



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Vivita Priediece

MAZAS JAUDAS KATLU DŪMGĀZU ATTĪRĪŠANAS UN SILTUMA ATGUVES EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN MODELĒŠANA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Vivita Priedniece

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**MAZAS JAUDAS KATLU DŪMGĀZU
ATTĪRĪŠANAS UN SILTUMA ATGUVES
EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN MODELĒŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

IVARS VEIDENBERGS,

vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.*

VLADIMIRS KIRSANOVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Priediece V. Mazas jaudas katlu dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atguves eksperimentālā izpēte un modelēšana. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 48 lpp.

Iespiests saskaņā ar 2022. gada 14. janvāra promocijas padomes “RTU P-19” lēmumu Nr. 150.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas «Izaugsme un nodarbinātība» 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa «Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās» projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 «Rīgas Tehniskās universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās» ietvaros.



Pētījums tapis ar Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu.

Pētījums īstenots ERAF projektā «Individuālajā siltumapgādē integrēta miglas aparāta sistēma (IFUS)» 1.1.1.1/16/A/015.



<https://doi.org/10.7250/9789934227592>
ISBN 978-9934-22-759-2 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 24. maijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Rīgā, Zunda krastmalā 8, 109. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing. Andres Siirde*,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Dr. sc. ing. Edmunds Teirumnieks*,
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

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

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vivita Priedniece (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 38 attēli, 17 tabulu, 67 vienādojumi, kopā 105 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 133 nosaukumi.

SATURS

Apzīmējumi.....	5
Ievads	7
Tēmas aktualitāte.....	7
Darba mērķis un uzdevumi	7
Hipotēze	8
Zinātniskā novitāte	8
Praktiskā novitāte	9
Pētījumu aprobācija.....	9
1. Literatūras apskata kopsavilkums	11
2. Eksperimenti miglas aparāta darbības analīzei	13
2.1. Miglas aparāta eksperimentālais stends	13
2.2. Eksperimenta īstenošana	17
3. Aprēķina modelis miglas aparāta darbības analīzei	19
3.1. Piliena pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā.....	19
3.2. Piliena cieto daļiņu uztveršana	21
3.3. Modeļa realizācijas algoritms.....	23
4. Rezultāti	28
4.1. Eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti.....	28
4.2. Miglas aparāta veiktspējas pārbaudes rezultāti	29
4.3. Aprēķina modeļa validācija.....	35
4.4. Optimizācija	39
SECINĀJUMI.....	45
Izmantotā literatūra	47

APZĪMĒJUMI

<p>D_2 – aprēķinātais piliena diametrs, μm;</p> <p>D_1 – piliena diametrs pie atsauces spiediena, μm;</p> <p>P_2 – testos izmantotais ūdens spiediens, bar;</p> <p>P_1 – atsauces ūdens spiediens, bar;</p> <p>m_d – piliena masa, kg;</p> <p>β_p – masas pārnese koeficients parciālo spiedienu izmaiņu gadījumā, $\text{kmol}/(\text{N} \cdot \text{s})$;</p> <p>$dZ$ – iekārtas elementa augstums, m;</p> <p>d_p – cietās daļiņas diametrs, m;</p> <p>d_d – piliena diametrs, m;</p> <p>H – aparāta augstums, m;</p> <p>M_v – tvaika molmasa, 18 kg/kmol;</p> <p>p^{sat} – piesātināta tvaika parciālais spiediens uz pilienu, Pa;</p> <p>p_b – tvaika parciālais spiediens gāzes plūsmā, Pa;</p> <p>t_s – pilienu piesātinājuma temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;</p> <p>p – sistēmas pilnais spiediens, Pa;</p> <p>ω – gāzes mitruma saturs, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{dg}}$.</p> <p>$p_{\text{dg}}$ – sausās gāzes parciālais spiediens, Pa;</p> <p>p_{wv} – ūdens tvaiku parciālais spiediens, Pa.</p> <p>u_r – ūdens pilienu ātrums aparātā, m/s;</p> <p>u_d – pilienu ātrums, m/s;</p> <p>u_g – gāzes ātrums, m/s;</p> <p>u_t – pilienu nogulsnešanās ātrums nekustīgā gāzē, m/s;</p> <p>ρ_w – ūdens pilienu blīvums, kg/m^3;</p> <p>ρ_g – mitru gāzu blīvums, kg/m^3;</p> <p>g – brīvas krišanas paātrinājums, m/s^2;</p> <p>C_D – vides pretestības koeficients;</p> <p>μ_g – mitras gāzes dinamiskā viskozitāte, Pa·s;</p> <p>Stk – pilienu Stoksa skaitlis;</p> <p>ρ_p – cietās daļiņas blīvums, kg/m^3;</p> <p>d_p – cietās daļiņas diametrs, m;</p> <p>C_c – Kanninghama labojuma faktors daļiņas izmēram;</p> <p>m_g – mitro gāzu masas plūsma, kg/s;</p> <p>m_{dg} – sauso gāzu masas plūsma, kg/s;</p>	<p>m_v – ūdens tvaika masas plūsma, kg/s;</p> <p>m_w – ūdens masas izmaiņas, kg/s;</p> <p>V_w – iesmidzināmā ūdens plūsma, m^3/s;</p> <p>V_g – dūmgāzu plūsma aparātā, m^3/s;</p> <p>C_p – cieto daļiņu koncentrācija dūmgāzēs, kg/m^3;</p> <p>$C_{p\text{iz}}$; $C_{p\text{ie}}$ – cieto daļiņu koncentrācija aparāta izejā un ieejā, kg/m^3;</p> <p>η_d – pilienu skaits aparātā laika vienībā, 1/s;</p> <p>t_g – gāzes temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;</p> <p>T_g – gāzes temperatūra, K;</p> <p>Q_d – pilienu siltums, J/s;</p> <p>Q_{ht} – siltuma apmaiņas siltums, J/s;</p> <p>Q_c – tvaika kondensācijas siltums, J/s;</p> <p>Q_p – cieto daļiņu siltums, J/s;</p> <p>V_d – pilienu sākuma tilpums, m^3;</p> <p>c_{pg} – gāzu īpatnējā siltumietilpība, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;</p> <p>$t_d$ – ūdens pilienu temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;</p> <p>c_{pp} – cieto daļiņu īpatnējā siltumietilpība, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;</p> <p>$\alpha$ – siltuma pārejas koeficients no gāzes uz pilienu, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$;</p> <p>$\beta_c$ – masas apmaiņas koeficients, m/s;</p> <p>Nu – Nuselta skaitlis;</p> <p>Sh – Šervuda skaitlis;</p> <p>λ_g – gāzes siltumvadītspējas koeficients, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;</p> <p>$D_v$ – tvaika difūzijas koeficients, m^2/s;</p> <p>μ_g – gāzes dinamiskā viskozitāte, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;</p> <p>$\nu_g$ – gāzes kinemātiskā viskozitāte, m^2/s;</p> <p>$\frac{dt_g}{dz}$ – dūmgāzu temperatūras izmaiņas, $^{\circ}\text{C}$;</p> <p>n_{sk} – pilienu skaits iekārtā, 1/s;</p> <p>$\frac{dt_w}{dz}$ – ūdens temperatūras izmaiņas, $^{\circ}\text{C}$;</p> <p>$\frac{dd_d}{dz}$ – ūdens pilienu diametra izmaiņas, m;</p> <p>$\frac{du_d}{dz}$ – pilienu ātruma izmaiņas, m/s;</p> <p>$\frac{dC_p}{dz}$ – cieto daļiņu koncentrācijas izmaiņas, kg/m^3;</p> <p>$\frac{d\omega}{dz}$ – gāzes mitruma satura izmaiņas, $\text{kg}/\text{kg}_{\text{da}}$;</p>
---	---

t_{w1}, t_{w2} – iesmidzinātā ūdens temperatūra attiecīgi pirms MA un pēc MA, °C;
 G – iesmidzinātā ūdens daudzums jeb caurplūde, l/h;
 O_2 – skābekļa koncentrācija dūmgāzēs, %;
 η_{fu} – miglas aparāta efektivitāte, %;
 Q_{con} – sistēmā patērētais kurināmā enerģijas daudzums, kWh;
 ΔQ – atšķirība starp eksperimentālajām un aprēķinātajām MA jaudām, %;
 $Q_{exp.}$ – miglas aparāta jauda eksperimentos, kW;
 $Q_{apr.}$ – miglas aparāta jauda aprēķinos, kW;
 Q – miglas aparāta jauda, kW;
 b_0 – brīvais loceklis;
 b_i, b_j, b_{uj}, b_{jj} – mainīgo parametru koeficienti;
 ϵ – gadījuma kļūda;
 $Z_n - j$ -tais neatkarīgais mainīgais;
 Z_n^0 – punkts ar koordinātām līdz k ;
 ΔZ_n – vērtību intervāls Z_n asij;
 x_n – mainīgais bezdimensiju koordinātās;
 $b_n - n$ -tais koeficients;
 N – eksperimentu skaits;
 x_{ni} – katra eksperimenta mainīgais pie attiecīgā b koeficienta;
 y_i – atkarīgais mainīgais pie attiecīgā x ;
 γ – proporcionalitātes koeficients optimizācijā;
 $\delta'k$ – parametra izmaiņas solis optimizācijā.

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Eiropas komiteja 2009. gadā atjaunoja Ekodizaina direktīvu (2009/125/EK), kas nosaka, ka visām enerģiju ražojošām un patērējošām iekārtām, tai skaitā arī degšanas iekārtām, ko izmanto apkures un siltā ūdens nodrošināšanai, jāievieš siltumnīcefekta gāzu emisijas mazinošas tehnoloģijas.

Ekodizaina direktīva nosaka vēlamo degšanas iekārtu energoefektivitāti un radīto emisiju daudzumu. Pasaules Veselības organizācija noteikusi arī pieļaujamo emisiju daudzumu robežvērtības diennaktij un gadam. To pārsniedzot, tiek radīts būtisks kaitējums cilvēku veselībai. Arī atsevišķas valstis savos normatīvos norāda dažādu emisiju robežvērtības, kas jāievēro gan uzņēmumiem, gan individuāliem emisiju ražotājiem. Konkrēti emisiju līmeņa rādītāji iekļauti arī starptautiska un vietēja mēroga likumdošanā. Visos šajos dokumentos uzmanība pievērsta gāzveida piesārņotājiem – oglekļa dioksīdam, slāpekļa oksīdiem, sēra oksīdiem, tvana gāzei, lielā daļā – arī tam, vai ir ieviesti rādītāji cieto daļiņu emisijām, vai plānots to darīt.

Cieto daļiņu emisijas ir pieaugoša problēma visā pasaulē ne tikai radītā piesārņojuma dēļ, bet arī tādēļ, ka pētījumos ir pierādīta saikne starp elpceļu, asinsvadu un sirds saslimšanu gadījumu pieaugumu, ja cilvēks ilgstoši ir pakļauts cieto daļiņu ietekmei. Galvenais cieto daļiņu avots ir mājsaimniecību sektors, kurā galvenokārt izmanto mazas jaudas cietā biokurināmā degšanas iekārtas.

Dūmgāzu attīrīšana pēc mazas jaudas degšanas iekārtām ir maz pētīta. Pagaidām izstrādātās tehnoloģijas ir ekonomiski neizdevīgas vai ar zemu efektivitāti. Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana kondensatora iekšpusē ir maz pētīta, sīkāk modelēta iekārtas darbība sistēmā vai gāzveida piesārņotāju attīrīšanas efektivitāte, taču tieši cieto daļiņu attīrīšana pētījumos praktiski nav modelēta.

Promocijas darba gaitā izveidota un eksperimentāli pārbaudīta dūmgāzu attīrīšanas iekārta, kas papildus nodrošina arī siltuma atgūvi no dūmgāzēm un ir paredzēta lietošanai pēc mazas jaudas katliem, kas galvenokārt izmantoti mājsaimniecībās. Šādas iekārtas izmantošana būtiski samazina mājsaimniecību sektora radīto piesārņojumu. Papildus izstrādāts iekārtas siltuma un masas apmaiņas modelis ar pavadošo diferenciālvienādojumu sistēmu galveno parametru izmaiņu aprēķinam. Tajā veikta iekārtas attīrīšanas procesu modelēšana, kas sniedz iespēju paredzēt un teorētiski noteikt iekārtas efektivitāti, ņemot vērā attiecīgos sistēmas darbības parametrus, potenciāli paplašinot iekārtas lietojuma iespējas, izmantojot dažādus katlu un kurināmā veidus.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir mazas jaudas siltuma avota dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atgūšanas iekārtas izveide, eksperimentāla un analītiska izpēte un darbības režīmu optimizācija.

Mērķa sasniegšanai īstenojamie uzdevumi:

- aprēķināt un izgatavot sīkpilienu dūmgāzu kondensatora jeb miglas aparāta (MA) iekārtu, veikt tās eksperimentālu izpēti;
- izstrādāt aparāta simulācijas modeli, izveidot tā aprēķina datorprogrammu;
- validēt MA modeli;

- veikt MA aparāta režīmu optimizāciju ar Boksa–Vilsona (*Box–Wilson*) metodi.

Hipotēze

Vai ir iespējams izveidot efektīvu cieto daļiņu uztveršanas un dūmgāzu siltuma atguves iekārtu mājsaimniecību siltuma avotiem.

Zinātniskā novitāte

Darbā aprakstīta jauna tipa kondensatoru tehnoloģija mazas jaudas katliem mājsaimniecībās mitru dūmgāzu attīrīšanai no cietajām daļiņām – mīklas aparāts. Šajā iekārtā paralēli dūmgāzu attīrīšanai norit arī latentā siltuma atgūšana no tām. Dūmgāzu dzesēšana un attīrīšana norit ar īpaši mazu pilienu palīdzību, to diametri nepārsniedz 800 μm. Iekārtas analīzei izstrādāts siltuma un masas apmaiņu raksturojošs aprēķina modelis, izmantojot brīvpieejas programmēšanas valodu *Python*. Šis ir pirmais aprēķina modelis, kas aplūko parametru izmaiņas kondensatora iekšpusē – iekārtas augstumā, ja siltuma un masas apmaiņā piedalās arī cietās daļiņas. Modelis pārbaudīts pie 10 kW līdz 20 kW katla jaudas, izmantojot koksnes granulas.



1. attēls. Darba realizācijas algoritms.

Galvenie darba izstrādes posmi ir iekārtas izstrāde un pārbaude, ieskaitot primāros eksperimentus sistēmas sastāvdaļu pārbaudei. Pēc šī posma izvēlēta atbilstošākā sprausla, iesmidzinātā ūdens daudzums, temperatūra. Eksperimentu plānošana un īstenošana mīklas aparāta pārbaudei pie dažādiem sistēmas darbības parametriem. Matemātiskā modeļa izstrāde iekārtas darbības raksturošanai. Eksperimentos iegūto un ar modeli aprēķināto datu analīze. Rezultātu apstrāde un analīzes posms ietver arī modeļa validāciju un optimālo parametru atrašanu mīklas aparāta izmantošanai koksnes granulu katla sistēmā.

Praktiskā novitāte

Darba gaitā izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta jauna dūmgāzu attīrīšanas iekārta mājsaimniecību apkures katliem. Iekārtas darbības analīzei izstrādāts aprēķina modelis, kas ietver diferenciālvienādojumu sistēmu galveno sistēmas parametru – iesmidzinātā ūdens pilienu diametru, ātruma, dūmgāzu temperatūru iesmidzinātā ūdens temperatūru, cieto daļiņu koncentrāciju un gāzu mitruma satura izmaiņu – aprēķinam. Modelis ir validēts ar eksperimentālajiem datiem un ir ar augstu ticamības līmeni, rezultātu atšķirība līdz 10 %. Veikta iekārtas analīze pie dažādām katlu jaudām, piedāvājot izdevīgākos darbināšanas variantus, augstākas iekārtas efektivitātes sasniegšanai reālos apstākļos.

Darbā iegūtos rezultātus var izmantot likumdošanas izstrādātāji un pieņēmēji, lai nodrošinātu dūmgāzu attīrīšanas iekārtu izmantošanas aktualizēšanu un ieviestu prasības to uzstādīšanai, īpaši mājsaimniecībās. Industrijai ir iespēja izmantot iegūtās zināšanas un rezultātus miglas aparāta un tam līdzīgu iekārtu ražošanai. Pašvaldību un valsts līmenī ir iespēja attīstīt gaisa kvalitātes kontroli, rosinot un sniedzot atbalstu iedzīvotājiem dūmgāzu attīrīšanas iekārtu uzstādīšanai.

Pētījuma aprobācija

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Priedniece V., Veidenbergs I., Blumberga D., Mathematical model of the fog unit, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2018), Latvia.
2. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Laboratory Research of the Flue Gas Condenser – Fog Unit, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China.
3. Priedniece V., Kalniņš, E., Kirsanovs, V., Dzikēvičs M., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Sprayed water flowrate, temperature and drop size effects on small capacity flue gas condenser's performance, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2019), Latvia.
4. Priedniece, V., Kalnins, E., Kirsanovs, V., Pedisius N., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Particulate Matter Emission Decrease Possibility from Household Sector using Flue Gas Condenser – Fog Unit. Analysis and Interpretation of Results., International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2019), Latvia.
5. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Prodanuks T., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Treatment of particulate matter pollution: people's attitude and readiness to act, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2020), Latvia, Zoom platform.

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir atspoguļoti deviņās starptautiskās zinātniskās publikācijās, ar promocijas darbu saistīta apakšnodaļa ir iekļauta zinātniskajā monogrāfijā.

1. Seļivanovs, J., Vīgants, E., Priedniece, V., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Flue Gas Treatment Multi-Criteria Analysis. *Energy Procedia*, Elsevier, 2017, 379.–385. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.056.
 2. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Laboratory Research of the Flue Gas Condenser – Fog Unit. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, 482.–487. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2018.07.056.
 3. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Experimental and Analytical Study of the Flue Gas Condenser – Fog Unit. *Energy Procedia*, 2019, Vol. 158, 822.–827. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.215.
 4. Priedniece, V., Kalnins, E., Kirsanovs, V., Pedisius N., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Particulate Matter Emission Decrease Possibility from Household Sector using Flue Gas Condenser – Fog Unit. Analysis and Interpretation of Results. *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23, Issue 1, 135.–151. lpp., ISSN 2255-8837. Pieejams: doi.org/10.2478/rtuct-2019-0010.
 5. Priedniece V., Kalniņš, E., Kirsanovs, V., Dzikēvičs M., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Sprayed water flowrate, temperature and drop size effects on small capacity flue gas condenser's performance, *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23: Issue 3, 333.–346. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-0099>.
 6. Blumberga D., Priedniece V., Rumba R., Kirsanovs V., Ņikitenko A., Lavendelis E., Veidenbergs I., Mathematical Modeling of Heat and Mass Processes in a Scrubber: The Box–Wilson Optimization Method, *Energies*, Volume 13, Issue 9. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/en13092170>.
 7. Kirsanovs, V., Priedniece, V., Kalniņš, E., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Innovative Scrubber Technology Model for Domestic Boiler Application, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020, Pieejams: <https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/s40095-020-00347-z>.
 8. Kirsanovs, V., Priedniece, V., Kalniņš, E., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Small Scale Pellet Boiler Gas Treatment in Fog Unit, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020. Pieejams: <https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/s40095-020-00357-x>.
 9. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Prodanuks T., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Treatment of particulate matter pollution: people's attitude and readiness to act, *Environmental and Climate Technologies*, 2020, 24 (2), pp. 231–246. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0069>.
- Barisa, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Gušča, J., Lauka, D., Kārklīņa, I., Muižniece, I., Pakere, I., Priedniece, V., Romagnoli, F., Rošā, M., Seļivanovs, J., Soloha, R., Veidenbergs, I., Vīgants, E., Vīgants, Ģ., Ziemele, J. *Energosistēmu analīze un modelēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 144 lpp. ISBN 978-9934-22-037-1.

