

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius OZAROVSKIS

AKUSTINIO CIKLONO TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

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

VG TU leidyklos TECHNIKA 2105-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-422-1

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012

© Darius, Ozarovskis, 2012

d.ozarovskis@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Darius OZAROVSKIS

THE RESEARCH OF ACOUSTIC CYCLONE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

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

Reziümė

Disertacijoje nagrinėjamas oro srauto, užteršto smulkiomis dalelėmis ($0,1 \leq d \leq 10 \mu\text{m}$), vienas iš sausųjų valymo metodų.

Pagrindinis tyrimo objektas yra akustinis ciklonas su antriniu priešpriešiniu oro srautu. Ciklono veikimo principas pagrįstas išcentrine jėga, kuri veikia daleles įsuktame oro sraute. Ciklonai labai plačiai naudojami dėl savo paprastumo, pigumo ir patogios eksploatacijos.

Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti ir ištirti akustinį cikloną. Akustinio ciklono tyrimams buvo naudojami skaitiniai ir eksperimentiniai metodai. Disertacijoje siekiama ištirti ciklono užteršto oro srauto valymo efektyvumą.

Sukurto ciklono taikymo sritis prasiplečia – dalelių, atskiriamų iš oro srauto, matmenų diapazonas padidėja, t. y. galima išvalyti smulkesnes nei $1 \mu\text{m}$ daleles, todėl oro valymo įrenginiuose nereikia montuoti papildomų pluoštinių filtrų.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: dalelių elgsenos akustiniame lauke, jų sąveikos, akustinio lauko šaltinių ir jų panaudojimo analizė; akustinio ciklono koncepcijos teorinis pagrindimas, srautų akustiniame ciklone simuliacija; akustinio ciklono kūrimas ir ciklono eksperimentiniai tyrimai.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai bei priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta dalelių sąveikos akustiniame lauke ir akustinių šaltinių tobulinimo raidos analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašomi akustinių šaltinių kūrimas bei tyrimai.

Trečiajame skyriuje tiriama akustinio lauko parametrų įtaka smulkių dalelių sukibimui.

Ketvirtajame skyriuje pateikti skaitiniai bei eksperimentiniai akustinio ciklono tyrimai ir jų rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti šeši straipsniai: vienas – žurnale, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą, du – Inspec duomenų bazėje cituojamame žurnale, trys – konferencijų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti keturi pranešimai tarptautinėse Lietuvos ir kitų šalių konferencijose. Patentuotas vienas išradimas.

Abstract

The study analyzes one of the dry cleaning method for air flow polluted by ultrafine particles ($0.1 \leq d \leq 10 \text{ nm}$). This method is widely distributed in Lithuania, because the collected dust can be used as secondary raw materials.

The main object of the research is the acoustic cyclone with a secondary opposite air-flow. Cyclone operating principle is based on centrifugal force applied to the particles in the screwed air flow. Due of its simplicity, low cost and ease operation, those kind cyclones is widely used. Therefore, these objects are important in reducing emissions (particulate matter) into the atmosphere from a variety of industries.

The aim of the work is to develop and analyze acoustic cyclone. For designing of acoustic cyclone the special software SolidWorks 2011 SP2.0 Flow Simulation 2011 2.0 Build 1525 was used. And for production – advanced sheet metal processing technology was used. Acoustic cyclone research was done by digital and experimental methods. The dissertation aims to explore the subject of polluted air cleaning efficiency in different sizes and masses of particles in the flow.

The scope of created cyclone extends as particles are separated from the air flow from size up to $1 \text{ }\mu\text{m}$. Therefore, in the air-cleaning devices do not need to install additional fiber filters.

The aim of this thesis is to carry out the review of scientific literature on the employment of acoustic field for interaction of fine particles, to analyze and ground the impact of acoustic field parameters on the adhesion of fine particles, to analyze and to ground the concept of acoustic cyclone, its working principles and simulation of flows theoretically, to design acoustic cyclone based on returning flow principle ant to carry out experimental research with the designed cyclone.

The thesis consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of literature and a list of publications by the author and annex.

The first chapter is dedicated for the literature review. The research of particles' interaction in acoustic field and development of acoustic sources improvement process are provided in this chapter. In the end of the chapter the conclusions are provided and the tasks of the thesis are specified.

In the second chapter the development process and research of acoustic sources are described.

In the third chapter the impact of acoustic field parameters on fine particles' adhesion is analyzed.

In the fourth chapters numerical and experimental research of acoustic cyclone and their results are presented.

Žymėjimas

Simboliai

Δd – slėgio perkritis;
 a – koeficientas dėl trinties įvertinantis tangentinio greičio sumažėjimą;
 B – talpos charakteringas parametras;
 c – garso greitis;
 d – dalelės skersmuo;
 d – kameros skersmuo;
 d – oro ištekėjimo angos skersmuo;
 e – vidinė energija;
 f – dažnis;
 F – jėga;
 f_μ – turbulencijos klampos faktorius;
 g – laisvo kritimo pagreitis;
 h – šiluminė entalpija;
 K – empirinis koeficientas;
 k – turbulencijos kinetinė energija;
 l – rezonansinės kameros gylis;
 Le – Lewis skaičius;
 p – slėgis;
 p_a – aplinkos slėgis;
 p_A – slėgis kameroje;
 P_B – turbulencijos generavimas dėl plūdumo jėgų;
 Pr – Prandtl'o skaičius;
 Q – dujų debitas;
 Q_H – šilumos šaltinis tūrio vienetui;

q_i – difuzinis šilumos srautas;
 q_i – difuzinis šilumos srautas;
 r – atstumas tarp atomų centrų;
 Re_{kr} – kritinis Reynolds skaičius;
 r_j – atstumas tarp dalelių centrų j -oje fazėje;
 r_p – charakteringas atomo spindulys;
 S_i – išorinė masės pasiskirstymo jėga per masės vienetą;
 S_i – i -tojos dalelės poslinkis;
 St – Struchalio skaičius;
 t – laikas;
 U – akustinės bangos plitimo kryptis;
 U – oro srauto akustinio lauko greičio amplitudė;
 u – srauto greitis;
 $U(r)$ – Lenardo – Džonso potencialas;
 U_{rel} – dalelių santykinis greitis;
 v – dujų srauto greitis;
 W – garso galia;
 W_D – akustinio dipolio galia;
 W_K – akustinio kvadrupolio garso galia;
 W_M – akustinio monopolio garso galia;
 δ_{ij} – Kronekerio delta funkcija;
 Δt – laiko pokytis;
 ε – sąveikos energijos parametras;
 ε – turbulencijos disipacija;
 η – įsodinimo faktorius;
 μ – dinaminis klampos koeficientas;
 μ_t – turbulentinio sūkurio klampos koeficientas;
 ρ – oro tankis;
 ρ_p – dalelės tankis;
 τ_{ik} – klampios šlyties įtempimų tenzorius;
 τ_p – dalelės sustojimo laikas;
 ϕ – dalelės būsenos faktorius;
 $\phi(t)$ – fazė laiko atžvilgiu;
 ω – akustinis kampinis dažnis;
 $\omega\tau_p$ – akustinis Stokso skaičius.

Santrumpos

AAG – aerodinaminis akustinis generatorius;
 CPU – procesorius (angl. Central processing unit);
 DEM – diskrečiųjų elementų metodas (angl. Discrete element method);
 FDM – baigtinių skirtumų metodas (angl. Finite difference method);

FEM – baigtinių elementų metodas (angl. Finite element method);
FVM – baigtinių tūrių metodas (angl. Finite volume method);
LDA – Lazerinis Doplerio efektu pagrįstas srautų tyrimo metodas (angl. Laser Doppler Anemometry);
LDV – Lazerinis Doplerio efektu pagrįstas srautų tyrimo metodas (angl. Laser Doppler Velocimetry);
MTV – Lazerinis molekulių žymėjimu pagrįstas srautų tyrimų metodas (angl. Molecular Tagging Velocimeter);
PIV – dalelių judėjimo vaizdu paremtas srautų tyrimo metodas (angl. Particle image velocimetry).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	1
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	3
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra ir apimtis	4
1. AKUSTINIŲ CIKLONŲ APŽVALGA, ULTRASMULKIŲ DALELIŲ ELGSENOS ORO SRAUTE IR AKUSTINIO LAUKO ŠALTINIŲ ANALIZĖ	5
1.1. Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija	5
1.2. Ciklonai su akustiniais generatoriais	6
1.3. Ultrasmulkių dalelių elgsena oro sraute	14
1.4. Akustinio lauko poveikis ultrasmulkioms dalelėms oro sraute	16
1.5. Akustinio lauko šaltinių raidos analizė	20
1.6. Akustinio lauko susidarymas tekant orui	27
1.7. Srautų skaitinio modeliavimo metodai	29

1.8. Užterštų oro srautų tyrimų metodų ir įrangos apžvalga.....	30
1.9. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	34
2. AKUSTINIŲ ŠALTINIŲ PARAMETRŲ TYRIMAI	35
2.1. Akustinio generatoriaus analizė.....	36
2.2. Akustinio lauko susidarymas dėl oro tėkmės sąveikos su kietu objektu	38
2.3. Akustinių generatorių prototipai ir jų tyrimų rezultatai	39
2.4. Antro skyriaus išvados	46
3. AKUSTINIO LAUKO PARAMETRŲ ĮTAKA DALELIŲ AGLOMERACIJAI ORO SRAUTE	47
3.1. Tyrimų standas	47
3.2. Horizontalios akustinės kameros eksperimentiniai tyrimai	49
3.3. Trečio skyriaus išvados	53
4. AKUSTINIO CIKLONO EKSPERIMENTINIAI IR SKAITINIAI TYRIMAI	55
4.1. Procesai vykstantys akustiniame ciklone.....	55
4.2. Oro srautų ciklonuose tyrimų standas.....	56
4.3. Oro srautų akustiniame ciklone eksperimentiniai tyrimai	57
4.4. Akustinio ciklono valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai.....	61
4.5. Skaitiniai tyrimai	66
4.5.1. Skaitiniai modeliai.....	67
4.5.2. Skaitinių tyrimų rezultatai	72
4.6. Ketvirto skyriaus išvados	81
BENDROSIOS IŠVADOS	83
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	85
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	93
PRIEDAS. Akustinio ciklono patentas	95

Contents

INTRODUCTION	1
The Investigated Problem.....	1
Important of the Thesis.....	1
The Object of Research	2
The Goal of the Thesis	2
The Task of the Thesis	2
Research Methodology	3
Importance of Scientific Novelty	3
Practical Significance of Achieved Results.....	3
The Defended Statements.....	3
Approval of the Results	4
The Structure of the Research Paper	4
 1. REVIEW OF ACOUSTIC CYCLONES, ANALYSIS OF BEHAVIOUR OF ULTRAFINE PARTICLES IN AIR FLOW AND SOURCE OF ACOUSTIC FIELD.....	 5
1.1. Classification of Equipment of Air (gases) Treatment	5
1.2. Cyclones with Acoustic Generators.....	6
1.3. Behaviour of Ultrafine Paricles in the Air Flow.....	14
1.4. Influence of Acoustic Field to Ultrafine Particles in the Air Flow	16
1.5. Analysis of Development of Sources of Acoustic Field.....	20
1.6. Formation of Acoustic Field in the Air Flow	27

1.7. Numerical Methods of Flow Modelling	29
1.8. Review of Air Flow Research Methods and Equipment	30
1.9. Conclusions of First Chapter and Formulation of the Task of the Thesis	34
2. THE RESEARCH OF PARAMETERS OF ACOUSTIC SOURCES	35
2.1. Analysis of Acoustic Generator.....	36
2.2. Formation of Acoustic Field due Air Flow Interaction with Solid Object	38
2.3. Prototypes and Test Results of Acoustic Generators.....	39
2.4. Conclusions of Second Chapter.....	46
3. INFLUENCE OF ACOUSTIC FIELD PARAMETERS ON AGGLOMERATION OF PARTICLES IN THE AIR FLOW	47
3.1. The Stand of Research.....	47
3.2. Experimental Studies of Horizontal Acoustic Chamber.....	49
3.3. Conclusions of Third Chapter.....	53
4. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF ACOUSTIC CYCLONE	55
4.1. Processes within acoustic cyclon.....	55
4.2. Research Stand of Air Flows in Cyclones	56
4.3. Experimental Studies of Air Flow Processes in Acoustic Cyclones.....	57
4.4. The Experimental Studies of Acoustic Cyclone Efficiency	61
4.5. Numerical Studies	66
4.5.1. Numerical models.....	67
4.5.2. Results of Numerical Studies	72
4.6. Conclusions of Fourth Chapter.....	81
GENERAL CONCLUSIONS	83
REFERENCES	85
LIST OF THE AUTHOR SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	93
ANNEX. Patent of Acoustic cyclone.....	95

Ivadas

Problemos formulavimas

Mokslo ir technikos plėtra yra susijusi su neigiama įtaka aplinkai: didėja atliekų kiekis, sunaudojama daugiau išteklių, labiau teršiama aplinka. Gamybos medžiagos perdirbamos, deginamos ir atliekų pavidalu vėl patenka į aplinką.

Perdirbant žaliavas, gaminant pusfabrikačius ir galutinius produktus, smulkinant žaliavas (akmens anglį, rūdą ir pan.), deginant iškastinį kurą, pramonėje susidaro dulkės – smulkiadispersinės kietosios dalelės, pakibusios ore. Išmetamosios pramoninės dujos, užterštos dulkėmis, turi būti valomos. Šių operacijų metu susiformavusių dulkes sudarančių dalelių dydis būna nuo 0,01 μm . Kuo mažesnės dalelės, tuo sudėtingiau jas atskirti iš valomo oro srauto. Reikia atkreipti dėmesį, kad ciklonai daleles, kurių dydis yra mažesnis kaip 20 μm , sulaiko neefektyviai. Metodai tokio dydžio dalelėms atskirti yra brangūs, jų eksploatacija ir priežiūra sudėtinga (Striška, 2001).

Darbo aktualumas

Daugėjant gyventojų žemėje, plečiantis urbanizacijos plotams, didėjant pramonės mastams, kyla ir gyvenimo kokybė. Kartu senka ir brangsta žemės

resursai, mažėja žmogaus nepalietų gamtos plotų, nyksta floros, faunos įvairovė. Taigi, aplinkos apsaugos klausimai darosi vis aktualesni. Griežtėja aplinkos apsaugos reikalavimai: pasaulio valstybės įsipareigoja mažinti teršalų emisiją į aplinką, neekologiškos technologijos uždraudžiamos. Todėl būtina ieškoti naujų aplinkos neteršiančių technologinių procesų arba efektyvių valymo metodų.

Šiais globalizacijos laikais konkurencinė aplinka yra ypač stipri. Norint išlikti, reikia teikti paslaugas arba gaminti produktą ne tik paklausų ir kokybišką, bet ir konkurencingą kainos atžvilgiu. Taigi, visas produkto technologinis procesas turi būti racionalus, o poveikis aplinkai – minimalus. Taršos mokesčiai yra dideli ir vis auga, o efektyvūs pramoniniai technologiniai valymo įrenginiai yra labai brangūs. Tai didina gaminamo produkto savikainą, mažina konkurencingumą. Tad būtina ieškoti efektyvių, bet nebrangių valymo metodų ir įrenginių.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – akustinis ciklonas ir procesai vykstantys jame.

Darbo tikslas

Ištirti akustinį cikloną ir suformuluoti jo tyrimo metodiką.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apžvalgą apie ciklonuose naudojamo akustinio lauko poveikį smulkių dalelių aglomeracijai.
2. Išanalizuoti ir pagrįsti akustinio lauko parametrų įtaką smulkių dalelių sukibimui ciklono srautuose.
3. Išanalizuoti ir teoriškai bei eksperimentiškai pagrįsti procesus, vykstančius akustiniame ciklone.
4. Sukurti akustinio ciklono prototipą, pagrįstą grįžtamojo srauto principu.
5. Atlikti sukurto akustinio ciklono eksperimentinius tyrimus.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi skaitiniai ir eksperimentiniai metodai. Skaitiniai tyrimai atlikti baigtinių elementų metodu paremta programine įranga „SolidWorks 2011 SP2.0 Flow Simulation 2011 2.0. Build 1525“. Atlikti aerodinaminių akustinių generatorių skleidžiamų akustinių laukų matavimai. Pagal sukurtą metodiką nustatytas akustinio lauko parametrų poveikis dalelėms oro sraute ir eksperimentiškai ištirtas naujai sukurtas akustinio ciklono prototipas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas eksperimentinis akustinio lauko parametrų poveikio smulkioms dalelėms ciklono oro sraute tyrimo metodas.
2. Pasiūlyta metodika, leidžianti formuoti antrinį srautą ciklone.
3. Nustatyta pirminio ir antrinio srautų santykinų parametrų įtaka akustinio ciklono efektyvumui.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Taikant akustinį cikloną, labai supaprastinamas smulkių dalelių valymo procesas, jis tampa pigesnis, užima mažiau laiko ir darbo sąnaudų, lyginant su kitais šiuo metu taikomais būdais. Akustinis ciklonas gali būti naudojamas įvairių apdirbamosios pramonės technologinių procesų metu.

Ginamieji teiginiai

1. Pateikas smulkių dalelių nusodinimo būdas, pagrįstas antrinio srauto formavimu akustiniame ciklone, padidina įrenginio valymo efektyvumą.
2. Sukurta metodika, leidžia įvertinti akustinio lauko parametrų poveikį smulkioms dalelėms oro sraute.
3. Apjungus tradicinius sausuosius ir akustinės dalelių aglomeracijos oro valymo metodus akustinis ciklonas gali išvalyti platesnio dydžių diapazono daleles.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti šeši moksliniai straipsniai: vienas – žurnale, įtraukta į Thomson ISI sąrašą (Ozarovskis 2012), du – Inspec duomenų bazėje cituojamame žurnale (Ozarovskis 2011), trys – konferencijų medžiagoje (Ozarovskis, 2009, 2010, 2011).

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

- Tarptautinėje konferencijoje „*Mechanika*“ 2009–2010 m. Kaune;
- 7-oje tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials (MSM)*“ 2011 m. Kaune;
- 15-oje tarptautinėje „Research/Expert“ konferencijoje „*Trends in the Development of Machinery and Associated Technology (TMT)*“ 2011 m. Prahoje.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros ir autoriaus publikacijų sąrašai. Disertacijos apimtis – 94 puslapiai neskaitant priedo, 33 numeruotos formulės, 60 iliustracijų ir 7 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 110 literatūros šaltinių.

Akustinių ciklonų apžvalga, ultrasmulkių dalelių elgsenos oro sraute ir akustinio lauko šaltinių analizė

Skyriuje nagrinėjami oro (dujų) valymo įrenginiai, jų klasifikacija, taikymo sritys. Apžvelgiami ciklonai su akustiniais generatoriais, jų privalumai ir trūkumai. Remiantis literatūros šaltiniais, pateikta ultrasmulkių dalelių ($0,1 \mu\text{m} \leq d \leq 10 \mu\text{m}$) elgsena oro sraute, jų tarpusavio sąveika. Plačiau išnagrinėtas akustinio lauko poveikis ultrasmulkioms dalelėms oro sraute. Apžvelgtas akustinio lauko susidarymas tekant oro srautui. Pateikta akustinių šaltinių klasifikacija, raidos analizė ir veikimo principai.

1.1. Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija

Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija pagal dulkių atskyrimo iš oro srauto būdą pateikta 1.1 paveiksle. Įrenginiai skirstomi į sausuosius, šlapiuosius, elektrofiltrus ir sorbcinius. Sausuoju metodu dulkės atskiriamos iš užteršto oro

srauto ir nusodinamos ant sauso paviršiaus. Šlapiuoju metodu dulkės atskiriamos ir nusodinamos naudojant skysčius.



1.1 pav. Oro (dujų) valymo įrenginių klasifikacija (Vatin, Strelec, 2003)

Fig. 1.1. Classification of equipment of air (gases) treatment
(Vatin, Strelec, 2003)

Oro (dujų) valymo įrenginiai pagal jų veikimo principą gali būti skirstomi į gravitacinius, inercinius, filtrinius ir elektrinius. Darbe plačiau nagrinėjami įrenginiai priskirti sausiesiems mechaniniams išcentriniais oro (dujų) valymo įrenginiams.

1.2. Ciklonai su akustiniais generatoriais

Ciklonas (gr. *kyklon* – besisukantis) priklauso sausiesiems pirminio oro valymo metodams ir gali būti naudojamas įvairiose pramonės šakose: tekstilės, chemijos bei medžio apdirbimo srityse, taip pat energetikos sistemos objektuose. Pirmas ciklonas buvo suprojektuotas, pagamintas ir patentuotas 1886 m. S. M. Morze. Tai vienas iš seniausių įrenginių, naudojamų dalelėms sulaikyti. Jo veikimo principas pagrįstas išcentrine jėga, kuria veikiamos dalelės įsuktame oro sraute nubloškiamos į ciklono sienelės. Tačiau mažiausios ir lengviausios dalelės lieka oro srauto sūkuriu centre ir negali būti atskirtos nuo oro srauto (Hamakawa *et al.*, 2011).

Sausieji mechaniniai oro valymo įrenginiai, kuriems priskiriami ir ciklonai, skirti pradiniam oro valymui, kai srautas išvalomas nuo 15–20 μm ir didesnių dalelių (Vatin, Strelec, 2003). Minėti valymo įrenginiai plačiai paplitę, nes surinktas dulkes galima panaudoti kaip antrines žaliavas (Khmelev, 2009), ir dėl savo paprastumo, pigumo bei patogios eksploatacijos plačiai naudojami įvairiose apdirbamosios pramonės šakose.

Mažiausioms dalelėms atskirti iš valomų dujų naudojami audekliniai oro filtrai. Jie naudojami tose srityse, kuriose keliami aukšti oro kokybės reikalavimai, ypač pastatų ventiliacijai ir itin švaraus oro reikalaujančiuose technologiniuose procesuose. Tokie filtrai yra vieni iš efektyviausių. Jų valymo efektyvumas gali siekti daugiau kaip 99 proc. Tačiau tokiems filtrams būtina reguliari priežiūra – eksploatacijos metu jie greitai užsikemša ir dėl to filtravimo sistemose kyla hidraulinis pasipriešinimas (Konno, Murakami, 1959).

Taigi, remiantis paminėtais faktais, galima daryti išvadą, kad klasikiniai oro valymo būdai netenkina griežtų aplinkosauginių reikalavimų ir šių dienų aktualijų. Todėl būtina sukurti šiuolaikinius dujų valymo įrenginius, gebančius atskirti ultrasmulkias dispersiškas daleles iš valomo oro srauto, o išvalytą orą saugiai pašalinti į atmosferą.

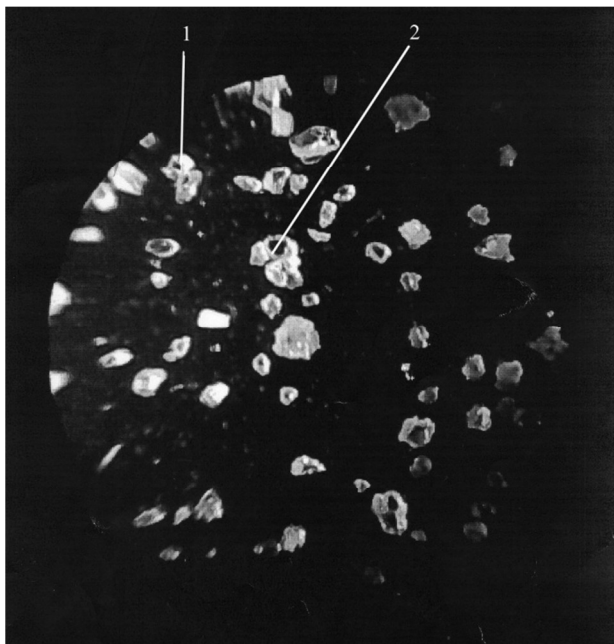
Vienas iš būdų padidinti oro valymo įrenginių efektyvumą yra smulkesnių dalelių sustambinimas. Be elektrinio, gravitacinio, šiluminio dalelių sustambinimo būdų, yra labai efektyvus akustinis būdas, t. y. valomą oro srautą galima paveikti akustiniu lauku (Khmelev, 2009).

Šis būdas vadinamas akustine aglomeracija. Akustinė aglomeracija – tai procesas, kurio metu aukšto intensyvumo garso bangos sukelia santykinį pakibusių dalelių dujų aplinkoje tarpusavio judėjimą. Šis judėjimas daro įtaką dalelių susidūrimui, kurio metu jos sukimba ir suformuoja stambesnes struktūras, dar kitaip vadinamas aglomeratais, šie savo ruožtu toliau jungiasi tarpusavyje ir dar labiau stambėja. Dažniausiai dalelių, kurių dydis mažesnis kaip 1–5 μm , akustinės aglomeracijos metu naudojamas 140–160 dB garso slėgis, Reinoldso skaičius – mažesnis kaip 0,1–0,5 (Černov, 2004).

Per trumpą 1 s laikotarpį dėl akustinės aglomeracijos dalelės sustambėja iki tokio dydžio, kokį gali sugaudyti tradiciniai oro valymo įrenginiai (Hoffmann, 2000).

Akustinis smulkių dalelių sustambinimas turi neginčijamų privalumų lyginant su kitais dalelių aglomeracijos būdais (Rozenberg, 1969):

- galimybė nusodinti smulkiadispersinius aerozolius;
- gali būti taikomas agresyvioms dujoms valyti;
- galimybė dirbti esant aukštam slėgiui ir temperatūrai;
- energetiškai efektyvus;
- aukšto efektyvumo valymo procesas;
- nedidelės laiko sąnaudos.



1.2 pav. Kvarcinio smėlio dalelių agregacija, sukelta akustinio lauko poveikio:

1 – dviejų dalelių agregacija, 2 – trijų dalelių agregacija (Vekteris *et al.*, 2012)

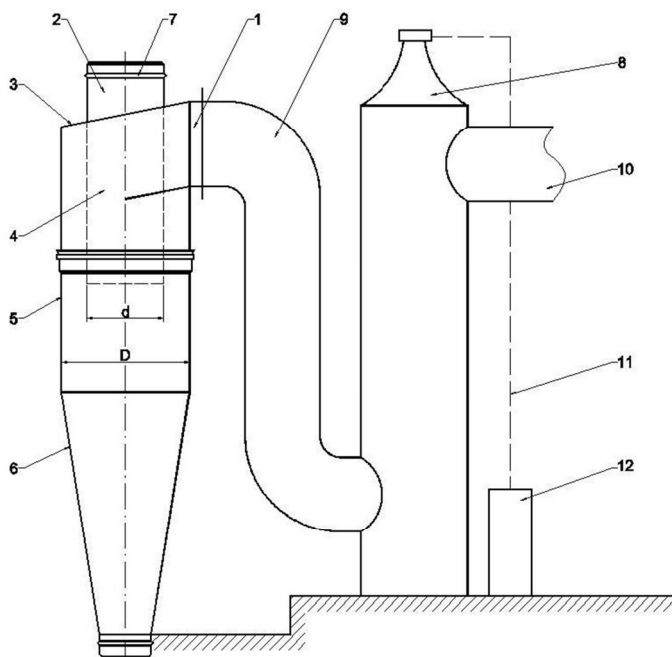
Fig. 1.2. Aggregation of particles of sand caused by impact of acoustic field:

1 – aggregation of two particles, 2 – aggregation of three particles (Vekteris *et al.*, 2012)

Kvarcinio smėlio aglomeracija oro sraute, sukelta akustinio lauko poveikio pavaizduota 1.2 paveiksle. Smulkios dalelės paveiktos akustine banga sukimba tarpusavyje. Dviejų ir trijų dalelių aglomeracija pateikta atitinkamai 1 ir 2 pozicijose.

Sujungę tradicinius sausuosius oro valymo metodus su akustine dalelių aglomeracija galime praplėsti valymo efektyvumą ir valymo diapazoną dalelių dydžio atžvilgiu.

Ciklonas su atskira akustine kolonėle (Kočetov *et al.*, 2006) pavaizduotas 1.3 paveiksle. Cikloną sudaro užteršto oro tiekimo vamzdis (1) ir išvalyto oro išmetimo vamzdis (2), sraigto formos dangtis (3), išmetimo vamzdis (4), cilindrinė korpuso dalis (5), kūginė korpuso dalis (6) ir filtras (7). Tiekimo vamzdis (1) sujungtas su akustine kolona (8) ortakiu (9). Užterštas oras į akustinę kamerą (8) tiekiamas ortakiu (10). Viršutinėje akustinės kolonos (8) dalyje sumontuotas akustinis generatorius, jis sujungtas kabeliu (11) su akustinio generatoriaus valdymo bloku (12).



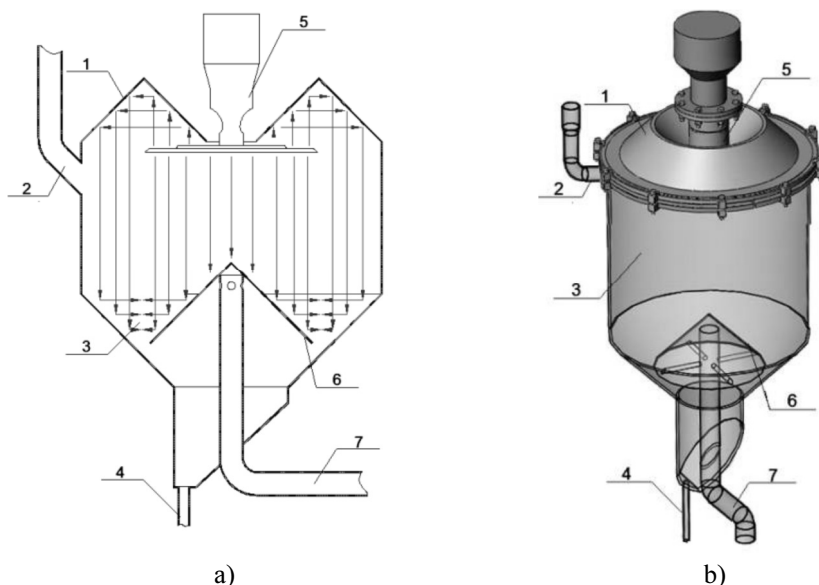
1.3 pav. Ciklonas su akustine kolonėle: 1 – užteršto oro srauto tiekimo vamzdis, 2 – išvalyto oro srauto vamzdis, 3 – sraigto formos dangtis, 4 – išmetimo vamzdis, 5 – cilindrinė ciklono dalis, 6 – kūginė ciklono dalis, 7 – filtras, 8 – akustinė kolonėlė, 9 – ortakis, 10 – ortakis, 11 – kabelis, 12 – valdymo blokas (Savelevič *et al.*, 2006)
Fig. 1.3. Cyclone with acoustic column: 1 – polluted air flow inlet pipe, 2 – cleaned air flow outlet pipe, 3 – screw shape cover, 4 – outlet pipe, 5 – cylindrical part of body, 6 – conical part of body, 7 – filter, 8 – acoustic column, 9 – pipe, 10 – cable, 12 – control unit (Savelevič *et al.*, 2006)

Tokiame įrenginyje užterštas oro srautas tiekiamas į akustinę koloną (8) ortakiu (10). Akustinio lauko parametrai nustatomi valdymo bloku (12). Akustinėje kolonoje (8) vyksta smulkių dalelių atskyrimas iš oro srauto dėl akustinio lauko poveikio dalelėms. Akustinis generatorius sukelia virpesius. Dalelės, esančios oro sraute, veikiamos akustinėmis bangomis, taip pat pradeda virpėti ir susiduria bei sulimpa viena su kita. Tokiu būdu vyksta dalelių agregacija ir sustambėjusios bei pasunkėjusios dalelės nusėda apatinėje akustinės kolonos (8) dalyje. Iš apatinės akustinės kolonos dalies užterštas oro srautas toliau ortakiu (9) tiekiamas į cikloną antriam valymui. Ciklone srautas užsukamas ir sraigtu juda žemyn. Dalelės, veikiamos išcentrinio jėgų, juda nuo centro link sienelių. Atsitrenkusios į sienelę praranda kinetinę energiją ir sienele krinta žemyn link ciklono kūginės dalies (6), kur bus surinktos. Išvalytas oro

srautas išeina per išėjimo vamzdį (2). Smulčiausios dalelės, kurios nebuvo atskirtos iš oro srauto, sugaunamos filtru (7). Tuo pačiu metu vyksta vibroakustinių virpesių slopinimas, kadangi filtras (7) tarnauja ir kaip aerodinaminis akustinio triukšmo slopintuvas.

Tokie įrenginiai yra didelių gabaritų ir reikalauja specialios priežiūros. Be to, akustinė kolonėlė neužtikrina užteršto oro srauto sudėtingo judėjimo ir akustinis laukas panaudojamas neefektyviai.

Ciklonas su integruotu ultragarsiniu šaltiniu (Khmelev, 2009). Siekiant padidinti tradicinio ciklono valymo efektyvumą buvo panaudotas pjezoelektrinis ultragarsinis šaltinis (1.4 pav.).



