

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ina TETSMAN

**AEROZOLINĖS TARŠOS SIURBTUVO,
AKTYVINAMO AEROAKUSTINIŲ SRAUTŲ,
EFEKTYVUMO TYRIMAS**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2213-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-608-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2013

© Ina Tetsman, 2013

ina.tetsman@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ina TETSMAN

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF AEROSOL POLLUTION EXHAUSTER UNDER AEROACOUSTIC FLOW

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Vladas VEKTERIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas naujai sukurto aerozolinės taršos šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumo nustatymas. Pateikiami teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti aerozolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumą ir suformuluoti jo tyrimo metodiką. Tyrimo objektas – šoninis siurbtuvas aktyvinamas aeroakustiniu srautu. Siekiant įgyvendinti tyrimų tikslą išspręsti šie uždaviniai: atlikta mokslinės literatūros apžvalga apie siurbtuvų tyrimus ir analizę, ištirtas šoninis siurbtuvas aktyvinamas aeroakustiniu srautu, pasiūlyta eksperimentinių tyrimų metodika, eksperimentiškai ištirtas siurbtuvo darbo efektyvumas. Uždaviniai suformuluoti atsižvelgiant į aerozolinių dalelių mažinimo problemą aplinkoje.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir vienas priedas.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Išanalizuotos aerozolinių dalelių šalinimo priemonės ir jų formuojamų srautų charakteristikos, pateiktos aeroakustinių srautų charakteristikų ir disertacijos tema atliktų mokslinių darbų analizės. Išnagrinėti veiksmai, veikiantys koaguliacijos proceso efektyvumą. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikti virš druskos rūgšties tirpalo garuojančio paviršiaus teoriniai tyrimai, nustatyti taršos šaltinio dinaminiai klampos koeficientai ir tankiai atsižvelgiant į skysčio temperatūrą, teoriškai nustatytas aeroakustinio srauto poveikis aerozolinėms dalelėms, atlikta tyrimo rezultatų analizė.

Trečiajame skyriuje aprašomi siurbtuvo aktyvinamo aeroakustiniu srautu eksperimentiniai tyrimai, pateikta tyrimo metodika. Išsamiai išanalizuota garso generatorių akustinio lauko charakteristikų priklausomybė nuo garso generatorių konstrukcijų. Įvertintas siurbtuvo darbo efektyvumas, pateiktos statistinės matavimų charakteristikos. Pabaigoje pateiktos išvados ir literatūros sąrašas.

Disertacijos tema išspausdintos šešios mokslinės publikacijos: viena – mokslo žurnale, įtrauktame į *ISI Web of Science* sąrašą; viena – mokslo žurnale, cituojamame *Copernicus* duomenų bazėje; trys – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų straipsnių rinkiniuose; dvi – kituose tarptautinių ir respublikinių konferencijų straipsnių rinkiniuose.

Abstract

The study investigated the defining of aerodynamic characteristics of the newly developed aerosols side exhauster activated by aeroacoustic flow. It included theoretic and experimental research. The main aim of the work was to develop the methodology of defining aerodynamic parameters in an aeroacoustic flow-activated aerosols side exhauster and analyse its characteristics and efficiency of use. The research object was the aerosols side exhauster under aeroacoustic flow and defining of its aerodynamic characteristics. To implement the objective of the work, the following tasks had to be achieved: the analysis of the scientific literature on the measures of aerosols removal from evaporating surfaces, their constructions, operational and functionality principles, theoretical and experimental research performed in the acoustic effect mode. The tasks have been formulated having taken into consideration the problem of aerosol particles' reduction in atmosphere.

The study consisted of the following sections: introduction, three chapters, the results summary, the lists of literature and study-related author's publications, and one annex.

The introduction section included the discussion of the researched issue, relevance of the study, description of the research object, formulation of the aim and tasks of the study, description of research methodology, scientific novelty of the study, the practical significance of its results, and the defended statements. At the end of the introduction section, the topic of the study, the publications published by the author, the author's reports presented during conferences and the structure of the study paper have been presented.

Chapter 1 was designated for literature review. It included the analysis of scientific works performed in relation to the study. At the end of the chapter, conclusions were drawn and the tasks of the study specified.

Chapter 2 included theoretical research.

Chapter 3 included the description of the experimental research of the acoustic field-activated aerosols side exhauster, and the dependence of acoustic field characteristics on noise generator's structure was described.

6 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: one article – in the ISI Web of Science register, one articles – in the journal quoted by Copernicus data base, three articles – in material reviewed during international conferences and two article during a national conference. 7 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

A_0 – svyravimų poslinkio amplitudė;

B – vonios plotis;

C_c – praslydimo faktorius, kai dalelių skersmuo – tarp 0,1 ir 10 μm ;

C_i – dujų komponento svorinė koncentracija mišinyje;

C_T – vidutinis šilumos imlumas;

c – garso greitis;

D – rezonatoriaus skersmuo;

D_0 – difuzijos koeficientas esant $T_0 = 273\text{ K}$ ir $p_0 = 101308\text{ Pa}$;

D_{ij} – difuzijos koeficientas;

D^T – termodifuzijos koeficientas;

$\frac{D}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$ – vadinamoji substancinė išvestinė;

d – tūtos skersmuo;

d_p – dalelės skersmuo;

E – koaguliacijos efektyvumas;

F – jėgos vektorius, veikiantis medžiagos masės vienetą;

f – svyravimų dažnis;

G – dalelių skaičiaus 1 cm^3 ;

g – laisvojo kritimo pagreitis;

g_{12} – hidrodinaminės sąveikos funkcija;

H – atstumas nuo skysčio paviršiaus iki vonios krašto;

h_x – entalpija;
 I – garso intensyvumas;
 $i_i = p_i/p$ – dujų mišinio komponento virš skysčio tūrinė dalis;
 i, j, k, l – indeksai;
 k – koeficientas, priklausantis nuo dažnio, dalelių sąveikos ir naudojamos aparatūros;
 L – rezonatoriaus ilgis;
 L_d – atstumas tarp dalelių;
 l – vonios ilgis;
 M – Macho skaičius;
 M_1 – Macho skaičius iki smūginės bangos;
 M_i – komponento molekulinė masė;
 M_g – lyginamoji molekulinė masė virš skysčio;
 m – molekulinė masė;
 m_p – dalelės masė;
 n – aerosolinių dalelių koncentracija per laiką t ;
 n_0 – aerosolinių dalelių pradinė koncentracija;
 P_o – slėgis generatoriuje;
 p – aplinkos slėgis, 101 325 Pa;
 $\tilde{p}$ – slėgis, įvertinantis išcentrines jėgas;
 p_g – garso slėgis;
 p_i – dalinis komponento slėgis virš skysčio, kai skysčio temperatūra t_{sk} ;
 q – apibendrinta koordinatė;
 q_{s0} – konvekcinės šilumos kiekis;
 q_v – šilumos kiekis, išskiriamas vidinių šaltinių;
 R – dujinė pastovioji;
 r_p – dalelės spindulys;
 r_{p0} – pradinis dalelės spindulys;
 S – atstumas tarp rezonatoriaus ir tūtos;
 Sat – Saterlando konstanta;
 T_k – skysčio temperatūra, K;
 t – laikas;
 t_i – funkcijos $u(t)$ atvirkštinės Furjė transformacijos charakteringas laikas;
 t_{sk} – skysčio temperatūra, °C;
 U_g – terpės greičio svyravimų amplitudė;
 U_p – dalelės greičio svyravimų amplitudė;
 u_p – dalelės greitis terpėje;

V – srauto judėjimo greitis;
 v_b – pūtimo greitis;
 v_g – garų kilimo greitis;
 v_s – siurbimo greitis;
 x_p^1 ir x_p^2 – atitinkamai pirmos ir antros dalelių poslinkių amplitudės;
 x_p – dalelės svyravimo amplitudė;
 x_g – garso šaltinio svyravimo amplitudė;
 x_p – dalelės poslinkio amplitudė;
 x_g – terpės poslinkio amplitudė;
 $\beta_{i,k}$ – koaguliacijos branduolys;
 $\beta_{Oi,k}$ – koaguliacijos ortokinetinis komponentas;
 $\beta_{Hi,k}$ – koaguliacijos hidrodinaminis komponentas;
 $\gamma = C_p / C_v$ – specifinės šilumos santykis pastovaus slėgio ir tūrio (orui $\gamma = 1,4$);
 ε – dalelių susidūrimo efektyvumas;
 δ – drėgnumas;
 η_g – dalelės aptekėjimo koeficientas terpeje;
 η_p – traukos koeficientas;
 η_{12p} – tarp pirmos ir antros dalelių santykinis traukos koeficientas;
 λ_{gas} – dujų molekulių vidutinis laisvasis kelias;
 λ – šilumos laidumo koeficientas;
 μ – antras dinaminis klampos koeficientas;
 μ_0 – dinaminis garų komponento klampos koeficientas, kai temperatūra virš skysčio
 $t = 0$ °C;
 μ_g – garų mišinio virš skysčio dinaminis klampos koeficientas;
 ξ – oro koeficientas, 0,5;
 ρ_g – srauto tankis;
 ρ_p – dalelės tankis;
 τ – dalelių relaksacijos laikas;
 φ – virpesių fazė;
 ω – ciklinis dažnis;
 ω_i – kampinis dažnis;
 Φ_d – disipacinė funkcija;
 ∇ – Laplaso operatorius.

Santrumpa

HG – Hartmano garso generatoriu

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
 1. ŠONINIŲ SIURBTUVŲ IR AEROAKUSTINIŲ SRAUTŲ TYRIMŲ METODŲ APŽVALGA	 7
1.1. Aerosoliai šiuolaikinėse gamybos technologijose	7
1.2. Aerosolių surinkimo įrenginių tipai.....	9
1.3. Aeroakustiniai srautai ir jų analizė	13
1.4. Aerosolių sąveikos sraute teorinių tyrimų analizė.....	18
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	26

2. SIURBTUVO, AKTYVINAMO AEROAKUSTINIŲ SRAUTŲ, PARAMETRŲ TYRIMAI	29
2.1. Garuojančio skysčio ir siurbtuvo srautų pagrindinės lygtys	29
2.2. Skysčio garavimo ir siurbtuvo srautų greičių tyrimas	32
2.3. Garų klampos ir tankio tyrimai	34
2.4. Šoninio siurbtuvo garso generatoriaus parametrų ir akustinio lauko charakteristikų tyrimai	35
2.5. Antrojo skyriaus išvados	40
3. EKSPERIMENTINIAI AEROZOLINĖS TARŠOS SIURBTUVO TYRIMAI	43
3.1. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, eksperimentinių tyrimų metodika	44
3.2. Eksperimentiniai aeroakustinio srauto tyrimai	47
3.3. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumo tyrimas	52
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	58
BENDROSIOS IŠVADOS	59
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	61
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	69
PRIEDAI	71
A priedas. Patentas LT5891. Aktyvinamas aerozolinės taršos nusiurbtuvas	71
B priedas. Garso slėgio lygio priklausomybių nuo dažnio matavimo rezultatai	80
C priedas. Šalinamo oro srauto santykinio drėgnumo pokyčio laike matavimo rezultatai	83

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of the problem.....	1
Relevance of the thesis.....	2
The object of research.....	2
Aim of the work.....	2
Tasks of the work.....	2
Methodology of research.....	3
Scientific novelty.....	3
Practical value.....	4
Defended propositions.....	4
Approval of Rezults.....	4
The scope of the scientific work.....	5
1. THE REVIEW OF AEROSOL POLLUTION EXHAUSTERS AND AEROACOUSTIC FLOWS RESEARCH METHODS	7
1.1. Aerosols in the work environment.....	7
1.2. The review of Aerosols exhausters.....	9
1.3. Aero acoustic Flow and their Analysis.....	13
1.4. Analysis of Theoretical Studies of Aerosols Interaction in the Flow	18
1.5. Conclusions of First Chapter and Formulation of the Tasks of the Thesis	26
2. INVESTIGATION OF PARAMETERS OF SIDE EXHAUSTER ACTIVATED BY AEROACOUSTIC FLOW	29
2.1. Main equation of vapour and exhauster flows.....	29
2.2. Theoretical Studies of vapour of liquid and suction velocity of exhauster.....	32
2.3. Analysis of dynamic coefficient of viscosity and density of the gas mixture above liquid.....	34
2.4. Theoretical Studies of Acoustic Field of an activated Aerosol exhauster	35

2.5. Conclusions of Second Chapter.....	40
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF AEROSOL POLLUTION EXHAUSTER	43
3.1. Methodology of Experimental Studies of Aerosol exhauster activated by Aero Acoustic Flow.....	44
3.2. Experimental Studies of Aero Acoustic Flow.....	47
3.3. Experimental Studies of efficiency of an activated aerosol exhauster.....	52
3.4. Conclusions of Third Chapter.....	58
GENERAL CONCLUSIONS	59
REFERENCES	61
LIST OF THE AUTHOR SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION.....	69
ANNEX	71
A annex. Patent LT5891. An activated Aerosol exhauster.....	71
B annex. Results of sound pressure level measurement.....	80
C annex. Results of Humidity measurement.....	83

Ivadas

Problemos formulavimas

Daugelis mechaninių įrenginių, šalinančių aerosolius nuo garuojančių paviršių, nėra pakankamai efektyvūs. Tam tikslui naudojami aerosolinės taršos šoniniai siurbtuvai, kurių skaičiuojamasis darbo efektyvumas ne visada pasiekiamas ir priklauso nuo virš garuojančio paviršiaus vykstančių pernašos procesų mechanizmų. Siekiant užtikrinti, kad kenksmingųjų medžiagų koncentracija darbuotojo kvėpavimo zonoje neviršytų nustatytų Lietuvos higienos normų reikalavimų HN 23:2011, reikia kurti įrenginius naujai, naudojant šiuolaikines technologijas.

Vienas sudėtingų iššūkių yra galimybė integruoti akustinio lauko generatorius į technologinių procesų kompleksą, mažinant aerosolių kiekį pernašos procesų aplinkoje. Šį uždavinį galima išspręsti tik gerai suprantant aeroakustinių srautų fiziką, atlikus nuodugnius akustinio lauko poveikio aerosoliams tyrimus, kuriais remiantis galima pagrįsti aerosolių šalinimo sistemų tobulinimo kryptis ir sudaryti eksperimentinių tyrimų metodologiją. Tiriant akustinio lauko poveikį aerosolių koaguliacijai, padaryta didelė pažanga, tačiau tokie reiškiniai ir procesai yra per daug sudėtingi ir skirtingi, tad sunku ar beveik neįmanoma perkelti ir pritaikyti tokių tyrimų laimėjimų tiesiogiai praktikoje. Todėl tokių sistemų kūrimas ir tobulinimas turi būti grindžiamas tyrimais specifinėje darbo aplinkoje.

Vienas pagrindinių tokių sistemų projektavimo tikslas – siurbimo, pūtimo ir akustinio lauko generavimo efektyvumas tame pačiame įrenginyje.

Darbe siekiama nustatyti aerosolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, parametrus ir jo sukurtą, virš garuojančio skysčio vykstančių aeroakustinių procesų charakteristikas, atsižvelgiant į skysčio temperatūrą.

Darbo aktualumas

Tradiciniai aerosolinės taršos šoniniai siurbtuvai šalina aerosolius nuo garuojančių paviršių nepakankamai efektyviai, todėl jie įrengiami tik tose patalpose, kuriose darbuotojai būna trumpą laiką. Siekiant efektyviau išvalyti darbo zoną nuo aerosolinės taršos reikalingi naujos konstrukcijos šoniniai siurbtuvai, kurie be tradicinių funkcijų turėtų ir akustinio lauko generavimo funkciją. Žinoma, kad akustinio lauko poveikis garavimo zonoje ženkliai padidina aerosolių koaguliaciją ir tuo pačiu sumažina patalpos užterštumą. Analizuojant aerosolių sąveiką virš garuojančio skysčio paviršiaus, reikia išspręsti daug mokslinių ir techninių uždavinių. Vienas iš jų tiriamos sistemos modelio sudarymas bei skaičiavimams reikalingų parametrų nustatymas eksperimentiniais tyrimais. Eksperimentiniams tyrimams atlikti ir vykstančių procesų srautuose dėsningumams nustatyti reikalingi naujo tipo siurbtuvai, galintys generuoti aeroakustinius srautus virš garuojančių paviršių. Tad būtina ieškoti efektyvių, bet nebrangių aerosolių mažinimo metodų ir įrenginių.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – aerosolinės taršos siurbtuvas aktyvinamas aeroakustiniu srautu.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – ištirti aerosolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumą ir suformuluoti jo tyrimo metodiką.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikta mokslinės literatūros analizė apie aerzolinės taršos siurbtuvų tipus, jų tyrimus.
2. Ištirti sukurto aerzolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, garso generatorių parametrų įtaką generuojamam akustiniam laukui.
3. Pasiūlyti aerzolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, eksperimentinių tyrimų metodiką.
4. Eksperimentiškai ištirti garso generatorių akustinio lauko charakteristikas.
5. Eksperimentiškai ištirti aerzolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumą.

Tyrimų metodika

Rengiant darbą atlikti teoriniai tyrimai taikant pusiau analitinius metodus, atliekant aeroakustinio srauto akustinio lauko parametrų nustatymus, ir eksperimentiniai tyrimai, taikant naujai sukurta tyrimo metodiką.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Atlikta aerzolių mažinimo aerzolinės taršos siurbtuvais efektyvumo analizė taikant lyginamuosius jų efektyvumo vertinimo metodus. Gautos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, akustinio lauko charakteristikos leidžia įvertinti aerzolių koaguliacijos efektą. Nustatyta, kad aerzoliai, kurių dalelių skersmuo 5–10 μm , koaguliuojasi esant žemam (1–5 kHz) akustinio lauko dažniui.
2. Nustatyti šalinamo oro drėgnumo kitimo dėsningumai veikiant siurbtuvo aeroakustiniam srautui ir kylant skysčio temperatūrai. Parodyta, kad siurbtuvo be aeroakustinio srauto kylant skysčio temperatūrai šalinimo efektyvumas sumažėjo iki 58,5% lyginant su siurbtuvu, aktyvinamu aeroakustiniu srautu.
3. Pasiūlytas aerzolinės taršos šoninis siurbtuvas, aktyvinimas aeroakustiniu srautu, leidžia spręsti darbo aplinkos oro užterštumo mažinimo problemą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas, ištirtas ir eksperimentiškai išbandytas šoninis siurbtuvas, aktyvinamas aeroakustiniu srautu, naudojimas kartu su garso generatoriumi gerokai supaprastina teršalų šalinimo procesą, jis tampa efektyvesnis, reikalauja mažiau darbo sąnaudų, lyginant su kitais šiuo metu taikomais teršalų šalinimo būdais.

Ginamieji teiginiai

1. Naudojant naują aerozolinės taršos mažinimo metodą, pagrįstą akustinio lauko poveikiu, geriausios akustinio lauko charakteristikos gaunamos, kai garso generatoriaus tūtos ir rezonatoriaus skersmenų santykis 1,66, rezonatoriaus ilgis 12,7 mm ir atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm.
2. Sukurtas šoninis siurbtuvas aktyvinamas aeroakustiniu srautu leidžia sumažinti aerozolinę taršą darbo aplinkoje net iki 58,5 %.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdintos šešios mokslinės publikacijos: viena – mokslo žurnale, įtrauktame į ISI *Web of Science* sąrašą (Tetsman, Vekteris 2013a); viena – mokslo žurnale ETARS (Tetsman, Vekteris 2013b); dvi – recenzuojamų tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje (Tetsman, Vekteris 2010a, 2011); dvi – kituose tarptautinių ir respublikinių konferencijų straipsnių rinkiniuose (Tetsman, Vekteris 2010b, 2012).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2010, 2011, 2012 m. Vilniuje;
- Respublikiniame XVIII Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos asociacijos seminare 2010 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechanika“ 2010 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“ 2011 m. Prahoje, Čekijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2012 m. Bialystoke, Lenkijoje.

Gautas Lietuvos Respublikos patentas Nr. LT5891 išradimui „Aktyvinamas aerozolinės taršos nusiurbtuvas“. Autoriai: Vladas Vekteris, Ina Tetsman, Vytautas Striška, Artūras Kilikevičius.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai. Taip pat yra vienas priedas.

Darbo apimtis – 72 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 50 numeruotos formulės, 29 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją naudotasi 129 literatūros šaltiniais.

Šoninių siurbtuvų ir aeroakustinių srautų tyrimų metodų apžvalga

Skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Išanalizuotos aerosolinių dalelių šalinimo priemonės ir jų formuojamų srautų charakteristikos, pateiktos aeroakustinių srautų charakteristikų ir disertacijos tema atliktų mokslinių darbų analizės. Išnagrinėti veiksmas, veikiantys koaguliacijos proceso efektyvumą.

Šių tyrimų tikslas – taikant aeroakustinius srautus aerosolio šalinimo įrenginiuose, rasti geriausius jų parametrus ir pritaikyti akustinės koaguliacijos efektą kenksmingųjų medžiagų koncentracijai mažinti aplinkoje.

Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

1.1. Aerosoliai šiuolaikinėse gamybos technologijose

Vienas svarbiausių Lietuvos darnaus vystymosi strategijos prioritetų – pagrindinių ūkio šakų technogeninio poveikio aplinkai ir žmonių sveikatai mažinimas, integruojant aplinkos interesus į jų vystymosi strategijas bei didinant ekologinį efektyvumą. Todėl, siekiant aukšto aplinkos apsaugos lygio ūkinėje veikloje, turi

būti diegiamas geriausias gamybos būdas, kuriuo vienas iš tikslų – išvengti taršos jau pradinėje gamybos pakopoje, taip pat ir darbo aplinkoje. Tyrimai rodo, kad, didėjant technogeninei oro taršai, būtent daugiadispersių aerozolinių dalelių pavidalu, didėja žmonių sergamumas, sukeliantis ekonominius nuostolius (Pivrikas 2008).

Vienas iš pagrindinių fizikinių darbo aplinkos veiksnių yra mikroklimatas, kurį sukuria žmogaus organizmą veikiantys oro temperatūros, santykinės drėgmės bei oro judėjimo greičio deriniai, reglamentuojami Lietuvos higienos normų HN 69:2003. Pagal šias normas žmogui komfortiška santykinė drėgmė yra 40–60 %, o temperatūra – atsižvelgiant į darbo sunkumą – 16–20 °C.

Ypatingas dėmesys skiriamas gamybos procesams, kai naudojamos kenksmingosios medžiagos, pavyzdžiui, dažymo, cheminis padengimo, popieriaus ir gumos gamybos procesai ir kt. Jie atliekami voniose, kuriose virš skysčio formuojasi aerozoliai.

Vandens ir daugelio kitų medžiagų garai dažniausiai nematomi. Kasdienėje kalboje garais paprastai vadinami iš dalies į skystą aerozolį susikondensavę garai, t. y. garų ir aerozolio mišinys, susidedantis iš daugelio skysčio dalelių, pakibusių dujinėje terpėje. Dėl didelio suminio tokių dalelių paviršiaus ploto aerozoliai labai absorbuoja dujas, greitai reaguoja su terpe, gerai išsklaido šviesą, yra geri katalizatoriai. Kai kurių aerozolių aerodinaminiai dydžiai pateikti 1.1 lentelėje (Reist 1987).

Kenksmingas aerozolių poveikis žmogaus organizmui labiausiai priklauso nuo fizikinių ir cheminių jų savybių, dalelių dydžio ir formos, koncentracijos ore, poveikio laiko. Pavojingiausios yra apie 5 µm dydžio aerozolinės dalelės, nes įkvėptos jos prasiskverbia į plaučių alveoles. Dalelės, didesnės kaip 10 µm, susilaiko viršutiniuose kvėpavimo takuose, o mažesnės kaip 0,25 µm iš dalies iškvepiamos. Pakilus darbo aplinkos oro temperatūrai, padidėja apsinuodijimo pavojus, nes, kylant oro temperatūrai, didėja medžiagų lakumas ir garavimas, o padidėjus oro drėgnumui, sustiprėja, pavyzdžiui, druskos rūgštis, vandenilio fluorida toksiškumas. Todėl procesų taršos kontrolė yra itin aktuali.

1.1 lentelė. Aerozolių pasiskirstymas pagal aerodinaminį skersmenį, µm (Reist 1987)
Table 1.1. The values of aerosol diameter, µm (Reist 1987)

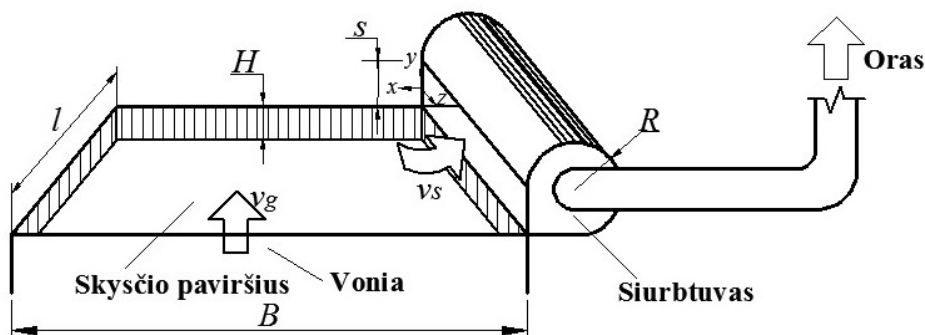
Aerozolis	Aerodinaminis skersmuo, µm
Amonio chloridas	0,1
Sieros rūgšties rūkas	0,3 – 0,5
Atmosferinis rūkas	0,3–5,0

Daugelis pirmaujančių šalies mokslininkų siekia pagerinti dujų surinkimo ir valymo įrangą, skaičiavimo metodus procesams, susijusiems su dujų judėjimu, apskaičiuoti tikruosius gamybos procesų parametrus, gerinti esamas ir kurti naujas aukštųjų išteklių ir energiją taupančias technologijas, o tai yra svarbu ekonomikai.