1. LITERATŪRAS APSKATA KOPSAVILKUMS

Mājsaimniecības ir nepilnīgi apzināts cieto daļiņu piesārņojuma avots, ko likumdošana patlaban praktiski nekontrolē. Nav izstrādātas arī ekonomiski izdevīgas un efektīvas iekārtas mazas jaudas katlu dūmgāzu attīrīšanai. Likumdošanas dokuments, kas paredz emisiju samazināšanas pasākumus mazas jaudas degšanas iekārtām, ir Eiropas Parlamenta un Padomes direktīva 2009/125/EK, ar ko izveido sistēmu, lai noteiktu ekodizaina prasības ar enerģiju saistītiem ražojumiem [1], un saistošie Latvijas Republikas (LR) Ministru kabineta (MK) noteikumi Nr. 941 “Noteikumi par ekodizaina prasībām ar enerģiju saistītām precēm (produktiem)” [2]. Ekodizaina direktīvas nosacījumi mājsaimniecībām paredz, ka:

- katliem ar automātisko kurināmā padevi *PM* (*particulate matter*) emisijas apkures sezonā nedrīkst pārsniegt 40 mg/m^3 , katliem ar manuālo kurināmā padevi – 60 mg/m^3 ;
- sezonālā telpu apsildes efektivitāte katliem ar jaudu līdz 20 kW (ieskaitot) nedrīkst būt zemāka par 75 %;
- sezonālā telpu apsildes efektivitāte katliem ar jaudu virs 20 kW nedrīkst būt zemāka par 77 % [1].

Emisiju samazināšanai no degšanas procesiem izdala primārās un sekundārās tehnoloģijas. Primāro tehnoloģiju uzsvars ir uz kurināmā kvalitāti un kurtuvju, katlu uzbūvi, savukārt sekundārās tehnoloģijas koncentrējas uz dūmgāzu apstrādi un attīrīšanu [3]. Līdz šim izstrādātās emisiju samazināšanas tehnoloģijas mazas jaudas katliem ir:

- piedevas kurināmajam (piemēram, kalcija hidroksīds – Ca(OH)_2 , kaļķakmens – CaCO_3 un kaolīns $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) [4];
- katalītiskie filtri (piemēram, ar platīna, palādijs pārklājumiem) [5];
- mazas jaudas elektrostatiskie putekļu nogulsnetāji (nav ekonomiski izdevīgi) [6];
- maza izmēra cauruļu siltummaiņi [7];
- *PM* filtri (var palielināt smalko daļiņu emisijas) [4].

Visām attīrīšanas tehnoloģijām var minēt vienotu trūkumu – dūmgāzu apstrādes rezultātā rodas atlikumi. Sauso attīrīšanas metožu gadījumā tās ir cietās nogulsnes, savukārt mitro attīrīšanas metožu gadījumā – šķidrums ar cieto nogulšņu piemaisījumiem. Nepieciešams izvērtēt šo nogulšņu turpmāko lietojumu. Turklāt neviena no izplatītākajām dūmgāzu attīrīšanas metodēm nav piemērota mazas jaudas katliem lietošanai mājsaimniecībās, jo tiem var būt augstas vai papildu izmaksas, kas saistītas ar atlikumu apstrādi un darbināšanu.

Karstu piesārņotu gāzu plūsmu attīrīšanā no cietajām daļiņām (*PM*) tieša kontakta aparātos vienlaikus notiek daļiņu uztveršana uz iesmidzinātā ūdens pilieniem un siltuma un masas pāreja starp pilieniem un karstām piesārņotām gāzēm. Patlaban maz pētītas raksturīgo parametru izmaiņas kondensatora iekšienē, dūmgāzu dzesēšanas un attīrīšanas procesa laikā. Ūdens saņemto siltumu ir lietderīgi izmantot mājsaimniecību vajadzībām, tādā veidā palielinot ne tikai iekārtas, bet arī kopējās apkures un siltā ūdens sagatavošanas sistēmas energoefektivitāti. Maz pētīta ir arī *PM* ietekme uz siltuma un masas pārnesei procesiem. Modelēšanas procesos galvenokārt aplūkota kopējā siltuma un masas apmaiņa plūsmā, kā arī analizēta gāzveida piesārņotāju atdalīšana no dūmgāzēm.

Izšķir rupjas (2,5–10 μm), smalkas (< 2,5 μm) un putekļveida (< 0,1 μm) *PM*. Rupjas *PM* rodas smalcināšanas un malšanas procesu laikā un cilvēka organismā galvenokārt nonāk bronhos. Smalkās daļiņas pārsvarā rodas degšanas procesu rezultātā. Šīs daļiņas veido līdz 50 % no visām gaisā esošajām *PM*, un to uzturēšanās laiks gaisā ir ilgs (nedēļas, pat mēneši) [8]. Smalkās *PM* iespējams ieelpot dziļāk plaušās, tās var nonākt plaušu cirkulācijā un arī asinsrites sistēmā.

PM ir nozīmīga piesārņojuma problēma, jo regulāri tiek pārsniegtas ES direktīvā 2008/50/EK par gaisa kvalitāti un tīrāku gaisu Eiropai noteiktās normas par *PM* koncentrāciju gaisā [9], [10]. ES stratēģijas par emisiju samazinājumu tiešā veidā neietver *PM* emisijas, taču iekļauj gāzveida emisijas, kas veicina piesārņojuma ietekmi un var radīt sekundārās *PM* [6]. Vairāk nekā 45 % no *PM* emisijām Eiropā 2015. gadā radīja mazas jaudas degšanas iekārtas. Veiktie pētījumi pierādījuši, ka biomasas izmantošana degšanas iekārtās var veidot 19–37 % no kopējā radītā *PM* daudzuma atkarībā no laikapstākļiem un sezonālītātes, kā arī izmantotā kurināmā veida [11], [12].

PM piesārņojums ir problēma, kas aktuāla globālā mērogā. Pasaules Veselības organizācija (PVO) ir izstrādājusi vadlīnijas radītajām *PM* emisijām, kas balstītas ekspertu veikto pētījumu gaitā iegūto datu izvērtējumā un ir piemērojamas jebkurai valstij. *PM* emisijām noteiktas robežvērtības $PM_{2,5}$ un PM_{10} izmēra daļiņām. Vidējais gada rādītājs $PM_{2,5}$ koncentrācijai ir 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} – 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vidējās diennakts emisiju koncentrācijas $PM_{2,5}$ ir līdz 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} – 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [13].

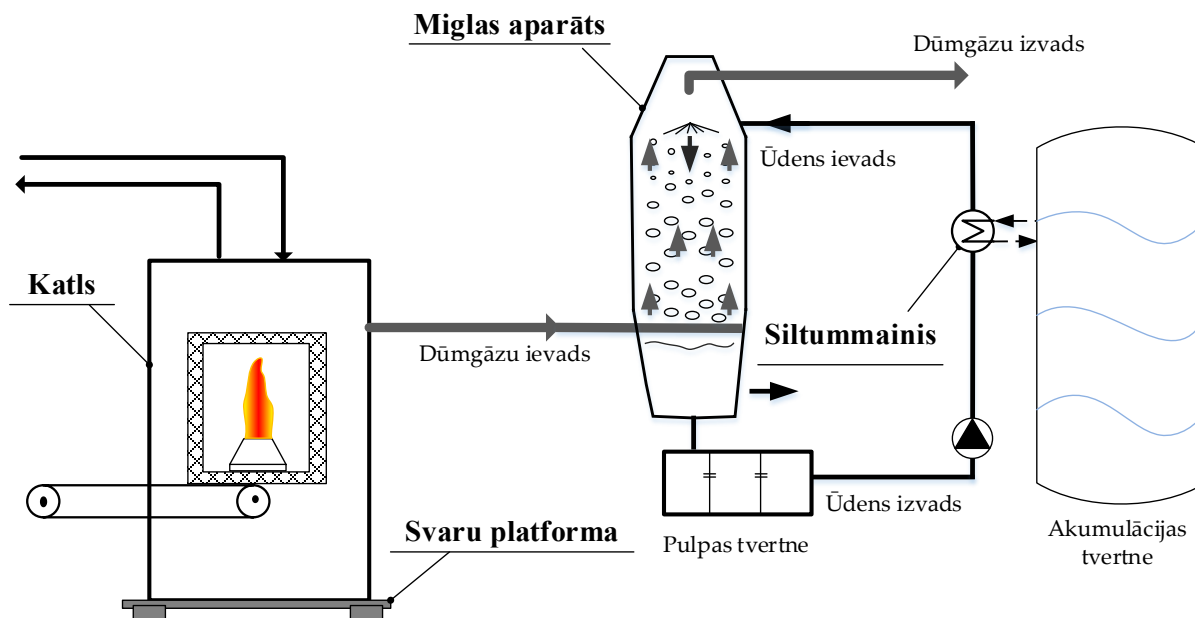
Darbā izstrādātais modelis veidots, izmantojot modelēšanas valodu *Python*, kas ir brīvpieejas no platformas neatkarīga, uz objektu orientēta un universāla programmēšanas valoda, kas ir ātrāka un sasniedz augstākas klases rezultātus, salīdzinot ar *Java* vai *C* programmēšanas valodām. Tā ieguvusi popularitāti pēdējo gadu laikā plašā lietojuma un padziļinātās sintakses dēļ. Programma nodrošina kompaktāku problēmas attēlošanu, tādējādi samazinot modeļa izstrādes laiku un uzturēšanas izmaksas. Plaša pamata bibliotēka un vairāki tūkstoši papildu bibliotēku nodrošina programmu izstrādātājus ar augstas kvalitātes risinājumiem, ko viegli iekļaut esošās sistēmās, lai sasniegtu praktiski jebkuru mērķi [14].

Python izmantošanas piemērs ir izstrādāts defektu analīzes rīks (*PyCDT*), lai veiktu defektu aprēķinus kopā ar plaši izmantotām blīvuma funkcionālās teorijas programmām. Rīks sniedz piekļuvi materiālu datubāzei, kas ļauj analizēt iespējamus punktveida defektus dažādiem materiāliem [15]. *SAMT2* ir uzlabots telpiskās analīzes un modelēšanas rīks *Python* moduļa veidā. Rīks ir plaši izmantojams – viegli pielāgojams un uzlabojams, bez izmantoto datu tipu izmaiņām [16]. Cits *Python* izmantošanas piemērs – to lieto kā nenoteiktību analīzes rīku vides modelēšanā. Modelis balstās Beijesa lineārajā teorijā (*Bayes linear theory*) jeb lineārā pirmās pakāpes otrā mirkļa nenoteiktības analīzē, ietverot uzlabotu lietotāju pusi. Modeļa mērķis ir uzlabot resursu pārvaldību ar papildu nenoteiktību analīzēm. To iespējams pielāgot dažādām vides sistēmām, ja modeļa darbībai izmanto teksta failus un rezultātus var nolasīt no failiem bez papildu apstrādes. Aprēķinus pārraksta programmas kodā. Iteratīva procesa izpētes gadījumā, kurā meklē tuvāko atbilstošo novērojumu, aprēķinu veic atkārtoti pat tūkstošiem reižu, kas noteikšanas laiku pagarina līdz stundai vai vairāk [17]. Teksta datņu izmantošana un iteratīvs aprēķinu process ir nozīmīgs arī šajā darbā izstrādātā modeļa gadījumā.

2. EKSPERIMENTI MIGLAS APARĀTA DARBĪBAS ANALĪZEI

2.1. Miglas aparāta eksperimentālais stends

Miglas aparāta (MA) eksperimentālo stendu veido piecas daļas: cietā kurināmā katls, MA reaktors, dūmvads dūmgāzu pievadīšanai un izvadīšanai ar mēriekārtu pieslēgumiem, hidrauliskā sistēma un pulpas tvertne (2.1. att.).



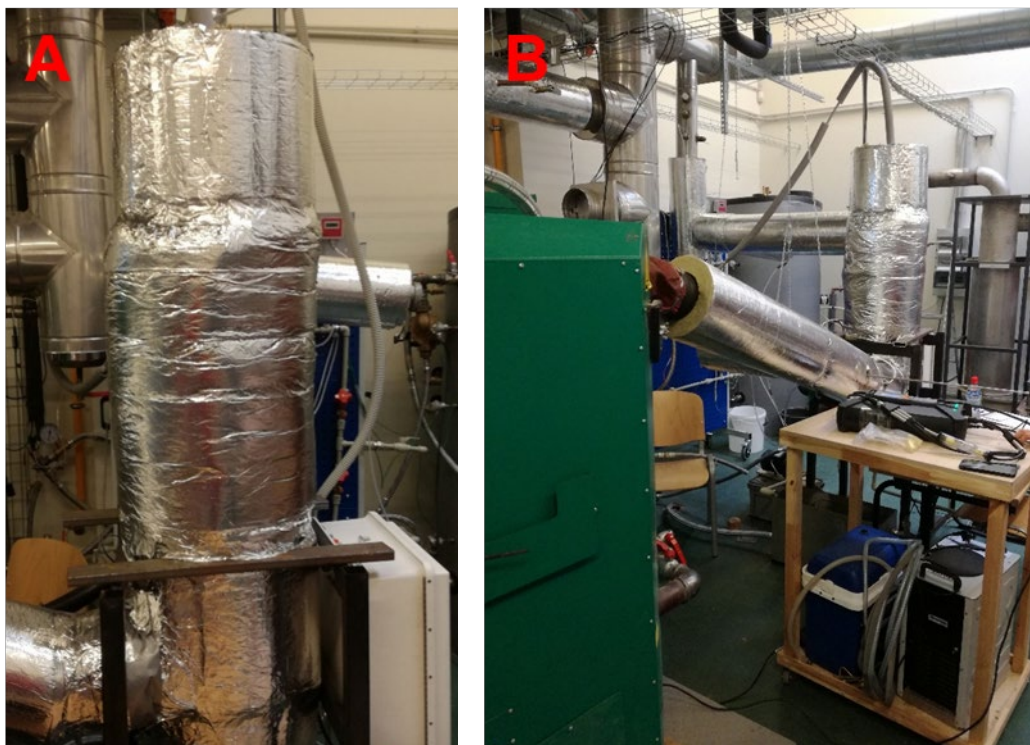
2.1. att. MA eksperimentālā stenda shēma.

Eksperimentālā stenda izveide ietvēra atsevišķu stenda sastāvdaļu testēšanu laboratorijas vidē. Sistēmā izmantots granulu katls *Grandeg Bio-25*, kas nodrošina nepieciešamo jaudu, saražotā siltuma un dūmgāzu daudzumu. Katls savienots ar MA, izmantojot dūmvadu, kurā izveidoti vairāki pieslēgumi mērinstrumentu sensoriem – dūmgāzu analizatoram *Testo 350*, higrometram, temperatūras sensoriem un diferenciāla spiediena mērītājam. Dūmvadā papildus ir izvietots pieslēgums *PM* mērīšanas zondes ievietošanai.

MA ir uzstādīts aiz katla, tam ir korpuss (2.2. att.), izsmidzināšanas sprausla, dūmgāzu ievads un izvads, pulpas tvertne, ūdens pievadcaurule un atdalītājs. Iekārtas apakšā izvietots dūmgāzu ievads, pie kura pievienots katla dūmvads. Dūmgāzes, nonākot iekārtas korpusā, virzās uz MA augšējo daļu, kur atrodas dūmgāzu izvads un ūdens pievadcaurules. Pievadcaurules galā atrodas sprausla, caur kuru ūdeni iesmidzina aparātā. Viss kondensatora reaktors ir noklāts ar siltumizolācijas materiālu, lai samazinātu iekārtas siltuma zudumus apkārtējā vidē. Iekārtas darbība balstās uz ūdens iesmidzināšanas rezultātā izveidotu sīku pilienu jeb miglas zonu, kurā iesmidzinātais ūdens sajaucas ar pretī plūstošajām dūmgāzēm. Norit tieša kontakta siltuma un masas apmaiņa starp dūmgāzēm un ūdeni, ar pilienu palīdzību tiek uztvertas *PM*, ko novada uz pulpas tvertni.

Pēc MA ir pievienots dūmvads attīrīto dūmgāzu novadīšanai uz skursteni un pēc tam apkārtējā vidē. Dūmvadā uzreiz pēc MA ir ievietotas metāla skaidiņas, kas aizkavē ūdens

pilienu nokļūšanu un nosēšanos dūmvados ārpus MA. Tajā ir izvietoti pieslēgumi temperatūras sensoram, higrometram, diferenciālā spiediena mērītājam, kā arī *PM* mērīšanas iekārtas zondei. Augšdaļā aiz MA skursteņa ir izvietots dūmsūcējs, lai nodrošinātu nepieciešamo vilkmi dūmgāzu izvadīšanai caur iekārtu.



2.2. att. MA eksperimentālajā stendā
(A – MA tuvplānā; B – MA no katla puses).

Hidrauliskā sistēma sastāv no ūdens pievadcaurulēm, stiprinājumiem un pārejām. Caurulēs ir izveidoti pieslēgumi manometriem, ūdens plūsmas mērītājiem, atgaisotājam un temperatūras sensoriem. Ar hidrauliskās sistēmas un sprauslu palīdzību ūdens nonāk MA, tad no MA ūdens ar uztvertajām *PM* nonāk pelnu pulpas tvertnē. Ar cirkulācijas sūkņa palīdzību ūdens no pulpas tvertnes nonāk siltummaiņā, kurā tiek atgūts siltums no ūdens, kas cirkulē caur MA, lai iesmidzinātā ūdens temperatūra saglabātos vienāda. Atgūto siltumu uzkrāj akumulācijas tvertnē, kuras tilpums ir 500 l. Cirkulācijas sūknis ir aprīkots ar frekvenču pārveidotāju, ūdens caurplūdes regulācijai. Pēc siltummaiņa ūdeni padod atpakaļ uz MA.

Ūdens attīrīšanai paredzētā pulpas tvertne sastāv no nelielas metāla kastes, kas ar metāla plākšņu palīdzību ir sadalīta trīs daļās. Katrai pulpas tvertnes plāksnei vidū ir izurbts caurums, lai nodrošinātu ūdens aizplūšanu no vienas tvertnes puses uz otru. Tālāk ūdeni ar cirkulācijas sūkņa palīdzību novada atpakaļ uz MA. Visvairāk *PM* nogulsņējas pirmajā tvertnes daļā, vismazāk – pēdējā pulpas tvertnes daļā. Paralēli MA izstrādei norit jaunas pelnu pulpas attīrīšanas iekārtas izstrāde un pilnveide. Sākotnējo nostādināšanas tvertnes risinājumu plānots aizstāt ar kompakto *PM* nostādinātāju. Tā ir jauna un efektīva tehnoloģija, kas nodrošina *PM* atdalīšanu no ūdens, lai ūdeni būtu iespējams atgriezt atpakaļ MA sistēmā bez papildu risku radīšanas. Iekārtas darbības princips un prototips balstīts uz radiālo nostādinātāju. Pelnu pulpas

attīrīšanas iekārtas izstrāde un pārbaude aprakstīta O. Švedova u. c. pētījumos, tādēļ šajā darbā šī sistēmas sastāvdaļa sīkāk netiek aplūkota [18], [19].