1.4 pav. Ciklonas su ultragarsiniu šaltiniu: a) principinė schema, b) bendras vaizdas. 1 – viršutinis reflektorius, 2 – įėjimo vamzdis, 3 – ciklono korpusas, 4 – nuvedimas į bunkerį, 5 – pjezoelektrinis ultragarsinis šaltinis, 6 – apatinis reflektorius, 7 – išėjimo vamzdis (Khmelev, 2009)

Fig. 1.4. Acoustic cyclone with ultrasonic generator: a) principled scheme, b) overall view. 1 – upper reflector, 2 – inlet pipe, 3 – body, 4 – outlet pipe to bunker, 5 – piezoelectric ultrasonic generator, 6 – lower reflector, 7 – outlet pipe (Khmelev, 2009)

Eksperimentinių tyrimų rezultatais buvo nustatyta, kad ultragarsinio šaltinio įtraukimas į ciklono konstrukciją užtikrina ciklono valymo efektyvumo padidinimą iki 99,5 proc. ir oro išvalymą nuo dalelių, kurių dydis – 0,01–1 μm . Be to, tokių oro valymo sistemų ženkliu privalumu laikoma galimybė jas

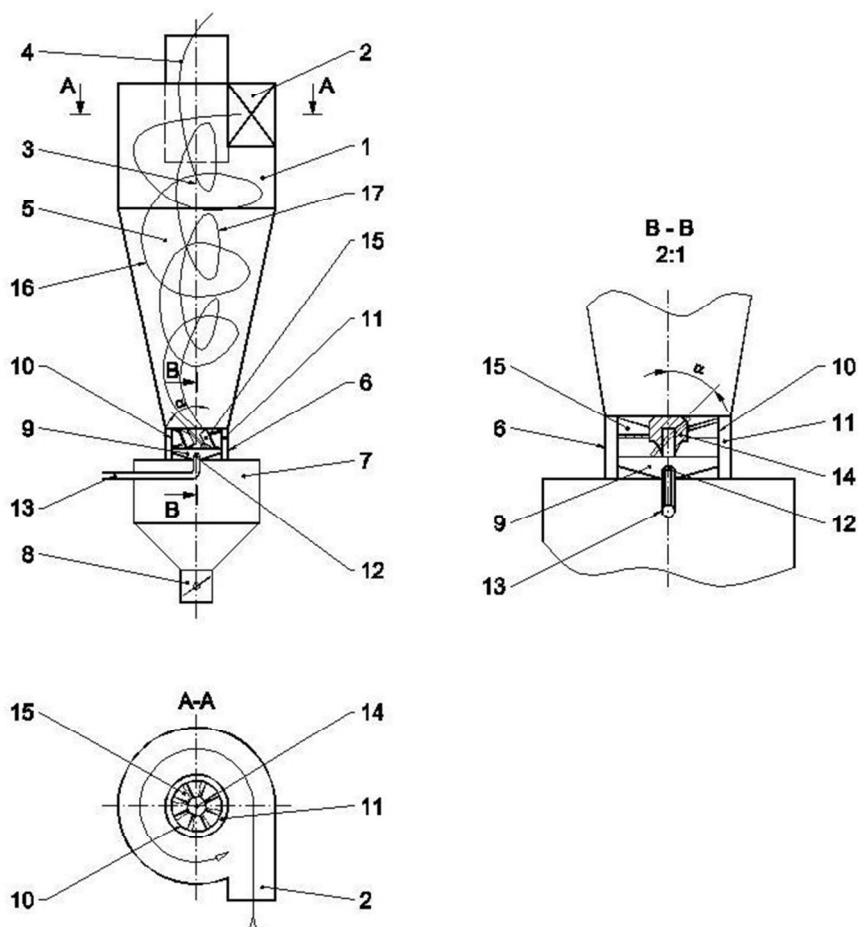
eksploatuoti agresyviose aplinkose, esant aukštam slėgiui ir temperatūrai (Khmelev, 2009).

Tokios sistemos negali būti realiai naudojamos pramonėje, kadangi yra sudėtinga naudoti ultragarso lauką dideliuose ventiliacijos sistemos kanaluose. Be to, ultragarsinio šaltinio valdymo sistemos yra sudėtingos (Hamakawa *et al.*, 2011).

Apžvelgus pirmiau paminėtus valymo įrenginius prieinama išvada, kad tikslinga sukurti kompaktišką, paprastos konstrukcijos ir nesudėtingos eksploatacijos akustinį cikloną.

Antrinis ciklonas su antriniu priešpriešiniu srautu (Vekteris *et al.*, 2012). Akustinio ciklono tikslas – padidinti išvalymo efektyvumą, sumažinti energijos užterštam orui valyti sąnaudas. Šis tikslas yra pasiekiamas išdėstant akustinį generatorių ciklono korpuso kūginės dalies viduje, siauriausioje jos vietoje, o ant akustinio generatoriaus atspindėtuvo pritvirtinant plokšteles, pasvirusias ciklono ašies atžvilgiu kampų α , kurio viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio tangentiniam įvedimui į ciklono cilindrinę korpuso dalį.

Akustinį cikloną su antriniu priešpriešiniu srautu (1.5 pav.) (Vekteris *et al.*, 2011) sudaro cilindrinis korpusas (1), prie kurio šoninės sienelės tangentiškai prijungtas užteršto oro tiekimo vamzdis (2), o per korpuso (1) simetrijos ašį (3) į viršų išvestas išvalyto oro išleidimo vamzdis (4). Prie apatinės cilindrinio korpuso (1) dalies prijungta kūginė korpuso dalis (5), siaurėjanti žemyn nuo cilindrinės korpuso (1) dalies. Siauriausia kūginio korpuso dalis (6) hermetiškai sujungta su taršos surinkimo talpa (7), kurios dugne įrengta sklendė (8) susikaupusiai taršai pašalinti. Akustinis generatorius (9) patalpintas siauriausioje kūginio korpuso dalyje (6) per centrinę simetrijos ašį (3). Akustinio generatoriaus (9) įvorės (10) išorinis skersmuo mažesnis už kūginės korpuso dalies (6) vidinį skersmenį ir tarp jų susidaro tarpelis (11). Įvorės (10) dugne pritvirtinta srauto formavimo tūta (12), sujungta su suslėgto oro tiekimo vamzdžiu (13). Virš tūtos (12) įvorės (10) vidinėje zonoje įtvirtintas atspindėtuvas (14), prie kurio išorinių sienelių kampų α centrinės ciklono ašies (3) atžvilgiu pritvirtintos plokštelės (15). Kampų α viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio (2) tangentiniam įvedimui į cilindrinę korpuso (1) dalį. Ciklone susidaro du oro srautai – pirminis (16) ir antrinis (17).



1.5 pav. Akustinis ciklonas (Vekteris *et al.*, 2012)

Fig. 1.5. Acoustic cyclone (Vekteris *et al.*, 2012)

Akustinio ciklono veikimo principas. Valomas oro srautas pro užteršto oro tiekimo vamzdį (2) tangentiškai patenka į cilindrinę korpuso dalį (1). Dėl tangentiško oro srauto tiekimo cilindrinėje korpuso dalyje (1) oro srautas pradeda sukis apie ciklono simetrijos ašį (3). Kietosios dalelės, esančios sraute, besisukdamos kartu su oro srautu, veikiamos išcentrinės jėgos, pradeda judėti radialine kryptimi link cilindrinio korpuso (1) vidinės sienelės. Užsuktas srautas (16) spirale juda žemyn link siauriausios kūginės dalies (6). Stambesnio frakciškumo kietosios dalelės palei vidinę korpuso sienelę kartu su srautu (15) juda žemyn link siauriausios kūginės dalies (6) ir pro tarpelį (11) patenka į teršalų surinkimo talpą (7). Dėl dinaminio ir statinio slėgio pokyčių sraute (16)

prie tarpelio (11) bei dalies iš srauto (16) atskirtų dalelių, kurios patenka į teršalų surinkimo talpą (7), srautas, pakeitęs sukimosi kryptį, pradeda kilti į viršų. Tokiu būdu susiformuoja antrinis srautas (17), jis nešasi ir dalį mažesnio frakciškumo dalelių, kurios nespėjo atsiskirti nuo pagrindinio srauto siauriausioje kūginėje dalyje (6) ir pro tarpelį (11) patekti į taršos surinkimo talpą (7). Papildomai į antrinį srautą (17) vamzdeliu (13) yra tiekiamas suslėgtas oras. Jis vamzdeliu (13) patenka į tūtą (10), iš jos nukreipiamas į atspindėtuvą (14). Atspindėjęs oro srautas su sužadinta aukšto dažnio pulsacija (srauto pulsacija generuojama Hartmano generatoriaus principu) yra nukreipiamas į plokšteles (15), kurios dėl jų posvyrio kampo α užsuka per jas einantį pulsuojančią srautą. Pulsuojančio srauto užsukimo kryptis sutampa su antrinio srauto (17) sukimosi kryptimi, tačiau yra priešinga pirminio srauto sukimosi kryptčiai. Dėl papildomo oro srauto, kuris sustiprina antrinio srauto (17) sukimosi intensyvumą, neatskirtos nuo pirminio srauto (16) kietosios dalelės, veikiamos išcentrinės jėgos, grąžinamos atgal į pirminį srautą. Sraute aukšto dažnio pulsacija sukelia mažo dispersiškumo dalių akustinę koaguliaciją, jos sustambėja ir besisukdamos antriniame sraute (17) yra efektyviau grąžinamos į pirminį srautą, iš kurio pro tarpelį (11) patenka į taršos surinkimo talpą (7). Išvalytas antrinis srautas (17) pro išvalyto oro išleidimo vamzdį (2) patenka į aplinką arba nukreipiamas toliau apdoroti, priklausomai nuo pasirinkto valymo proceso technologijos.

Akustinio generatoriaus (9) patalpinimas siauriausioje kūginio korpuso dalyje (6) jo simetrijos ašyje (3) leidžia padidinti akustinio lauko poveikio efektyvumą mažesnio dispersiškumo dalelėms, kurios liko neatskirtos nuo pirminio srauto (16), sumažinant trukmę tarp dalelių poveikio akustiniu lauku ir atskyrimo iš oro srauto. Tai leidžia sumažinti akustinio lauko intensyvumą, energijos jam formuoti sąnaudas. Be to, mažesnė kietųjų dalelių koncentracija antriniame sraute (17) mažiau slopina akustinį lauką, dėl to pailginamas jo poveikio kietosioms dalelėms laikas, o tai sudaro palankesnes sąlygas efektyvesnei akustinei koaguliacijai. Tai leidžia atsisakyti papildomo oro valymo elektrostatiniais filtrais, plautuvais ir t. t. Akustinio generatoriaus (9) patalpinimas ciklono viduje sumažina oro valymo įrenginių užimamą plotą, sumažėja slėgio nuostoliai dėl vietinių ir kelio kliūčių, o tai mažina energijos užterštam orui valyti sąnaudas.

Akustinis ciklonas skiriasi tuo, kad akustinis generatorius (9) sumontuotas ciklono korpuso kūginės dalies (5) viduje, siauriausioje jos vietoje (6), centrinėje simetrijos ašyje (3). Kitas skirtumas tas, kad ant akustinio generatoriaus (9) atspindėtuvo (14) išorinio korpuso dalies pritvirtintų plokštelių (15) viršūnės pasvirusios ciklono korpuso simetrijos ašies (3) atžvilgiu kampu α , kurio viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio (2) tangentiniam įvedimui į cilindrinę korpuso (1) dalį.

Prieš atliekant akustinio ciklono esant antriniam priešpriešiniam srautui projektavimo ir modeliavimo darbus būtina išanalizuoti ultrasmulkių dalelių tarpusavio sąveiką bei įvertinti akustinio lauko poveikio dalelių sąveikai reikšmę.

1.3. Ultrasmulkių dalelių elgsena oro sraute

Ultrasmulkių dalelių srauto charakteristika labai skiriasi nuo stambių, neadhezinių dalelių srauto. Ultrasmulkių dalelių tarpusavio sąveikos jėgos yra daug didesnės už gravitacijos ar inercijos jėgas. Dalelės, varomos hidrodinaminių ar Brouno judesių, susiduria ir dėl sąveikos jėgų sukimba bei formuoja stambesnius aglomeratus (Li, 2011).

Remiantis Nicholso apibrėžtimi (Nichols *et al.*, 2002), pirminės ultrasmulkios dalelės laisvai judėdamos ir susidurdamos tarpusavyje sukimba, veikiamos silpnų adhezijos jėgų, pvz., van der Waalso arba elektrostatinė. Toliau dalelės, veikiamos jėgų, jungiasi tarpusavyje formuodamos standžius aglomeratus, juose susijungia tvirtais kovalentiniais, joniniais, metaliniais ar kitais ryšiais (Grass *et al.*, 2006, Teleki *et al.*, 2008).

Dviejų dalelių adhezija kontakto metu pagal Kinlochą skirstoma į šešias rūšis (Kinloch, 1987): *dispersinė adhezija* atsiranda dėl van der Waalso tarpmolekulinės traukos kontaktinėje zonoje; *elektrostatinė adhezija* – dėl įkrautų arba poliarizuotų dalelių; *difuzinė adhezija* – dėl dalelių atomų ar molekulių difuzijos tarp dalelių; *cheminė adhezija* – dėl dviejų dalelių atomų mainų (joniniai ryšiai) arba išorinių elektronų dalinimosi (kovalentiniai ryšiai); *vandenilinių ryšių adhezija* – dėl silpnų ryšių formavimosi, kai dviejų dalelių deguonies, azoto ar fluoro atomai dalinasi vandenilio branduoliais; *mechaninė adhezija* atsiranda, kai adhezinės medžiagos užpildo dalelės paviršiuje esančias tuštumas (kraterius) ar poras ir tokiu būdu mechaniškai sukimba (Li, 2011).

Be pirmiau paminėtų šešių adhezijos rūšių, yra pastebėtos ir specifinės adhezijos rūšys: *skysta-tiltinė adhezija*, kuri pasireiškia dėl dviejų dalelių, dujose susijusių kapiliarinėmis jėgomis (Ennis *et al.*, 1990). *Sąveikos adhezija* atsiranda, kai dvi dalelės yra susijusios tarp skystos ir dujinės fazės ir traukia viena kitą kapiliarinėmis jėgomis dėl abipusių paviršių deformacijos (Nicholson, 1949).

Dalelių atomai sąveikauja vienas su kitu neryšniais potencialų deriniais, kurie veikia elektrostatinės (Kulono) ir dispersinės (van der Waalso) jėgas bei stūmos sąveikas, atsirandančias tarp atomų molekulėse (Yan *et al.*, 2010). Labiausiai paplitęs potencialas tarp neryšinių sąveikų yra Lenardo-Džonso potencialas, kuriame dalelės sąveikos energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$U(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{r_p}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_p}{r} \right)^6 \right], \quad (1.1)$$

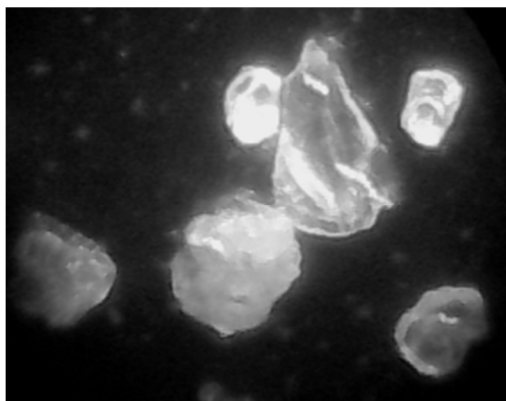
čia: r – atstumas tarp atomų centrų, ε – sąveikos energijos parametras, r_p – charakteringas atomo spindulys.

Pirmasis narys išreiškia mažojo nuotolio stūmos jėgas, o antrasis – tolimojo nuotolio van der Waalso traukos jėgas. Jėga, veikianti tarp dalelių, lygi $F = -\nabla U$, ji yra orientuota išilgai tiesės, einančios per dalelės centrus (Li *et al.*, 2011).

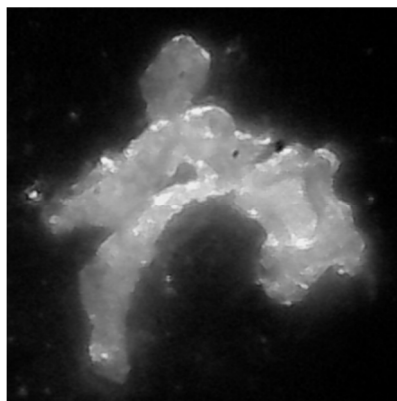
Kol atstumas tarp dalelių yra ženkliai didesnis už dalelių dydį ($r \gg 2r_p$), tol adhezinės jėgos yra labai mažos ir jų galime nevertinti. Tačiau jos tampa reikšmingos, kai dvi ar daugiau dalelių susiduria, tada adhezinės jėgos pasidaro stipresnės už daleles veikiančias gravitacijos ir inercijos jėgas.

Be dalelių tarpusavio sąveikos, mažos dalelės turi ir įvairių sąveikų su jas supančia aplinka: srauto, išoriniu temperatūros, išoriniu elektriniu ir magnetiniu bei akustiniu lauku. Skirtingai nei adhezijos jėgos, dalelės lauko sąveikos atsiranda visame dalelės sraute ir nereikalauja dalelių susidūrimų sąlygos.

Be to, dalelės sukelia oro srauto, elektros, akustikos ir šiluminiame laukuose skirtingus perturbacijos tipus, kurie daro įtaką abipusės sąveikos jėgoms, veikiančioms daleles. Tokios dalelių laukus veikiančios jėgos gali sukelti dalelių abipusę trauką, jų susidūrimus bei adheziją (Li *et al.*, 2011).



a)



b)

1.6 pav. Kvarcinio smėlio (SiO_2) dalelių formos (vaizdas padidintas 600 k.): a) artima sferiniai formai dalelė, b) netaisyklingos formos dalelė (Vekteris *et al.*, 2011)

Fig. 1.6. The shapes of particles of sand (SiO_2) (x600 magnify view): particle similar to spherical shape, b) particle of irregular shape (Vekteris *et al.*, 2011)

Pramoniniuose užterštuose oro srautuose dažniausiai būna dalelės arba dalelių agregatai, kurių forma tolina nuo taisyklingos sferos formos (1.6 b pav). Todėl kuriant akustinius ciklonus užterštam orui apdoroti, būtina įvertinti realias nesferines dalelių formas, nustatyti tokių dalelių aptekėjimo lauką ir kitus parametrus, galinčius turėti įtakos dalelių sukibimui.

Kvarcinio smėlio dalelės formos ypatumai pavaizduoti 1.6 paveiksle. Šios dalelės yra artimesnės sferinei formai (1.6 a pav.), nors ir yra kitokios formos (1.6 b pav.).

Išsamią inercijos, traukos, Brouno ir adhezijos jėgų, paremtų van der Waalso traukos ir elektrostatinėmis jėgomis, įvertinimo analizę pateikė Russelas (Russel *et al.*, 1989).

1.4. Akustinio lauko poveikis ultrasmulkioms dalelėms oro sraute

Akustiniai laukai daugeliu atvejų taikomi dalelių srautų manipuliacijai. Pavyzdžiui, anglies pelenų dalelių paveikimas stipriu akustiniu lauku iškart už degimo kameros žymiai padidina mikrometro ir sub-mikrometro dydžio pelenų dalelių pašalinimo greitį elektrostatiniuose nusodintuvuose, įrengtuose degimo produktų šalinimo sistemose, išdėstytose už degimo kameros (Liu *et al.*, 2009, Gallego-Juárez *et al.*, 1999). Panaši technologija buvo panaudota dalelių aglomeracijai sukelti dyzelinio variklio degimo produktų išmetimo sistemoje (de Sarabia *et al.*, 2003). Kituose procesuose ultragarso akustinės bangos gali būti panaudotos dalelių aglomeratams suskaidyti (Ding, Pacek, 2008). Akustinės bangos, sufokusuotos į aglomerato paviršių, gali būti panaudotos adhezinėms jėgoms tarp besijungiančių ultrasmulkių dalelių nutraukti (Brereton, Bruno, 1994, Chen, Wu, 2010). Stabilios ultragarso bangos yra naudojamos ląstelių klasteriams arba koloidinėms dalelėms gaminti (Kuznetsova *et al.*, 2009, Sobanski *et al.*, 2001, Spengler *et al.*, 2001, Spengler *et al.*, 2003). Akustinės paviršiaus bangos gali būti panaudotos skysčio plėvelės atomizacijai, išgauti mikrometro dydžio ir mažesnius aerozolio lašelius (Lang, 1962). Nuo dydžio priklausantis sklidimo greitis, sukeltas akustinio spinduliavimo, taip pat gali būti panaudotas dalelėms atskirti, priklausomai nuo jų dydžio, ypač mikro-fluidinėse sistemose (Kapishnikov *et al.*, 2006, Petersson *et al.*, 2007).

Akustinės bangos aerozolio dalelėms arba suspensijai sukelia įvairius skirtingos kilmės efektus. Tačiau ne visi šie efektai yra vienodos reikšmės (Song, 1990). Akustinių dalelių sąveikos efektai paprastai yra skirstomi į pirmaeilius arba antraeilius. Dominuojantys pirmaeiliai efektai sukelia dalelės aglomeraciją ortokinetiniais dalelių susidūrimais ir akustinio sužadavimo efektais (arba hidrodinaminėmis sąveikomis), tačiau mažesnėmis nei 1 μm

skersmens dalelėms Brauno judėjimas taip pat gali būti reikšmingas (Dong *et al.*, 2006, Sheng, Shen, 2007). Ortokinetiniai susidūrimai atsiranda tarp pakibusių nevienodo dydžio dalelių. Dalelėms judant pirmyn ir atgal su skystosios būsenos virpesiais, didesnių dalelių inertinis nukrypimas viršija mažesniųjų. Šis faktas lemia stipresnį santykinį greitį, tai padidina susidūrimų dažnį tarp skirtingo dydžio dalelių. Ortokinetinė sąveika apibūdinama akustinių bangų svyravimo greičio dydžiu ir kiekvienos dalelės fazės skirtumu supančiame oro sraute. Šis greičio skirtumas yra matuojamas pagal įsodinimo faktorių η , kuris apibūdinamas kaip dalelės greičio amplitudės ir oro srauto greičio amplitudės santykis, bei būsenos faktorių ϕ , kuris apibūdinamas fazių uždelsimu tarp dalelės ir oro srauto virpesių. Šie du dydžiai gali būti išreikšti kaip akustinis kampinis dažnis ω ir dalelės sustojimo laikas $\tau_p = \rho_p d^2 / 18\mu$ (Tiwary, Reethof, 1986).

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_p)^2}}, \quad \phi = \tan^{-1}(\omega\tau_p), \quad (1.2)$$

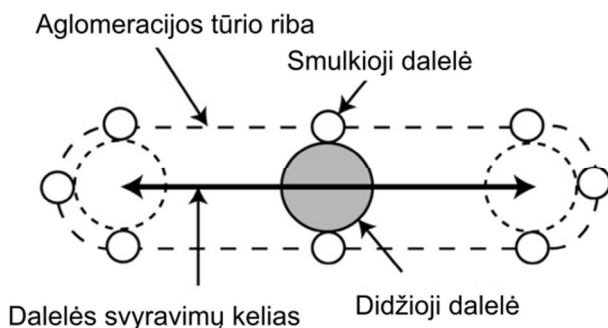
čia: $\omega\tau_p$ galime laikyti akustiniu Stokso skaičiumi. Kai $\eta \rightarrow 1$, o $\phi \rightarrow 0$, tai dalelė juda tolygiai su skysčiu ir nevyksta ortokinetiniai susidūrimai. Dvi dalelės diametru d_1 ir d_2 juda santykinai viena kitos atžvilgiu greičiu.

$$U_{rel,12} = [\eta_1 \cos(\omega t - \phi_1) - \eta_2 \cos(\omega t - \phi_1)]U, \quad (1.3)$$

čia: U – oro srauto akustinio lauko greičio amplitudė.

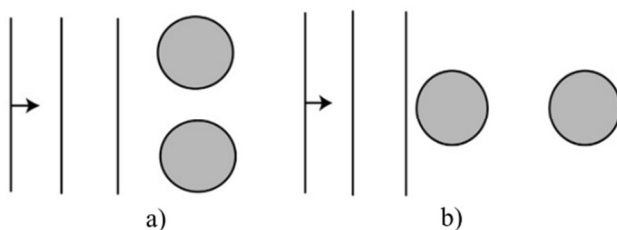
Vienos dalelės ribose bet kuri antra dalelė, esanti aglomeracijos tūryje aplink pirmąją dalelę, kaip parodyta 1.7 paveiksle, susidurtų su pirmąja dalele, darant prielaidą, kad dalelės kelyje nėra hidrodinaminės sąveikos sukeltos deformacijos. Dažniausiai yra daroma prielaida, kad dalelių susijungimas įvyksta, kai dvi dalelės patenka į atitinkamą jų aglomeracijos tūrį (Dong *et al.*, 2006).

Du hidrodinaminės sąveikos tarp dalelių atvejai gali susidaryti dėl sukurto akustinio lauko. Pirmuoju atveju sąveika yra stipriausia, kai linija, jungianti dviejų dalelių centrus, yra statmena akustinės bangos krypčiai, kaip parodyta 1.8 a paveiksle. Akustinės bangos sklaidimas įsiterpia tarp dviejų dalelių ir tarp jų sumažina slėgį, kuris sukelia dalelių judėjimą viena kitos link. Dalelių judėjimo trajektorijos sudaro Kamertono šakutės formą (1.9 a pav.). Šią vadinamąją „Kamertono šakutės“ aglomeraciją pirmieji atrado Hofmanas ir Kupmanas (Hoffman, Koopmann, 1997).



1.7 pav. Schema, vaizduojanti akustinės aglomeracijos tūrį aplink didesnę dalelę, virpančią veikiant akustinei bangai mažesnės dalelės link (Li *et al.*, 2011)

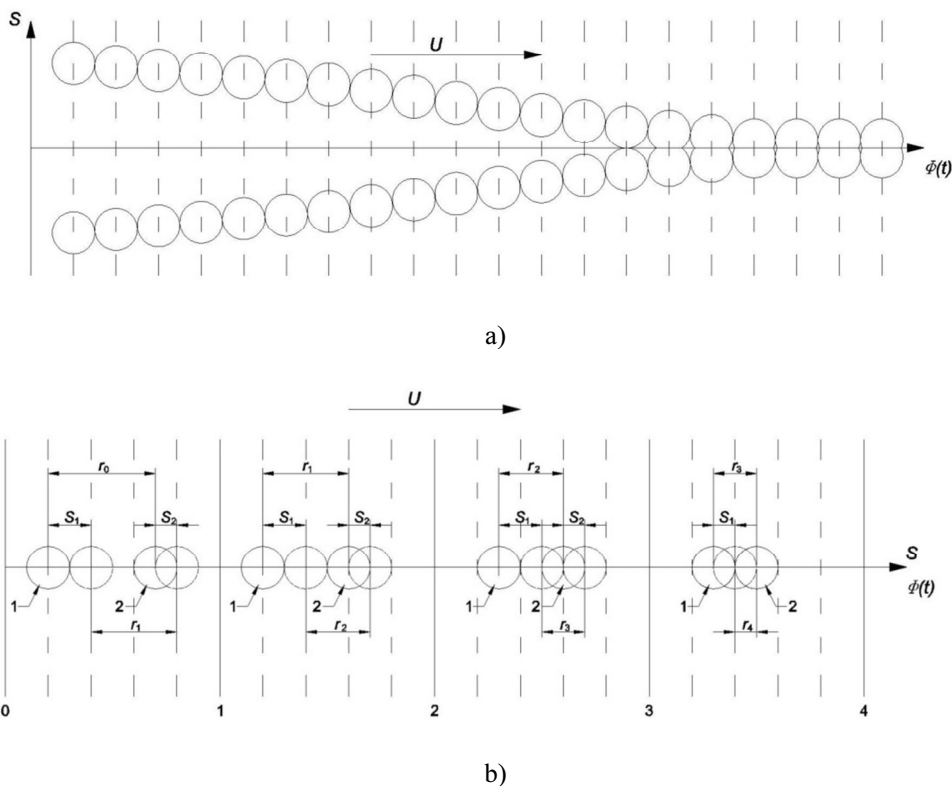
Fig. 1.7. Schematic diagram showing the acoustic agglomeration volume surrounding a large particle oscillating under an acoustic wave in the presence of smaller particle (Li *et al.*, 2011)



1.8 pav. Dalelių konfigūracijos ir akustinio lauko bangos hidrodinaminei sąveikai tarp dalelių su jungiamąja linija: a) statmena bangos kryptčiai, b) lygiagrečiai bangos kryptčiai (Li *et al.*, 2011)

Fig. 1.8. Configuration of particles and acoustic wave field for hydrodynamic interaction between particles with connecting line: a) orthogonal to the wave direction, b) parallel to the wave direction (Li *et al.*, 2011)

Antruoju atveju hidrodinaminė sąveika turi maksimalų efektyvumą, kai linija, jungianti dalelių centrus, yra lygiagrečiai bangos plitimo kryptčiai, kaip parodyta 1.8 b pav. Tokiu atveju akustinė banga, pasiekusi pirmąją dalelę, suteikia jai poslinkį antros dalelės atžvilgiu. Tuo pačiu metu pirmoji dalelė, užstodama antrąją dalelę nuo akustinės bangos poveikio, sumažina antrąją dalelę supančio srauto greitį. Šis „akustinio sužadinimo efektas“ sukelia dalelių suartėjimą (1.9 b pav.). Antrųjų dalelių greičio sumažėjimo išraišką dėl akustinio lauko poveikio pateikė Dianovas (Dianov *et al.*, 1965), pagrįsdamas ją Oseno priartėjimu mažo Reinoldso skaičiaus srauto laukui.



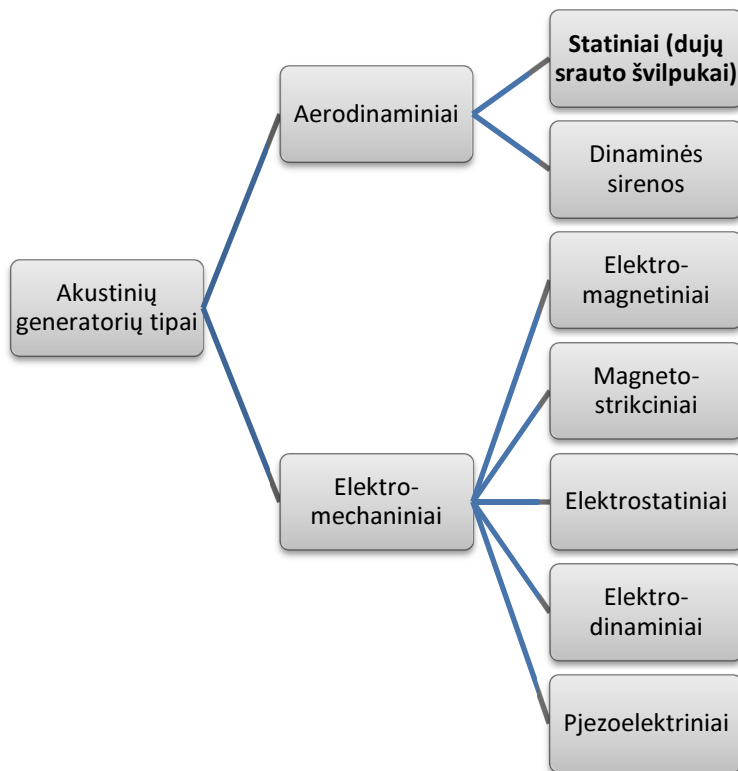
1.9 pav. Dalelių aglomeracija veikiant akustiniam laukui: a) dalelių sąveika, statmena akustinės bangos plitimo kryptčiai („Kamertono šakutės“ aglomeracija), b) dalelių sąveika, lygiagreti akustinės bangos plitimo kryptčiai. 1 – pirmoji dalelė, 2 – antroji dalelė, S_i – i -osios dalelės poslinkis, U – akustinės bangos plitimo kryptis, $\phi(t)$ – fazė laiko atžvilgiu, r_j – atstumas tarp dalelių centrų j -oje fazėje

Fig. 1.9. Agglomeration of particles under impact of acoustic field: a) interaction of particles orthogonal to the wave direction (Tuning-fork), b) interaction of particles parallel to the wave direction. 1 – first particle, 2 – second particle, S_i – displacement of particle “ i ”, U – direction of acoustic wave, $\phi(t)$ – phase depending from time, r_j – distance between centers of particles at phase “ j ”

Oseno teorija aprašo dideliais atstumais tarp dalelių vykstančius procesus, o Stokso teorija taikoma kliūčių ruože vykstantiems procesams nustatyti arba esant mažiems tekėjimo greičiams (Smoluchowski, 1911). Tik sujungę šias dvi teorijas galime sudaryti visą dalelių judėjimo akustiniame lauke vaizdą.

1.5. Akustinio lauko šaltinių raidos analizė

Aerodinaminiai akustiniai generatoriai. Aerodinaminiai generatoriai srauto kinetinę energiją transformuoja į ultragarso dažnio tamprųjų virpesių energiją. Tokie generatoriai gali būti gana kompaktiški, jų gamyba nėra sudėtinga. Koaguliacijos, džiovavimo, putų gesinimo procesuose tarp aerodinaminių spinduliuotuvų labiausiai paplitusios dinaminės ir statinės sirenos, dar kitaip vadinamos dujų srauto švilpukais (Khmelev *et al.*, 2010). Ultragarsinių generatorių klasifikacija pateikta 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Ultragarsinių generatorių, skirtų dujų aplinkai paveikti, klasifikacija (Khmelev *et al.*, 2010)

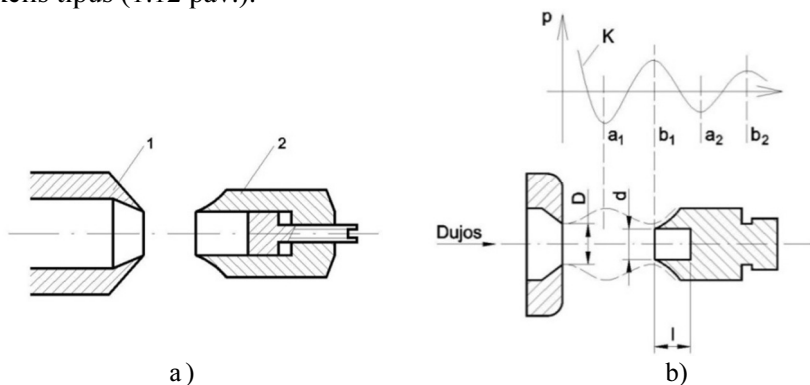
Fig. 1.10. Classification of ultrasonic generators (Khmelev *et al.*, 2010)

Akustiniai generatoriai skirstomi į aerodinaminius ir elektromechaninius, Aerodinaminiai dar skirstomi į statinius ir dinaminius, o elektromechaniniai – į elektromagnetinius, magnetrostrickinius, elektrostatinius, elektrodinaminius ir pjezoelektrinius.

