko parametru ietekmi uz sistēmas ekointensitātes indeksa izmaiņām. Vienādojumi apraksta:
 - kurināmā kvalitātes izmaiņas;
 - katla darbības rādītāju izmaiņas;
 - gāzes kondensatora darbību;
 - siltuma tīkla darbību.
10. Ludzas katlu mājas ar uzstādītu gāzu kondensatoru ekointensitātes izpēte veikta eksperimentāli. Balstoties uz eksperimentālās izpētes rezultātiem, redzams, ka, pazeminoties āra gaisa temperatūrai, pieaugot relatīvajai katla slodzei un paaugstinoties siltuma tīklu atgaitas ūdens temperatūrai, ekointensitātes indikators samazinās. Pieaugot katla relatīvajai slodzei no 0,4 līdz 0,8, ekointensitātes indikators samazinās no 1,17 līdz 1,11 jeb par 5%.

Edgars VĪGANTS

DŪMGĀZU DZESĒŠANAS KONDENSĀCIJAS IEKĀRTAS IZPĒTE

Promocijas darba kopsavilkums

Iespiests „Gutenbergs Druka”, Mūku iela 6,
Rīga, LV-1050, Latvija.