Mitruma satura mēriekārtu pārbaudes veiktas pie 32 %, 75 % un 94 % relatīvā mitruma satura (RH), izmantojot klimata kameru un izšķīdušā sāls metodi. Pārbaudēs izmantotie sāļi bija MgCl (32 % RH); NaCl (75 % RH) un KNO₃ (94 % RH). Lielākā absolūtā nobīde, kas novērota vienam no sensoriem, bija 0,6 % RH jeb relatīvi 2,5 %. Nobīdes vērtības ņemtas vērā, izstrādājot vienādojumu korekcijas koeficienta aprēķināšanai. Vienādojumu ievada datu reģistratorā, saglabājot oriģinālos datus un vienlaikus aprēķinot koriģēto vērtību.

Dūmgāzu analizators *Testo 350* kalibrēts laboratorijas apstākļos. To pieslēdz pie speciāliem gāzes baloniem, kuros iepildīts O₂, CO₂, CO un NO gāzes maisījums. Gāzes balonos esošajām gāzēm ir zināma koncentrācija, tādēļ tās ir piemērotas kalibrācijas veikšanai. Kalibrācija veikta vismaz reizi mēnesī vai ik pēc katriem 10 testiem.

Sprauslu raksturojums, izvēle un testēšana (2.3. att.) sīkāk veikta atsevišķā pētījumā un aprakstīta darbā [20]. Galvenie sprauslas raksturojošie parametri ir: izsmidzināšanas spiediens un leņķis; iesmidzinātā ūdens ātrums; izsmidzināšanas augstums; izsmidzināšanas konuss. Šie parametri savukārt ietekmē sprauslas radīto noklājumu un ūdens pilienu diametru. [20].



2.3. att. Sprauslu testēšana [20].

MA sistēmai izvēlētas pilna konusa sprauslas, kas rada aizpildītu ūdens pilienu plūsmu, to izsmidzināšanas leņķim pie 3 bāru ūdens spiediena jābūt 90° un jānodrošina iesmidzinātā ūdens daudzums aptuveni 3,7 l/min pie 2 bāru spiediena. Sprauslas izsmidzināšanas augstums MA ir nemainīgs, tādēļ sprauslu pārbaudes testos tas netika mainīts. Izmantots vienāds iesmidzinātā ūdens daudzums, lai noteiktu, kā atkarībā no sprauslas izmēra mainās izsmidzināšanas leņķis. Šaurākie izsmidzināšanas leņķi iegūti ar lielāko sprauslu, platākie leņķi – ar mazāko sprauslu [20].

Noskaidrots, ka sprauslas veidotais izsmidzinātā ūdens konuss nav viendabīgs. Atsevišķos punktos nolijušā ūdens daudzums ir 2–3 reizes lielāks par citiem punktiem. Pilienu izmēri un

kustības ātrums noteikts, izmantojot fotofiksāciju. Izmidzināšanas process filmēts ar 100 kadriem sekundē, un izmantoti 1/20 000 sekundē gari gaismas impulsi, lai iegūtu nekustīgu pilienu attēlus. Fiksējot atsaucē skalu, noteikts ūdens pilienu izmērs metriskās vienībās [20].

Cieto daļiņu mērījumu procedūra

PM mērījumu procedūra ir ļoti rūpīgs process, ko veic ar augstu precizitāti. Iegūtie rezultāti ir būtiski, lai noteiktu iekārtas *PM* uztveršanas efektivitāti. *PM* mērījumu procesu var iedalīt piecās daļās: filtru izvēle; trauciņu sagatavošana; filtru sagatavošana; filtru izmantošana eksperimentos; filtru analīze. Filtri iegādāti, ņemot vērā *LVS EN ISO:9096* [21] standarta prasības, pēc kurām īstenoti eksperimenti. Arī *PM* mērīšanas iekārta atbilst minētajam standartam. Eksperimentos lietotie filtri ir apaļas formas, izgatavoti no stikla šķiedras vai kvarca.

Pirms *PM* mērījuma sākšanas filtru ievieto zondes uzgalī. Pirms testa veic iekārtas hermetizācijas pārbaudi (*leak check*). Iekārtas datu panelī ievada vairākus ar dūmvadu saistītus parametrus – mērījumu vietas dziļumu un rādiusu, dūmvada formu, dūmgāzu parametrus (skābekļa un CO₂ saturu dūmvadā), kā arī testa ilgumu. Pēc datu ievadīšanas sāk eksperimentu. *PM* mērījumi MA veikti pēc *LVS EN ISO 9096:2017* standarta prasībām. Gan pirms, gan pēc MA *PM* mērījumiem izmantotā metode ir manuālā *PM* koncentrācijas noteikšana standarta apstākļos no stacionāra emisiju avota. Parauga ņemšana norit, izmantojot iekšējās filtrācijas metodi izokinētiskos apstākļos. Izokinētiskajā paraugu ņemšanā ievadītās gāzes ātrums un virziens paraugu ņemšanas zondē ir tāds pats, kāds tas ir dūmvadā attiecīgajā parauga ņemšanas punktā.



2.4. att. Filtri ar dažādām cieto daļiņu koncentrācijām.

Izmantojot filtra sākuma un beigu masu, noteikta masas starpība. Ar *PM* mēriekārtu noteikts iesūknētais dūmgāzu daudzums, ko tālāk attiecina pret nosvērto *PM* daudzumu, rezultātā iegūstot *PM* koncentrāciju. *PM* koncentrācijas uz filtriem ir atšķirīgas, kā redzams 2.4. attēlā. Gaišākas krāsas filtri ir ar zemākām *PM* koncentrācijām, tie izmantoti mērījumos pie mazāka iesmidzinātā ūdens daudzuma iekārtā. Filtri ir numurēti attiecīgi no kreisās uz labo – 5., 4., 3. un 2. 5. filtrs izmantots *PM* mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma 200 l/h, 4. filtrs izmantots mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma 150 l/h, 3. filtrs izmantots mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma 50 l/h, savukārt 2. filtrs izmantots sākotnējās *PM* koncentrācijas noteikšanai pirms MA pēc granulu katla bez iesmidzināšanas. Līdzīga situācija novērojama pie visām izmantotajām sprauslām.

2.2. Eksperimenta īstenošana

Eksperimentu īstenošanai definēti pieci mainīgie parametri, kas raksturo dūmgāzes un iekārtā iesmidzināto ūdeni: iesmidzinātā ūdens temperatūra; iesmidzinātā ūdens daudzums; iesmidzinātā ūdens pilienu diametrs; dūmgāzu plūsma; dūmgāzu temperatūra iekārtas ievadā.

Iesmidzinātā ūdens temperatūra t_{w1} nosaka, cik daudz siltumenerģijas tiek atgūts no dūmgāzēm, kas plūst cauri MA. Testu laikā izmantotas trīs veidu iesmidzinātā ūdens temperatūras, noapaļoti: 20 °C, 30 °C un 40 °C. Cits svarīgs mainīgais faktors, kas ietekmē absolūto mitrumu, atgūto siltumenerģiju, PM uztveršanu un dūmgāzu temperatūru, ir **iesmidzinātais ūdens daudzums G jeb ūdens caurplūde** caur MA. Sākotnējos eksperimentos izmantotas caurplūdes robežās no aptuveni 50 l/h līdz 250 l/h ar izmaiņu soli 50 l/h. **Iesmidzinātā ūdens pilienu sākuma diametrs d_{i0}** ir vēl viens ūdeni raksturojošais parametrs, kas tieši saistīts ar sprauslu un tās izmēru. Eksperimentos izmantotas trīs izmēru *MaxiPass L* sprauslas (*MPL* sprauslas nr.) – *MPL 0.77*, *MPL 1.12* un *MPL 1.51* (2.5. att.). Šīs sprauslas ir izturīgas pret aizsērēšanu, tajās iespējams izmantot ūdeni ar nelielu cieto daļiņu piemaisījumu, kas ir būtiska priekšrocība.

Galvenie eksperimentu laikā kontrolējamie parametri, kas saistīti ar dūmgāzēm, ir dūmgāzu plūsma un dūmgāzu temperatūra iekārtas ievadā. Abi parametri ir atkarīgi no katla parametriem – jaudas, efektivitātes, darbināšanas režīma. Sākotnējos eksperimentos pārbaudītās **dūmgāzu plūsmas (V_g)** ir robežās no 0,0194 Nm³/s līdz 0,0226 Nm³/s, savukārt **dūmgāzu temperatūra (t_{g1})** pēc katla un pirms MA ir robežās no 130,8 °C līdz 135,2 °C. Šie parametri mainās minimāli, jo sistēmas pārbaude veikta pie nemainīgiem katla parametriem.



2.5. att. Eksperimentos izmantotās sprauslas.

Aprēķināti pilienu diametri pie dažādām caurplūdēm un sprauslām. Aprēķinā izmantoti vairāku testu rezultāti. Pilienu diametrs pie katras caurplūdes un sprauslas izmēra rēķināts četras reizes, lai iegūtu precīzāku vidējo vērtību. Iegūtie pilienu diametri aprēķināti, izmantojot sprauslas ražotāju sniegto vienādojumu:

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-0,3} \quad (2.1.)$$

kur: D_2 – piliena diametrs, kas tiek aprēķināts (μm);
 D_1 – piliena diametrs pie atsauces spiediena (μm);
 P_2 – testos izmantotais ūdens spiediens (bar);
 P_1 – atsauces ūdens spiediens (bar).

Aprēķinātie pilienu diametri pie dažādām sprauslām un ūdens caurplūdēm

		Caurplūde, l/h			
		50	150	200	250
Sprausla <i>MPL 0.77</i>	Pilienu diametrs, μm	307	192	161	–
		315	198	166	–
		316	198	166	–
		320	200	168	–
		Vidējā vērtība	314	197	165
	Sprausla <i>MPL 1.12</i>	Pilienu diametrs, μm	451	270	–
453			272	–	201
478			287	–	212
450			270	–	200
Vidējā vērtība		458	275	–	203
Sprausla <i>MPL 1.51</i>	Pilienu diametrs, μm	794	398	–	275
		786	394	–	272
		786	394	–	273
		785	393	–	272
	Vidējā vērtība	788	395	–	273

Lielākie pilienu diametri – līdz $794 \mu\text{m}$ – iegūti pie caurplūdes 50 l/h . Mazākie pilienu diametri – līdz $192 \mu\text{m}$ – iegūti pie caurplūdes 250 l/h . Novērojamas būtiskas atšķirības pilienu diametros atkarībā no izmantotās sprauslas. Piemēram, pilienu diametrs sprauslai *MPL 1.51* pie ūdens caurplūdes 50 l/h vidēji ir $788 \mu\text{m}$, savukārt sprauslai *MPL 0.77* – $314 \mu\text{m}$.

3. APRĒĶINA MODELIS MIGLAS APARĀTA DARBĪBAS ANALĪZEI

3.1. Piliena pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā

MA paredzēts mitru gāzu attīrīšanai, iesmidzinot tajās ūdeni. Ūdens pilieni mijiedarbojas ar gāzu plūsmu un PM , notiek tvaika kondensācija un PM uztveršana. Tieša kontakta kondensatoros nākas saskarties ar procesiem starp mitrām gāzēm un izkliedētiem ūdens pilieniem [22].

Pārvietošanās laikā daļa pilienu saskaras (*collision*), tā rezultātā tie vai nu saplūst (*coalescence*), vai arī sadalās mazāka izmēra pilienos. Saplūšanas efektivitāte ir augsta, tā novērojama vairumā saskares gadījumu. Tās rezultātā pilienu diametru sadalījums kļūst polidisperss. Pilienu saskares efektivitāte ir apgriezti proporcionāla pilienu diametram. Lielāka izmēra pilieni atgrūž ļoti maza izmēra pilienus, jo zem liela diametra pilienu veidojas saspiestas gāzes slānis [23]. Modeļa izveidē noteiktie pieņēmumi ir:

- pilienu un PM sadalījums ir viendabīgs ar noteiktu sākuma diametru, attiecīgi d_{d0} un d_p ;
- pilienu tilpuma un virsmas temperatūra to mazo izmēru dēļ ir vienāda;
- PM ātrums un temperatūra ir vienāda ar gāzes ātrumu un temperatūru;
- siltuma apmaiņā neņem vērā radiācijas siltumu, jo procesa temperatūra ir zema;
- pieņem, ka pilienu saplūšana un sadalīšanās to saskares rezultātā ir vienāda;
- sauso gāzu plūsma aparātā ir nemainīga;
- pilieni ir sfēriski;
- pilienu kustībā netiek ņemti vērā Arhimēda spēki;
- neievēro gāzes plūsmas izmaiņas PM uztveršanas rezultātā;
- PM uztveršana notiek inerces mehānisma darbības rezultātā;
- gāze aplūkojama kā ideāla gāze, kurai piemērojams gāzes stāvokļa vienādojums.

Pilienu kustība un mitru gāzu plūsma aparātā ir pretēji vērstas. Pilienu masa procesā mainās un kondensācijas gadījumā palielinās. Siltuma un masas apmaiņas procesi norit tad, kad pilieni atrodas miglas aparātā. Z ass virziens ir pretējs pilienu kustības virzienam, tāpēc masas izmaiņas, ja virzošais spēks ir tvaika parciālo spiedienu starpība, var izteikt šādi:

$$\frac{dm_d}{dz} = -\beta \frac{\pi d_d^2}{H} M_v (p_b - p^{sat}), \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \quad (3.1)$$

Piesātināta tvaika parciālā spiediena noteikšanai izmantota formula [24]:

$$p^{sat} = 610,78 \exp\left(\frac{17,27 \times t_s}{t_s + 237,3}\right) \quad (3.2)$$

Tvaika parciālo spiedienu gāzes plūsmā nosaka, izmantojot gāzes mitruma saturu:

$$p_b(t_b) = \frac{p\omega}{0,622 + \omega} \quad (3.3)$$

Mitras gāzes pilns spiediens ir sastāvdaļu parciālo spiedienu summa:

$$p = p_{dg} + p_{vb} \quad (3.4)$$

Iekārtās, kurās nav paaugstināta spiediena, pieņem, ka pilns spiediens $p = 101\,325$ Pa.

Aplūkojot piliena vertikālu kustību gāzes plūsmā, noteikti vairāki ātrumi: piliena nogulsšanās ātrums gāzē (*terminal velocity*); plūsmas ātrums; piliena ātrums aparātā. Piliena patiesais ātrums plūsmā nosaka laiku, cik ilgi piliens atrodas aparātā. Ātrums ir vektoriāls lielums, ko raksturo vērtība un virziens. Lai noteiktu ūdens piliena ātrumu aparātā u_r , jāaplūko spēki, kas darbojas uz pilienu: smaguma spēks, tam pretēji vērtais Arhimēda spēks; piliena frontālās pretestības spēks. Piliens kustēsies ar ātrumu u_r , ja starp spēkiem būs līdzsvars. Sfēriskam pilienam nogulsšanās ātrumu nekustīgā gāzē nosaka šādi:

$$u_t = \sqrt{\frac{4(\rho_w - \rho_g)gd_d}{3\rho_g C_D}}, \text{ m/s} \quad (3.5.)$$

Saistību starp piliena nogulsšanās, relatīvo, piliena un gāzes ātrumu nosaka [25]:

$$u_t = u_r = u_d + u_g, \text{ m/s} \quad (3.6.)$$

Vides pretestības koeficients ir atkarīgs no piliena krišanas režīma, tāpēc tā noteikšanai ir jāzina kustības režīmu raksturojošs Re skaitlis, kurā arī ietilpst u_r :

$$Re = \frac{u_r d_d \rho_g}{\mu_g} \quad (3.7.)$$

Sakarības starp nogulsšanās ātrumu un vides pretestības koeficientu nosaka gravitācijas un pretestības spēku bilance. Aprēķinus sarežģī tas, ka C_D nav konstants un dažādiem kustību režīmiem vides pretestības koeficienta izmaiņas nosaka dažādi atšķirīgi likumi: Stoksa (*Stokes*), Osenā (*Oseen*) un Goldsteina (*Goldstein*). Katrs likums ir spēkā šaurā Re izmaiņu diapazonā. Paplašinot Re izmaiņu diapazonu, praksē izmanto empīriskas vai pusempīriskas vides pretestības koeficienta aprēķina formulas [26]. Autori [27] piedāvā vienotu sakarību Re izmaiņas diapazonam $0,1 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$, kas atspoguļota turpinājumā:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,197Re^{0,63} + 2,6 \times 10^{-4} Re^{1,38}) \quad (3.8.)$$

Aprēķinos izmanto pakāpeniskas tuvināšanas jeb iterācijas metodes. Pieņem Re vērtību un, izmantojot 3.8. vienādojumu, aprēķina vides pretestības koeficientu. Izmantojot 3.6. izteiksmi, aprēķina piliena relatīvo ātrumu, izmantojot 3.7. izteiksmi, – Re vērtību. Aprēķinu atkārto, līdz iegūtā vērtība sakrīt ar pieņemto. Turpmākajos aprēķinos jāizmanto iepriekš iterācijas procesā noteiktās u_r un Re vērtības.

Uz daļiņu, kas kustas gāzes plūsmā, iedarbojas divi spēki – gravitācijas spēks un pretēji daļiņas kustībai vērsts berzes spēks. Arhimēda spēks gāzē ir mazs, tāpēc to var neņemt vērā. Piliena ātruma izmaiņas gāzes plūsmā var izteikt ar vienādojumu:

$$\frac{du_d}{dz} = \frac{3C_D u_r \mu_g Re}{4\rho_w d_d^2 u_d} - \frac{g}{u_d}, \text{ m/(m} \cdot \text{s)} \quad (3.9.)$$

Piliena diametra izmaiņas ir saistītas ar piliena masas izmaiņām ūdens tvaika kondensācijas rezultātā. Šajā gadījumā netiek aplūkotas ar pilienu saskari saistītās pilienu diametru izmaiņas. Piliena diametra izmaiņas nosaka ar vienādojumu:

$$\frac{dd_d}{dz} = -\frac{2\beta_p M_v (p_b - p^{sat})}{\rho_w u_d}, \text{ m/m} \quad (3.10.)$$

Jāpievērš uzmanība tam, ka 3.10. vienādojums nosaka diametra izmaiņas konkrētā posmā – elementā. Lai noteiktu diametra vērtību elementa izejā, diametra pieaugumam jāpievieno tā vērtība elementa ieejā. Piliena sākuma diametrs d_{d0} pieņemts vai aprēķināts, ja zināms pilienu diametru sadalījuma likums pēc sprauslas [28].

3.2. Piliena cieto daļiņu uztveršana

Pilienam virzoties cauri piesārņotas gāzes plūsmai, tas uztver PM un attīra gāzi. Pieņemts, ka daļiņas un gāze virzās ar vienādu ātrumu un nav PM un gāzes relatīvās kustības. Mitros skruberos ir inerces, satveršanas un difūzijas PM uztveršanas mehānismi [29]. Specifiskos gadījumos var darboties arī difūzās forēzes, termoforēzes, elektriskā lauka u. c. mehānismi [30]. Iesmidzināšanas skruberos kurināmā degšanas produktu PM uztveršanā noteicošais ir inerces mehānisms [31]. Piliena PM uztveršanas efektivitāti inerces mehānisma gadījumā var aprēķināt šādi [32]:

$$\eta_d = \left(\frac{Stk}{Stk+0,35} \right)^2 \quad (3.11.)$$

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p u_r c_c}{18 \mu_w g d_d} \quad (3.12.)$$

Kaninghama labojuma faktors ir vērā ņemams tad, ja daļiņas izmērs ir mazāks par 15 μm (0,015 mm). Lielāka diametra daļiņām faktors ir aptuveni 1,33.