Statiniai (dujų srauto) aerodinaminiai generatoriai. Statiniuose aerodinaminiuose generatoriuose (1.11 pav.) dujos, viršgarsiniu greičiu išeinančios iš tūtos (1), periodiškai užpildo rezonatorių (2), vėliau dujų pliūpsnis, išeinantis iš rezonatoriaus, susiduria su dujų srautu, išeinančiu iš tūtos. Susiformuoja tankio šuolis, jis osciliuodamas generuoja garsą. Paprasčiausią tokio dujų srauto švilpuko konstrukciją (pavaizduota 1.11 pav.) sukūrė Hartmanas. Konstrukcija susideda iš tūtos, rezonatoriaus ir mechanizmo, reguliuojančio rezonatoriaus tūrį (Rozenberg, 1969).

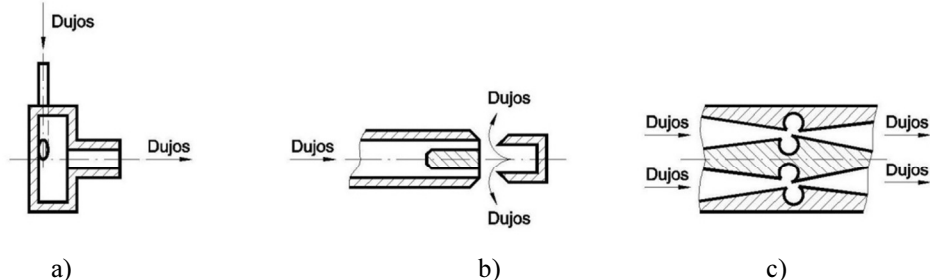
Jei naudodamiesi Pito vamzdeliu išmatuotume srauto slėgį skirtingais atstumais tūtos išėjimo angos atžvilgiu ir slėgio reikšmės atidėtų grafike, tai gautume kreivę K , pavaizduotą 1.11 b paveiksle.

Akustiniai generatoriai, priklausomai nuo jų konstrukcijos, dar skirstomi į kelis tipus (1.12 pav.).



1.11 pav. Dujų srauto generatoriaus konstrukcija: 1 – tūta, 2 – rezonatorius (Bergmann, 1957)

Fig. 1.11. Design of air flow generator: 1 – muzzle, 2 – resonator (Bergmann, 1957)



1.12 pav. Statinių aerodinaminių generatorių tipai: a) sūkurinis švilpukas, b) Galtono švilpukas, c) Levasero švilpukas (Rozenberg, 1969)

Fig. 1.12. Types of static aerodynamic generators: a) vortex whistle, b) Galton's whistle (Rozenberg, 1969)

Sūkuriniame aerodinaminiam generatoriuje (1.12 a pav.) suspaustų dujų srautas leidžiamas pagal cilindrinės kameros liestinę. Srautas kameroje užsisuka ir išeina per vamzdelį, kurio ašis sutampa su kameros ašimi (Agranat, 1987). Kadangi sūkurio intensyvumas dėl cilindrinės kameros ir vamzdelio diametrų skirtumo staigiai padidėja, slėgis centrinėje ašyje tampa žemesnis už atmosferos slėgį. Todėl atsiranda išorinio slėgio periodiškai prasiskverbimas į vamzdelį, t. y. periodiškos slėgio pulsacijos. Pulsacijos dažnis nustatomas pagal formulę (Khmelev *et al.*, 2010):

$$f = \frac{ac}{pd} \sqrt{\frac{\Delta p}{p}}, \quad (1.4)$$

čia: a – koeficientas, dėl trinties įvertinantis tangentinio greičio sumažėjimą, c – garso greitis, d – kameros skersmuo, Δp – slėgio perkritis suspaustų dujų tiekimo ir išėjimo vietose, p – slėgis išeinant.

Sūkurinių švilpukų konstrukcija gana nesudėtinga, tačiau jų galingumas, kai spinduliuotės dažnis – iki 20 kHz, neviršija kelių vatų. Naudingumo koeficientas, t. y. akustinio galingumo santykis su srauto srovės galingumu, siekia 28 proc.

Galtono švilpukas susideda iš žiedo formos plyšio tūtos ir cilindrinio rezonatoriaus su sandariu dugnu ir atidarytomis nuožulomis, nukreiptomis į tūtos pusę. Į rezonatorių tekantis suspaustų dujų srautas sukelia sūkurius su pulsacijos dažniu, apskaičiuojamu pagal formulę (Khmelev *et al.* 2010):

$$f = 0,466n \frac{v}{l}, \quad (1.5)$$

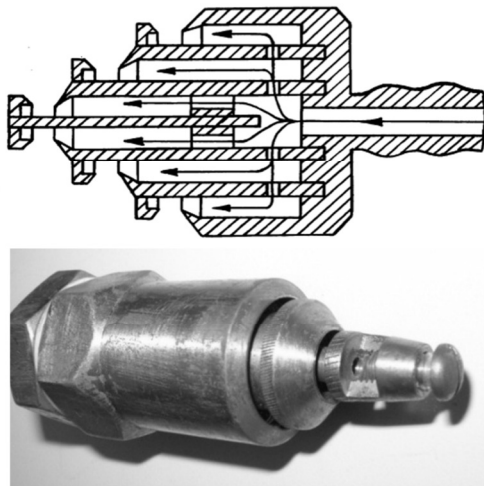
čia: v – dujų srauto greitis, l – rezonansinės kameros gylis, n – 1,2,3.

Veikiant oru Galtono švilpuko galingumas, esant 20 kHz ribiniam dažniui, siekia tik kelis vatus, o naudingumo koeficientas – 15–25 proc. Norint padidinti spinduliuotės dažnį, reikia arba įkelti dujas, arba naudoti tokias, kuriose yra aukštas garso sklaidimo greitis, pvz., helį. Naudojant helį, galima pasiekti 100 kHz dažnį.

Levasero švilpukai išsiskiria dviem savotiškais toroidinėmis rezonansinėmis kameromis, nuosekliai išdėstytomis už žiedo formos plyšio. Srautas į antrinę rezonansinę kamerą patenka po pagrindinės rezonansinės kameros aptekėjimo. Antrinė kamera padidina amplitudę, atitinkamai ir spinduliuotės galią (Bergmann, 1954).

Praktikoje akustiniams virpesiams generuoti ultragarso dažnių diapazone naudojami aukšto slėgio Hartmano slėgio švilpukai. Hartmano generatoriaus konstrukcija labai paprasta: kūginės formos tūta išdėstyta vienoje ašyje su cilindrinio rezonatoriumi. Konstrukcija analogiška Galtono švilpukui.

Taip pat yra ir specialių aerodinaminių spinduliuotuvų, generuojančių ultragarsinius virpesius plačiame dažniniame diapazone. 1.13 paveiksle pavaizduotas plataus dažninio diapazono dujų srauto spinduliuotavas, susidedantis iš daugiapakopės konstrukcijos. Siekiant išplėsti generuojamų dažnių spektrą generatoriaus konstrukcijoje siūloma panaudoti keletą tūtų ir rezonatorių, kiekviena tūtos ir rezonatoriaus pora generuotų skirtingų dažnių garsą. Vienu metu dirbant keletui tūtų ir rezonatorių jų generuojami individualūs garsai susideda ir tampa plačiajuosčiais virpesiais.



1.13 pav. Plačiajuosčio dujų srauto spinduliuotuvo konstrukcija ir nuotrauka (Khmelev *et al.*, 2010)

Fig. 1.13. Design and view of broadband generator (Khmelev *et al.*, 2010)

Dinaminės sirenos. Dinaminių sirenų veikimo principas paremtas suspausto oro srauto tiekimo pertrūkiais (Rozenberg, 1969). Oras tiekiamas pro kiaurymių sistemą. Kiaurymės išdėstytos viena prieš kitą apskritimu dviejuose vienoje ašyje sumontuotuose diskuose: nesisukančiame (statoriuje) ir besisukančiame (rotoriuje). Oro srovė pertraukiama tarp kiaurymių, išdėstytų rotoriuje ir statoriuje. Periodiškas kiaurymių atidarymas ir uždarymas sudaro kintamą oro srauto pasipriešinimą. Jis kinta nuo minimalios reikšmės (kiaurymės visiškai atidengtos) iki maksimalios reikšmės (kiaurymės visiškai uždengtos). Tai sukelia periodinį oro srauto praretėjimą ir suspaudimą, kitaip tariant, sukelia tamprius virpesius.

Dinaminės sirenos generuojamų virpesių dažnis apskaičiuojamas pagal formulę (Khmelev *et al.*, 2010):

$$f = \frac{mn}{60}, \quad (1.6)$$

čia: m – skylių skaičius statoriuje (tiek pat, kaip ir rotoriuje), n – rotoriaus apsisukimų skaičius per minutę.

Egzistuoja dviejų tipų dinaminės sirenos: ašinės ir radialinės. Pirmojo tipo sirenose kiaurymių ašys išdėstytos lygiagrečiai sirenos ašiai ir garsas tiesiogiai perduodamas į rezonatorių. Antrojo tipo sirenose kiaurymių ašys išdėstytos statmenai sirenos ašiai, o garsas į rezonatorių perduodamas specialiu reflektoriumi. Mažiems oro srautams apdirbti dažniausiai naudojamos ašinės sirenos. Tai leidžia sumažinti įrenginio gabaritus.

Dinaminėse sirenose rotorius sukasi dideliu greičiu ir sukelia reikšmingas mechanines apkrovas. Siekiant sumažinti masę rotorius gaminamas iš lengvųjų lydinų, pasižyminčių aukštu mechaniniu atsparumu. Šiuolaikinėse sirenose rotoriaus sukimosi dažnis siekia 20 000 aps./min.

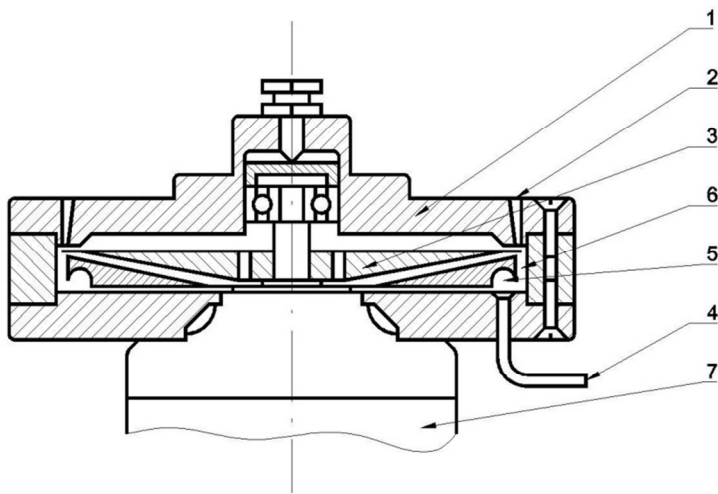
Siekiant išgauti periodinius oro srauto pertrūkius sirenose, rotorius turi sandariai priglusti prie statoriaus ir sandariai uždaryti kiaurymes. Tačiau praktikoje, norint užtikrinti laisvą rotoriaus sukimąsi statoriaus atžvilgiu, tarp jų turi būti tarpelis. Todėl visiško kiaurymių perdengimo pasiekti neįmanoma. Sirenos naudingumo koeficientas bus tuo didesnis, kuo mažiau oro nuotėkio bus kiaurymių perdengimo metu (kuo mažesnis tarpas tarp statoriaus ir rotoriaus). Taip pat akivaizdu, kad sirenos naudingumo koeficientas padidėja didinant statoriaus ir rotoriaus kiaurymių diametrų skirtumą (didinant kiaurymių perdengimo laipsnį). Pageidautina, kad statoriaus kiaurymės, kurios perduoda garsą į rezonatorių, būtų didesnio skersmens. Kiaurymių skersmuo turi būti lygus pusei atstumo tarp gretimų kiaurymių centrų. Taigi, oro srauto išretėjimo ir suspaudimo impulsai įvyks vienodais laikotarpiais (Rozenberg, 1969).

Norint gauti sirenos aerodinaminius duomenis, reikia nustatyti sirenos hidraulinio pasipriešinimo oro srautui priklausomybę nuo generuojamų virpesių dažnių.

Dažniausiai į sireną tiekiamo suspausto oro slėgis būna nuo 0,02 iki 0,4 MPa. Slėgio didinimas padidina garso galingumą, tačiau kartu pareikalauja didesnės elektros variklio galios.

Maksimalus dinaminių sirenų generuojamas garso intensyvumas siekia 1 MW/m² (100 W/cm²), kai naudingumo koeficientas – iki 20 proc. Virpesių dažnis gali siekti 200 kHz, akustinis galingumas gali siekti iki 35 kW.

Šiuo metu yra žinoma įvairių dinaminių sirenų konstrukcijų. Esama sirenų su vienu besisukančiu rotoriumi ir turinčių du skirtingomis kryptimis besisukančius rotorius. Rotorių pavara gali būti ir elektrinė, ir pneumatinė.



1.14 pav. Dinaminė sirena: 1 – statorius, 2 – kiaurymės, 3 – rotorius, 4 – antvamzdis, 5 – žiedo formos kamera, 6 – žiedo formos tarpelis, 7 – variklis (Bergman, 1954)

Fig. 1.14. Dynamic siren: 1 – stator, 2 – holes, 3 – rotor, 4 – pipe, 5 – “Ring” shape chamber, 6 – “Ring” shape gap, 7 – motor (Bergman, 1954)

Viena iš galimų dinaminės sirenos konstrukcijų pavaizduota 1.14 paveiksle. Statoriuje (1), taip pat tarnaujančiame kaip sirenos dangtis, išdėstyta 100 kūginės formos kiaurymių (2). Po statoriumi ant variklio (7) ašies sumontuotas rotorius (3). Rotorius pagamintas iš diuraliuminio lydinio ir yra siaurėjančios nuo centro į periferiją disko formos. Disko kraštuose išdėstyta 100 kiaurymių. Per rotoriaus ir statoriaus kiaurymes iš apačios per antvamzdį (4) ir žiedo formos kamerą (5) tiekiamas suspausto oro srautas. Toliau srautas per žiedo formos tarpelį (6) patenka į kiaurymes (2). Sukantis rotoriumi virš statoriaus generuojamos garso bangos, kurių dažnis priklauso nuo variklio apskukų.

Elektromechaniniai akustiniai generatoriai. Elektromechaniniais akustiniais generatoriais vadinami įrenginiai, kurie transformuoja elektros virpesių energiją į mechaninius virpesius. Elektromechaniniai spinduliuotuvai, priklausomai nuo jų veikimo principo, dar skirstomi į elektromagnetinius, elektrodinaminius, pjezoelektrinius, magnetostrikcinius, elektrostatinius. Elektromagnetinių generatorių principas paremtas judančios mechaninės sistemos virpėjimu veikiant ją kintamos elektros srovės žadinamu elektromagnetu (Geršgal, 1987).

Elektrodinaminiuose spinduliuotuvuose virpesius žadina magnetinis laukas tarp stacionaraus magneto ir elektrinės ritės.

Elektrostatiniuose spinduliuotuvuose akustiniai virpesiai generuojami sąveikaujant membranai su statoriumi sukuriama elektriniu lauku. Statorius gali būti metalinės plokštelės su kiaurymėmis arba įtemptos vielos pavidalo.

Magnetrostrikcinių spinduliuotuvų veikimo principas paremtas virpesiais, kuriuos žadina strypas, keičiantis savo geometrinius matmenis veikiant kintamam magnetiniam laukui, iš magnetrostrikcinės medžiagos.

Pjezoelektriniuose spinduliuotuvuose akustinius virpesius sužadina elementas, turintis pjezoelektrinių savybių, veikiant elektriniam laukui.

Šiuo metu elektrodinaminiai ir elektrostatiniai spinduliuotuvai plačiai taikomi buitinėse akustinėse sistemose. Tačiau ultragarsinėje technikoje minėti prietaisai sunkiai skinasi kelią, kadangi jų darbo efektyvumas ultragarsiniame diapazone smarkiai krinta. Tokiu pačiu trūkumu pasižymi ir elektrodinaminiai akustiniai prietaisai. Plačiausiai ultragarsinėje technikoje naudojami magnetrostrikciniai ir pjezoelektriniai akustiniai generatoriai, galintys gana efektyviai transformuoti ir spinduliuoti energiją.

Magnetrostrikciniai akustiniai generatoriai. Magnetrostrikciniai spinduliuotuvai dažniausiai susideda iš trijų pagrindinių dalių: aktyvaus elemento (pasižymintio magnetrostrikcinėmis savybėmis), pasyvaus elemento (akustinio tampiųjų virpesių transformatoriaus) ir šiuos elementus suderinančio įtaiso (Geršgal, 1987).

Dažnai aktyvus elementas tiesiogiai naudojamas kaip ultragarsinių virpesių šaltinis. Antroji spinduliuotuvo dalis – pasyvus elementas – gali būti naudojama įvairioms pagalbinėms funkcijoms: technologinėms, konstrukcinėms. Tačiau pagrindinė pasyviojo elemento paskirtis – aktyviojo elemento generuojamų tampiųjų virpesių perdavimas į apdirbamą aplinką.

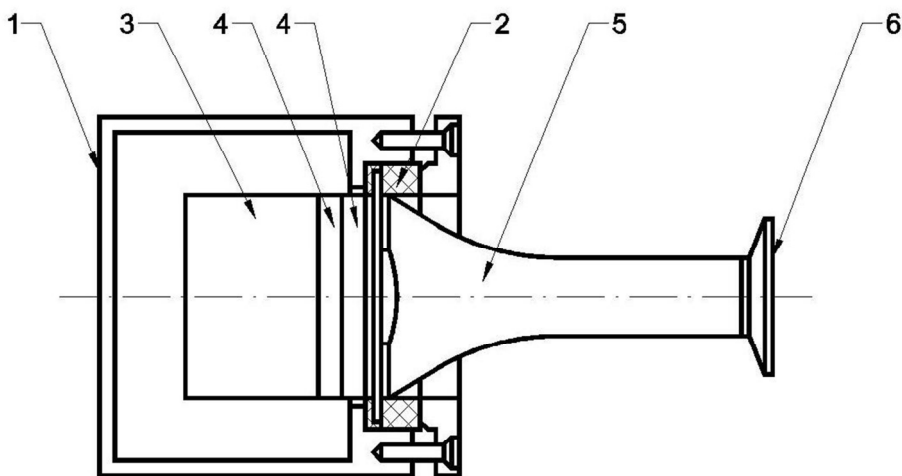
Magnetrostrikcinių akstinių generatorių trūkumu laikomas mažas naudingumo koeficientas – 40 proc. Be to, šie spinduliuotuvai charakterizuojami kaip žemo dažnio virpesių generatoriai (nuo 2 iki 20 kHz), o virpesių dažnis dažniausiai būna nestabilus. Taip pat prie trūkumų galima būtų priskirti ir stiprų spinduliuotuvų įkaitimą darbo metu. Taigi, juos būtina aušinti skysčiu (vandeniu arba tepalu).

Pjezoelektriniai akustiniai generatoriai. Pjezoelektriniais generatoriais vadinami elektromechaniniai akustiniai generatoriai, kurie susideda iš elemento ar elementų, turinčių pjezoelektrinių savybių, t. y. gebančių keisti savo dydį veikiant elektriniam laukui prijungus elektrodus (1.15 pav.). Šie spinduliuotuvai dažniausiai naudojami ultragarsiniame dažniniame diapazone iki 3–10 GHz (Khmelev *et al.*, 2010).

Iš įvairių pjezoelektrinių medžiagų pramonėje naudojami natūralūs monokristaliniai pjezoelektrikai: kvarcas ir sagneto druska (Potassium sodium tartrate), ir dirbtiniai polikristaliniai keraminiai pjezoelektrikai: bario ir kalcio titanatas bei švino cirkonatas-titanatas. Dėl pigumo ir paprastos gamybos pramonėje daugiausia naudojamos dirbtinės pjezokeraminės medžiagos.

Prijungus prie pjezoelektrinės plokštelės paviršiaus kintamą aukšto dažnio elektros įtampą, plokštelė atitinkamai kintamos elektros stovės dažniui generuos

mechaninius virpesius. Plokštelių paviršius judės vienas kito atžvilgiu, sąveikaudamos su aplinka, kurioje gali sklisti ultragarso bangos, plokštelės skleis ultragarsą. Didžiausias efektas pasiekiamas, kai kintamos elektros srovės dažnis sutampa su pjezoelektrinės plokštelės savaisiais virpesių dažniais, t. y. rezonanso metu. Tačiau net ir šiuo atveju pjezoplokštelės svyravimo amplitudė neviršys 5–6 μm . Tokio dydžio kieto kūno virpesių amplitudė neužtikrina reikiamo akustinio poveikio.



1.15 pav. Pjezoelektrinė ultragarsinių virpesių sistema: 1 – korpusas, 2 – atrama, 3 – atspindinti plokštė, 4 – pjezokeraminis elementas, 5 – virpesių greičio transformatorius, 6 – darbinis instrumentas (Khmelev *et al.*, 2010)

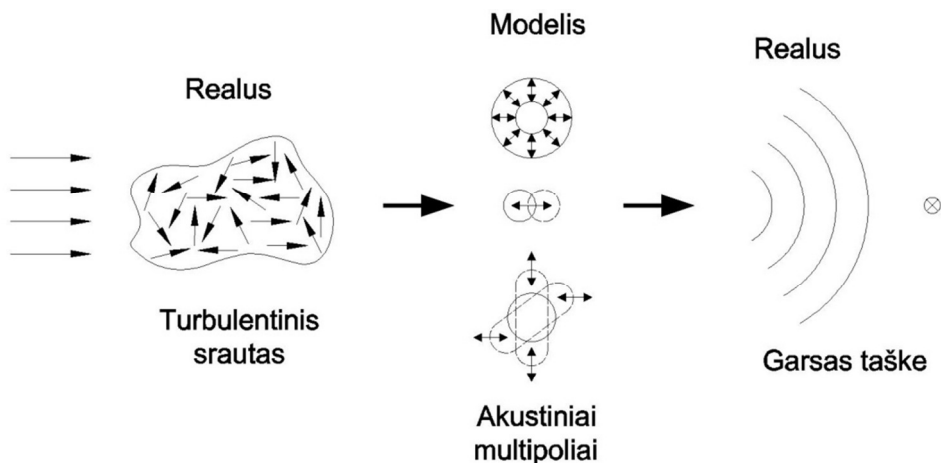
Fig. 1.15. Piezoelectric ultrasonic oscillation system: 1 – body, 2 – support, 3 – reflection plate, 4 – piezoelectric element, 5 – transformer of oscillation, 6 – operating tool (Khmelev *et al.*, 2010)

Pjezoelemento gabaritų padidinimas neturi reikšmingo efekto. Tad naudojami rezonansiniai greičio transformatoriai-koncentratoriai, kurie yra ultragarsinių virpesių sistemos sudėtyje.

1.6. Akustinio lauko susidarymas tekant orui

Akustiniai virpesiai – tai aukštu dažniu besikeičiantis oro tankis, sklindantis aplinka. Akustikoje tai galima pavadinti garsu. Jo susidarymo galimybes ir teorinius pagrindus, esant turbulentiniam dujų tekėjimui, tyrinėjo Lighthill

(Lighthill, 1952, 1954), o vėliau ir kiti mokslininkai: Slednikovas (Slednikov, 1971), Hiklingas (Hikling, 1980), Blochincevas (Blochincev, 1981), Goldsteinas (Goldstein, 1981), Dowlingas, Hynes (Dowling, Hynes, 2004). Garso susidarymas Lighthillio akustine analogija pavaizduotas 1.16 paveiksle. Ji pagrįsta tuo, kad turbulentinio tekėjimo sukuriamas garsas gali būti matematiškai nagrinėjamas kaip akustinių multipolių sukuriama garso energija.



1.16. Lighthillio akustinė analogija (Lighthill, 1952)
Fig. 1.16. Lighthill's acoustic analogy (Lighthill, 1952)

Akustiniai multipoliai skirstomi į tris tipus: akustinis monopolis, akustinis dipolis ir akustinis kvadrupolis. Akustinis monopolis gali būti vaizduojamas kaip pulsuojanči sfera. Akustinis dipolis – tai du akustiniai monopoliai, pulsuojančys vienu metu. Akustinis kvadrupolis – tai du akustiniai dipoliai, pulsuojančys vienu metu. Efektyviausias garso energijos sukūrimo požiūriu yra akustinis monopolis. Akustiniai multipoliai pavaizduoti 1.17 paveiksle.

Atitinkamai akustinio monopolio, akustinio dipolio ir akustinio kvadrupolio garso susidarymo galios, tekant turbulentinėms oro tėkmėms, gali būti aprašytos:

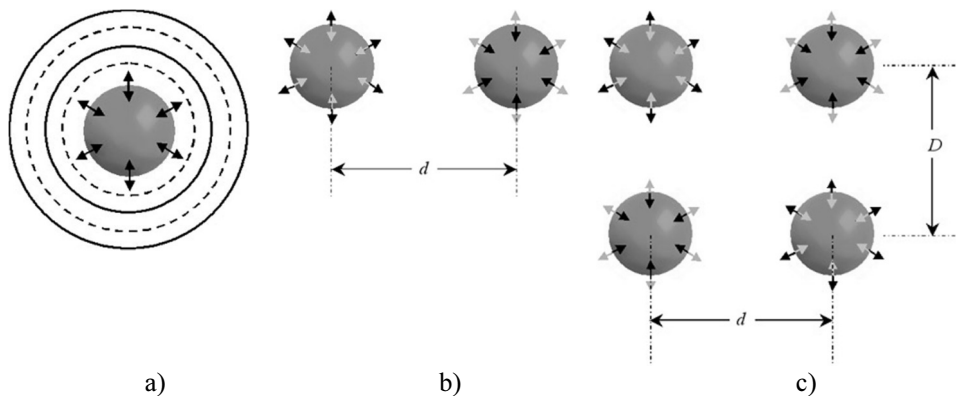
$$W_M = K \frac{\rho \cdot v^4 \cdot d^2}{c}, \quad (1.7)$$

$$W_D = K \frac{\rho \cdot v^6 \cdot d^2}{c^3}, \quad (1.8)$$

$$W_K = K \frac{\rho \cdot v^8 \cdot d^2}{c^5}, \quad (1.9)$$

čia: W_M – akustinio monopolio garso galia, W_D – akustinio dipolio galia, W_K – akustinio kvadrupolio garso galia, K – empirinis koeficientas ($K \approx 2 \cdot 10^{-5}$),

ρ – oro tankis, v – oro tekėjimo greitis, d – oro ištekėjimo angos skersmuo, c – garso greitis ore.



1.17 pav. Akustiniai multipoliai: a) akustinis monopolis, b) akustinis dipolis; c) akustinis kvadrupolis

(<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/a/c/acoustic%20sources/source.html>)

Fig. 1.17. Acoustic multipoles: a) monopole, b) dipole, c) quadruple

(<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/a/c/acoustic%20sources/source.html>)

Garso susidarymo galia, tekant turbulentinėms oro tėkmėms, gali būti aprašoma visomis trimis formulėmis.

1.7. Srautų skaitinio modeliavimo metodai

Skaitiniai tyrimai kasmet vis plačiau taikomi įvairiose srityse. Jie smarkiai supaprastina inžinerinių uždavinių sprendimą, padeda sutaupyti laiko. Šiame poskyryje apžvelgsime keletą labiausiai paplitusių skaitinių tyrimo metodų.

FEM (Finite element method) – baigtinių elementų metodas. Tai skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas (Barauskas *et. al.*, 2004).

FDM (Finite difference method) – baigtinių skirtumų metodas. Šis skaitmeninis metodas skirtas rasti apytikslius diferencialinių lygčių sprendinius naudojant baigtinių skirtumų lygtis. FDM paremtas tinklelio diskretine funkcija.

Pagrindinis šio metodo privalumas tas, kad jis gali būti labai lengvai įdiegtas. Tačiau FEM metodas dažniausiai yra tikslesnis lyginant su FDM metodu.

Paprastai FEM pasirenkamas statybinės mechanikos srityje, jį taikant skaičiuojama kietųjų kūnų deformacija ir įtempimas arba konstrukcijų dinamika. Skaičiuojamojoje skysčių dinamikoje dažniau naudojamas FDM ar kiti metodai, tokie kaip baigtinių tūrių metodas (FVM).

FVM (Finite volume method) – baigtinių tūrių metodu pateikiamos ir apskaičiuojamos diferencialinių lygčių dalinės išvestinės algebrinių lygčių forma (LeVeque, 2002, Toro, 1999). Kaip ir taikant FDM ar FEM metodus, vertės apskaičiuojamos geometrinio tinklelio diskrečiose vietose. „Baigtinis tūris“ remiasi mažu tūriu, aplink kurį išsidėstę mazgų taškai tinklelyje. Taikant FVM metodą, tūriai integruojami į dalinių išvestinių diferencialines lygtis, kuriose divergencijos išraiška yra konvertuojama į paviršiaus integralus naudojant divergencijos teoremą. Vėliau šie paviršiaus integralai išreiškiami kaip srautai kiekviename baigtiniame tūryje. FVM metodas pritaikomas nestruktūriniuose tinkleliuose. Jis naudojamas daugelyje skaičiuojamosios skysčių dinamikos paketų.

DEM (Discrete element method) – diskrečiųjų elementų metodas. Jis naudojamas didelio skaičiaus mažų dalelių judesui apskaičiuoti. DEM gali būti taikomas dalelėms su nesferine forma modeliuoti. Šis metodas reikalauja didelių skaičiuojamosios technikos resursų. Tai riboja jo dydį arba naudojamų dalelių kiekį.

Modeliavimas prasideda nuo dalelių dislokacijos konkrečiose vietose ir pradinio greičio suteikimo joms. Vėliau jėgos (trinties, gravitacijos, Kulono, stūmos, Van der Valso ir kt.), veikiančios kiekvieną dalelę, apskaičiuojamos remiantis pradiniais duomenimis ir fizikos dėsniais. Visos dalelę veikiančios jėgos sudedamos siekiant nustatyti jėgų poveikio jai rezultatą. Integravimo metodas naudojamas kiekvienos dalelės padėčiai ir greičio pokyčiui per nustatytą laiko žingsnį apskaičiuoti. Toliau nauja dalelės padėtis naudojama jėgoms apskaičiuoti kitame laiko žingsnyje. Šis ciklas tęsiasi tol, kol modeliavimas bus baigtas.

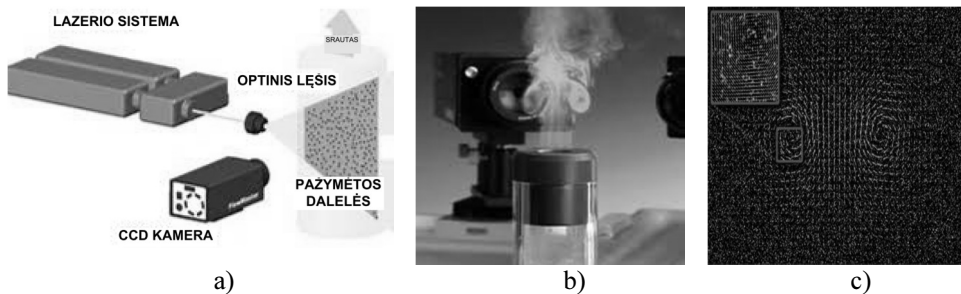
1.8. Užterštų oro srautų tyrimų metodų ir įrangos apžvalga

Užterštų oro srautų matavimai ir tyrimai yra gana sudėtingi. Ypač sunku išmatuoti turbulentinių srautų procesus. Jau daugelį metų šiam tikslui naudojama aparatūra, pagrįsta lazerinėmis technologijomis.

PIV (Particle image velocimetry) – dalelių judėjimo greičio vaizdas. Tai yra optinis metodas, naudojamas srauto vizualizacijai mokymų ir mokslinių

tyrimų metu. Jis naudojamas momentiniams greičio matavimams ir srauto savybėms nustatyti.

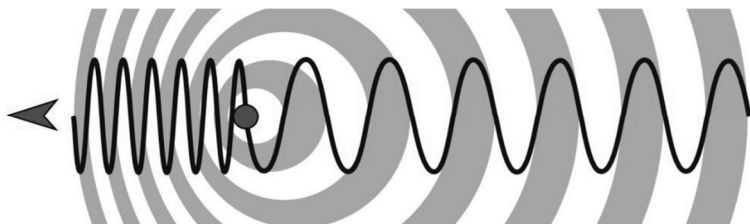
Principinė PIV metodo schema, stendo nuotrauka ir kompiuterinė srauto dalelių judėjimo vizualizacija pavaizduota 1.18 paveiksle. Tipinė PIV įranga susideda iš skaitmeninės filmavimo kameros, šviesos blykstės arba lazerio, sinchronizatoriaus, sinchronizuojančio kameros ir lazerio darbą, „pažymėtų“ dalelių, tiriamojo srauto bei programinės įrangos nufilmuotam vaizdui apdoroti.