1.2. Aerosolių surinkimo įrenginių tipai

Norint užtikrinti, kad kenksmingųjų medžiagų koncentracija darbuotojo kvėpavimo zonoje neviršytų nustatytos higienos normos, prie taršos šaltinio montuojami vietiniai siurbtuvai. Kadangi teršalai sklinda dėl perteklinės šilumos nuo teršalų šaltinio ir siurbtuvo sukurtų srovių, pagal jų tarpusavio padėtį galimos tokios situacijos: siurbtuvo ir teršalų šaltinio ašys sutampa (atvirieji gaubtai virš įrenginių); siurbtuvas yra ne vienoje ašyje su teršalų židiniu (traukos sienelės, šoniniai siurbtuvai); uždarieji gaubtai (traukos spintos) ir t. t.

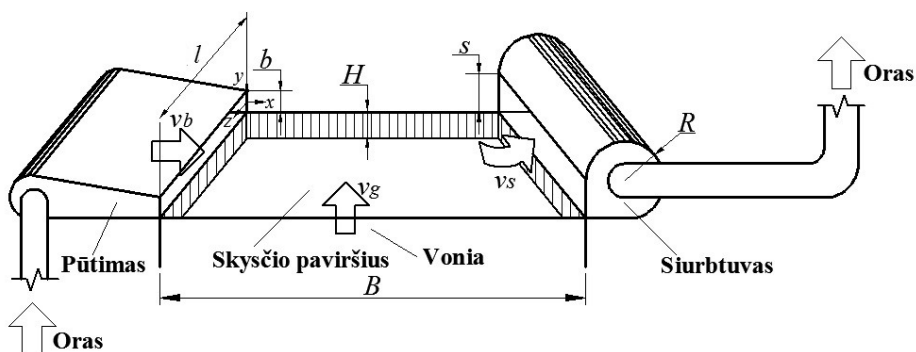
Visi toliau nagrinėjami siurbtuvai identifikuojami kaip šoninio siurbimo siurbtuvai, nes jie priima orą nuo viso skysčio paviršiaus iš šono. Tokius siurbtuvus galima skirstyti į vienpusius ir dvipusius. Kai vonios plotis yra iki 0,7 m, įrengiami vienpusiai šoniniai siurbtuvai iš vienos išilginės vonios pusės. Kai vonios plotis daugiau kaip 0,7 m, naudojami dvipusiai šoniniai siurbtuvai. Pagal tai, kaip veikia nuo teršalų šaltinio sklindantis srautas ir siurbimo srautas, siurbtuvai skirstomi į paprastuosius (1.1 pav.) ir aktyvintuosius (1.2 pav.). Aktyvinieji šoniniai siurbtuvai papildomai turi pučiamo oro srovę, kuri nukreipia teršalus į siurbimo angą.



1.1 pav. Vienpusio šoninio siurbtuvo schema

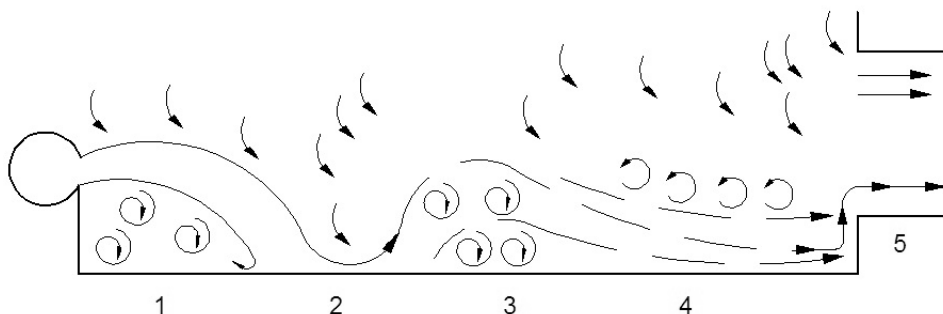
Fig. 1.1. Definitions of geometric parameters of push and pull system

Siurbiant šoniniam siurbtuvui galima stebėti sudėtingą procesą (1.3 pav.), kuris vyksta virš išilgusio skysčio paviršiaus: veikiant kėlimo jėgai aerosolis kyla į viršų, o vonios krašte esantis siurbtuvas turi sukurti tokį oro judėjimo greitį, dėl kurio aerosolis būtų priverstas pakeisti savo judėjimo kryptį į siurbtuvo plyšį. Kai siurbtuvas neveikia arba yra nepakankamas siurbimas, aerosoliai, esantys priešingoje pusėje nuo siurbtuvo plyšio, yra nesusiurbiami. Didėjant skysčio temperatūrai kilimo jėga didėja, didėja aerosolių koncentracija ir užterštumas. Sumažinti jų koncentraciją galima sukūrus akustinį lauką virš taršos šaltinio, pūtimo srovė gali būti aeroakustinė srovė, ir tai leis padidinti įrenginių darbo efektyvumą ir sumažins aerosolio koncentraciją šalinimo sraute.



1.2 pav. Aktyvintojo vienpusio šoninio siurbtuvo schema

Fig. 1.2. Definitions of geometric parameters of push and pull system



1.3 pav. Pritekamosios turbulentinės srovės scheminis vaizdas: 1 – grįžtamojo ryšio srovės po pusiau laisvu srautu; 2 – poveikio zona; 3 – pasienės srovės reorganizacijos zona; 4 – pasienės srovės zona; 5 – pasienės srovės šalinimas (Marzal 2002b)

Fig. 1.3. Schematic representation of push flow: 1 – feedback current under semi-free jets; 2 – impact zone; 3 – wall jet reorganization zone; 4 – wall jet zone; 5 – wall jet entering exhaust unit (Marzal 2002b)

Masės pernešimo procesas nuo garuojančio skysčio į aplinką gali būti difuzinis, taip pat su priverstine ar natūralia konvekcija. Sudėjus tokius srautus sukuriamą sudėtinga srautų dinamika virš vonioje esančio skysčio (Hughes 1990; Flynn 1995; Robinson, Ingham 1996; Rota 2001). 1.3 paveiksle galima matyti, kaip kinta pritekamosios turbulentinės srovės dinamika.

Mokslininkai (Rota 2001; Marzal 2003b; Huang 2004) nagrinėjo pučiamo, siurbiamo ir garų kilimo srautų greičių įtaką teršalų koncentracijai darbo aplinkoje, tačiau nepasiūlė metodų, kaip sumažinti teršalų koncentraciją jų atsiradimo vietoje. 1.4 paveiksle (Huang 2004) pavaizduotos keturių bandymų vizualizacijos esant pūtimo greičiui $v_b = 0,3$ m/s ir garų kilimo greičiui $v_g = 0,05$ m/s, kai siurbiamo oro srauto greitis v_s keitėsi nuo 1,55 m/s iki 4,17 m/s. Tas įrodo, kad būtent siurbimo greitis daro įtaką teršalų pakilimo kampui virš skysčio paviršiaus, bet jo reikšmė priklauso nuo pučiamo ir garų kilimo greičių.

Kad energijos sąnaudas būtų mažiausios, siurbimo ir pūtimo greičius galima nustatyti pagal 1.1 ir 1.2 lygtis, skaičiuojamoji schema pateikta 1.1 ir 1.2 paveiksluose (Huang 2004):

$$\frac{v_s^*}{v_g} = \left(-3362,3v_g^3 + 1893,9v_g^2 - 365,6v_g + 46 \right) \times \exp \left[\left(-103,6v_g^3 + 38,6v_g^2 - 4,3v_g + 1,1 \right) \times B \right], \quad (1.1)$$

$$\frac{v_s^*}{v_b^*} = \exp \left[\left(-21,7v_g^2 + 6,7v_g + 1,1 \right) \times B + \left(-53,4v_g^2 + 21,1v_g + 1,2 \right) \right]. \quad (1.2)$$

Aerolių koncentracijai mažinti pasiūlytas naujos konstrukcijos šoninis siurbtuvas su generuojamu aeroakustiniu srautu (patentas Nr. LT5891). Toks įrenginys (1.5 pav.) naudojamas aeroliams mažinti nuo įvairios temperatūros skysčio paviršiaus, kuris laikomas riboto dydžio talpose, skirtose įvairioms technologinėms operacijoms ir procesams atlikti.

Aerolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, konstrukcijos pranašumas tas, kad lyginant su kitų siurbtuvų konstrukcijomis leidžia sumažinti ne tik nusiurbiamo oro kiekį, bet ir sumažinti nusiurbiamų aerolių koncentraciją nusiurbtame ore. Nusiurbto aerolio kiekis oro sraute daro įtaką jo išvalymo kokybei ir sąnaudoms, kurių reikia jam išvalyti, vertinant pagal surinktos taršos kiekį nuo valytino paviršiaus.



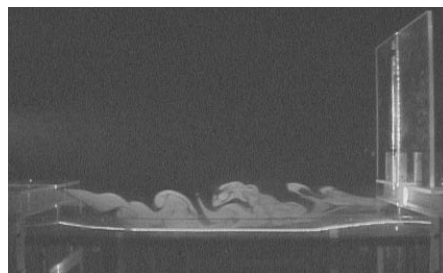
a)



b)



c)



d)

1.4 pav. Tipinių srautų nuotraukos, gautos naudojant dūmų vizualizacijos metodus su lazerinės šviesos sklaida. Dūmai leidžiami pūtimo įtaisų srove, kai $v_k = 0,05$ m/s, $v_b = 0,30$ m/s: a) – sklaidos režimas $v_s = 1,55$ m/s; b) – perėjimo režimas $v_s = 2,79$ m/s; c) – inkapsuliacijos režimas $v_s = 3,49$ m/s; d) – stipraus siurbimo režimas $v_s = 4,17$ m/s. Išlaikymas – $1/30$ s (Huang 2004)

Fig. 1.4. Photos of typical characteristic flow modes obtained by using smoked-flow visualization method assisted with laser-light heet scattering. Smoke released with push-jet flow, when $v_k = 0.05$ m/s, $v_b = 0.30$ m/s: a) – dispersion mode $v_s = 1.55$ m/s; b) – transition mode $v_s = 2.79$ m/s; c) – encapsulation mode $v_s = 3.49$ m/s; d) – strong suction mode $v_s = 4.17$ m/s. Shutter speed $1/30$ s (Huang 2004)

Aerozolinės taršos siurbtuvą (1.5 pav., a) sudaro: pūstuvą (1), kuriuo viduje įrengtas garso generatorius, sudarytas iš kolektoriaus (2), kuriame suformuotos skylės (3) ir jų vietose prie kolektoriaus sandariai prijungtos tūtos (4), nukreiptos į sferinės formos atspindėtuvus (rezonatorius) (5), o jie savo ruožtu nukreipti į angą (6), kuri suformuota pūstuve (1).

Tūtoje (4) (1.5 pav., b) sumontuoti srauto užsuktuvai (7) ir (8), kurių užsukamo srauto kryptis yra priešinga, ir jie išdėstyti taip, kad gretimose tūtos (4) užsukto srauto kryptis būtų priešinga. Pūstuvą (1) išdėstytas ant taršos šaltinio (9) krašto. Priešingoje taršos šaltinio (9) pusėje išdėstytas cilindrinės formos siurbtuvas (10), kuriame pagal liestinę – tangentiškai – per visą jo ilgį suformuo-

ta aerozolių įsiurbimo anga (11), ir jis nukreiptas į taršos šaltinį (9). Oro išsiurbimo atvamzdis (12) prie siurbtuvo (10) prijungtas tangentiškai.

1.3. Aeroakustiniai srautai ir jų analizė

Aeroakustiniai srautai visais laikais traukė didelį dėmesį dėl plačių galimybių naudoti juos pramoniniuose aerodinaminiuose įrenginiuose. Pirmąkart jie buvo taikomi dulkėms ir dūmams koaguluoti bei nusodinti (Young 1949; Svory 1950), vėliau – garavimui (Khandwawala 1974; Li 2007), kurui uždegti (Phillips 1970. Rakowsky 1974) ir pan.

Hartmanas (Hartmann) – vienas pirmųjų mokslininkų, paaiškinęs rezonanso veikimo mechanizmą. Jis sukūrė garso generatorių ir teigė, kad oro srovė, kuri periodiškai užpildo rezonatorių ir išteka iš jo, generuoja akustinį lauką (Hartmann 1918). Tyrimai, susiję su Hartmano generatoriumi (HG), orientuoti į įvairius dalykus, pavyzdžiui, nustatyti darbo režimus, geometrinių parametrų pokyčius gerinant eksploatacines savybes, teorinį modeliavimą, taikant analitinius arba skaitinius metodus, nustatyti parametrus konkrečiam atvejui, valdant oro srautą padidinti HG akustinį intensyvumą, nustatyti jo priklausomybes nuo garso kokybės ir pan.

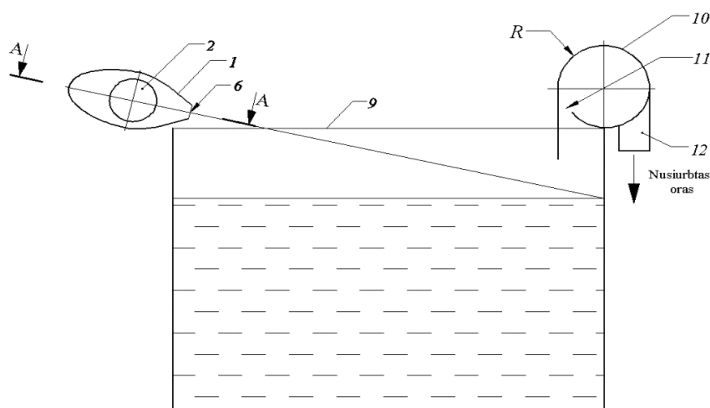
Šprengeris (Sprenger 1954) pastebėjo, kad kartu su rezonansiniu reiškiniu vyksta šiluminis poveikis. Tai paskatino tyrėjus aprašinėti įtaiso šiluminio efekto didinimą ir ieškoti jo taikymo srities. Ši idėja buvo labai patraukli, nes Šprengeris pasiekė šiluminį efektą be degimo ar kitų judančių prietaiso dalių.

Aerodinaminis akustinių bangų generavimas glaudžiai susijęs su procesais, vykstančiais viršgarsiniame sraute. Siekiant geriau suprasti šiuos procesus, reikia apžvelgti srauto ypatumus: srauto greitį, srauto slėgį, geometrinių srauto parametrų priklausomybę nuo formuojamų akustinių charakteristikų. Dauguma anksčiau tyrėjų bandė padidinti generuojamo garso slėgio amplitudę, kartu ir prietaiso akustinį efektyvumą, bet mažai kas bandė kontroliuoti prietaiso dažnį.

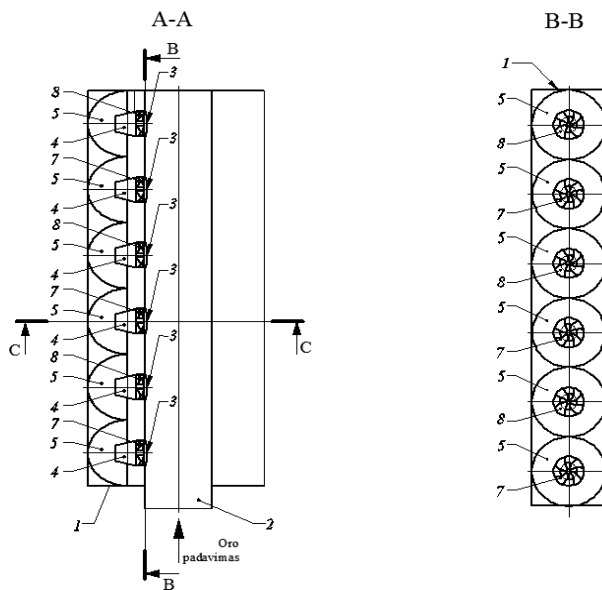
Aerodinaminio akustinio generatoriaus tyrimai gali būti klasifikuojami į aerodinaminius ir akustinius, į kuriuos įeina daugybė teorinių ir eksperimentinių tyrimų. Aerodinamikoje srauto greitį (Lasauskas 2008) įprasta apibūdinti absoliučiojo srauto greičio ir garso greičio santykiu. Šis santykis vadinamas Macho skaičiumi ir žymimas raidė M . Pagal Macho skaičių visus oro srautus galima suskirstyti į keletą diapazonų: ikigarsinis ($M < 1$), transgarsinis ($0,8 < M < 1,2$), garsinis ($M = 1$), viršgarsinis ($M > 1,2$) ir kt. Kai srauto greitis yra artimas garso greičiui, tankis nespėja išsilyginti. Keičiantis slėgiui, išilgai su srovės linija keičiasi ir tankis. Todėl Macho skaičius yra oro srauto spūdumo matas.

Srautas iš ikigarsinio į viršgarsinį gali greitėti pamažu, bet iš viršgarsinio į ikigarsinį jis sulėtėti gali tik šuoliškai, sudarydamas smūgio bangą. Tokio srauto

struktūra pateikta 1.6 paveiksle. Smūgio bangoje dalis mechaninės energijos virsta šiluma.



a)



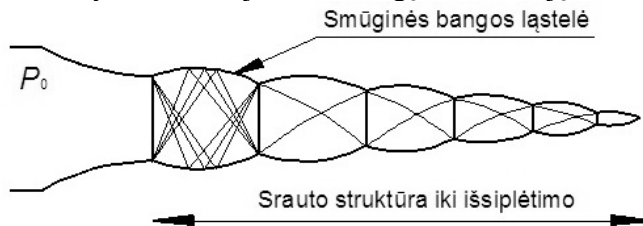
b)

1.5 pav. Aktyvinamojo aerozolinės taršos siurbtuvo schema: a) – bendras vaizdo schema, b) – pūstuvo įtaiso schema

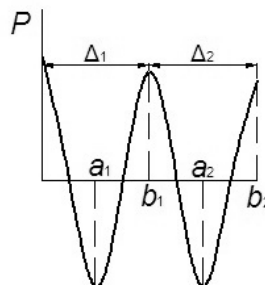
Fig. 1.5. Aerosol pollution exhauster under aeroacoustic flow: a) – scheme of exhauster, b) – scheme of exhauster push

Akustiniai svyravimai gali formuotis ir ikigarsinėje srovėje (Svory 1950; Hartmann, Trusdo 1951), kai srautas su rezonatoriumi išdėstyti ant vienos ašies. Pagrindinis reikalavimas rezonansiniam reiškiniui yra teigiamas grįžtamasis ryšys. Kai išeinanti srovė išsiplečia, susidaro ląstelių struktūra su periodiniais statinio slėgio pokyčiais (1.6 pav.). Statinis slėgis svyruoja priklausomai nuo srovės slėgio ir išsilygina su aplinkos slėgiu.

Hartmanas neaprašė smūgio bangos susidarymo esant atskiriems smūgiams į rezonatorių, kai jis yra viršgarsinio lauko zonoje. Smitas ir Paelis (Smith 1964; Powell 1964) paaiškino šį fenomeną „nestabilumo zonos“ susidarymu, atsižvelgiant į smūgio bangos buvimą. Didėjant atstumui nuo tūtos krašto, srovė platėja, o srauto tekėjimo greitis tampa viršgarsinis. Kai srovės plotis didžiausias, srauto greitis turi didžiausią reikšmę, o srauto tankis – mažiausią. Tūtos tekėjimo srauto trikdymai formuoja Macho kūgį, o kertanti jį srovė išlinksta.



a)



b)

1.6 pav. Smūginio srauto iš tūtos susidarymas: a) – greitėjimo ir stabdymo zonos (Raman 2009; Srinivasan 2009), b) – nestabilumo zonos slėgio svyravimas smūginiam srautui iš tūtos greitėjant ir lėtėjant (Rosenberg 1967)

Fig. 1.6. A shock-containing jet: a) – accelerating and decelerating regions (Raman 2009, Srinivasan 2009), b) – regions of instability governed by accelerating and decelerating regions in a shock-containing jet (Rosenberg 1967)

Smūgio bangos plitimo greitis ir ją lydinčio oro srauto greitį v_{shock} galima išreikšti iš Bernulio lygties Macho skaičiumi (Loycanskiy 2003):

$$v_{shock} = \frac{2}{\gamma + 1} \cdot \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right) \cdot c, \quad (1.3)$$

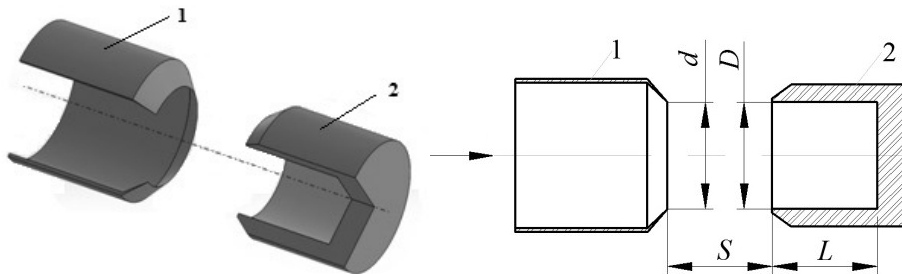
čia $\gamma = C_p / C_v$ – specifinės šilumos santykis pastovaus slėgio ir tūrio (orui $\gamma = 1,4$); c – garso greitis, m/s; M_1 – Macho skaičius iki smūginės bangos.

Remiantis literatūra (Saronia 1979; Back 1979), rezonansinis triukšmas klasifikuojamas į tris pagrindinius režimus: srauto nestabilumo, srauto akustinio garso sklaidimo ir staigaus priešingo tekėjimo. Pirmas režimas susijęs su Kelvino–Helmholtco (Kelvin–Hemholtzt) nestabilumu esant mažiems toroidiniams sukuriams srauto paviršiuje. Antras, aukšto dažnio režimas, susidaro dėl Macho bangos ir srauto ribos sąveikos. Pagrindiniai trečio režimo komponentai (pvz., slėgis) priklauso nuo geometrinių formų.

Ištekantis iš tūtos oro srovės srautas pasiekia garso greitį, kai slėgis generatoriuje P_0 lygus P_{kr} (P_{kr} orui 1,88p, p – aplinkos slėgis), susidaro smūgio banga. Dėl srauto ribų nuokrypių nuo tūtos ašies jos kraštuose susidaro trikdžiai, kurie, skleidžiami su garso greičiu prieš srauto srovę, negali patekti atgal į tūtą, smunka žemyn srautu formuodami srauto struktūrą iš ląstelių (1.6 ir 1.7 pav.). Be to, vienintelis galimas kintamasis parametras, veikiantis ląstelių dydį ir kartu Macho disko buvimą vietą bei skleidžiamo garso dažnio amplitudę, yra iš tūtos tiekiamo oro slėgis.

Teoriškai srauto struktūra turėtų kartotis iki begalybės, bet dėl srovės turbulencijos ir maišymosi jos paviršiuje svyravimai slopinami per kelis periodus (1.6 pav., a). Ryškios pulsacijos vyksta tik pirmosiose srauto ląstelėse ir paprastai prie rezonatoriaus krašto išdėstomi naudojant atkarpą $a_1 b_1$ (1.6 pav., b) (Rosenbegr 1967; Raman 2001). Vadinas, kontroliuoti rezonansinio garso generatoriaus srauto akustines charakteristikas, tokias kaip garso intensyvumas, galima reguliuojant srauto slėgį ir kontroliuojant geometrinius prietaiso parametrus (rezonatoriaus ilgį bei skersmenį; tūtos skersmenį; atstumą tarp tūtos iki rezonatoriaus), nes nuo jų priklauso smūginės bangos struktūra ir Macho disko vietos buvimas (Chang 2001; Lee 2001).

Sarpotdaras (Sarpotdar 2005) ir Sreejitas (Sreejith 2008) tyrinėjo svyravimų tendencijas pagal pagrindinį srovės dažnį, esant atstumui S tarp tūtos ir rezonatoriaus, atsižvelgiant į slėgį, ir pastebėjo, kad visi dažnio minimumai atsiranda praktiškai esant tam tikram atstumui S . Šis dažnio minimumas nepriklauso nuo rezonatoriaus ilgio. Šį reiškinį galima paaiškinti remiantis smūginės bangos struktūra, t. y. išsiplėtimo ir suspaudimo zonų susidarymu. Didinant atstumą S rezonatoriaus kraštai atsiduria skirtingose zonose, o tai savo ruožtu daro poveikį dažnio reikšmei.



1.7 pav. Hartmano generatoriaus schemas: 1 – tūta; 2 – rezonatorius

Fig. 1.7. Scheme of Hartmann whistle: 1 – nozzle; 2 – cavity

Kai rezonatoriaus padėtis sutampa su srauto srovės išplėtimo zona, dažnis pamažu didėja ir pasiekia maksimumą. Toliau didinant atstumą S , rezonatoriaus padėtis sutampa su srauto srovės suspaudimo zona, o dažnis pradeda mažėti ir pasiekia mažiausiąją reikšmę. Vadinasi, rezonatoriaus (1.7 pav.) ilgis L daro poveikį rezonansiniam dažniui ir gali keistis priklausomai nuo jo dydžio. Hartmanas ir Trolle (1927) siūlė, kad ilgio dydis turi būti 1–2 kartus didesnis už rezonatoriaus skersmenį dėl didesnio efektyvumo. Kastner ir Samimy (2002) patvirtino šias išvadas ir nustatė, kad, didėjant rezonatoriaus ilgiui, mažėja dažnio amplitudė, o rezonatoriaus ilgis, sudarantis 1–2 rezonatorių skersmenis ($L = (1-2)D$), sukėlė didesnę efektą nei 3–6 skersmenis.

Hartmanas pateikė išsamias geometrinių parametrų priklausomybes (Hartmann 1939) kartu su formulėmis ir nomogramomis projektiniams parametrų nustatyti, kai $D = d = L$.

Pagrindinių projektavimo duomenų nustatymas, kai $D \neq d$, pradedamas atsižvelgiant į reikalingo dažnio ir tūtos skersmens d reikšmes, kurios nustatomos iš formulės (Rozenberg 1967), kHz:

$$f = \frac{c\xi}{\pi d} \cdot 10^{-3}, \quad (1.4)$$

čia d – tūtos skersmuo, cm; ξ – oro koeficientas, 0,5.