Tiešā kontakta kondensatoros siltuma un masas apmaiņas virsmu veido ievadītā ūdens pilienu un gāzes fāžu pārejas virsma, kas ir mainīga, un galvenokārt atkarīga no plūsmu hidrodinamiskajiem režīmiem. Paaugstināta mitruma satura un zemas ūdens temperatūras rezultātā notiek intensīva tvaiku kondensācija uz pilienu virsmas, un tā diametrs palielinās, gāzes mitruma saturs samazinās. Mitras gāzes plūsmu aplūko kā sausas gāzes un ūdens tvaika maisījuma plūsmu. Gāzu mitruma saturs ir mitras gāzes ūdens tvaika masas attiecība pret sausas gāzes masu, ko var izteikt šādi:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{dg}} = -\frac{\Delta m_g}{m_{dg}} = \frac{\Delta m_w}{m_{dg}}, \text{ kg/kg}_{dg} \quad (3.13.)$$

Kondensācijas procesa virzītājspēks ir plūsmas tvaika parciālā spiediena un piesātinājuma spiediena uz pilienu virsmas starpība. Mitruma kondensācija uz pilienu virsmas izmaina tā masu. Kondensāta izmaiņas aparātā iegūst, reizinot abas puses ar pilienu skaitu. Ievērojot sakarību starp kondensāta izmaiņām un mitruma saturu (3.13. vienādojums), iegūst mitruma satura aprēķina gala izteiksmi:

$$\frac{d\omega}{dz} = -\frac{6V_w \beta_p d_d^2 M_v (p_b - p^{sat})}{d_{d0}^3 u_d m_{dg}}, \text{ kg/kg}_{dg} \quad (3.14.)$$

kur V_w – iesmidzināmā ūdens plūsma, m^3/s .

Piesārņotās gāzes ievada MA lejas daļā, un tās virzās augšup. Ūdens pilienu veidā virzās pretēji gāzes plūsmai. Saskaroties pilieniem ar PM , notiek daļiņu uztveršana un PM koncentrācijas samazināšana mitru gāzu plūsmā. Lai vērtētu PM uztveršanas efektivitāti, ir jāzina daļiņu apjoms, kas vienlaikus aizpilda aparāta tilpumu (aizpildījums, *holdup*). Aizpildījumu ietekmē iesmidzinātā šķidrums daudzums un daļiņu kustības ātrums aparātā. Iesmidzinātā ūdens daudzumu nosaka ūdens un gāzes tilpuma attiecība. PM_{10} uztveršanai, ja pilienu izmērs ir no 0,5 mm līdz 2,0 mm, šo attiecību rekomendē [32] izvēlēties 0,7 l/m³ līdz 2,7 l/m³ robežās. Danzomola B. A. u. c. (*Bashir Ahmed Danzomol, et. al.*) veiktie eksperimentālie pētījumi liecina, ka optimāla PM uztveršana ir vērojama, ja pilienu diametrs ir 0,5 mm un ūdens un gāzes attiecība – 2,7 l/m³. Attiecību var izteikt kā $0,0027 V_w, m^3 / V_g, m^3$. Jāatzīmē, ka aizpildījums raksturo situāciju, kurā ātrums ir nemainīgs. Ja gāzes plūsma ir nemainīga, tad koncentrācijas izmaiņas var noteikt šādi [32]:

$$\frac{c_{p iz}}{c_{p ie}} = \exp\left(-\frac{1,5G_w u_r Z \eta_d}{V_{wgp}(u_r - u_{wg})d_d}\right) \quad (3.15.)$$

Ir jāievēro, ka daļiņas ātrums ir mainīgs, jo, kondensējoties tvaikam no mitrām gāzēm uz pilieniem, mainās gāzes plūsma aparātā. Daļiņu ātrums mainās, mainoties arī gāzes temperatūrai. Ja tiek pieņemts, ka gāzes plūsmas izmaiņas ir saistītas tikai ar temperatūras izmaiņām, tad, izmantojot gāzes stāvokļa vienādojumu, var rakstīt šādi:

$$\frac{dV_g}{V_g} = \frac{dt_g}{t_g} \quad (3.16.)$$

Ievērojot pēdējo sakarību, koncentrācijas izmaiņas aparātā var izteikt šādi:

$$\frac{dc_p}{dz} = -\frac{1,5c_p u_r \eta_d V_w d_d^2 \Delta Z}{u_d d_{d0}^3 V_g} - \frac{c_p dt_g}{(273+t_g)}, \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}) \quad (3.17.)$$

Šajā vienādojumā jāņem vērā, ka ir veikta virkne pieņēmumu: nav ievērotas gāzes plūsmas izmaiņas tvaiku kondensācijas un cieto daļiņu uztveršanas rezultātā.

Siltuma un masas apmaiņa starp pilieniem un mitru piesārņotu gāzes plūsmu

Ja starp pilieniem un gāzēm notiek siltuma un masas apmaiņa, tad piliena temperatūra mainās. Izmaiņas var noteikt, aplūkojot piliena siltuma bilances vienādojumu, kas saista piliena siltuma izmaiņas Z ass virzienā ar siltuma apmaiņas ceļā pievadīto siltumu, mitru gāzu tvaika kondensācijas siltumu un uztverto cieto daļiņu pienesto siltumu:

$$\frac{dQ_d}{dz} = \frac{dQ_{ht}}{dz} + \frac{dQ_c}{dz} + \frac{dQ_p}{dz}, \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}) \quad (3.18.)$$

Pilienu temperatūra Z ass virzienā samazinās. Gāzes plūsmas temperatūra mainās saistībā ar siltuma atdevi siltuma apmaiņas rezultātā ar ūdens pilieniem, ūdens tvaika pārnesi masas pārejas ceļā uz pilieniem un siltuma pārnesi no gāzes uz pilieniem ar uztvertajām PM . Ir jāņem vērā visu pilienu virsmas laukums, jo caur to notiek saskare starp abiem siltumnesējiem. Ir jāzina pilienu skaits aparātā.

Lielums n_d nosaka, cik pilienu ir aparātā laika vienībā. Pieņemot, ka pilieni nesaplūst un nedalās, bet vienīgi pieaug to masa un tilpums, pilienu daudzumu var noteikt, iesmidzināmā

ūdens tilpuma plūsmu dalot ar piliena sākuma tilpumu. Balstoties uz pilienu skaitu aparātā vienā sekundē, aprēķina kopējo pilienu skaitu aparāta tilpumā.

$$n_{sk} = \frac{6V_w H}{\pi d_{d0}^3 u_d} \quad (3.19.)$$

Ievērojot pilienu skaitu, no gāzes plūsmas siltuma bilances var izteikt temperatūras izmaiņas elementā.

$$\frac{dt_g}{dZ} = \frac{6V_w d_d^2}{d_{d0}^3 u_d m_g c_{pg}} \left[-\alpha(t_g - t_d) - \beta_p M_v c_{pv} (p_b - p^{sat})(t_g - t_d) - \frac{1}{4} C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_d) \right] \quad (3.20.)$$

Siltuma un masas apmaiņas koeficientu aprēķinam izmantotas Ranza un Maršala sakarības (*the Ranz and Marshall correlation*), kas piedāvātas darbā [33]:

$$Nu = \frac{\alpha d_d}{\lambda_g} = 2 + 0,6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (3.21.)$$

$$Sh = \frac{\beta_c d_d}{D_v} = 2 + 0,6 Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (3.22.)$$

Līdzības skaitļu aprēķinam izmanto šādas izteiksmes:

$$Re = \frac{\rho_g u_r d_d}{\mu_g}$$

$$Pr = \frac{\mu_g c_{pg}}{\lambda_g} \quad (3.23.-3.25.)$$

$$Sc = \frac{V_g}{D_v} = \frac{\mu_g}{D_v \rho_g}$$

3.3. Modeļa realizācijas algoritms

Modeļa galvenie rezultāti ir parametru izmaiņas iekārtā, ko raksturo seši pamatvienādojumi.

$$\frac{dt_g}{dZ} = \frac{n_{sk} \pi d_d^2 \Delta Z}{u_d m_g c_{pg}} \left[-\alpha(t_g - t_w) - \beta_p M_v c_{pv} (p_b - p^{sat})(t_g - t_w) - \frac{1}{4} C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_w) \right] \quad (3.26.)$$

$$\frac{dt_w}{dZ} = \frac{n_{sk} \pi d_d^2 \Delta Z}{V_w \rho_w c_{pw} u_d} \left[-\alpha(t_g - t_w) - \beta_p M_v c_{pv} (p_b - p^{sat}) \right] r + c_{pv} (t_g - t_w) - 1,5 C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_w) \quad (3.27.)$$

$$\frac{dd_d}{dZ} = - \frac{2\beta_p M_v (p_b - p^{sat}) \Delta Z}{\rho_w u_d} \quad (3.28.)$$

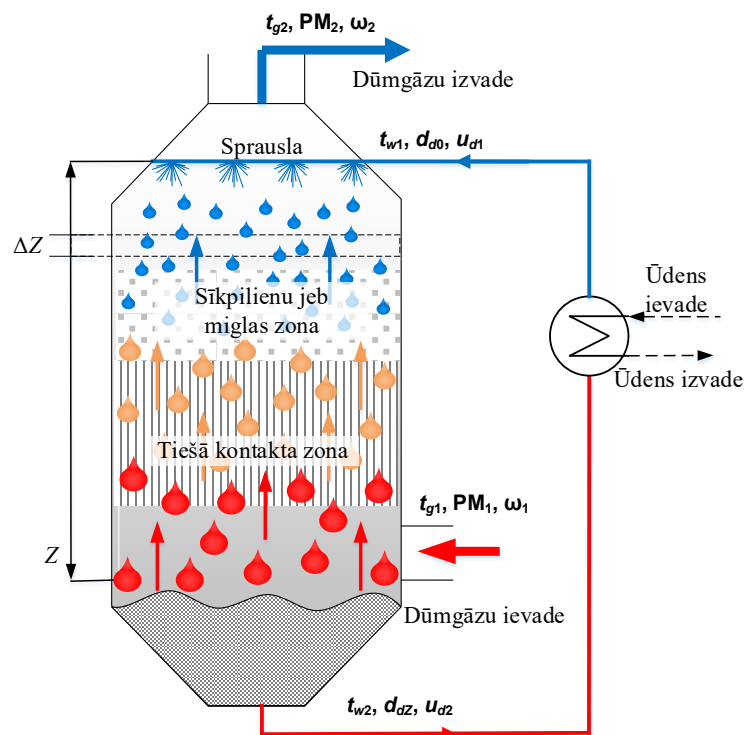
$$\frac{du_d}{dZ} = - \frac{3C_D u_r \mu_g Re \Delta Z}{4\rho_w d_d^2 u_d} + \frac{g \Delta Z}{u_d} \quad (3.29.)$$

$$\frac{dc_p}{dZ} = - \frac{n_{sk} 0,25 C_p u_r \eta_d \pi d_d^2 \Delta Z}{u_d V_g} + \frac{c_p dt_g}{(273+t_g)} \quad (3.30.)$$

$$\frac{d\omega}{dZ} = - \frac{n_{sk}\beta_p\pi d_d^2 M_v (p_b - p^{sat}) \Delta Z}{u_d m_{dg}} \quad (3.31.)$$

Programma, kas ietver MA aprēķina modeli, rakstīta *PYTHON 3.7*, izmantojot *Visual Studio 2019*. Galvenie parametri, kuru izmaiņas aplūkotas modelī, ir: iesmidzinātā ūdens temperatūra; dūmgāzu temperatūra; iesmidzinātā ūdens pilienu diametrs un ātrums; cieta daļiņu koncentrācija; gāzes mitruma saturs. Izmantojot iegūtos modeļa datus, aprēķināta MA jauda. Modeļa izveidē veiktie pieņēmumi aprakstīti 3.1. apakšnodaļā “Pilienu pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā”. Programmā ir vairāki iterācijas cikli. Aprēķins ietver četras galvenās darbību kopas:

- 1) siltumfizikālo parametru aprēķinu augstumā Z ;
- 2) Re skaitļa aprēķinu;
- 3) individuālā elementa aprēķinu;
- 4) parametru izmaiņu aprēķinu elementa izejā.



3.1. att. Modeļa darbības princips MA shēmā.

Aprēķinu atkārto līdz brīdim, kad parametri noteikti visā iekārtas augstumā un ūdens temperatūras, pilienu diametru izmaiņas ir atbilstošas noteiktajam izmaiņu diapazonam (3.2. att.). Aprēķins tiek veikts pa soļiem:

- 1) ievada sensoru mērījumus un konstantes;
- 2) nosaka elementa augstumu ΔZ (parametru izmaiņu soli);
- 3) nosaka ūdens pilienu diametru un temperatūras sākuma vērtības aprēķinā;
- 4) nosaka ūdens pilienu diametru un temperatūras atšķirības robežas ar ievaddatiem;
- 5) aprēķina siltumfizikālos parametrus konkrētā augstumā Z ;

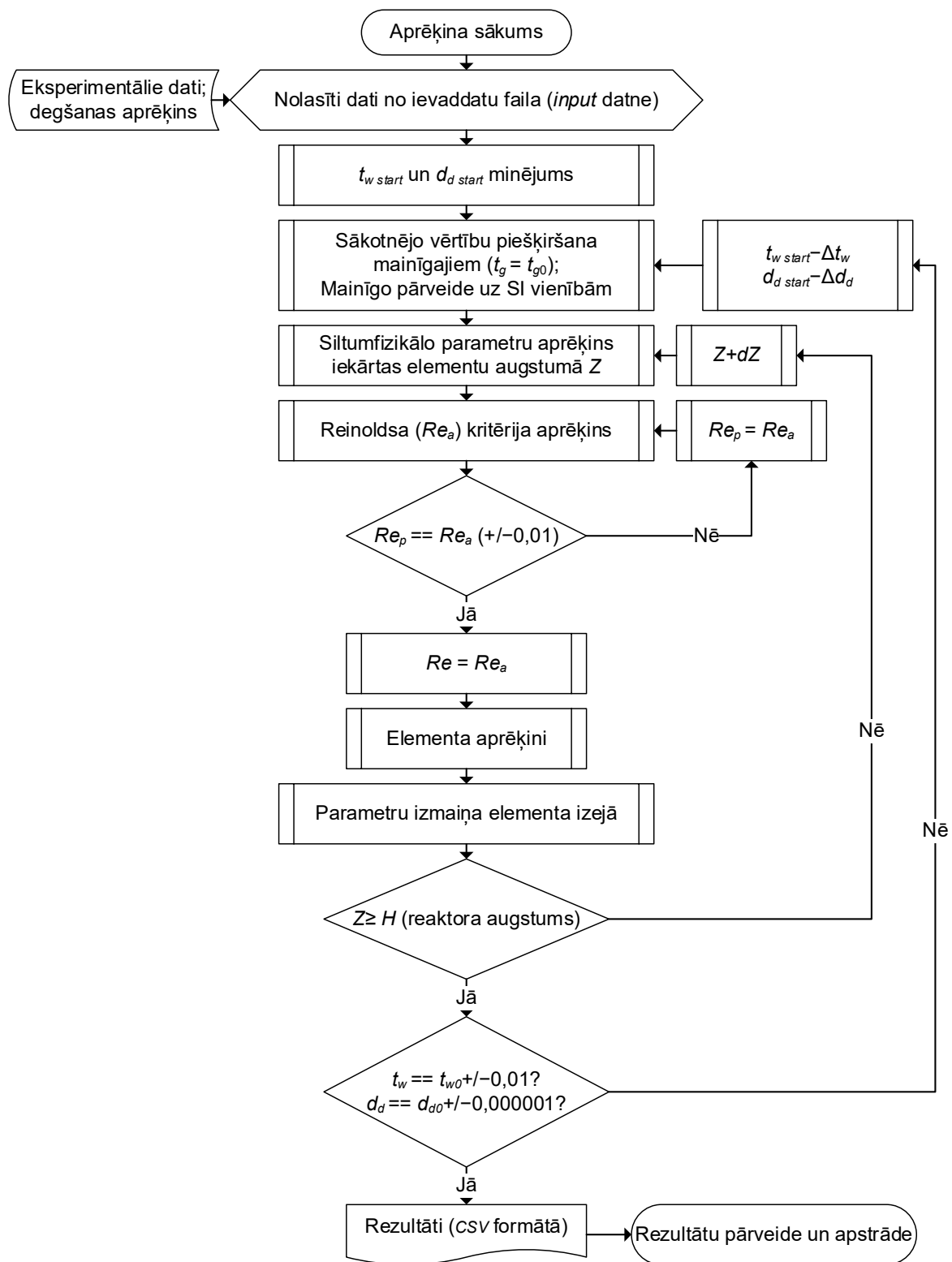
- 6) pieņem sākotnējo Re (ievadā);
- 7) aprēķina reālo Re konkrētajā situācijā;
- 8) nosaka reālā un pieņemtā Re atšķirības robežas;
- 9) ar aprēķināto Re turpina elementa aprēķinus;
- 10) aprēķini parametru izmaiņām elementa izejā (tiek veikti iekārtas augstumā līdz $Z \geq H$, kur H ir iekārtas pilnais augstums);
- 11) pārbauda ūdens temperatūras un pilienu diametru atbilstību ievaddatiem;
- 12) izvada gala rezultātus, apkopotus *csv* (*comma-separated values*) failā.

Siltumfizikālo parametru aprēķins ietver siltumietilpību, blīvumu, dinamiskās viskozitātes, siltumvadītspējas koeficientu aprēķinu dūmgāzu komponentēm, aprēķinus difūzijas koeficientam starp vidēm, ūdens fāžu pārejas siltumam. Papildus aprēķināti dažādi siltuma un masas apmaiņu raksturojošie skaitļi, piemēram, Pr skaitlis. Iekļauti vienādojumi, kas raksturo PM uztveršanu ūdenī, kā arī izmaiņu aprēķins elementos. Galvenie izvades dati ir dūmgāzu temperatūras, ūdens temperatūras, pilienu diametra, pilienu ātruma, cieto daļiņu koncentrācijas un dūmgāzu mitruma satura izmaiņas.

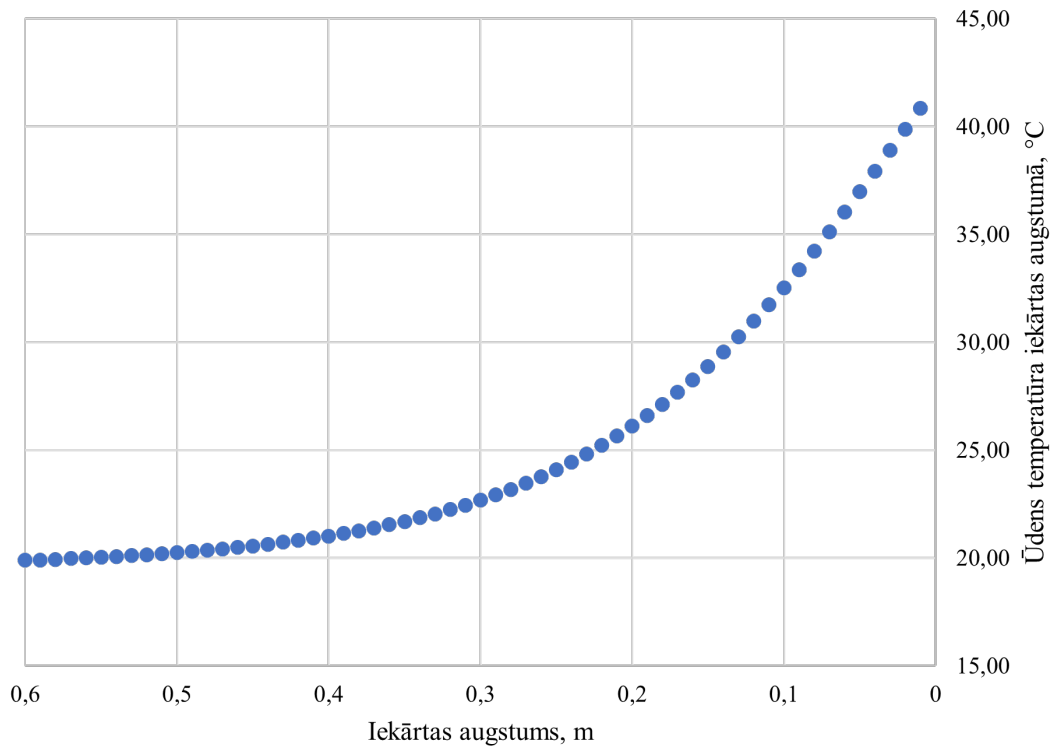
Sensora rādījumi un sagaidāmie rezultāti tiek ievadīti ievades datnē atbilstoši tajā sniegtajiem norādījumiem. Palaižot programmu, atveras logs, kurā atspoguļotas aprēķina beigu darbības. Programmas rezultāts tiek automātiski saglabāts *csv* datnē. Programma papildus piedāvā attēlot interaktīvus grafikus, ko var palielināt, samazināt vai pietuvināt.