1.18 pav. Dalelių judėjimo greičio vaizdo sistema: a) principinė schema, b) stendo nuotrauka, c) srauto dalelių judėjimo vizualizacija

Fig. 1.18. Particle image velocimetry system: a) principle scheme, b) view of stand, c) visualization of movement of particles

PIV metodu į užterštą oro srautą paleidžiamos „pažymėtos“ dalelės, jos yra gana mažos ir dėl to gali tiksliai sekti užteršto oro srauto trajektoriją. Į užteršto oro srautą nukreipiamas lazeris, ir „pažymėtos“ dalelės iluminoja srautą. Taigi, dalelės, esančios sraute, tampa matomos. Iliuminuotų dalelių judėjimą fiksuoja aukštos rezoliucijos greito filmavimo kamera. Užfiksuotas vaizdas apdorojamas programine įranga ir panaudojamas srauto greičiui ir kryptiai nustatyti.



1.19 pav. Doplerio efekto diagrama. Šaltinio judėjimo sukeltas bangos ilgio kitimas (Lewis, 2012)

Fig. 1.19. Illustration of the Doppler effect. The change of wavelength caused by the motion of the source (Lewis, 2012)

Šiuo metu paprasčiausia ir labiausiai paplitusi technologija užterštiems oro srautams tirti yra **LDV (Laser Doppler Velocimetry)** arba **LDA (Laser Doppler Anemometry)**. Tai technologija, naudojanti Dopplerio efektą (1.19 pav.) lazerio spindulyje, matuojant permatomo arba pusiau permatomo užteršto oro srauto greitį. Taip pat šia technologija galima matuoti nepermatomų, atspindinčių paviršių linijinius arba vibracinius judėjimus.

LDV sistema susideda iš lazerio optinio pluošto tiekimo sistemos, šviesos priėmimo fotodetektoriaus ir programinės įrangos.

LDV susikerta du kolimuoti, monochrominiai ir koherentiniai lazerio spinduliai matuojamame oro sraute. Du spinduliai dažniausiai yra išgaunami padalinus vieną lazerio spindulį. Tokiu būdu yra užtikrinamas koherentiškumas tarp dviejų spindulių. Dažniausiai naudojami matomo spektro spindulių lazeriai (bangų ilgis – 390–750 nm). Dalelės, esančios oro sraute ir pratekančios pro lazerių spindulių susikirtimo tašką, atspindi šviesą, kurią priėmimo optika surenka ir fokusuoja į fotodetektorius (fotosensorius) (1.20 pav.).

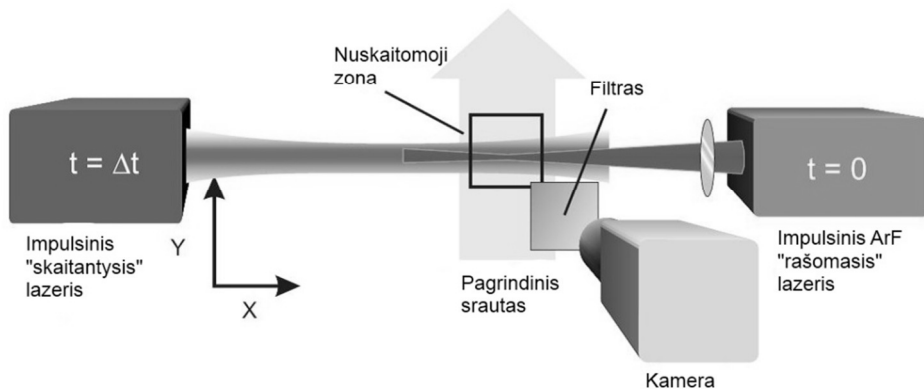


1.20 pav. Lazerinė Doplerio anemometro sistema

Fig. 1.20. Laser Doppler velocimetry system

Atspindinti šviesa kinta tam tikru intensyvumu. Jo kitimo dažnis yra ekvivalentiškas Dopplerio efektui tarp įprasto ir sklaidžiojo šviesos atspindžio. Taip nustatoma dalelės greičio komponentės proporcija lazerių spindulių plokštumoje. Jei srauto kryptis statmena spindulių plokštumai, tai elektrinis signalas iš fotodetektoriaus nustato visą dalelės greitį. Pritaikius trijų prietaisų kombinaciją (pvz.: He-Ne, Argono jonų ir lazerinių diodų) su skirtingais spindulių bangų ilgiais, vienu metu galima nustatyti visas tris dalelės greičių komponentes (Drain, 1980).

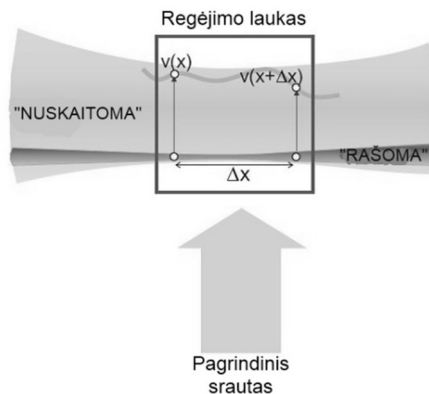
MTV (Molecular Tagging Velocimeter) – specialus metodas, skirtas srautų tėkmės greičiams nustatyti (Elenbaas, 2005). Tai vienas paprasčiausių lazerinių srautų matavimo metodų. MTV sistema (1.21 pav.) susideda iš impulsinio „rašomojo“ lazerio, impulsinio „skaitymojo“ lazerio, vaizdo kameros ir filtro prie jos, tiriamo srauto bei programinės įrangos.



1.21 pav. Molekulinio žymėjimo greičio nustatymo sistema

Fig. 1.21. Molecular tagging velocimeter system

„Rašomojo“ lazerio spindulys vieną kartą šauna į tiriamą užteršto oro srautą. Lazerio spindulio kelyje, srauto komponentuose, optiškai sužadinami cheminiai procesai. Dėl įvykusių cheminių procesų susiformuoja nauji cheminiai dariniai arba pasikeičia oro srauto komponentų vidinės energijos būseną. Taigi, molekulės, susidūrusios su lazerio spinduliu, „pažymimos“ ir vadinamos „pažymėtomis“.



1.22 pav. Molekulinio žymėjimo greičio nustatymo sistemos veikimo principas

Fig. 1.22. Operation of Molecular tagging velocimeter system

Lazerio spindulio laiku $t = 0$ „pažymėtų“ molekulių linija transportuojama užterštu oro srautu. „Skaitomojo“ lazerio spinduliu ir vaizdo kamera „pažymėtų“ molekulių linija fiksuojama po tam tikro laiko Δt (1.22 pav.). Gauti vaizdai laiku t ir Δt analizuojami naudojant programinę įrangą, nustatomas linijos poslinkis. Jei srautas yra trijų matmenų ar turbulentinis, „pažymėtoji“ linija ne tik pasislinks tam tikru atstumu, bet ir deformuos, t. y. iš tiesės taps kreive.

1.9. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus literatūros apie oro valymo įrenginius analizę nustatyta, kad klasikiniai sausieji pirminio oro valymo įrenginiai netinkami ultrasmulkioms dalelėms atskirti iš valomo oro srauto.

2. Atlikus oro valymo metodų analizę nustatyta, kad akustinės aglomeracijos ir tradicinių oro valymo būdų sujungimas smarkiai padidina tradicinių oro valymo įrenginių efektyvumą bei leidžia juos taikyti atskiriant ultrasmulkią dalelę iš valomo oro srauto.

3. Literatūros šaltinių analizė parodė, kad ciklonai su akustinėmis kolonėlėmis yra didelių gabaritų, reikalauja specialios ir sudėtingos priežiūros, o ciklonai su pjezoelektriniais ultragarsiniais šaltiniais dar negali būti realiai pritaikomi ir naudojami pramonėje dėl sudėtingo valdymo bei neefektyvaus ultragarsinio lauko panaudojimo dideliuose ventiliacijos kanaluose.

4. Lazeriniai oro srautų tyrimo metodai yra gana sudėtingi ir brangūs ir ne visuomet gali būti pritaikyti naudojant cikloną.

Įvertinus mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus ir žinant darbo tikslą, tikslinga išspręsti šiuos uždavinius:

- Sukurti akustinio lauko šaltinių prototipus, atlikti jų tyrimus ir išanalizuoti gautus rezultatus.
- Pasiūlyti metodiką, leidžiančią įvertinti akustinio lauko parametrų poveikį ultrasmulkioms dalelėms oro sraute.
- Teoriškai pagrįsti akustinio ciklono koncepciją, veikimo principus ir srautų simuliaciją.
- Sukurti akustinio ciklono prototipą, pagrįstą grįžtamojo srauto principu.
- Atlikti sukurto akustinio ciklono prototipo eksperimentinius tyrimus.

Akustinių šaltinių parametų tyrimai

Atlikus analizę prieita išvada, kad dabartiniai valymo metodai ir įrenginiai netenkina šių dienų aktualijų ekologine bei ekonomine prasme. Todėl būtina sukurti naują metodą, kurį taikant būtų galima atskirti ultrasmulkias daleles iš valomo oro srauto efektyviai ir nebrangiai investicijų bei eksploatacijos sąnaudų požiūriu.

Šiam tikslui pasiekti visų pirma būtina sukurti naujo tipo aerodinaminius akustinio lauko generatorius, kurie būtų technologiškai lengvai pagaminami ir nereikalautų sudėtingos priežiūros eksploatacijos metu. Antra, reikia sukurti metodiką, leidžiančią įvertinti akustinio lauko poveikį dalelių aglomeracijai oro sraute. Trečia – sujungti klasikinius ir naujus oro (dujų) valymo metodus, siekiant padidinti įrenginių valymo efektyvumą ir ekonomiškumą.

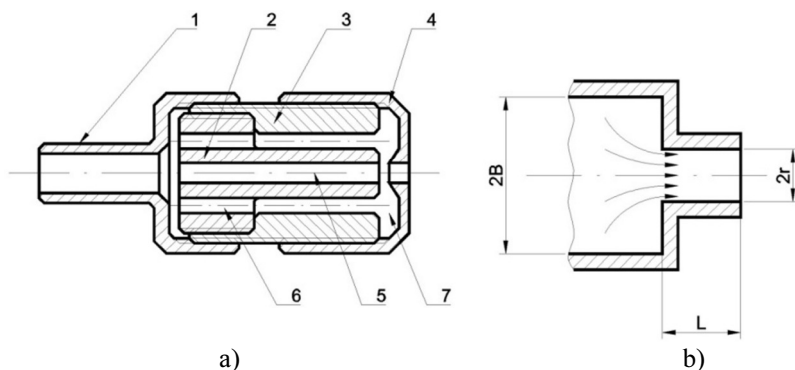
Skyriuje nagrinėjamos akustinio lauko susidarymo priežastys tekant oro srautams. Aprašoma sukurtų akustinių šaltinių prototipų konstrukcija ir veikimo principai. Pateikiami akustinių generatorių tyrimai ir jų rezultatų analizė.

Šio skyriaus medžiaga buvo paskelbta autoriaus publikacijoje (Vekteris *et al.*, 2010) ISI Proceedings medžiagoje.

2.1. Akustinio generatoriaus analizė

Sukurto aerodinaminio akustinio lauko generatoriaus prototipas pavaizduotas 2.1 a pav. Aerodinaminis akustinio lauko generatorius (2.1 a pav.) susideda iš štuceri (1), šerdies (2), korpuso (3) bei tūtos (4). Pro štuceri (1) įpučiamas suspausto oro srautas, jį šerdis (2) paskirsto per centrinį (5) ir periferinius kanalus (6). Periferiniais kanalais (6) tiekiamas oras patenka į rezonansinę kamerą (7). Pasisiekus tam tikrą kritinį slėgį kameroje (7), suspaustas oro srauto pliūpsnis permuša oro srautą, einantį centriniu kanalu (5), ir išeina pro tūtą (4). Po pliūpsnio sumažėjus oro slėgiui rezonansinėje kameroje (7), centriniu kanalu (5) einantis oro srautas atsinaujina ir išeina pro tūtą (4), kol rezonansinėje kameroje (7) pasiekiamas kritinis slėgis. Tada aprašytas ciklas pasikartoja ir tokiu būdu sukuriamos oro srauto pulsacijos, generuojančios akustinį lauką.

Paprasčiausiu išteklėjimo angos modeliu gali būti cilindro formos kanalas. Jo ilgis L atitinka tiriamo objekto, kurio angos skersmuo yra lygus $2r$, sienelių storį (2.1 b pav.) (Drobot *et al.* 1989, Lighthill, 1952, 1954, Slednikov, 1971, Hikling, 1980). Susidarius slėgių skirtumui juo tekės oras.



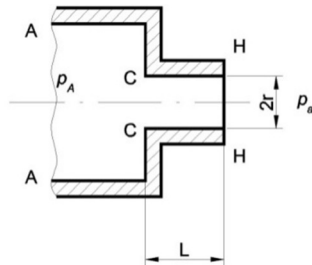
2.1 pav. Akustinis generatorius: a) išilginis pjūvis, b) išteklėjimo angos modelio grafiška išraiška

Fig. 2.1. Acoustic generator: a) longitudinal section, b) diagram of outlet hole

Skersmuo $2r$ dažniausiai yra mažas lyginant su talpos (tiriamo objekto) charakteringu parametru B ($r < B$). Akustinio lauko susidarymą tokioje sistemoje sąlygoja ištekančias oras, jo tekėjimo režimas angoje ir aplinka, kurioje sklinda garsas. Tekėjimas turi būti turbulentinis, kadangi laminarinis tekėjimas negeneruoja akustinių laukų. Turbulentinis tekėjimas yra nesuskaičiuojamų sūkurių rezultatas. Nestacionarūs sūkurių sukelia slėgių pulsacijas prie sienelių (pseudogarsas atsiradimas) ir savuosius akustinius signalus (triukšmai dėl

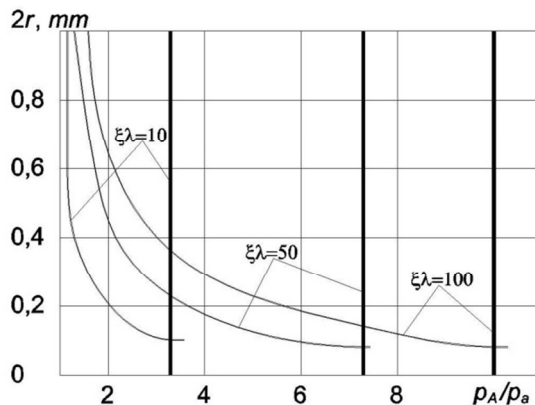
akustinio tekėjimo). Lygūs nesandarumo kraštai sukuria mažiau sūkurių nei nelygūs (šiurkštūs). Anga (nesandarumas), turinti aštrius (daugiabriaunius) kraštus, labiau veikia tėkmę ir sukuria didesnę turbulentinį tekėjimą (2.2 pav.).

Prie veiksmų, turinčių įtakos dujų (oro) judėjimui angoje (kanale), priskiriami ne tik angos geometriniai parametrai, bet ir dujų tankis, klampa, molekulinė masė, suspaudimas, paviršinis įtempimas, absoliutinis sistemos slėgis.



2.2 pav. Oro ištekėjimo anga
Fig. 2.2. Outlet hole for air flow

2.3 paveiksle matyti nustatytos p_A/p_a diapazono ribos turbulentiniam suspausto oro nutekėjimui į atmosferą esant normaliai temperatūrai ($\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa·s, $\rho_H = 1,2$ kg/m³, $p_H = 0,1$ MPa, $Re_{kr} = 2 \cdot 10^3$) (Drodot, 1989). Esant ikigarsiniams greičiams turbulentinį tekėjimo režimą galima užtikrinti plačiame santykio p_A/p_a diapazone tik esant dideliems skersmenims $2r$ ir santykiniais kanalo ilgiams.



2.3 pav. Ikigarsinio turbulentinio tekėjimo diapazono ribos ištekančiam suspaustam orui, kai angos ilgis įvairus (Drodot, 1989)

Fig. 2.3. Subsonic turbulent flow range limits at the different length of outlet hole (Drodot, 1989)

Reikia pabrėžti, kad akustinių laukų stiprėjimas su slėgio skirtumų didėjimu $p_A/p_a > (p_A/p_a)_g$ įmanomas ir dėl akustinių efektų, kurie susidaro dėl staigių dujų slėgių pokyčių kanale (Slednikov, 1971). Tačiau šie akustiniai efektai teoriškai netiriami dėl sunkios analizės (Drobot, 1989). Jie gali būti įvertinti eksperimentiškai.

Akustinių laukų stiprumui įtaką daro ir slėgio pulsacijos, atsirandančios dėl sūkurių susidarymo, esant turbulentiniam tekėjimui. Pulsacijų dažnis nustatomas pagal sūkurių susidarymo dažnį, jis gali būti apskaičiuotas pagal formulę, kuri nagrinėjamu atveju turi tokį pavidalą:

$$f = St \frac{v_H}{2r} n, \quad (2.1)$$

čia: St – Struchalio skaičius, $n = 1, 2, 3, \dots$ – sveikasis teigiamas skaičius, v_H – dujų tekėjimo greitis, $2r$ – angos skersmuo.

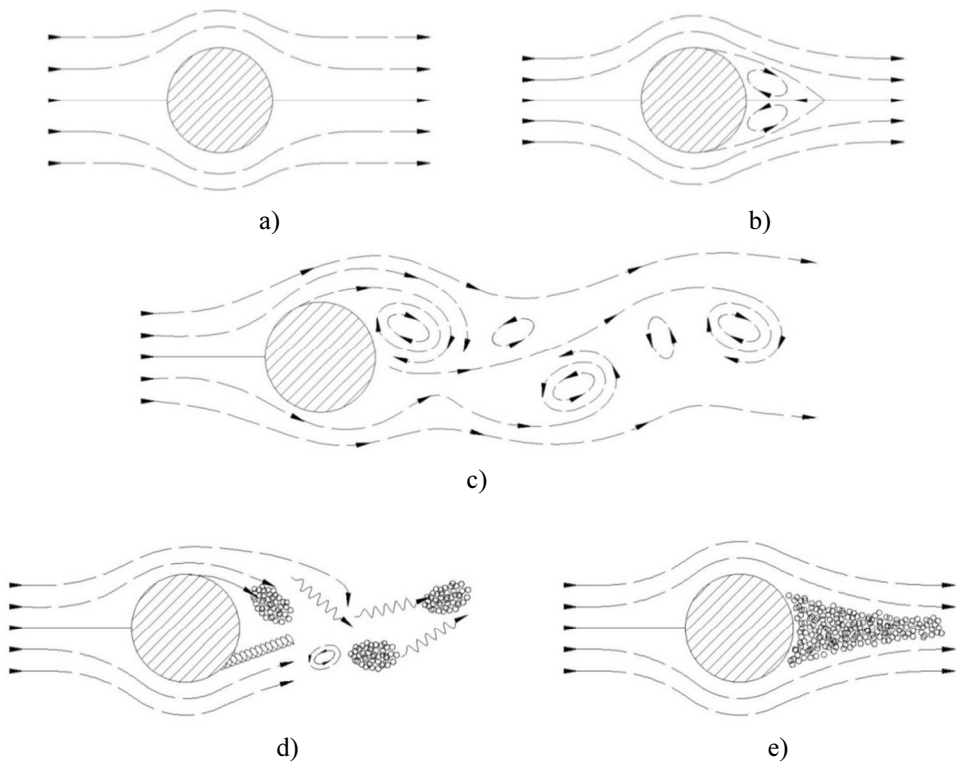
Dažniausiai esant turbulentiniam judėjimui $St \approx 0,2$ ir pagrindinė energija yra sutelkta didelėse pulsacijose, t. y. esant mažiems n .

Tekant dujoms, kai mažos nuotėkio angos ir maži n , susidariusio virpėjimo dažnis yra aukštas. Pavyzdžiui, esant anksčiau nagrinėtam oro tekėjimui gausime $f_1 = 600$ kHz, $f_2 = 120$ kHz. Tačiau, angai didėjant, šie dažniai mažėja bei mažėja ištekėjimo greitis. Taigi, kai ištekėjimo greitis nedidelis, o kanalo angos didelės, ištekant dujoms susidaręs pseudo garso signalas gali būti matuojamo akustinio signalo dalis.

2.2. Akustinio lauko susidarymas dėl oro tėkmės sąveikos su kietu objektu

Akustinis laukas gali susidaryti ne tik orui tekant per nesandarumus, bet ir jam aptekant kietus kūnus, ypač esant didelėms oro tėkmėms arba / ir esant šiurkštiems kietųjų kūnų paviršiams. Tai susiję su turbulentinių oro tėkmių susidarymu.

Kaip pavyzdį galima pateikti apvalaus cilindro aptekėjimą (Roberson, 1997). Kaip matyti iš 2.4 paveiksle, oro tekėjimui didėjant (didėjant Reinoldso skaičiui), pradeda formotis turbulentinė tėkmė. 2.4 a ir b paveiksluose pavaizduotas laminarinis apvalaus cilindro aptekėjimas. Kituose paveiksluose pavaizduota, kaip pradeda formotis oro sūkuriai ir oro tėkmė tampa turbulentinė. Dėl to atsiranda aukšto dažnio slėgio pokytis arba akustinių virpesių, kurie sklinda aplinkoje bei kietuose kūnuose.



2.4 pav. Cilindro aptekėjimas esant įvairioms oro tėkmėms:

a) $Re < 200$, b) $Re < 1000$, c) $Re < 2000$, d) $Re \approx 10^4$, e) $Re \approx 10^5$

Fig. 2.4. The flow over cylinder at various number of Re :

a) $Re < 200$, b) $Re < 1000$, c) $Re < 2000$, d) $Re \approx 10^4$, e) $Re \approx 10^5$

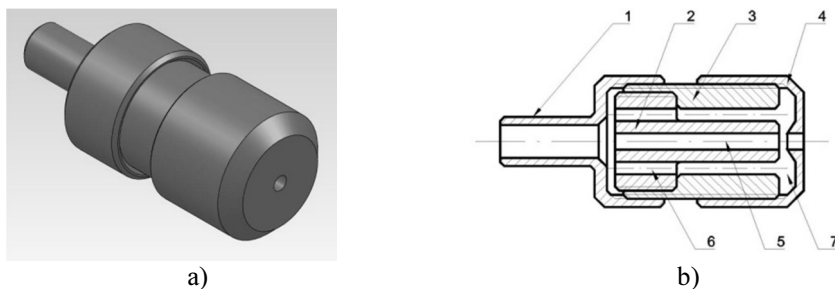
Įvairių kietų kūnų dujų aptekėjimo tyrimų rezultatai plačiau pateikti Robertsono (Roberson, 1997).

2.3. Akustinių generatorių prototipai ir jų tyrimų rezultatai

Šiuo metu akustinių generatorių poveikis pramonėje auga. Efektyviausi garso generatoriai, kurių skleidžiamas akustinių bangų dažnis yra ultragarsiniame ruože, t. y. už girdimumo ribos. Kuriant akustinius generatorius būtina žinoti akustinio lauko charakteristikas, kurios užtikrintų tinkamą poveikį dalelių

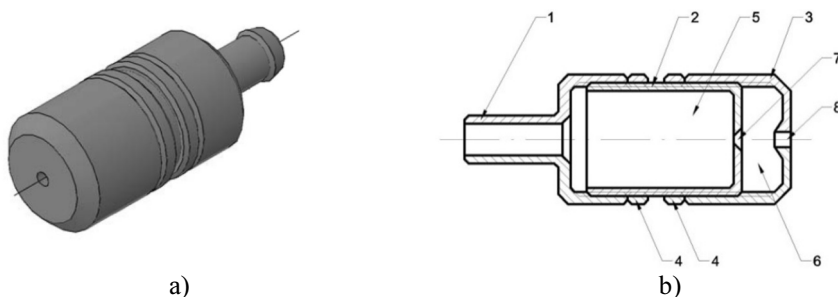
agregacijai. Spinduliavimo intensyvumas sukelia didesnę dalelių santykinę greitį. Dalelių agregacija apibūdinama charakteringu akustinio lauko dažniu.

Tyrimams buvo sukurti ir pagaminti šeši aerodinaminių akustinių lauko generatorių prototipai (2.5–2.10 pav.). Prototipai buvo bandomi siekiant nustatyti jų generuojamo akustinio lauko parametrus: garso slėgį ir dažnį.



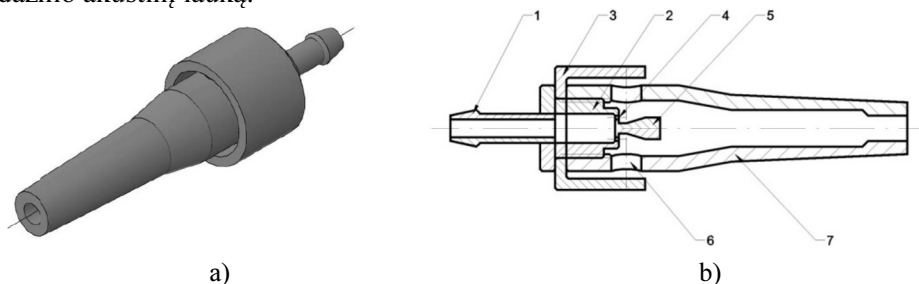
2.5 pav. Akustinis generatorius AAG-1: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.5. Acoustic generator AAG-1: a) overall view, b) longitudinal section

Pirmasis akustinis generatorius AAG-1 pavaizduotas 2.5 paveiksle. Jis susideda iš štucerio (1), šerdies (2), korpuso (3) ir tūtos (4). Pro štucerį (1) paleidžiamas suspausto oro srautas, jį šerdis (2) paskirsto per centrinį (5) ir periferinius kanalus (6). Periferiniais kanalais (6) tiekiamas oras patenka į rezonansinę kamerą (7). Pasiekus tam tikrą kritinį slėgį kameroje (7), suspausto oro srauto pliūpsnis permuša oro srautą, einantį centriniu kanalu (5), ir išeina pro tūtą (4). Po pliūpsnio sumažėjus oro slėgiui rezonansinėje kameroje (7) centriniu kanalu (5) einantis oro srautas atsinaujina ir išeina pro tūtą (4), kol rezonansinėje kameroje (7) pasiekiamas kritinis slėgis. Tada aprašytas ciklas pasikartoja ir tokiu būdu sukuriamos oro srauto pulsacijos, generuojančios akustinį lauką.



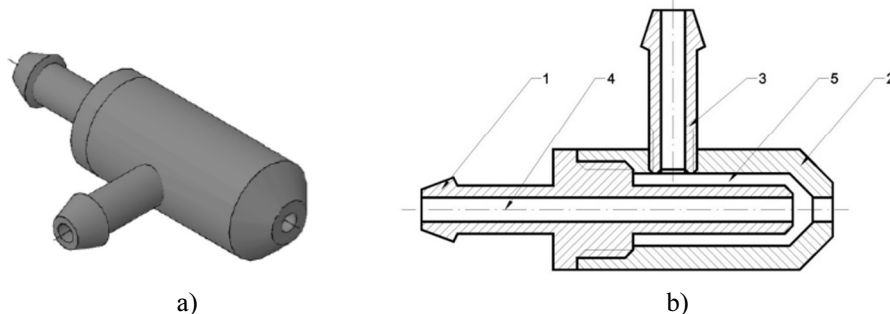
2.6 pav. Akustinis generatorius AAG-2: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.6. Acoustic generator AAG-2: a) overall view, b) longitudinal section

Antrasis akustinis generatorius AAG-2 pavaizduotas 2.6 paveiksle. Jis susideda iš štucerio (1), korpuso (2), tūtos (3) ir dviejų fiksacinių žiedų (4). Suslėgto oro srautas tiekiamas pro štucerį (1) į pirminę kamerą (5). Iš pirminės kameros suslėgtas oras pro platėjančią angą (7) patenka į antrinę akustinio generatoriaus kamerą (6). Dėl platėjančios angos (7) kameroje (6) susidaro oro sūkurių ir slėgio pulsacijos. Antrinėje kameroje (6) susidaro du pseudo srautai (pagrindinis ir antrinis, susidaręs dėl sūkurių kameroje (6), kurie išeina per tūtos (3) angą (8). Išeinančio suslėgto oro srauto slėgio pulsacijos generuoja aukšto dažnio akustinį lauką.



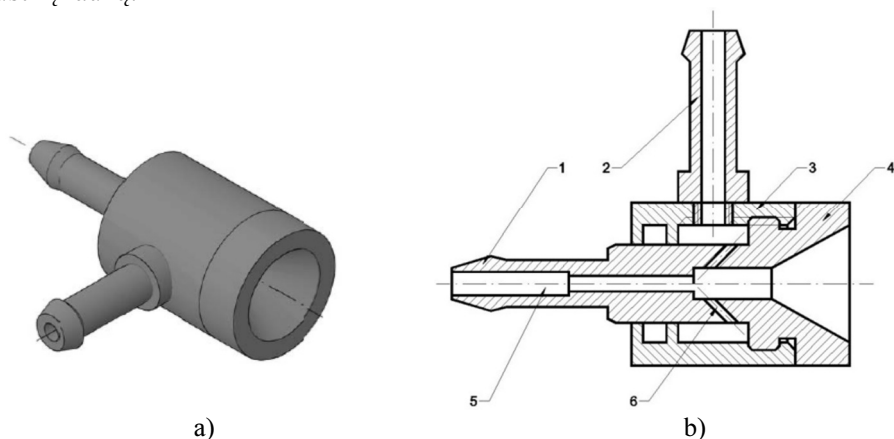
2.7 pav. Akustinis generatorius AAG-3: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.7. Acoustic generator AAG-3: a) overall view, b) longitudinal section

Trečiasis akustinis generatorius AAG-3 pavaizduotas 2.7 paveiksle. Jis susideda iš štucerio (1), difuzoriaus (2), dangčio (3) ir tūtos (7). Suslėgto oro srautas tiekiamas pro štucerį (1) į difuzorių (2). Difuzoriuje (2) pro kiaurymes (4) suslėgto oro srautas, aptekėdamas difuzoriaus liežuvėlį (5), patenka į tūtą (7). Dėl pagrindinio oro srauto tekėjimo pro angas (6) ežkuojamas papildomas oro srautas, kuris susimaišo tūtoje (7) su pagrindiniu suslėgto oro srautu. Liežuvėlis (5) ir laiptuotai siaurėjanti tūta (7) sukelia turbulentinį srautą tūtos (7) viduje, o ištekančys susimaišę oro srautai pro tūtos (7) angą generuoja akustinį lauką.



2.8 pav. Akustinis generatorius AAG-4: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.8. Acoustic generator AAG-4: a) overall view, b) longitudinal section

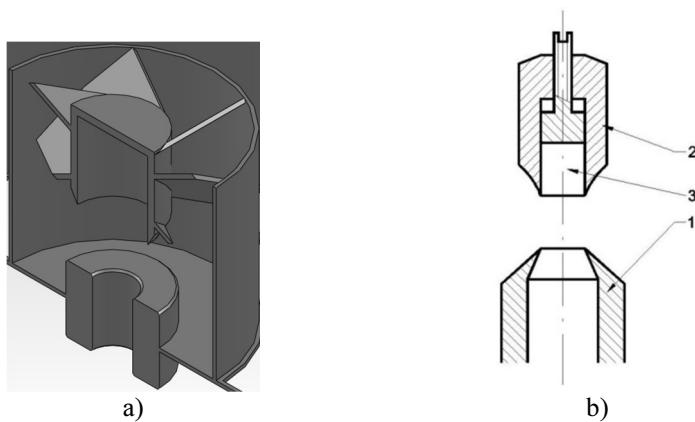
Ketvirtasis akustinis generatorius AAG-4 pavaizduotas 2.8 paveiksle. Jis susideda iš štucerių (1) ir (3) bei tūtos (2). Suslėgto oro srautas per štucerių (1) centriniu kanalu (4) tiekiamas į tūtą (2). Papildomai pro štucerių (3) paduodamas antrinis suslėgto oro srautas, tekėdamas cilindrinio kanalu (5) jis susikerta tūtoje (2) su pagrindiniu suslėgto oro srautu. Susikirtę du suslėgto oro srautai tūtoje sukelia slėgio pulsacijas ir ištekėdami pro tūtos (2) angą generuoja aukšto dažnio akustinį lauką.



2.9 pav. Akustinis generatorius AAG-5: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.9. Acoustic generator AAG-5: a) overall view, b) longitudinal section

Penktasis akustinis generatorius AAG-5 pavaizduotas 2.9 paveiksle. Jis susideda iš štucerių (1 ir 2), korpuso (3) bei tūtos (4). Suslėgto oro srautas pro štucerių (1) centriniu kanalu (5) tiekiamas link tūtos (4). Papildomai pro štucerių (2) tiekiamas antrasis suslėgto oro srautas į korpusą (3). Iš korpuso (3) pro kanalus (6) antrasis oro srautas įstrižai prieš pagrindinį srautą patenka į centrinį kanalą (5). Dėl įstrižų kanalų (6) susikertantys priešprieša srautai sukelia slėgio pulsacijas ir ištekėdami pro tūtą (4) generuoja aukšto dažnio akustinį lauką.

Šeštasis akustinis generatorius AAG-6 pavaizduotas 2.10 paveiksle. Šio generatoriaus konstrukcija susideda iš tūtos (1), rezonatoriaus (2) ir rezonansinės kameros (3). Akustiniame aerodinamiame generatoriujė suslėgto oro srautas išeina iš tūtos (1), periodiškai užpildydamas rezonatorių (2), vėliau oro pliūpsnis, išeinantis iš rezonatoriaus, susiduria su suslėgto oro srautu, išeinančiu iš tūtos. Susiformuoja tankio šuoliai, kurie osciliuodamiesi generuoja aukšto slėgio akustinį lauką. Šio principo aerodinaminį akustinį generatorių sukūrė Hartmanas (Bergmann, 1954).