Kai D/d lygus 1,64, D/L lygus 0,89, o rezonatorius išdėstytas pirmoje nestabilumo zonoje, geriausias spinduliavimo dažnis sutampa su savaisiais rezonatoriaus dažniais ir nustatomas pagal formulę: $f = 4230/d$. Atlikus išsamius tyrimus, kaip rezonatoriaus ilgio ir skersmens santykis veikia garso galią, mokslininkai (Monson, Binder 1953; Palme 1960) nustatė, kad kai $d/D = 1,27$, garso generatoriaus veikimas yra efektyviausias, tačiau Školnikova (Shkolnikova 1963) teigia, kad šis santykis turi būti lygus $d/D = 1,6-1,66$.

Garso bangos, sklisdamos aplinkoje, sukuria skirtingą slėgį. Garso slėgis yra skirtumas tarp momentinio pilnutinio slėgio ir vidutinio slėgio, esančio aplinkoje, kai nėra garso. Suspaudimo fazėje slėgis yra teigiamasis, išretėjimo fazėje – neigiamasis, garso šaltinio svyravimų poslinkio amplitudė A_0 arba $2A_0 = A$.

1.4. Aerosolių sąveikos sraute teorinių tyrimų analizė

Aerosolių judėjimo oro srautuose dėsniumai. Išmanyti aerodinamikos dėsnius būtina tyrinėjant dalelių koaguliaciją ir nusėdimą. Pagrindinis veiksnys, nustatantis aerosolio dalelių judėjimo sraute ypatumus, yra tas, kad jų svoris, palyginti su aplinkos molekulėmis, kur kas didesnis (aerosolio dalelės stipriau nei dujų molekulės veikia inercijos jėga).

Dalelių judėjimo lygtys gaunamos remiantis žinomais klasikinės hidrodinamikos dėsniais. Kai kuriais atvejais aerosolinio skysčio judėjimo lygtį galima prilyginti atskiros aerosolio dalelės judėjimo lygčiai greičių lauke dujinėje aplinkoje.

Pažymėtina, kad dalelių pernašos proceso dujinėje aplinkoje aprašymas apima daugiau įvairių uždavinių nei aprašo aerodinamikos lygtys. Dalelių judėjimas gali būti sukeltas molekulinės kinetikos procesų dujinėje aplinkoje, pavyzdžiui, Brauno difuzijos. Ir tuo pačiu metu gali vykti šilumos ir masės mainų reiškiniai, taip pat fazinis virsmas, o tai gerokai apsunkina aerosolio judėjimo aprašymą dujinėje aplinkoje.

Aerodinaminės dalelės dujinėje terpėje veikia išorinės jėgos, pasipriešinimo jėgos ir hidrodinaminės jėgos tarp dalelių. Prie išorinių jėgų priskiriamos sunkio jėgos, elektrostatinės jėgos ir t. t. Jėgos, veikiančios dalelę, iš judamos arba nejudamos terpės pusės priskiriamos prie pasipriešinimo jėgų. Kai dalelės svyruoja akustiniame lauke, pasipriešinimo jėgas galima priskirti prie išorinių.

Veiksnių, veikiančių koaguliacijos proceso efektyvumą, analizė. Mono- ir polydispersinių aerosolių mažinimas yra pagrindinė aplinkosaugos problema, akustinė koaguliacija tinka aerosoliams, kurių dalelių dydis yra iki $10\ \mu\text{m}$ (Khmeliiov 2010). Bet ji mažai efektyvi mažos koncentracijos aerosoliams, nes dėl didelio atstumo tarp dalelių mažai tikėtina, kad pradės veikti hidrodinaminės jėgos.

Norint nustatyti akustinio lauko poveikio režimus, reikia žinoti dispersinės terpės iširimo laiko priklausomybę nuo dydžių, charakterizuojančių tokį poveikį, o būtent akustinių virpesių dažnį ir garso slėgio lygį. Šios priklausomybės nustatomos priklausomai nuo dujinės terpės klampos, tankio ir slėgio, nuo aerosolinių dalelių tankio, pradinės jų koncentracijos ir dispersinio pasiskirstymo (Khmeliiov 2010).

Jeigu žinoma monodispersinių aerosolinių dalelių svorinė koncentracija K_i , dalelių spindulys r_p ir tankis ρ_p , tada dalelių pradinė koncentracija 1 cm^3 nustatoma pagal formulę (Mednikov 1963):

$$n_0 = \frac{C_i \cdot 10^{-6}}{3/4 \pi r_{p0}^3 \rho_p} \cong 0,24 \cdot 10^{-6} \frac{C_i}{r_{p0}^3 \rho_p}, \quad (1.5)$$

čia n_0 – aerosolinių dalelių pradinė koncentracija; C_i – svorinė koncentracija, g/cm^3 , ρ_p – dalelės tankis g/cm^3 ; r_{p0} – pradinis dalelės spindulys, cm .

Priklausomai nuo dalelių dydžio, jų pradinė koncentracija gali siekti 10^7 – 10^8 ir daugiau. Pagal Parkerio (Parker) ir Brandto (Brandt) dalelių koncentracijos eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad ji eksponentiškai priklauso nuo laiko ir koaguliacijos koeficiento. Tokia pati priklausomybė buvo nustatyta Podaševnikovo (Černov 2004):

$$n = n_0 \cdot e^{-0,08 p_g t + 0,0002 (p_g t)^2}, \quad (1.6)$$

čia n – aerosolinių dalelių koncentracija per laiką t ; p_g – garso slėgis.

Jeigu priimti, kad aerosolinės dalelės pasiskirstė 1 cm^3 tolygiai, tai tarp jų atstumas L_m gali būti nustatytas pagal formulę (Mednikov 1963):

$$L_{m0} = \frac{1}{\sqrt[3]{n_0}} \text{ arba } L_m = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}. \quad (1.7)$$

Po koaguliacijos pradinė dalelių koncentracija n_0 sumažėja iki dalelių koncentracijos n per laiką t , tuo pačiu aerosolinių dalelių spindulys kinta nuo r_{p0} iki r_p , o jo reikšmę galima nustatyti iš materialaus balanso:

$$\frac{3}{4} \pi r_{p0}^3 \rho_p n_0 = \frac{3}{4} \pi r_p^3 \rho_p n \text{ arba } r_p = r_{p0} \sqrt[3]{\frac{n_0}{n}}, \quad (1.8)$$

čia r_p – aerosolinių dalelių spindulys per laiką t .

Tam, kad nustatyti garų komponento svorinę koncentraciją virš skysčio atliekant teorinius tyrimus patogiau naudotis šią formulę (Tiščenko 1991), mg/m^3 :

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000 / [(273 + t_{sk}) \cdot 133,3], \quad (1.9)$$

čia M_i – komponento molekulinė masė; t_{sk} – skysčio temperatūra, $^{\circ}\text{C}$.

Atlikus visų terpės komponentų svorinės koncentracijos nustatymus, terpės tankis bus skaičiuojamas pagal formulę (Tiščenko 1991), mg/m^3 :

$$\rho_g = \sum_{i=1}^n C_i . \quad (1.10)$$

Veikiant akustinei bangai, labai svarbu žinoti terpės pasipriešinimą aerozolio judėjimui – klampa, kuria nusako dinaminis klampos koeficientas. Jeigu kalbėti apie dujinę terpę virš skysčio paviršiaus, kuri sudaro keli komponentai (oras, skysčio (tirpalo) garai), tai dinaminis klampos koeficientas bus skaičiuojamas pagal formulę (Tiščenko 1991), Pa·s:

$$\mu_g = \frac{M_g}{\sum_{i=1}^n i_i M_i / \mu_i} , \quad (1.11)$$

čia M_g – lygynamoji molekulinė masė virš skysčio: $M_g = \sum_{i=1}^n i_i M_i$, $i_i = p_i/p$ –

pės komponento virš skysčio tūrinė dalys, i – komponentas; p_i – komponento dalinis slėgis virš skysčio esant skysčio temperatūrai t_k , Pa; p – aplinkos slėgis, Pa; μ_i – dinaminis klampos komponento virš skysčio esant skysčio temperatūrai

t_k : $\mu_i = \mu_0 \frac{273 + Sat}{T_k + Sat} \left(\frac{T_k}{273} \right)^{1,5}$, μ_0 – komponento dinaminis klampos koeficientas

virš skysčio esant $t_k = 0$ °C, Pa·s; Sat – Saterlando konstanta, T_k – skysčio temperatūra, K.

Garso bangos sukelia aerolinių dalelių periodiškus svyravimus. Pagal Stokso lygtį dalelės greitis terpėje gali būti išreikštas taip (Mednikov 1963):

$$u_p = \frac{U_g}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t - \varphi) , \quad (1.12)$$

čia U_g – terpės greičio svyravimų amplitudė, τ – dalelių relaksacijos laikas, s:

$$\tau = \frac{2\rho_p r_p^2}{9\mu_g} , \quad \omega - \text{ciklinis dažnis, } \omega = 2\pi f, \quad \varphi - \text{virpesių fazė: } tg\varphi = \omega\tau .$$

Iš čia gauname, kad dalelės, kuri dalyvauja svyruojančios terpės judėjime, traukos koeficientas:

$$\eta_p = \cos\varphi = \frac{U_p}{U_g} = \frac{x_p}{x_g} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad \text{čia } (\omega\tau)^2 = \left(\frac{4\pi\rho_p r_p^2 f}{9\mu_g} \right)^2 . \quad (1.13)$$

čia U_p ir U_g – dalelės ir terpės svyravimų greičio amplitudės, x_p ir x_g – dalelės ir terpės svyravimų poslinkio amplitudės.

Dalelės aptekėjimo koeficientas terpėje:

$$\eta_g = \sin \varphi = \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad \text{iš čia } \eta_p^2 + \eta_g^2 = 1. \quad (1.14)$$

Kai santykinis svyravimų dalelių greitis yra artimas santykiniam nusistovėjimo greičiui, ortokinetikos susidūrimas nebėra reikšmingas.

Viviano, Stoksui ir Kidui (Villat 1945) skaičiavimais pavyko gauti priklausomybę tarp akustinės koaguliacijos efektyvumo E , dalelių koncentracijos n 1 cm^3 ir akustinio lauko poveikio laiko t esant garso intensyvumui I :

$$\lg(100 - E) = \frac{k}{nt\sqrt{I}}, \quad (1.15)$$

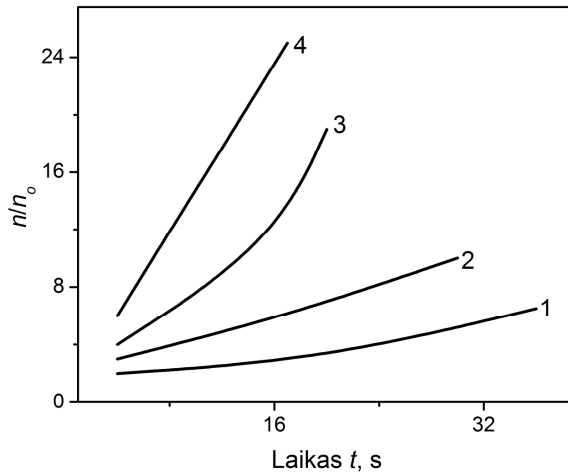
čia k – koeficientas, priklausantis nuo dažnio, dalelių sąveikos ir naudojamos aparatūros.

1.8 paveiksle parodyta chloridinio amonio rūko (terpės svorinė koncentracija – 2 mg/l) aerolio koncentracijos n/n_0 pokytis veikiant akustiniam laukui nuo laiko ir intensyvumo (Fuks 1955). Šie bandymai rodo, kad nuo garso intensyvumo priklauso dalelių sulipimas. Kai garso intensyvumas aukštesnis, per trumpą laiką galima pasiekti tokios pat koaguliacijos efektyvumą, kaip ir esant mažam intensyvumui per ilgą laiką. Dalelių koaguliacijai būtinas garso intensyvumas artimas 1 W/m^2 , o išbuvimo garso lauke trukmė – ne mažiau nei 4 s. Dalelių koaguliacija prasideda, kai garso slėgio lygis pasiekia 120 dB.

Svarbus aerolio parametras, charakterizuojantis jo koaguliacijos efektyvumą, yra dažnis, apibūdinamas formulę (Khmeliiov 2010):

$$f = \frac{3\mu_g}{2\pi\rho_p r_{p0}^2}. \quad (1.16)$$

Garso svyravimų dažnis atvirkščiai proporcingas koaguliuojamų dalelių dydžiui. Jei dalelių išsidėstymas polydispersinis, būtina naudoti garso poveikį plačiu dažnių diapazonu. Taigi koaguliacijos procesą veikia pradinė dalelių koncentracija ir akustinio lauko charakteristikos (garso dažnis ir intensyvumas) (Khmeliiov 2010).



1.8 pav. Chloridinio amonio aerozolio koncentracijos n/n_0 pokytis veikiant akustiniam laukui nuo laiko ir intensyvumo: 1 – 1 W/m²; 2 – 2 W/m²; 3 – 3 W/m²; 4 – 4 W/m² (Chernov 2004)

Fig. 1.8. Ammonium chloride aerosol concentrations n/n_0 change influence of acoustic field from time and intensity of sound: 1 – 1 W/m²; 2 – 2 W/m²; 3 – 3 W/m²; 4 – 4 W/m² (Chernov 2004)

Akustinės koaguliacijos teorijos sukūrimas remiasi kelių fizinių uždavinių sprendimu: atskiros dalelės, kelių dalelių ir smulkiausių dalelių sistemos elgesio tyrimas garsiniame lauke. Sprendžiant šį uždavinį galima ištirti pagrindinius fizinio mechanizmo dėsningumus, dalelėms koaguliojant akustiniame lauke.

Akustinis poveikis. Akustinio dalelių sulipinimo matematinis modeliavimas, remiantis Smoluchovskio lygtimi Monte Carlo metodu, buvo nagrinėtas kai kurių autorių (Mednikov 1964; Galkin 2001; Sheng 2006; Sheng 2007). Koaguliacija vyksta esant dviejų ir daugiau dalelių susidūrimui, aprašomam Smoluchovskio lygčių sistemomis:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_i(t), \quad (1.17)$$

čia k – sveikasis skaičius nuo 1 iki begalybės; $\beta_{i,k}$ – koaguliacijos branduolys, nepriklausomas nuo laiko ir charakterizuojantis susidūrimų intensyvumą; i ir k – reikšmės; $n_k(t)$ – k – reikšmė, koncentracija laiko momentu t .

Lygties dešinėsios pusės pirmasis narys charakterizuoja k reikšmės koncentracijos padidėjimo intensyvumą dėl i ir k reikšmių susidūrimų, o antrasis narys – k reikšmės koncentracijos sumažėjimą, esant susidūrimui su bet kurio mis kitomis dalelėmis (Sheng 2006).

Koaguliacijos branduolys yra simetriškas, kai:

$$\beta_{i,k} = \beta_{k,i}. \quad (1.18)$$

Dalelių tikimybiniis susidūrimas Sheng darbuose (2006, 2007) buvo skaičiuojamas pagal dviejų dalelių sąveikos mechanizmus: pagal ortokinetinę ir hidrodinaminę. Skaitmeninis modeliavimas rodo, kad esant polydispersinėms dalelėms dominuoja ortokinetinis mechanizmas. Esant monodispersinėms dalelėms, dominuoja hidrodinaminio poveikio mechanizmas. Todėl sulipimą apytiksliai galima pateikti kaip dviejų komponentų sumą (Sheng 2006, 2007):

$$\beta_{i,k} = \beta_{Oi,k} + \beta_{Hi,k}, \quad (1.19)$$

čia $\beta_{Oi,k}$ – koaguliacijos komponentas, charakterizuojantis dalelių suartėjimą per ortokinetinės sąveikos mechanizmą; $\beta_{Hi,k}$ – koaguliacijos komponentas, charakterizuojantis dalelių suartėjimą per hidrodinaminės sąveikos mechanizmą; i ir j – reikšmės, nustatančios susidūrimo tikimybę (Hoffman 2006).

Hidrodinaminį susidūrimą lemia skysčio hidrodinaminės jėgos, susidarantios dviem dalelėms artėjant viena prie kitos. Tobulo skysčio hidrodinaminio susidūrimo dažnio funkcija gali būti aprašyta klasikine išraiška König (Ezekoye 1999):

$$\beta_{König}^{Hy} = \frac{\sqrt{3}\pi\rho_g U_g^2}{36\mu_g} \frac{d_1^2 d_2^2}{d_1 + d_2}. \quad (1.20)$$

Kai yra hidrodinaminė sąveika, klampa yra nereikšminga esant didelėms dalelėms ir didelio intensyvumo garso bangoms. Atsižvelgiant į tai, vienos dalelės hidrodinaminės sąveikos jėgą sudaro dvi dalys. Pirmoji – dėl pirmos ir antros dalelių traukos su kitomis dalelėmis. Traukos sąveika susidaro dėl pirmos ir antros dalelių traukos sukurių (Song 1990). Antroji dalis atspindi klampių bangų poveikį. Dalelių pernaša taip pat turi įtakos abiem dalims. Tada hidrodinaminio susidūrimo dažnio funkcija išreiškiama taip (Changdong 2005):

$$\beta_{Song}^{Hy} = \frac{\sqrt{3}\rho_g U_g^2}{144\pi\mu_g} \frac{d_1^2 d_2^2}{d_1 + d_2} g_{12} = \left(\frac{g_{12}}{4\pi^2} \right) \beta_{König}^{Hy}, \quad (1.21)$$

čia g_{12} – hidrodinaminės sąveikos funkcija.

Pagal ortokinetikos mechanizmą skirtingų dydžių dalelių susidūrimas yra dėl santykinio jų judėjimo, kurį sukelia garso bangos. Garso lauke mažesnės dalelės laisviau svyruoja negu didesnės. Skirtingo dydžio dalelės juda skirtingai. Ortokinetikos susidūrimo branduolys gali būti išreikštas taip (Mednikov 1965):

$$\beta_{Mednikov}^{Or} = \frac{1}{2(d_1 + d_2)^2 U_g \eta_{12p}}, \quad (1.22)$$

čia η_{12p} – tarp pirmos ir antros dalelių santykinis traukos koeficientas:

$$\eta_{12p} = \sqrt{\eta_{1p}^2 + \eta_{2p}^2 - 2\eta_{1p}\eta_{2p}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (1.23)$$

čia η_1 ir η_2 – atitinkamai pirmos ir antros dalelių traukos koeficientai (Sheng 2005):

Amplitudės santykinis virpesių greitis tarp dviejų dalelių U_{12} nustatomas pagal formulę (Dong 2006):

$$U_{12} = U_2 - U_1 = \eta_{12g} U_g, \quad (1.24)$$

čia η_{12g} – santykinis aptekėjimo koeficientas tarp dviejų skirtingų dalelių apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_{12g} = \frac{\omega(\tau_1 - \tau_2)}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_1)^2)(1 + (\omega\tau_2)^2)}}, \quad (1.25)$$

čia τ_1 ir τ_2 – atitinkamai pirmos ir antros dalelių relaksacijos laikas, s.

Dviejų dalelių susidūrimas, tuo pačiu metu veikiant akustiniams virpesiams, ir didžiausias dalelių atskyrimo atstumas nustatomas santykinio dalelės poslinkio tarp dviejų dalelių. Šis atstumas L_d apskaičiuojamas taip:

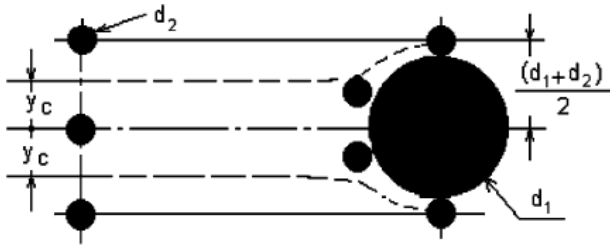
$$L_d = |x_{p^2} - x_{p^1}| = \frac{\mu_{12g} U_g}{\omega}, \quad (1.26)$$

čia x_p^1 ir x_p^2 – atitinkamai pirmos ir antros dalelių poslinkių amplitudės.

Šalia stambios dalelės srauto linijos išsilenkia ir mažos dalelės, esančios arti stambių, nukreipiamos kaip parodyta 1.9 paveiksle, čia d_1 – didelės dalelės skersmuo; d_2 – mažos dalelės skersmuo; y_c – kritinis galimų dalelių susidūrimų radialinis atstumas, t. y. maksimalus radialinis atstumas. Kritinis atstumas y_c lemia dalelių susidūrimo efektyvumą, kuris skaičiuojamas taip:

$$\varepsilon = \frac{4y_c^2}{(d_1 + d_2)^2}. \quad (1.27)$$

Jeigu ε vienalytė, visos smulkios dalelės susiburia, t. y. plotu $(d_1 + d_2)^2/4$ susiduria su stambiomis dalelėmis. Kadangi kai kurios smulkios dalelės išvengia susidūrimų dėl kreipiamųjų dalelių trajektorijų, kurios yra mažesnės nei vienalytės, jos kontroliuojamos Stokso skaičiumi.



1.9 pav. Mažo skersmens d_2 dalelių susidūrimo su stambia dalele, kurios skersmuo d_1 , diagrama. Parametras y_c yra kritinis atstumas ir sudaro didžiausią radialinį galimų susidūrimų atstumą (Dong 2006)

Fig. 1.9. Diagram of small particles of diameter d_2 colliding with the large particle of diameter d_1 . The parameter y_c is the critical distance, and represents the maximum radial distance for possible collisions (Dong 2006)

Dėl mažų d_2 dalelių nusėdimo stambių dalelių d_1 pastovaus srauto susidūrimo efektyvumas gali būti išreikštas Stokso skaičiumi. Jis apskaičiuojamas pagal formulę (Dong 2006):

$$\varepsilon = \left(\frac{St}{St + A} \right)^B, \quad (1.28)$$

čia A ir B – konstantos: $A = 0,65$, $B = 3,7$ (Löffler 1988).

Stokso skaičius nustatomas taip:

$$St = \frac{\rho_p \mu_{12g} U_g d_2^2}{18 \mu_g d_1}, \quad (1.29)$$

Ortokinetikos susidūrimo ilgis apibrėžiamas kaip:

$$L_{eff}^{orth} = \varepsilon L_d, \quad (1.30)$$

čia ε apskaičiuojamas pagal formulę (1.27), L_d apskaičiuojamas pagal formulę (1.26) ir atspindi bendrą santykinį poslinkio ir dalelių susidūrimo efektyvumo poveikį.

Dalelių nusistovėjimo sunkio jėgos poveikio greitis V_{ST} apskaičiuojamas taip:

$$V_{ST} = \frac{C_c \rho_p g d_p^2}{18 \mu_g}, \quad (1.31)$$

čia g – laisvojo kritimo pagreitis, $\text{m/kg}\cdot\text{s}^2$; C_c – slydimo veiksnys, kai dalelių skersmuo – tarp 0,1 ir 10 μm , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_c = 1 + \frac{2,52\lambda_{gas}}{d_p}, \quad (1.32)$$

čia λ_{gas} – dujų molekulių vidutinis laisvasis kelias, m.

Santykinis nusodinimo greitis tarp dviejų dalelių, d_1 ir d_2 :

$$V_{TS}^{re} = \frac{C_c \rho_p g}{18\mu_g} (d_1^2 - d_2^2). \quad (1.33)$$

Santykinis vibracinių dalelių greitis yra artimas santykiniam nusistovėjimo greičiui, tada ortokinetikos susidūrimas nebėra reikšmingas. Gravitacija nėra veiksminga skaičiuojant ortokinetikos susidūrimo ilgį, bet turi akustinį poveikį (Dong 2005).

Autoriai, nagrinėjantys hidrodinaminę komponentę (Song 1994, Hoffman 1997, Ezekoye 1999, Gonzalez 2000), sukeliančią susidūrimo tikimybę, parodė, kad esant mažoms dalelėms (iki 10 μm), kai garso slėgis siekia iki 137 dB, Reinoldso skaičius yra mažesnis negu 0,4. Charakteringas tokių dalelių greitis gali būti imamas 0,32 m/s. Esant mažam Reinoldso skaičiui, galima prielaida dėl Stokso aptekėjimo režimo. Tokiais atvejais kai kurie autoriai (Khmeliiov 2010) siūlo įvertinti skysčio arba dujų klampą. Todėl šiame darbe bus teoriškai įvertinta dalelių sąveika, atsižvelgiant į dujinės terpės virš skysčio dinaminį klampos koeficientą.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros analizę galima daryti šias išvadas:

1. Mokslinėse publikacijose daug dėmesio skiriama įvairiems modeliavimo metodams, nustatantiems aerozolio elgseną akustiniame lauke, tačiau nepakankamai dėmesio skirta naujos kartos aerozolių šalinimo sistemų kūrimui ir tyrimui.
2. Sudėtingėjant šiuolaikinėms gamybos technologijoms, švarios aplinkos užtikrinimas tampa mokslinių tyrimų ir analizės objektu taikant akustinės koaguliacijos principus aerozolių lokalizavimo priemonėse.

3. Daugelio autorių publikacijose nuodugniai išanalizuoti akustinės koaguliacijos metodai, tačiau mažai paskelbta tyrimų, nurodančių, kaip tuos metodus praktiškai naudoti aerozolių surinkimo sistemose.

Darbo tikslui pasiekti tikslinga spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikta mokslinės literatūros analizę apie aerozolinės taršos siurbtuvų tipus, jų tyrimus.
2. Ištirti sukurto aerozolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, garso generatorių parametrų įtaką generuojamam akustiniam laukui.
3. Pasiūlyti aerozolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, eksperimentinių tyrimų metodiką.
4. Eksperimentiškai ištirti garso generatorių akustinio lauko charakteristikas.
5. Eksperimentiškai ištirti aerozolinės taršos siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumą.

Siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, parametrų tyrimai

Skyriuje pateiktos garuojančių skysčių ir šoninio siurbtuvo srautų pagrindinės lygtys, išanalizuota garavimo ir siurbtuvo sukeliama srauto greičiai virš taršos šaltinio, nustatyti terpės dinaminės klampos koeficientai ir tankiai, tiriama garso generatorių konstrukcinių ypatumų poveikis akustinio lauko charakteristikoms ir akustinio lauko dažnio priklausomybę nuo siurbtuvo konstrukcijos parametrų.

Skyriaus tematika paskelbtos dvi autorės publikacijos (Vekteris, Tetsman 2011, 2013a).

2.1. Garuojančio skysčio ir siurbtuvo srautų pagrindinės lygtys

Siekiant ištirti šoninio siurbtuvo aktyvinamo aeroakustiniu srautu poveikį garų koaguliacijai, tikslinga naudoti judesio kiekio ir energijos lygtis daugiakomponentams mišinių parametrų vertinti bei nustatyti garuojančio skysčio dinaminio klampos koeficiento poveikį esant įvairioms koncentracijoms ir temperatūroms.

Kenksmingųjų medžiagų garavimo intensyvumas priklauso nuo oro įsotinimo vienos ar kitos medžiagos garais, nuo oro judrumo ties skysčio paviršiumi, nuo skysčio fizinių savybių, aplinkos drėgnumo, todėl svarbu, kuriant siurbtuvą, nustatyti difuzinio pernešimo intensyvumą. Bendroju atveju klampaus skysčio judėjimas uždaroje sistemoje modeliuojamas judesio kiekio lygtimi, masės tvermės dėsniu ir energijos tvermės lygtimi.

Judesio kiekio lygtis, įvertinant išcentrines jėgas ir Koriolio jėgas, užrašoma taip:

$$\rho_g \frac{DV}{d\tau} = -\nabla \tilde{p} + \rho_g \sum_i C_i F_i + \mu_g \nabla^2 V + (\mu + \mu') \nabla (\nabla \cdot V) \pm 2\rho \sum \omega_i v_i, \quad (2.1)$$

čia $\frac{D}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$ – vadinamoji substancinė išvestinė; ρ_g – srauto tankis, V – srauto judėjimo greitis; ∇ – Laplaso operatorius; $\tilde{p} = p - 1/2\rho\omega^2 q$ – slėgis, įvertinantis išcentrines jėgas; p – slėgis; ω_i – kampinis dažnis; q – apibendrinta koordinatė; C_i srauto komponento koncentracija virš skysčio, F – jėgos vektorius, veikiantis medžiagos masės vienetą; μ_g – srauto dinaminis klampios koeficientas, μ – antras klampios koeficientas, μ – efektyvusis klampis.

Masės tvermės dėsnis sujungia lokalinius ir konvekcinius skysčio tankius su greičio pokyčiais, divergencijos greičio vektoriaus išraiškomis pereinant nuo vienos fiksuotos erdvės prie kitos ir užrašoma nedalomumo arba vientisumo lygtimi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0. \quad (2.2)$$

Energijos tvermės sąlyga, kai nėra spindulinio šilumos perdavimo, išreiškia konduktyvia – konvektyvia šilumokaitos lygtimi:

$$C_T \rho = \frac{DT}{d\tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_v + \frac{Dp}{d\tau} + \mu \Phi_d, \quad (2.3)$$

čia T – temperatūra; λ – šilumos laidumo koeficientas; C_T – vidutinis šilumos imlumas; q_v – šilumos kiekis, išskiriamas vidinių šaltinių; Φ_d – disipacinė funkcija:

$$\Phi_d = 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 +$$

$$+\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)^2-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2. \quad (2.4)$$

Energijos lygtis daugiakomponenčiams mišiniams su difuzine komponento pernaša ir įvairiomis entalpijos reikšmėmis atrodo taip (Žukauskas 1982):

$$\rho \frac{Dh_x}{\partial \tau} = -\operatorname{div} q + \frac{Dp}{\partial \tau} + \mu F_d + \frac{\rho}{m^2} \sum_{i,j} \left\{ m_i F_i D_{ij} \left\{ \nabla (C_{jm} + C_j (m - m_j)) \nabla \ln p - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{C_j m_j m}{RT} \left[F_j - \sum_k (C_k F_k) \right] \right\} \right\} - \sum_i D_i^T (F_i \nabla \ln T) \quad (2.5)$$

čia

$$q = -\lambda \nabla T \sum_{i,j} \left\{ \frac{m_i}{m^2} \rho D_{ij}^T h_i \left\{ \nabla (C_i m) + C_j (m - m_i) \nabla \ln p - \frac{C_j m_j m}{RT} \left[F_j - \sum_k (C_k F_k) \right] \right\} \right\} - \\ - \sum_i \left(h_i D_i^T \nabla \ln T \right) + \\ + \frac{RT}{m} \sum_{i,j,k} \left\{ \frac{C_j D_j^T}{m_j m_i D_{ij}} \left(D_{ik} \frac{m_i}{C_i} - D_{jk} \frac{m_j}{C_j} \right) \left[\nabla (C_k m) + C_k (m - m_k) \nabla \ln p - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{C_k m_k m}{RT} \left[F_k - \sum_i (C_i F_i) \right] \right] \right\} - \\ - \frac{RT}{\rho} \sum_{i,j} \left[\frac{C_j D_j^T}{m_j m_i D_{ij}} \left(\frac{D_i^T}{C_i} - \frac{D_j^T}{C_j} \right) \nabla \ln T \right], \quad (2.6)$$

čia D_{ij} – difuzijos koeficientas ($D_i = \frac{p_0}{p} \left(\frac{T_k}{T_0} \right)^2 D_0$), čia D_0 – difuzijos koeficientas,

kai $T_0 = 273$ K ir $p_0 = 101308$ Pa, m^2/s ; p – aplinkos slėgis, 101 325 Pa; T_k – skysčio temperatūra, K); D^T – termodifuzijos koeficientas; h_x – entalpija; C_i – dujų koncentracija mišinyje; m – molekulinė masė; F – jėgos vektorius; i, j, k, l – indeksai; R – dujinė pastovioji.

Kairėje (2.6) lygties dalyje turime substancionalinę entalpijos išvestinę, o dešinėje – ketvirtas ir kiti nariai išreiškia entalpijos kitimą, sukiamą masės jėgų darbo, atliekamo esant atskirų komponentų difuzijai.

i -tojo komponento mišinio, sudaryto iš kelių komponentų, lygtį galima užrašyti tokia forma:

$$\rho \frac{DC_i}{d\tau} = -\operatorname{div} \left\{ \frac{\rho m_i}{m^2} \sum_j \left\{ D_{ij} \left\{ \nabla(C_j m) + C_j (m - m_j) \nabla \ln p - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{C_j m_j m}{RT} \left[F_j - \sum_k (C_k F_k) \right] \right\} \right\} - D_i^T \nabla \ln T \right\} + W_i, \quad (2.7)$$

čia W_i – kiekis i -tojo mišinio komponento, išsiskiriančio dėl cheminės reakcijos tūrio vienetą per laiko vienetą.

Dešinėje (2.7) lygties dalyje pirmasis sumos narys, esantis pirmojo rango figūriniuose skliaustuose, nustato koncentracinę difuziją – komponento tekėjimą mažesnės koncentracijos kryptimi; antras – barodifuziją, charakterizuojančią lengvesnių molekulių judėjimą į sumažinto slėgio sritį, o sunkesnių – atvirkščiai; trečias – dinodifuziją, atsirandančią veikiant jėgoms daleles, sudarančias mišinį; ketvirtas – termodifuziją, kuriai vykstant daugeliu atvejų sunkesnės molekulės juda žemų temperatūrų kryptimi, tačiau neatmetamas ir atvirkštinis efektas; paskutinis lygties narys charakterizuoja duotos medžiagos šaltinį, susijusį su cheminėmis reakcijomis.

Iš masės išsaugojimo ir judesio kiekio lygčių (2.1 ir 2.2) Laithilas (Lighthill 1952) išvedė oro tankio svyravimo banginę lygtį aeroakustiniam srautui generuoti. Supaprastinti šių lygčių variantai naudojami tolimesniuose tyrimuose.

2.2. Skysčio garavimo ir siurbtuvo srautų greičių tyrimas

Siurbimo metu virš vonios vyksta sudėtingas procesas, kurį galima skirti į du procesus: į srauto kilimą virš vonios be siurbtuvo darbo ir į siurbimo ir pūtimo srautų formavimą veikiant šoniniam siurbtuvui be vonios darbo. Karštas skysčio paviršius garuoja ir didėjant skysčio temperatūrai garų koncentracija didėja, tai sukelia srauto judėjimą ir padidintą aplinkos užterštumą.

Atrodytų, kad esant skirtingiems srauto judėjimams bei įvairiems vonių įrengimo būdams, problemą reikėtų spręsti kiekvienu atveju skirtingai, tačiau toks užduoties sprendimas yra labai sunkus. Siekiant lengviau išspręsti šią problemą daromos tokios prielaidos:

1) oro srautas, kylantis nuo vonios skysčio paviršiaus be siurbtuvo darbo, turi tą patį greitį bet kuriame taške virš vonios;

2) šoninio siurbtuvo srautas siurbiamas per labai siaurą angą, kuris įrengtas virš skysčio lygio. Tokiu būdu srautas juda tik vonios skysčio paviršiuje.

Visų srautų teoriniai tyrimai buvo atlikti voniai (1.2 pav.), kurios plotis $L = 0,3$ m, ilgis $B = 0,415$ m, o aukštis iki skysčio paviršiaus iki vinies krašto $H = 0,08$ m, priklausomai nuo skysčio temperatūros, kai aplinkos temperatūra 20°C . Rekomenduojama, kad pūtimo plyšys būtų ne siauresnis kaip 5 mm ($0,011B$, čia B – vonios plotis), o siurbimo kaip 50 mm ($0,21B$). Skaičiuojant siurbtuvą, reikia patenkinti dvi sąlygas: visas teršalų židinio sukeltas srautas turi būti nusiurbtas, į siurbtuvą tekanti srovė kritiniame pjūvyje turi išlikti stabili. Laikoma, kad srovė stabili, jei jos greitis kritiniame pjūvyje (Posohin 1981):

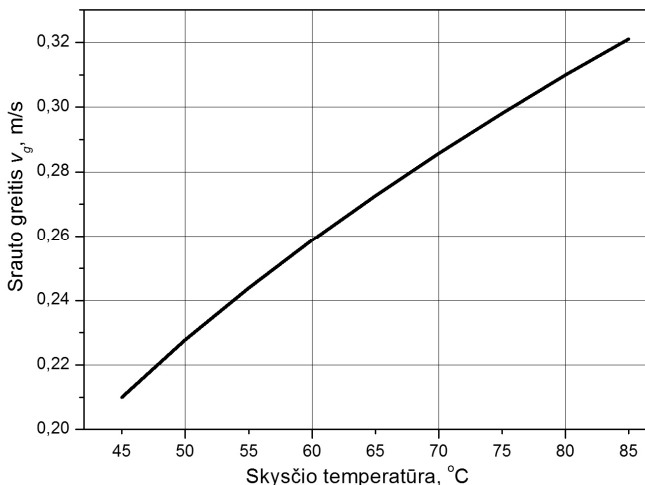
$$u_{kr} = 7u_{tr}, \text{ kai } H \geq 0,15B \text{ arba } u_{kr} = 1,83 \sqrt{gB \frac{\Delta t}{t_a}}, \text{ kai } H \leq 0,15B, \quad (2.8)$$

čia u_{tr} – trigdančių srovių greitis (patalpoje leidžiamas oro greitis $0,2$ – $0,5$ m/s), Δt – aplinkos ir skysčio temperatūrų skirtumas, $^\circ\text{C}$, t_a – aplinkos temperatūra, $^\circ\text{C}$.

Kilimo srautai tai konvekciniai srautai, kurie susidaro iš dviejų dalių: formavimosi, kai šaltinio paviršiuje ašinis greitis didėja nuo nulio iki didžiausios reikšmės, ir pagrindinės, kai ašinis greitis mažėja arba lieka pastovus tostant nuo šaltinio. Garų kilimo greičio pokytis pagrindinėje konvekcinėje srovėje, vonios vienam metro ilgiui (2.1 pav.), nustatomas pagal formulę (Posohin 1981), m/s:

$$v_g = 0,053 \cdot \sqrt[3]{q_{k0}}. \quad (2.9)$$

čia q_{s0} – konvekcinės šilumos kiekis, W.



2.1 pav. Garų srauto greičio v_g priklausomybė nuo skysčio temperatūros
Fig. 2.1. Graph of dependence of vapour speed v_g above liquid temperature

Konvekcinės srovės skaičiavimo rezultatų grafinė išraiška rodo, kad didžiausią įtaką garų kilimo greičiui v_g turi šilumos kiekis. Kilant skysčio temperatūrai nuo 45 °C iki 85 °C, garų kilimo greitis keitėsi nuo 0,21 iki 0,32 m/s.

Atlikti teoriniai tyrimai rodo, kad srovės greitis per vonios ilgį B neturi būti mažesnis už kritinį ($u_{kr} = 1,4\text{--}3,5$ m/s), tada teršalai bus sugaudomi iki 90% (Posohin 1981).

2.3. Garų klamos ir tankio tyrimai

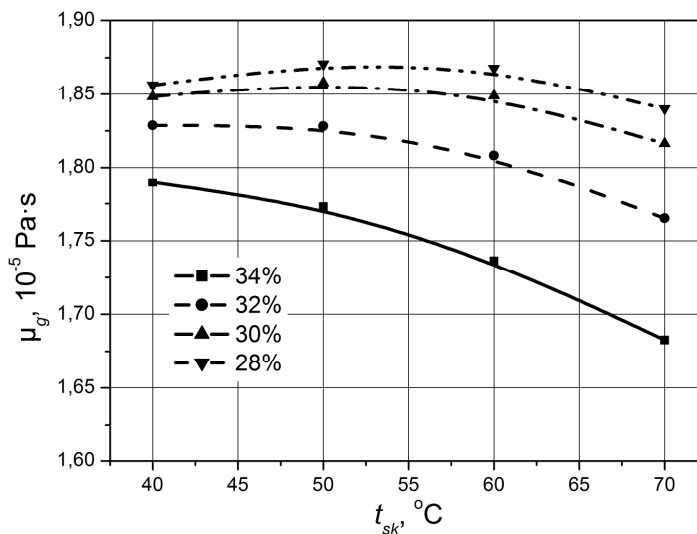
Garų komponentų koncentracijos nustatymas priklauso nuo komponento dalinio slėgio virš skysčio, nuo jo molekulinės masės ir temperatūros. Virš skysčio yra plonas garų prisotintas sluoksnis, todėl dalinis komponentų garų slėgis virš skysčio paviršiaus lygus sočiųjų garų daliniam slėgiui, esant tikrajai paviršiaus temperatūrai. Kai skystis maišomas, jo paviršiaus temperatūra būna lygi temperatūrai gilumoje, o garavimo paviršius gali būti kelis kartus didesnis už ramaus skysčio paviršių.

Garų komponento koncentracija virš skysčio, garų mišinio tankis, garų mišinio dinaminis klamos koeficientas virš skysčio pateikti (2.6) lygties paaiškinimuose. Difuzinės pernašos intensyvumas gali būti charakterizuojamas turbulentiniu difuzijos koeficientu, kai skysčio temperatūra t_{sk} ir slėgis p pateikti (2.6) lygties paaiškinimuose. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad druskos rūgšties garų tankis virš skysčio, kuris buvo nustatytas remiantis 1.9–1.11 formulėmis ir pateiktas 2.1 lentelėje, labiausiai veikia skysčio temperatūrą, didžiausias pokytis vyksta 70 °C temperatūroje. Remiantis (1.9–1.11) formulėmis nustatytas garų dinaminis klamos koeficientas ir pateiktas grafiškai 2.2 paveiksle.

2.1. lentelė. Garų mišinio tankis (kg/m^3) virš druskos rūgšties (HCl) tirpalo paviršiaus atsižvelgiant į jo koncentraciją ir temperatūrą

Table 2.1. Dependence of density (kg/m^3) of the gas mixture above liquid surface on concentration of HCl vapour and temperature

Druskos rūgšties (HCl) tirpalo koncentracija, %	Tirpalo temperatūra, °C			
	40	50	60	70
28	1,1208	1,0839	1,0488	1,0155
30	1,1301	1,0995	1,0742	1,055
32	1,1476	1,1278	1,119	1,1243
34	1,1795	1,1789	1,1986	1,2448



2.2 pav. Druskos rūgšties (HCl) dinaminis klampos koeficiento μ_g priklausomybė nuo tirpalo temperatūros t_k ir koncentracijos

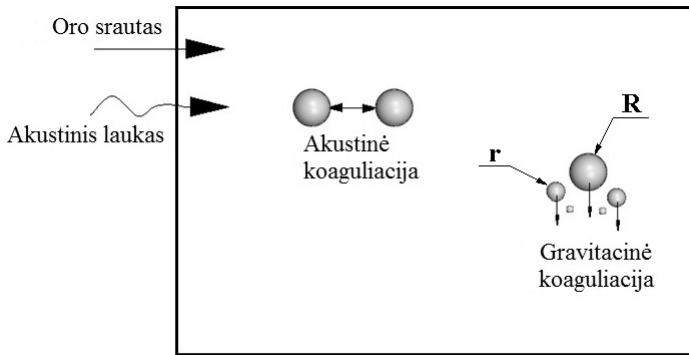
Fig. 2.2. Graph of dependence of dynamic viscosity μ_g and temperature t_k of the gas mixture above liquid surface on concentration of HCl vapour

Teoriniai visų srautų tyrimai buvo atlikti atsižvelgiant į skysčio (druskos rūgšties HCl tirpalo) temperatūrą ir medžiagos koncentraciją, kai aplinkos temperatūra yra 20 °C.

Kai skysčio temperatūra yra 40–70 °C, kintant druskos rūgšties (HCl) koncentracijai nuo 20 iki 34 %, jos garų tankio pokytis sudaro nuo 6,1 iki 23,4 %, tačiau kai yra ta pati koncentracija, garų tankis, atsižvelgiant į temperatūrą, kinta vidutiniškai apie 9,1 %. Didžiausia garų dinaminio klampos koeficiento reikšmė $1,8707 \cdot 10^{-5}$ Pa·s gauta esant 50 °C ir 28 % tirpalo koncentracijai, o mažiausia $1,6827 \cdot 10^{-5}$ Pa·s – esant 70 °C ir 34 % tirpalo koncentracijai.

2.4. Šoninio siurbtuvo garso generatoriaus parametrų ir akustinio lauko charakteristikų tyrimai

Akustinės koaguliacijos metu dalelės svyruoja dujų atžvilgiu, tarp jų atstumas mažėja, todėl atsiranda traukos jėgos. Dalelių tūris didėja, didėja ir jų masė. Po akustinės koaguliacijos vyksta gravitacinė koaguliacija. Gravitacinės koaguliacijos metu (2.3 pav.) spindulio R dalelės, kurios nuo savo svorio krinta

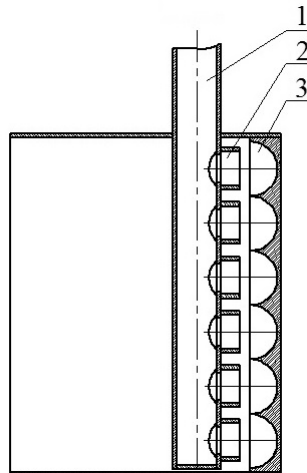


2.3 pav. Gravitacinės koaguliacijos susidarymas

Fig. 2.3. Aerosol particles coagulation process

žemyn didėjančiu greičiu, paveja kelis mažo spindulio r daleles ir susiduria su jomis. Taip mažos dalelės, nešamos oro srautu, suteka į didelį lašą (Spurny 2000).

Nustatant šoninio siurbtuvo akustinio lauko charakteristikas, reikia įvertinti ir nustatyti garso generatoriaus parametrus. Pūstuve (2.4 pav.) sumontuotas aeroakustinio srauto garso generatorius (1.7 pav.), kurį sudaro tūta 1 (skersmuo – d), prieš kurią ant vienos ašies S atstumu išdėstytas rezonatorius 2 (skersmuo – D , ilgis – L), kurio atviras kraštas nukreiptas į dujų srovę.



2.4 pav. Pūstuvo schema: 1 – oro tiekimo vamzdis; 2 – tūta; 3 – rezonatorius

Fig. 2.4. Schem of push Nozzle: 1 – Supply Pipe of Air; 2 – Nozzle; 3 – Cavity

Kai tiekiamas suslėgtasis oras, slėgio P_0 , atstumas nuo tūtos iki nestabilumo zonos pradžios a nustatomas pagal šią formulę (Rosenbegr 1967), mm:

$$a_1 = d \left[1 + 0,041(10P_0 - 0,93)^2 \right], \quad (2.10)$$

čia d – tūtos skersmuo, mm; P_0 – perteklinis oro slėgis, MPa.

Iki nestabilumo zonos pabaigos atstumas Δ (1.6 ir 1.7 pav.) sutampa su srauto ląstelės pabaiga ir skaičiuojamas pagal formulę (Rosenbegr 1967), mm:

$$b_1 = 1,12d(P_0 - 0,9)^{0,5}. \quad (2.11)$$

Generatorius (1.8 pav.) pasiekia geriausias akustinio lauko charakteristikas, kai (Rosenbegr 1967), mm:

$$S = a_1 + 0,6(b_1 - a_1). \quad (2.12)$$

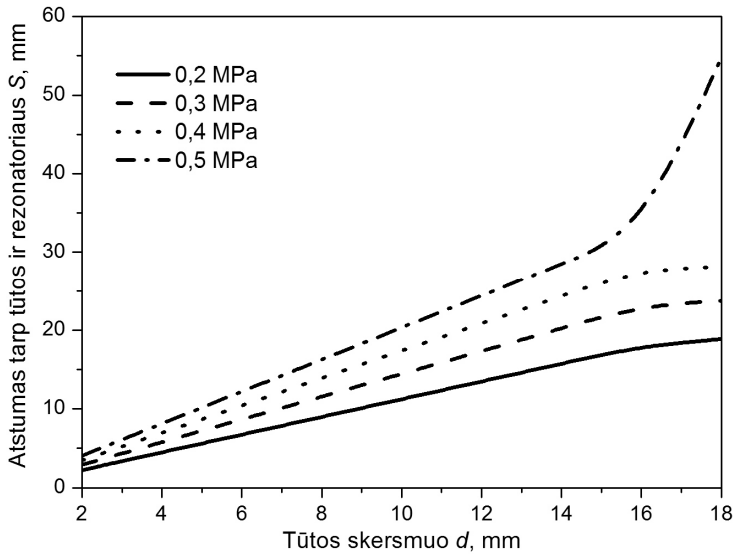
Ištyrus geometrinius garso generatoriaus parametrus ir akustinio lauko charakteristikas, nustatyta, kad didžiausias efektas bus gautas, kai atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus svyruos 2–10 mm, suslėgtojo oro pertekliniam slėgiui esant 0,2–0,3 MPa, o rezonatoriaus ilgis – 12–25 mm. Rezultatai pateikti 2.5 ir 2.6 paveiksluose.

Mokslininkai (Svory 1950; Hartmann, Trusdo 1951) pastebėjo, kad dažnis priklauso nuo rezonatoriaus ilgio L ir keičiasi pagal ketvirtadalia bangos ilgio λ teoriją: $f = c/\lambda$, kai $\lambda = 4L$, t. y. pagal linijinį akustinį dėsnį, tačiau Hemholtzo pasiūlyta rezonansinio dažnio formulė buvo tikslesnė (Saronia 1979; Back 1979):

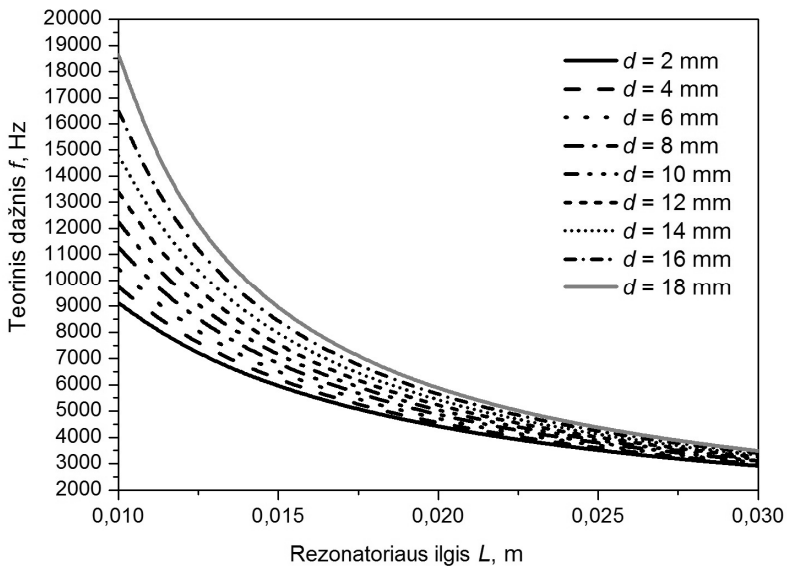
$$f = (2n - 1) \frac{c}{4(L + 0,3d)}, \quad (2.13)$$

čia n – sveikasis skaičius, kai $n = 1$, nustatoma pirmos harmonikos reikšmė; c – garso greitis, m/s; L – rezonatoriaus ilgis, m, d – tūtos skersmuo, m.

Pirmiausia analizuotas geriausių dažnių diapazonas (2.7–2.8 pav.), atsižvelgiant į aerolinių dalelių dydį. Kaip minėta, akustinis poveikis labiausiai tinka koaguluoti aerolines daleles, kurių dydis mažesnis nei 10 μm . Teorinė analizė buvo atlikta aeroliams, kurių dydis – iki 40 μm .