Ievaddatu datnē jānosaka elementa izmērs, kam veiks aprēķinu. Jāievada konstantes, kas ietver katla augstumu, CO_2 , N_2 un H_2O molmasas, gāzu konstante un gravitācijas paātrinājums. Ciklā neiesaistītie lielumi, kas nepieciešami siltumfizikālo parametru aprēķinam un nolasāmi eksperimentu laikā, ir: ūdens tilpums; sausu gāzu un tvaika masas plūsmas; CO_2 , N_2 un gaisa masas plūsmas; CO_2 , sausu gāzu, N_2 , tvaika un gaisa tilpums; gaisa patēriņa koeficients; atmosfēras spiediens; cietās daļiņas diametrs un blīvums.

Ciklā iesaistītie lielumi, ko nolasa eksperimentu laikā, ir ieejas dūmgāzu un ūdens temperatūra, ieejas ūdens pilienu diametrs, ieejas dūmgāzu mitruma saturs un masa, ieejas dūmgāzu plūsmas ātrums un PM koncentrācija, kā arī ieejas dūmgāzu tilpums.



3.2. att. Izstrādātā modeļa aprēķina algoritms.



3.3. att. Modelētās iesmidzinātā ūdens temperatūras izmaiņas iekārtas augstumā.

Izvaddati attēloti izvēlētajos elementos visas iekārtas augstumā, piemēram, ja iekārtas augstums ir 0,6 m un elementa augstums ir 0,01 m, tad aplūkojamas parametru izmaiņas 60 elementos. Piemērs, kas atspoguļo iesmidzinātā ūdens temperatūras izmaiņas iekārtas augstumā, redzams 3.3. attēlā. Ūdeni iekārtā iesmidzina no augšas, tādēļ tā temperatūra pieaug, tuvojoties apakšai. Šajā gadījumā modelēts režīms: katla jauda – 20 kW, iesmidzinātā ūdens daudzums – ap 150 l/h, iesmidzinātā ūdens temperatūra – ap 20 °C.

4. REZULTĀTI

MA sistēmas eksperimenti veikti, izmantojot granulu katlu, ar iespēju mainīt darbības parametrus, lai sasniegtu darbināšanas jaudu diapazonā no 10 kW līdz 30 kW. Ūdens iesmidzināšanai izmantotas trīs dažāda izmēra sprauslas: *MPL 0.77*, *MPL 1.12* un *MPL 1.51*. Sprauslas ir izturīgas pret aizsērēšanu, tajās var izmantot ūdeni ar nelielu piejaukumu daļu.

4.1. Eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti

Galvenie mainīgie parametri eksperimentos ir iesmidzinātais ūdens daudzums (caurplūde, G , l/h), ūdens temperatūra kondensatora ievadā (t_{w1} , °C) un sākotnējais pilienu diametrs (d_{d0} , μm). Diametrs cieši saistīts ar izmantotās sprauslas parametriem (iesmidzināšanas spiediens, sprauslas izmērs). Dūmgāzu temperatūras izmaiņas ir saistītas ar katla jaudu un skābekļa daudzumu dūmgāzēs.

4.1. tabula

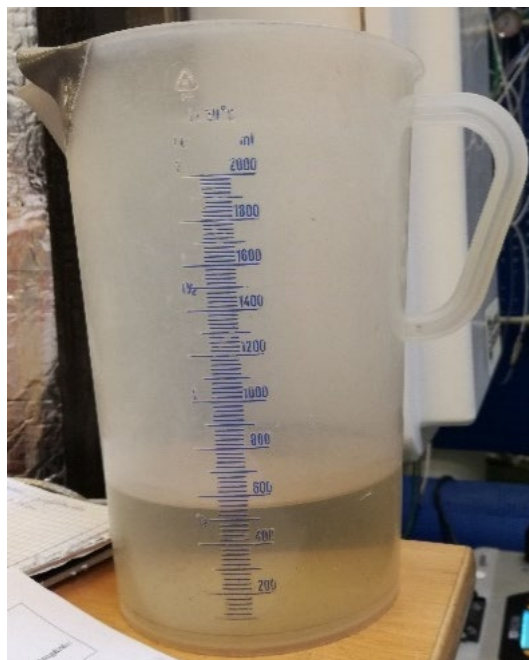
Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantotas dažādas sprauslas

Parametrs/ Izmantotā sprausla	<i>MPL 1.51</i>	<i>MPL 1.12</i>	<i>MPL 0.77</i>
G , l/h	49,2–250,3	51,8–252,5	49,0–201,3
t_{w1} , °C	19,7–40,5	19,7–40,9	19,4–39,8
Q , kW	0,51–2,56	0,50–2,63	0,52–2,49
d_{d0} , μm	297–503	263–457	249–379
t_{g1} , °C	130,8–135,2	130,8	130,8
t_{g2} , °C	28,6–77,6	28,0–74,2	29,0–70,4
O ₂ , %	10,9–11,3	10,2–11,6	10,7–11,7
$C_{p\ ie}$, mg/Nm ³	36,2	36,2	36,2
$C_{p\ iz}$, mg/Nm ³	8,2–22,8	8,2–24,2	10,4–26,3
ΔC_p , %	37,0–77,2	33,1–77,3	27,2–71,2
Eksperimentu skaits	9	9	9

Pie granulu katla jaudas 20 kW veikti eksperimenti ar visām sprauslām. *PM* koncentrācija pirms aparāta visos gadījumos mērīta atsevišķos eksperimentos, un atsaucei pieņemta vidējā iegūtā koncentrācija, jo katls vienmēr darbojas vienādā režīmā. Pilienu diametri noteikti atbilstoši sprauslu ražotāju sniegtajam aprēķinam. Sprauslai *MPL 1.51* tie ir robežās no 297 μm līdz 503 μm. Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 28,6 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču šajā gadījumā novērota arī pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados.

Pie vidējās sprauslas *MPL 1.12* veiktajos eksperimentos pilienu diametri ir robežās no 263 μm līdz 457 μm. Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 28,0 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču arī šajā gadījumā novērota pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados. Visos eksperimentos pie 20 kW katla jaudas, skābekļa koncentrācija dūmgāzēs bija aptuveni 10–12 %, tādēļ novērojamas nelielas atšķirības sākotnējā dūmgāzu temperatūrā.

Pie mazākās sprauslas *MPL 0.77* veiktajos eksperimentos pilienu diametri ir robežās no 249 μm līdz 376 μm . Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 29,0 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču arī šajā gadījumā pie lielākās caurplūdes novērota pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados (4.1. att.).



4.1. att. No dūmvadā izvietotās cieto daļiņu mērījumu vietas novadītais ūdens.

Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, novērojama pilienu aiznese ārpus MA. Pie PM mērījumu punkta, dūmvadā aiz kondensatora, izvietota liekā ūdens novadīšanas caurule, un testu laikā novērota izteikta ūdens uzkrāšanās sistēmā aiz kondensatora. Attēlā redzamais ūdens daudzums novadīts no dūmvada viena testa laikā (30 min). Šajos gadījumos novērota arī PM mērījumu filtru izjukšana augstā mitruma satura dēļ, kas veidojas dūmvados.

Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie lielākās iesmidzinātā ūdens caurplūdes. Šajā gadījumā novērota arī intensīvākā pilienu aiznese ārpus iekārtas. Šie eksperimenti kalpoja kā iekārtas darbības pārbaude pie dažādiem katla darbības parametriem. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izvēlēta galvenā izsmidzināšanas sprausla, kas sniedz iespēju nodrošināt plašu caurplūdes diapazonu un potenciāli arī augstāko efektivitāti pie dažādām katla jaudām.

4.2. Miglas aparāta veiktspējas pārbaudes rezultāti

Iekārtas veiktspējas pārbaude veikta laboratorijas apstākļos, kas pēc iespējas pietuvināti reālai situācijai, kas novērojama mājāsaimniecībās. Pārbaudītais kurināmais ir augstākās klases koksnes granulas. Ūdens iesmidzināšanai iekārtā izmantota sprausla *MPL 1.51*, kas nodrošina optimālākās caurplūdes un pilienu diametrus robežās no 224 μm līdz 509 μm atkarībā no spiediena uz sprauslas uzgali. Konkrētā sprausla izvēlēta, balstoties uz sistēmas pārbaudes eksperimentālajiem rezultātiem dažādos apstākļos. Sistēmas parametri pie pārbaudītajām jaudām apkopoti 4.2. tabulā.

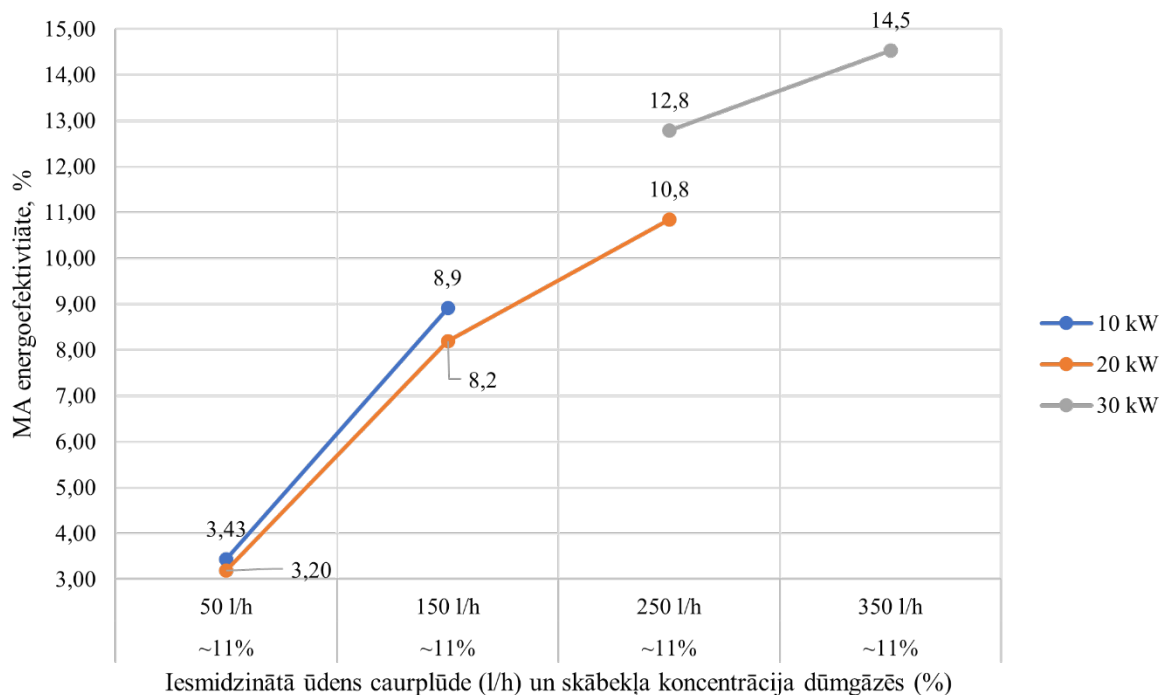
MA sistēmas parametri pie dažādām katla jaudām

	10 kW	20 kW	30 kW
O ₂ dūmgāzēs, %	7,5–10,9	10,4–11,2	7,6–10,9
Iesmidzinātais ūdens daudzums, l/h	45,5–160,2	49,2–240,9	261,5–341,7
<i>t</i> _{w1} pirms MA, °C	19,4–19,9	19,7–20,2	19,6–20,3
<i>t</i> _{w2} pēc MA, °C	24,9–29,4	28,9–34,3	29,9–35,2
Atgūtais siltums, kW	0,5–1,1	0,7–2,6	4,1–5,2
MA energoefektivitāte, %	3,7–8,8	3,2–10,8	11,1–14,5
Kopējā sistēmas efektivitāte, %	89,2–97,0	87,6–97,7	95,0–96,8
<i>PM</i> pirms MA, mg/Nm ³	52,6–69,3	36,2	59,1–106,6
<i>PM</i> pēc MA, mg/Nm ³	17,1–35,5	15,5–24,2	28,9–44,8
<i>PM</i> uztveršanas efektivitāte, %	48,8–67,5	33,1–57,1	45,5–67,9
Dūmgāzu parametri			
<i>t</i> _{g1} pirms MA, °C	87,5–97,0	130,8–135,2	157,9–180,6
Relatīvais mitrums pirms MA, %	2,4–3,2	2,4–3,2	2,4–3,2
<i>t</i> _{g2} pēc MA, °C	29,1–52,1	28,6–74,1	30,3–36,2
Relatīvais mitrums pēc MA, %	45,1–85,6	16,0–89,2	89,5–92,3
Absolūtais mitrums pēc MA, g/kg _{dg}	22,1–50,9	22,1–38,8	25,8–36,2
Spiediena starpība pēc MA, Pa	no –9,2 līdz –22,0	no –11,6 līdz –20,7	no –15,0 līdz –19,9

Papildus, ņemot vērā sistēmas pārbaudes rezultātus, secināts, ka visaugstākos kondensatora veiktspējas rezultātus ir iespējams sasniegt, smidzinot MA ūdeni ar zemāko temperatūru 20 °C. Līdz ar to netika veikti prototipa veiktspējas mērījumi pie iesmidzinātas ūdens temperatūras 30 °C un 40 °C. 4.2. tabulā apkopotie rezultāti raksturo kopējo situāciju pie katras pārbaudītās katla jaudas. MA energoefektivitāte aprēķināta pēc 4.1. formulas, kurā iekļauts vidējais testa ilgums 30 min jeb 0,5 h.

$$\eta_{fu} = \frac{Q \times 0,5}{Q_{con}} \times 100, \quad (4.1.)$$

Dati uzrāda, ka vismazākais *PM* samazinājums ir pie katla jaudas 20 kW. Tas saistīts ar to, ka katls darbojas nominālos jeb optimālos apstākļiem un *PM* koncentrācija jau sākotnēji ir zema, vidēji 36,2 mg/Nm³, tādēļ arī MA ir grūti panākt maksimāli augstāko dūmgāzu attīrīšanas pakāpi, jo pēc faktiskajiem skaitļiem pēc MA 15,5–24,2 mg/Nm³ jau ir ļoti zema koncentrācija. Kopējā sistēmas efektivitāte ir robežās no 87,6 % līdz 97,7 %. Gan augstākā, gan zemākā sistēmas efektivitāte sasniegta pie nominālās katla jaudas – 20 kW.



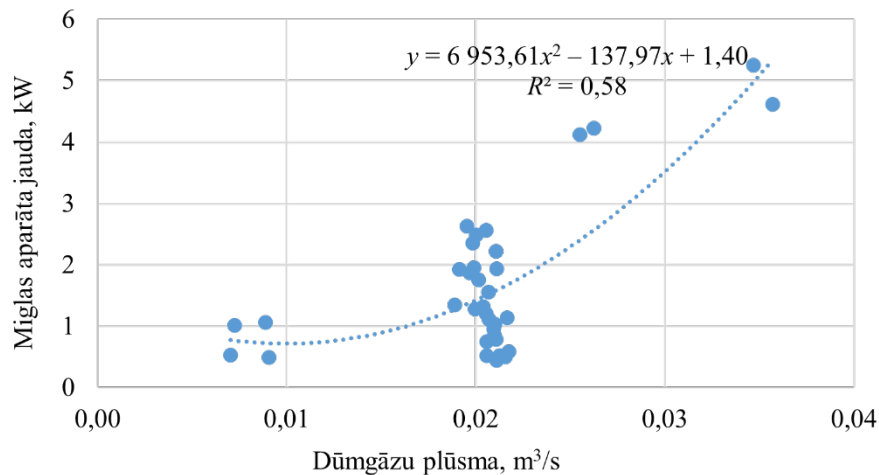
4.2. att. MA energoefektivitāte atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma pie noteiktas skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.

MA sasniegtā energoefektivitāte pie skābekļa satura dūmgāzēs ~ 11 % pie katras no aplūkotajām jaudām atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma redzama 4.2. attēlā. Augstākā MA efektivitāte – 14,5 % – sasniegta, ja katla jauda ir 30 kW, izmantojot arī lielāko iesmidzinātā ūdens daudzumu – aptuveni 340 l/h. Savukārt zemākā MA efektivitāte – 3,2 % – novērota, ja katla jauda ir 20 kW, iesmidzinātā ūdens daudzums – aptuveni 50 l/h. Svarīgi ir tas, ka, pieaugot katla jaudai, pieaug dūmgāzu temperatūra. Aplūkotajā gadījumā dūmgāzēs temperatūra pirms MA, ja katla jauda ir 10 kW, svārstās no 88 °C līdz 97 °C, savukārt, ja katla jauda ir 30 kW, tā svārstās robežās no 158 °C līdz 181 °C atkarībā no katlam pievadītā gaisa daudzuma un skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.

Pieaugot dūmgāzu temperatūrai, pieaug arī siltuma zudumi ar aizejošām dūmgāzēm. Rezultātā ar dūmgāzēm tiek aizvests noteikts daudzums siltumenerģijas, ko papildus var atgūt ar MA. Faktiski tas nozīmē: jo lielāka ir dūmgāzu temperatūra pirms MA, jo potenciāli lielāku energoefektivitāti MA var sasniegt. Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, novērojama ievērojama ūdens aiznese ārpus MA. Šis novērojums deva impulsu idejai par pielikumu uztveršanas slāņa – metāla skaidiņu – ievietošanu MA, papildus no turpmākajiem eksperimentiem izslēdzot lielāko iesmidzinātā ūdens daudzumu izmantošanu. *PM* rezultātus pirms MA papildus ietekmē katla īpatnības – efektivitātes izmaiņas atkarībā no izvēlētajiem darbības parametriem. Augstāko katla efektivitāti iespējams sasniegt, ja katla jauda ir nominālā, šajā gadījumā 20 kW. Pārbaudītās sistēmas katla efektivitāte atkarībā no izvēlētajās darbības jaudas ir robežās no 82,3 % līdz 88,0 %, zemākā efektivitāte ir, ja katla jauda ir 30 kW, augstākā efektivitāte, ja – 10 kW. Kopējā sasniegtā sistēmas efektivitāte, ņemot vērā katla un MA

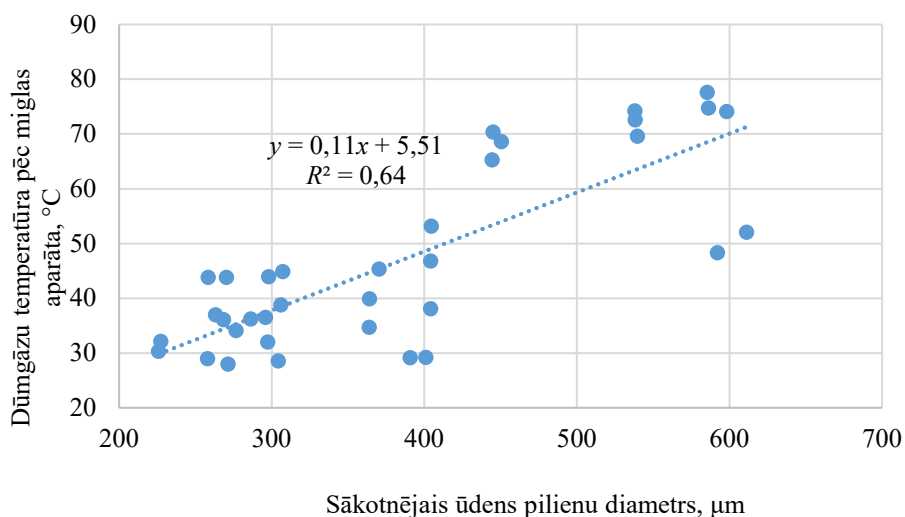
sasniegto efektivitāti, ir robežās no 87,6 % līdz 97,7 %, kas jebkurā gadījumā paaugstina kopējo sistēmas efektivitāti un apliecina MA lietderību un funkcionalitāti sistēmā.