2.10 pav. Akustinis generatorius AAG-6: a) bendras vaizdas, b) išilginis pjūvis
Fig. 2.10. Acoustic generator AAG-6: a) overall view, b) longitudinal section

Tyrimo rezultatai. Aerodinaminių akustinių generatorių teoriniai skaičiavimai atlikti remiantis 1.7–1.9, 2.1 formulėmis. Skaičiavimo rezultatų skaitinė išraiška pateikta 2.1 lentelėje, grafinė – 2.12 paveiksle.

2.1 lentelė. Aerodinaminių akustinių generatorių teoriniai parametrai
Table 2.1. Theoretical parameters of aerodynamic acoustic generators

Akustinis generatorius	f, Hz	Garso galia, W		
		W_M	W_D	W_K
AAG-1	1,99E+04	3,13E+01	4,51E+01	6,50E+01
AAG-2	4,72E+04	1,76E+02	8,01E+02	3,65E+03
AAG-3	3,71E+03	1,09E+00	1,67E-01	2,57E-02
AAG-4	4,72E+04	1,76E+02	8,01E+02	3,65E+03
AAG-5	2,49E+03	4,89E-01	4,40E-02	3,97E-03
AAG-6	1,38E+02	1,49E-03	2,84E-06	5,38E-09

Skaičiavimo rezultatai rodo, kad didžiausią įtaką aerodinaminių akustinių generatorių skleidžiamam akustinio lauko dažniui ir galiai turi dujų tekėjimo greitis bei spinduliuotuvo išteklėjimo angos skersmuo. Mažiausias angas turintys AAG-2 ir AAG-4 generatoriai teoriškai skleidžia aukšto 47,2 kHz dažnio akustinį lauką. Toks laukas yra daugiau kaip du kartus už žmogaus girdimumo ribos. Taip pat skaičiavimai rodo, kad minėti spinduliuotuvai yra ir galingiausi.

Didelę išteklėjimo angą turintis AAG-6 generatorius teoriškai turėtų spinduliuoti žemu 138 Hz dažniu akustinį lauką. Atitinkamai jo galingumas yra mažiausias.

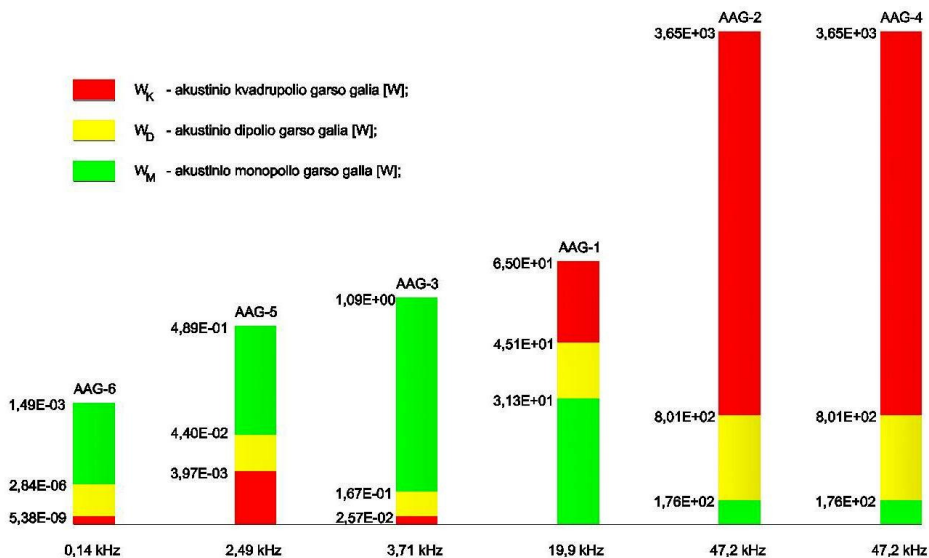
Eksperimentiniams tyrimams buvo panaudota Brüel & Kjær garso matavimo aparatūra 2250 su garso lygio matuoklio programine įranga BZ-7222, dažnio analizavimo programine įranga BZ-7223, duomenų kaupimo programine įranga BZ-7224 ir garso įrašymo opcija BZ-7226. Bandymo aparatūros išdėstymo schema pavaizduota 2.11 paveiksle.



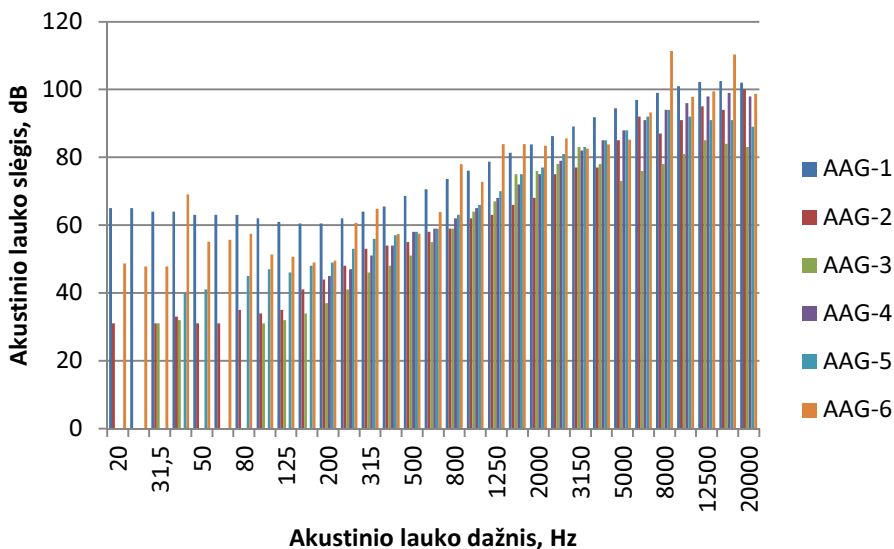
2.11 pav. Matavimo įrangos išdėstymo schema

Fig. 2.11. Layout of measuring equipment

Aerodinaminių akustinių generatorių tyrimo rezultatai pateikti 2.13 paveiksle. Jame pateiktas generatorių palyginimas. Grafike matome, kad AAG-6 akustinis generatorius yra galingiausias iš visų tirtų. Taip pat galime pastebėti, kad garso slėgio pikas, generuojamas šio akustinio spinduliuotuvo, pasikartoja kas 8 kHz, t. y. esant 8, 16 ir, kaip tolimesni tyrimai parodys, 24 kHz. Todėl toliau akustinio ciklono tyrimuose naudosime būtent AAG-6 generatorių.



2.12 pav. Aerodinaminių akustinių generatorių teorinių tyrimų rezultatai, W
Fig. 2.12. The results of theoretical research of aerodynamic acoustic generators, W



2.13 pav. Aerodinaminių akustinių generatorių spinduliuojamas akustinis laukas skirtingais dažniais

Fig. 2.13. The sound pressure of acoustic field emitted by acoustic generators

2.4. Antro skyriaus išvados

1. Aerodinaminių akustinių generatorių prototipų teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų rezultatai skiriasi, nes klasikinė teorinių skaičiavimų metodika neįvertina aerodinaminių akustinių šaltinių konstrukcijos ypatumų. Todėl atliekant skaičiavimus būtina suformuluoti prielaidas ir nustatyti empirinius pataisos koeficientus, įvertinančius aerodinaminių šaltinių konstrukcinį išskirtinumą.

2. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad aerodinaminio generatoriaus efektyvumui įtakos turi ne tik veikimo principas, konstrukcinių elementų dydžių santykis, bet ir šaltinių technologinis išpildymas.

3. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad galingiausias aerodinaminis generatorius – AAG-6, jo rezonansinė kamera buvo didžiausia iš visų tyrimuose dalyvavusių prototipų, o briaunos aštriausios, t. y. nenuimtos nuožulos.

4. AAG-6 spinduliuotuvo skleidžiamas akustinis laukas pasižymi ryškiausiomis garso slėgio pulsacijomis. Garso slėgio pikas pasikartoja kas 8 kHz, t. y. esant 8, 16 ir 24 kHz, ir siekia 110 dB. Taigi, akustinio ciklono prototipui kurti pasirenkame būtent AAG-6 aerodinaminio akustinio generatoriaus prototipą.

Akustinio lauko parametų įtaka dalelių aglomeracijai oro sraute

Skyriuje nagrinėjama akustinio lauko parametų įtaka dalelių aglomeracijai užterštame ciklono oro sraute. Pasiūlytas metodas, leidžiantis įvertinti dalelių elgseną esant skirtingoms akustinio lauko charakteristikoms bei nustatyti efektyvius akustinio lauko parametrus.

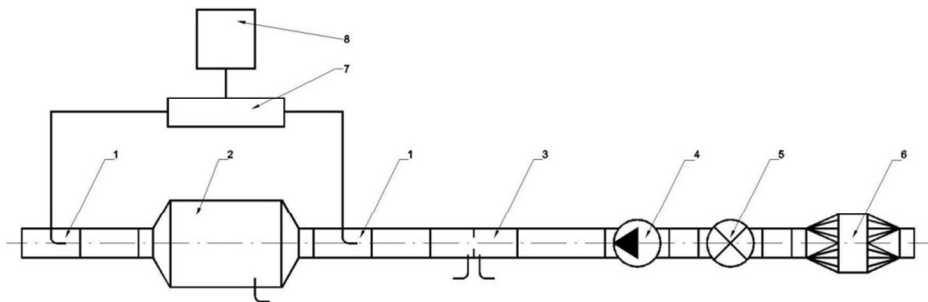
Atlikti eksperimentai patvirtino teorinius tyrimus. Eksperimento metu paimtų bandinių nuotraukos iliustruoja akustinio poveikio rezultatus. Gauti tyrimo rezultatai leido parinkti ir panaudoti aerodinaminius akustinius generatorius kuriant akustinio ciklono prototipą.

Šio skyriaus medžiaga buvo pasklepta autoriaus publikacijose (Vekteris *et al.*, 2011) (Vekteris *et al.*, 2012) leidinyje įtraukta į Thompson ISI sąrašą bei Inspec duomenų bazėje cituojamame žurnale.

3.1. Tyrimų standas

Tirti akustinio lauko parametų įtaką dalelių sukibimui buvo suprojektuotas ir pagamintas specialus standas (3.1 pav.). Jis susideda iš vamzdžių su oro srauto analizatoriais (1), akustinės kameros (2), droselio (3), ventiliatoriaus (4),

dozatoriaus (5), HEPA filtro (6), aerosolinių dalelių diluterio „Ati TDA-D100“ (7) ir dalelių matavimo bei skaičiavimo sistemos „Lasair II“ (8). Stendo schema pavaizduota 3.1 paveiksle.



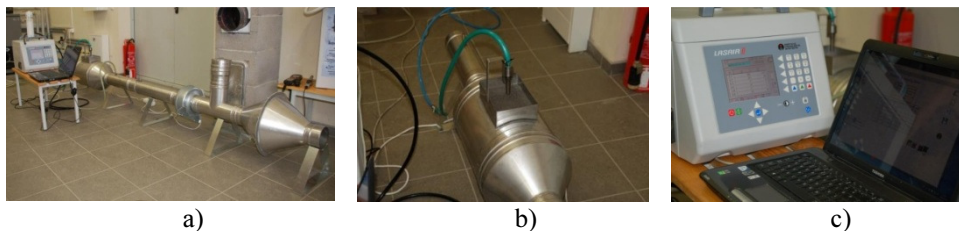
3.1 pav. Eksperimentinio stendo schema: 1 – vamzdis su oro srauto analizatoriais, 2 – akustinė kamera, 3 – droselis, 4 – ventiliatorius, 5 – dozatorius, 6 – HEPA filtras, 7 – aerosolinių dalelių diluteris „Ati TDA-D100“, 8 – dalelių matavimo bei skaičiavimo sistema „Lasair II“

Fig. 3.1. The scheme of experimental stand: 1 – pipe with air flow analyzers, 2 – acoustic chamber, 3 – throttle, 4 – fan, 5 – dispenser, 6 – HEPA filter, 7 – diluter of aerosols “Ati TDA-D100”, 8 – particle detecting and counting system “Lasair II”.

Ventiliatoriumi (4) siurbiamas oras ir pučiamas į HEPA filtrą (6), kuris filtruoja oro sraute esančias daleles iki 5 μm dydžio. Dozatoriumi (5) į išvalytą oro srautą paleidžiamas sumaltas kvarcinis smėlis, kurio smiltelių dydis sudaro iki 5 μm . Toliau oro srautas su kvarcinio smėlio dalelėmis pro droselį (3) juda link akustinės kameros (2). Prieš akustinę kamerą (2) sumontuotas vamzdis su oro srauto analizatoriumi (1). Fiksuojamas dalelių, esančių oro sraute, dydis ir kiekis pagal frakcijas prieš akustinio lauko poveikį. Oro srautas su kvarcinio smėlio dalelėmis patenka į akustinę kamerą (5), kurioje srautas yra veikiamas akustiniu lauku, generuojamu aerodinaminiu akustiniu generatoriumi. Toliau oro srautas, paveiktas akustinio lauko, pro vamzdį su srauto analizatoriumi (1), sumontuotu iškart už akustinės kameros, išteka į aplinką. Dėl dviejų oro srauto analizatorių (1), sumontuotų už akustinės kameros (2) ir prieš ją, galime lyginti dalelių, esančių sraute, dydį ir kiekį pagal frakcijas prieš akustinio lauko poveikį ir po jo. Eksperimentinio stendo nuotraukos pavaizduotos 3.2 paveiksle.

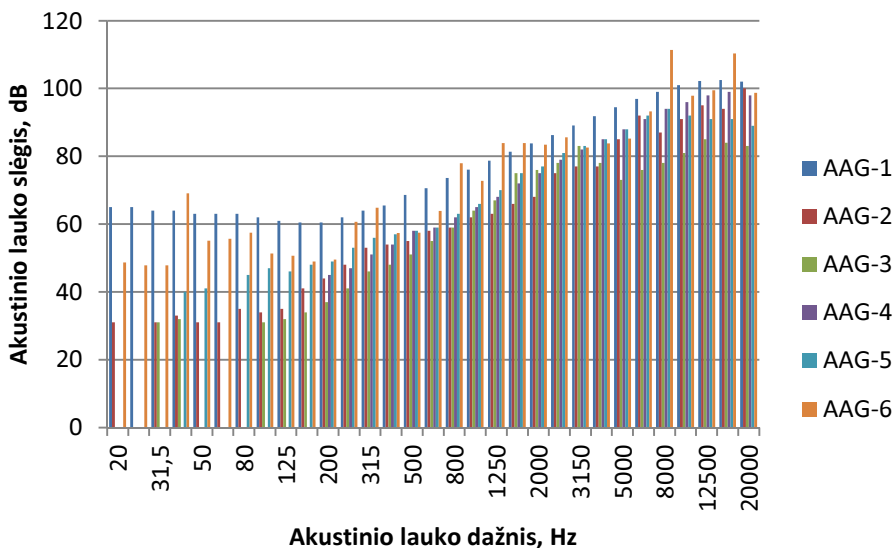
3.2. Horizontalios akustinės kameros eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentas buvo atliekamas su skirtingais aerodinaminiais akustiniais generatoriais. Oro srautas, užterštas kvarcinio smėlio dalelėmis, buvo paveiktas skirtingų parametrų akustiniais laukais. Akustinio lauko lygis akustinėje kameroje pavaizduotas 3.3 paveiksle. Jame pateiktas generatorių palyginimas. Grafike matome, kad AAG-6 akustinis generatorius yra galingiausias iš visų tirtų.



3.2 pav. Eksperimentinis stendas: a) bendras vaizdas, b) akustinė kamera, c) matavimo įranga

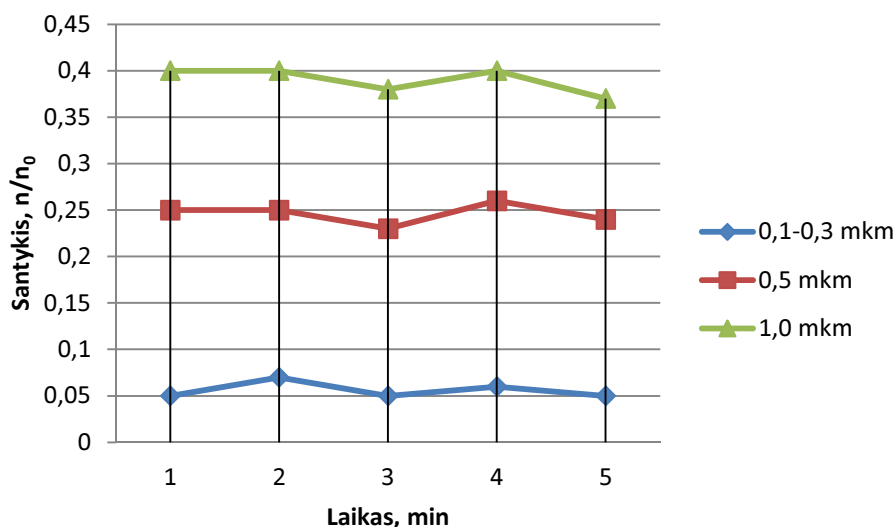
Fig. 3.2. Experimental stand: a) overall view, b) acoustic chamber, c) measuring equipment



3.3 pav. Akustinio lauko lygis akustinėje kameroje

Fig. 3.3. The pressure of acoustic field in acoustic chamber

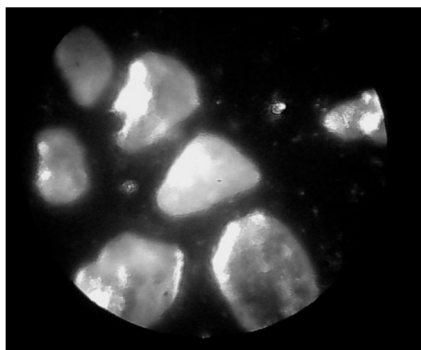
Eksperimento metu buvo tiriama dalelių koncentracijos oro sraute pokytis esant skirtingiems akustinių laukų parametrams. Eksperimento rezultatai parodė, kad skirtingų dydžių dalelių koncentracija kito skirtingai. 3.4 paveiksle pavaizduotas skirtingų dydžių dalelių koncentracijos pokytis oro sraute. Pastebėta, kad kuo dalelės smulkesnės, tuo jų koncentracijos pokytis buvo mažesnis, ir atvirkščiai – kuo dalelės stambesnės, tuo jų koncentracijos pokytis prieš akustinio lauko poveikį ir po jo buvo didesnis. Vienu ir kitu atveju dalelių koncentracija po akustinio lauko poveikio mažėjo. Tai leidžia daryti prielaidą, kad dalelės, veikiamos akustinio lauko, įgauna poslinkį viena kitos atžvilgiu ir, priartėjusios viena prie kitos, sulimpa. Tokiu būdu vyksta dalelių aglomeracija, dalelės stambėja ir sunkėja, kartu kinta jų kiekis, priklausomai nuo dalelės dydžio.



3.4 pav. Skirtingų dydžių dalelių koncentracijos pokytis oro sraute: n_0 – dalelių kiekis 1 m^3 prieš akustinio lauko poveikį, n – dalelių kiekis 1 m^3 po akustinio lauko poveikio

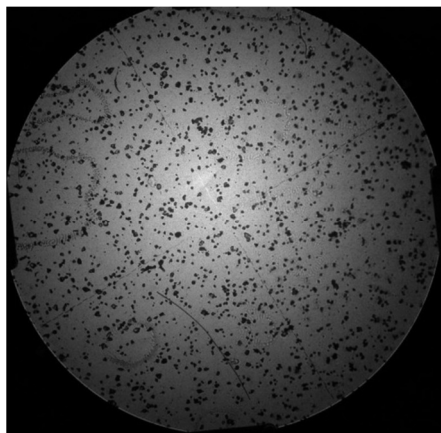
Fig. 3.4. The alteration of different size particles' concentration in air flow: n_0 – the amount of particles 1 m^3 before impact of acoustic field, n – the amount of particles 1 m^3 after impact of acoustic field

Eksperimento metu taip pat buvo paimti dalelių mėginiai prieš akustinio lauko poveikį ir po jo. Mėginiai buvo tiriami mikroskopu. Nuotraukos, padarytos naudojant mikroskopą, pateiktos 3.5–3.8 paveiksluose.

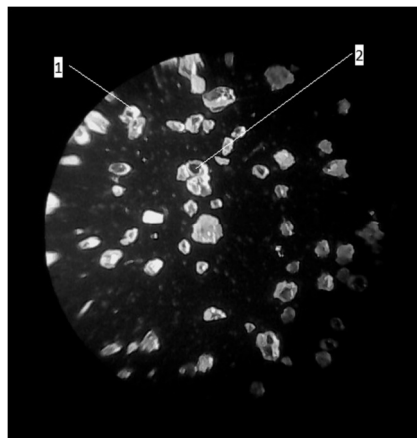


3.5 pav. Kvarcinio smėlio (SiO_2) dalelių vaizdas pro mikroskopą prieš akustinio lauko poveikį

Fig. 3.5. View of Quartz sand (SiO_2) particles before impact of acoustic field



a)

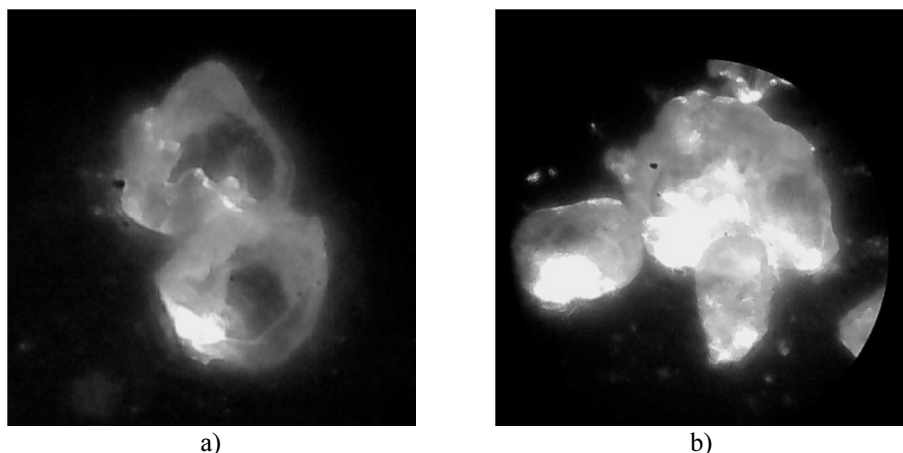


b)

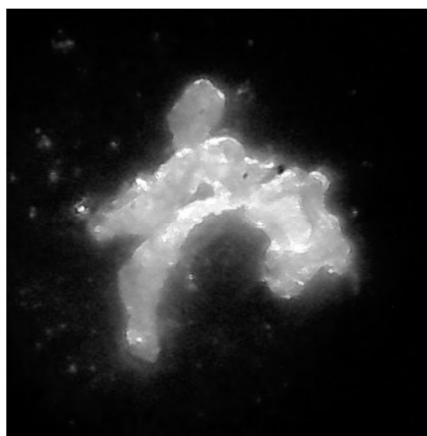
3.6 pav. Kvarcinio smėlio dalelių agregacija po akustinio lauko poveikio: a) vaizdas padidintas 20 kartų, b) vaizdas padidintas 200 kartų: 1 – dviejų dalelių agregacija, 2 – trijų dalelių agregacija

Fig. 3.6. Aggregation of Quartz sand particles after impact of acoustic field: a) view magnified 20 times, b) view magnified 200 times: 1 – aggregation of two particles, 2 – aggregation of three particles

3.5 paveiksle pavaizduotos kvarcinio smėlio dalelės oro sraute prieš akustinio lauko poveikį. Dalelės yra nesukibusios, tuo tarpu 3.6-3.7 paveiksluose stebima dalelių aglomeracija po akustinio lauko poveikio. Dalelių aglomeracijos intensyvumas priklauso nuo veikiamo akustinio lauko parametrų bei dalelių savybių: dydžio, tankio, medžiagos, drėgnumo, elektrostatinių savybių ir kt.



3.7 pav. Kvarcinio smėlio dalelių agregacija po akustinio lauko poveikio (vaizdas padidintas 600 kartų): a) dviejų dalelių agregacija, b) trijų dalelių agregacija
Fig. 3.7. Aggregation of Quartz sand particles after impact of acoustic field (view magnified 600): a) aggregations of two particles, b) aggregations of three particles



3.8 pav. Netaisyklingos formos kvarcinio smėlio (SiO_2) dalelė
(vaizdas padidintas 600 kartų)

Fig. 3.8. Irregular shape of Quartz sand (SiO_2) particle (view magnified 600)

Didžioji smulkių dalelių sukibimo teorinių tyrimų dalis buvo atlikta darant prielaidą, kad dalelė yra sferinės formos. Nuotraukose galima matyti įvairių formų daleles, tačiau praktiškai taisyklingos sferinės formos dalelių nesurasime. Todėl vertinant teorinių tyrimų rezultatus būtina papildomai įvertinti ir galimas tokių tyrimų paklaidas dėl dalelių netaisyklingos formos. Vienas iš ryškesnių netaisyklingos formos dalelių pavyzdžių pateiktas 3.8 paveiksle.

3.3. Trečio skyriaus išvados

1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad dalelių koncentracija užteršto oro sraute po akustinio lauko poveikio mažėjo.

2. Veikiant užterštą oro srautą girdimo diapazono akustiniu lauku, skirtingų frakcijų dalelių koncentracija kito skirtingai: smulkesnių dalelių (nuo 0,1 iki 0,5 μm) pokytis buvo mažesnis už stambesnių (nuo 0,5 iki 1,0 μm). Pokyčio santykis n/n_0 svyravo nuo 0,05 iki 0,4.

3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai patvirtino literatūros šaltinių analizės rezultatus. Dalelės oro sraute, veikiamos akustinio lauko, įgauna poslinkį viena kitos atžvilgiu, suartėja, susiduria ir sukimba – įvyksta akustinė aglomeracija.

4. Daugeliu atvejų teoriniuose ultrasmulkių dalelių sąveikos tyrimuose vadovaujamosi prielaida, kad dalelės yra taisyklingos sferinės formos. Tačiau mikroskopinė dalelių analizė parodė, kad dalelės yra įvairių, netaisyklingų formų. Taigi, teoriniuose tyrimuose būtina įvertinti netaisyklingos formos įtaką dalelių tarpusavio sąveikai.

Akustinio ciklono eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai

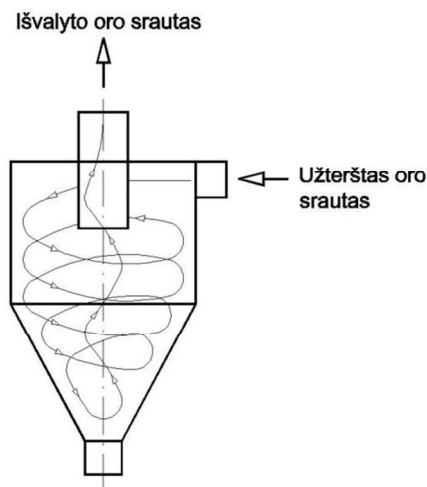
Skyriuje pateikti naujai sukurto ir pagaminto akustinio ciklono prototipo eksperimentiniai tyrimai. Jie atlikti matuojant oro srautų ciklone parametrus esant antriniam priešpriešiniam oro srautui ir jo nesant. Aprašytas skaitinių tyrimų metodas, kuriuo buvo sumodeliuotos ir vizualiai pateiktos oro srautų ciklone trajektorijos. Atlikta srautų skaitinė simuliacija leido lengviau suprasti akustiniame ciklone vykstančius procesus. Nustatytas akustinio ciklono valymo efektyvumas ir antrinio priešpriešinio oro srauto bei akustinio generatoriaus įtaka jam.

Šio skyriaus medžiaga buvo pasklepta autoriaus publikacijose (Vekteris *et al.*, 2012) leidinyje įtrauktame į Thompson ISI sąrašą bei ISI Proceedings medžiagoje.

4.1. Procesai vykstantys akustiniame ciklone

Procesai, vykstantys ciklonuose, yra gana sudėtingi ir priklauso nuo daugelio faktorių (Štokman, 1998). Dalelės, esančios besisukančiame ciklono oro sraute (4.1 pav.), yra veikiamos sunkio, išcentrinės ir pasipriešinimo jėgų. Sunkio ir

pasipriešinimo jėgos santykinai mažos išcentrinų jėgų atžvilgiu, todėl teigiame, kad oro valymas ciklonuose yra paremtas išcentrinų jėgų poveikiu dalelėms. Tačiau ultrasmulkių dalelių srauto charakteristikos labai skiriasi nuo stambių, ne adhezinių dalelių srauto. Ultrasmulkių dalelių tarpusavio sąveikos jėgos yra daug didesnės už gravitacijos ar inercijos (Li, 2011). Norint tokias daleles atskirti iš valomo oro srauto, būtina jas sustambinti, t. y. aglomeruoti. Šiam tikslui naudosime aerodinaminį akustinį lauką, kurį generuos integruotas akustinis generatorius, apatinėje siauriausioje akustinio ciklono dalyje.



4.1 pav. Oro srauto judėjimas ciklone

Fig. 4.1. The movement of air flow in the cyclone

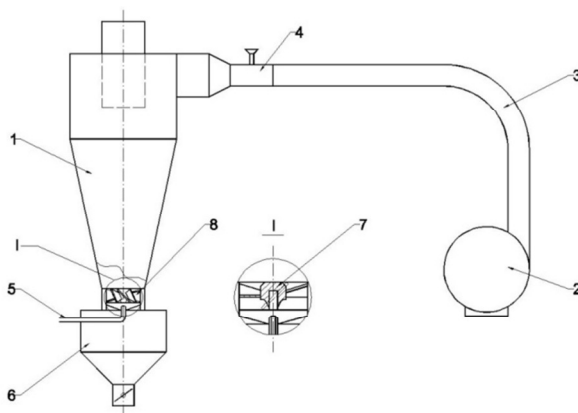
Užterštas oro srautas dideliu greičiu liestine įpučiamas į cilindrinę ciklono korpuso dalį. Srauto judėjimas įgauna žemyn einančios spiralės formą. Dažniausiai išcentrinis pagreitis ciklone būna keletą šimtų arba net tūkstančių kartų didesnis už laisvojo kritimo pagreitį. Todėl dalelės negali judėti oro srauto trajektorija ir, paveiktos išcentrinų jėgų, yra išmetamos iš oro srautų trajektorijos kreivių ciklono sienelės link (Vatin, Strelec, 2003). Atsitrenkusios į sienelę, dalelės praranda kinetinę energiją ir, veikiamos sunkio jėgos, nukrenta į ciklono dulkių surinkimo bunkerį apačioje.

4.2. Oro srautų ciklonuose tyrimų stendas

Eksperimentinis stendas (4.2–4.3 pav.) susideda iš akustinio ciklono 1, ventiliatoriaus 2, oro tiekimo vamzdžio 3, dozatoriaus 4, suslėgto oro tiekimo vamzdžio 5, bunkerio 6 ir aerodinaminio akustinio generatoriaus 7.

Iš ventiliatoriaus 2 oro srautas pro vamzdį 3 tiekiamas į cikloną 1. Tarp tiekimo vamzdžio 3 ir ciklono 1 sumontuotas dozatorius 4, pro kurį į oro srautą įpučiamas kvarcinis smėlis. Iš srauto atskirtas kvarcinis smėlis išbyra į surinkimo bunkerį 6. Šiuo atveju ciklonas buvo eksperimentiškai tiriamas be antrinio srauto.

Antruoju atveju į cikloną pro tiekimo vamzdį 5 įpučiamas suslėgto oro srautas. Suslėgtas oras patenka į akustinio generatoriaus atspindėtuvą 7, kuriame vyksta oro slėgio pulsacijos. Antrinis oro srautas pulsuodamas išeina pro srautą užsukančias mentes 8 ir tada jo sūkurys, besisukantis priešinga pagrindiniam srautui kryptimi, kyla į viršų.



4.2 pav. Akustinio ciklono eksperimentinis stendas: 1 – akustinis ciklonas, 2 – ventiliatorius, 3 – oro tiekimo vamzdis, 4 – dozatorius, 5 – suslėgto oro tiekimo vamzdis, 6 – surinkimo bunkeris, 7 – aerodinaminis akustinis generatorius, 8 – srautą užsukančios mentės

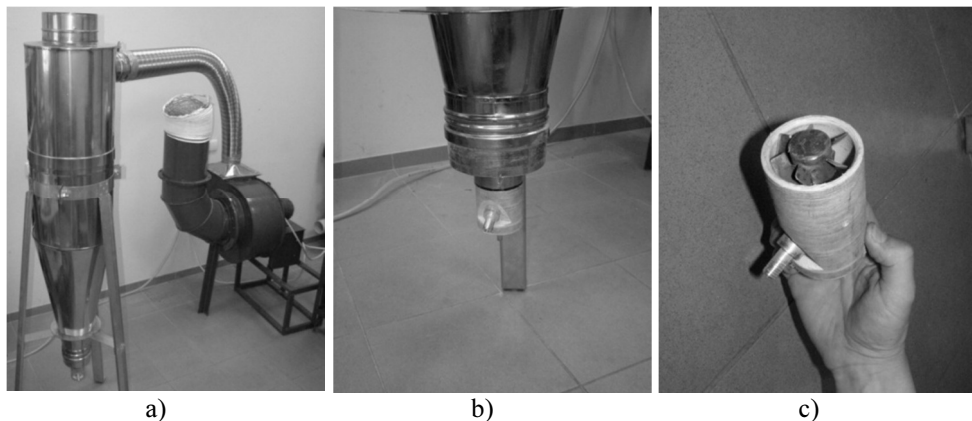
Fig. 4.2. The experimental stand of acoustic cyclone: 1 – acoustic cyclone, 2 – fan, 3 – air inlet pipe, 4 – dispenser, 5 – compressed air inlet pipe, 6 – bunker, 7 – aerodynamic acoustic generator, 8 – static fan

4.3. Oro srautų akustiniame ciklone eksperimentiniai tyrimai

Ciklono bandymus rekomenduojama atlikti taikant vidutinį oro srauto užterštumo dispersiškumą. Pasaulinėje praktikoje ciklono tyrimams dažniausiai naudojamas kvarcinis smėlis (Vatin, Strelec, 2003).