2.5 pav. Atstumo tarp tūtos ir rezonatoriaus priklausomybė nuo tūtos skersmens
Fig. 2.5. Variation of stand-off distance with nozzle diameter

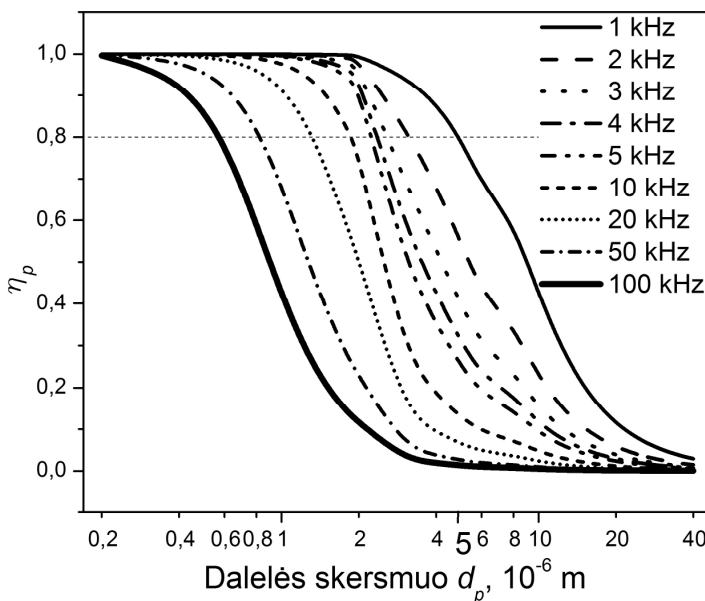


2.6 pav. Dažnio priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio ir tūtos skersmens
Fig. 2.6. Variation of frequency of sound with cavity length

2.7 ir 2.8 paveiksluose pavaizduota aptekėjimo koeficiento priklausomybė nuo dalelių skersmenų, veikiamų skirtingų garso bangos dažnio, esant didžiausiam ir mažiausiam dinaminiam klampos koeficientui. Esant dalelių ir garso šaltinio poslinkio amplitudžių santykiui, didesniau už 0,8, koaguliacija praktiškai nevyksta (Khmeliiov 2010). Skaičiavimai atliekami esant 120 dB pastoviam garso slėgio lygiui.

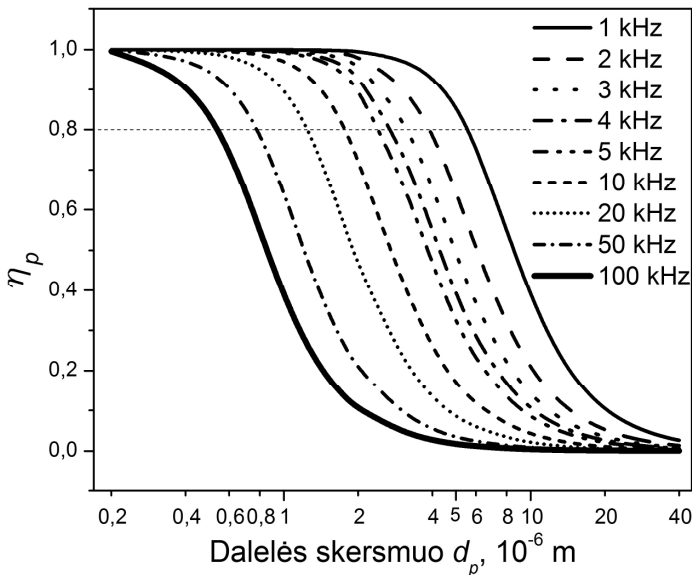
Apibendrinant galima teigti, kad, didėjant dažniui, aerosolinių dalelių dydis mažėja. Daroma išvada, kad 5–10 μm dydžio aerosolinių dalelių geriausias dažnis (1–5 kHz) yra žemiau viršgarsinio diapazono, o aerosoliai, kurių dalelės mažesnės nei 5 μm , efektyviausiai koaguliuoja viršgarsinių dažnių diapazone (2.7 ir 2.8 pav.).

Taigi teorinė analizė parodė, kad efektyviausia smulkių aerosolinių dalelių koaguliacija vyks 1–5 kHz garso dažnių diapazonu, garso slėgio lygis – ne mažiau kaip 120 dB. Gautas priklausomybės leidžia nustatyti pagrindinius garso generatoriaus parametrus.



2.7 pav. Traukos koeficiento η_p priklausomybė nuo dalelių skersmens ir garso dažnio esant 70 °C temperatūrai ir 34 % rūgšties koncentracijai

Fig. 2.7. Entrainment factor η_p for particles of varying diameter presented with acoustic frequency as a parameter of the gas mixture above liquid surface on 34% concentration of HCl vapor and 70 °C temperature



2.8 pav. Traukos koeficiento η_p priklausomybė nuo dalelių skersmens ir garso dažnio esant 70 °C temperatūrai ir 34 % rūgšties koncentracijai

Fig. 2.8. Entrainment factor η_p for particles of varying diameter presented with acoustic frequency as a parameter of the gas mixture above liquid surface on 28% concentration of HCl vapor and 50 °C temperature

Parinkus garso generatoriaus ir siurbtuvo konstrukcijas, nustatyta, kad, norint išsamiai ištirti teršalų lokalizavimo efektyvumą ir veiksmingumą, reikalingas papildomas eksperimentinis tyrimas.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Konvekcinės srovės skaičiavimo rezultatų grafinė išraiška rodo, kad didžiausią įtaką garų kilimo greičiui turi šilumos kiekis. Kylant skysčio temperatūrai nuo 45 °C iki 85 °C, garų kilimo greitis keitėsi nuo 0,21 iki 0,32 m/s. Nustatyta, kad pūtimo ir siurbimo srovių greičiai neturi būti mažesnės už kritinį greitį $u_{kr} = 1,4\text{--}3,5$ m/s.
2. Kai skysčio temperatūra yra 40–70 °C, druskos rūgšties koncentracijai kintant nuo 28 iki 34 %, jos garų tankio pokytis sudaro nuo 6,1 iki 23,4 %, tačiau esant tai pačiai koncentracijai, garų tankis, atsižvelgiant į temperatūrą, kinta vidutiniškai apie 9,1 %.

3. Tyrimai rodo, kad, didėjant dažniui, aerosolinių dalelių dydis mažėja. 5–10 μm dydžio aerosolinių dalelių geriausias dažnis (1–5 kHz) yra žemiau viršgarsinio diapazono, o aerosoliai, kurių dalelės mažesnės nei 5 μm , efektyviausiai koaguliuoja viršgarsinių dažnių diapazone.

Eksperimentiniai aerosolinės taršos siurbtuvo tyrimai

Skyriuje analizuojama šoninio siurbtuvo akustinio lauko parametrų įtaka aerozolio mažinimui užterštame oro sraute. Pasiūlyta siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, ekaperimentinio tyrimo metodika ir nustatyti efektyvaus garso generatoriaus konstrukciniai parametrai ir akustinio lauko charakteristikos.

Ištirtas šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas, nustatyta, kad papildomai naudojant garso generatorių ($D/d = 1,66$, $L = 12,7$ mm, $S = 2$ mm) aerosoliai lokalizuojami gerokai veiksmingiau. Atlikti eksperimentiniai tyrimai patvirtino šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumą.

Šių tyrimų tikslas tobulinti sukurto aerosolinės taršos šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, generuojamų aeroakustinių srautų valdymo metodus, leidžiančius mažinti aerozolio kiekį jų formavimosi zonoje.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios autorės publikacijos (Tetsman, Vekteris 2010a, 2010b, 2012, 2013b).

3.1. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, eksperimentinių tyrimų metodika

Didelę reikšmę turi išankstinis aktyvintojo šoninio siurbtuvo su pūstuvu ištyrimas. Norint išnaudoti visas akustinio lauko poveikio galimybes, būtina kruopščiai išanalizuoti jo poveikį aerozoliui ir darbinės charakteristikas.

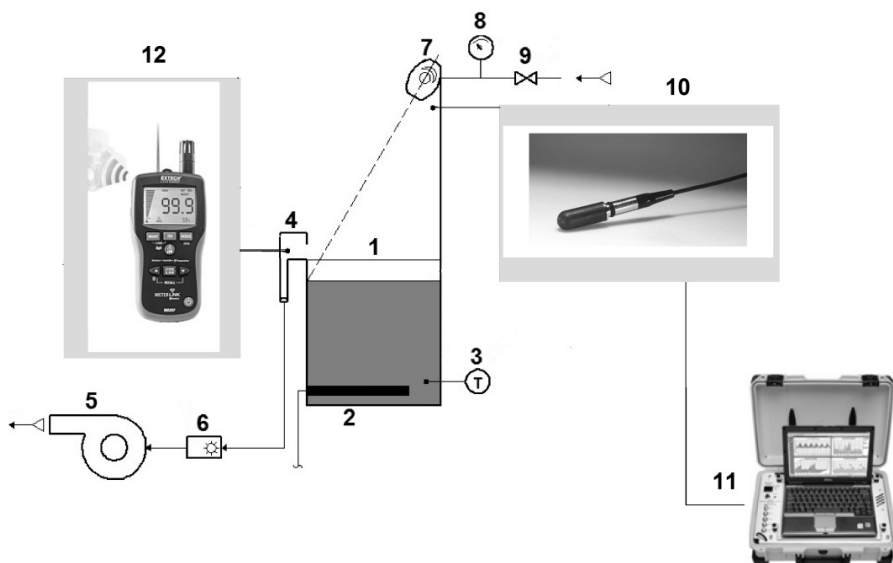
Tyrimo objektai, matavimo priemonės ir įranga. Tyrimo objektas – aeroakustiniais srautais aktyvinamas aerozolių šoninis siurbtuvas. Eksperimentinių tyrimų tikslas – patvirtinti teorinius tyrimus, ištirti akustinio lauko parametrų įtaką aerozolio mažinimui užterštame oro sraute. Bendras stendo vaizdas pateiktas 3.1 paveiksle. Tiriamojo aeroakustinio srauto akustinis laukas formuojasi virš talpyklos su skysčiu (1), kuris šildomas šildytuvu (2), o jo temperatūrinis ir drėgnumo pokyčiai stebimi su daugiavinkiu drėgnumo ir temperatūros matuokliu su IR ir Bluetooth EXTECH MO297 (12) bei temperatūros ir drėgmės duomenų kaupikliu „FHT 70 DataLog“ (prietaisų oro santykinio drėgnumo matavimo ribos: 0–100 %, paklaida ± 3 %). Nuo skysčio paviršiaus susiformavusius aerozolių šalina šoninis siurbtuvas (4), kuris buvo sumontuotas prie talpyklos (1) krašto ir sujungtas su ventiliatoriumi (5). Šalinamo oro debitą galima reguliuoti su dažnine pavara (6). Pūstuvą (7) montuojamas virš garuojančio skysčio taip, kad jo pučiamo oro srauto ašis nukreipta į skysčio paviršių prie vonios krašto. Suslėgtasis oras tiekiamas į pūstuvą per sklendę (9), o jo slėgis nustatomas manometru (8). Pūtimo metu pūstuve generuojama stovinti akustinė banga. Sklindančios akustinės bangos parametrus išmatuoti buvo naudojamas „Bruel&Kjaer“ firmos mikrofonas TC 4013 (10) bei triukšmo ir vibracijų analizatorius Type 9727 (11). Duomenys apdorojami kompiuteriu.

Matavimų ir tyrimų metodikos. Šių tyrimų tikslas – taikant pūstuvo aeroakustinio srauto akustinę pulsaciją išanalizuoti procesus, vykstančius virš taršos šaltinio, nustatyti srautų charakteristikas ir tobulinti šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniais srautais, srautų valdymo metodus, leidžiančius mažinti aerozolio kiekį jų formavimosi zonoje.

Akustiniam laukui veikiant aerozolinių daleles, kurios svyruoja dujų atžvilgiu, sumažėja atstumas tarp jų, atsiranda traukos jėgos ir jos pradeda koaguluotis. Susiliejusios dalelių tūris didėja, didėja ir jų masė. Taigi susidariusi akustinė banga neleidžia aerozoliams pasklisti į aplinką.

Pūstuvo aeroakustinių srautų charakteristikų tyrimo metodika. Buvo tiriamos šios pūstuvo aeroakustinių srautų akustinio lauko charakteristikos:

- akustinio lauko dažnis;
- akustinio lauko garso slėgio lygis ir intensyvumas;
- akustinio lauko garso slėgio amplitudė laikui einant.



3.1 pav. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, stendo schema: 1 – talpykla su skysčiu; 2 – šildytuvas; 3 – temperatūros matuoklis; 4 – šoninis siurbtuvas; 5 – ventiliatorius; 6 – dažninė pavarą; 7 – pūstuvą; 8 – manometras; 9 – sklendė; 10 – mikrofona TC 4013; 11 – „Briel & Kjaer“ triukšmo ir vibracijų analizatorius Type 9727 su kompiuteriu Dell; 12 – daugiafunkcis drėgnumo ir temperatūros matuoklis su IR ir Bluetooth EXTECH MO297

Fig. 3.1. Schem of stand of side exhauster under aeroacoustic flow: 1 – open-surface tank; 2 – heater; 3 – meter of temperature; 4 – side exhauster; 5 – fan; 6 – frequency gear; 7 – push nozzle; 8 – gauge; 9 – valve; 10 – microphone TC 4013; 11 – “Briel & Kjaer” oscillation measurement system Type 9727 and PC Dell; 12 – Pinless Moisture/Humidity Meter with IR Thermometer + Bluetooth EXTECH MO297

Pūstovo aeroakustinių srautų tyrimo stendo schema pateikta 3.1 paveiksle. Akustinis laukas formuojasi dėl pūstovo konstrukcijos (2.6 pav.), kuriame įrengtas garso generatoriaus kolektorius su skylėmis ir ant kurio pritvirtintos tūtos, sutampančios su skylėmis, ir jose sumontuoti srauto užsuktuvai, formuojantys priešingų kryptių srautus nei gretimame atvamzdyje. Prieš visas tūtas išdėstyti sferiniai srauto atspindėtuvai – rezonatoriai, nukreipiantys srautą oro ištekimui plyšio link.

Į pūstuvą iš kompresoriaus tiekiamas 0,3–0,4 MPa oro srautas, kai srovė teka iš tūtos dideliu greičiu ir užpildo rezonatorių, srovė, tekanti iš rezonatoriaus, sutinka srautą, tekantį iš tūtos. Susidaro sutankėjimas, kuris vibruodamas generuoja garsą, t. y. akustinę stovinčiąją bangą. Tyrimų tikslas – nustatyti geriausius geometrinius pūstovo garso generatorių parametrus esant 1–21 kHz dažniams,

kai garso slėgio lygis ne žemesnis nei 120 dB, t. y. minimaliai reikalingos reikšmės lašelinių dispersinių priemaišų koaguliacijai. Matuoti naudojamas „Bruel&Kjaer“ firmos mikrofonas TC 4013 bei triukšmo ir vibracijų analizatorius Type 9727 su kompiuteriu. Tokiu būdu gaunama garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio ruože nuo 1 kHz iki 21 kHz.

Pūstuvo akustinio lauko charakteristikų tyrimo metodika:

1. Pūstuvą montuojamas prie vonios.
2. Sumontuotas pūstuvą jungiamas prie suslėgto oro tiekimo sistemos. Oro slėgis turi būti 0,3–0,4 MPa.
3. „Bruel&Kjaer“ firmos mikrofonu TC 4013 bei triukšmo ir vibracijų analizatoriumi Type 9727 su kompiuteriu atliekami akustinio lauko charakteristikų matavimai.
4. Matavimai kartojami keičiant tūtos skersmenį bei atstumą tarp tūtos ir rezonatoriaus.
5. Garso slėgio intensyvumas skaičiuojamas esant maksimaliai garso slėgio lygio reikšmei.

Šalinamo oro srauto drėgnumo tyrimo metodika. Vertinant siurbtuvo darbo efektyvumą be aeroakustinių srautų ir su jais, oro drėgnumas matuojamas daugiafunkčiu drėgnumo ir temperatūros matuokliu su IR ir Bluetooth EXTECH MO297 ir duomenų kaupikliu „FHT 70 DataLog“ (oro santykinio drėgnumo matavimo ribos: 0–100 %, paklaida ± 3 %). Pūtimo ir siurbimo greičiai išlieka pastovūs, kai skystis talpykloje šildomas šildytuvu. Matavimai kartojami šildant skystį talpykloje iki 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 ir 85 °C temperatūros, taip gaunama šalinamo oro santykinio drėgnumo priklausomybė nuo skysčio temperatūros, kai akustinio oro srauto garso slėgio lygis – nuo 120 dB ir daugiau esant 1–21 kHz dažniams. Tyrimo stendo schema pateikta 3.1 paveiksle.

Siurbtuvo aktyvinamo aerokustiniu srautu drėgnumo tyrimo metodika:

1. Siurbtuvas ir pūstuvą montuojami prie vonios.
2. Vonia pripildoma skysčio ir pašildoma iki 50 °C temperatūros.
3. Sumontuotas siurbtuvas jungiamas su ventiliatoriumi, siurbimo greitis neturi viršyti kritinio greičio.
4. Sumontuotas pūstuvą jungiamas su suslėgto oro tiekimo sistema (oro slėgis 0,3–0,4 MPa).
5. Ventiliatorius prijungiamas prie elektros srovės ir paleidžiamas.
6. Garų vizualizacijai į vandenį įdedama 16 mm skersmens sauso ledo granulė.

7. Su daugiafunkciniu drėgnumo ir temperatūros matuokliu su IR ir Bluetooth EXTECH MO297 ir duomenų kaupikliu „FHT 70 DataLog“ atliekami drėgnumo matavimai.
8. Tyrimą pakartoti 3 kartus, atlikti duomenų statistinius apdorojimus.

3.2. Eksperimentiniai aeroakustinio srauto tyrimai

Norint ištirti pūstuvo formuojamo akustinio lauko charakteristikas, buvo suprojektuoti ir pagaminti skirtingų konstrukcinių parametrų rezonatoriai, pateikti 3.1 lentelėje.

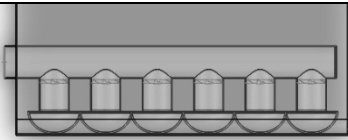
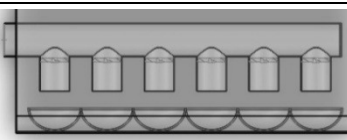
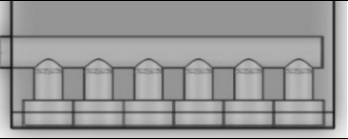
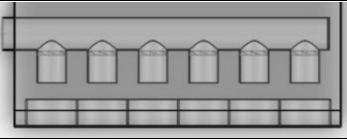
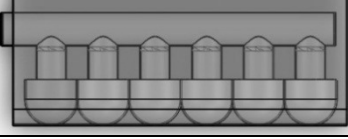
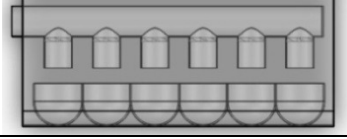
Visi virš skysčio paviršiaus esantys rezonatoriai eksperimento metu buvo tirti keturiais atvejais: kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15, o atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 ir 10 mm. Tyrimas buvo atliekamas matuojant garso slėgio lygį, dažnį prie garso generatoriaus (3.2 pav.).

Pirmo tyrimo metu buvo parinktas rezonatorius, kuriuo ilgis 12,7 mm. Tiekiant į generatorių 0,3–0,4 MPa suslėgtąjį orą, sklaidžiamo garso slėgio amplitudė siekė 154 Pa, o esant 1–21 kHz dažniams garso slėgio lygis nenusileisdavo žemiau 120 dB. B.1a paveiksle (B priedas) pateikti aeroakustinio srauto tyrimo rezultatai, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis sudarė 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, garso slėgio lygis siekė garso slėgio lygį – 139,8 dB esant 1228 Hz dažniui, garso slėgio intensyvumas – 95 W/m².

B.1b paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis – 1304 Hz, garso slėgio lygis siekė 138 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 63 W/m². B.1c paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, dažnis – 7492 Hz, garso slėgio lygis siekė 135 dB, garso slėgio intensyvumas buvo 30 W/m². B.1d paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykiui yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis – 9832 Hz, garso slėgio lygis siekė 129 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 8 W/m². Iš pateiktos garso slėgio lygio dažninės priklausomybės (B priedas) matyti, kad dažniams esant iki 5000 Hz, efektyviausias garso slėgio rezultatas gautas tiriant prietaisą, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm. Esant aukštesniems nei 5000 Hz dažniams, efektyviausias garso slėgio lygio rezultatas gautas tiriant prietaisą, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm.

3.1. lentelė. Pūstuvo rezonatorių ilgiai L ir atstumai iki tūtos S

Table 3.1. Cavity lengths L and Stand-off distance S of Push nozzle

Rezonatoriaus ilgis L , mm	Atstumas tarp rezonatoriaus ir tūtos S , mm	
	2	10
12,7		
15,7		
26,6		



3.2 pav. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, stendo nuotrauka

Fig. 3.2. Photo of stand of side exhauster under aeroacoustic flow

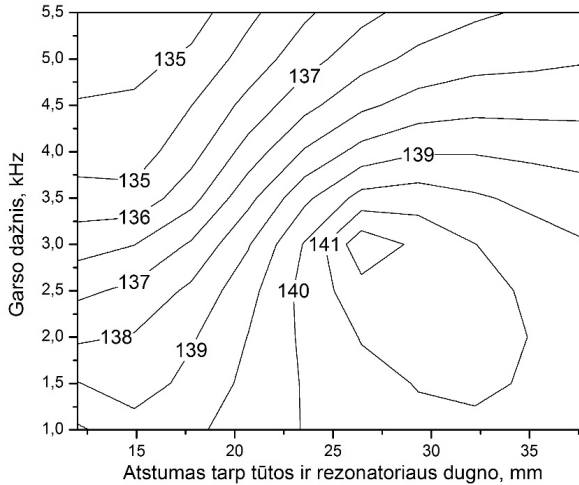
Antro tyrimo metu buvo parinktas rezonatorius, kuriuo ilgis 15,7 mm. B.2a paveiksle (B priedas) pateikti aeroakustinio srauto tyrimo rezultatai, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, garso slėgio lygis siekė 135 dB, esant 3692 Hz dažniui, o garso slėgio intensyvumas – 31,6 W/m². B.2b paveiksle (B priedas) pateikti tyrimo rezultatai, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis – 5440 Hz, garso slėgio lygis siekė 134 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 25 W/m². B.2c paveiksle (B priedas) pateikti tyrimo rezultatai, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, dažnis – 6480 Hz, garso slėgio lygis siekė 133 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 20 W/m².

B.2d paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis – 14 656 Hz, garso slėgio lygis siekė 129 dB, o garso slėgio intensyvumas – 8 W/m². Taigi galima daryti išvadą, kad antro eksperimento metu iš pateiktų garso slėgio lygio dažninės priklausomybės grafikų matyti (B.2 pav. B priedas), kad, esant dažniams iki 5000 Hz, efektyviausias garso slėgio rezultatas gautas tiriant pūstuvą, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, o esant aukštesniems kaip 5 kHz dažniams efektyviausias garso slėgio lygio rezultatas gautas tiriant garso generatorių esant tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykiui 1,66, kai atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm.

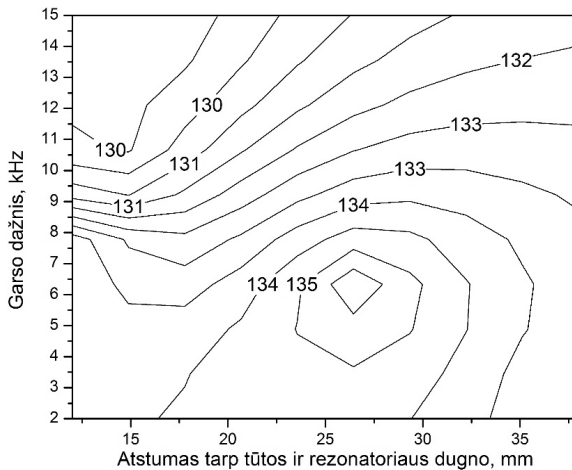
Trečio eksperimento metu rezonatoriaus ilgis siekė 26,6 mm. B.3a paveiksle (B priedas) pateikti aeroakustinio srauto tyrimo rezultatai, kai tūtos d ir rezonatoriaus sferos D skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, garso slėgio lygis – 142 dB, dažnis – 3040 Hz, garso slėgio intensyvumas – 158,5 W/m². B.3b paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos d ir rezonatoriaus sferos D skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis 4784 Hz, garso slėgio lygis siekė 138 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 60 W/m². B.3c paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos d ir rezonatoriaus sferos D skersmenų santykiui yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, dažnis 6400 Hz, garso slėgio lygis siekė 136 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 40 W/m². B.3d paveiksle (B priedas) pateiktas tyrimo rezultatas, kai tūtos d ir rezonatoriaus sferos D skersmenų santykis yra 15, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 10 mm, dažnis – 2692 Hz, garso slėgio lygis siekė 133 dB, o garso slėgio intensyvumas buvo 20 W/m².