Eksperimentu dati papildus analizēti, lai noteiktu parametru savstarpējās mijiedarbības. 4.4. attēlā redzamas MA jaudas izmaiņas atkarībā no dūmgāzu plūsmas. MA jauda pieaug, pieaugot dūmgāzu un iesmidzinātā ūdens plūsmām, savukārt jaudas samazinājumu vistiešāk ietekmē iesmidzinātā ūdens temperatūra. Starp dūmgāzu plūsmu un MA jauda novērojama vidēji cieša korelācija, determinācijas koeficients ir ap 0,58. Sakarības tendenci raksturo polinoms vienādojums, kas redzams 4.3. attēla grafikā.



4.3. att. MA jauda atkarībā dūmgāzu plūsmas.

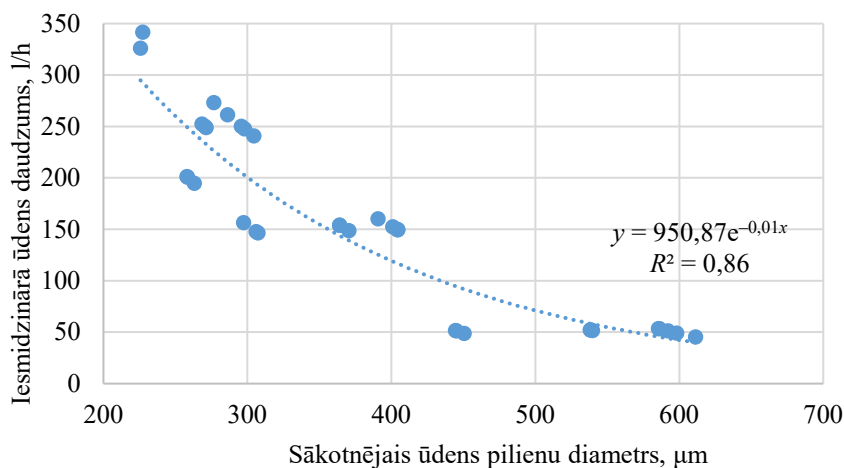
Regresijas analīze veikta ne tikai MA jaudu ietekmējošiem parametriem, bet arī galveno parametru datiem savstarpēji. Kā redzams 4.4. attēlā, meklējot matemātisko sakarību starp dūmgāzu temperatūru MA izejā un sākotnējo ūdens pilienu diametru, iegūta vidēji cieša korelācija starp datiem, determinācijas koeficients ir 0,64. Konkrētajā gadījumā iegūta lineāra saistība, kas redzama 4.4. attēlā.



4.4. att. Dūmgāzu temperatūra pēc MA atkarībā no sākotnējā ūdens pilienu diametra.

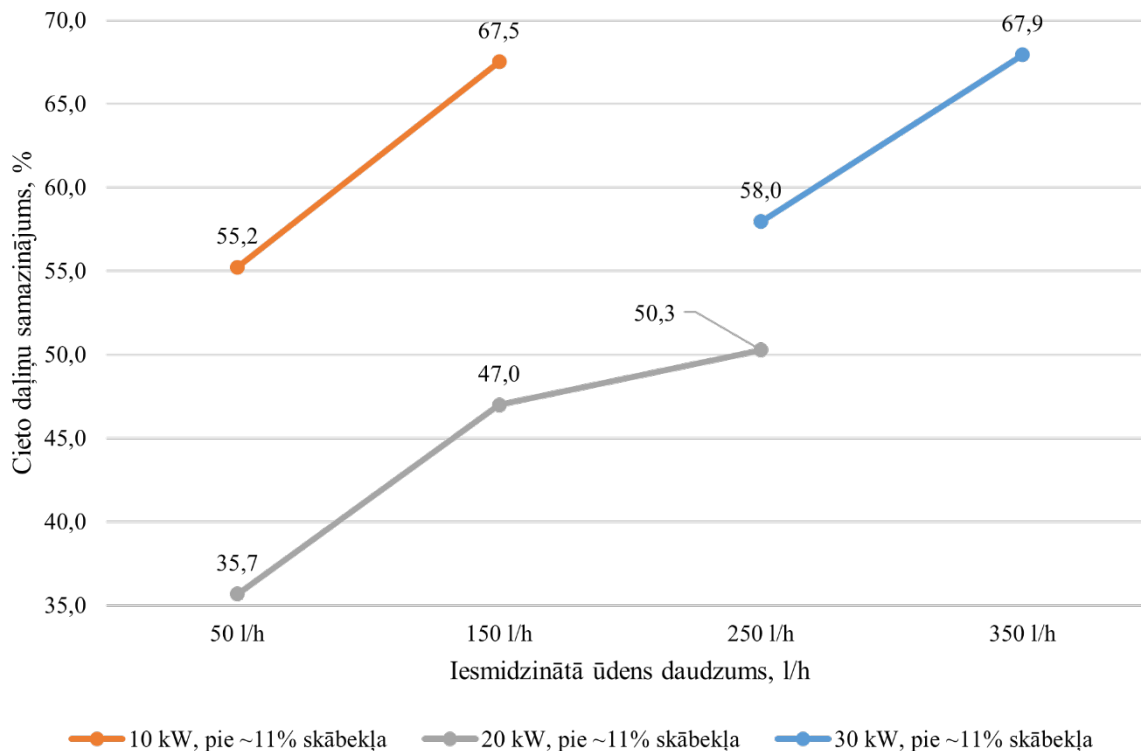
Augstāka dūmgāzu temperatūra pēc MA novērota gadījumos, kad iesmidzinātā ūdens temperatūra ir augstāka un ir lielāks pilienu diametrs. Pie augstākas dūmgāzu temperatūras novērojama arī izteikta datu izkliede.

Paaugstinot iesmidzinātā ūdens daudzumu, ūdens temperatūra MA izejā un visā aparātā pieaug. Tas nozīmē, ka pieaug arī starpība starp dūmgāzu un ūdens temperatūru, un konvektīvā siltuma apmaiņa kļūst intensīvāka. Lai palielinātu iesmidzinātā ūdens daudzumu, ir nepieciešams paaugstināt spiedienu uz izsmidzināšanas sprauslu, tādējādi nodrošinot mazākus pilienu diametrus (4.5. att.).



4.5. att. Iesmidzinātā ūdens daudzums atkarībā no ūdens pilienu diametra.

Mazāka diametra pilieni veido lielāku fāžu pārejas virsmu. Ņemot vērā to, ka siltumapmaiņas virsmu MA ierobežo iekārtas diametrs, kas ir loģisks secinājums. Mazāki pilieni virsmu aizpilda pilnīgāk nekā lielāki pilieni, un dūmgāzēm ir mazāk iespēju virzīties cauri virsmas spraugām, attiecīgi tām ir jāvirzās cauri virsmai. Tā rezultātā uzlabojas gan siltuma, gan masas apmaiņa, kā arī pieaug MA siltuma jauda.



4.6. att. *PM* samazinājums atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma pie dažādām katla jaudām un vienāda skābekļa satura dūmgāzēs.

PM līmenis pirms un pēc MA pie katras katla jaudas redzams 4.6. attēlā. Šajā gadījumā salīdzināti dati pie aptuveni 11 % skābekļa satura dūmgāzēs, jo šajos apstākļos veikti eksperimenti pie visām aplūkotajām jaudām. Pie 10 kW katla jaudas *PM* koncentrācija pirms MA vidēji bija 52,6 mg/Nm³. Savukārt sasniegtā *PM* koncentrācija pēc MA ir robežās no 17,1 mg/Nm³ līdz 35,5 mg/Nm³, sasniedzot *PM* samazinājumu līdz 67,5 %. Iesmidzinātā ūdens temperatūra bija ap 20 °C visos testos pie konkrētās jaudas. Kā redzams 4.6. attēlā, lielākais *PM* koncentrācijas samazinājums sasniegts pie lielākā iesmidzinātā ūdens daudzuma.

Vidējā *PM* koncentrācija pirms MA, katlam darbojoties ar jaudu 20 kW ir 36,2 mg/Nm³. Savukārt sasniegtā *PM* koncentrācija pēc MA pie šīs katla jaudas vidēji ir robežās no 18,0 mg/Nm³ līdz 23,3 mg/Nm³, sasniedzot *PM* samazinājumu līdz 50,3 %. Lielākais samazinājums *PM* koncentrācijā pēc MA aplūkotajos režīmos novērojams, ja iesmidzināmā ūdens temperatūra ir ap 20 °C, iesmidzinātā ūdens daudzums ~250 l/h. Zemāks *PM* samazinājums pie 20 kW katla jaudas novērojams divu iemeslu dēļ: pirmkārt, *PM* koncentrācija pirms MA ir nemainīga visos gadījumos; otrkārt, testi pie 10 kW un 30 kW veikti pēc MA uzlabošanas – ūdens separatora ieviešanas, lai samazinātu ūdens pilienu aiznesi pēc iekārtas. Pie 30 kW katla jaudas *PM* koncentrācija pirms MA ir 106,6 mg/Nm³ pie skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs 11 %. Lielākais *PM* samazinājums – 67,9% – ir sasniegts pie iesmidzinātā ūdens daudzuma ~350 l/h.

Balstoties uz veikto MA sistēmas pārbaudi mākslīgi radītā vidē, var secināt, ka *PM* uztveršanas efektivitāte ir atkarīga ne tikai no MA darbības parametriem, bet arī no sākotnējās *PM* koncentrācijas. Kopumā *PM* koncentrācija aiz katla jeb pirms MA viszemākā ir pie jaudas

20 kW – 36,2 mg/Nm³. Pie 10 kW katla jaudas *PM* koncentrācija aiz katla ir 52,6 mg/Nm³ un 69,3 mg/Nm³ atkarībā no skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs. Savukārt pie 30 kW katla jaudas *PM* koncentrācija aiz katla ir 59,1 mg/Nm³ un 106,6 mg/Nm³ atkarībā no skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs. Šos rezultātus var skaidrot ar to, ka visi eksperimenti veikti ar vienu katlu, mainot tā jaudu ar kurināmā patēriņu. Katla nominālā jauda ir 20 kW, pie tās sasniedzama augstākā efektivitāte un pilnīgākā kurināmā sadegšana. Katlam strādājot ar samazinātu jaudu, samazinās arī temperatūra kurtuvē un efektivitāte, kā arī pieaug radītā emisiju koncentrācija. Katlam strādājot ar paaugstinātu jaudu, būtiski pieaug radītais dūmgāzu apjoms, un tā rezultātā palielinās dūmgāzu plūsma. Tas negatīvi ietekmē siltumapmaiņu, un tā rezultātā samazinās katla efektivitāte. Turklāt, ja palielinās dūmgāzu plūsma, katlā ievadītais kurināmais sadalās nepilnīgi, paaugstinot radīto emisiju koncentrāciju. To apliecina arī eksperimentu rezultāti.

Eksperimentālā stenda veiktspējas analīze liecina par to, ka ar izstrādāto sistēmu ir iespējams veikt efektīvu *PM* attīrīšanu. Tomēr sistēmai ir ierobežojumi. Eksperimentālie dati liecina, ka *PM* koncentrāciju dūmgāzēs pie optimāliem MA darbināšanas parametriem var samazināt līdz 10–20 mg/Nm³. ES Ekodizaina direktīva nosaka, ka mazas jaudas katliem ar automātisku kurināmā padevi, piemēram, granulu katlam eksperimentālajā stendā, *PM* emisijas nedrīkst pārsniegt 40 mg/m³, tāpēc šī koncentrācija uzskatāma par pietiekami zemu. Tas parāda, ka, pateicoties MA tehnoloģijai, ir iespējams sasniegt divreiz zemāku *PM* koncentrāciju, nekā prasīts. Jāņem vērā, ka gadījumos, kad *PM* koncentrācija pirms MA jau sākotnēji ir zema (36,2 mg/Nm³, ja katla jauda ir 20 kW), tad *PM* samazinājums ir zemāks. Taču pretēja situācija novērojama, ja katla jauda ir liela, piemēram, ar sākotnējo *PM* koncentrāciju 106,6 mg/Nm³, ja katla jauda ir 30 kW, ir iespējams sasniegt samazinājumu līdz pat 34,2 mg/Nm³.

4.3. Aprēķina modeļa validācija

Aprēķina modeļa validācija veikta, izmantojot eksperimentālo un modeļa rezultātu salīdzinājumu. Līdzīga validācijas metode, kurā salīdzina modelētos un eksperimentālos datus, plaši izmantota siltuma un masas apmaiņas procesu raksturošanai. Ženga (*Zheng et al.*) u. c. [34] autoru darbā izstrādāts skaitlisks algoritms, lai raksturotu pilienu dinamiku mitra gaisa pilienvēda kondensācijā, un algoritms attiecināts uz visu kondensācijas procesu. Pētījumā izstrādāts individuāla piliena augšanas modelis, un tas attiecināts uz ierobežotu virsmas laukumu. Lai validētu rezultātus, pilienvēda kondensācijas eksperimenti īstenoti pie 94 % un 80 % relatīvā mitruma satura. Starp modeļa un eksperimenta rezultātiem iegūta laba sakritība, pierādot modeļa ticamību.

Ar aprēķina modeli iegūtās MA jaudas vērtības salīdzinātas ar eksperimentu rezultātiem vienādos darbības režīmos. Savstarpēji salīdzināti 16 veikto eksperimentu dati un atbilstošo eksperimentu režīmu rezultāti, kas iegūti, izmantojot aprēķina modeli. Rezultātu atšķirība aprēķināta, par atsauces vērtību 4.2. vienādojumā pieņemot eksperimentos izmantoto jaudu.

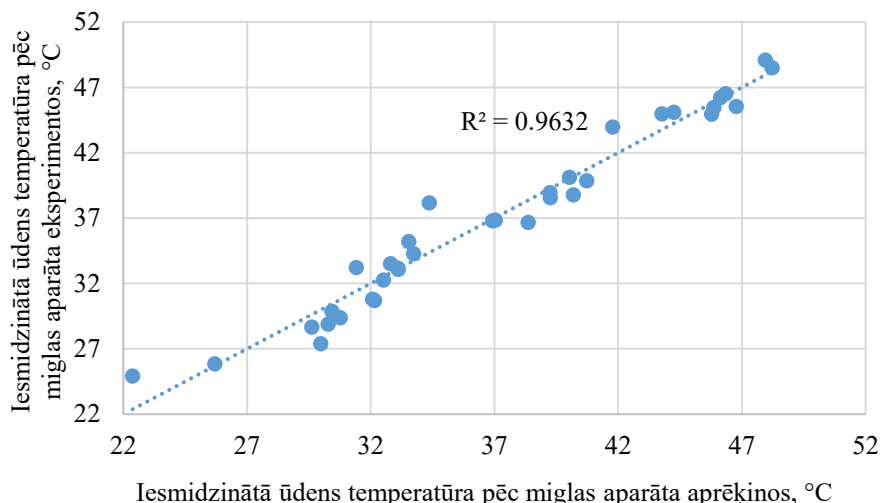
$$\Delta Q = \frac{(Q_{\text{eksp.}} - Q_{\text{apr.}})}{Q_{\text{eksp.}}} \times 100 \quad (4.2.)$$

Galvenie izpētes parametri

Nr.	t_{w1} eksp. ~ t_{w1} apr., °C	t_{w2} eksp., °C	t_{w2} apr., °C	G , l/h	Q eksp., kW	Q apr., kW	ΔQ , %
1.	20,2	33,2	33,2	49,2	0,75	0,77	-2,96
2.	19,7	30,8	31,0	150	1,93	2,07	-7,09
3.	30,5	38,8	38,8	53,4	0,51	0,53	-3,15
4.	29,4	36,7	36,6	150	1,28	1,32	-3,66
5.	39,5	46,5	46,5	53,7	0,44	0,44	-1,16
6.	40,0	45,5	45,5	150	0,95	0,99	-4,08
7.	20,1	34,3	34,2	51,8	0,85	0,87	-2,08
8.	19,9	32,3	32,5	154	2,22	2,41	-8,70
9.	19,7	27,4	28,0	249	2,63	2,40	8,69
10.	30,3	39,9	39,9	52,3	0,58	0,60	-3,20
11.	29,9	38,6	38,6	154	1,55	1,64	-5,74
12.	40,9	49,1	48,4	52,4	0,50	0,45	9,08
13.	39,9	46,2	46,3	149	1,11	1,15	-4,05
14.	19,4	38,2	38,4	51,8	1,13	1,18	-3,93
15.	30,3	44,0	43,9	49,0	0,78	0,80	-1,75
16.	29,9	40,1	40,4	148	1,76	1,91	-8,83

Galvenie salīdzinājumā izmantotie parametri apkopoti 4.3. tabulā. Ievades parametri no eksperimentālajiem datiem ir: dūmgāzu temperatūra pēc katla t_{g1} ; ievades ūdens temperatūra t_{w1} ; ūdens caurplūde G ; sākotnējais ūdens pilienu diametrs d_{d0} . Validācijai izmantotie eksperimentu rezultāti ir pie 20 kW katla jaudas, jo tā ir nominālā eksperimentos izmantotā katla jauda, nodrošinot precīzākos datus. Dūmgāzu temperatūra pēc katla bija vienāda 15 režīmos (131 °C), savukārt vienam režīmam temperatūra bija 135 °C, tādēļ dūmgāzu temperatūra nav iekļauta datu tabulā. Eksperimentos izmantotas trīs dažādas sprauslas, kas nodrošina līdzīgas ūdens plūsmas ar dažādiem pilienu diametriem. Iesmidzinātā ūdens daudzums ir robežās no 50 l/h līdz 249 l/h. Ievades ūdens temperatūra bija robežās no aptuveni 20 °C līdz aptuveni 40 °C.

Starp aprēķināto un eksperimentos noteikto ūdens temperatūru vērojama ļoti cieša korelācija, kas redzama 4.7. attēla grafikā.



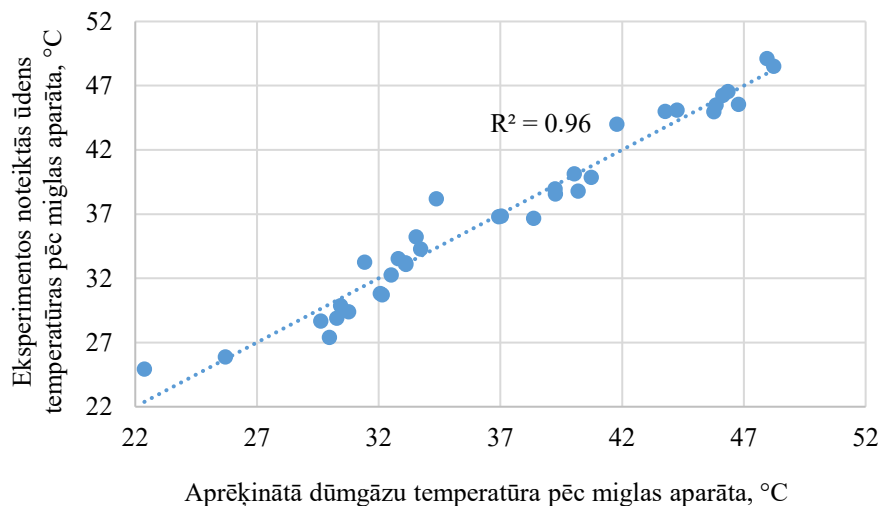
4.7. att. Eksperimentos noteiktā un aprēķinātā iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA .

Loģiski, ka, paaugstinot iesmidzinātā ūdens temperatūru pirms MA, pieaugs arī ūdens temperatūra pēc MA. Pie ciešākas sakarības starp iesmidzinātā ūdens daudzumu un dūmgāzu plūsmu iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA samazinās.

Dūmgāzu temperatūra pēc MA ir atkarīga no sākotnējās dūmgāzu temperatūras un ūdens parametriem – ūdens temperatūras pēc MA, sākotnējā ūdens pilienu diametra. Datu analīzes rezultātā iegūts 4.3. vienādojums.

$$t_{g_2} = -63,08 + 0,20 \times t_{g_1} + 1,03 \times t_{w_2} + 0,12 \times d_{d_0}. \quad (4.3.)$$

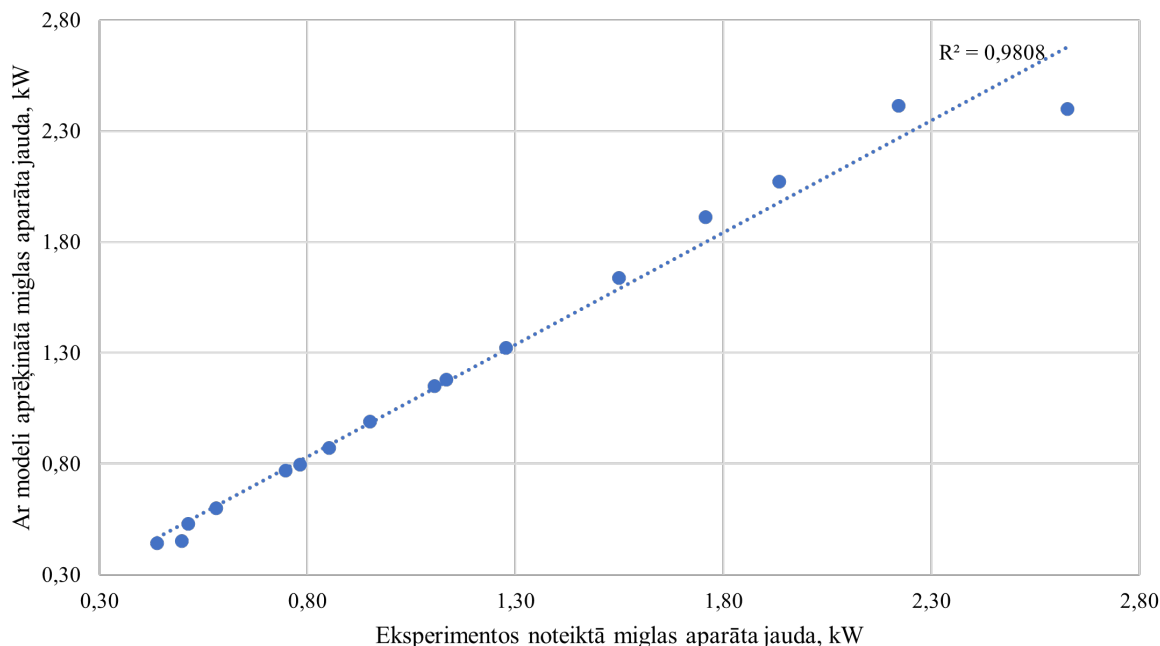
Starp parametriem ir statistiski nozīmīga sakarība 95 % ticamības līmenī. Determinācijas koeficients ir 91,1 %. Eksperimentos noteiktās ūdens temperatūras pēc MA salīdzinātas ar aprēķinātajām dūmgāzu temperatūrām pēc MA (4.9. att.).



4.8. att. Sakarība starp eksperimentālo ūdens temperatūru un aprēķināto dūmgāzu temperatūru pēc MA.

Starp datiem novērojama cieša korelācija. Pieaugot dūmgāzu temperatūrai pirms MA, pieaug arī ūdens temperatūra pēc MA. Līdzīgi, pieaugot ūdens temperatūrai pēc MA, dūmgāzu temperatūra pēc MA arī pieaug – dūmgāzu dzesēšanas būs mazāk intensīva. Ūdens pilienu diametra pieaugums samazina fāžu pārejas virsmu un siltuma daudzumu, ko atgūst no dūmgāzēm konvekcijas procesā. Dūmgāzu dzesēšana pasliktināsies, un to temperatūra pieaug.

Kondensatora jauda eksperimentos bija robežās no 0,44 kW līdz 2,63 kW, savukārt aprēķinātā jauda bija robežās 0,44 kW līdz 2,41 kW. Iesmidzinātā ūdens daudzums rada svārstības kondensatora jaudas vērtībās. Paaugstināta ievadītā ūdens temperatūra samazina MA jaudu, tādēļ iesmidzināšanai iekārtā piemērotāks aukstāks ūdens. Optimāls iesmidzinātā ūdens daudzums siltuma atgūšanai no dūmgāzēm neatkarīgi no katla jaudas ir aptuveni 150 l/h. Lai atspoguļotu datus un to savstarpējās atšķirības, izveidots kondensatora jaudas grafiks (4.9. att.).



4.9. att. Eksperimentos noteiktās un aprēķinātās MA jaudas salīdzinājums.

Kā redzams 4.9. attēlā, starp eksperimentālajiem un aprēķinātajiem miglas aparāta jaudas datiem pastāv cieša korelācija, determinācijas koeficients ir 0,98. Kā redzams 4.3. tabulā, lielākā atšķirība starp aprēķinātajām un eksperimentāli noteiktajām jaudas vērtībām ir pie ūdens temperatūras ap 20 °C un augoša iesmidzinātā ūdens daudzuma, vidējā atšķirība – 8,2 %. Savukārt līdzīgākie dati ir pie ūdens temperatūras ap 30 °C un iesmidzinātā ūdens daudzuma ap 50 l/h (vidēji 2,7 %). Atšķirība starp vērtībām ir robežās no 1,16 % līdz 9,08 %, datu vidējā atšķirība – 4,9 %. Datu atšķirība nepārsniedz 10 %, tāpēc secināts, ka modelētie dati veido labu sakritību ar eksperimentālajiem datiem un modelis ir piemērots kondensatora darbības analīzei. Šajā analīzē iekļautie eksperimentu rezultāti iegūti, izmantojot visu trīs veidu sprauslas, katla jauda – 20 kW. Pie iesmidzinātā ūdens temperatūras 30 °C un 40 °C eksperimenti veikti pie iesmidzinātā ūdens daudzuma līdz aptuveni 150 l/h, lai nodrošinātu efektīvāko *PM* attīrīšanu un siltuma atgūšanu no dūmgāzēm bez liekas ūdens izsmidzināšanas un iespējamās aizneses dūmvados. Eksperimenti pie 20 °C izcēla ūdens aizneses un pārāk daudz izsmidzināšanas

problēmu, kas eksperimentos pie augstākas ūdens temperatūras bija ņemtas vērā un ierobežotas (pildījums ūdens aizneses ierobežošanai, optimālāks iesmidzināšanas daudzums).

4.4. Optimizācija

Eksperimenta plānošana ir matemātiska aprēķina izveide ar noteiktu secību, kas palīdz noteikt kādu pētāmo lielumu [35]. Matemātiskajā modelī, plānojot eksperimentu, tiek izmantots mainīgais atkarīgais lielums y , kas atkarīgs no neatkarīgiem mainīgajiem faktoriem $x_1, x_2 \dots x_n$. Reālajā procesā rodas neprognozējamas gadījuma rakstura pārmaiņas. Tāpēc izmantoti regresijas koeficienti b_0, b_j, b_{uj}, b_{jj} . Mainīgā izmaiņas raksturojošais vienādojums vispārīgā formā izteikts 4.4. formulā [35].

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^n b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \dots + \epsilon \quad (4.4.)$$

Veiktajā analizē atkarīgais mainīgais ir MA jauda (Q , kW). Neatkarīgie mainīgie:

- dūmgāzu plūsma (V_g , Nm³/s);
- dūmgāzu temperatūra pirms MA (t_{g1} , °C);
- iesmidzinātā ūdens daudzums (G , l/h);
- sākotnējais ūdens pilienu diametrs (d_{d0} , μm);
- iesmidzinātā ūdens temperatūra (t_{w1} , °C).

Analizētais dūmgāzu plūsmas diapazons ir atbilstošs granulu katliem ar jaudu no 10 kW līdz 20 kW un minimālo lietderības koeficientu 82 %. Parametru maksimālās un minimālās vērtības noteiktas, analizējot eksperimentālo datu kopu, izvēloties parametru vērtības, kas iekļaujas aprēķina modeļa izmantošanas robežās. Vērtību apkopojums redzams 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Neatkarīgo mainīgo parametru vērtības

	V_g , Nm ³ /s	t_{g1} , °C	G , l/h	d_{d0} , μm	t_{w1} , °C	ω_1 , kg/kg _{dg}	W^d , %
min.	0,00482	90	60	425	20	0,08	4,55
maks.	0,01	140	150	600	30		
vid.	0,00735	115	105	512,5	25		

W^d – kurināmā mitruma saturs, masas %.

Analizētais kurināmais ir koksnes granulas ar mitruma saturu 4,55 %. Šajā gadījumā pie iesmidzinātā ūdens daudzuma un pilienu diametriem nav piesaistīta konkrēta sprausla. Analizē ir pieci neatkarīgie mainīgie, tāpēc skaitliskā eksperimenta plāns jāveido $2^5 = 32$ eksperimenta režīmiem ar trīs papildu eksperimentiem pie viduspunktu vērtībām, līdz ar to kopējais eksperimentu skaits ir 35.

Izveidotā matrica ar parametru vērtībām un aprēķinātajām miglas aparāta jaudām

Nr	V_g , Nm ³ /s		t_{g1} , °C		G , l/h		d_{d0} , μm		t_{w1} , °C		Q , kW
1.	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	425	min.	30	maks.	2,23
2.	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	425	min.	20	min.	3,43
3.	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	425	min.	30	maks.	1,66
4.	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	20	min.	1,67
5.	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	600	maks.	20	min.	2,47
6.	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	425	min.	20	min.	1,36
7.	0,01	maks.	90	min.	60	min.	600	maks.	30	maks.	1,08
8.	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	600	maks.	20	min.	1,34
9.	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	600	maks.	30	maks.	1,09
10.	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	20	min.	3,05
11.	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	600	maks.	30	maks.	1,34
12.	0,01	maks.	90	min.	60	min.	425	min.	20	min.	1,98
13.	0,00482	min.	90	min.	60	min.	425	min.	20	min.	1,31
14.	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	30	maks.	1,42
15.	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	30	maks.	2,50
16.	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	600	maks.	30	maks.	1,09
17.	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	425	min.	30	maks.	2,90
18.	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	600	maks.	30	maks.	1,94
19.	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	425	min.	30	maks.	1,44
20.	0,01	maks.	90	min.	60	min.	425	min.	30	maks.	1,39
21.	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.	1,99
22.	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	425	min.	30	maks.	1,10
23.	0,01	maks.	90	min.	60	min.	600	maks.	20	min.	1,48
24.	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.	1,99
25.	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	425	min.	20	min.	2,75
26.	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	600	maks.	20	min.	1,35
27.	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	425	min.	20	min.	1,69
28.	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	425	min.	30	maks.	1,35
29.	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	425	min.	20	min.	1,63
30.	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	425	min.	20	min.	2,30
31.	0,00482	min.	90	min.	60	min.	425	min.	30	maks.	1,05
32.	0,00482	min.	90	min.	60	min.	600	maks.	20	min.	1,10
33.	0,00482	min.	90	min.	60	min.	600	maks.	30	maks.	0,85
34.	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.	1,99
35.	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	600	maks.	20	min.	1,77

Mainīgo matrica izveidota, izmantojot programmu *Statgraphics Centurion XVII* un tajā ietvertu rīku *Design of Experiments*. Rīks dod iespēju ievadīt atkarīgo mainīgo (y), neatkarīgos mainīgos (x_n) un to maksimālās (max) un minimālās (min) vērtības, kā arī izvēlēties, kāda veida eksperiments ir plānots, cik daudz eksperimentu tiks veikti pie viduspunktiem (2^k eksperimentu plānā, kur $k = 1 \dots 5$, pie viduspunktiem parasti veic 3–5 eksperimentus). Rezultātā izveidota

mainīgo matrica ar dažādām to vērtību kombinācijām, kas ir atbilstošas veicamajiem eksperimentiem.

Eksperimenti īstenoti skaitliski, izmantojot izstrādāto MA aprēķina modeli programmas formā. Izmantojot iegūtos modeļa datus, aprēķināta MA jauda. Izveidotā matrica ar atbilstošo vērtības apzīmējumu (min., maks., vid.) un ar aprēķinu iegūtie MA jaudas rezultāti attiecīgajos režīmos apkopoti 4.5. tabulā.

Nākamais solis eksperimenta plānošanā ir neatkarīgo mainīgo pārveide bezdimensiju lielumos, kur mainīgie apzīmēti attiecīgi x_1, x_2, x_3 u. c. Katra mainīgā maksimālā vērtība līdzvērtīga +1, minimālā -1. Šajā gadījumā netiek ņemti vērā viduspunktu rezultāti, tas nozīmē, ka pārveidoti mainīgie 32 režīmos. Mainīgo vērtību intervāla un vidējās vērtības iegūst ar 4.5. un 4.6. vienādojumu palīdzību [35].

$$Z_n^0 = \frac{(Z_n \max + Z_n \min)}{2} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (4.5.)$$

$$\Delta Z_n = \frac{(Z_n \max - Z_n \min)}{2} \quad (4.6.)$$

Aprēķinātās parametru vērtības ar pieņemtajiem koeficientiem apkopotas 4.6. tabulā.

4.6. tabula

Mainīgo intervāla un vidējās vērtības

	V_g	t_{g1}	G	d_{a0}	t_{v1}
maks.	0,01	140	150	600	30
Min.	0,00482	90	60	425	20
Z_n^0	0,00735	115	105	512,5	25
ΔZ_n	0,00253	25	45	87,5	5
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

Koeficientu $x_1 - x_5$ pārrēķins uz bezdimensiju koordinātām veikts pēc 4.7. formulas. Papildu analizē ieviests brīvais koeficients x_0 , kas bezdimensiju koordinātās ir +1.

$$x_n = \frac{(Z_n - Z_n^0)}{\Delta Z_n} \quad (4.7.)$$

Nākamais solis ir aprēķināt mainīgo koeficientus b_n . Jebkura koeficienta b_n iegūšanai izmanto 4.8. vienādojumu, kur x_{ni} un y_{ni} reizinājumu summu dala ar eksperimentu skaitu N [35].

$$b_n = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ni} y_i}{N} \quad (4.8.)$$

Mainīgo koeficientu vērtības

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
$\sum x_n$	55,1274	13,4358	6,0499	9,6420	-4,0206	-6,2705
b_n	1,7227	0,4199	0,1891	0,3013	-0,1256	-0,1960

Iegūtais vienādojums bezdimensiju lielumiem izskatās šādi:

$$\hat{y} = 1,7227 + 0,4199x_1 + 0,1891x_2 + 0,3013x_3 - 0,1256x_4 - 0,1960x_5 \quad (4.9.)$$

Kad iegūts bezdimensiju vienādojums, nepieciešams pāriet pie reālajiem skaitļiem. x_n tiek aizstāts ar eksperimenta lielumiem. Vienādojums izskatās šādi:

$$Q = 1,7227 + 0,4199 \frac{V_g - 0,00735}{0,0025} + 0,1891 \frac{t_{g1} - 115}{25} + 0,3013 \frac{G - 105}{45} - 0,1256 \frac{d_{d0} - 512,5}{87,5} - 0,1960 \frac{t_{w1} - 25}{5} \quad (4.10.)$$

Iegūts reālo skaitļu vienādojums:

$$Q = 0,6458 + 165,8865V_g + 0,0076t_{g1} + 0,0067G - 0,0014d_{d0} - 0,0392t_{w1} \quad (4.11.)$$

Pēc bezdimensiju vienādojuma var noteikt, ka mainīgais ar lielāko ietekmi uz MA jaudu ir dūmgāzu plūsma V_g . Lai noteiktu, vai vienādojums ir adekvāts MA jaudas raksturošanai un atbilst 95 % ticamības robežai, programmā *Statgraphics Centurion XVII* veikta daudzfaktoru regresijas analīze veiktajiem eksperimentiem (32 režīmi). Analīzes rezultātā iegūts šāds MA jaudu raksturojošs vienādojums:

$$Q = 0,6458 + 165,887V_g + 0,0076t_{g1} + 0,0067G - 0,0014d_{d0} - 0,0392t_{w1} \quad (4.12.)$$

Iegūtais regresijas vienādojuma koriģētais determinācijas koeficients apraksta 82,26 % no MA jaudas rezultātiem. Salīdzinot ar eksperimenta plānošanā iegūto vienādojumu, var redzēt, ka atšķirības starp mainīgajiem praktiski nav. Starp vienādojuma mainīgajiem nav novērojamas savstarpējas korelācijas. Šis rezultāts apstiprina to, ka eksperimenta plānošanā iegūtais vienādojums adekvāti apraksta MA jaudu un nav nepieciešams atsevišķi veikt vienādojuma mainīgo statistiskās nozīmības pārbaudi.

Optimizācijai izvēlēta stāvā kāpuma Boksa–Vilsona (*Box–Wilson*) metode. Bezdimensiju vienādojums (4.9. vienādojums) ir skaitliskā eksperimenta atsauces funkcija, un ar tās palīdzību tiek realizēta stāvā kāpuma optimizācija. Ar vienādojuma koeficientu palīdzību nosaka stāvā kāpuma virzienu un kāpuma soli. Soli nosaka katram faktoram kā faktora koeficienta b_i un proporcionalitātes koeficienta γ reizinājumu. No bezdimensiju vienādojuma (4.9. vienādojums) izvēlas faktoru, kas būtiski ietekmē atsauces vērtību y , pieņem tā izmaiņas soli δ'_k un aprēķina proporcionalitātes koeficienta γ . Aprēķiniem tiek izmantota šāda izteiksme:

$$\gamma = \frac{\delta_k}{\delta_k b_k} \quad (4.13.)$$

Citu faktoru soļu izmaiņas ir proporcionālas galvenā faktora soļu izmaiņām:

$$\delta'_i = \gamma \delta_i b_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (4.14.)$$

Pēc pirmā optimizācijas soļa faktoru vērtības aprēķina šādi [36]:

$$x_{in} = x_{i0} + u \delta'_i \quad (4.15.)$$

Optimizācijas mērķis ir atrast faktoru kopumu, kas nodrošinātu maksimālo Q vērtību. Optimizācijai izvēlēta stāvā kāpuma vai gradienta metode. Šim nolūkam izmantots modelis, kas aplūko tikai galveno faktoru iedarbību (izslēdzot faktoru savstarpējās iedarbības efektus).