Eksperimentiniai tyrimai ciklono valymo efektyvumui nustatyti buvo atliekami dviem etapais: pirmu – oro srautai matuoti be antrinio priešpriešinio

oro srauto tiekimo, antru – tiekiant antrinę priešpriešinę oro srautą. Pagrindinio oro srauto debitas – $500 \text{ m}^3/\text{h}$, antrinio – $18 \text{ m}^3/\text{h}$.



4.3 pav. Akustinio ciklono eksperimentinis stendas: a) bendras vaizdas, b) integruotas AAG, c) AAG su srautą užsukančiomis mentėmis

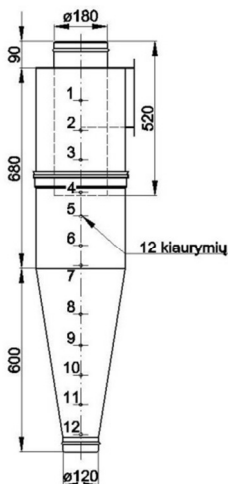
Fig. 4.3. The experimental stand: a) overall view, b) integrated AAG, c) AAG with static fan

Pagaminto ciklono sienelėse papildomai buvo išgręžtos kiaurymės, pro kurias galima įkišti Pito vamzdelį oro srauto matavimams atlikti (4.2 pav.). Matavimams buvo naudojama „TESTO“ firmos įranga: anemometrai „Testo 512“ ir lenktas Pito vamzdelis (4.3 pav.). Tokia matavimo įranga pasirinkta dėl paprastumo ir nedidelių matavimų paklaidų; lazerinės matavimo priemonės yra sudėtingos, brangios ir dar nėra įvertintos neapibrėžčių sandais.

Pro kiekvieną kiaurymę buvo kišamas lenktas Pito vamzdelis ir skirtingais laiko tarpais jį pasukant matuojamas oro srautas keturiomis kryptimis. Matavimai buvo pradėti ties ciklono korpuso sienie (4 mm nuo sienelės) ir tada matuota kas 30 mm link centrinės ciklono ašies. Tokiu būdu buvo fiksuojamas oro srauto ciklone greitis ir slėgis.

Matavimo metu surinkti duomenys buvo pavaizduoti grafiškai, nubraižytos srautų greičio epiūros išilgai ir skersai centrinės ciklono ašies atžvilgiu. Oro srauto greičio epiūros pavaizduotos 4.6 paveiksle. Rodyklės šalia kreivių nurodo oro srauto kryptį.

Analizuodami kreives bendriniu atveju galime teigti, kad maksimalios srauto greičio reikšmės užfiksuotos nuo 4 iki 90 mm nuo ciklono korpuso sienelės. Toliau artėjant link ciklono centrinės ašies srauto greitis stipriai mažėja ir ties ašimi 30 mm spinduliu radialinis srautas išnyksta, tačiau atsiranda ašinys (vertikalia kryptimi).



4.4 pav. Eksperimentinis ciklonas

Fig. 4.4. The experimental cyclone



a)



b)

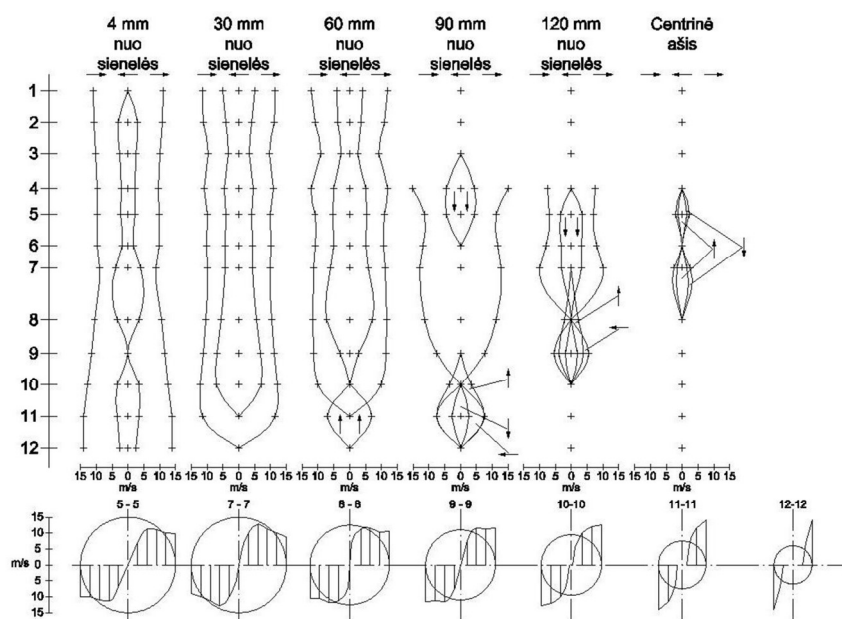
4.5 pav. Matavimo įranga: a) anemometras „Testo 416“, b) Pito vamzdelis

Fig. 4.5. Measurement equipment: a) anemometer „Testo 416“, b) Pitot pipe

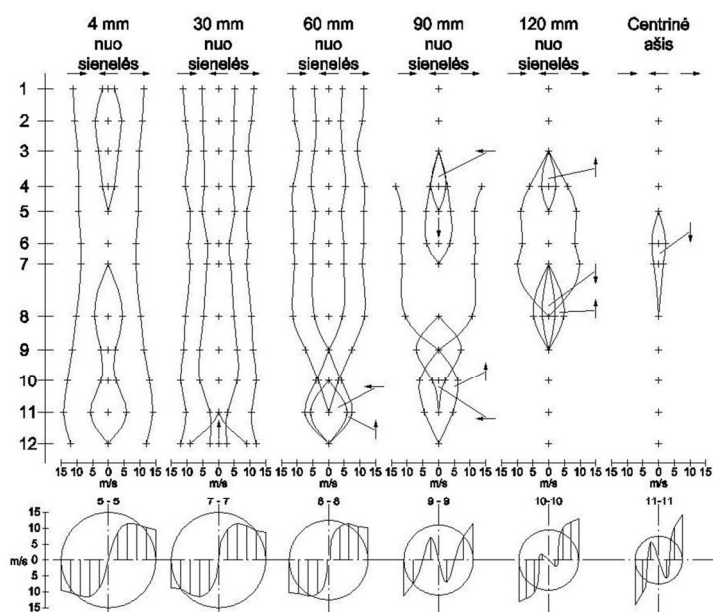
Verta paminėti, kad beveik visuose ciklono matavimo taškuose buvo užfiksuotas priešpriešinys (pagrindinio srauto krypties atžvilgiu) vidutiniškai tris kartus lėtesnis srautas. Todėl galime daryti prielaidą, kad srautas ciklone yra nenusistovėjęs.

Pagrindinis srautas dominuoja cilindrinėje ciklono dalyje ir pirmu (nesant antrinio srauto), ir antru (esant antriniam srautui) atveju. Tačiau, einant žemyn, kūginėje ciklono dalyje vaizdas keičiasi. Pirmuoju atveju greičių skersinių epiūrų forma išlieka panaši visuose pjūviuose, tačiau matuojat srautus esant antriniam priešpriešiniam srautui greičių skersinės epiūros nuo 9–9 iki 12–12 pjūvių pasikeičia, lyginant su aukštesniais pjūviais ir su pirmuoju atveju, tuose pačiuose pjūviuose. Akustiniame ciklone esant antriniam priešpriešiniam srautui pjūviuose nuo 12–12 iki 9–9 susiformuoja priešpriešinys sūkurinis srautas pagrindinio sūkurio atžvilgiu. Kylant aukštyje pjūviais priešpriešinys sūkurys praranda savo kinetinę energiją ir pasiduoda pagrindinio srauto įtakai

Sudėtingiausios srauto trajektorijos buvo stebimos pjūviuose nuo 9–9 iki 11–11. Šioje zonoje matavimų metu buvo fiksuojami srautai visomis kryptimis. Galime teigti, kad ciklono apatinėje kūginės dalies dalyje vyksta chaotiškas oro srauto judėjimas.



a)



b)

4.6 pav. Srautų greičio epiūros: a) tradiciniame ciklone, b) akustiniame ciklone
 Fig. 4.6. The chart of air flow velocity: a) in classic cyclone, b) in acoustic cyclone

Lygindami srauto greičio reikšmes galime teigti, kad pirminiu ir antriniu atvejais pagrindinių srautų greitis mažai skiriasi – iki 1,4 proc.

Visais atvejais lyginant srautų radialinius greičius su ašiniais (vertikalia kryptimi) galima prieiti prie išvados, kad minėti greičiai skiriasi 3 kartus ir daugiau. Tai dar kartą patvirtina ciklono veikimo principą – dalelės atskiriamos iš užteršto oro srauto dėl jas veikiančių išcentrinių jėgų. Dalelės, atsitrenkdamos į ciklono sienelės, praranda kinetinę energiją ir nukrenta žemyn į joms surinkti skirtą bunkerį. Į viršų tekantis srautas, kurio greitis siekia iki 4 m/s, negali išnešti dalelių, buvusių pagrindiniame sraute.

4.4. Akustinio ciklono valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai

Ir oro srautų ciklone eksperimentinių tyrimų, ir ciklono valymo efektyvumo tyrimo metu buvo eksperimentiškai nagrinėjamas akustinis ciklonas esant antriniam srautui su aktyvintu akustiniu generatoriumi ir nesant antrinio srauto su neaktyvintu akustiniu generatoriumi.

Akustinio lauko ciklone matavimams buvo naudojama Bruel & Kjaer virpesių matavimo sistema „Type 9727“. Ji susideda iš mašinų diagnostikos įrankių dėžės, universalios programinės įrangos „Type 7910“, daugiakanalio duomenų bloko „Type PULSE 3560-B“, nešiojamojo „Dell“ asmeninio kompiuterio bei mikrofono „TC 4013“ (4.7 pav.).



a)



b)

4.7 pav. Virpesių matavimo sistema „Type 9727“: a) mašinų diagnostikos įrankių dėžė, b) mikrofonas „TC 4013“

Fig. 4.7. Oscillation measurement system “Type 9727”: a) machine diagnostics toolbox, b) microphone „TC 4013“

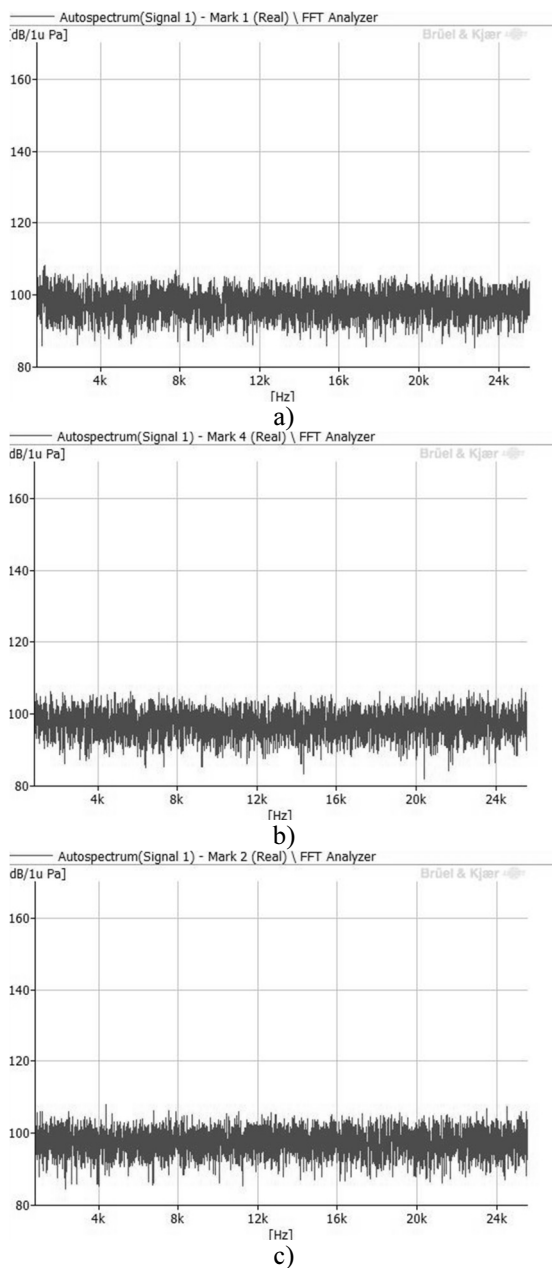
Virpesių matavimo sistema matuoja ir fiksuoja virpesius. Juos fiksuoja sensorius, įmontuotas akustinio lauko zonoje. Programine įranga analizuojami sensoriaus užfiksuoti virpesių dažniai ir amplitudės laiko atžvilgiu. Iš gautų duomenų ir jų analizės išvedami akustinio lauko parametrai.

Buvo išmatuotas akustinis fonas ciklone trimis pjūviais (4.8 pav.). Vėliau buvo suaktyvintas aerodinaminis akustinis generatorius ir išmatuotas akustinis fonas ciklone veikiant akustiniam generatoriui. Skleidžiamas generatoriaus akustinis laukas ciklone buvo matuojamas tuose pačiuose trijuose pjūviuose (4.9 pav.).

Iš pateiktų diagramų galime matyti, kad ventiliatoriaus skleidžiamas akustinio triukšmo lygis yra stabilus visame garso diapazone visuose matuotuose pjūviuose ir sudaro $\sim 100 \text{ dB} \pm 10 \text{ dB}$. Akustiniame ciklone akustinis laukas nėra toks stabilus. Garso lygis vidutiniškai sudaro apie 120 dB, tačiau iš karto į akis krinta garso lygio pikai kas 8 kHz, t. y. esant 8, 16 ir 24 kHz. Piko metu garso slėgio amplitudė siekia iki 170 dB. Todėl galima teigti, kad oro slėgio pulsacijos aerodinaminiam akustiniame generatoriuje vyksta 8 kHz dažniu. Didžiausia amplitudė užfiksuota arčiausiai akustinio lauko šaltinio, t. y. 12–12 pjūvyje. Aukštesniuose pjūviuose atitinkamai garso slėgio amplitudė mažėja.

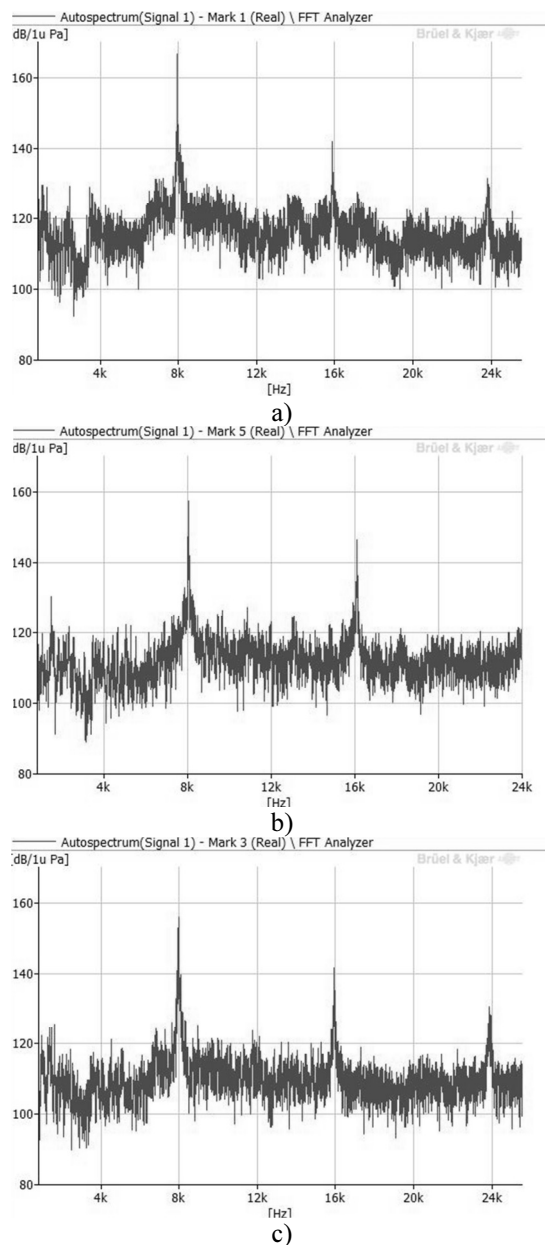
Išmatavę akustinio lauko stiprumą ciklone perėjome prie ciklonų valymo efektyvumo nustatymo. Tiekiant oro srautą (4.1 pav.) iš ventiliatoriaus (2) į cikloną (1), pro dozatorių (4) buvo įpūstas tam tikras kvarcinio smėlio kiekis. Tada buvo tikrinamas surinkimo bunkeris (6), t. y. buvo sveriamas su svarstyklėmis „БЭЛ-4“, kurių padalos vertė – 0,001 g, kvarcinio smėlio kiekis surinkimo bunkeryje. Žinodami tikslų įpūsto į oro srautą kvarcinio smėlio kiekį ir pasvėrę surinktą, skaičiavome ciklonų valymo efektyvumą.

Aprašytas eksperimentas buvo atliekamas su tradiciniu ciklonu, t. y. nesant papildomo antrinio priešpriešinio srauto ir akustinio lauko poveikio užterštam oro srautui. Vėliau buvo tiriamas akustinis ciklonas pagal aukščiau aprašytą principą esant skirtingiems antrinio priešpriešinio srauto debitams ir akustinio lauko dažniams. Valymo efektyvumo eksperimento metu gauti rezultatai pateikti 4.10–4.11 paveiksluose.



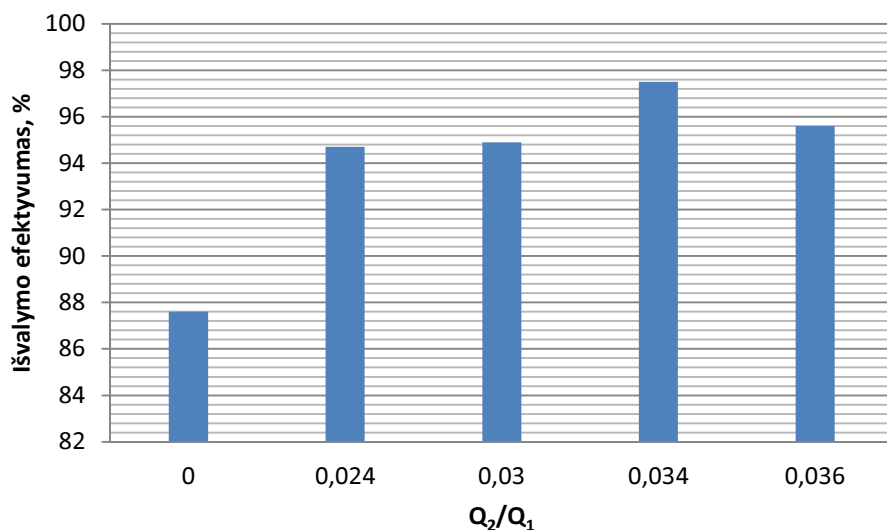
4.8 pav. Akustinis laukas ciklono viduje: a) 12–12 pjūvyje, b) 7–7 pjūvyje, c) 5–5 pjūvyje

Fig. 4.8. Acoustic field inside cyclone: a) 12–12 section, b) 7–7 section, c) 5–5 section



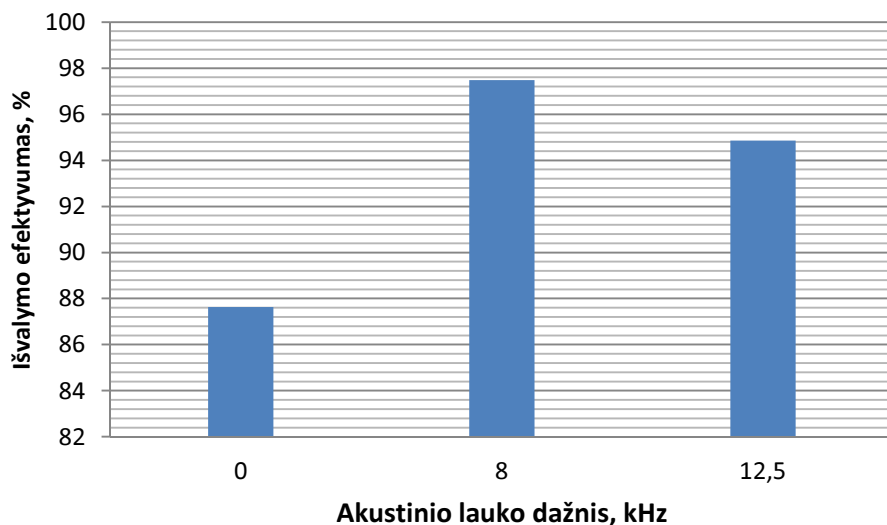
4.9 pav. Akustinis laukas akustinio ciklono viduje aktyvavus AAG: a) 12–12 pjūvyje, b) 7–7 pjūvyje; c) 5–5 pjūvyje

Fig. 4.9. Acoustic field inside cyclone with activated AAG: a) 12–12 section, b) 7–7 section, c) 5–5 section



4.10 pav. Išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo Q_2/Q_1 : Q_1 – pagrindinis oro srautas, Q_2 – antrinis oro srautas

Fig. 4.10. Dependence of cleaning efficiency upon Q_2/Q_1 : Q_1 – the primary air flow, Q_2 – the secondary air flow



4.11 pav. Išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo akustinio lauko dažnio

Fig. 4.11. Dependence of cleaning efficiency upon acoustic field's frequency

Tradicinio ciklono valymo efektyvumas svyravo nuo 82,9 iki 90,2 proc., vidutiniškai – 87,2 proc., o akustinio – nuo 97,1 iki 98,0 proc., vidutiniškai – 97,5 proc. Todėl galima teigti, kad antrinio srauto ir akustinio lauko poveikis stipriai padidina ciklono valymo efektyvumą.

4.10 paveiksle nustatyta išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo pagrindinio (pirminio) oro srauto Q_1 ir priešpriešinio (antrinio) oro srauto Q_2 santykio Q_2/Q_1 .

Didžiausias akustinio ciklono efektyvumas pasireiškė veikiant užterštą oro srautą 8 kHz dažnio akustiniu lauku (4.11 pav.). Taip pat eksperimento metu pastebėta, kad didžiausias akustinio generatoriaus efektas pasireiškė atskiriant stambesnes daleles. Atskiriant smulkiausias daleles (mažesnes kaip 1 μm) reikėtų naudoti ultragarsinį akustinį generatorių.

4.5. Skaitiniai tyrimai

Skaitmeniniai tyrimai atlikti taikant specialią programinę įrangą „SolidWorks 2011 SP2.0, Flow Simulation 2011 2.0. Build 1525“. Flow Simulation sprendžia Navjė-Stokso lygtis, kurios aprašo judesio kiekio, masės tvermės dėsnius, veikiančius oro srautus. Lygtys yra papildytos srautų būvio lygtimis, apibrėžiančiomis skysčio savybes, ir srautų tankio, klampos bei šilumos laidumo empirinėmis priklausomybėmis. Ypatinga problema yra tiksliai nustatyti geometrines apibrėžtis, kraštines ir pradines sąlygas.

Flow Simulation programinė įranga yra pajėgi numatyti ir laminarinį, ir turbulentinį srautus. Dauguma skysčių srautų, su kuriais susiduriama inžinerinėje praktikoje, yra turbulentiniai. Flow Simulation iš esmės buvo sukurtas imituoti ir tyrinėti turbulentinius srautus. Jiems nustatyti yra naudojamos Favre suvidurkintos Navjė-Stokso lygtys, kuriose atsižvelgiama į turbulentinio srauto laiko vidurkio įtaką srauto parametrų, į kitus didelio masto nuo laiko priklausančius reiškinius yra atsižvelgiama tiesiogiai. Šios procedūros metu lygtyse atsiranda papildomų narių, žinomų kaip Reinoldso įtempimai, kurie reikalauja papildomos informacijos. Šiai lygčių sistemai užbaigti srauto modeliavimo metu naudojamos transporto lygtys turbulentinei kinetinei jėgai ir jos išsklaidymo koeficientui, vadinamajam k - ϵ modeliui, apskaičiuoti.

„Flow Simulation“ naudoja vieną lygčių sistemą tiek laminariniams, tiek turbulentiniams srautams aprašyti. Be to, įmanomas perėjimas iš laminarinės būsenos į turbulentinę ir / arba atvirkščiai.

4.5.1. Skaitiniai modeliai

Srautai modeliuose yra apskaičiuojami nustatant atitinkamas kraštines sąlygas.

Masės, kampinio judėjimo ir energijos tvermės dėsniai Dekarto koordinatų sistemoje gali būti užrašyti tvermės forma tokiu pavidalu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i i = 1, 2, 3, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (4.3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2},$$

čia: u – srauto greitis, ρ – srauto tankis, S_i – išorinė masės pasiskirstymo jėga per masės vienetą, h – šiluminė entalpija, Q_H – šilumos šaltinis tūrio vienetui, τ_{ik} – klampios šlyties įtempimų tenzorius, q_i – difuzinis šilumos srautas.

Niutoniniams skysčiams klampios šlyties įtempimų tenzorius apibrėžiamas kaip:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad (4.4)$$

Remiantis *Boussinesq* prielaida, Reinoldso įtempimų tenzorius išraiška tokia:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4.5)$$

čia: δ_{ij} – Kronekerio delta funkcija (ji lygi vienetui, kai $i = j$, kitu atveju lygi nuliui), μ – dinaminės klampos koeficientas, μ_t – turbulentinio sukūrio klampos koeficientas, k – turbulencijos kinetinė energija (μ_t ir k , kai tekėjimas laminarinis, lygūs nuliui). Turbulentinio modelio k - ε rėmuose μ_t charakterizuojamas dviem pagrindinėmis turbulencijos savybėmis: turbulencijos kinetine energija k ir turbulencijos disipacija ε ,

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (4.6)$$

čia: f_μ – turbulencijos klampos faktorius. Jis apibrėžiamas:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0,025 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T} \right), \quad (4.7)$$

čia: $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$, $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$, y – atstumas iki sienos.

Ši funkcija mums leidžia įvertinti laminarinio ir turbulentinio tekėjimo režimų perėjimą.

Dvi papildomos pernešimo lygtys yra naudojamos siekiant įvertinti turbulencijos kinetinę energiją ir disipaciją:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon, \quad (4.9)$$

čia: S_k ir S_ε yra apibrėžiama:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (4.10)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}. \quad (4.11)$$

čia: P_B – turbulencijos generavimas dėl plūdumo jėgų ir gali būti išreikštas kaip

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad (4.12)$$

čia: g_i – laisvojo kritimo pagreičio komponentė x_i kryptimi, konstanta $\sigma_B = 0.9$, konstanta C_B apibrėžiama kaip: $C_B = 1$, kai $P_B > 0$, ir $C_B = 0$, kai $P_B < 0$;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2), \quad (4.13)$$

Konstantos C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε yra apibrėžtos empiriškai. „Flow Simulation“ programinėje įrangoje minėtos konstantos turi šias reikšmes:

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.3, \quad \sigma_\varepsilon = 1. \quad (4.14)$$

Kur Lewis skaičius $Le = 1$, difuzinis šilumos srautas aprašomas:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.15)$$

čia: konstanta $\sigma_c = 0.9$, Pr – Prandtl'o skaičius, h – šiluminė entalpija.

Šios lygtys apibrėžia ir laminarinį, ir turbulentinį tekėjimus. Be to, yra įmanomas perėjimas iš vieno tekėjimo režimo į kitą ir atgal. Parametrai k ir μ_t yra lygūs nuliui tik tada, kai tekėjimo režimas laminarinis.

Skaitinis sprendimo metodas, naudojamas modeliuojant srautą, yra aiškus ir patikimas. Vis dėlto kartais, jei modelis ar / ir sprendžiamas uždavinys yra sudėtingi, standartinis „Flow Simulation“ skaitinis sprendimo būdas reikalauja ypač didelių kompiuterio resursų (atminties ir / arba CPU laiko). Tuomet tikslinga pasinaudoti srauto modeliavimo alternatyvomis, kurios leidžia pritaikyti automatiškai nustatytus parametrų dydžius, valdančius skaitinį sprendimo metodą.

Iš esmės „Flow Simulation“ sprendžia pagrindines lygtis baigtinių tūrių FV (finite volume) metodu erdviniam stačiakampio skaičiavimo tinklelyje, suprojektuotame Dekarto koordinatinių sistemose su plokštumomis, statmenomis jų ašims. Visų fizikinių kintamųjų reikšmės yra pateiktos tinklelio elementų centruose. Dėl baigtinės apimties FV metodo principinės lygtys yra diskretizuojamos įprastu būdu. Erdvinės išvestinės aproksimuojamos įvestinių antrinio tikslumo diferencialiniais operatoriais. Laiko išvestinės aproksimuojamos pirminio tikslumo Oilerio schema. Skaitinėje schemoje klampa yra nežymi, palyginti su skysčio klampa.

Skaičiavimo tinklelis. „Flow Simulation“ skaičiavimo tinklelis yra stačiakampis visame skaičiavimo lauke, todėl tinklelio elementų kraštinės yra statmenos nustatytoms Dekarto koordinatinių sistemos ašims ir nepritaikytos kietai / skystai sąsajai. Taigi, kieta / skysta sąsaja nupjauna šalia sienelės esančius elementus. Vis dėlto, naudojant specialius matus, masės ir šilumos srautai yra apdorojami tinkamai šiuose daliniuose elementuose.

Stačiakampis skaičiavimo laukas yra konstruojamas automatiškai (gali būti pakeistas rankiniu būdu), todėl apima kietąjį kūną ir turi kraštines plokštumas, statmenas nustatytoms Dekarto koordinatinių sistemos ašims. Tada skaičiavimo tinklelis yra konstruojamas kituose išvardintuose lygmenyse.

Visų pirma sukonstruojamas pagrindinis tinklelis. Tam reikia skaičiavimo lauką padalinti pagal pagrindinio tinklo plokštumas, kurios yra akivaizdžiai statmenos Dekarto koordinatinių sistemos ašims. Galima nurodyti šių plokštumų skaičių ir tarpus palei kiekvieną ašį. Pagrindinis tinklas yra nustatomas tik skaičiavimo lauku ir nepriklauso nuo kietųjų / skystųjų sąsajų.

Pagrindinio tinklo elementai, besikertantys su kietosiomis / skystosiomis sąsajomis, yra tolygiai dalijami į mažesnius elementus. Toliau vykdoma tokia procedūra: kiekvienas iš pagrindinių tinklo langelių, besikertančių su kietąja / skystąja sąsaja, yra dalomas tolygiai į aštuonis mažesnius elementus; kiekvienas mažesnis langelis, susikertantis su sąsaja, toliau dalomas į dar mažesnius 8 elementus, kol pasiekiamas reikalingas elemento dydis.

Kitame tinklelio konstravimo etape tinklelis, išgautas susikirtus su kietąja / skystąja sąsaja praeitos procedūros metu, yra tobulinamas (t. y. elementai yra toliau dalomi arba sujungiami) pagal kietosios / skystosios sąsajos išlinkimą. Kriterijus, kurį reikia įvykdyti, yra nustatomas taip: maksimalus kampas tarp normalių paviršių vieno langelio viduje neturi viršyti tam tikros ribos, kitu atveju langelis yra dalomas į 8 mažus langelius.

Galiausiai tinklelis, gautas šių procedūrų metu, yra patobulinamas skaičiavimo lauke tam, kad atitiktų vadinamąjį siaurojo kanalo kriterijų: kiekvieno elemento, esančio prie kietosios / skystosios sąsajos, tinklelio elementų, esančių fluideo zonoje palei liniją, normalią kietajai / skystajai sąsajai, ir prasidedančių nuo šio elemento centro, skaičius (įskaitant dalinius langelius) turi būti ne mažesnis už reikalaujamą skaičių. Kitaip kiekvienas iš tinklelio elementų šioje linijoje yra padalinamas į 8 dalis.

Atlikus šias tinklelio konstravimo procedūras gaunamas vietoje patobulintas stačiakampis skaičiavimo tinklelis ir naudojamas pagrindinėms lygtims spręsti.

Erdvinės aproksimacijos. Išcentruotų baigtinių tūrių metodas (FV) yra naudojamas lokaliai patobulinto stačiakampio tinklelio pagrindinėms lygčių aproksimacijoms gauti. Pagrindinės lygtys yra integruojamos pagal kontrolės apimtį, kuri yra tinklelio elementas, ir aproksimuojamos su pagrindinių kintamųjų išcentruotų elementų reikšmėmis. Integralinės tvermės dėsniai gali būti pateikti elemento tūrio forma ir paviršiaus integraline lygtimi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int U dv + \oint F \cdot ds = \int Q dv \quad (4.16)$$

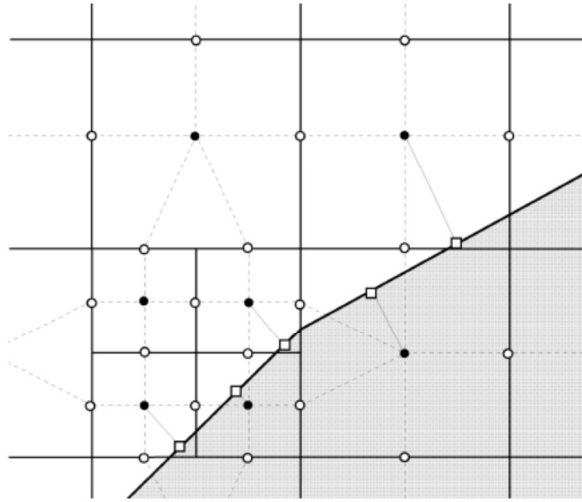
yra pakeista diskrečia forma

$$\frac{\partial}{\partial t} (Uv) + \sum_n F \cdot S = Qv, \quad (4.17)$$

čia: n – elemento paviršių skaičius.

Srautų F antrinės priešpriešinės aproksimacijos yra pagrįstos netiesiogiai apdorotomis modifikuotomis Leonardo „greitosiomis“ aproksimacijomis (Roache, 1998) ir suminio svyravimo mažėjimo (TVD – angl. Total Variation Diminishing) metodu (Hirsh, 1988).

Nagrinėdami dalinių tinklelio elementų lygtį, mes įvedame papildomus kraštinius paviršius ir atitinkamus kraštinius srautus, atsižvelgdami į kraštines sąlygas bei geometriją, ir naudojame specialią skaičiavimo procedūrą (4.12 pav.).



4.12. Skaičiavimo tinklelio elementai kietosios / skystosios sąsajos metu

Fig. 4.12. Computational mesh cells at the solid / fluid interface

Skaitinio algoritmo forma. Indeksas n žymi laiko lygį, o „*“ – tarpinės srauto parametrų reikšmės. Šis skaitinis algoritmas yra naudojamas srauto parametrų pagal laiko lygmenį $(n+1)$ apskaičiuoti naudojant žinomas laiko lygmens reikšmes n :

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + A_h(U^n, p^n)U^* = S^n, \quad (4.18)$$

$$L_h \delta p = \frac{\text{div}_h(\rho u^*)}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}, \quad (4.19)$$

$$\rho^* = \rho(p^n + \delta p, T^*, y^*),$$

$$\rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t \cdot \text{grad}_h \delta p, \quad (4.20)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p, \quad (4.21)$$

$$\rho T^{n+1} = \rho T^*, \rho \kappa^{n+1} = \rho \kappa^*, \rho \varepsilon^{n+1} = \rho \varepsilon^*, \rho y^{n+1} = \rho y^*, \quad (4.22)$$

$$\rho^{n+1} = \rho(p^{n+1}, T^{n+1}, y^{n+1}). \quad (4.23)$$

čia: $U = (\rho u, \rho T, \rho \kappa, \rho \varepsilon, \rho y)^T$ yra visas pagrindinių kintamųjų kompleksas, išskyrus slėgį p , $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ yra greičio vektorius, $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$ yra sudedamųjų koncentracijų skysčių mišinio vektorius, o $\delta p = p^{n+1} - p^n$ yra pagalbinis kintamasis, kuris vadinamas slėgio korekcija. Šie parametrai yra diskrečios funkcijos, pateiktos elementų centruose. Jie skaičiuojami naudojant diskrečiąsias lygtis (4.18–4.23), kurios aproksimuoja pagrindines diferencialines lygtis. 4.18–4.23 lygtyse A_h , div_h , grad_h ir $L_h = \text{div}_h \text{grad}_h$ yra diskretūs

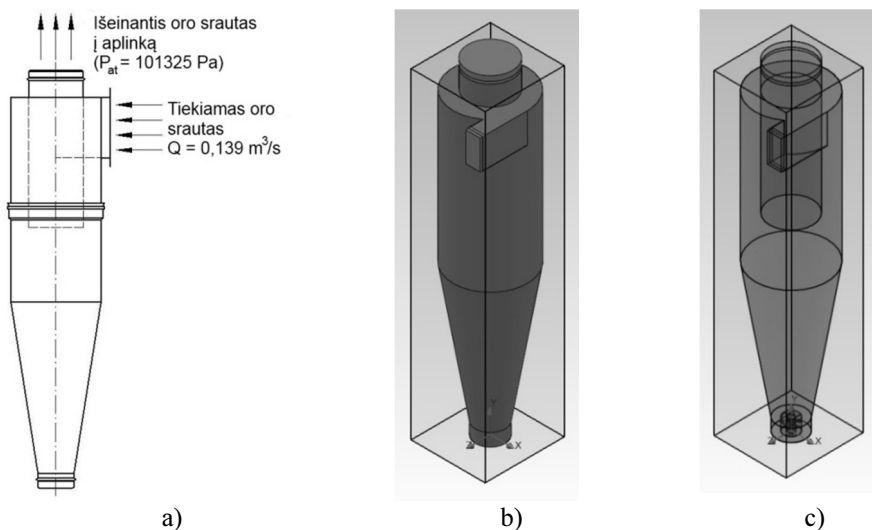
operatoriai, kurie aproksimuoja atitinkamus diferencialinius operatorius antriniu tikslumu.

4.18 lygtis atitinka pirmąjį algoritmo veiksmą, kai visiškai numanomos diskrečios konvekcijos / išsklaidymo lygtys yra sprendžiamos tam, kad būtų gautos tarpinės judesio kiekio ir galutinės turbulentinių parametru, temperatūros ir rūšių koncentracijų reikšmės.

Elipsinio tipo lygtis (4.19) yra naudojama slėgio korekcijai δp apskaičiuoti. Ši lygtis yra apibrėžiama tokiu būdu, kad galutinis judesio kiekio laukas ρu^{n+1} , apskaičiuotas 4.18 lygtimi, tenkina visiškai numanomą diskrečiąją kontinuumo lygtį. Galutinės srauto parametru reikšmės yra nustatytos 4.20–4.23 lygtimis.

4.5.2. Skaitinių tyrimų rezultatai

Akustinio ciklono (be antrinio srauto) srautų simuliacija. Akustiniame ciklone antrinis srautas tiekiamas per akustinio generatoriaus tūtą, ji nukreipia srautą į akustinio generatoriaus atspindėtuvą (rezonatorių). Tokiu būdu antrinis srautas aktyvuoja akustinį generatorių, srautui nutrūkus, jis išsijungia. 4.13 pav. pateiktas ciklono modelio bendras vaizdas bei pradinės ir kraštinės sąlygos srautų skaitinio modeliavimo metu.



4.13 pav. Akustinis ciklonas: a) pradinės–kraštinės sąlygos, b) bendras vaizdas, c) permatomas vaizdas

Fig. 4.13. Acoustic cyclone: a) initial-boundary conditions, b) overall view, c) transparent view

4.1 lentelė. Pradinės ir kraštinės sąlygos**Table 4.1.** Initial and boundary condition

Pradinės sąlygos	
Termodinaminiai parametrai	Statinis slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Greičio parametrai	Greičio vektorius Greitis X kryptimi: 0 m/s Greitis Y kryptimi: 0 m/s Greitis Z kryptimi: 0 m/s
Fluidai	Oras
Tiekiamo oro srauto (pirminio) kraštinės sąlygos	
Tipas	Tiekiamas tūrinis oro srautas
Paviršius	Srauto įėjimo kanalo skerspjūvis
Srauto parametrai	Srauto vektoriaus kryptis: normalė į paviršių Srauto debitas statmenai į paviršių: 0,139 m ³ /s Visiškai išsivystęs srautas: ne
Termodinaminiai parametrai	Apytikris slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas ir ilgis: Intensyvumas: 2,00 % Ilgis: 0,003 m
Paribio sluoksnio parametrai	Paribio sluoksnio tipas: turbulentinis
Išeinančio oro srauto kraštinės sąlygos	
Tipas	Išeinantis oro srautas į aplinką
Paviršius	Srauto išėjimo kanalo skerspjūvis
Srauto vektoriaus kryptis	Normalė į paviršių
Koordinatų sistema	Paviršiaus koordinatų sistema
Termodinaminiai parametrai	Aplinkos slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas ir ilgis: Intensyvumas: 2,00 % Ilgis: 0,003 m
Paribio sluoksnio parametrai	Paribio sluoksnio tipas: turbulentinis
Skaičiavimo kontrolės nustatymai. Galutinės sąlygos	
Galutinės sąlygos	Jei viena yra tenkinama
Maksimalus žingsnių kiekis	4000
Konvergencijos tikslai	Analizės intervalas: 0,500

Sprendžiamas uždavinys pasirinktas ir laminariniame, ir turbulentiniame srautuose. Sienelės šiurkštumas nustatytas 0 μm, sienelės terminė sąlyga – adiabinė. Pradinis tinklėlio lygis – 8 (maksimaliai leistinas). Rezultatų rezoliucijos tankis – 8 (maksimaliai leistinas). Užteršto oro srauto dalelės yra sferinės formos. Tiekiamos į cikloną oro srauto skerspjūvyje dalelės

išsibarsčiusios tolygiai. Išsamesnės pradinės ir kraštinės sąlygos pateiktos 4.1 lentelėje.

Akustinio ciklono (be antrinio srauto) srautų skaitmeninės analizės rezultatai pateikti 4.2–4.3 lentelėse bei grafiškai pavaizduoti 4.14–4.17 paveiksluose. Buvo skaičiuojamos viso akustinio ciklono modelio parametų reikšmės, o ne tam tikruose konkrečiuose pjūviuose ar taškuose. Pateiktos minimalios bei maksimalios reikšmės. Taigi, galime analizuoti visos tiriamos sistemos parametų reikšmių svyravimą.

4.2 lentelė. Pagrindinių parametų rezultatai

Table 4.2. Results of general parameters

Parametras	Reikšmė		
	Vidutinė	Minimali	Maksimali
Vidutinis statinis slėgis, Pa	101 493	101 491	101 495
Vidutinis absoliutus slėgis, Pa	101 655	101 651	101 659
Vidutinis dinaminis slėgis, Pa	162	160	164
Vidutinis oro srauto greitis, m/s	15,3	15,2	15,3
Minimalus statinis slėgis AAG, Pa	101 438	101 433	101 444
Vidutinis statinis slėgis AAG, Pa	101 439	101 434	101 445
Maksimalus statinis slėgis AAG, Pa	101 440	101 436	101 445
Minimalus absoliutus slėgis AAG, Pa	101 438	101 433	101 444
Vidutinis absoliutus slėgis AAG, Pa	101 439	101 434	101 445
Maksimalus absoliutus slėgis AAG, Pa	101 440	101 436	101 445

4.3 lentelė. Minimalių – maksimalių reikšmių rezultatai

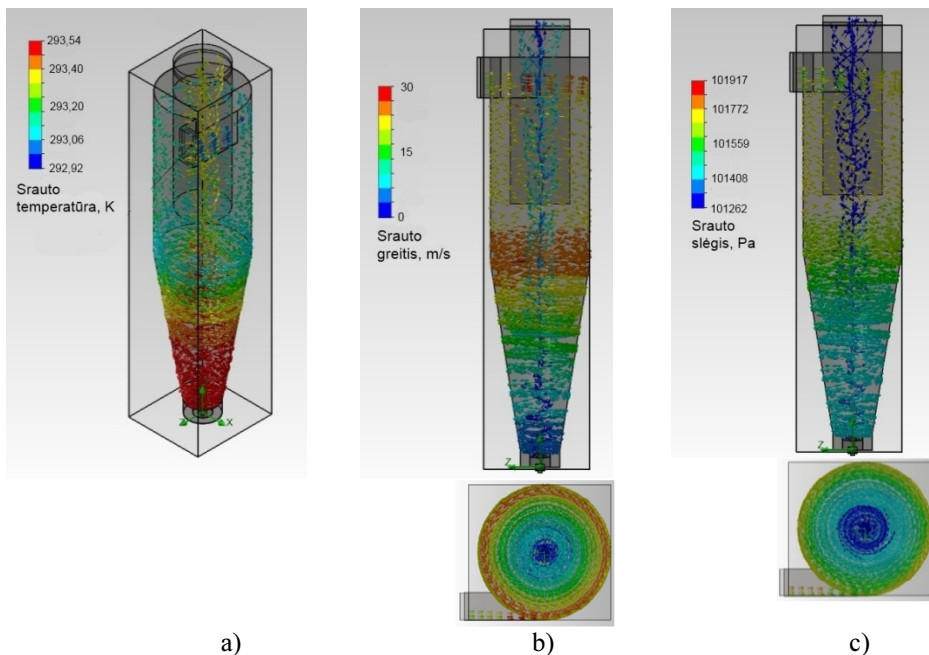
Table 4.3. Results of Minimum – maximum values

Parametras	Reikšmė	
	Minimali	Maksimali
1	2	3
Slėgis, Pa	101263,70	101837,78
Temperatūra, K	292,96	293,60
Greitis [m/s]	0	30,106
X – greičio dedamoji, m/s	-26,926	23,417
Y – greičio dedamoji, m/s	-12,803	11,625
Z – greičio dedamoji, m/s	-29,978	25,115
Fluido temperatūra, K	292,96	293,60
Macho skaičius	0	0,09
Tankis, kg/m ³	1,20	1,21
Dalelės X greitis, m/s	-23,688	22,535

4.3 lentelės pabaiga
End of Table 4.2.

1	2	3
Dalelės Y greitis, m/s	-9,675	11,213
Dalelės Z greitis, m/s	-23,176	22,812
Dalelės greitis, m/s	0,006	23,842
Dalelės tankis, kg/m ³	2600,00	2600,00
Dalelės temperatūra, K	293,09	293,59
Dalelės Re skaičius	0	162,6939921
Dalelės masė, kg	$1,361 \cdot 10^{-9}$	$1,361 \cdot 10^{-9}$
Dalelės skersmuo, m	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
Dalelės sant. greitis, m/s	0	24,456

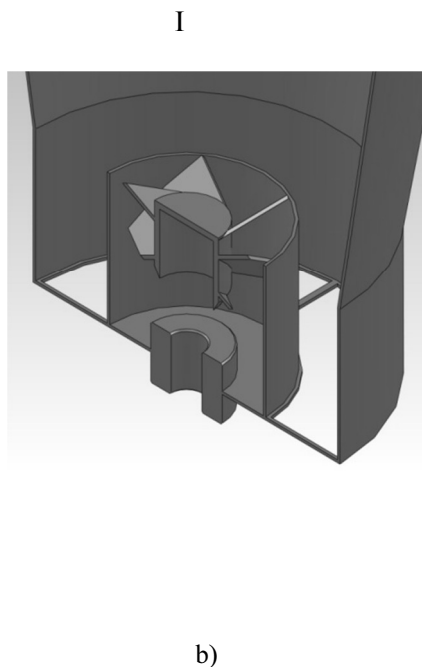
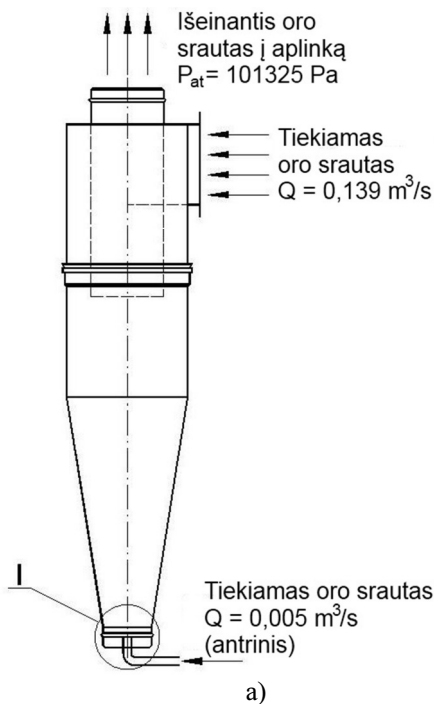
Iš 4.2–4.3 lentelių matome, kad minimalios ir maksimalios reikšmės nedaug skiriasi. Slėgio, temperatūros, oro srauto tankio pokyčiai yra nežymūs, nesiekia 1 proc. Didesni pokyčiai pastebimi tik greičių komponentėse. Tam turi įtakos ciklono konstrukcijos formos specifika. Oro srauto trajektorijos ir temperatūros, greičio bei slėgio reikšmės ciklone pavaizduotas 4.14 paveiksle.



4.14 pav. Oro srautų ciklone simuliacija: a) temperatūros reikšmės, b) greičio reikšmės, c) slėgio reikšmės

Fig. 4.14. Simulation of air flow in acoustic cyclone without secondary air flow:
a) values of temperature, b) values of velocity, c) values of pressure

Akustinio ciklono (su antriniu priešpriešiniu srautu) srautų simuliacija. Ciklone akustinis generatorius patalpintas siauriausioje kūginio korpuso dalyje per centrinę simetrijos ašį (4.15 pav.) Akustinio generatoriaus įvorės išorinis skersmuo mažesnis už kūginės korpuso dalies vidinį skersmenį ir tarp jų susidaro tarpelis. Įvorės dugne pritvirtinta srauto formavimo tūta, sujungta su suslėgto oro tiekimo vamzdžiu. Virš tūtos įvorės vidinėje zonoje įtvirtintas atspindėtuvas, prie kurio išorinių sienelių kampų α centrinės ciklono ašies atžvilgiu pritvirtintos plokštelės. Kampas α viršūnė nukreipta priešinga kryptimi pagrindinio oro tiekimo vamzdžio tangentiniam įvedimui į cilindrinę korpuso dalį. Ciklone susidaro du oro srautai: pirminis ir antrinis priešpriešinis (pirminiam srautui).



4.15 pav. Akustinis ciklonas esant antriniam srautui: a) pradinės–ribinės sąlygos, b) „I“ padidintas vaizdas – akustinio generatoriaus pjūvis

Fig. 4.15. Acoustic cyclone with secondary air flow: a) initial-boundary conditions, b) magnified view “I”

4.4 lentelė. Pradinės ir ribinės sąlygos**Table 4.4.** Initial and boundary conditions

Pradinės sąlygos	
Termodinaminiai parametrai	Statinis slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Greičio parametrai	Greičio vektorius Greitis X kryptimi: 0 m/s Greitis Y kryptimi: 0 m/s Greitis Z kryptimi: 0 m/s
Fluidai	Oras
Tiekiamo oro srauto (pirminio) kraštinės sąlygos	
Tipas	Tiekiamas tūrinis oro srautas
Paviršius	Srauto įėjimo kanalo skerspjūvis
Srauto parametrai	Srauto vektoriaus kryptis: normalė į paviršių Srauto debitas statmenai į paviršių: 0,139 m ³ /s Visiškai išsivystęs srautas: ne
Termodinaminiai parametrai	Apytikris slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas ir ilgis: Intensyvumas: 2,00 % Ilgis: 0,003 m
Paribio sluoksnio parametrai	Paribio sluoksnio tipas: turbulentinis
Tiekiamo oro srauto (antrinio) kraštinės sąlygos	
Tipas	Paduodamas tūrinis oro srautas
Paviršius	Srauto (antrinio) įėjimo kanalo skerspjūvis
Srauto parametrai	Srauto vektoriaus kryptis: Normalė į paviršių Srauto debitas statmenai į paviršių: 0,005 m ³ /s Visiškai išsivystęs srautas: ne
Termodinaminiai parametrai	Apytikris slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas ir ilgis: Intensyvumas: 2,00 % Ilgis: 0,003 m
Paribio sluoksnio parametrai	Paribio sluoksnio tipas: turbulentinis
Ištekamo oro srauto kraštinės sąlygos	
Tipas	Ištekantis oro srautas į aplinką
Paviršius	Srauto išėjimo kanalo skerspjūvis
Srauto vektoriaus kryptis	Normalė į paviršių
Koordinačių sistema	Paviršiaus koordinačių sistema
Termodinaminiai parametrai	Aplinkos slėgis: 101325,00 Pa Temperatūra: 293,20 K
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas ir ilgis: Intensyvumas: 2,00 % Ilgis: 0,003 m

4.4 lentelės pabaiga

End of Table 4.4.

Paribio sluoksnio parametrai	Paribio sluoksnio tipas: Turbulentinis
Skaičiavimo kontrolės nustatymai. Galutinės sąlygos	
Galutinės sąlygos	Jeį viena yra tenkinama
Maksimalus žingsnių kiekis	4000
Konvergencijos tikslai	Analizės intervalas: 0,500

Sprendžiamas uždavinys pasirinktas ir laminariniam, ir turbulentiniam srautuose. Sieneles šurkštumas nustatytas 0 μm , sieneles terminė sąlyga – adiabatinė. Pradinis tinklelio lygis – 8 (maksimaliai leistinas). Rezultatų rezoliucijos tankis – 8 (maksimaliai leistinas). Užteršto oro srauto dalelės yra sferinės formos. Tiekiamos į cikloną oro srauto skerspjūvyje dalelės išsibarsčiusios tolygiai. Išsamesnės pradinės ir kraštinės sąlygos pateiktos 4.4 lentelėje.

Akustinio ciklono (esant antriniam priešpriešiniam srautui) srautų skaitmeninės simuliacijos rezultatai pateikti 4.5–4.6 lentelėse. Buvo skaičiuojamos viso akustinio ciklono modelio parametrų reikšmės, o ne tam tikruose konkrečiuose pjūviuose ar taškuose. Pateiktos minimalios bei maksimalios reikšmės. Taigi, galime analizuoti visos tiriamos sistemos parametrų reikšmių svyravimą.

4.5 lentelė. Pagrindinių parametrų rezultatai

Table 4.5. Results of general parameters

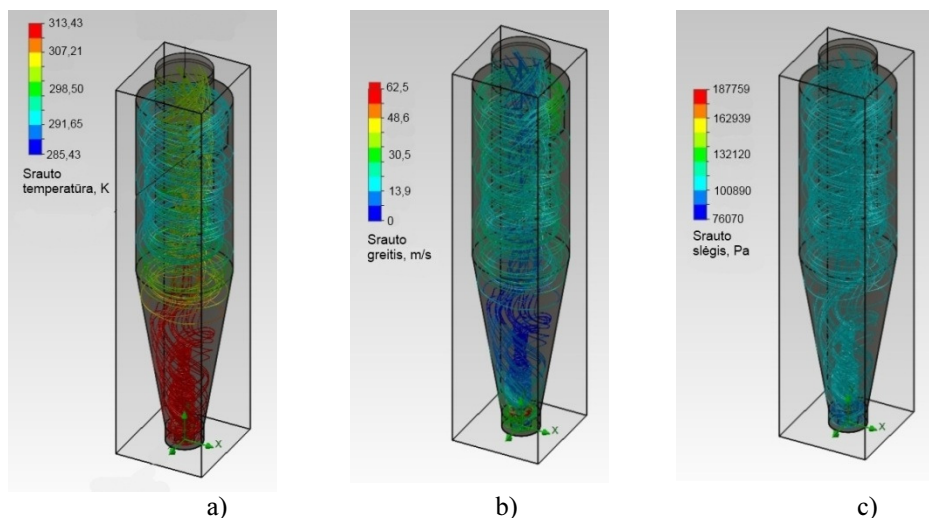
Pavadinimas	Reikšmė		
	Vidutinė	Minimali	Maksimali
Vidutinis statinis slėgis, Pa	101 518	101 510	101 528
Vidutinis absoliutus slėgis, Pa	101 736	101 723	101 748
Vidutinis dinaminis slėgis, Pa	216	211	219
Vidutinis oro srauto greitis, m/s	17,9	17,7	18,1
Minimalus statinis slėgis AAG, Pa	110 552	110 228	111 183
Vidutinis statinis slėgis AAG, Pa	263 854	263 578	264 102
Maksimalus statinis slėgis AAG, Pa	267 403	267 111	267 684
Minimalus absoliutus slėgis AAG, Pa	110 552	110 228	111 183
Vidutinis absoliutus slėgis AAG, Pa	263 854	263 578	264 102
Maksimalus absoliutus slėgis AAG, Pa	267 403	267 111	267 684

4.6 lentelė. Minimalių – maksimalių reikšmių rezultatai**Table 4.6.** Results of minimum – maximum values

Pavadinimas	Reikšmė	
	Minimali	Maksimali
Slėgis, Pa	54411,35	267637,33
Temperatūra, K	219,94	355,67
Greitis, m/s	0	432,106
X – greičio dedamoji, m/s	-424,132	415,137
Y – greičio dedamoji, m/s	-216,889	353,105
Z – greičio dedamoji, m/s	-412,911	415,963
Fluido temperatūra, K	219,94	355,67
Macho skaičius	0	1,34
Tankis, kg/m ³	0,66	2,68
Dalelės X greitis, m/s	-42,720	31,343
Dalelės Y greitis, m/s	-7,811	48,503
Dalelės Z greitis, m/s	-31,905	32,324
Dalelės greitis, m/s	2,780	58,494
Dalelės tankis, kg/m ³	2600,00	2600,00
Dalelės temperatūra, K	293,09	354,36
Dalelės Re skaičius	0	230,6413642
Dalelės masė, kg	$1,361 \cdot 10^{-9}$	$1,361 \cdot 10^{-9}$
Dalelės skersmuo, m	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
Dalelės sant. greitis, m/s	0	48,518

4.5–4.6 lentelėse pateikti rezultatai ir reikšmių (minimalių ir maksimalių) skirtumai kardinaliai skiriasi, lyginant su rezultatais, pateiktais 4.2–4.3 lentelėse. 4.2–4.3 lentelėse rezultatų skirtumas nesiekė 1 proc., 4.5–4.6 lentelėse kartais skiriasi 4,9 k. Toks didelis skirtumas atsirado dėl antrinio srauto tiekimo per aerodinaminį akustinį Hartmano generatorių, kurio veikimo principas buvo aprašytas ankstesniuose skyriuose.

Oro srauto trajektorijos ir temperatūros, greičio bei slėgio reikšmės akustiniame cikle pavaizduotas 4.16 paveiksle.



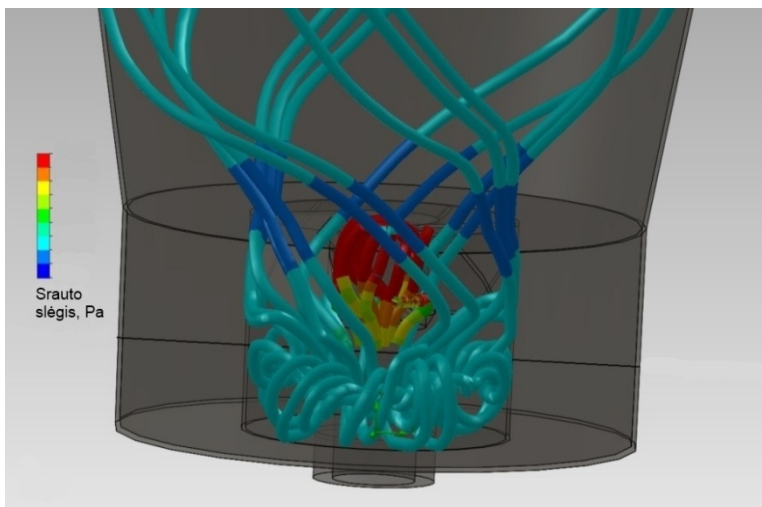
4.16 pav. Skaitinė oro srautų akustiniame ciklone simuliacija: a – temperatūros reikšmės; b – greičio reikšmės; c – slėgio reikšmės

Fig. 4.16. Simulation of air flow in acoustic cyclone with secondary air flow: a) values of temperature, b) values of velocity, c) values of pressure

Pagrindinis akustinio ciklono išskirtinumas – integruoto aerodinaminio akustinio generatoriaus ciklono apatinė dalis. Kaip skaitiniai tyrimai parodė, generatoriaus atspindėtuve vyksta intensyvios oro slėgio pulsacijos, generuojančios akustinį lauką. Oro srauto trajektorijų ir oro slėgio pulsacijos simuliacija akustiniame generatoriuje pavaizduota 4.17 paveiksle.

Analizuodami kreives bendrinio atveju galime teigti, kad maksimalios srauto greičio reikšmės kaip ir eksperimentinių tyrimu metu buvo stebimos periferiniuose ciklono sluoksniuose. Toliau artėjant link ciklono centrinės ašies srauto greitis stipriai mažėja ir ties ašimi radialinis srautas išnyksta, tačiau atsiranda vertikalus srautas.

Akustiniame ciklone esant priešpriešiniam srautui apatinėje kūginės dalies pusėje susiformuoja priešpriešinis sukurinis srautas pagrindinio sukurio atžvilgiu. Kylant aukšty, priešpriešinis sukuryr praranda savo kinetinę energiją ir pasiduoda pagrindinio srauto įtakai. Šį procesą galima stebėti ir eksperimentinių tyrimu metu užfiksuotose ir pavaizduotose srauto greičio epiūrose (4.4 pav.) bei 4.16 paveiksle pateiktose srautų trajektorijose.



4.17 pav. Oro srauto trajektorijų ir slėgio pulsacijos simuliacija akustiniame generatoriuje

Fig. 4.17. Simulation of air flow and pressure pulsation in acoustic generator

Sudėtingiausios srauto trajektorijos buvo stebimos apatinėje siauriausioje akustinio ciklono dalyje. Galime teigti, kad ciklono apatinėje kūginės dalies dalyje vyksta chaotiškas oro srauto judėjimas. Tai patvirtina ir eksperimentinių tyrimų rezultatai.

4.6. Ketvirto skyriaus išvados

1. Eksperimento metu maksimalios srauto greičio reikšmės užfiksuotos periferiniuose srauto sūkurio sluoksniuose. Artėjant link ciklono centrinės ašies srauto greitis stipriai mažėja, 30 mm spinduliu nuo centrinės ciklono ašies radialinis srautas išnyksta, bet atsiranda ašinis (vertikalia kryptimi).

2. Palyginus srauto greičio reikšmes galima teigti, kad pirmu ir antru atvejais pagrindinių srautų greitis mažai skiriasi – iki 1,4 proc. Akustiniame ciklone esant antriniam priešpriešiniam srautui pjūviuose nuo 12–12 iki 9–9 susiformuoja priešpriešinis sūkurinis srautas pagrindinio sūkurio atžvilgiu. Šį procesą galime stebėti ir skaitmeninės srautų simuliacijos metu (4.16 pav.), jį matome ir srautų greičių epiūrose (4.4 pav.).

3. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad akustinio ciklono apatinėje kūginės dalies dalyje vyksta chaotiškas turbulentinis oro srauto judėjimas.

4. Išmatavus akustinio lauko parametrus akustinio ciklono viduje galime teigti, kad aerodinaminio akustinio generatoriaus skleidžiamas akustinis laukas

atitinka literatūroje nurodomą 140–160 dB akustinio lauko slėgį, prie kurio vyksta 1–5 μm skersmens dalelių aglomeracija. Toks garso slėgio lygis stebimas prie 8, 16 ir 24 kHz, kas 8 kHz.

5. Atlikus oro valymo metodų analizę, įvertinus eksperimentinius bei teorinius tyrimus nustatyta, kad akustinės aglomeracijos ir tradicinių oro valymo būdų sujungimas smarkiai padidina tradicinių oro valymo įrenginių efektyvumą bei leidžia taikyti juos atskiriant ultrasmulkias daleles iš valomo oro srauto. Antrinio srauto ir akustinio lauko poveikis stipriai padidina ciklono valymo efektyvumą. Eksperimento metu tradicinio ciklono vidutinis valymo efektyvumas siekė 87,2 proc., akustinio ciklono – 97,5 proc.

6. Didžiausias ciklono efektyvumas pasireiškė veikiant užterštą oro srautą 8 kHz dažnio akustiniu lauku.

7. Skaitiniai tyrimai parodė, kad didžiausios akustinio ciklono slėgio pulsacijos vyksta aerodinamiame akustiniame generatoriuje: minimalus slėgis lygus – 54,4 kPa, maksimalus – 267,6 kPa. Slėgio pulsacija generuoja akustinį lauką, jo veikiamos smulkiausios dalelės sąveikauja tarpusavyje, sukimba, sustambėja ir pasunkėja, o tada veikiamos išcentrinių ir gravitacinių jėgų pašalinamos iš valomo oro srauto.

8. Antrinio priešpriešinio srauto tiekimas smarkiai veikia ciklono oro srauto charakteristikas: trajektoriją, greitį, slėgį, temperatūrą, dalelės oro sraute judėjimo greitį.

Bendrosios išvados

1. Atlikus oro valymo metodų analizę, įvertinus eksperimentinius bei teorinius tyrimus nustatyta, kad akustinės aglomeracijos ir ciklono oro valymo būdų apjungimas ženkliai padidina ciklono oro valymo efektyvumą bei suteikia galimybę taikyti jį ultrasmulkių dalelių atskyrimui iš valomo oro srauto.

2. Išmatavus akustinio lauko parametrus akustinio ciklono viduje galime teigti, kad aerodinaminio akustinio generatoriaus skleidžiamas akustinis laukas atitinka literatūroje nurodomą 140–60 dB akustinio lauko slėgį, prie kurio vyksta 1-5 μm skersmens dalelių aglomeracija. Toks garso slėgio lygis stebimas prie 8, 16 ir 24 kHz, kas 8 kHz.

3. Skaitiniai tyrimai parodė, kad didžiausios akustinio ciklono slėgio pulsacijos vyksta aerodinamiame akustiniame generatoriuje: minimalus slėgis lygus – 54,4 kPa, maksimalus – 267,6 kPa. Slėgio pulsacija generuoja akustinį lauką, jo veikiamos smulkiausios dalelės sąveikauja tarpusavyje, sukimba, sustambėja ir pasunkėja, o tada veikiamos išcentrinių ir gravitacinių jėgų pašalinamos iš valomo oro srauto.