Išanalizavus visų tyrimų rezultatus, kurie pateikti 3.6 paveiksle, nustatyta, kad eksperimentų metu, esant iki 5 kHz dažniams, efektyviausias garso slėgio rezultatas gautas tiriant pūstuvą, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm. Esant aukštesniems

nei 5 kHz dažniams, efektyviausias garso slėgio lygio rezultatas gautas tiriant, kai tūtos ir rezonatoriaus sferos skersmenų santykis yra 15 ir atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm.



a)



b)

3.6 pav. Dažnio ir garso slėgio lygio priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio ir atstumo iki tūtos: a) – rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66;

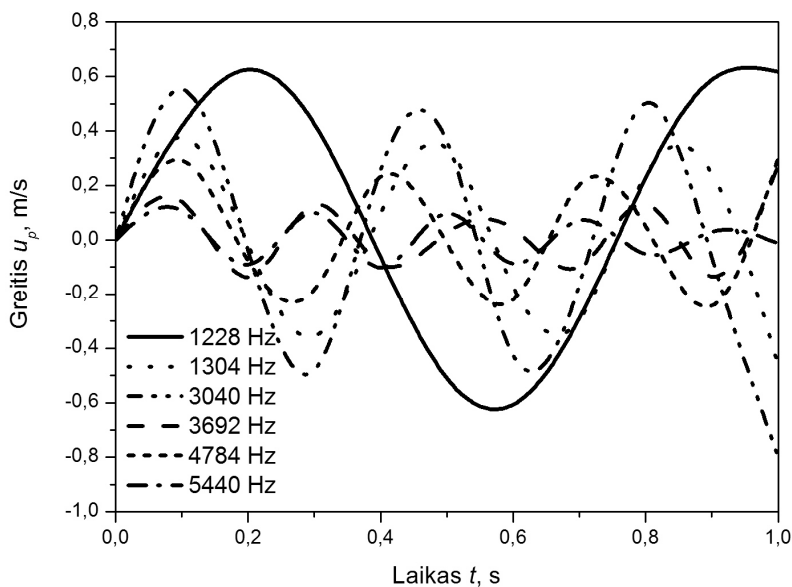
b) – rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15

Fig 3.6. Fig. 10. Variation of frequency and sound pressure level with cavity length and staff-off distance when: a) – nozzle and diameters ratio was equal is 1.66, b) – nozzle and diameters ratio was equal is 15

Visos garso generatoriaus konstrukcijos tinka aerozolinei taršai nusodinti, bet vertinant poveikį 5 ir 10 μm skersmens dalelėms pagal (1.12) formulę, didesnę dujų svyravimų poslinkio amplitudę (3.7–3.8 pav.) sukels pūstuvą, kurio viduje bus sumontuotas garso generatorius, kurio rezonatoriaus ilgis $L = 12,7 \text{ mm}$, o tūtos d ir rezonatoriaus sferos D skersmenų santykis – 1,66, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm.

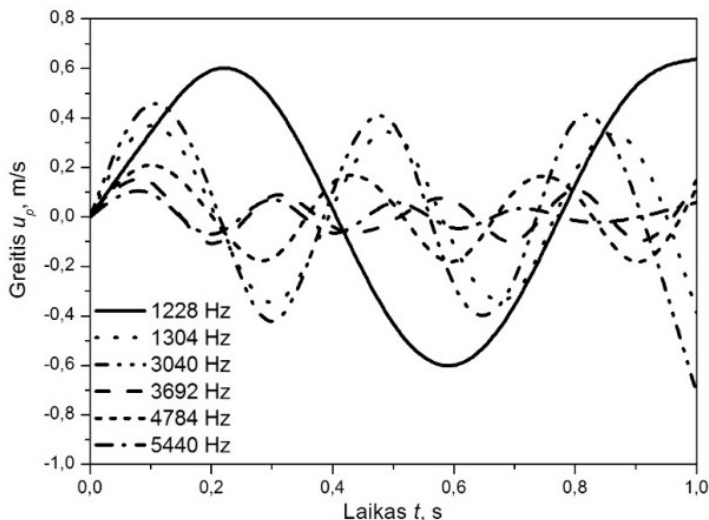
Kai druskos rūgšties garų dinaminis klampos koeficientas – $1,8707 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, tai gaunama didžiausia 91,5 μm garso šaltinio greičio amplitudė, kai garso intensyvumas – 95 W/m^2 , dažnis – 1228 Hz.

Į rezonatorių tiekiamas suslėgtasis oro srautas, atsižvelgiant į jo slėgį, generuojamas aukšto intensyvumo garsas. Šiais tyrimais buvo bandoma įvertinti garso intensyvumą dažnio diapazone atliekant pasyviuosius pakeitimus, keičiant rezonatoriaus cilindrinės ertmės ilgį bei atstumą tarp tūtos ir rezonatoriaus. Nors įvairių geometrinių variantų Hartmano garso generatoriai buvo tiriami anksčiau, garso generatorių, sujungtų į bloką, akustinio lauko parametrų nustatymas skiriasi nuo tradicinio HG.



3.7 pav. Aerozolinės dalelės 5 μm skersmens judėjimo greičio pokytis laikui einant, atsižvelgiant į akustinio lauko dažnį, kai dinaminis klampos koeficientas – $1,8707 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ir rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis – 1,66

Fig. 3.7. Velocity of Aerosol 5 μm changing over time dependence on the frequency of the acoustic field, when dynamic viscosity coefficient $1.8707 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ and nozzle and cavity diameters ratio 1.66



3.8 pav. Aerosolinės dalelės $10\ \mu\text{m}$ skersmens judėjimo greičio pokytis laikui einant, atsižvelgiant į akustinio lauko dažnį, kai dinaminis klampos koeficientas – $1,8707 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ir rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis – 1,66

Fig. 3.8. Velocity of Aerosol $10\ \mu\text{m}$ changing over time dependence on the frequency of the acoustic field, when dynamic viscosity coefficient $1.8707 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ and nozzle and cavity diameters ratio 1.66

Didinant atstumą S rezonatoriaus kraštai atsiduria skirtingose zonose, o tai savo ruožtu paveikia dažnio reikšmę. Kai rezonatoriaus padėtis sutampa su srauto srovės išplėtimo zona, garso intensyvumas dažnyje pamažu didėja ir pasiekia maksimumą. Toliau didinant atstumą S rezonatoriaus padėtis sutampa su srauto srovės suspaudimo regionu, o garso intensyvumas dažnyje pradeda mažėti ir pasiekia mažiausią reikšmę.

Ištirtos aeroakustinio srauto akustinio lauko charakteristikos rodo, kad, papildomai naudojant garso generatorių ($D/d = 1,66$, $L = 12,7\ \text{mm}$, $S = 2\ \text{mm}$), aerozolių lokalizavimas bus gerokai veiksmingesnis.

3.3. Šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumo tyrimas

Eksperimentinio tyrimo metu buvo atlikti šalinamo oro drėgnumo tyrimai ir nustatyta, kaip keičiasi drėgnumas virš garuojančio skysčio, atsižvelgiant į skysčio temperatūrą: kai aerozoliai nuo talpyklos skysčio paviršiaus kyla laisvai ir visa garų šalinimo įranga neįjungta (3.9 pav.); kai aerozoliai šalinami nuo



3.9 pav. Garavimo vizualizacija siurbtuvui neveikiant

Fig. 3.9. Separation of vapours over the tank when an exhauster is not operating

talpyklos skysčio paviršiaus su pūstuvu (3.10 pav.); kai aerozoliai šalinami nuo talpyklos skysčio paviršiaus su siurbtuvu, naudojant efektyviausią garso generatorių ($D/d = 1,66$, $L = 12,7$ mm, $S = 2$ mm), kuris generuoja akustinę bangą. Srauto siurbimo greičio tyrimams atlikti buvo suprojektuota ir pagaminta vonia (talpykla) su vienpusiu šoniniu siurbtuvu. Tyrimo stendo schema pateikta 3.1 paveiksle.

Tyrimo metu į vonią pripilama skysčio, kuris buvo šildomas nuo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Garų vizualizacijai naudotos sauso ledo granulės. Garavimas, kai siurbtuvas neveikia, pavaizduotas 3.9 paveiksle.

Šalinamo oro santykinio drėgnumo matavimo rezultatai buvo apdorojami kompiuteriu, naudojant programinę paketą Origin 6.1. 3.2–3.4 lentelėse pateikti apskaičiuotieji skirstiniai ir statistiniai parametrai.

Pirmo eksperimento metu buvo tiriamas oro srauto santykinio drėgnumo pokytis, kai aerozoliai nuo talpyklos skysčio paviršiaus kyla laisvai ir visa garų šalinimo įranga neįjungta. Tiriamo oro srauto santykinio drėgnumas, kai skysčio temperatūra buvo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, kito nuo 70,8 % iki 75,9 %, o vidutinė reikšmė – 73,1 %. Kai skysčio temperatūra buvo $55\text{ }^{\circ}\text{C}$: mažiausia reikšmė – 83 %, didžiausia – 84,9 %, vidutinė – 84,4 %. Tyrimais nustatyta, kad drėgnumas kito net 21,5 % nuo pradinio, temperatūrai kintant nuo 50 iki $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Visi matavimai buvo kartojami tris kartus, matavimo laikas – 100 s. Statistiniai drėgnumo charakteristikos pateiktos 3.2 lentelėje.

Antro eksperimento metu buvo tiriamas oro srauto santykinio drėgnumo pokytis, kai aerosoliai šalinami nuo talpyklos skysčio paviršiaus su pūstuvu ir siurbtuvu be akustikos. Statistinės drėgnumo charakteristikos pateiktos 3.3 lentelėje. Oro santykinio drėgnumo pokytis, atsižvelgiant į skysčio temperatūrą, buvo nuo 52,2 % iki 90,8 %. Statistiniai drėgnumo charakteristikos pateiktos 3.3 lentelėje.

Trečias eksperimentas, kuriuo metu taip pat buvo tiriamas oro srauto santykinio drėgnumo pokytis, kai aerosoliai šalinami nuo talpyklos skysčio paviršiaus su siurbtuvu naudojant efektyviausią garso generatorių ($D/d = 1,66$, $L = 12,7$ mm, $S = 2$ mm), kuris generuoja akustinę bangą. Tyrimai parodė, kad santykinis drėgnumas, esant 85 °C temperatūrai, skiriasi nuo pradinio tik 6 %. Statistinės drėgnumo charakteristikos pateiktos 3.4 lentelėje.

Trijų tyrimų vidutinių santykinio drėgnumo reikšmių priklausomybės pateiktos 3.11 paveiksle. Rezultatai parodė, kad dėl skirtingų skysčio temperatūrų santykinis oro drėgnumas kito skirtingai. Kylant skysčio temperatūrai, kreivė, kuri vaizduoja tyrimą be įrangos, rodo didžiausias drėgnumo reikšmes.



3.10 pav. Garavimo vizualizacija siurbtuvui veikiant
Fig. 3.10. Separation of vapours over the tank when an exhauster is operating

3.2 lentelė. Statistinės drėgnumo charakteristikos (be įrangos)**Table 3.2.** Statistic parametrs of Humidity without device

Statistinis parametras	Skaitinė reikšmė							
	Skysčio temperatūra, °C							
	50	55	60	65	70	75	80	85
Matavimų skaičius N	30	30	30	30	30	30	30	10
Aritmetinis vidurkis, %	73,1	84,4	86,5	86,6	91,3	92,2	94	93,1
Taškinio imties standartinio nuokrypio įvertis S_x	1,33	0,57	1,18	3,75	0,38	0,81	0,44	1,07
Aritmetinio vidurkio imties standartinio nuokrypio įvertis $S_{\square x}$	0,24	0,1	0,21	0,68	0,07	0,15	0,08	0,2
Minimali reikšmė $x_{\min}$, %	70,8	83	84,4	81,6	90,8	91	93,5	91,6
Maksimali reikšmė $x_{\max}$, %	75,9	84,9	89,8	92,3	92	94	95,1	95,4
Sklaida, %	5,1	1,9	5,4	10,7	1,2	3	1,6	3,8

3.3 lentelė. Statistinės drėgnumo charakteristikos (su oro srautu)**Table 3.3.** Statistic parametrs of Humidity (with airflow)

Statistinis parametras	Skaitinė reikšmė							
	Skysčio temperatūra, °C							
	50	55	60	65	70	75	80	85
Matavimų skaičius N	30	30	30	30	30	30	30	30
Aritmetinis vidurkis, %	52,2	52,5	53,8	55,7	57,8	61,9	63,5	90,8
Taškinio imties standartinio nuokrypio įvertis S_x	2,87	1,17	7,74	2,23	3,42	4,03	0,52	1,73
Aritmetinio vidurkio imties standartinio nuokrypio įvertis $S_{\square x}$	0,52	0,21	1,41	0,4	0,62	0,74	0,1	0,32
Minimali reikšmė $x_{\min}$, %	52,4	50,8	44,5	54	51,9	58,1	62,7	86,5
Maksimali reikšmė $x_{\max}$, %	54,4	53,8	68,1	57,1	63,3	73,3	64,6	92,9
Sklaida, %	3,9	3,8	23,6	12,1	11,4	15,2	1,9	6,4

3.4 lentelė. Statistinės drėgnumo charakteristikos (su aeroakustiniu srautu)

Table 3.4. Statistic parametrs of Humidity (with aeroacoustic flow)

Statistinis parametras	Skaitinė reikšmė							
	Skysčio temperatūra, °C							
	50	55	60	65	70	75	80	85
Matavimų skaičius N	30	30	30	30	30	30	30	30
Aritmetinis vidurkis, %	51,5	51,2	52,8	53,9	54,8	55,8	54,1	57,3
Taškinio imties standartinio nuokrypio įvertis S_x	0,89	3,77	1,33	0,82	0,88	0,64	1,46	0,65
Aritmetinio vidurkio imties standartinio nuokrypio įvertis $S_{\square x}$	0,16	0,67	0,24	0,15	0,16	0,12	0,27	0,12
Minimali reikšmė $x_{\min}$, %	49,9	49,2	51,5	51,7	52,4	54,7	52,5	55,5
Maksimali reikšmė $x_{\max}$, %	52,9	53,6	54,4	55,5	55,8	56,6	55,2	58,1
Sklaida, %	3	3,8	2,9	2,8	2,6	1,9	2,7	2,6

Praktiškai garų šalinimas su siurbtuvu ir pūstuvu su oro srautu ir su aeroakustiniu srautu, esant skysčio temperatūrai iki 60 °C, buvo vienodai efektyvus, bet kai skysčio temperatūra buvo didesnė nei 60 °C, mažesnės drėgnumo reikšmės pasiekiamos naudojant įrangą su akustinės bangos generacija. Kitaip tariant, kuo didesnė pradinė aerozolio dalelių koncentracija, tuo geriau nusodinami jie virš skysčio.

Atlikus šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumo tyrimus (3.12 pav.), nustatyta, kad didėjant skysčio temperatūrai darbo efektyvumas didėja iki 58,5 %.

Pagal gautas kreives sudarytos regresijos lygtis su programiniu paketu Origin 6.1.

Galima teigti, kad sukuriamas akustinis laukas turi poveikį šalinamam srautui. Dalelės, veikiamos akustinio lauko, įgauna poslinkį viena kitos atžvilgiu ir, priartėjusios viena prie kitos, sulimpa. Tokiu būdu vyksta dalelių koaguliacija ir jų koncentracijos mažinimas.

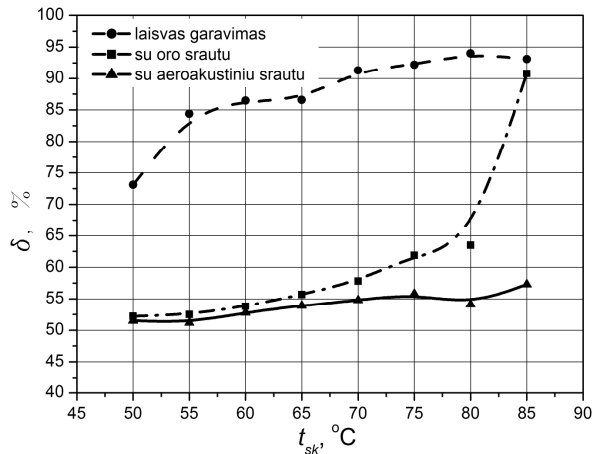
Antro eksperimento kreivės regresija gauta eksponentinė: $y = y_0 + ae^{x/t}$, o trečio – tiesinė funkcinė priklausomybė $y = ax + b$.

Gautos tokios regresijos lygtis:

$$R_1 = 53,54328 + 5,52607 \cdot 10^{-6} e^{t_{sk}/5,41685}, \quad (3.3)$$

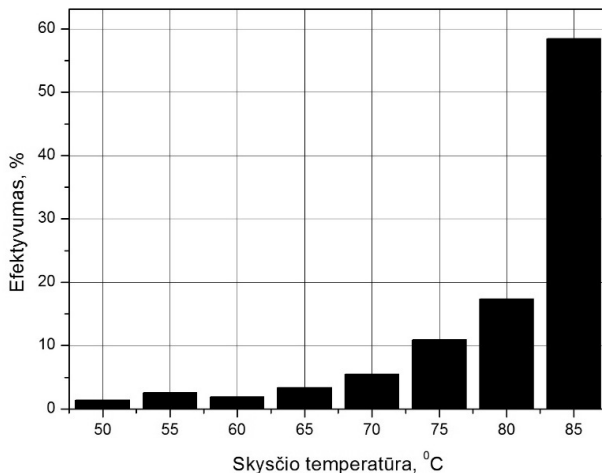
$$R_2 = 43,47857 + 0,15476 t_{sk}, \quad (3.4)$$

čia R_1 – šalinamo oro santykinis drėgnumas, kai veikia pūstuvai ir siurbtuvas be akustikos; R_2 – šalinamo oro santykinis drėgnumas, kai veikia pūstuvai ir siurbtuvas su akustika; t_{sk} – skysčio temperatūra, °C.



3.11 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant skirtingoms skysčio temperatūroms

Fig. 3.11. Humidity of air measured from exhauster of the deferent liquid temperature



3.12 pav. Aerosolio mažinimo efektyvumas esant skirtingoms skysčio temperatūroms, kai naudojama įranga be akustikos ir su akustika

Fig. 3.12. Reduction of aerosol efficiency at different liquid temperatures when using the equipment without acoustics and acoustics

Tam, kad aerosolis būtų šalinamas veiksmingai, tradiciniuose teršalų šalinimo ir valymo įrenginiuose reikia didinti šalinamo oro debitą atsižvelgiant į skysčio temperatūrą. Šiame darbe įvertinus aerosolio mažinimo veiksmingumą, kai naudojamas šoninis siurbtuvas generuojantis aeroakustinį srautą, nustatyta, kad padidina aerosolio ma įrangą be akustikos ir su akustika, nustatyta, kad dėl jos poveikio virš skysčio paviršiaus galima pasiekti net iki 58,5 % didesnę darbo efektyvumą, t. y. sumažinti aerosolio koncentraciją ir kartu šalinamo oro srauto debitą bei valymo įrangos sąnaudas.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus garso slėgio matavimų rezultatus, tiriant aeroakustinį srautą, nustatyta, kad geriausios akustinio lauko charakteristikos gaunamos, kai garso generatoriaus tūtos ir rezonatoriaus skersmenų santykis 1,66, rezonatoriaus ilgis 12,7 mm ir atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm. Tokio garso generatoriaus garso slėgio lygis, esant 1228 Hz dažniui, lygus 139,8 dB.
2. Atlikus garso generatorių akustinio lauko eksperimentinius tyrimus, pagal gautus rezultatus nustatyta, kad kai druskos rūgšties garų dinaminis klampos koeficientas lygus $1,8707 \cdot 10^{-5}$ Pa·s, gaunama didžiausia garso šaltinio poslinkio amplitudė lygi 91,5 μ m prie 1228 Hz dažnio.
3. Įvertinus šoninio siurbtuvo su generuojamu aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumą, nustatyta, kad dėl akustinio lauko poveikio iki 58,5 % sumažėjo aerosolinė tarša.
4. Atlikus aerosolinės taršos šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, darbo efektyvumo tyrimus, nustatyta, kad didėjanti skysčio temperatūra didina siurbtuvo efektyvumą, mažinant aerosolinę taršą.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros šaltinių analizę pastebėta, kad aerozolių surinkimo srityje atlikta daug išsamių teorinių ir eksperimentinių tyrimų, tačiau nepakankamai dėmesio skirta naujų metodų paieškai spręsti aerozolio mažinimo problemas bei visiškai nenagrinėtas siurbtuvų su akustine pulsacija naudojimas.
2. Nustatyti virš druskos rūgšties tirpalo garuojančio paviršiaus susidariusių garų dinaminio klampio koeficiento kitimo dėsningumai. Didėjant druskos rūgšties koncentracijai ir skysčio temperatūrai, jos garų dinaminis klampio koeficientas mažėja. Kai skysčio temperatūra yra 40–70 °C, o druskos rūgšties koncentracija – 28–34 %, jos garų tankio pokytis sudaro 6,1–23,4 %, tačiau esant tai pačiai koncentracijai garų tankis, atsižvelgiant į temperatūrą, kinta vidutiniškai apie 9,1 %.
3. Pasiūlytos nauja šoninio siurbtuvo konstrukcija, kuri pagrįstas aeromechanikos principais formuojant aeroakustinius srautus, bei eksperimentinio tyrimo metodika, kuri leidžia įvertinti aeroakustinio srauto poveikį aerozolio koaguliacijai. Atlikta aeroakustinių garso generatorių parametų analizė, taikant pusiau analitinį metodą. Nustatyta, kad garso generatoriaus, kai jo rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66, rezonato-

riaus ilgis 12,7 mm ir atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, sukuria daugiau kaip 120 dB garso slėgio lygį.

4. Išanalizavus šoninio siurbtuvo aeroakustinio srauto parametrus, nustatyta, kad didžiausią garso šaltinio poslinkio amplitudę 91,5 μm sukuria garso generatorius, kai garso slėgio lygis 1228 Hz dažnyje lygus 139,8 dB.
5. Palyginus siūlomo ir tradicinio šoninių siurbtuvų efektyvumą matyti, kad šoninio siurbtuvo, aktyvinamo aeroakustiniu srautu, efektyvumas net iki 58,5 % didesnis už tradicinio.

Literatūra ir šaltiniai

ACGIH. 2001. Common industrial ventilation. Industrial ventilation—A manual of recommended practice, in 24th edn. *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*. Lansing, MI, p. 10-108–10-112.

Aly, K.; Ziada S. 2010. Flow excited resonance of trapped modes of ducted shallowcavities, *Journal of Fluids and Structures* 26: 92–120.

Arthurs, D.; Ziada, S. 2011. The planar jet plate oscillator, *Journal of Fluids and Structures* 27: 105–120.

Bogdanovičius, A. 2005. *Fizikos pagrindai aplinkos inžinerijoje*. Vilnius: Technika. 233 p.

Billon, A.; Valeau, A.; Sakout, A. 2005. Two feedback paths for a jet-slot oscillator, *Journal of Fluids and Structures* 21: 121–132.

Brocher, E.; Ardisson J. P. 1983. Heating characteristics of a new type of Hartmann–Sprenger tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 4: 97–102.

Brocher, E.; Maresca, C.; Bournay, M. H. 1970. Fluid dynamics of the resonance tube, *Journal of Fluid Mechanics* 43(2): 369–384.

Brun, E.; Boucher, R. M. G. 1957. Research on the acoustic air-jet generator: a new development, *Journal of the Acoustical Society of America* 29 (5): 573–583.

Cain, A. B.; Kerschen, E. J.; Raman, G. 2002. Simulations of acoustic characteristics and mechanisms of powered resonance tubes, in *Proceedings of the Eighth AIAA/CEAS Aer-*

oacoustics Conference and Exhibit, AIAA-2002-2400, June 17–19, Breckenridge, Colorado.

Chang, S. M.; Lee, S. 2001. On the jet regurgitant mode of a resonant tube, *Journal of Sound and Vibration* 246(4): 567–581.

Chang, K.S.; Kim, K. H.; Iwamoto, J. 1996. A study on the Hartmann Sprenger tube flow driven by a sonic jet, *International Journal of Turbo and Jet Engines* 13:173–182.

Dong, Ch., S.; Xianglin, S. 2005. Modelling of acoustic agglomeration processes using the directsimulation Monte Carlo method, *Journal of Aerosol Science*. China.

Duan, Y.; Koch, W.; Linton, C. M.; McIver, M. 2007. Complex resonances and trapped modes in ducted domains, *Journal of Fluid Mechanics* 571: 119–147.

Ezekoye, O. A.; Wibowo, Y. W. 1999. Simulation of acoustic agglomeration processes using a sectional algorithm, *Journal of Aerosol Science* 30: 1117–1138.

Flagan, R. C.; Seinfeld, J. H. 1988. *Fundamentals of air pollution engineering*. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall.

González, I.; Hoffmann, T. L.; Gallego-Juárez, J. A. 2002. Visualization of hydrodynamic interactions: Validation of a numerical model, *Acta Acustica* 88(1): 19–26.

Glessner, M.; Valeau, A.; Sakout, A. 2008. Vortexes in unconfined flows: application to the coupling of a jet-slot oscillator with a resonator, *Journal of Sound and Vibration* 314: 635–649.

Graf, H.; Ziada, S. 2010. Excitation source of a side-branch shear layer, *Journal of Sound and Vibration* 329: 2825–2842.

Gregory, J. W.; Sullivan, J. P. 2003. Characterization of Hartmann tube flow with porous pressure sensitive paint, in *Proceedings of the 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, June 23–26, Orlando FL.

Hamed, A.; Das, K.; Basu, D. 2003a. Characterization of powered resonance tube for high frequency excitation, in *Proceedings of FEDSM'03 4TH ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference Honolulu*, July 6–11, 2003, Hawaii, USA, FEDSM 45472.

Hamed, A.; Das, K.; Basu, D. 2003b. *Numerical simulation and parametric study of Hartmann Sprenger tube based powered device*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 0550.

Hartmann, J. 1919. *Om en ny metode til frembringelse af ydsvinginger*, Dan Mat Fys Medd 1: 13.

Hartmann, J. 1939. Construction, performance and design of the acoustic air-jet generator. *J Sci Instr* 16: 140–9.

Hartmann, J. 1931. On the production of acoustic waves by means of an air-jet of a velocity exceeding that of sound, *Phil Mag* 11: 926–948.

Hartmann, J.; Larris, F. 1951. *The air-jet generator as a means of setting up waves in a liquid medium*. Dan Mat Fys Medd 26: 11.

Hartmann, J.; Lazarus, F. 1940. The radiation of the acoustic air-jet generator derived from direct observations of the amplitude of the aerial vibrations of the oscillator, *Phil Mag* 29: 140–147.