Skaitliskā eksperimenta matricā augstākā Q vērtību var sasniegt, ja V_g^{\max} ; t_{g1}^{\max} ; G^{\max} ; d_{d0}^{\min} un t_{w1}^{\min} . Tas nozīmē, ka optimālās vērtības meklējumos jāpalielina V_g , t_{g1} , G vērtības un jāsamazina d_{d0} un t_{w1} . No regresijas vienādojuma (4.9. vienādojums) bezdimensiju vērtībām redzams, ka būtiskāk jaudu ietekmē gāzes plūsma, jo šī faktora koeficientam ir lielākā vērtība.

Tiek izvēlēts gāzes plūsmas pieauguma solis un atkarība no tā noteiktas pārējo faktoru izmaiņas. Optimizāciju sāk no skaitliskā eksperimenta plāna centra. Nepieciešamo darbību secība redzama 4.8. tabulā. Ar faktoru izmaiņu soļu palīdzību definētie turpmākie režīmi stāvā kāpuma virzienā apkopoti 4.9. tabulā.

4.8. tabula

Faktoru izmaiņu soļi optimizācijā

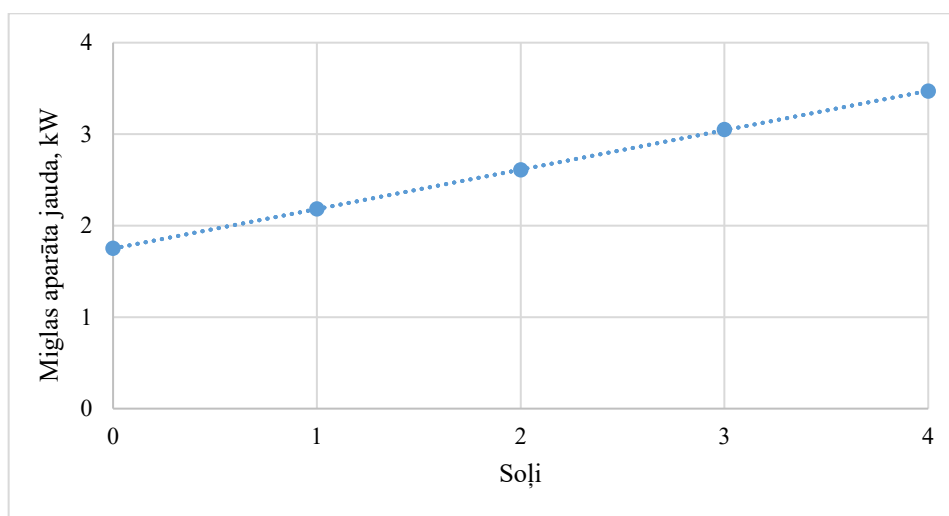
Mainīgie lielumi	V_g , Nm ³ /s	t_{g1} , °C	G , l/h	d_{d0}	t_{w1} , °C	Q , kW
Plāna centrs	0,00741	115	105	512,5	25	1,755
Izmaiņu intervāls	0,00259	25	45	57,5	5	
Augšējā robeža	0,01	140	150	600	30	
Apakšējā robeža	0,00482	90	60	425	20	
Bezdimensiju vienādojuma (4.9.) koeficienti b_i	0,4199	0,1891	0,3013	-0,1256	-0,196	
b_i * izmaiņu intervāls	0,00109	4,7275	13,5585	-10,99	-0,98	
Parametra izmaiņas solis	0,0013	5,62	16,13	-13,078	-1,07	

Kā redzams 4.4. attēlā, kondensatora jaudas izmaiņas ģenerētajos režīmos un plāna centrā ir lineāras, tajās nav optimuma, un jauda pieaug ar katru soli. 4.9. tabulā apkopotie stāvā kāpuma soļi aprēķini liecina, ka jaudas pieaugumam nepieciešams palielināt gāzes plūsmu, iesmidzināmo ūdens daudzumu, samazināt pilienu diametrus un iesmidzināt ūdeni ar zemāku temperatūru. Aplūkotajā iekārtā maksimālo kondensatora jaudu ierobežo dūmgāzu plūsmas vērtība 0,01 Nm³/s. Plūsmu nosaka granulu katla jauda (20 kW) un kvalitatīva kurināmā sadedzināšana (skābekļa daudzums dūmgāzēs). Cits būtisks gāzu plūsmu ierobežojošs apstāklis ir gāzes un pilienu mijiedarbība kondensatorā. Pieaugot plūsmai, palielinās smalko pilienu iznešana no aparāta.

Režīmi optimuma noteikšanai

	V_g	t_{g1}	G	d_{d0}	t_{w1}	Q
1.	0,0087	120,6	121,13	499	23,8	2,18
2.	0,01	126,2	137,26	486	22,6	2,61
3.	0,0113	131,8	153,39	473	21,5	3,05
4.	0,0126	137,4	169,5	460	20,33	3,47

Veiktā izpēte rāda, ka MA, kas projektēts 20 kW granulu katlam, var atgūt līdz 2,6 kW dūmgāzu siltuma. Tas ir 13 % no katla jaudas. Šajā režīmā (4.9. tab.) gāzu plūsmai jābūt $V_g = 0,01 \text{ Nm}^3/\text{s}$, gāzu temperatūrai $t_{g1} = 126 \text{ °C}$, ūdens plūsmai $G = 137 \text{ l/h}$, ūdens pilienu diametram $d_{d0} = 486 \text{ μm}$, iesmidzināmā ūdens temperatūrai $t_{w1} = 22,6 \text{ °C}$. Atsauces parametra Q vērtības atkarībā no optimizācijas soļa grafiski redzamas 4.10. attēlā.



4.10. att. MA jaudas izmaiņas stāvā kāpuma virzienā.

Izpētē aplūkoti soļi stāvā kāpuma virzienā, tāpēc katra soļa (režīma) parametri uzskatāmi par optimāliem. Optimālo režīmu parametru vērtības apkopotas 4.9. tabulā. Būtiski atzīmēt, ka, mainoties vienam izvēlētam parametram, pārējie mainās pēc noteiktas likumsakarības, ko apraksta regresijas vienādojums (4.9. vienādojums). Brīvi var mainīt tikai vienu parametru. Ja MA iekārtas optimālai darbināšanai nepieciešami citi izmaiņu soļi, tad jāveic jauni soļu aprēķini.

MA jauda pieaug, palielinoties dūmgāzu plūsmai, dūmgāzu temperatūrai un iesmidzinātā ūdens daudzumam un samazinoties pilienu izmēram un iesmidzinātā ūdens temperatūrai. Reālos apstākļos dūmgāzu plūsma un temperatūra ir atkarīga no katla jaudas, izmantotā kurināmā un katla darbināšanas parametriem. Pilienu izmērs ir atkarīgs no izvēlētajā sprauslas. Pilienu izmēra regulēšana, darbinot MA, ir ierobežota. Iesmidzinātā ūdens temperatūras izvēle un regulēšana mājāsaimniecībās ir ierobežota un lielā mērā atkarīga no apkures sistēmas īpatnībām, kā arī sistēmas siltuma patēriņa.

SECINĀJUMI

1. Izgatavota, pārbaudīta un turpmākai izmantošanai piedāvāta efektīva mazas jaudas granulu katliem piemērota dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atgūšanas tehnoloģija, lai uzlabotu katla un tā sistēmas kopējo energoefektivitāti un samazinātu cieto daļiņu emisijas. To veic MA, realizējot siltuma un masas pārejas procesus starp katla dūmgāzēm, pilienu veidā iesmidzinātu ūdeni un *PM*.

2. MA sistēmas pārbaudes eksperimentu rezultāti liecina, ka iekārtas *PM* uztveršanas efektivitāte ir līdz aptuveni 68 %, kas ir augsts efektivitātes rādītājs. Galvenie mainīgie parametri, kas pārbaudīti šajos eksperimentos, ir iesmidzinātā ūdens daudzums, iesmidzinātā ūdens pilienu sākuma diametrs un pilienu temperatūra MA ievadā, dūmgāzu plūsma un temperatūra pirms MA.

3. Galvenie MA sistēmu raksturojošie rādītāji, kas iegūti sistēmas veiktspējas analīzes rezultātā, ir: MA jauda robežās no 0,5 kW līdz 5,2 kW; energoefektivitāte robežās no 3,2 % līdz 14,5 %; *PM* uztveršanas efektivitāte robežās no 33,1 % līdz 67,9 %. Zemākā sasniegtā *PM* koncentrācija dūmgāzēs pēc MA ir līdz 10 mg/Nm³, kas iekļaujas ES Ekodizaina direktīvas noteiktajos robežlielumos automātiski darbināmiem katliem, kas ir līdz 40 mg/m³. Eksperimenti pierādīja, ka MA spēj nodrošināt zemāku *PM* koncentrāciju 93 % gadījumā. Vienīgie gadījumi, kad *PM* koncentrācija pēc MA pārsniedz 40 mg/m³, ir pie paaugstinātas – 30 kW – katla jaudas un caurplūdes, kas pārsniedz 250 l/h, kas pārsniedz optimālo iesmidzinātā ūdens daudzumu. Šie rezultāti ir attiecināmi uz iekārtas darbību reālai situācijai pietuvinātā laboratorijas vidē. Ar MA sistēmas pārbaudi mākslīgā vidē ir nodrošināts, ka izstrādātā tehnoloģija ir atbilstoša tehnoloģiju gatavības līmenim – *TRL* 5.

4. Darba gaitā izstrādāts MA simulācijas jeb aprēķina modelis, kas raksturo tā darbību dažādos darbināšanas apstākļos. Tas raksturo siltuma un masas apmaiņas procesu norisi kondensatorā, ja procesos iesaistītas arī *PM*. Ar modeļa palīdzību var noteikt pilienu diametru, gāzu temperatūras, ūdens temperatūras, *PM* koncentrācijas un ūdens tvaika piesātinājuma stāvokļa un plūsmas parciālo spiedienu starpību izmaiņas MA augstumā. Aprēķina modelis validēts, izmantojot eksperimentu un aprēķina datu salīdzinājumu vienādos iekārtas darbības režīmos. Validācija veikta datiem, ja katla jauda ir 20 kW, kas ir modeļa šī brīža lietojamības robežas. Modeļa rezultātiem ir augsts ticamības līmenis, jo starp modeļa un eksperimenta datiem iegūtā atšķirība nepārsniedz 10 %.

5. Modelēšanas rezultāti papildina eksperimentu rezultātus un sniedz informāciju par procesu norisi aparātā. Tvaika parciālo spiedienu izmaiņas liecina par to, vai aparātā notiek kondensācija uz pilieniem, vai pilienu iztvaikošana un par to, vai procesi noris visā aparātā, vai tikai tā daļā. Kondensācijas procesa pāreja iztvaikošanā ir aktuāla augstas iesmidzināmā ūdens temperatūras gadījumā, jo pilieni, uzsilstot aparātā, var sasniegt rasas punkta temperatūru, un seko pilienu iztvaikošana. Parametru eksperimentāla noteikšana aparātā ir komplicēta, jo piesārņotās dūmgāzes ir sajauktas ar iesmidzinātiem ūdens pilieniem un veido komponentu maisījumu.

6. Optimizācijā izmantota Boksa–Vilsona (*Box–Wilson*) stāvā kāpuma metode. Tajā veikts skaitlisks eksperiments. Izstrādāta un analizēta eksperimentālo datu matrica MA jaudas

noteikšanai, kurā galvenie jaudu ietekmējošie parametri ir: dūmgāzu plūsmas ātrums; dūmgāzu temperatūra pirms MA (pēc katla); iesmidzinātā ūdens daudzums; ūdens pilienu diametrs; iesmidzinātā ūdens temperatūra MA ievadā. Noteiktās datu robežas balstījās eksperimentu rezultātos, kas pielīdzināmas rezultātiem pie katla jaudām, sākot no 10 kW līdz 20 kW. Galvenie datu analīzes un optimizācijas rezultāti uzrāda to, ka MA jaudai ir lineāra pieauguma tendence. Realitātē tas ir iespējams līdz iesmidzinātā ūdens daudzuma optimuma – 150 l/h – sasniegšanai. Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, iekārtas efektivitāte samazinās. Cits parametrs, kas ietekmē iekārtas darbību praksē, ir dūmgāzu plūsma, kas nedrīkst pārsniegt 0,01 Nm³/s. Plūsmu ietekmē katla jauda un izmantotā kurināmā kvalitāte. Papildus jāņem vērā gāzu un pilienu mijiedarbības veids kondensatorā.

7. Darba izstrādes laikā iegūtie rezultāti apstiprina, ka ir iespējams izveidot efektīvu cieto daļiņu uztveršanas un dūmgāzu siltuma atgūšanas iekārtu mājsaimniecību siltuma avotiem – mazas jaudas granulu kurināmā katliem. No dūmgāzēm atgūto siltumu var izmantot karstā ūdens apgādē.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. “EUR-Lex – 32009L0125 – EN – EUR-Lex”. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0125>. [Accessed: 12-Apr-2019].
2. “Noteikumi par ekodizaina prasībām ar enerģiju saistītām precēm (produktiem)”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=241282>. [Accessed: 10-May-2019].
3. S. Fournel, B. Marcos, S. Godbout, and M. Heitz, “Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels”, *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 165–172, 2015.
4. J. D. Herner *et al.*, “Effect of advanced aftertreatment for PM and NO_x reduction on heavy-duty diesel engine ultrafine particle emissions”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 6, pp. 2413–2419, 2011.
5. A. Hukkanen, T. Kaivosoja, O. Sippula, K. Nuutinen, J. Jokiniemi, and J. Tissari, “Reduction of gaseous and particulate emissions from small-scale wood combustion with a catalytic combustor”, *Atmos. Environ.*, vol. 50, pp. 16–23, 2012.
6. N. Karvosenoja, Z. Klimont, A. Tohka, and M. Johansson, “Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions in Finland”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 2, no. 4, p. 044002, 2007.
7. A. Messerer, V. Schmatloch, U. Pöschl, and R. Niessner, “Combined particle emission reduction and heat recovery from combustion exhaust-A novel approach for small wood-fired appliances”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 7, pp. 512–521, 2007.
8. K. H. Kim, E. Kabir, and S. Kabir, “A review on the human health impact of airborne particulate matter”, *Environ. Int.*, vol. 74, pp. 136–143, 2015.
9. E. D. Vicente and C. A. Alves, “An overview of particulate emissions from residential biomass combustion,” *Atmos. Res.*, 2017.
10. Eiropas parlaments un Eiropas Savienības padome, *Eiropas parlamenta un padomes direktīva 2008/50/EK par gaisa kvalitāti un tīrāku gaisu Eiropai*. 2008.
11. J. Chen *et al.*, “A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China”, *Sci. Total Environ.*, vol. 579, no. November 2016, pp. 1000–1034, 2017.
12. Clean Heat, “Residential wood burning. Environmental impact and sustainable solutions”, 2016.
13. World health organization Media centre, “WHO | Ambient (outdoor) air quality and health”, *WHO*, 2016.
14. C. Studies and S. Stories, “Case Studies & Success Stories”, vol. I.
15. D. Broberg *et al.*, “PyCDT: A Python toolkit for modeling point defects in semiconductors and insulators”, *Comput. Phys. Commun.*, vol. 226, pp. 165–179, 2018.
16. R. Wieland, K. Groth, F. Linde, and W. Mirschel, “Spatial Analysis and Modeling Tool Version 2 (SAMT2), a spatial modeling tool kit written in Python”, *Ecol. Inform.*, vol. 30, pp. 1–5, 2015.
17. J. T. White, M. N. Fienen, and J. E. Doherty, “A python framework for environmental model uncertainty analysis”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 85, pp. 217–228, 2016.
18. O. Svedovs, M. Dzikevics, V. Kirsanovs, and I. Veidenbergs, “Development of New Compact Water Treatment System for Flue-Gas Condenser for Households”, *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 563–573, 2021.
19. O. Švedovs, M. Dzikēvičs, and V. Kirsanovs, “Methods for Determining the Performance and Efficiency Parameters of the Flue-gas Condenser Sedimentation Tank”, vol. 24, no. 2, pp. 337–347, 2020.
20. V. Kostevica, “Sprauslu darbības analīze”, *Bakal. darbs*, 2018.

21. ISO, "LVS EN 9096:2018", *Starptautisks standarts*, 2018. [Online]. Available: <https://www.lvs.lv/lv/products/preview/137324>. [Accessed: 06-Apr-2018].
22. D. Wunsch, "Theoretical and numerical study of collision and coalescence-Statistical modeling approaches in gas-droplet turbulent flows", 2009.
23. C. Magono and T. Nakamura, "On the Behavior with of Water a Large Droplets Water during Drop Collision", 1959.
24. J. Monteith L. and M. Unsworth H., *Principles of Environmental Physics*, Fourth Edi. Elsevier Ltd, 2013.
25. R. Flagan C. and J. Seinfeld H., *FUNDAMENTALS OF AIR POLLUTION ENGINEERING*. Mineola New York: Dover Publications Inc., 2012.
26. N. S. Cheng, "Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles", *Powder Technol.*, vol. 189, no. 3, pp. 395–398, 2009.
27. M. I. Shilyaev and E. M. Khromova, "Modeling of Heat and Mass Transfer and Absorption-Condensation Dust and Gas Cleaning in Jet Scrubbers", *Intech*, vol. Chapter 7, p. 33, 2013.
28. A. O. Sæbø, R. Wighus, and R. Wighus, "Droplet sizes from deluge nozzles".
29. F. Ahmad and R. K. Jain, "An Experimental Study of Parameters of Wet Scrubber for Environmental Benefit", *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 9675–9680, 2016.
30. D. Blumberga and I. Veidenbergs, *Tehnoloģisko gāzu attīrīšana un dzesēšana*. Rīga: Latvijas Universitāte, 1990.
31. B. A. Danzomo, M. E. Salami, S. Jibrin, and I. M. Nor, "Performance Evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control", *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 12, pp. 1669–1677, 2012.
32. W. Licht, *Air Pollution Control Engineering: Basic Calculations for Particulate Collection*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1988.
33. M. S. El-Morsi, "Optimization of direct contact spray coolers", 2002.
34. S. Zheng, F. Eimann, C. Philipp, T. Fieback, and U. Gross, "Modeling of heat and mass transfer for dropwise condensation of moist air and the experimental validation", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 120, pp. 879–894, 2018.
35. Р. И. Эстеркин, "Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива ... – Рахмиель Иосифович Эстеркин – Google grāmatas", 1981. [Online]. Available: <https://books.google.lv/books?id=L11mGwAACAAJ&dq=inauthor:%22Рахмиель+Иосифович+Эстеркин%22&hl=lv&sa=X&ved=0ahUKEwjJ4dmzqYzaAhVBqi>. [Accessed: 27-Mar-2018].
36. V.-M. Tapani, "Experimental Optimization and Response Surfaces", *Chemom. Pract. Appl.*, 2012.



Vivita Priediece dzimusi 1994. gadā Madonā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi bakalaura (2016) un maģistra grādu (2018) vides zinātnē. Bakalaura darbs izstrādāts par biomasas līdzdedzināšanu, maģistra darbs – par sīkpilienu dūmgāzu kondensatoru. 2016. gada rudenī V. Priediece sāka darbu RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta Cietā biokurināmā testēšanas laboratorijā. Patlaban V. Priediece ir pētniece un lektore. Zinātniskās intereses saistītas ar siltuma un masas apmaiņas procesu izpēti dūmgāzēs, dabisko termoiepakojumu, cietā biokurināmā kvalitātes pārbaudi un degšanas procesiem. V. Priediece ir 12 zinātnisko publikāciju un divu monogrāfiju autore vai līdzautore.