4. Papildomas antrinio priešpriešinio srauto padavimas į akustinį cikloną ženkliai įtakoja ciklone vykstančius procesus: kūginėje dalyje susiformavęs priešpriešinis sukurinis srautas pagrindinio srauto atžvilgiu, padidina oro srautų greitį, sukelia dideles slėgio pulsacijas akustinio generatoriaus, apatinėje ciklono kūgio dalyje.

5. Antrinio srauto ir akustinio lauko poveikis ženkliai padidina ciklono valymo efektyvumą. Eksperimento metu tradicinio ciklono vidutinis valymo efektyvumas siekia – 87,2 proc., tuo tarpu akustinio ciklono – 97,5 proc. Ciklono didžiausias efektyvumas pasireiškia veikiant užterštą oro srautą 8 kHz dažnio akustiniu lauku.

Literatūra ir šaltiniai

Acoustic sources. – [žiūrėta 2012-05-25]. – Internetė: <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/a/c/acoustic%20sources/source.html>.

Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius, Technika.

Bergmann, L. 1954. *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*. Zurich.

Bjerkness, V. 1933. *Physikalische Hydrodynamik*, S, 247.

Brandt, O.; Freund, H.; Hiedemann, E. 1937. *Schwebstoff im Schallfeld*. Z. Phys., 104, 4-8, 511-533.

Brereton, G.; Bruno, B. 1994. Partical removal by focused ultrasound, *J Sound Vib* 173(5):683-98.

Chen, D.; Wu, J. 2010. Dislodgement and removal of dust-particles from a surface by a technique combining acoustic standing wave and airflow, *J Acoust Soc Am* 127(1):45-50.

de Sarabia, E.; Elvira-Segura, L.; Gonzalez-Gomez, I.; Rodriguez-Maroto, J.; Munoz-Bueno, R.; Dorronsoro-Areal, J. 2003. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhaust, *Ultrasonics* 41:227-81.

- Dianov, D. B.; Podolskij A. A.; Turubarov V. I. 1965. Calculation of the hydrodynamic interactions of aerosol particles in a sound field under Ossen flow conditions, *Sov Phys Acoust* 13(3):314–319.
- Ding, P.; Pacek, A. 2008. De-agglomeration of goethite nano-particles using ultrasonic comminution device, *Powder Technol* 187(1):1–10.
- Dong, S.; Lipkens, B.; Cameron, T. 2006. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols, *J Aerosol Sci* 37:540–553.
- Dowling, A. P.; Hynes, T. P. 2004. Sound generation by turbulence, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 23, p. 491–500.
- Drain, L. E. *The Laser Doppler Technique*, John Wiley & Sons, 1980, ISBN 0-471-27627-8.
- Andrade, E. N. de C. 1936. The coagulation of Smoke by supersonic vibration, *Trans. Farad. Soc.*, v.32, 1111.
- Elenbaas, T. 2005. *Writing lines in turbulent air using Air Photolysis and Recombination Tracking*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Ennis, B.; Li, J.; Tardos, G.; Pfeffer, R. 1990. The influence of viscosity on the strength of an axially strained pendular liquid bridge, *Chem Eng Sci* 45(10):3071–3088.
- EPSRC Engineering Instrumental Poll. Science & Technology Facilities Council. <http://www.technology.stfc.ac.uk/EIP/sectb.htm>. Žiūr. 2012-07-02.
- Faxen, H. 1927. *Die geschwindigkeit zweier Kugeln, die unter Einwirkung der Schwere in einer zähen Flüssigkeit fallen*. Ztschr. Angen Math Mech., v. 7, 79.
- Gallego-Juárez, J.; de Sarabia, E.; Rodriguez-Corral, G.; Hoffman, T.; Galvez-Moraleda, J.; Rodriguez-Maroto, J.; et al. 1999. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emission from coal combustion plants, *Environ Sci Technol* 33:3843–3849.
- Glowinski, R.; Le Tallec, P. 1989. *Augmented Lagrangian Methods and Operator-Splitting Methods in Nonlinear Mechanics*. SIAM, Philadelphia.
- Gorbatschew, S. W.; Severny, A. B. 1935. *Kolloid Zeitschrift*. v. 73, 146.
- Grass, R.; Tsantilis, S.; Pratsinis, S. 2006. Design of high-temperature, gas-phase synthesis of hard or soft TiO₂ agglomerates, *AIChE J* 52(4):1318–1325.
- Hackbusch, W. 1985. *Multi-grid Methods and Applications*. Springer-Verlag, NY, USA.
- Hamakawa, H.; Arshad, A. B. M.; Ohta, M. 2011. Effect of Acoustic Resonance Phenomenon on Fluid Flow with Light Dust, *Journal of Thermal Science* vol. 20, No. 5, 430–434.
- Hirsh, C. 1988. *Numerical computation of internal and external flows*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Hoffman, T.; Koopmann, G. 1997. Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: theory evaluation, *J Acoust Soc Am* 101(6):3421–3429.

Hoffmann, T. L. 2000. Environmental implication of acoustic aerosol agglomeration, *Ultrasonis* 38, 353–357.

<http://www.cementas.lt/?obj=pagesWebCat&action=gotoChildpages&id=4&expandid=4.2007.03.15>

Yan, W.; Li, S.; Zhang, Y.; Yao, Q.; Tse, S. 2010. Effects of dipole moment and temperature on the interaction dynamics of titania nanoparticles during agglomeration, *J Phys Chem C* 114:10755–10760.

Kapishnikov, S.; Kantsler, V.; Steinberg, V. 2006. Continuous particle size separation and size sorting using ultrasound in a microchannel, *J Stat Mech Theory Exp*.

Kassner, E.; Knoerschild E. 1984. Friction Laws and Energy Transfer and Circulator Flow, *Technical Report* No. F-TR-2198-B8,GS_USAF. Wright Patterson Air Force Base, No 78.

King, L. 1984. On the acoustic radiation pressure on spheres, *Proc R Soc Lond A* 147:212–240

Kinloch, A. 1987. *Adhesion and adhesives*. London: Chapman and Hall.

Koning, W. 1891. Hydrodynamisch – akustische Untersuchungen, *Ann, Phys. und Chem.*, 42, 3, 353–370.

Konno, K.; Murakami, K. 1959. Experiment on Filtration Performance by Dust Load of Air Filter, *Transaction of JSME*, 63, pp. 113–116.

Kuznetsova, L.; Bazou, D.; Coakley, W. 2007. Stability of 2-D colloidal particle aggregates held against flow stress in an ultrasound trap, *Langmuir*; 23:3009–3016.

Lang, R. 1962. Ultrasonic atomization of liquids. *J Acoust Soc Am* 34:6–8.

Lewis, E. <http://www.arm.gov/news/blog/post/18689>. žiūr. 2012-07-02.

Li, S.; Marshall, J. S.; Liu, G.; Yao, Q. 2011. Adhesive particulate flow: The discrete-element method and its application in energy and environmental engineering, *Progress in Energy and Combustion Science* 37, p. 633–668.

LeVeque, R. 2002. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems, *Cambridge University Press*.

Lift and drag. – [žiūrėta 2009-05-18]. – Internetė: <http://electron4.phys.utk.edu/141/oct20/October%2020.html>.

Lighthill, M. J. 1952. *On sound generated aerodynamically I. General theory*. Proc. R. Soc. London, A 211, p. 564–587.

Lighthill, M. J. 1954. *On sound generated aerodynamically I. Turbulence as a source of sound*. Proc. R. Soc. London, A 222, p. 1–32.

Liu, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Wang, J.; Zhao, W.; Cen, K. 2009. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particle at low frequencies, *Powder Technol* 193(1):20–25.

Marchuk, G. I. 1982. *Methods of Numerical Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin.

- Nicholson, M. 1949. The interaction between floating particles, *Proc. Cambridge Phil Soc* 45:288–295.
- Ossen, G. 1927. *Neue Methoden und Ergebnisse in der Hydrodynamik*. Leipzig, p. 216.
- Petersson, F.; Aberg, L.; Sward-Nilsson, A.; Laurell, T. 2007. Free flow acoustophoresis: microfluidic-based mode of particle and cell separation, *Anal Chem* 79:5117–23.
- Roache, P. J. 1998. *Technical Reference of Computational Fluid Dynamics*. Hermosa Publishers, Albuquerque, New Mexico, USA.
- Roberson, J. A. 1997. *Engineering fluid mechanics*. 6th ed. – New York: „Joh Wiley and Sons“, 238 p.
- Russel, W.; Saville, D.; Schowalter, W. 1989. *Colloidal dispersion*, New York: *Cambridge University Press*.
- Saad, Y. 1996. *Iterative methods for sparse linear systems*. PWS Publishing Company, Boston.
- Samarskij, A. A. 1989. *Theory of Difference Schemes*. Nauka, Moscow.
- Schimmoller, B. K. 2008. Tuning in to acoustic cleaning, *Power Engineering* 103.7 (July 1999): 18(6). Academic OneFile. Gale. Cengage Learning (EMEA) Trial. 10 Dec. 2008 <http://find.galegroup.com/itx/start.do?prodId=AONE>.
- Shaw, D. 1978. Acoustic agglomeration of aerosol, *Recent developments in aerosol science*. Wiley Inter-Science, p. 279–319.
- Sheng, C.; Shen, X. 2007. Simulation of acoustic agglomeration processes of polydisperse solid particles, *Aerosol Sci Technol* 41:1–13.
- Smoluchowski, M. 1911. Über die Wechselwirkung von Kugeln, die sich in einer zähen Flüssigkeit bewegen, *Bull. intern. Acad. Sci. Cracovie*, No 1A, 28.
- Sobanski, M.; Tucker, C.; Thomas, N.; Coakley, W. 2001. Sub-micron particle manipulation in an ultrasonic standing wave: application in detection of clinically important biomolecules, *Bioseparation* 9:351–357.
- Song, L. 1990. *Modeling of acoustic agglomeration of fine particles*. Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University, State College, PA.
- Spengler, J.; Coakley, W.; Christensen, K. 2003. Microstreaming effects on particle concentration in an ultrasonic standing wave, *AIChE J*, 49(11):2773–2782.
- Spengler, J.; Jekel, M.; Christensen, K.; Adrian, R.; Hawkes, J.; Coakley, W. 2001. Observation of yeast cell movement and aggregation in a small-scale MHz-ultrasonic standing wave field, *Bioseparation* 9:329–341.
- Striška, V. *Aplinkosaugos įrenginiai ir sistemos*. V.: Technika, 2001. 256 p.
- Teleki, A.; Wengeler, R.; Wengeler, L.; Nirschl, H.; Pratsinis, S. 2008. Distinguishing between aggregates and agglomerates of flame-made TiO₂ by high-pressure dispersion, *Powder Technol* 181 (3): 292–300.

Timochenko, V. I.; Iessel, M. 1971. Sur la dynamique des processus de coagulation acoustique, *C. R. Acad. Se. Paris*, t. 272, p. 1457–1460.

Tiwary, R.; Reethof, G. 1986. Hydrodynamic interaction of spherical aerosol particles in a high intensity acoustic field. *J Sound Vib* 108(1):33–49.

Toro, E. F. 1999. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag.

Vekteris, V.; Zaremba, R.; Striška, V. 2008. Increasing the Effectiveness of Vibroacoustic Cyclone, *Proceedings of 13th International Conference. Mechanika* p. 525–528.

Vekteris, V. 1996. *Adaptive tribological systems*. Vilnius “Technika”, 203 p.

Vekteris, V.; Ozarovskis, D.; Striška, V. 2012 06 25. *Akustinis ciklonas*. Lietuvos patentas B04C 9/00 Nr. 5846.

Vekteris, V.; Ozarovskis, D.; Striška, V. 2009. The Research of Acoustic Influence on Polluted Air Flow, *Proceeding of 14th International Conference. Mechanika* Kaunas, p. 430–433.

Vekteris, V.; Ozarovskis, D.; Striška, V. 2010. The research of generators of aerodynamic acoustic field, *Proceeding of 15th International Conference. Mechanika*.

Vekteris, V.; Ozarovskis, D.; Zaremba, R.; Mokšin, V. 2011. Tribology of particles in acoustic field, *ULTRAGARSAS (ULTRASOUND)*, Vol. 66, No. 3, ISSN 1392-2114.

Vekteris, V.; Striška, V.; Mokšin, V.; Ozarovskis, D. 2011. Study of the interaction between particles in the acoustic cyclone separator, *ULTRAGARSAS (ULTRASOUND)*, Vol. 66, No. 1, ISSN 1392-2114.

Vekteris, V.; Striška, V.; Mokšin, V.; Ozarovskis, D.; Zaremba, R. 2012. Tribological adhesion of particles in an acoustic field, *Vibroengineering. Journal of Vibroengineering*. June. Vol. 14, Issue 2, ISSN 1392-8716.

Vilatt, H. 1945. *Lecons sur les fluides visqueux*. Gauthien-Fillars.

Агранат, Б. А. 1987. *Основы физики и техники ультразвука* [Текст] / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин [и др.]. – М.: Высшая школа, 352 с.

Хиклинг, Р. 1980. *Аэродинамический шум в технике*. – М.: Мир, 350 с.

Блохинцев, Д. И. 1981. *Акустика неоднородной движущейся среды*. – М.: Наука, 320 с.

Гершгал, Д. А. 1987. *Ультразвуковая технологическая аппаратура* [Текст] / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – М.: Энергия, 318 с.

Голдстейн, М. Е. 1981. *Аэроакустика*: Пер. с англ./Пер. Р.К. Каравосова и Г. П. Карашева; Под ред. А. Г. Мунина – М.: Машиностроение, 294 с.

Горбачев, С. В.; Северный, А. Б. 1936. К вопросу о воздействии звуковых волн на капли тумана, *Журнал физической химии*, т. 7, № 4, стр. 536.

Дианов, Д. Б.; Подольский, А. А.; Турубаров, В. И. 1967. Расчет гидродинамического сближения аэрозольных частиц в звуковом поле в стоковом режиме обтекания, *Акуст. ж.*, т. XIII, вып. 1.

Дробот, Ю. Б.; Грешников, В. А.; Бачелов, В. Н. 1989. *Акустическое контактное течение*. – Москва: Машиностроение, – 120 с.

Каневский, И. Н. 1961. Постоянные силы, возникающие в звуковом поле, *Акуст. ж.*, 7, №3.

Кочетов, О. С.; Кочетова, М. С.; Ходакова Т. Д. 2006 01 20. *Акустический циклон*. Rusijos patentas Nr. RU 2 268 090 C1.

Кочин, Н. Е.; Кибель, Н. В.; Розе, Н. В. 1948. *Теоретическая гидромеханика* ч. 2, М. – Л., Гостехиздат,.

Лайцянский, Л. Г. 1973. *Механика жидкости и газа*. Изд. «Наука», М., ст. 847.

Ландау, Л. Д.; Лифшиц Е. М. 1944. *Механика сплошных сред*. М. – Л.

Меркулов, Л. Г.; Тимошенко, В. И. 1964. К расчету коэффициента акустической коагуляции. Применение ультразвука к исследованию вещества, *МОПИ, вып. XX*, стр. 187–191.

Мюллер, Г. 1928. Коагуляция коллоидов с частицами, имеющими форму „палочек“ и „листочков“. Теория любых полидисперсных систем и коагуляции притечуеи, *Kolloidchemische Beihefte*, v. 27, 223.

Подольский, А. А.; Турубаров В. И. О зависимости степени обтекания аэрозольных частиц от амплитуды звукового поля при числах Рейнольдса 0,5. Труды ЛИАП, 1965 г., вып. 45, стр. 60–63.

Подольский А. А., Турубаров, В. И. 1966. К теории сближения аэрозольных частиц в звуковом поле в стоковом режиме обтекания. *Акуст. ж.*, т. XII, вып. 2, стр. 266–269.

Розенберг, Л. Д. 1969. *Физические основы ультразвуковой технологии*. – М.: Наука, 698 с.

Розенберг, Л. Д. 1969. Физика и техника мощного ультразвука, В 3 т. Т. 1. *Источники мощного ультразвука* [Текст] / под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 380 с.

Северный, А. Б. 1936. О кондеромоторном действии, возникающим между каплями воды в акустическом поле. *ЖЭТВ*. т. 6, вып. 7, 705.

Седов, Л. И. 1970. *Механика сплошной среды*. М.: Наука, (т. 2 стр. 232–235, и т. 1 стр. 415–419).

Следников, Т. Х. 1971. *Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй*. – М., Наука, 85 с.

Слезкин, Н. 1955. *Динамика вязкой несжимаемой жидкости*. ТГТИ, М.

Тимошенко, В. И. 1974. О влиянии изменения подвижности аэрозольных частиц в акустическом поле на процесс диффузии, *Межвузовский сборник «Прикладная акустика»*, т. VI, Таганрог, стр. 192–201.

Тимошенко, В. И. 1968. О кинетике акустической коагуляции аэрозолей, *Сб. Прикладная акустика*, ТРТИ, вып. I, стр. 200–208.

Тимошенко, В. И.; Чернов, Н. Н. 2003. *Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле*. Ростов на-Дону: Ростиздат, 304 с.

Широкова, Н. Л. 1970. Физические основы ультразвуковой технологии, под. ред. Л. Д. Розенберга, часть X, *Коагуляция аэрозолей*, М.: Наука.

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

Фукс, Н. А. 1961. *Успехи механики аэрозолей*. Изд. АН СССР, М.

Хмелев, В. Н. 2009. Ультразвуковая коагуляционная камера для работы в агрессивных средах. *Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр./науч. ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафонов; отв. за вып.: А.А. Левицкий*. – Красноярск : ИПК СФУ, 465 с.

Хмелев, В.Н.; Шалунов, А.В.; Цыганок, С.Н.; Шалунова, К.В. 2009. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для повышения эффективности систем газоочистки, *Вторая международная конференция «Пылегазоочистка-2009»*, vol. 1, Москва, ИНТЕРЭКО, pp. 97-101.

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. *Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов*. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Таганрог.

Чернов, Н.Н. 2002. О сближении аэрозольных частиц за счет сил гидродинамического взаимодействия в акустических полях, *Известия ТРТУ* № 6, Таганрог.

Широкова, Н. Л. 1968. О механизме взаимодействия частиц аэрозоля в акустическом поле. *Труды VI Всесоюзной акустической конференции*, Москва.

Штокман, Е. А. 1998. *Очистка воздуха*. – М.: издательство АВС, 320 с.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vekteris, V.; Striška, V.; Mokšin, V.; Ozarovskis, D.; Zaremba, R. 2012. Tribological adhesion of particles in an acoustic field, *Vibroengineering* 14(2): 509-513. ISSN 1392-8716 (Thomson ISI Web of Science).

Vekteris, V.; Striška, V.; Mokšin, V.; Ozarovskis, D. 2011. Study of the interaction between particles in the acoustic cyclone separator, *Ultragarsas (Ultrasound)* 66(1): 49-53. ISSN 1392-2114 (Inspec).

Vekteris, V.; Ozarovskis, D.; Zaremba, R.; V.; Mokšin, V. 2011. Tribology of particles in acoustic field, *Ultragarsas (Ultrasound)* 66(3): 17-22. ISSN 1392-2114 (Inspec).

Straipsniai kituose leidiniuose

Vekteris, V.; Striška, V.; Ozarovskis, D. 2009. The Research of Acoustic Influence on Polluted Air Flow, - *Proceeding of 14th International Conference. Mechanika 2009*. Kaunas. 430-433. ISSN 1822-2951 (ISI Proceedings).

Vekteris, V.; Striška, V.; Ozarovskis, D. 2010. The Research of Generators of Aerodynamic Acoustic Field, *Proceeding of 15th International Conference Mechanika 2010*, Kaunas. ISSN 1822-2951 (ISI Proceedings).

Vekteris, V.; Striška, V.; Mokšin, V.; Ozarovskis, D. 2011. Adhesion of particles in secondary air flow, *15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2011*, Prague. ISSN 1840-4944 (ISI Proceedings).

Priedas

Akustinio ciklono patentas



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

PATENTAS Patent

Nr. 5846

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 06 25, Vilnius
Date of issue



Direktorius
Director

Rimvydas Naujokas

(10) **LT 5846 B**(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patento numeris: **5846** (51) Int. Cl. (2011.01): **B04C 9/00**
- (21) Paraiškos numeris: **2011 026**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2011 04 13**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2012 03 26**
- (45) Patento paskelbimo data: **2012 06 25**
- (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
Darius OZAROVSKIS, LT
Vytautas STRIŠKA, LT
- (73) Patento savininkas:
Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
—

- (54) Pavadinimas:

Akustinis ciklonas

- (57) Referatas:

Akustinis ciklonas priklauso kietųjų dalelių valymo iš užteršto oro srauto įrenginių grupei. Jis gali būti naudojamas tekstilės, chemijos bei medžio apdirbimo pramonės srityse, taip pat energetikos sistemos objektuose. Užterštas oro srautas tangentiškai yra tiekiamas į cilindrinę ciklono dalį. Užsuktas oro srautas spirališkai juda kūgine ciklono dalimi link taršos kaupimo talpos. Siauriausioje kūginėje dalyje iš srauto atsiskiria dalis didesnio dispersiškumo kietųjų dalelių ir srautas, pakeitęs sukimosi kryptį, antriniu srautu pro išmetimo vamzdį pašalinamas iš ciklono. Antrinio srauto formavimosi zonoje patalpintas akustinis generatorius sustiprina antrinį srautą dėl pasuktų kampų α plokštelių bei akustinio lauko daromo poveikio antriniame sraute esančioms neatskirtoms dalelėms. Tai ženkliai pagerina užteršto oro išvalymo kokybę, sumažina energijos užterštam orui valyti sąnaudas.

1

LT 5846 B

Akustinis ciklonas priklauso kietųjų dalelių valymo iš užteršto oro srauto įrenginių grupei. Jis gali būti naudojamas tekstilės, chemijos bei medžio apdirbimo pramonės srityse, taip pat energetikos sistemos objektuose.

Žinoma akustinė kamera (žr. JAV patentą US 5769913, publ. 1998-07-23) yra skirta kietųjų ir skystųjų dalelių koaguliacijai, paveikiant jas skirtingo intensyvumo ir dažnio akustiniais laukais. Akustinių laukų generavimas pagrįstas vibracinių plokštelių, kurias veikia akustinis generatorius, vibracija. Akustinio lauko intensyvumui padidinti yra įrengti atspindėtuvai, kurie stiprina suformuotą akustinį lauką. Ši akustinė kamera yra nepritaikyta montuoti valymo įrenginio viduje, ji įrengiama prieš oro valymo įrenginius: ciklonus, elektrostatinius filtrus ir kt.

Vienas iš pagrindinių šio įrenginio trūkumų yra mažas efektyvumas, kai oras stipriai užterštas ir dalelių dispersiškumo sklaida jame didelė. Naudojant akustinę kamerą prieš valymo įrenginius, padidėja ir energijos orui valyti sąnaudos. Dėl padidėjusių slėgio nuostolių akustinė kamera montuojama kaip atskiras įrenginys. Taigi padidėja ir valymo įrenginių užimamas plotas, ypač tai aktualu esant dideliems oro valymo debitams, kas būdinga energetiniams objektams.

Kitame žinomame įrenginyje užterštas oro srautas prieš jo valymą ciklone patenka į akustinę koloną, kurios viršutinėje dalyje sumontuotas akustinis generatorius su valdymo bloku. Akustinėje kolonoje užterštame oro sraute esančios kietosios detalės, paveiktos akustinio lauko, koaguliuoja ir patekusios į cikloną efektyviau nusodinamos (žr. patentą RU 2268090, publ. 2006-01-20).

Šis išradimas yra efektyvus ir taikytinas, kai yra mažas oro užterštumas ir nedidelė jame esančių dalelių dispersiškumo sklaida. Jeigu užteršto oro dalelių dispersiškumo sklaida yra didelė ir oras labai užterštas, tada stipriai slopinamas akustinis srautas ir jo poveikis dalelėms sumažėja. Šio tipo įrenginys užima daug vietos, nes papildomai reikalinga akustinė kolona, dažniausiai jos dydis prilygsta ciklonui, o kai kuriais atvejais ji būna ir didesnė. Taip pat dėl akustinės kolonos įrengimo padidėja ir slėgio nuostoliai visoje oro valymo sistemoje, kas reikalauja papildomų energetinių sąnaudų.

Išradimo tikslas – padidinti išvalymo efektyvumą ir sumažinti energijos užterštam orui valyti sąnaudas.

LT 5846 B

Šis tikslas yra pasiekiamas išdėstant akustinį generatorių ciklono korpuso kūginės dalies viduje, siauriausioje jos vietoje, o ant akustinio generatoriaus atspindėtuvo pritvirtinant plokšteles, pasvirusias ciklono ašies atžvilgiu kampų α , kurio viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio tangentiniam įvedimui į ciklono cilindrinę korpuso dalį.

Išradimas aprašytas pagal pridedamus brėžinius, kuriuose:

Fig. 1 – bendras akustinio ciklono vaizdas su pagrindiniais jį sudarančių junginių ryšiais;

Fig. 2 – pjūvis A – A fig. 1, per užteršto oro tiekimo vamzdį į cilindrinę korpuso dalį;

Fig. 3 – pjūvis B – B fig. 1, akustinio generatoriaus vaizdas pjūvyje.

Akustinį cikloną sudaro cilindrinis korpusas (1), prie kurio šoninės sienelės tangentiškai prijungtas užteršto oro tiekimo vamzdis (2), o per korpuso (1) simetrijos ašį (3) į viršų išvestas išvalyto oro išleidimo vamzdis (4). Prie apatinės cilindrinio korpuso (1) dalies prijungta kūginė korpuso dalis (5), siaurėjanti žemyn nuo cilindrinės korpuso (1) dalies. Siauriausia kūginio korpuso dalis (6) hermetiškai sujungta su taršos surinkimo talpa (7), kurios dugne įrengta sklendė (8) susikaupusiai taršai pašalinti. Akustinis generatorius (9) patalpintas siauriausioje kūginio korpuso dalyje (6) per centrinę simetrijos ašį (3). Akustinio generatoriaus (9) įvorės (10) išorinis skersmuo mažesnis už kūginės korpuso dalies (6) vidinį skersmenį ir tarp jų susidaro tarpelis (11). Įvorės (10) dugne pritvirtinta srauto formavimo tūta (12), sujungta su suslėgto oro tiekimo vamzdžiu (13). Virš tūtos (12) įvorės (10) vidinėje zonoje įtvirtintas atspindėtuvas (14), prie kurio išorinių sienelių kampų α centrinės ciklono ašies (3) atžvilgiu pritvirtintos plokštelės (15). Kampu α viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio (2) tangentiniam įvedimui į cilindrinę korpuso (1) dalį. Ciklone susidaro du oro srautai – pirminis srautas (16) ir antrinis srautas (17).

Akustinio ciklono veikimas

Valomas oro srautas pro užteršto oro tiekimo vamzdį (2) tangentiškai patenka į cilindrinę korpuso dalį (1). Dėl tangentiško oro srauto tiekimo, cilindrinėje korpuso dalyje (1) oro srautas pradeda sukintis apie ciklono simetrijos ašį (3). Kietosios dalelės, esančios sraute, besisukdamos kartu su oro srautu, veikiamos išcentrinės jėgos, pradeda judėti radialine kryptimi link cilindrinio korpuso (1) vidinės sienelės. Užsuktas srautas (16) spirale juda žemyn link siauriausios kūginės dalies (6). Stambesnio frakciškumo kietosios dalelės palei vidinę korpuso sienelę kartu su srautu (15) juda žemyn link siauriausios kūginės dalies (6) ir

LT 5846 B

pro tarpelį (11) patenka į teršalų surinkimo talpą (7). Dėl dinaminio ir statinio slėgio pokyčių sraute (16) prie tarpelio (11) bei dalies iš srauto (16) atskirtų dalelių, kurios patenka į teršalų surinkimo talpą (7), srautas pakeitęs sukimosi kryptį pradeda kilti į viršų. Tokiu būdu susiformuoja antrinis srautas (17), jis nešasi ir dalį mažesnio frakciškumo dalelių, kurios nespejo atsiskirti nuo pagrindinio srauto siauriausioje kūginėje dalyje (6) ir pro tarpelį (11) patekti į taršos surinkimo talpą (7). Papildomai į antrinį srautą (17) vamzdeliu (13) yra tiekiamas suslėgtas oras. Suslėgtas oras vamzdeliu (13) patenka į tūtą (10), iš jos nukreipiamas į atspindėtuvą (14). Atspindėjęs oro srautas su sužadinta aukšto dažnio pulsacija (srauto pulsacija generuojama Hartmano generatoriaus principu) yra nukreipiamas į plokšteles (15), kurios dėl jų posvyrio kampo α užsuka per jas einantį pulsuojantį srautą. Pulsuojančio srauto užsikimo kryptis sutampa su antrinio srauto (17) sukimosi kryptimi, tačiau yra priešinga pirminio srauto sukimosi krypčiai. Dėl papildomo oro srauto, kuris sustiprina antrinio srauto (17) sukimosi intensyvumą, neatskirtos nuo pirminio srauto (16) kietosios dalelės, veikiamos išcentrinės jėgos, grąžinamos atgal į pirminį srautą. Sraute aukšto dažnio pulsacija sukelia mažo dispersiškumo dalių akustinę koaguliaciją, jos sustambėja ir besisukdamos antriniame sraute (17) yra efektyviau grąžinamos į pirminį srautą, iš kurio pro tarpelį (11) patenka į taršos surinkimo talpą (7). Išvalytas antrinis srautas (17) pro išvalyto oro išleidimo vamzdį (2) patenka į aplinką arba nukreipiamas toliau apdoroti, priklausomai nuo pasirinkto valymo proceso technologijos.

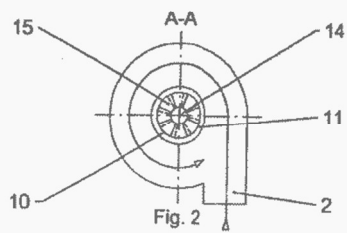
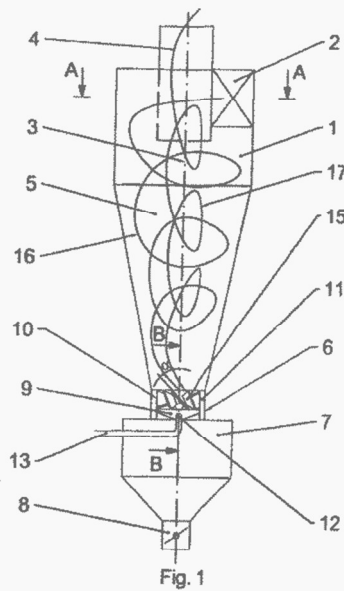
Akustinio generatoriaus (9) patalpinimas siauriausioje kūginio korpuso dalyje (6) jo simetrijos ašyje (3) leidžia padidinti akustinio lauko poveikio efektyvumą mažesnio dispersiškumo dalelėms, kurios liko neatskirtos nuo pirminio srauto (16), sumažinant trukmę tarp dalelių poveikio akustiniu lauku ir atskyrimo iš oro srauto. Tai leidžia sumažinti akustinio lauko intensyvumą, energijos jam formuoti sąnaudas. Be to, mažesnė kietųjų dalelių koncentracija antriniame sraute (17) mažiau slopina akustinį lauką, dėl to pailginamas jo poveikio kietosioms dalelėms laikas, o tai sudaro palankesnes sąlygas efektyvesnei akustinei koaguliacijai. Tai leidžia atsisakyti papildomo oro valymo elektrostatiniais filtrais, plautuvais ir t. t. Akustinio generatoriaus (9) patalpinimas ciklono viduje sumažina oro valymo įrenginių užimamą plotą, sumažėja slėgio nuostoliai dėl vietinių ir kelio kliūčių, o tai mažina energijos užterštam orui valyti sąnaudas.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

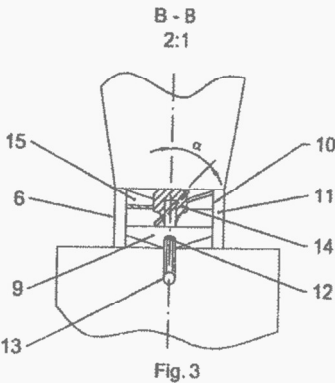
1. Akustinis ciklonas, susidedantis iš cilindrinio korpuso (1) su tangentiškai įvestu į jį užteršto oro tiekimo vamzdžiu (2), išvalyto oro išleidimo vamzdžio (4), kūginės korpuso dalies (5) bei akustinio generatoriaus (9), b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad akustinis generatorius (9), susidedantis iš įvorės (10), srauto formavimo tūtos (12), įvestos per įvorės (10) dugno centrą, ir atspindėtuvo (14), ant kurio išorinio korpuso cilindrinės dalies įvorės (9) vidinės ertmės zonoje pritvirtintos plokštelės (15), sumontuotas ciklono korpuso kūginės dalies (5) viduje, siauriausioje jos vietoje (6), centrinėje simetrijos ašyje (3).

2. Akustinis ciklonas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ant akustinio generatoriaus (9) atspindėtuvo (14) išorinio korpuso dalies pritvirtintų plokštelių (15) viršūnės pasvirusios ciklono korpuso simetrijos ašies (3) atžvilgiu kampų α , kurio viršūnė nukreipta priešinga kryptimi užteršto oro tiekimo vamzdžio (2) tangentiniam įvedimui į cilindrinę korpuso (1) dalį.

LT 5846 B



LT 5846 B



Darius OZAROVSKIS

AKUSTINIO CIKLONO TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai
mechanikos inžinerija (09T)

THE RESEARCH OF ACOUSTIC CYCLONE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences
Mechanics Engineering (09T)

2012 12 21. 11,75 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