- Hartmann, J.; Trolle, B. 1926. *New investigations on the air-jet generator for acoustic waves*. Dan Mat Fys Medd 7.
- Hartmann, J.; Trolle, B. 1927. A new acoustic generator. The air-jet generator, *Journal of Scientific Instruments* 4(4): 101–111.
- Hartmann, J.; Trusdø, E. 1951. *Synchronisation of air-jet generators with an appendix on the stem generator*. Dan Mat Fys Medd 26: 10.
- Hamed, A.; Das, K.; Basu, D. 2003. Characterization of powered resonance tube for high frequency excitation, in *Proceedings of FEDSM'03 Fourth ASME JSME Joint Fluids Engineering Conference*, Honolulu, July 6–11 Hawaii, USA.
- Hein, S.; Hohage, T.; Koch, W. 2004. On resonances in open systems, *Journal of Fluid Mechanics* 506: 255–284.
- Hein, S.; Hohage, T.; Koch, W. 2007. Acoustic resonances in a high-lift configuration, *Journal of Fluid Mechanics* 582: 179–202.
- Hein S., Koch W. 2008. Acoustic resonances and trapped modes in pipes and tunnels, *Journal of Fluid Mechanics* 605: 401–428.
- Henderson, B. 2001. The connection between sound production and jet structure of the supersonic jet, *Journal of the Acoustical Society of America* 111(2): 735–747.
- Henderson, B.; Powell, A. 1993. Experiments concerning tones produced by an axisymmetric choked jet impinging on flat plates, *Journal of Sound and Vibration* 168(2): 307–326.
- Ho, C.; Nosseir, N. S. 1981. Dynamics of an impinging jet. Part 1: the feedback mechanism, *Journal of Fluid Mechanics* 105: 119–142.
- Hoffman, T. L. 2006. An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the acoustic wake effect, *Journal of Aerosol Science* 28: 919–936.
- Hoffmann, T. L.; Koopmann, G. H. 1997. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory evaluation, *The Journal of the Acoustical Society of America* 101: 3421.
- Huang, J.-M.; Hsiao, F.-B. 1999. On the mode development in the developing region of a plane jet, *Physics of Fluids* 11(7): 1847–1857.
- Huang, R. F.; Lin, S. Y.; Jan, S.-Y.; Hsieh, R. H.; Chen, Y.-K.; Chen, C.-W.; Yeh, W.-Y.; Chang, C.-P.; Shih, T.-S.; Chen, C.-C. 2005. Aerodynamic Characteristics and Design Guidelines of Push–Pull Ventilation Systems, *Ann. occup. Hyg* 49(1): 1–15.
- Iwamoto, J. 1990. Experimental study of flow oscillation in a rectangular jet driven tube, *Journal of Fluids Engineering—Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 112(1): 23–27.
- Karamcheti, K.; Bauer, A. B.; Shields, W. L.; Stegen, G.R.; Woolley, J. P. 1969. *Some Features of an Edge-tone Flow Fields*. NASA SP-207.
- Kastner, J.; Samimy, M. 2002. Development and characterization of Hartmann tube fluidic actuators for high-speed control, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 40(10): 1926–1934.

- Kerschen, E. J. 2001. Analytical modelling of the resonance frequencies of a powered resonance tube, in *Division of Fluid Dynamics of the American Physical Society Meeting*, San Diego, CA.
- Kinsler, L. E.; Frey, A. R.; Coppens, A. B.; Sanders, J. V. 2000. *Fundamentals of Acoustics, fourthed*. Wiley, New York.
- Koch, W. 1983. Resonant acoustic frequencies of flat plate cascades, *Journal of Sound and Vibration* 88(2): 233–242.
- Krothapalli, A.; Rajkuperan, E.; Alvi, F.; Lourenco, L. 1999. Flow field noise characteristics of a supersonic impinging jet, *Journal of Fluid Mechanics* 392: 155–181.
- Lietuvos higienos normos HN 35:2007 „Didžiausia leidžiama cheminių medžiagų (teršalų) koncentracija gyvenamosios aplinkos ore“. Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas, STR 2.09.02:1998 [interaktyvus], [žiūrėta 2012 sausio 29 d.]. Prieiga per internetą: <http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=164242>.
- Liu, Z.; Thorpe, S. A.; Smyth, W. D. 2012. Instability and hydraulics of turbulent stratified shear flows, *Journal of Fluid Mechanics* 695: 235–256.
- Liu, T.; Sullivan, J. 1996. Heat transfer and flow + objectives, in *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering one and 9th International Symposium on Process Systems Engineering*, 377–382.
- Malin, B. S. 1945. Practical pointers on industrial exhaust system, *Heat Vent* 42: 75–82.
- Marzal, F.; Gonzalez, E.; Minana, A. 2002a. Analytical model for evaluating lateral efficiencies in surface treatment tanks, *Am Ind Hyg Assoc J* 63: 572–577.
- Marzal, F.; Gonzalez, E.; Minana, A. 2002b. Determination and interpretation of total and transversal linear efficiencies in push–pull ventilation systems for open surface tanks, *Ann Occup Hyg* 46: 629–635.
- Marzal, F.; Gonzalez, E.; Minana, A. 2002c. Influence of push element geometry on the capture efficiency of push–pull ventilation systems in surface treatment tanks, *Ann Occup Hyg* 46: 383–393.
- Marzal, F.; Gonzalez, E.; Minana, A. 2003a. Methodologies for determining capture efficiencies in surface treatment tanks, *Am Ind Hyg Assoc J* 64: 604–608.
- Marzal, F.; Gonzalez, E.; Minana, A. 2003b. Visualization of airflows in push–pull ventilation systems applied to surface treatment tanks, *Am Ind Hyg Assoc J* 64: 455–460.
- Mednikov, E. P. 1965. *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*. Consultants Bureau. New York.
- Mehta, R.; Bradshaw, P. 1979. Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels, *Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society* 83: 443–449.
- Melling, A. 1997. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry, *Measurement Science and Technology* 8: 1406–1416.
- Morch, K. A. 1964. A theory for the mode of operation of the Hartmann air jet generator, *Journal of Fluid Mechanics* 43: 141–159.
- Murugappan, S.; Gutmark, E. 2005. Parametric study of the Hartmann–Sprenger tube, *Experiments in Fluids* 38: 813–823.

- Narayanan, S.; Bhawe, P.; Srinivasan, K.; Ramamurthi, K.; Sundararajan, T. 2009. Spectra and directivity of a Hartmann Whistle, *Journal of Sound and Vibration* 321(3–5): 875–892.
- Neemeh, R. A.; Ostrowski, P. P.; Wu, J. H. T. 1984. Thermal performance of a logarithmic-spiral resonance tube, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 22: 1823–1825.
- Neddermeijer, H. G.; van Oortmarssen, G. J.; Piersma, N.; Dekker, R.; Habbema, J. D. F. 2000. Adaptive extensions of the Nelder and Mead Simplex Method for optimization of stochastic simulation models, in *Econometric Institute Report EI2000–22/A*, Netherlands. 88 p.
- Nosseir, N. S.; Ho, C. 1982. Dynamics of an impinging jet. Part 2: the noise generation, *Journal of Fluid Mechanics* 116: 379–391.
- O'Donovan, T. S.; Murray, D. B. 2007a. Jet impingement heat transfer – Part I: mean and root-mean-square heat transfer and velocity distributions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 3291–3301.
- O'Donovan, T. S.; Murray, D. B. 2007b. Jet impingement heat transfer—Part II: a temporal investigation of heat transfer and local fluid velocities, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 3302–3314.
- Oke, G.; Stefanopoulos, Y. 2001. Gradient-descent based trajectory planning for regulation of a two-link flexible robotic arm, in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Proceedings 2: 948–952.
- Panickar, P.; Raman, R. 2007. Criteria for the existence of helical instabilities in subsonic impinging jets, *Physics of Fluids* 19: 106103-1.
- Powell, A. 1961. On the edge tone, *Journal of the Acoustical Society of America* 33: 395–409.
- Powell, A. 1988. The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates, *J Acoust Soc America* 83: 515–533.
- Rakowsky, E. L.; Corrado, A. P.; Marchese, V. P. 1974. Fluidic explosive initiator, *Fluidics Quart* 6: 13–32.
- Raman, G. Cessation of screech in underexpanded jets, *Journal of Fluid Mechanics* 336(1997): 69–90.
- Raman, G.; Envia, E.; Bencic, T. J. 2002. Jet cavity interaction tones, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal* 40(8): 1503–1511.
- Raman, G.; Khanafseh, S.; Cain, A. B.; Kerschen, E. 2004. Development of high band width powered resonance tube actuators with feedback control, *Journal of Sound and Vibration* 269: 1031–1062.
- Raman, G.; Srinivasan, K. 2009. The powered resonance tube: from Hartmann's discovery to current active flow control applications, *Progress in Aerospace Sciences* 45: 97–123.
- Reist, P. 1984. *Introduction to Aerosol Science*. Macmillan Publishing Company. New York. 284 p.

- Rockwell, D.; Naudascher, E. 1979. Self-sustained oscillations of impinging free shear layers, *Annual Review of Fluid Mechanics* 11: 67–94.
- Rossiter, J. E. 1964. Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds, *Royal Aircraft Establishment* TR No. 64307.
- Rota, R.; Nano, G.; Canossa, L. 2001. Design guidelines for push–pull ventilation systems through computational fluid dynamics modeling, *Am Ind Hyg Assoc J* 62: 141–148.
- Roux, S.; Fenot, M.; Lalizel, G.; Brizzi, L. E.; Dorignac, E. 2011. Experimental investigation of the flow and heat transfer of an impinging jet under acoustic excitation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54: 3277–3290.
- Sarohia, V.; Back, H. L. 1979. Experimental investigation of flow and heating in a resonance tube, *Journal of Fluid Mechanics* 94: 649–672.
- Sarpotdar, S.; Raman, G.; Cain, A. B. 2005. Powered resonance tubes: resonance characteristics and actuation signal directivity, *Experiments in Fluids* 39: 1084–1095.
- Schäffler, S.; Schultz, R.; Weinzierl, K. 2002. Stochastic method for the solution of unconstrained vector optimization problems, *Journal of Optimization Theory and Applications*. Springer Netherlands 114(1): 209–222.
- Seiner, J. M. Advances in high speed jet aeroacoustics, in *American Institute of Aeronautics and Astronautics* AIAA-84-2275.
- Shaozeng, D.; Lipkens, B.; Cameron, T. M. 2005. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols, *The Journal of Aerosol Science*, 540–553.
- Shaw, D. T. 1976. *Acoustic agglomeration of aerosols. Recent Developments in Aerosol Sciences*. New York: Wiley.
- Shen, W.; Nie, Y.; Zhang, H. M. 2007. Dynamic network simplex method for designing emergency evacuation plans, *Transportation Research Record* 2022: 83–93.
- Sheng, C.; Shen, X. 2006. Modelling of acoustic agglomeration processes using the direct simulation Monte Carlo method, *Journal of Aerosol Science* 37(1): 16–36.
- Shibata, M.; Howell, R. H.; Hayashi. 1982a. Characteristics and design method for push–pull hoods: Part 1-cooperation theory on airflow, *ASHRAE Trans* 88: 535–556.
- Shibata, M.; Howell, R. H.; Hayashi. 1982b. Characteristics and design method for push–pull hoods: Part 2-streamline analyses of push–pull flows, *ASHRAE Trans* 88: 557–570.
- Shirokova, N. L. 1970. Aerosol coagulation, in L. D. Rosenberg (Ed.). *Physical principles of ultrasonic technology*, Vol 2, Part X, p. 447–539.
- Sobeiraj, G. B.; Szumowsky, A. P. 1991. Experimental investigations of an underexpanded jet from a convergent nozzle impinging on a cavity, *Journal of Sound and Vibration* 149: 375–96.
- Sontag, E. D. 1998. *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*. Springer. 351 p.
- Song, L. 1990. *Modelling of acoustic agglomeration of fine aerosol particles*. Ph.D. thesis. The Pennsylvania State University

- Spalart, P. R.; Allmaras, S. R. 1992. *A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows*, in American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-92-0439.
- Spall, J. C. 2000. Adaptive stochastic approximation by the simultaneous perturbation method, in *IEEE Transactions on Automatic Control* 45(10): 1839–1853.
- Spurny, K. R. 2000. *Aerosol Chemical Processes in the Environment*. Boca Raton, Florida, Lewis Publishus. 615 p.
- Sreejith, G. J.; Narayanan, S.; Jothi, T. J. S.; Srinivasan, K. 2008. Studies on conical and cylindrical resonators, *Applied Acoustics* 69(12): 1161–1175.
- Stauskis, V. J. 2007. *Statybinė akustika*. Vilnius: Technika. Pp. 226.
- Striška, V. 2001. *Aplinkos apsaugos įrenginiai ir sistemos*. Vilnius: Technika. 256 p.
- Striška, V. 2012. *Aplinkos apsaugos įrenginiai ir sistemos: laboratorinių darbų nurodymai*. Vilnius: Technika. 56 p.
- Tam, C. K. W. 1995. Jet noise generated by large scale coherent motion, in H. H. Hubbard (Ed.). *Aeroacoustics of Flight Vehicles, Acoustical Society of America, Theory and Practice* 1: 1095.
- Tam, C.; Ahuja, K. 1990. Theoretical model of discrete tone generation by impinging jets, *Journal of Fluid Mechanics* 214: 67–87.
- Tam, C. K. W.; Tanna, H. K. 1982. Shock associated noise of super sonic jets from convergent–divergent nozzles, *Journal of Sound and Vibration* 81: 337–358.
- Tetsman, I.; Striška, V. 2010. Šoninių siurbtuvų efektyvumo tyrimas, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba. 13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, t. 2, Nr. 4. Vilnius: Technika, 42–45. ISSN 2029-2341.
- Thorpe, S. A. 1987 Transitional phenomena and the development of turbulence in stratified fluids: a review, *J. Geophys. Res.* 92(C5): 5231–5248.
- Thorpe, S. A. 2002. The axial coherence of Kelvin–Helmholtz billows, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 128: 1529–1542.
- Vejrazka, J.; Tihon, J.; Marty, P.; Sobolik, V. 2005. Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet, *Physics of Fluids* 17: 105–102.
- Vilat, H. 1945. *Lecons sur les fluids visqueux*. Gauthien – Fillars.
- Vollmers, H. 2001. Detection of vortices and quantitative evaluation of their main parameters from experimental velocity data, *Measurement Science and Technology* 12: 1199–1207.
- Wilcox, D. C. 1994. *Turbulence Modeling for CFD*. CW Industries, Inc LaCanada, California.
- Ziada, S. 1995. Feed back control of globally unstable flows: impinging flows, *Journal of Fluids and Structures* 9: 907–923.
- Ziada, S. 2001. Interaction of a jet slot oscillator with a deep cavity resonator and its control, *Journal of Fluids and Structures* 15: 831–843.

Ziada, S. 2002. Active stabilization of aplanar jet impinging on a flexible wedge, *Journal of Fluids and Structures* 16: 613–626.

Ziada, S.; Ng, H. 2003. Flow excited resonance of a confined shallow cavity in low Mach number flow and its control, *Journal of Fluids and Structures* 18: 79–92.

Ziada, S., Rockwell, D. 1982. Oscillations of an unstable mixing layer impinging up on an edge, *Journal of Fluid Mechanics* 124: 307–334.

Elinskii, I. J. 1989. *Ventilation and Heating of Galvanic Shops of Machine Building Plants*. Moscow: Mashinostroyeniye (in Russian). 150 p.

Ландау, Л. Д.; Лифшиц, Е. М. 2000. *Механика сплошных сред*. М. – Л.

Тимошенко, В. И. 1974. О влиянии изменения подвижности аэрозольных частиц в акустическом поле на процесс диффузии. Межвузовский сборник „Прикладная акустика“, том VI. Таганрог, с. 192–201.

Фукс, Н. А. 1955. *Механика аэрозолей*. Изд. АН СССР. М.

Хмелев, В. Н.; Шалунов, А. В.; Шалунова, К. В.; Цыганок, С. Н.; Барсуков, Р. В.; Сливин, А. Н. 2010. *Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография*. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 241 с.

Чернов, Н. Н. 2004. *Гидродинамическое взаимодействие ансамбля взвешенных частиц в звуковом поле*. Известия ТРТУ № 5. Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием. Таганрог, с. 115–117.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vekteris, V.; Tetsman, I.; Striška, V.; Mokšin, V. 2013a. Tribological behavior of aerosol particles in acoustic field, *Mechatronic Systems and Materials V. Solid State Phenomena* 199(1392–4044): 205–208. ISSN 1012-0394. (ISI Web of Science)

Vekteris, V.; Tetsman, I.; Mokšin, V. 2013b. Experimental investigation of influence of acoustic wave on vapour precipitation process, *Engineering, Technology & Applied Science Research (ETASR)* 3(2): 408–412. ISSN 2241-4487.

Straipsniai kituose leidiniuose

Vekteris, V.; Tetsman, I.; Striška, V. 2010. Experimental research of suction velocity of side exhausters, in *Mechanika–2010: proceedings of the 15th international conference*. Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Sciences, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering (BAME). Kaunas: Technologija, p. 477–481. ISSN 1822-2951.

Vekteris, V.; Tetsman, I.; Striška, V.; Mokšin, V. 2011. Investigation into reduction of flow rate of cleaning air, in *15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2011*. Prague, Czech Republic. Proceedings Zenica (BH): University of Zenica. Year 15, no. 1, p. 365–368. ISSN 1840-4944.

Stukaitė, L.; Tetsman, I.; Vekteris, V. 2012. Akustinio lauko įtakos aerozolio šalinimo efektyvumui tyrimas, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba, 15-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, t. 4, Nr. 6. Vilnius: Technika, 537–540. ISSN 2029-2341.

Tetsman, I.; Striška, V. 2010. Šoninių siurbtuvų efektyvumo, iš *Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba, 13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, t. 2, Nr. 4. Vilnius: Technika, 42–45. ISSN 2029-2341.

Patentas, įregistruotas Lietuvoje

Vekteris, V.; Tetsman, I.; Striška, V.; Kilikevičius, A. 2012. *Aktyvinamas aerosolinės taršos nusiurbtuvas*: patentas LT5891. Vilnius

Priedai

**A priedas. Patentas LT5891. Aktyvinamas
aerozolinės taršos nusiurbtuvas**



LIETUVOS RESPUBLIKOS VALSTYBINIS PATENTŲ BIURAS
STATE PATENT BUREAU OF THE REPUBLIC OF LITHUANIA

PATENTAS Patent

Nr. 5891

Šis dokumentas patvirtina, kad vadovaujantis Lietuvos Respublikos patentų įstatymu išradimas, nurodytas pridedamame patento aprašyme, yra įrašytas į Lietuvos Respublikos patentų registrą.

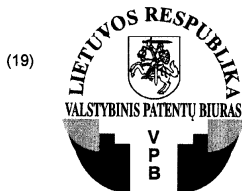
It is hereby certified that following the Patent Law of the Republic of Lithuania the invention as outlined in the attached Patent Specification has been entered into the Register of Patents of the Republic of Lithuania.

Išdavimo data 2012 12 27, Vilnius
Date of issue



Direktorius
Director

Rimvydas Naujokas

(10) **LT 5891 B**(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patento numeris: **5891** (51) Int. Cl. (2011.01): **F24F 9/00**
- (21) Paraiškos numeris: **2010 115**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2010 12 30**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2012 07 25**
- (45) Patento paskelbimo data: **2012 12 27**
- (62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
- (85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
- (30) Prioritetas: —
- (72) Išradėjas:
Vladas VEKTERIS, LT
Ina TETSMAN, LT
Vytautas STRIŠKA, LT
Artūras KILIKEVIČIUS, LT
- (73) Patento savininkas:
Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
—

LT 5891 B

- (54) Pavadinimas:
Aktyvinamas aerosolinės taršos nusiurbtuvas
- (57) Referatas:

Aktyvinamas aerosolinės taršos nusiurbtuvas skirtas aerosoliams nusiurbti nuo skysčių paviršių bei mažinti jų kiekį nusiurbtame ore. Išradimas gali būti naudojamas aerosoliams surinkti nuo skirtingų temperatūrų skysčių paviršių. Skysčiai gali būti laikomi riboto dydžio talpose ir skirti įvairiems technologiniams procesams ir operacijoms atlikti. Suspaustas oro srautas tiekiamas į kolektorių ir iš jo per skyles su užsuktuvais formuojamas sūkurinis srautas. Dėl skirtingų užsikimo kryptių tarpgrętimų užsuktuvų formuojasi padidintos turbulencijos srautas. Užsuktas srautas per atvamzdžius patenka į sferinius atspindėtuvas, kurie tarnauja kaip turbulencijos stiprintuvai, ir nukreipia šį srautą virš taršos šaltinio. Padidintos turbulencijos srautas, patekęs virš taršos šaltinio, suaktyvina skystų dalelių aerozolyje koleasencinį efektą ir dalį aerosolinės taršos grąžina atgal į skystį. Oro srautas nusiurbiamas su likusia tarša nuo skysčio paviršiaus cilindrinės formos nusiurbtuvu.

Išradimas skirtas aerozoliams nusiurbti nuo skysčių paviršių ir jų kiekio mažinimui nusiurbtame ore. Jis gali būti naudojamas aerozoliams surinkti nuo skirtingų temperatūrų skysčio paviršiaus. Skystis gali būti laikomas riboto dydžio talpose, skirtose įvairiems technologiniams procesams ir operacijoms atlikti.

Žinomi įvairių konstrukcijų nusiurbtuvai susidariusiems aerozoliams nuo skysčio paviršių surinkti. Jie klasifikuojami į aktyvinius ir pasyvius. Pasyvūs nusiurbtuvai tik nusiurbia skysčio paviršiuje susidariusią taršą, aktyvinami - papildomai nupučia susidariusią taršą link siurbtuvų įsiurbimo angos. Jų pagrindinė paskirtis - kuo efektyviau surinkti virš įvairių paviršių susidariusius aerozolių.

Visų šių žinomų įrenginių konstrukcijos neužtikrina susiformavusių aerozolių kiekio sumažinimo nusiurbtame ore. Nusiurbto aerosolio kiekis oro sraute daro įtaką išvalymo kokybei bei išvalymo sąnaudoms, vertinant pagal surinktos taršos kiekį nuo paviršiaus, kurį reikia išvalyti. Tokio tipo nusiurbtuvai nėra efektyvūs.

Žinomas metodas, kuris naudojamas įrenginyje, susidedančiame iš dviejų išdėstytų vienas šalia kito siurbtuvų. Vienas iš jų – vamzdynas, su įmontuotu jame ventiliatoriumi, sujungtas su nupūtimo kolektoriumi. Nupūtimo kolektorius išdėstytas prieš siurbtuvus, o tarp jų patalpintas taršos šaltinis (žiūr. patentą DE 3501469 TIK F 24 F9/00, publ.1986-07-24).

Šis išradimas yra geras ir taikytinas tuo atveju, kai reikia sumažinti šilumos nuostolius dėl garavimo, o taip pat leidžia sumažinti energijos sąnaudas, mažinant išsiurbiamo oro debitą nuo įkaitintų paviršių. Šis metodas tampa mažai efektyvus nusiurbiant susidariusią taršą nuo vonios skysčio paviršiaus, kurio temperatūra yra lygi aplinkos temperatūrai. Jis neleidžia sumažinti nusiurbiamų aerozolių kiekio, kuris formuojasi virš įkaitinto skysčio paviršiaus. Daugumoje atvejų nusiurbiamas aerosolis yra ir korozijos požiūriu agresyvus, todėl sistema tiekianti oro srautą nupūtimui turi būti pagaminta iš chemiškai atsparių medžiagų. Visa tai šį metodą daro mažiau efektyvų ir sudėtingą.

Taip pat žinomas įrenginys, kuris užtikrina oro užuolaidos sudarymą virš atviros vonios – taršos šaltinio (patentas JP4-169730, TIK F 24 F 9/00, publ. 1990-11-01). Įrenginį sudaro nupūtimo kolektorius su atvamzdžiais, kuris susiformavusį aerosolį virš taršos šaltinio nupučia link siurbtuvo su kreipiančiąją plokštuma ir pašalina jį vamzdynais. Šio įrenginio efektyvumą mažina tai, kad nusiurbiamas papildomas oro kiekis ir padidėja oro judėjimo greitis virš taršos šaltinio, tai labiau skatina taršos išsiskyrimą ir didina nusiurbiamo oro kiekį.

LT 5891 B

Siūlomo įrenginio tikslas - padidinti jo efektyvumą, sumažinti nusiurbiamo aerolio kiekį, nusodinant jį atgal į skystį, virš kurio paviršiaus jis formuojasi.

Šiame išradime siūlomo įrenginio konstrukcijos pranašumas yra tas, kad lyginant su kitų nusiurbtuvų konstrukcijomis leidžia sumažinti ne tik nusiurbiamo oro kiekį, bet ir sumažinti nusiurbiamų aerolių koncentraciją nusiurbtame ore, nusodinant susidariusius aerolius tiesiogiai virš jų susidarymo zonos. Tikslas pasiekiamas dėl nupūtimo įtaiso konstrukcijos, kuriame patalpintas kolektorius su skylėmis ir ant kurio pritvirtinti atvamzdžiai, sutampantys su skylėmis, ir juose sumontuoti srauto užsuktuvai, formuojantys priešingų krypčių srautus, nei gretiname atvamzdyje. Prieš visus atvamzdžius išdėstyti sferiniai srauto atspindėtuvai, nukreipiantys srautą link oro išteikėjimo plyšio. Plyšio plotis b yra lygus kartotinam poriniam dydžiui l , čia l - atstumas nuo atvamzdžio iki srauto atspindėtuvo sferos dugno, kuris savo ruožtu yra lygus $4h$, čia h - tarpelis tarp kolektoriaus ir nupūtimo įtaiso vieno krašto vidinės korpuso sienelės. Savo ruožtu siurbtuvo oro nusiurbimo plyšys suformuotas pagal cilindrinės siurbtuvo korpuso dalies liestinę, o oro pašalinimo vamzdis prijungtas prie siurbtuvo korpuso tangentiškai, vienoda kryptimi, bet priešingoje siurbtuvo cilindro pusėje nei suformuotas oro nusiurbimo plyšys.

Išradimas iliustruojamas brėžiniais, parodytais fig. 1-4.

Fig. 1 – įrenginio vaizdas iš šono. Šiame brėžinyje pavaizduota siurbtuvo ir nupūtimo įtaiso išdėstymo schema taršos šaltinio atžvilgiu.

Fig. 2 – nupūtimo įtaiso pjūvis, kuriame matosi kolektoriuje esančių skylių išdėstymas, atvamzdžių prijungimas ir srauto užsuktuvų patalpinimo vieta jose bei sferinių atspindėtuvų išdėstymas.

Fig. 3. – užsuktuvų išdėstymas atvamzdyje pagal srauto užsikimo kryptį

Fig. 4 – nupūtimo įtaiso padidintas vaizdas pjūvyje.

Aktyvinamą aerolinę taršą nusiurbtuvą sudaro: nupūtimo įtaiso korpusas 1, kurio viduje patalpintas kolektorius 2. Kolektoriuje 2 suformuotos skylės 3 ir jų vietose prie kolektoriaus sandariai prijungti atvamzdžiai 4, kurie nukreipti į sferinės formos atspindėtuvus 5, o jie savo ruožtu nukreipti į plyšį 6, kuris suformuotas nupūtimo įtaiso korpuso 1. Plyšio 6 plotis b , yra kartotinas dydis poriniam skaičiui atstumų l , čia l – atstumas nuo atvamzdžio 4 iki atspindėtuvo 5.

Savo ruožtu atstumas l lygus $4h$, čia h – tarpelis tarp kolektoriaus 2 ir vidinės nupūtimo įtaiso 1 vienos pusės korpuso sienelės. Atvamzdiuose 4 sumontuoti srauto užsuktuvai 7 ir 8, kurių užsakomo srauto kryptis yra priešinga ir jie išdėstyti, taip kad gretimose

LT 5891 B

atvamzdžiuose 4, užsukto srauto kryptis būtų priešinga. Nupūstuvus 1 išdėstytas ant taršos šaltinio 9 krašto. Priešingoje taršos šaltinio 9 pusėje išdėstytas cilindrinės formos siurbtuvas 10, kuriame pagal liestinę – tangentiškai, per visą jo ilgį suformuotas aerozolių įsiurbimo plyšys 11 ir jis nukreiptas į taršos šaltinį 9. Oro išsiurbimo atvamzdis 12 prie siurbtuvo 10 yra pajungtas jo gale, tangentiškai kaip ir suformuotas įsiurbimo plyšys 11 vienoda kryptimi, bet priešingoje cilindrinės formos siurbtuvo 10 pusėje.

Aktyvinamo aerosolinės taršos nusiurbtuvo veikimas

Suspaustas oro srautas tiekiamas į kolektorių 2. Iš kolektoriaus 2 per skylės 3 oro srautas patenka į užsukimo įtaisus 7 ir 8. Užsuktas oro srautas per atvamzdžius 4 patenka ant sferinės formos atspindėtuvų 5, kurie nukreipia jį pro plyšį 6 virš taršos šaltinio. Dėl priešingų užsukimo krypčių pratekant oro srautui pro užsuktuvus 7 ir 8, ištekančiam pro atvamzdžius 4, formuojasi padidintos turbulencijos srautas, kuris nukreipiamas į atspindėtuvus 5. Atspindėtuvai 5 tarnauja kaip turbulencijos stiprintuvai (besikeičiant statiniam ir dinaminiam slėgiui atspindėtuvo 5 ertmėje) - generuodami tam tikro dažnio pulsacijas, kurios priklauso nuo atstumo l. Padidintos turbulencijos oro srautas, patekęs pro plyšį 6 virš taršos šaltinio 9 suaktyvina skystų dalelių aerozolyje koleasencinį efektą. Dėka šio efekto, dalis skystų dalelių susijungia, stambėja ir nukrenta atgal į skystį, virš kurio paviršiaus jis susiformavo.

Nusiurbiamas oro srautas nuo taršos paviršiaus 9 per plyšį 11 ir cilindrinės formos nusiurbtuvą 10 pašalinamas pro atvamzdį 12.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Aktyvinamas aerzolinės taršos nusiurbtuvas, susidedantis iš siurbtuvo (10), išdėstyto prie taršos šaltinio krašto (9), ir nupūtimo įtaiso korpuso (1), išdėstyto prieš siurbtuvą (10), tarp kurių patalpintas taršos šaltinis (9), b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad nupūtimo įtaiso korpuso (1) patalpintas kolektorius (2) su skylėmis (3), išdėstytais priešinga taršos šaltinio (9) išdėstymo kryptimi, prie kurių sandariai pritvirtinti atvamzdžiai (4), sutampantis su skylėmis (3) kolektoriuje (2), kuriuose sumontuoti srauto užsuktuvai (7, 8), kiekviename atvamzdyje (4) formuojantys užsukamą srautą priešingos krypties negu gretimame atvamzdyje, o prieš visus atvamzdžius (4) išdėstyti sferiniai srauto atspindėtuvai (5) nukreipti link oro ištekJimo plyšio (6), kurio plotis b yra lygus kartotinam poriniam dydžiui l, čia l - atstumas nuo atvamzdžio (4) iki sferinio atspindėtuvo (5) sferos dugno, kuris savo ruožtu lygus 4 h, čia h - tarpelis tarp kolektoriaus (2) ir vidinės nupūtimo įtaiso vienos pusės korpuso (1) sienelės.

2. Aktyvinamas aerzolinės taršos nusiurbtuvas pagal p.1 b e s k i r i a n t i s tuo, kad siurbtuve (10) oro nusiurbimo plyšys (11) suformuotas pagal siurbtuvo (10) cilindrinės korpuso dalies liestinę – tangentiškai, o nusiurbto oro pašalinimo vamzdis (12), prijungtas prie siurbtuvo (10) cilindrinės korpuso dalies irgi tangentiškai, vienoda kryptimi, bet priešingoje cilindro pusėje nei suformuotas nusiurbimo plyšys (11).

LT 5891 B

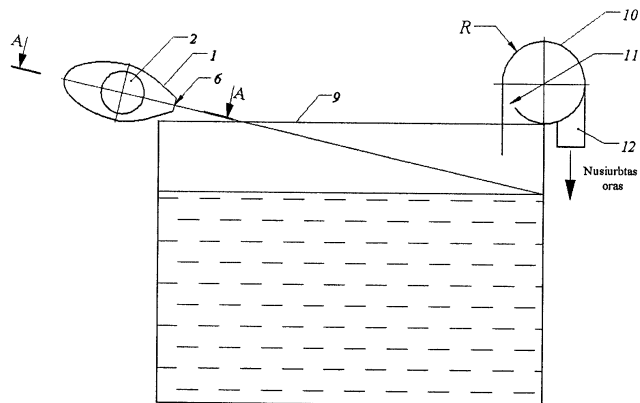


Fig. 1

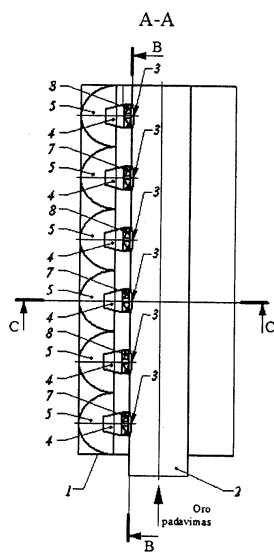


Fig. 2

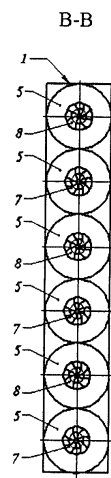


Fig. 3

LT 5891 B

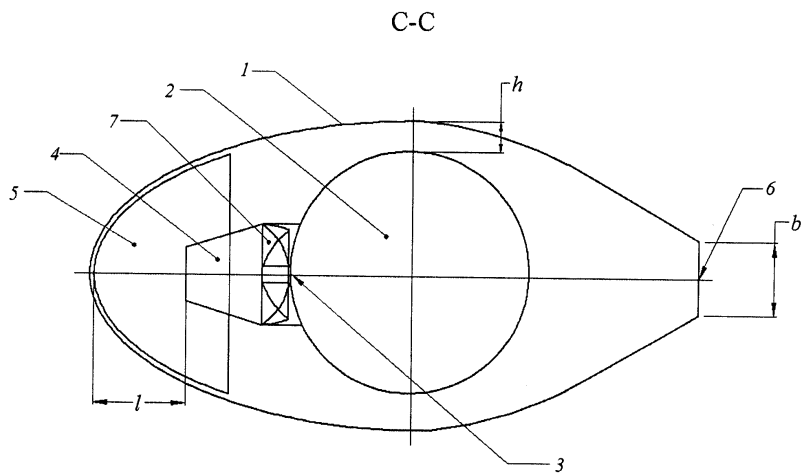
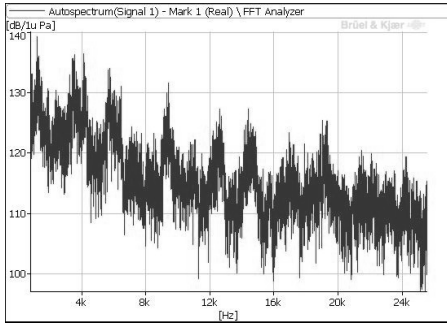
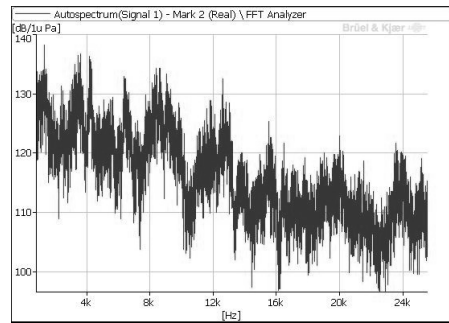


Fig. 4

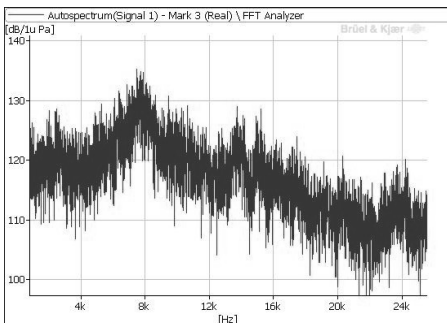
B priedas. Garso slėgio lygio priklausomybių nuo dažnio matavimo rezultatai



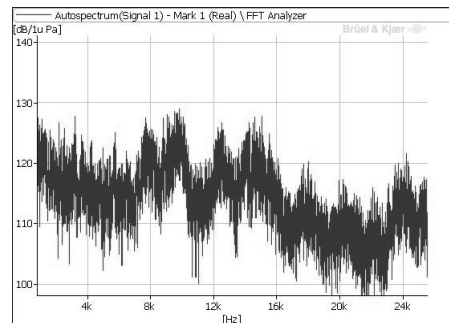
a)



b)



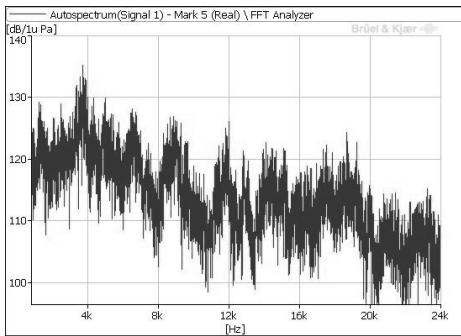
c)



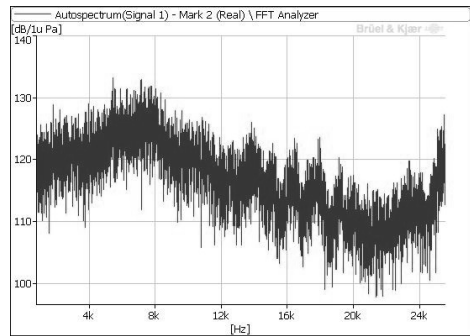
d)

B.1 pav. Garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio, kai rezonatoriaus ilgis 12,7 mm: a) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; b) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; c) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15; d) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15

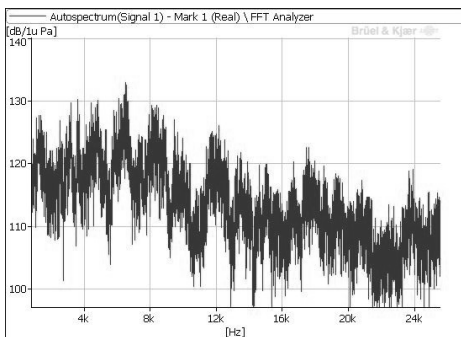
Fig. B.1. Sound pressure level spectrum of acoustic wave generator when effective length of resonator 12,7 mm: a) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; b) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; c) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15; d) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15



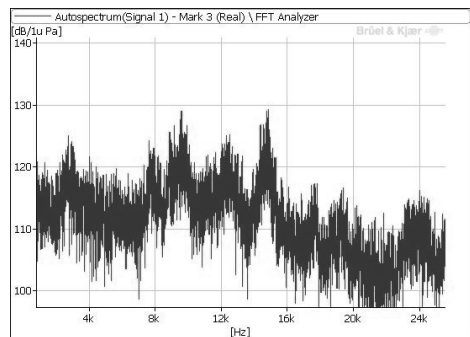
a)



b)



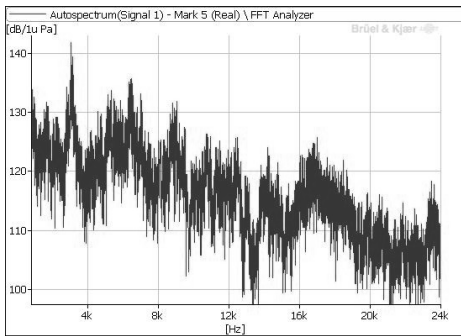
c)



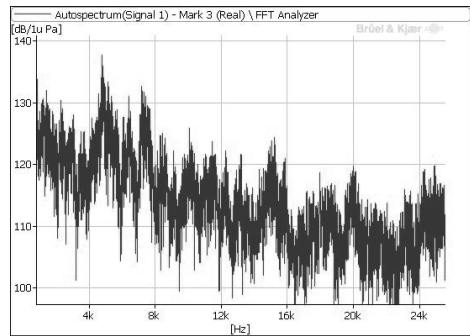
d)

B.2 pav. Garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio, kai rezonatoriaus ilgis 15,7 mm: a) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; b) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; c) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15; d) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15

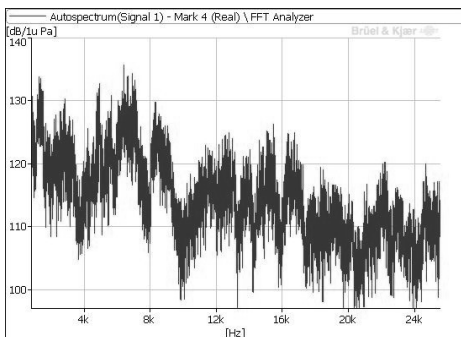
Fig. B.2. Sound pressure level spectrum of acoustic wave generator when effective length of resonator 15,7 mm: a) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; b) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; c) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15; d) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15



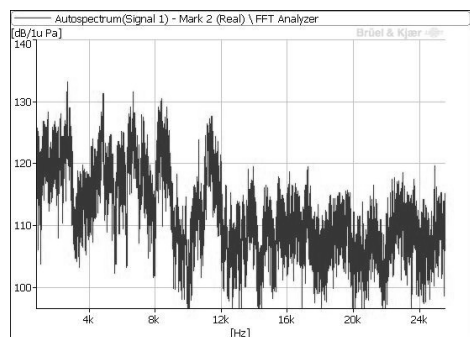
a)



b)



c)

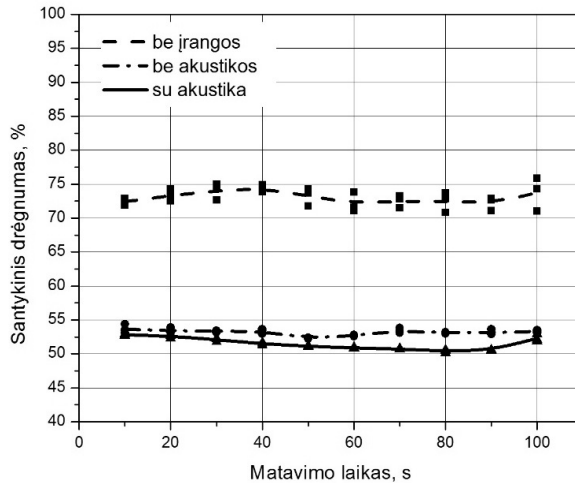


d)

B.3 pav. Garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio, kai rezonatoriaus ilgis 26,6 mm: a) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; b) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 1,66; c) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 2 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15; d) – atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus 10 mm, rezonatoriaus ir tūtos skersmenų santykis 15

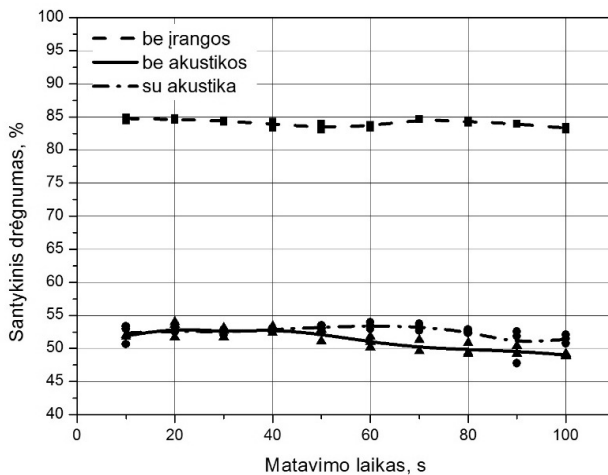
Fig. B.3. Sound pressure level spectrum of acoustic wave generator when effective length of resonator 15,7 mm: a) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; b) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 1,66; c) – stand-off distance was equal 2 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15; d) – stand-off distance was equal 10 mm, ratio of cavity and nozzle diameters was equal 15

C priedas. Šalinamo oro srauto santykinio drėgnumo pokyčio laike matavimo rezultatai



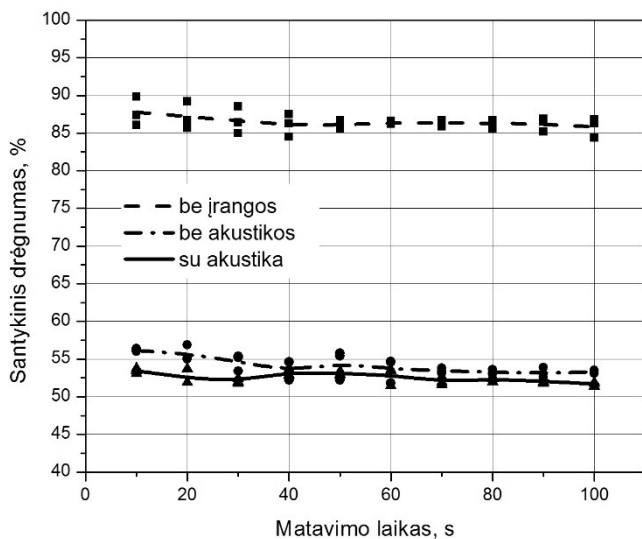
C.1 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 50 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.1. Humidity of air measured from exhauster of 50 °C liquid temperature



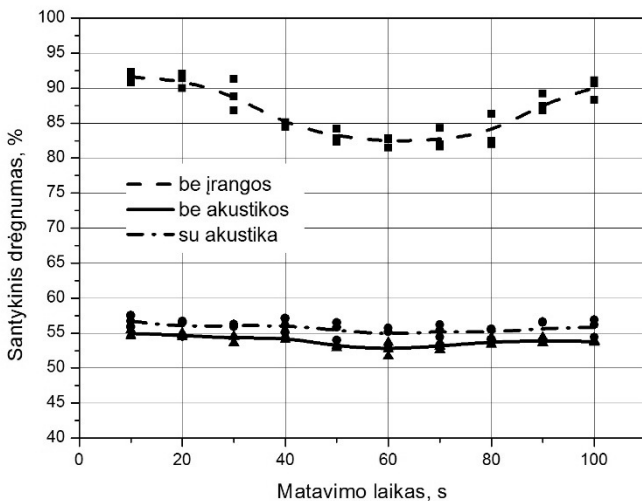
C.2 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 55 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.2. Humidity of air measured from exhauster of 55 °C liquid temperature



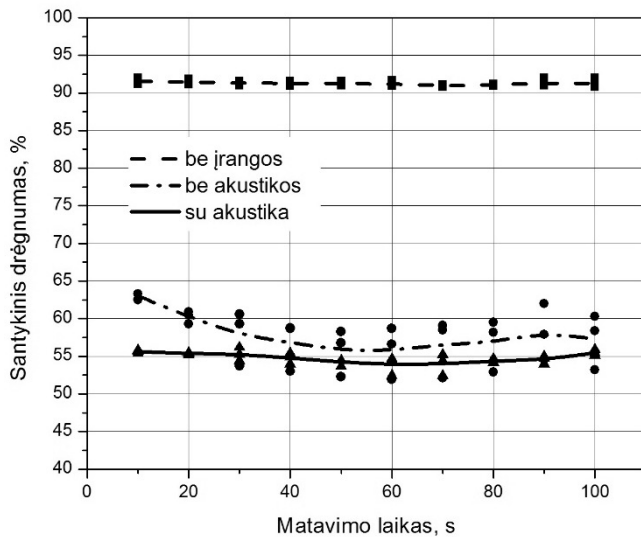
C.3 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 60 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.3. Humidity of air measured from exhauster of 60 °C liquid temperature



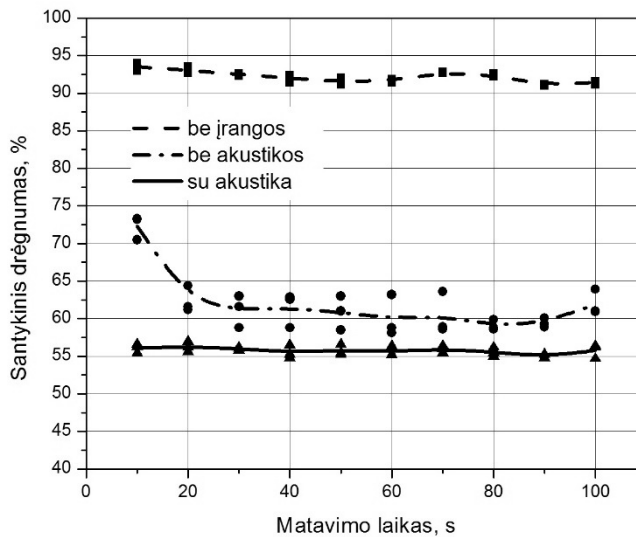
C.4 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 65 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.4. Humidity of air measured from exhauster of 65 °C liquid temperature



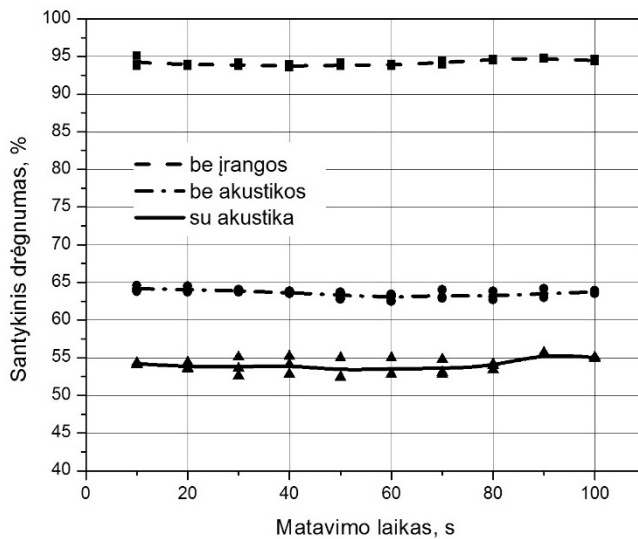
C.5 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 70 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.5. Humidity of air measured from exhauster of 70 °C liquid temperature



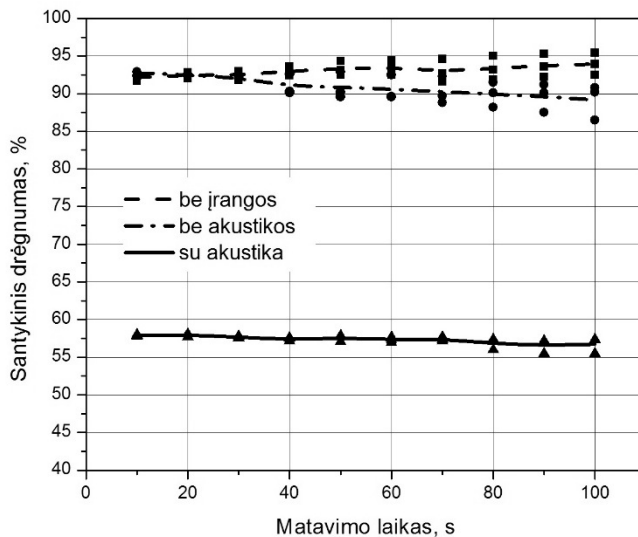
C.6 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 75 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.6. Humidity of air measured from exhauster of 75 °C liquid temperature



C.7 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 80 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.7. Humidity of air measured from exhauster of 80 °C liquid temperature



C.8 pav. Šalinamo oro srauto santykinis drėgnumas esant 85 °C skysčio temperatūrai

Fig. C.8. Humidity of air measured from exhauster of 85 °C liquid temperature

Ina TETSMAN

AEROZOLINĖS TARŠOS SIURBTUVO, AKTYVINAMO
AEROAKUSTINIŲ SRAUTŲ, EFEKTYVUMO TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (09T)

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF AEROSOL POLLUTION
EXHAUSTER UNDER AEROACOUSTIC FLOW

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2013 12 20. 8,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius