

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Inga JAKŠTONIENĖ

CILINDRINIO DAUGIAKANALIO CIKLONO SU REGULIUOJAMAI PUSŽIEDŽIAIS TYRIMAI IR TOBULINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (04T)



LEIDYKLA

Vilnius **TECHNIKA** 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Petras VAITIEKŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

Konsultantas

Dr. Dmytro SEREBRYANSKY (Ukrainos mokslų akademijos šiluminės fizikos institutas (Kijevas), technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2101-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-409-2

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012

© Inga, Jakštonienė, 2012

ingajakstoniene@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Inga JAKŠTONIENĖ

RESEARCHES AND DEVELOPMENT OF CYLINDRICAL MULTICHANNEL CYCLONE WITH ADJUSTABLE HALF-RINGS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

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

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Petras VAITIEKŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Consultant

Dr Dmytro SEREBRYANSKY (Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv), Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas cilindrinis daugiakanalis ciklonas kietosioms dalelėms (KD) šalinti. Pagrindinis tyrimo objektas – cilindrinis daugiakanalis ciklonas su reguliuojamais pusžiedžių tarpais. Darbo tikslas – ištirti priklausomybes, darančias įtaką kietosioms dalelėms iš dvifazio srauto daugiakanaliame ciklone šalinti, taip pat remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais patobulinti daugiakanalį cikloną nustatant optimalius reguliuojamų pusžiedžių tarpus. Darbe sprendžiami šie uždaviniai: nustatyti bendro efektyvumo ciklone priklausomybes nuo oro srauto greičio, kietųjų dalelių dispersiškumo, tankio, koncentracijos ir cilindrinų pusžiedžių skaičiaus, atlikti smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš srauto tyrimus norint nustatyti optimalius pusžiedžių tarpus bei vienfazio ir dvifazio srauto aerodinaminių procesų modeliavimą. Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, taip pat naudotos literatūros bei autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai ir vienas priedas. Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, iškeliamas mokslinis darbo naujumas ir praktinė darbo rezultatų reikšmė, pateikiami ginamieji teiginiai, taip pat pristatomos disertacijos tema paskelbtos autorės publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skiriamas literatūros apžvalgai, kurioje nagrinėjama oro tarša KD, pasaulyje naudojamų ciklonų konstrukcijos ir jų panaudojimo sritys, aprašomos pernašos procesų modeliavimo programos, formuluojamos išvados ir uždaviniai. Antrajame skyriuje pateikiama dinaminio slėgio matavimo kreivalinijiniuose kanaluose tyrimų metodika, rezultatai, jų analizė ir išvados. Trečiajame skyriuje pristatoma daugiakanalio ciklono bendro efektyvumo, naudojant skirtingos kilmės KD, eksperimentinių tyrimų metodika, rezultatai, jų analizė ir išvados. Ketvirtajame skyriuje nagrinėjama skirtingo dydžio KD šalinimo oro sraute daugiakanaliame ciklone metodika, pateikiama gautų rezultatų analizė ir išvados. Penktajame skyriuje aprašomas skaitinis vienfazio ir dvifazio srauto modeliavimas, gauti rezultatai nagrinėjami, vaizduojami ir lyginami su eksperimentiniais duomenimis. Šeštajame skyriuje pristatomas daugiakanalis ciklonas ir nurodomos jo naudojimo sritys.

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: 3 straipsnių rinkinyje, įtraukta į *ISI Web of Science* duomenų bazes, 4 kitose referuojamose tarptautinėse duomenų bazėse, 1 recenzuojamame tarptautinės konferencijos Lietuvoje leidinyje. Disertacijos tema perskaityti 5 pranešimai respublikinėse bei tarptautinėse konferencijose. Įteiktos dvi patentinės paraiškos: daugiakanalis ciklonas (spiralinis korpusas) Ukrainos valstybinio intelektinės nuosavybės departamentui, daugiakanalis ciklonas (cilindrinis korpusas) – LR Valstybiniam patentų biurui.

Abstract

In the dissertation, the problem of air pollution by solid particles (SP) is analyzed. The main object of the research is a cylindrical multichannel cyclone for air purification from SP equipment. The aim of the dissertation is researches and simulation of multichannel cyclone, possessing half-rings of different radius with adjusted clearances in single-phase or double-phase flow aerodynamic processes. In the graduation dissertation, several basic objectives are being solved: determination of the dependence of overall efficiency in the cyclone on air velocity, dispersity, density and concentration of solid particles, number of cylindrical half-rings; performance of researches on cleaning of small dispersive solid particles from the flow by determining the optimal spacing of half-rings as well as simulation of single-phase and two-phase flow aerodynamic processes. The dissertation consists of an introduction, six chapters, general conclusions and recommendations, lists of the references used as well as the list of the author's publications on the dissertation topic and one annex. In the introduction the research problem, relevance of the work are discussed, the research object is described, the aim and objectives of the work are formulated, scientific innovation of the work, practical significance of the work outcomes as well as protective propositions are indicated. The first chapter covers the review of references where air pollution by SP, constructions of globally used cyclones and their usage areas are analyzed. In the second chapter methodology of dynamic pressure measurements in curvilinear channels researches is represented. Results of air flow velocity in curvilinear channels researches, analysis and conclusions are presented. In the third chapter experimental researches methodology of the multichannel cyclone general efficiency using SP of different nature, results and analysis of the research are given, conclusions are formulated. In the fourth chapter methodology of different size SP capture in the air flow in the multichannel cyclone and analysis of the received results as well as conclusions are delivered. In the fifth chapter simulation of the single-phase and double-phase air flow numerical simulation is presented. In the sixth chapter the designed multichannel cyclone and its usage areas are described.

8 articles on the dissertation topics have been published: three articles have been published in the compendium of articles, included into *Web of Science ISI* database; four articles have been published in other international reviewed data bases, one article – in the reviewed publication of Lithuanian international conferences. 5 speeches on the graduation dissertation topic have been made in national and international conferences. Two patent applications have been submitted: multichannel cyclone (helical housing). The State Intellectual Property Department of Ukraine. Multichannel cyclone (cylindrical housing). The State Patent Bureau of the Republic of Lithuania.

Žymėjimai

Simboliai

C – dalelių koncentracija, g/m^3 ;
 D – ciklono skersmuo, m, mm;
 d – dujų įtekėjimo angos skersmuo, mm;
 KD – kietosios dalelės;
 K – kinetinė turbulencijos energija, $\text{m}^2 \times \text{s}^{-2}$;
 N – pusžiedžių skaičius ciklone;
 P – slėgis, Pa;
 ΔP – slėgio kritimas, Pa;
 R – ciklono spindulys, m;
 R_i , ir – i fazės tūrinė dalis, $r_1 + r_2 = 1$;
 $S_{\Phi i}$ – srauto (šaltinio) narys kintamajam Φ_i ;
 S_{ip} – tarpfazinis tūrio srautas;
 T – laikas, s;
 X – kampinė koordinatė, rad;
 v – įtekėjimo dujų greitis, m/s;
 $\mathbf{v}_i$ – fazės greičio vektorius;
 y , r – radialinė koordinatė, m;

z – ašinė koordinatė, m, mm;
 Γ_i – kintamojo Φ_i mainų koeficientas;
 ε – kinetinės turbulencijos disipacijos greitis;
 μ – dujų dinaminė klampa, kg/(m s);
 ρ_1 – oro tankis, kg/m³;
 ρ_2 – dalelių tankis, kg/m³;
 ρ_i – i fazės tankis;
 ξ_n – pasipriešinimo koeficientas;
 Re – Reinoldso skaičius;
 Stk – Stokso skaičius;
 Φ_i – i fazės priklausomas kintamasis, kaip momentas masės vienetui
turbulentumo energija, fazės tūrinė dalis;
 u_r, u_z, u_θ – radialinis, ašinis ir kampinis dalelių greitis, m/s, rad/s;
 u'_r, u'_z, u'_θ – dalelių greičio svyravimai (fluktuacijos) r, z ir θ kryptimi, m/s, rad/s;
 v'_r, v'_z, v'_θ – dujų greičio svyravimai (fluktuacijos) r, z ir θ kryptimi, m/s, rad/s.

Santrumpos

I cilindrinų pusžiedžių padėtis – A_1 pusžiedžių padėtis
II cilindrinų pusžiedžių padėtis – A_2 pusžiedžių padėtis
III cilindrinų pusžiedžių padėtis – A_3 pusžiedžių padėtis

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Mokslinis darbo naujumas.....	4
Praktinė darbo rezultatų reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. ORO TARŠA KIETOSIOMIS DALELĖMIS, JŲ ATSKYRIMAS	
IŠ DUJŲ (ORO) SRAUTO CIKLONAIŠ	7
1.1. Kietųjų dalelių susidarymas, jų sudėtis ir savybės	7
1.2. Susidarantys kietųjų dalelių Lietuvoje kiekiai bei jų poveikis	
žmogaus sveikatai ir aplinkai.....	9
1.3. Ciklonų tipai ir jų panaudojimo sritis	13
1.4. Kietųjų dalelių šalinimas iš dujų srauto daugiakanaliuose ciklonuose	22
1.5. Pernašos procesų modeliavimo programos	30
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	32

2. ORO SRAUTO DAUGIAKANALIO CIKLONO REGULIUOJAMŲ PUSŽIEDŽIŲ KANALUOSE GREIČIO TYRIMAI.....	33
2.1. Oro srauto greičio kanaluose tyrimų metodika.....	33
2.2. Statistinė duomenų analizė.....	41
2.3. Keturkanalio ciklono oro srauto greičio kanaluose tyrimų rezultatai ir analizė	42
2.4. Penkiakanalio ciklono oro srauto greičio kanaluose tyrimų rezultatai ir analizė...	46
2.5. Antrojo skyriaus išvados	50
3. DAUGIAKANALIO CIKLONO BENDRO EFEKTYVUMO TYRIMAI NAUDOJANT SKIRTINGOS KILMĖS KIETĄSIAS DALELES	53
3.1. Keturkanalio ir penkiakanalio ciklonų bendro efektyvumo nustatymo tyrimų metodika	54
3.2. Keturkanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimas ir analizė.....	60
3.3. Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimas ir analizė.....	64
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	77
4. SKIRTINGOS DISPERSIJOS KIETŲJŲ DALELIŲ ŠALINIMO IŠ ORO SRAUTO DAUGIAKANALIAME CIKLONE TYRIMAS IR ANALIZĖ	79
4.1. Keturkanalio ir penkiakanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo nustatymo metodika.....	80
4.2. Keturkanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo tyrimų rezultatai ir analizė.....	83
4.3. Penkiakanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo tyrimų rezultatai ir analizė.....	89
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	95
5. DAUGIAKANALIO CIKLONO AERODINAMINIŲ PROCESŲ MODELIAVIMAS.....	97
5.1. Dvifazio srauto modeliavimo lygtys.....	98
5.2. Skaitinis vienfazio oro srauto daugiakanaliame ciklone modeliavimas	99
5.3. Dvifazio srauto daugiakanaliame ciklone skaitinis modeliavimas	107
5.4. Penktąjo skyriaus išvados.....	118
6. INŽINERINIAI SPRENDIMAI.....	121
6.1. Daugiakanalio ciklono taikymo sritys ir konstrukciniai sprendimai	121
6.2. Šeštojo skyriaus išvados.....	126
BENDROSIOS IŠVADOS	127
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	129
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	137
PRIEDAS. Oro srauto greičiai ciklono kanaluose	139

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formation.....	1
Topicality of the work	2
Object of the research.....	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methodology of research.....	3
Scientific originality of the work	4
Practical value of the work	4
Defended propositions.....	4
Approbation of the scientific work	4
Structure of the scientific work	5
1. AIR POLLUTION BY SOLID PARTICLES, THEIR SEPARATION FROM GAS (AIR) FLOW BY CYCLONE	7
1.1. Composition of solid particles in burning fuel, their composition and characteristics	7

1.2. Composing quantities of solid particles in Lithuania and their impact on human health and environment	9
1.3. Cyclone types and their usage	13
1.4. Capture of solid particles from the gas flow in multichannel channels	22
1.5. Programs for simulation of carry processes	30
1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of dissertation tasks	32
2. RESEARCHES OF AIR FLOW VELOCITY IN CYCLONE ADJUSTED SEMI-RINGS CHANNELS.....	33
2.1. Research methodology of air flow velocity in channels	33
2.2. Analysis of statistical data	41
2.3. Results and analysis of researches of four-channel cyclone air flow velocity in channels	42
2.4. Results and analysis of researches of five-channel cyclone air flow velocity in channels	46
2.5. Conclusions of the second chapter	50
3. GENERAL EFFICIENCY RESEARCHES OF MULTICHANNEL CYCLONE USING SOLID PARTICLES OF DIFFERENT ORIGIN	53
3.1. Research methodology for identification of general efficiency of four-channel and five-channel cyclone	54
3.2. Research and analysis of general efficiency of four-channel cyclone	60
3.3. Research and analysis of general efficiency of five-channel cyclone.....	64
3.4. Conclusions of the third chapter	77
4. RESEARCH AND ANALYSIS OF REMOVAL OF DIFFERENT DISPERSION SOLID PARTICLES IN MULTICHANNEL CYCLONE FROM AIR FLOW	79
4.1. Research methodology of the efficiency of removal of fine-dispersive solid particles in four-channel and five-channel cyclone from the air flow	80
4.2. Efficiency research results and analysis of four-channel cyclone fine-dispersive solid particles removal from the air flow	83
4.3. Efficiency research results and analysis of five-channel cyclone fine-dispersive solid particles removal from the air flow	89
4.4. Conclusions of the fourth chapter	95
5. SIMULATION OF AERODYNAMIC PROCESSES OF MULTICHANNEL CYCLONE	97
5.1. Double-phase Flow Simulation Equations	98
5.2. Numerical simulation of single-phase air flow in multichannel cyclone.....	99
5.3. Numerical simulation of double-phase flow in multichannel cyclone.....	107
5.4. Conclusions of the fifth chapter	118
6. ENGINEERING SOLUTION	121
6.1. Scope of application and design solutions of multichannel-cyclone	121
6.2. Conclusions of the sixth chapter.....	126

GENERAL CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	127
REFERENCES	129
LIST OF THE AUTHOR’S PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION.....	137
APPENDIX. Air flow velocities in channels of cyclone	139

Ivadas

Problemos formulavimas

Pagrindiniai kietųjų dalelių (KD) išmetimo į aplinką Lietuvoje šaltiniai yra energetikos objektai – šiluminės elektrinės ir katilinės bei pramonės įmonės. Užteršta atmosfera savo ruožtu sąlygoja išlaidas, atsirandančias dėl pablogėjusios gyventojų sveikatos, sumažėjusio žemės ūkio kultūrų derlingumo, greitesnio ilgalaikio kapitalo nusidėvėjimo (Štreimikienė 2003).

Rusijos Federacijos Aplinkos apsaugos ir gamtos išteklių ministerija prognozuoja, kad dujų išteklių pasibaigs 2025 m., o nuo 2030 m. pirmenybė bus teikiama anglies ir atominiai energetikai (Бурдаков 2007). Tokie kuro ir energetikos balanso pasikeitimai visame pasaulyje gali pareikalauti ekonomiškiausių ir efektyviausių oro valymo įrenginių panaudojimo.

Europos Sąjungos (Direktyva 2008/50/EB) ir Lietuvos teisės aktai reglamentuoja dviejų teršalo frakcijų – KD₁₀ (iki 10 mikrometrų skersmens dalelės) ir KD_{2,5} (iki 2,5 μm skersmens dalelės). Kietosios dalelės, kurių aerodinaminis skersmuo yra ne didesnis už 2,5 μm, yra daugiausia problemų sveikatai keliantys teršalai. Jų poveikis yra įvairus – nuo nedidelio poveikio kvėpavimo sistemai iki ankstyvos mirties.

Įprastų išcentrinį oro valymo įrenginių efektyvumas siekia nuo 85–90 %, tačiau daugelio ciklonų trūkumas – žemas mažesnių nei 10 μm dalelių surinkimo

efektyvumas. Tai ypač aktualu, kai dėl sveikatai žalingų kietųjų dalelių išmetimo į orą reikia laikytis griežtų aplinkosauginių reikalavimų. Kiti sukurti aukšto efektyvumo oro valymo nuo kietųjų dalelių įrenginiai (rankoviniai, elektrostatiniai filtrai ir kt.) yra gana brangūs, o jų eksploatacija sudėtinga.

Taigi, norint atitikti didžiausias ES šalių leidžiamas išmetamų kietųjų dalelių koncentracijas į atmosferą, būtinas efektyvių oro valymo įrenginių panaudojimas.

Darbo aktualumas

Siekiant sumažinti oro taršą kietosiomis dalelėmis, visų pirma turi būti sprendžiamos ne tik aplinkosauginės problemos, bet ir ieškoma būdų, kaip išvengti pavojaus žmonių sveikatai. Mažinant oro taršą kietosiomis dalelėmis yra įgyvendinami naujos Direktyvos (2008/50/EB) dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje tikslai. Parenkant atitinkamas oro valymo technologijas, gali būti pasiektas teigiamas efektas, kuris dažniausiai išreiškiamas ir įvertinamas kapitalinėmis ir eksploatacinėmis išlaidomis, pasirinkto oro valymo įrenginio efektyvumu ir patikimumu.

Literatūros šaltiniuose nerasta duomenų apie ciklonus, turinčius pusžiedžių tarpų reguliavimo sistemą, bei atliktus eksperimentinius tyrimus. Todėl labai aktualu sukurti naujos kartos cilindrinį daugiakanalį su reguliuojamąja pusžiedžių sistema cikloną, kuris būtų skirtas skirtingos kilmės, dispersijos, tankio bei koncentracijos kietosioms dalelėms iš dujų (oro) srauto valyti.

Pastaruoju metu tyrinėtojai Tananajev (1997), Serebryanskyy, Prijomov (2004) pasižymėjo tuo, kad prisidėjo prie ciklono efektyvumo didinimo, kurdami naują daugiakanalio ciklono (išcentrinio filtro) modelį, kurio konstrukcijoje yra kreivalinijiniai kanalai su skirtingo spindulio pusžiedžiais. Siekdami įvertinti ypač mažos dalelių koncentracijos įtaką ciklono darbui, daug vertingų tyrimų atliko mokslininkai Zhongli Ji, Zhiyi Xiong, Xiaolin Wu, Honghai Chen, Hongxiao Wu (2007). Pattersonas ir Munzas (1996) tyrė kietųjų dalelių koncentracijos ir srauto temperatūros poveikį ciklono efektyvumui. Hoffmannas ir kt. (1991, 1992) nustatinėjo kietųjų dalelių koncentracijos poveikį esant mažesniai dujų srauto greičiui. Kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą, naudojant dideles įleidžiamų kietųjų dalelių koncentracijas (iki $24,5 \text{ kg/m}^3$), esant vidutiniam įtekėjimo greičiui 7, 18 ir 27 m/s , slėgio kritimui tyrė Fassani ir kt. (2000). Tačiau reikia pasakyti, kad mokslinėje literatūroje paskelbti eksperimentų ir skaitinio modeliavimo rezultatai, kai dulkių koncentracija mažesnė nei $1,0 \text{ g/m}^3$, yra gana negausūs.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – oro valymo įrenginys – cilindrinis daugiakanalis ciklonas (keturkanalis ir penkiakanalis) su reguliuojamais pusžiedžiais.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – ištirti veiksmų kietosioms dalelėms iš dvifazio srauto daugiakanaliame ciklone šalinti įtaką ir remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais patobulinti daugiakanalį cikloną nustatant optimalias reguliuojamų pusžiedžių padėtis.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti vienfazio srauto cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono greičių kanaluose tyrimus;
2. Nustatyti cilindrinio daugiakanalio ciklono bendro efektyvumo priklausomybę nuo įvairių parametrų (oro srauto įtekėjimo greičio, kietųjų dalelių dispersiškumo, tankio, koncentracijos, cilindrinio pusžiedžių skaičiaus) naudojant skirtingos kilmės kietąsias daleles;
3. Atlikti smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto cilindriname daugiakanaliame ciklone esant skirtingoms cilindrinio pusžiedžių padėtimis tyrimus, nustatant optimalią pusžiedžių padėtį;
4. Atlikti vienfazio ir dvifazio oro srauto cilindriname daugiakanaliame ciklone aerodinaminių procesų modeliavimą ir gautus rezultatus palyginti su eksperimentiniais.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimo ir kietųjų dalelių koncentracijos nustatymo (svorio) metodai, taip pat smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumui nustatyti naudojama tyrimų metodika. Vienfaziui ir dvifaziui srautui modeliuoti naudotas PHOENICS 3.5 programinės įrangos paketas.

Mokslinis darbo naujumas

Atlikti kompleksiniai eksperimentiniai cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklonų, turinčių reguliuojamą pusžiedžių sistemą, efektyvumo ir smulkiadispersinių dalelių (nuo 1–7 μm) tyrimai apima šių ciklonų tobulinimo ir modeliavimo procesus, kuriais nustatyta, kad penkiakanalio ciklono su reguliuojamais pusžiedžiais efektyvumas prilygsta šešiakanalio neturinčio reguliuojamų pusžiedžių (išcentrinio filtro) efektyvumui.

Praktinė darbo rezultatų reikšmė

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais galima teigti, kad cilindrinis penkiakanalis ciklonas, nustačius optimalias pusžiedžių padėtis, gali būti naudojamas skirtingos kilmės smulkiadispersinėms kietosioms dalelėms iš dujų (oro) srauto šalinti.

Ginamieji teiginiai

1. Penkiakanalio ciklono su reguliuojamais pusžiedžiais efektyvumas prilygsta šešiakanalio ciklono (išcentrinis filtras) neturinčio reguliuojamų pusžiedžių efektyvumui.
2. Keturkanalio ir penkiakanalio ciklono bendras efektyvumas šalinant iš oro kietąsias daleles priklauso nuo oro srauto greičio, kietųjų dalelių koncentracijos, tankio bei periferinio ir tranzitinio oro srauto kiekio pasiskirstymo cilindrinį pusžiedžių tarpuose.
3. Patobulintas penkiakanalis ciklonas gali pašalinti iš oro srauto smulkiadispersines – nuo 1 iki 7 μm aerodinaminio skersmens kietąsias daleles, o tai nebūdinga tradiciniams ciklonams, pasiekdamas 1 μm – 49,1 %, 2 μm – 65,1 %, 4 μm – 77,9 %, 7 μm – 98,3 % valymo efektyvumą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti 7 moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *ISI Web of Science* sąrašą (Vaitiekūnas and Jakštonienė, 2010; Vaitiekūnas *et al.* 2010; Baltrėnas *et al.* 2011), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos Lietuvoje leidinyje (Jakštonienė *et al.* 2011), trys – recenzuojamoje konferencijos Lietuvoje medžiagoje, įtrauktoje į *Index Copernicus* duomenų bazę (Jakštonienė and Vaitiekūnas, 2009; Jakštonienė and Vaitie-

kūnas, 2010; Jakštonienė and Vaitiekūnas, 2011). Parengtos ir įteiktos dvi patentinės paraiškos patentui gauti: Ukrainos valstybiniam intelektinės nuosavybės departamentui (Paraiškos Nr. 2011 03389 (Baltrėnas, P.; Serebryanskyi, D.; Jakštonienė, I. 2011)); LR valstybiniam patentų biurui (Paraiškos Nr. 2011 041 (Baltrėnas, P.; Viteikūnas, P.; Sigal, A.; Serebryanskyi, D.; Jakštonienė, I. 2011)).

Disertacijoje aprašytų atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Respublikinėje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas Lietuvos – ateitis“ 2009–2012 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2011 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, šeši tiriamąją medžiagą atskleidžiantys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros bei autoriaus publikacijų sąrašai, taip pat vienas priedas.

Darbo apimtis – 142 puslapiai su priedu, tekste panaudotos 28 numeruotos formulės, 68 paveikslai ir 20 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 105 literatūros šaltiniai.

Oro tarša kietosiomis dalelėmis, jų atskyrimas iš dujų (oro) srauto ciklonais

Skyriuje analizuojami oro valymo įrenginių – ciklonų konstrukcijos ir veikimo principai, jų taikymo sritys ir efektyvumas. Pateiktos KD dalelių savybės, išanalizuoti KD susidarymo iš stacionarių taršos šaltinių Lietuvoje kiekiai ir pernašos procesų modeliavimo programos.

1.1. Kietųjų dalelių susidarymas, jų sudėtis ir savybės

Dažniausiai kietųjų dalelių koncentracijos padidėjimą lemia transporto sukelta tarša, statybų, gatvių tiesimo, remonto darbai, energijos gamyba, kūrenimas kietuoju kuru, teršalų išsisklaidymui nepalankios meteorologinės sąlygos (rūkas, dulksna, silpnas vėjas). Dalelės gali būti išmetamos iš metalo lydymo, įėjimo formų gamybos bei kitų pramoninių procesų metu.

Susidarančių teršalų kiekis priklauso nuo deginimo technologijos pobūdžio, kuro rūšies ir degimo sąlygų. KD susidaro deginant kurą, jo mineralinė dalis

virsta pelenais. Tas būdinga praktiškai kiekvieno kietojo ir kai kurio skystojo kuro rūšims. Pelenuose būna nemažai SiO_2 , šarminių ir žemės šarminių metalų oksidų. Sunkiųjų metalų oksidų buvimas pelenuose (pvz., V_2O_5 mazuto ar orimulsijos atveju) labai padidina išmestų pelenų žalą aplinkai. Išmetamas pelenų kiekis priklauso nuo mineralinės kuro dalies arba, kitaip tariant, nuo kuro peleningumo. Šiuo atveju dyzelinio kuro peleningumas siekia 0,025 %, mazuto – iki 0,1 %, orimulsijos – 0,25 %, medienos – 0,6 %, durpių – 12 %, anglies – iki 40 %, skalūnų – iki 50 % (Denafas 2000).

Deginant kietąjį kurą, susidaro įvairaus dydžio kietosios dalelės – nuo milimetro (1 mm = 1000 μm) iki dešimtųjų μm dalių. Jos susidaro iš kure esančių nedegių priemaišų, nesudegusios kuro anglies, suodžių, liepsnoje pasigaminusių kietųjų sieros junginių, degimo oro dulkių. Mazuto dūmuose apie pusę pagal svorį dalelių gali būti mažesnių už 1 μm , orimulsijos dūmuose submikroninių dalelių kiekis gali siekti 70 % ir daugiau nuo visų dalelių svorio. Aplinkos ore tokios dalelės išsilaiko kelias dienas ar savaites, o įkvėpus nusėda į plaučius. Dėl daromo žalingo poveikio žmonių sveikatai yra ribojamas KD kiekis kurą deginančių įrenginių išmetamuosiuose dūmuose (Šležas 2004).

Be pelenų, į susidarantių KD sudėtį įeina dar ir suodžiai. Suodžiai (kietosios dalelės) – dispersinis anglies produktas, gaunamas nevysiškai sudegus angliavandeniliams arba juos termiškai suskaidžius. Tai kietosios juodos sferinės 0,1–0,35 μm dydžio dalelės, susidedančios iš kristalų, kurių sudėtis tokia: 95–99 % anglies, 0,2–0,5 % vandenilio ir šiek tiek mineralinių medžiagų, sieros. Tankis – 1800–1900 kg/m^3 (Anuszewski and Larson 1992).

Kietųjų dalelių savybės. Dujų valymo nuo kietųjų dalelių įrenginių darbo efektyvumas labai priklauso nuo KD fizikinių-cheminių savybių. Pagrindiniai požymiai, apibūdinantys KD, yra dispersinė sudėtis, tankis, sulipimas, abrazyvumas ir elektrinė varža.

Dispersinė sudėtis. Dalelės dydis yra pagrindinė charakteristika, nes KD gaudytuvo tipo parinkimas priklauso nuo gaudomų KD dydžio – skersmens d . KD dydžiui nustatyti naudojama keletas metodų: analizė sijoiant, separuojant, sedimentacija, mikroskopinė analizė. KD dispersinė sudėtis priklauso nuo kuro deginimo būdo (sluoksninis ar fakelinis), nuo kuro smulkinimo būdo fakelinio deginimo atveju. Degimo metu ir dūmus transportuojant dūmtakiais vyksta KD smulkinimas ir koaguliacija, KD dispersinė sudėtis keičiasi, tačiau laikoma, kad lieka tie patys dispersiškumo dėsningumai: iš smulkesnių dulkių gaunamos smulkesnės frakcijos kietosios dalelės ir atvirkščiai.

Kietųjų dalelių tankis. Svarbi deginių KD savybė yra jų tankis, kuris skirstomas į tikrąjį (dalelės medžiagos), nusėdusio sluoksnio ir tariamąjį. Nusėdusių dalelių sluoksnio tankis svarbus parenkant oro valymo įrangos bunkerį matmenis. Daugumai kuro pelenų jis yra 600–1000 kg/m^3 , susigulėjus sluoksniui padidėja 1,2–1,5 karto. Dalelių nusodinimo metodo parinkimui daug svarbesnis yra

tariamasis tankis, apibūdinamas dalelės masės ir jos tūrio, įskaitant poras, tuštumas ir kt., santykiu. Pvz., didesnio tariamojo tankio daleles lengviau sulaikyti elektrostatinio ir ypač inercinio tipo gaudytuvuose, o mažesnio – rankoviniuose filtruose ir skruberiuose. Tariamasis dalelių tankis priklauso nuo jų sudėties ir svyruoja plačiose ribose nuo kelių šimtų iki tūkstančio kg/m^3 . Didelio tankio dalelėse visada yra daug mineralinių kuro priemaišų elementų (Ramesh and Koziski 2001).

Abrazyvumas. Projektuojant ar eksploatuojant dūmų ar dulkių valymo sistemas, reikia atsižvelgti į kietųjų dalelių abrazyvumą, nes metalo erozija, esant vienodiems dūmų greičiams ir jų užterštumo koncentracijoms, priklauso nuo dalelių kietumo, formos, matmenų bei tankio. Ši savybė įvertinama parenkant valomų dujų greičius ir dujotakių bei ciklono sienelių medžiagą ir storį (Švenčianas 1994).

KD dalelių sulipimas. Ši savybė ypač svarbi, nes nuo KD galimybės sulipti ar prilipti prie ciklonų sienelių priklauso įrenginio efektyvumas. Dažniausiai pasitaikantis ciklonų darbo sutrikimas – jų užkimšimas KD. Pagal sulipimą KD skirstomos į keturias grupes: nesulimpančias (molžemis, šlako dulkės), mažai sulimpančias (akmens anglies pelenai), vidutiniškai sulimpančias (rusvųjų akmens anglių pelenai), gerai sulimpančias (cemento, molio dulkės, antracito pelenai) – šios grupės dulkės ne tik užkemša ciklonus, bet ir blogai byra iš bunkerų.

Kitos savybės – forma, lipnumas, hidroskopiškumas, birumas, lyginamasis paviršiaus plotas ir kt. yra ne tokios reikšmingos ir vertinamos tik esant tam tikroms sąlygoms. Deginių KD taip pat labai svarbus dalelių degamumas, savaiminis užsiliepsnojimas ir sprogstamumas. Savaiminis užsidegimas ir degumas yra ypač svarbus, norint tinkamai parinkti gaudytuvų kaupimo talpas, sandėliuojant surinktus teršalus.

1.2. Susidarantys kietųjų dalelių Lietuvoje kiekiai bei jų poveikis žmogaus sveikatai ir aplinkai

Lietuvos miestuose ir pramonės centruose oro kokybė daugiausia priklauso nuo vietinių taršos šaltinių – transporto, energetikos ir pramonės įmonių – išmetamų teršalų. Dėl sumažėjusios pramoninės veiklos šilumos gamyba yra viena svarbiausių (po transporto) aplinkos oro taršos šaltinių (Sitnikovas ir Denafas 2002; Aplinkos oro 2006).

D. Štreimikienė ir I. Konstantinavičiūtė (2003), analizuodamos Lietuvos energetikos plėtros prioritetus ir subalansuotumo rodiklius, cituodamos kitų šalių autorių publikacijų duomenis teigia, kad energetika vaidina pagrindinį vaidmenį visais subalansuotos plėtros požiūriais – ekonominiu, socialiniu ir aplinkosauginiu. Energijos gamyba ir jos panaudojimas sąlygoja visų lygių – vietinio, regio-

ninio ir globalinio – aplinkos kokybę. Tradicinių energijos išteklių išekvojimas, atliekų sanaupos, miškų iškirtimas, vandens tarša, dirvožemio suardymas – tai vis energetikos plėtros padarinių pavyzdžiai.

Iš šiluminių elektrinių tarša padidėjo, nutraukus vykdyti Ignalinos AE eksploatavimo darbus. Lietuvos oro baseiną teršia ir iš kitų regionų atnešti teršalai. Paprastai skiriamas dvejopas užteršto oro poveikis gyvajai gamtai ir žmogui:

- tiesioginis arba pirminis užteršto oro poveikis per kvėpavimo takus, odą ir pan.;

- netiesioginis arba antrinis poveikis, kuris daugiausia pasireiškia užteršties atmosferos krituliams teršiant dirvožemį bei vandenį.

Padidėjusio oro užterštumo poveikis gyventojų sveikatai gali būti trumpalaikis ir ilgalaikis, atitinkamai sukeliantis ūmius ir lėtinius sveikatos sutrikimus. Miesto rūko ar smogo atvejais stebimi ūmūs sveikatos sutrikimai: dirginami viršutiniai kvėpavimo takai – peršti nosį, gerklę, atsiranda kosulys bei pasunkėjas kvėpavimas silpnesnės sveikatos žmonėms (Bukantis *ir kt.* 2008).

KD_{2.5} – ypač kenksmingos žmonių organizmui, kadangi gali giliai praskverbti į plaučius ir būti daugelio kvėpavimo ligų sukėlimo priežastis (Schwartz *et al.* 1996; Pagano *et al.* 1998; Samet *et al.* 2000; Rimkus *ir kt.* 2006). Be to, į plaučius jos gali pernešti kancerogeninius junginius. Jos gali būti natūralios kilmės (vėjo pakeltos dulkės, jūros druskos ir kt.), patenkančios į orą žmogaus ūkinės veiklos metu (iš automobilių, elektrinių ar pramonės įmonių, deginant medieną), taip pat gali susiformuoti atmosferoje, kai dujiniai teršalai (SO₂, NO_x ar lakieji organiniai komponentai) transformuojasi cheminių reakcijų metu. Stambesnės kietosios dalelės paprastai per kelias valandas nuo patekimo į orą nusėda arba yra kritulių „išplaunamos“ netoli nuo emisijos vietos, o KD_{2.5} išlieka ore daug ilgesnį laiką ir kartu su oro mase gali nukeliauti labai didelius atstumus (Rimkus *ir kt.* 2006).

Kasdieniai KD₁₀ arba KD_{2.5} koncentracijos ore pokyčiai siejami su kasdieniais mirties atvejų pokyčiais, padidėjusios hospitalizacijos dėl kvėpavimo takų ir širdies veiklos sutrikimų bei astmos simptomų pasireiškimo skaičiais. Teršalai ardo bronchų, plaučių ląsteles – taip mažėja organizmo atsparumas virusams ir bakterijoms. Žmonės dažniau ima sirgti tokiomis ligomis, kaip bronchitas, plaučių uždegimas, astma, lėtinė obstrukcinė plaučių liga, net laukiama gyvenimo trukmės sutrumpėjimo iki 1–2 metų (Aplinkos oro... 2006).

KD nusėdus ant augalų paviršiaus, papūtus vėjui ar nuplovus lietaui, jos sėda ant dirvos paviršiaus, o likusioji dalis per lapų žioteles ar epidermio ląsteles skverbiasi į lapų ar stiebų audinius. Nusėdusios ant lapų paviršiaus KD blokuoja šviesos patekimą į lapus ir mažina fotosintezės intensyvumą, be to, gali užkimšti žioteles ir riboti lapų augimą. Toksiškos KD augalams gali tapti nuodingos.

Europos Sąjungos aplinkosauginės politikos tikslas – pasiekti tokius priimtinius oro kokybės lygius, kurie neturėtų neigiamo poveikio arba nekeltų grėsmės

aplinkai ir žmogaus sveikatai. Pagal moksliškai nustatytą arba įvertintą žmogaus sveikatai ir aplinkai poveikį yra nustatyti tam tikri aplinkos oro kokybės (ribinės ir siektinos vertės) teršalams standartai. Šių standartų siekimas nėra paremtas technologijomis arba ekonomine nauda. Visoje Europos Sąjungoje taikomi vienodi standartai, bet su viena išlyga – konkrečių teritorijų (pvz., gamtos apsauga) aplinkos oro apsaugos normas reglamentuoja nacionalinė teisinė bazė (Aplinkos oro... 2006).

EB oro kokybės politika ir teisės aktai yra skirti padėti valstybėms narėms siekti nustatytų ribų ir sukurti saugesnę aplinką savo piliečiams. Mažinant oro taršą kietosiomis dalelėmis yra įgyvendinami naujos Direktyvos tikslai dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje (Direktyva 2008/50/EB).

Oro kokybės direktyva bei Teminė oro taršos strategija ir švaraus oro Europoje (angl. *Café*) programa siekiama užkirsti kelią žalingam poveikiui aplinkai ir sveikatai. Švaraus oro Europoje programa ir iniciatyva INSPIRE siekiama iki 2020 m. sumažinti šią taršą.

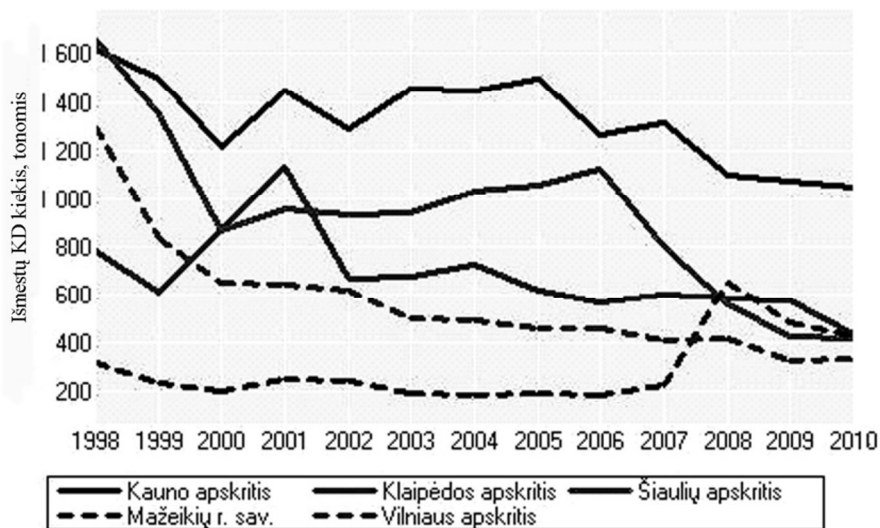
Susidarantys kietųjų dalelių Lietuvoje kiekiai. Teršalų koncentracijos padidėjimas paprastai susijęs arba su didesniu jų išmetimu, arba su nepalankiomis teršalų išsisklaidymui meteorologinėmis sąlygomis. Lietuvos statistikos departamento duomenimis, didžiausių KD išmetimų iš stacionarių taršos šaltinių kaita per pastaruosius dvylika metų pavaizduota 1.1 paveiksle.

Analizuojamuoju 1998–2010 m. laikotarpiu daugiausia KD į atmosferą pateko Kauno apskrityje – 17 271,8 t. Šiaulių apskrityje – mažiau 5149,9 t. už Kauno apskritį, nes bendras trylikos metų laikotarpio teršalų kiekis siekė 12 121,9 t. Klaipėdos ir Vilniaus apskrityse teršalų kiekiai siekė 8845,5 tūkst. t ir 7438,4 t. Mažiausiai KD buvo išmesta Mažeikių rajono savivaldybėje – 3809,2 tūkst. t.

Visose analizuojamosiose apskrityse bendras kietųjų teršiančių medžiagų kiekis kas dveji metai sudarė: 1998 m. – 5678,5 tūkst. t, 2000 m. – 3818,8 tūkst. t, 2003 m. – 3769 tūkst. t, 2006 m. – 3593,5 tūkst. t, 2009 m. – 2884,3 tūkst. t ir 2010 m. – 2657,3 tūkst. t, o tai rodo, kad nuo 1998 m. iki 2000 m. buvo ženklus teršalų kiekio sumažėjimas, kuris siekė – 1859,7 tonų. Lyginant 2000 m. ir 2002 m., teršalų kiekis sumažėjo tik 0,69 t, o 2002–2004 m. laikotarpiu tarša padidėjo 0,130 t, nuo 2003 m. iki 2005 m. tarša taip pat padidėjo – 0,60 t. KD tarša ženkliai padidėjo 2008–2010 m. Mažeikių rajono savivaldybėje. Kaip matyti iš pateiktų duomenų, kietųjų teršiančių medžiagų tendencija Lietuvos apskrityse pamažėjo nežymiai, neįskaitant 1998–2000 m.

Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, oro kokybės stebėjimų duomenys parodė, kad 2009 m. oro kokybė šalies miestuose buvo blogesnė negu 2010 m. Beveik visose oro kokybės tyrimų stotyse užfiksuota didesnė KD_{10} (kietosios dalelės iki 10 μ m skersmens) ir $KD_{2,5}$ (smulkesnės kietosios dalelės iki 2,5 μ m skersmens) vidutinė metinė koncentracija.

Užterštumo padidėjimas dažniau buvo stebimas šaltuoju metų laiku, jį sąlygojo po poros metų pertraukos grįžę žiemos šalčiai. Vidutinė metinė teršalų koncentracija 2010 m. neviršijo nustatytų ribinių verčių. Tačiau tam tikromis dienomis KD10 koncentracija visuose miestuose viršijo ribinę vertę, nustatytą vidutinei paros koncentracijai (50 mg/m^3). Pagal teisės aktų reikalavimus, vidutinė paros KD10 koncentracija neturi viršyti ribinės vertės daugiau kaip 35 dienas per metus. 2010 m. Vilniaus, Kauno, Šiaulių ir Panevėžio stotyse buvo užfiksuota nuo 39 iki 50 dienų, kai šis kriterijus buvo viršytas, kituose miestuose – mažiau nei 35 dienos.



Lietuvos statistikos departamentas

1.1 pav. Kietųjų dalelių išmetimo į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių skirtingose Lietuvos apskrityse ir savivaldybėse dinamika 1998–2010 m.

Fig. 1.1. Dynamics of emission of solid particles into atmosphere from stationary pollution sources in various Lithuanian counties and municipalities 1998 – 2010 (Lietuvos statistikos 2009)

KD koncentracijos padidėjimą dažniausiai lėmė dėl šalčių žiemos mėnesiais suintensyvėjusi šiluminės energijos gamyba ir dėl to padidėję teršalų išmetimai į orą tiek iš energetikos įmonių, tiek iš individualių namų šildymo įrenginių. Be to, įtakos tam galėjo turėti ir Ignalinos atominės elektrinės uždarymas, kai didesnis krūvis gaminant elektrą teko labiau taršioms miestų šiluminėms elektrinėms, o dėl aukštų gamtinių dujų ir elektros kainų dalis gyventojų savo būstų

šildymui vietoj jų rinkosi kitokius, taip pat taršesnius būdus (Valstybinis aplinkos 2010).

Todėl būtina imtis visų įmanomų priemonių oro taršai mažinti, kad ateityje teršalų koncentracijos neviršytų nustatytų normų, kadangi tai ne tik kelia grėsmę gyventojų sveikatai, bet ir gali turėti neigiamų pasekmių šaliai, pvz., tuo atveju, jei būtų imtasi teisinių veiksmų prieš Lietuvą dėl ES direktyvų reikalavimų nesilaikymo.

1.3. Ciklonų tipai ir jų panaudojimo sritis

Teoriniai ir eksperimentiniai ciklonų tyrinėjimai pradėti XIX amžiuje (Козлов 1993; Федоров *и др.* 2002; Ватин и Стрелец 2003).

Kaip teigia kai kurie autoriai (Ватин и Стрелец 2003), nėra žinoma, kas ir kada sukūrė pirmąjį cikloną, bet nuogirdos teigia, kad Rusija turėjo kažką panašaus į cikloną, kuris buvo naudojamas žinomiausiose to meto N. Demidovo (1705 m.) karinių ginklų gamyklose. Vokiečių mokslininkas Mathias Bonata 1982 m. savo straipsnyje „Ciklonai – valomų dujų įrenginiai nuo kietųjų dalelių“ pristatė ciklonų istoriją:

1886 m. amerikietis O. M. Meursault gavo patentą ciklono įrenginiui, nors šie įrenginiai buvo išrasti daugiau kaip prieš 100 metų.

Eksperimentinius ciklono tyrimus atliko daugelis mokslininkų, bet tik nedaugelis žino, kad L. Prandtlis teoriškai pateikė ir pagrindė išvadas apie srautų mechaniką. MAN firma Niurnberge 1901 m. užpatentavo ciklono įrenginį, kurio išradėjas yra L. Prandtlis.

Ciklonai – vieni iš plačiausiai naudojamų įrenginių, skirtų dujoms valyti, šalinant iš jų KD. Pagal valymo metodą šis įrenginys priskiriamas prie sausojo oro valymo įrenginių ir gali būti naudojamas įvairiose gamybos srityse, kurios yra susijusios su KD išmetimu į atmosferą. KD susidaro degimo proceso, kitų cheminių reakcijų, džiovinimo, sausų medžiagų transportavimo metu, kalnakasybos, metalurgijos ir liejimo pramonėse, anglies katilinėse ir elektrinėse, statybinių medžiagų gamyboje (cementas, kalkės, keramikos dirbiniai ir kt.), produkcijos perdirbimo, maisto produktų (sausas pienas, mišiniai kūdikiams, mielės ir kt.) gamyboje.

Dėl savo paprastumo ir nedidelių konstravimo, eksploatavimo, priežiūros ir energijos suvartojimo išlaidų ciklonai plačiai naudojami naftos ir perdirbimo pramonėje KD šalinti. Panaudojus tinkamas medžiagas ir konstravimo metodus, ciklonus galima eksploatuoti esant aukštai temperatūrai ir slėgiui, kai aukšto efektyvumo įrenginių naudojimas gali turėti didelės reikšmės tokiuose energijos ir perdirbimo pramonės procesuose, kaip degimas verdančiame sluoksnyje esant slėgiui, gazifikuotos anglies dujų ir garo kombinuotas ciklas ir fluidinis katalizi-

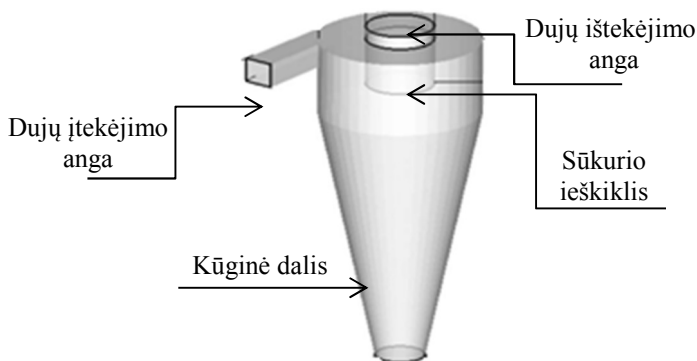
nis krekingas. Tokiuose procesuose ciklonai dabar yra beveik vienintelis, visiškai komercinis dalelių pašalinimo iš aukštos temperatūros dujų būdas (Zhou and Sao 1990; Hu *et al.* 2005; Gujun Wan *et al.* 2008).

Daugelio ciklonų trūkumas yra žemas KD surinkimo efektyvumas, ypač jei dominuoja mažesnės nei 10 μm dalelės. Taip pat esminis šio įrenginio trūkumas – didelis slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams ir su tuo susijusios energijos sąnaudos. Nuo pat jo atsiradimo daugiau kaip prieš šimtą metų daug tyrinėtojų yra prisidėję prie ciklono efektyvumo didinimo kuriant naujus modelius (Molerus and Gluckler 1996; Liden and Gudmundsson 1997).

Tačiau daugeliu atvejų efektyvumo padidėjimas yra nežymus ir kai kuriais atvejais susijęs su sudėtinga sandara ir papildomomis išlaidomis eksploatacijai (Gregg 1995).

Nukrypdomos nuo standartinių modelių kelios tyrinėtojų grupės patikrino įvairių geometrinių proporcijų bandomųjų ciklonų veikimą ir pasiūlė naujus modelius (Saltzman and Hochstrasser 1983; Moore and McFarland 1996), tačiau šių modelių panaudojimas plačiu mastu kelia abejonių.

Paprasta ciklono konstrukcija iš esmės išliko nepasikeitusi daugiau nei šimtmetį. Tačiau dažniausiai naudojami grįžtamojo srauto (tangentiniai) ir ašinio srauto ciklonai. Tipiškiausia grįžtamojo srauto ciklono konstrukcija (1.2 pav.) susideda iš nustatyto skersmens cilindrinio korpuso ir kūginės dalies (Bernardo *et al.* 2006).



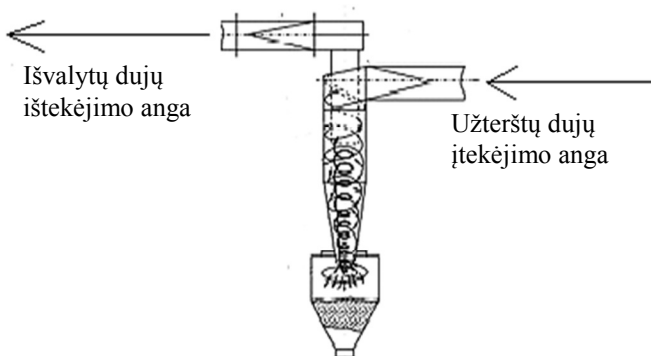
1.2 pav. Geometriniai kūginio grįžtamojo srauto ciklono matmenys

Fig. 1.2. Geometric measurements of conical reversible flow cyclone, see Table 1.1 (Chu *et al.* 2009)

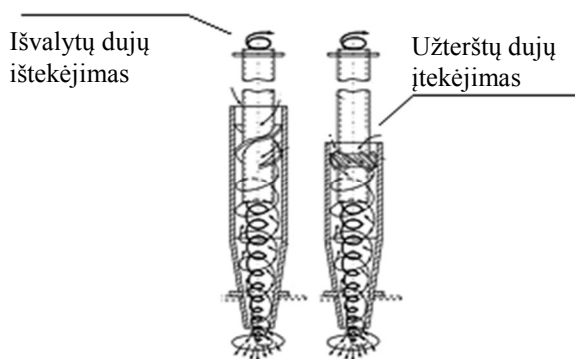
Tačiau nėra teorinės bazės, galinčios užtikrinti, kad konkretus modelis turi visas geriausias eksploatacines charakteristikas (Dirgo and Leith 1985; Carruthers 1994).

Jų konstrukcijoje paprastai yra tangentinės įleidimo angos ir todėl ciklonai yra apibrėžiami kaip piltuvo formos pramoniniai inerciniai įrenginiai. Jie popu-

liarūs, nes yra paprasti, nebrangiai pagaminami ir kompaktiški, neturi judamųjų dalių ir nereikalauja daug priežiūros (Boysan *et al.* 1982; Bernardo *et al.* 2006). Pagal valomų dujų įvedimo kryptį ciklonai pavaizduoti 1.3 paveiksle. Patekusios į ašinį cikloną dujos dėl prie įėjimo pritvirtintų sparnelių keičia savo judėjimo kryptį. Ašinių ciklonų efektyvumas yra mažesnis nei tangentinių, bet jie ypač tinka didelių dujų debitų sąlygomis (Denafas 2000).



a – tangentinis dujų įvedimas



b – ašinis dujų įvedimas

1.3 pav. Ciklonų tipai pagal dujų įvedimo kryptį

Fig. 1.3. Types of cyclones according to the direction of gas inlet
(Ватин и Стрелец 2003)

Esminis ciklono veikimo principas, nepriklausomai nuo dujų tiekimo krypties, yra toks: patekusios į cikloną dujos, priklausomai nuo atstumo tarp išorinės ciklono sienos ir įvedimo vamzdžio, keičia savo linijinį greitį ir juda spirale žemyn. Dujose esančios dalelės dėl savo inertiškumo atsitrenkia į sienelės ir krenta

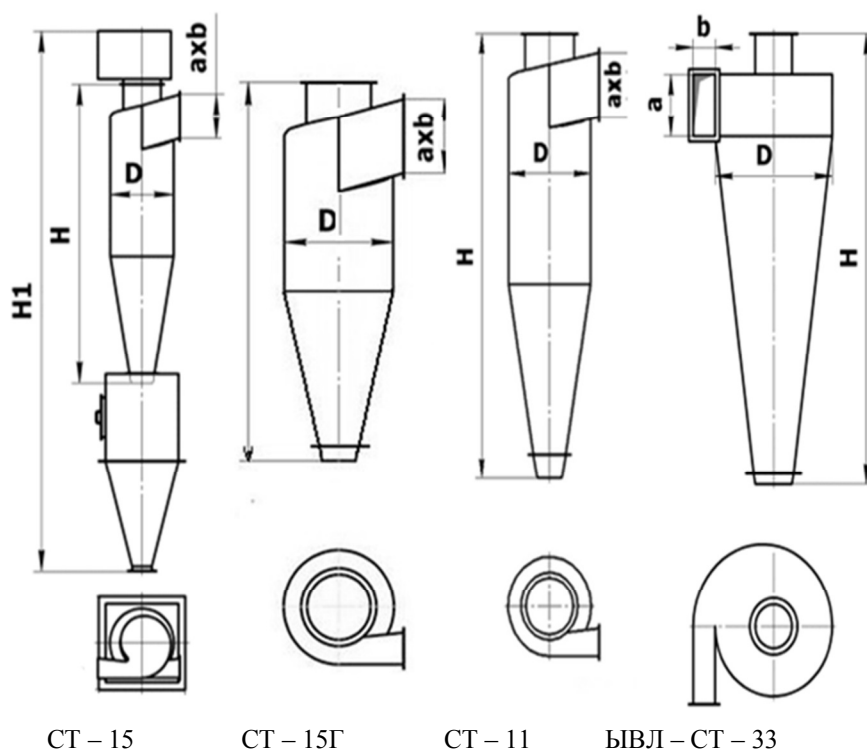
žemyn į bunkerį (Denafas 2000). Kadangi kūgio formos apatinė ciklono dalis yra siaurėjanti, tai išcentrinės jėgos veikimas, leidžiantis žemyn, vis didėja, todėl apatinėje dalyje nusėda daugiau smulkiųjų dalelių.

Toliau dujos keičia kryptį iš apačios į viršų, o tai dalelėms tampa kliūtimi, ir pro vertikalų išvedimo vamzdį, kuris panaikina susidarančius sukurius, išeina į viršų. Šio vamzdžio skersmuo ženkliai lemia slėgio kritimą ciklone ir ciklono efektyvumą, kurį sąlygoja dar ir šie faktoriai:

- dujų srauto įvedimo ir išėjimo kryptių geometriniai ypatumai;
- išorinis ciklono skersmuo;
- ciklono aukštis (vingių skaičius dujų srauto spiraliniame sukuryje);
- dujų debitas;
- dalelių dydis (Denafas 2000).

1.4 ir 1.5 paveiksle pavaizduota įvairių ciklonų tipų schemas. Maskvos *NIIOgaz* institute (1.4 pav.) sukurta keletas cilindrinų ir kūginių konstrukcijų ciklonų. Cilindriniai ciklonai priklauso didelio našumo įrenginiams. Dažniausiai cilindrinų ciklonų skersmuo neviršija 2000 mm, kūginių – 3000 mm.

Ciklonai, turintys didelį skersmenį bei pastovų tangentinį dujų srauto greitį, yra mažo efektyvumo, nes mažėja išcentrinės jėgos veikimas KD. Be to, šios konstrukcijos ciklonai dėl didelio jų aukščio yra sudėtingi diegiant juos pramonėje (Алиев 1986). CN–15 ciklonai naudojami kai kuriuose technologiniuose procesuose (džiovinimo, deginimo, aglomeracijos, deginant kurą ir t. t.), tačiau jie nerekomenduojami lipnioms dulkėms gaudyti. Šie ciklonai gali būti naudojami pavieniui arba grupėmis, t. y. gali susidėti iš dviejų, keturių, šešių ar aštuonių ciklonų su vienodu vidiniu skersmeniu nuo 300 iki 1000 mm (Baltrėnas *ir kt.* 2000). Šių CN–15, CN–15U įrenginių efektyvumas siekia 85–90 % šalinant KD, kurių medianinis dydis – 18–20 μm . CN–15U ciklonai turi mažiausią aukštį nei kitų prototipų bei žemesnį techninį – ekonominį rodiklį. Pradinė šių įrenginių KD koncentracija turi būti ne mažesnė kaip 400 g/m^3 (Асламова 2008). CN–11 ciklonai gali gaudyti lipnias ir įvairaus pluošto KD. Rekomenduojamas ne mažesnis aerodinaminis pasipriešinimas – 700–1200 Pa esant 15–20 m/s pradiniam dujų srauto greičiui į cikloną. Šio ciklono efektyvumas šalinant $\geq 50 \mu\text{m}$ KD siekia 85 % (Пылеулавливающие оборудование 2011). CN–24 ciklonai naudojami metalurgijoje, statybinių medžiagų, medienos apdirbimo pramonėje. Didžiausias efektyvumas – 88–98 % pasiekiamas šalinant 90 μm KD esant 2,100 kg/m^3 tankiui. KD, kurių skersmuo ne mažesnis negu 25 μm , šalinimo efektyvumas siekia 75–90 % (Пылеулавливающие оборудование 2011). Šio tipo ciklonai yra cilindrinės formos. Dangčio pasvirimo kampas ir dujų įpylimo vamzdis yra atitinkamai lygus – 11°, 15°, 24° ir turi tą patį išėjimo angos ir ciklono skersmens santykį, kuris lygus 0,59 (Алиев 1986).

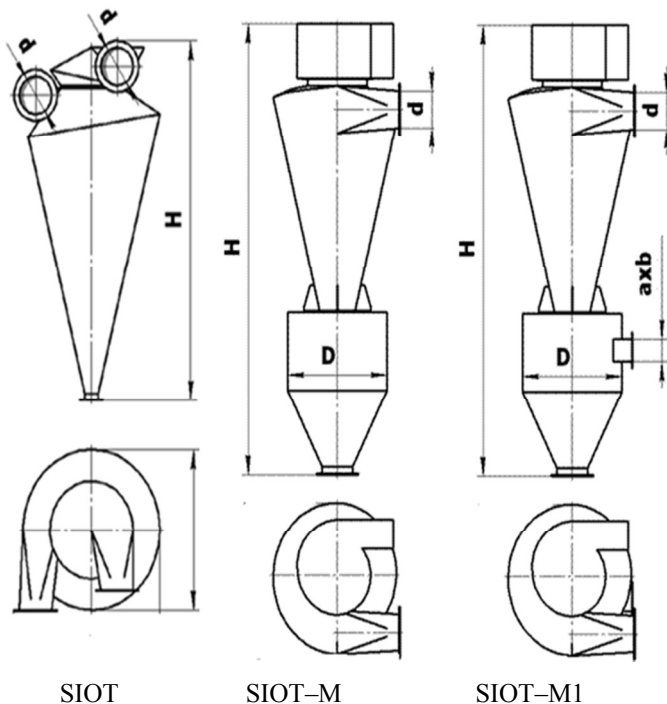


1.4 pav. NIIOgaz ciklonų konstrukcijos: C 15 (H_1 – ciklono bendras aukštis su bunkeriu, H – aukštis be bunkerio, D – cilindrinės dalies skersmuo, $a \times b$ – dujų įtekėjimo angos aukštis ir skersmuo)

CN 15U (D – cilindrinės dalies skersmuo, $a \times b$ – dujų įtekėjimo angos aukštis ir skersmuo). CN-11 (H – ciklono bendras aukštis, D – cilindrinės dalies skersmuo, $a \times b$ – dujų įtekėjimo angos aukštis ir skersmuo)

CDK–CN-3 (H – ciklono bendras aukštis, D – viršutinės kūginės dalies skersmuo, a – dujų įtekėjimo angos aukštis, b – dujų įtekėjimo angos skersmuo)

Fig. 1.4. Design of NIIO gas cyclones: CN-15 (H_1 – general height of cyclone with the tank, H – height without the tank, D – diameter of cylindrical part, $a \times b$ – height and diameter of gas inlet opening)
 CN 15U (D – cylindrical part diameter, $a \times b$ – gas inlet opening diameter).
 CN-11 (H – cyclone general height, D – cylindrical part diameter, $a \times b$ – height and diameter of gas inlet opening)
 CDK–CN-33 (H – total height of cyclone, D – diameter of upper conical part, a – height of gas inlet opening, b – diameter of gas inlet opening)
 (Пылеулавливающие оборудование 2011)



1.5 pav. SIOT ciklonų konstrukcijos: SIOT – (H – ciklono bendras aukštis, d – dujų įtekėjimo ir ištekėjimo angos skersmuo); SIOT – M (H – cilindrinės dalies aukštis su bunkeriu, d – dujų įtekėjimo anga, D – bunkerio skersmuo); SIOT M1 – (H – ciklono bendras aukštis su bunkeriu, D – bunkerio skersmuo; d – dujų įtekėjimo anga)

Fig. 1.5. Design of SIOT cyclones: SIOT – (H – total height of cyclone, d – diameter of gas inlet and outlet opening); SIOT – M (H – height of cylindrical part with the tank, d – diameter of gas inlet and outlet opening, D – tank diameter); SIOT M1 – (H – total height of cyclone with the tank, d – gas inlet opening) (Пылеулавливающие оборудование 2011)

SDK–CN–33, CK–CN–34 ir CK–CN–22 ciklonai – kūginės formos, turintys spiralinę dujų įpylimo angą bei mažą (atitinkamai 0,33, 0,34, 0,22) skersmens santykį tarp išvalytų dujų išėjimo angos ir ciklono skersmens. CK–CN–22 tipo ciklonai naudojami ypač lipnioms ir turinčioms abrazyvių savybių KD šalinti. Šiame įrenginyje yra žymiai didesnis slėgio kritimas nei kituose kūginiuose ciklonuose (Алиев 1986).

CK–CN–34 efektyvumas siekia 75–90 % šalinant KD, kurių medianinis dydis $20 \mu\text{m}$, KD tankis – 2100 kg/m^3 , įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas – 1130 Pa (Асламова 2008). Esant valomų dulkių tankiui – 2700 kg/m^3 , ciklono

SDK–CN–34 efektyvumas – 75–90 %, šalinant KD, kurių skersmuo ne mažesnis kaip 30 μm . Įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas – 1700 Pa, pasipriešinimo koeficientas dujų įtekėjimo sraute – 22,6 (Пылеулавливающее оборудование 2011). Minėtų ciklonų, esant skirtingiems tankiams, dujų įpylimo angos skersmeniui bei aerodinaminiam pasipriešinimui, KD šalinimo efektyvumas pateiktas 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. NIIOgas tipo ciklonų efektyvumas esant rodikliams – δ_{50} – medianinis dydis, p – tankis, d – dujų įtekėjimo anga, m, ΔP – aerodinaminis pasipriešinimas Pa

Table 1.1. Efficiency of NIIOgas type cyclones under the indicators – δ_{50} – median size, p – density, d – gas inlet opening, ΔP – aerodynamic resistance Pa, (Серебрянский 2004)

Rodikliai	Ciklonų tipas					
	CN-11	CN-15	CN-15U	CN-24	SDK–CN–33	SK–CN–34
Pasipriešinimo koeficientas	7	4,6	4,8	2,3	19	6

$\delta_{50}=13 \mu\text{m}$, $p = 2670 \text{ kg/m}^3$, $d=300 \text{ mm}$, $\Delta P = 1500 \text{ Pa}$

KD išvalymo efektyvumas, %	88	87	85	80	91	91
----------------------------	----	----	----	----	----	----

$\delta_{50} = 8 \mu\text{m}$, $p = 2500 \text{ kg/m}^3$, $d=450 \text{ mm}$, $\Delta P = 1000 \text{ Pa}$

KD išvalymo efektyvumas, %	71	70	66	60	70	71
----------------------------	----	----	----	----	----	----

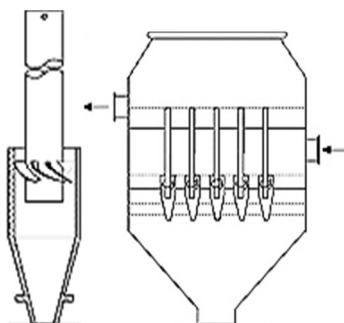
Siekiant sumažinti pakartotinę KD pernašą iš korpuso apačios ir ciklono bunkerio į cilindrinę dalį, 1985 m. buvo sukurtas supaprastintas SIOT ciklonų dizainas: SIOT–M – didesnio efektyvumo ir SIOT–M1 – didesnio efektyvumo ir produktyvumo (Пылеулавливающее оборудование 2011).

SIOT–M ciklonuose tarp korpuso ir bunkerio yra įrengtas cilindrinės formos įdėklas. Dėl šios priežasties bunkerio apačioje sumažėja sukuriu intensyvumas bei ant bunkerio sienelių nusėda mažiau dulkių. Tokiu būdu yra iki 2–2,5 karto sumažinama antrinė dulkių pernaša atgal į ciklono korpusą, palyginti su ankstesniu SIOT ciklono dizainu (Пылеулавливающее оборудование 2011).

SIOT–M1 ciklonuose dulkėtas dujų srautas dalijasi į dvi dalis: į viršutinę ciklono dalį pučiamas pagrindinis dujų srautas, į apatinę dalį – papildomas srautas, besisukantis ta pačia kryptimi kaip ir pagrindinis dujų srautas, kuris atitinkamai sudaro 30–35 % visos ciklono veiklos. Aerodinaminis tyrimas parodė, kad esant vienodam slėgio kritimui, aerodinaminis ciklono SIOT–M1 pasiprieši-

nimo koeficientas yra 2 kartus mažesnis esant 1,4–1,5 karto didesniai įrenginio našumui nei įprastinių SIOT ciklonų (Пылеулавливающие оборудование 2011).

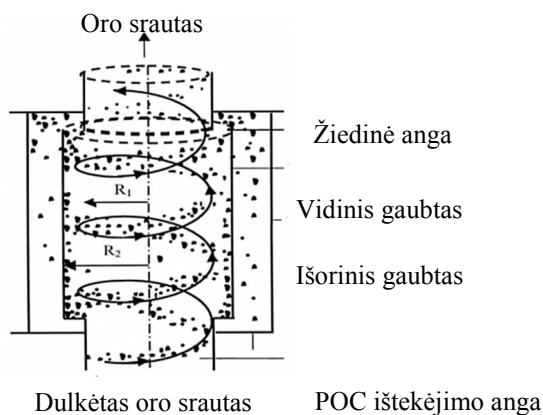
Multiciklonai ((bateriniai ciklonai) 1.6 pav.) sudaryti iš didelio skaičiaus viename korpuse sujungtų mažo skersmens (150 – 300 mm) ciklono elementų. Multiciklonai turi bendrą dulkių surinkimo bunkerį ir tai sumažina išvalymo efektyvumą lyginant su vieno ciklono elementu, turintį vieną ciklono korpusą. Dujų išvalymo efektyvumas sumažėja ne tik dėl netolygiai pasiskirsčiusių dujų atskiruose multiciklono elementuose bei skirtingo pasipriešinimo, bet ir dėl dujų srauto pasiskirstymo tarp bunkerio ir multiciklono atskirų elementų. Vienas iš šių įrenginių trūkumų yra tai, kad bateriniai ciklonai užsikemša pelenais dėl ko ciklone didėja pasipriešinimas. Ši priežastis susidaro dėl mažo greičio esant mažai apkrovai prie nevienodo dujų pasiskirstymo multiciklono elementuose. Netolygus dujų pasiskirstymas atskiruose elementuose priklauso nuo jo konfigūracijos, dujų krypties ir greičio. Nevienodas dujų pasiskirstymas multiciklono elementuose bei užsikimšimas pelenais, pagreitina vamzdžių susidėvėjimą. Atsiradus kiaurymėms išėjimo vamzdžiuose arba ciklono elementų korpusuose, bateriniai ciklonai praleidžia nevalytas dujas. Esant, siauriems tarpams tarp ciklono elementų, nėra galimybės atlikti profilaktinės apžiūros (Белоусов 1988). Deginant durpes ir rusvąsias anglis, kai kuriuose multiciklonuose pasiekiamas ~ 90 % efektyvumas esant liekamajai pelenų koncentracijai 0,50,9 g/m³ (aerodinaminis pasipriešinimas ~ 1000 Pa). Taikant pramonėje klasikinę oro valymo įrangos schemą, multiciklonai mažos galios katilinėse deginant labai peleningą kietąjį kurą, gali būti įrengiami išlakų pašalinimo trakte prieš rankovinius filtrus, siekiant sumažinti pastarųjų apkrovą stambiadiispersėmis lakiųjų pelenų dalelėmis. Šios schemos trūkumas – didelis aerodinaminis pasipriešinimas, reikalaujantis daug elektros energijos suvartojančių aukštojo slėgio ištraukiamųjų ventiliatorių (dūmsiurbų).



1.6 pav. Baterinis ciklonas BC R-250/2 110

Fig. 1.6. Battery cyclone BC R-250/2 110 (Zayanchovsky 1979)

Tyrėjai Ray (1997), Youngmin (1999), Nieuwland ir kiti (1996), atlikdami „Post ciklonų“ (PoC) eksperimentinius tyrimus, siekė sumažinti dalelių išmetimą iš pramoninių ciklonų, nepatiriant didelio ciklono eksploatacijos išlaidų padidėjimo. Pavykęs PoC modelis turi keletą privalumų, lyginant su kitais antrinio dulkių apdorojimo procesais: (1) paprasta konstrukcija, (2) maža kaina ir nesudėtinga priežiūra, (3) mažas slėgio kritimas ir (4) dulkių pakartotinis panaudojimas, kuris ypač naudingas maisto ir vaistų pramonėje, kur paskutiniajame filtre surinktos medžiagos nebenaudojamos dėl biologinio užterštumo. Be to, PoC gali būti sumontuotas nekeičiant pagrindinio ciklono. Pagrindinės PoC dalys yra du cilindro formos gaubtai, sumontuoti žiediniu pavidalu ir pritvirtinti virš grįžamojo srauto ciklono dujų išteklėjimo angos arba sūkurių ieškiklio. Dujų ir dulkių srautas PoC pavaizduotas 1.7 paveiksle. Maksimalus dujų tangentinis greitis tokiame PoC modelyje yra apytiksliai 20,4 m/s, kai įtekėjimo į cikloną greitis yra 16 m/s. 29,67 m/s susidaro ciklono atskyrimo dalyje. Dėl šio likusio srauto pro sūkurių ieškiklį išsiveržiančios dalelės susitelkia daugiausia prie sūkurių ieškiklio sienelių, o paskui prie vidinio PoC gaubto sienelių. Ištekančias srautas neša šią didelę dalelių srovę nuo PoC vidinės sienelės iki išorinės sienelės pro PoC viršuje esančią angą ir dalelės yra surenkamos filtre, pritvirtintame prie PoC išteklėjimo angos, esančios išorinio gaubto apačioje (1.7. pav.). Ištekančias srautas paprastai sudaro 5–25 % srauto, pratekančio pro sūkurių ieškiklį. Be išcentrinės jėgos, faktinį dalelių surinkimą PoC gali veikti ir kiti faktoriai, tokie kaip flokuliacija arba aglomeracija, turbulencinė dispersija, pernešimas nuo sienelių ir dalelių šokinėjimas. Santykinė šių mechanizmų svarba priklauso nuo PoC konstrukcijos, dujų įleidimo greičio, įtekančių KD koncentracijos ir dalelių dydžio. Ciklono PoC efektyvumas, esant 23,2 m/s greičiui, naudojant silicio karbidą – 95 %, tankis 3200 kg/m³.



1.7 pav. Dulkių srauto PoC schema

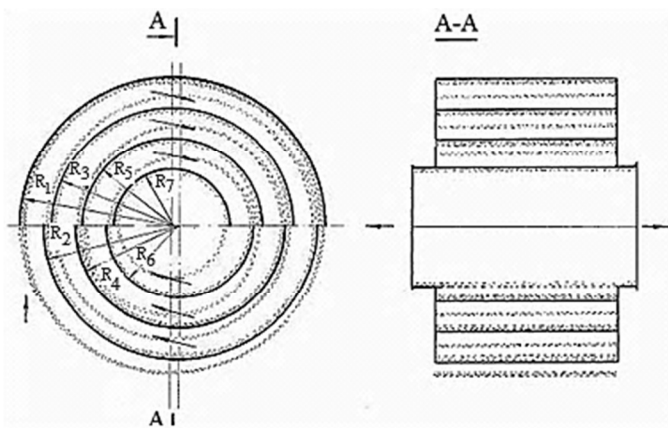
Fig. 1.7. Scheme of dust flow PoC (Youngmin *et al.* 1999)

Mokslininkai teigia, jog norint surasti optimalų PoC ciklono derinį, būtina detaliai ištirti proceso kintamųjų poveikį PoC ciklono darbui. Be to, reikalingas efektyvus požiūris į modeliavimą kuriant ir pritaikant naujus PoC modelius įvairaus dydžio ciklonams.

1.4. Kietųjų dalelių šalinimas iš dujų srauto daugiakanaliuose ciklonuose

Dujų valymo įrenginiai, turintys kreivalinijinius kanalus, panašūs į įprastinius ciklonus. Jie yra lengvai sumontuojami, paprastai eksploatuojami, universalūs ir ekonomiškai (Буров *u dp.* 1994; Балан *u dp.* 2000). Ši įrenginio konstrukcija skiriasi nuo įprastinių ciklonų tuo, jog separavimo kameroje skirtingo spindulio cilindriniai pusžiedžiai yra išdėstyti vienas priešais kitą, sudarydami kreivalinijinius kanalus su uždara kontūrais (1.8 pav.). Uždari kontūrai, turintys pusžiedžių tarpus, sudaro galimybę dujų srautui įtekėti ir ištekti į / iš kanalų. Uždaro kontūro skaičius sistemoje yra lygus pusžiedžių skaičiui (Лепихин *u dp.* 2004). Juose tranzitinis dujų (oro) srautas daugelį kartų filtruojasi pro KD sluoksnį, cirkuliuojantį pusžiedžių tarpuose.

Tyrėjai Буров (1994), Балан ir kt. (2000) teigia, kad KD filtracija ir išcentrinė separacija – dujų valymo naujovė. 1960 metais pradėti pirmieji KD šalinimo tyrimai kreivalinijiniuose kanaluose. Šių įrenginių efektyvumas buvo tyrinėjamas 1990 metais spalvotosios metalurgijos pramonėje (Серебрянский 2004). Eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikiami 1.2 lentelėje.



1.8 pav. Pusžiedžių schema su uždara kontūrais

Fig. 1.8. Scheme of curvilinear channels with closed profiles
(Лепихин *u dp.* 2004)

Dulkių šalinimo įrenginys su vienu pusžiedžiu buvo įrengtas pirminio valymo metu prieš rankovinį filtrą FRD–6500/18 anglies gamyboje PM–75. Du mėnesius veikiant rankoviniam filtrui, intensyviai didėjo aerodinaminis pasipriešinimas. Atlikus įrenginių apžiūrą, nustatytas rankovinio filtro užsikimšimas suodžiais. Įrenginys su kreivalinijiniu kanalu veikė 10 mėnesių, kol buvo pakeista 2400 filtro rankovių. Įrenginys, turintis tris cilindrinis pusžiedžius, šiluminėje elektrinėje už garo generatoriaus pakeitė vieną iš dvylikos CN–15 ciklonų. Šio įrenginio našumas siekė 10 tūkst. m³/h. Pelenų išmetimo koeficientą, veikiant CN–15 ciklonui, sudarė – 27,5 %, o su įrenginiu, turinčiu tris kreivalinijinius kanalus – 25 %. (Балан *u dp.* 2002). Iš 1.2 lentelės duomenų matyti, kad didėjant pusžiedžių skaičiui, įrenginio efektyvumas didėja. Bendras pasipriešinimo sistemos koeficientas su tranzitinio oro srauto vienu puse ištekėjimu ir vienodais ištekėjimo bei įtekėjimo ($S_{is} = S_{it}$) skerspjuvio plotais nustatomas pagal lygybę (Балан *u dp.* 2002):

$$\xi_n = (n-1)^2. \quad (1.1)$$

Čia: n – pusžiedžių skaičius daugiakanaliame ciklone (išcentriniame filtre).

1.2 lentelė. Daugiakanalių ciklonų efektyvumas

Table 1.2. Efficiency of equipment with curvilinear channels

(Буров 1991, Серебрянский 2004)

Parametrai	n – pusžiedžių skaičius daugiakanaliame ciklone				
	n = 1	n = 3	n = 4	n = 4	n = 5
Kietosios dalelės	suodžiai	pelenai	pelenai	varis	Fosfatai
Temperatūra	150	150	150	70	20
Našumas, m ³ /h	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	3×10 ³
Aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	150	500	1250	1250	1400
Pasipriešinimo koeficientas, ξ_n	0,7	4	9	9	16
Pradinė KD koncentracija, g/m ³	82	11,1	16,8	40	20
KD koncentracija po valymo, g/m ³	23	2,8	1,8	4	1,2
Daugiakanalio ciklono efektyvumas, %	70	75	90	90	94
Įrenginio skersmuo, mm	1500	100	6000	6000	700
Įrenginio aukštis, mm	6500	2700	6000	6000	2000
Įrenginio masė, kg	4500	1000	10000	10000	100

1.3 lentelėje pateikti baterinio ciklono BCU – M $2 \times 10 \times 9 - 3$ ir dujų valymo įrenginio su keturiais kreivalinjiniais kanalais eksperimentinio tyrimo rezultatai. Šie tyrimai buvo atlikti Barnaulo (miestas Rusijos rytuose) šiluminėje elektrinėje.

Baterinį cikloną sudarė 180 cikloninių elementų, iš kurių kiekvieno elemento skersmuo – 245 mm, ilgis – 3100 mm, plotis – 7514 mm, aukštis su bunkeriu – 5900 mm, ciklono masė – 22000 kg. Keturkanalio įrenginio svoris buvo dvigubai mažesnis negu baterinio ciklono. Gauti eksperimentų rezultatai buvo lemiamas argumentas dėl dujų valymo sistemos modernizavimo įrengiant įrenginius su kreivalinjiniais kanalais už garo generatoriaus (Серебрянский 2004).

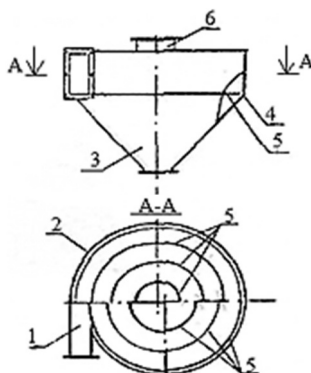
1.3 lentelė. Baterinio ir daugiakanalio ciklono kietųjų dalelių šalinimo iš dujų srauto efektyvumo parametrų palyginimas

Table 1.3. Comparison of efficiency parameters of gas purification from solid particles using battery and multichannel cyclone (Быров 1991)

Parametrai	Baterinis ciklonas BCU – M $2 \times 10 \times 9 - 3$	Daugiakanalis ciklonas n = 4
Dujų temperatūra ortakio įtekėjime, °C	---	150
Dujų temperatūra ortakio ištekejime, °C	151	142
Dujų debitas ortakio įtekėjime m ³ /h	104800	97092
Dujų debitas ortakio ištekejime m ³ /h	128940	103610
Aerodinamis pasipriešinimas, Pa	---	1250
Pradinė KD koncentracija, g/Nm ³	17,18	16,79
KD koncentracija po valymo, g/Nm ³	2,33	1,82
KD išvalymo iš dujų efektyvumas, %	83	89

KD šalinimą iš dujų kreivalinjinuose kanaluose tyrinėjo Odesos nacionalinio politechnikos universiteto mokslininkai, daugiakanalį oro valymo įrenginį pavadinę išcentrinio filtru (1.9 pav., patentas UA 78157 2007). Šio įrenginio patikimumas pasitvirtino bandymais, kurie Moldavijos metalurgijos gamykloje vyko septynerius metus. Išcentrinis filtras buvo eksperimentuojamas skirtinguose procesuose modernizuojant dujų valymo sistemą tomis pačiomis sąlygomis, kuriose buvo naudojamas ciklonas CN-15 ir rankovinis filtras FRKN-60. Ciklonas dėl greito susidėvėjimo pasižymėjo nepatvarumu, todėl buvo pakeistas keturkanaliu išcentrinio filtru. Išcentrinis filtras buvo įrengtas pirminio valymo metu prieš rankovinį filtrą FRKN-60 kokso smulkinimo procese. Tyrimai paro-

dė, kad esant dujų temperatūrai 15°C , dujų srautui $3430 \text{ m}^3/\text{h}$, pirminei dulkių koncentracijai – 154 g/m^3 bei įrenginio aerodinaminiam pasipriešinimui 574 Pa , keturkanalio išcentrinio filtro efektyvumas pasiektas 92% . Šalinant kietąsias daleles kokso džiovavimo procese esant 120°C dujų temperatūrai, pirminei dulkių koncentracijai $70,5 \text{ g/m}^3$, aerodinaminiam įrenginio pasipriešinimui 698 Pa bei $9780 \text{ m}^3/\text{h}$ dujų srautui, keturkanalio išcentrinio filtro efektyvumas pasiektas 95% (Балан и др. 2002; Буров и др. 2004).



1.9 pav. Išcentrinis filtras: 1 – dujų srauto įtekėjimo anga; 2 – spiralinės formos kamera; 3 – kūginis bunkeris; 4 – žiedinis plyšys; 5 – skirtingo spindulio cilindriniai pusžiedžiai; 6 – išvalytų dujų srauto išteklėjimo anga

Fig. 1.9. Centrifugal filter: 1 – gas flow inlet opening; 2 – separation chamber of a helical form; 3 – conical tank; 4 – circular gap; 5 – cylindrical half semi-rings of different radius; 6 – purified gas flow outlet opening (Серебрянский и Приемов 2007)

Kaip teigia tyrėjai Serebryanskyy ir kt. (2009), išcentrinio filtro trūkumai – dideli matmenys ir masė, pvz.: šešiakanalio išcentrinio filtro, kurio našumas $10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ cilindrinės dalies skersmuo – $2,6 \text{ m}$, o aukštis – 3500 mm (be bunkerio), efektyvumas – 97% . Norint sumažinti įrenginio matmenis, separavimo kameroje galima sukomponuoti dviejų lygių pusžiedžių sistemą. Zaparožės titano – magnio gamykloje dujų valymo sistemoje šalinant kokso dulkes, cikloną SIOT Nr. 9. pakeitė suprojektuotas eksperimentinis išcentrinis dviejų lygių šešiakanalis CF 2–6–8 ciklonas, kurio skersmuo – 1500 mm , aukštis be bunkerio – 2490 mm , našumas – $8000 \text{ m}^3/\text{h}$, efektyvumas – $97,8 \%$. (1.10 a pav.).

Moldovoje, Ribnicos mieste, cemento gamykloje atlikti dviejų lygių šešiakanalio išcentrinio CF 2-6-02 filtro eksperimentiniai tyrimai, šalinant KD iš klinkerio aušinimo kameros (1.10 b pav.). Išcentrinio filtro našumas – $200 \text{ m}^3/\text{h}$, efektyvumas – 91% , esant 480 Pa aerodinaminiam pasipriešinimui.

Atliktų tyrimų duomenys pateikiami 1.4 lentelėje. Iš pateiktų eksperimentinių tyrimų rezultatų matyti, kad dviejų lygių ciklono išcentrinio filtro CF 2–6–8 ir CF 2–6–02 efektyvumas skiriasi 6,8 %. Tai rodo, kad mažėjant įrenginio geometriniais parametrams mažėja kietųjų dalelių pasišalinimo efektyvumas. Tyrėjai Atakan Avci ir Irfan Karagoz (2003), tyrinėję srauto ir geometrinių parametrų įtaką KD šalinimo efektyvumui ciklone, teigia, kad, norint pasiekti aukštą efektyvumą ciklone, reikalingas ilgas srauto buvimo ciklone laikas ir vidutinis srauto greitis (15 m/s).

1.4 lentelė. Ciklono SIOT ir išcentrinį šešiakanalių filtrų efektyvumo parametrų palyginimas

Table 1.4. Results of experiments: Comparison of efficiency parameters of cyclone SIOT and two centrifugal six-channel filters (Серебрянский и Новаковский 2009)

Parametrai	Ciklonas SIOT Nr. 9	Šešiakanalis išcentrinis filtras (spiralinis korpusas) CF 2-6-8	Šešiakanalis išcentrinis filtras (spiralinis korpusas) CF 2-6-02
Dujų srautas, m ³ /h	7481	7206	140
Dujų temperatūra, °C	110	125	100
Medianinis KD dydis, μm	11	7,2	20
Dujų srauto greitis ortakio įtekėjime, m/s	—	14,3	11
Aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	210	890	480
Pradinė KD koncentracija, mg/m ³	5787	7300	2370
KD koncentracija po valymo, mg/m ³	1793	160	0,214
KD šalinimo efektyvumas, η %	69	97,8	91

Išcentriniai filtrai gali būti sukomponuoti į daugiapakopę valymo sistemą (1.11 pav.) Šio įrenginio konstrukciją sudaro lygiagrečiai sujungti dviejų lygių šešiakanaliai išcentriniai filtrai (Серебрянский и Новаковский 2009). Mokslininkai nustatė, jog išcentrinio filtro KD išmetimo priklausomybę nuo pusžiedžių skaičiaus galima apytiksliai apskaičiuoti pagal 1.2 formulę.

Skaiciavimo rezultatai pateikti 1.5 lentelėje. KD išmetimo koeficientas į atmosferą skaičiuojamas pagal formulę (Балан и др. 2002, Серебрянский 2004):

$$\varepsilon = \frac{1}{1+2^{n-1}}, \quad (1.2)$$

čia: n – pusžiedžių skaičius daugiakanaliame ciklone (išcentriniam filtre), ε – KD išmetimo koeficientas.

Pateikti preliminarūs skaičiavimai parodė, jog didėjant pusžiedžių skaičiui KD šalinimo efektyvumas didėja. Pateikta skaičiavimo priklausomybė buvo daug kartų patvirtinta eksperimentuojant įrenginius skirtingose gamybos srityse (Серебрянский и Новаковский 2009).

1.5 lentelė. Daugiakanalio ciklono (išcentrinio filtro) KD išmetimo priklausomybė nuo kanalų skaičiaus separavimo kameroje

Table 1.5. Dependence of multichannelcyclone (centrifugal filter) SP discharge on the number of channels in the separation chamber (Серебрянский и Новаковский 2009)

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varepsilon, \%$	20	11	5,8	3	1,5	0,8	0,39	0,195	0,0975	0,049
$\eta, \%$	80	89	94,2	97	98,4	99,2	99,61	99,805	99,9025	99,95



a)

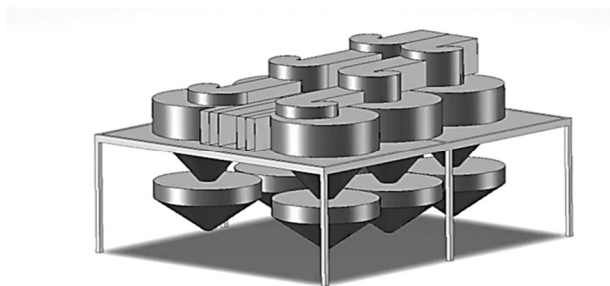
b)

1.10 pav. Šešiakanaliai dviejų lygių išcentriniai filtrai:

a) CF 2-6-8, b) CF 2-6-06

Fig. 1.10. Six-channel centrifugal filters of two levels:

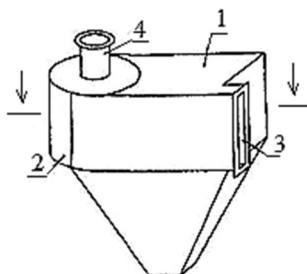
a) CF 2-6-8) b) CF 2-6-06 (Серебрянский и Новаковский 2009)



1.11 pav. Šešiakanalis išcentrinis filtras – (daugiapakopis) 6CF2-6-180, našumas – 180 000 m³/h

Fig. 1.11. Centrifugal filter of six channels – (multi-levelled) 6CF2-6-180, capacity – 180 000 m³/h (Серебрянский и Приемов 2007)

1.12 paveiksle pateikiamas profesoriaus A. V. Tananajev (patentas RU-2080939) inercinis filtras separatorius, kurio konstrukciją sudaro: dulkėgaudžio – saugykla, separavimo kamera, tangentinio dujų įtekėjimo angos ir dujų ištekėjimo vamzdžio, kuris yra išdėstytas pagal spirалės ašį. Šio įrenginio galimos taikymo sritys: statybinių medžiagų gamyboje (cemento, kalkių, ir t. t.), metalurgijoje, liejimo gamyboje, energetikoje deginant akmens anglį, durpes, naftą, maisto pramonėje. Įrenginys yra kompaktiškas, paprastas ir patikimo veikimo.

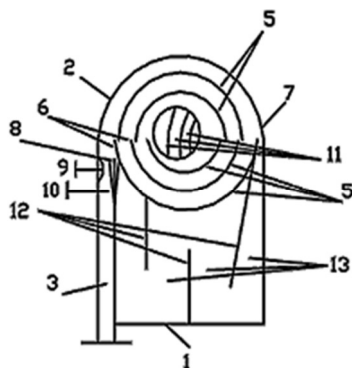


1.12 pav. Inercinis filtras – separatorius: 1 – separavimo kamera, 2 – spiralinis kanalas, 3 – dujų įtekėjimo anga, 4 – išvalytų dujų ištekėjimo anga

Fig. 1.12. Inert filter – separator: 1 – separation chamber, 2 – helical channel, 3 – gas inlet opening, 4 – purified gas outlet opening (Тананаев 1997)

Pateiktas išcentrinis filtras separatorius (1.13 pav.) susideda iš spiralinių kanalų 2 išsidėsčiusio separavimo kameroje 1, taip pat iš dujų įtekėjimo angos 3 ir išvalytų dujų ištekėjimo angos 4. Kreivalinijiniai kanalai susideda iš kelių skyrių – skirtingo spindulio cilindrinų pusžiedžių 5, išsidėsčiusių vienas priešais kitą formuojant pusžiedžių tarpus 6 ir KD pašalinimo angos 7. Tarp įėjimo į

kreivalinijinį kanalą 2 separavimo kameroje yra įrengta anga 8. Išskirtinės šios įrenginio savybės yra tai, kad pateiktame filtre yra priemonė 9, per kurią įėjime į kreivalinijinį kanalą 2 angos 8 srityje yra reguliuojamas skerspjūvio plotas. Anga 8 yra pagaminta suteikiant galimybę reguliuoti jos dydį. Skerspjūvio plotą reguliuojantis įrenginys yra įrengtas kreivalinijinio kanalo



1.13 pav. Išcentrinio filtro – separatoriaus schema: 1 – dulkių bunkeris, 2 – spiralinis dulkių bunkerio kanalas, 3 – dujų srauto įtekėjimo anga, 4 – išvalytų dujų ištekėjimo anga, 5 – cilindriniai pusžiedžiai, formuojantys kreivalinijinius kanalus, 6 – pusžiedžių tarpai, 7 – KD pasišalinimo anga, 9 – priemonė, kuria yra reguliuojamas pirmojo kanalo skerspjūvio plotis, 10 – įrenginys, kuriuo yra reguliuojamas jungiamosios angos dydis, 11 – profiliuotos grotelės, 12 – saugyklos pertvaros, 13 – saugyklos kanalai

Fig. 1.13. Scheme of centrifugal filter – separator: 1 – dust chamber, 2 – dust tank helical channel, 3 – gas flow inlet opening, 4 – purified gas outlet opening, 5 – cylindrical half-rings, forming helical channels, 6 – clearances of curvilinear channels, 7 – discharge opening for SP, 9 – device which is designed for regulation of the first channel transverse cut, 10 – equipment which is designed for regulation of size of connecting opening, 11 – profiled grid, 12 – partitions of the storage, 13 – channels of the storage (Тананаев 1997)

Šiame filtre KD šalinimas yra atliekamas išcentrinės jėgos atskyrimo efekto, kuris vyksta kreivalinijiniuose kanaluose, pagrindu, taip pat KD filtruojasi pro dulkių sluoksnį, cirkuliuojantį pusžiedžių tarpuose. KD kanaluose atsiranda dėl to, kad dalelių srautas su atskirtomis dalelėmis per pusžiedžių tarpus patenka į prieš tai esančius kreivalinijinio kanalo skyrius. Separatoriuje yra įrengta priemonė 10, kuria galima reguliuoti angos 8 dydį. Pastaroji priemonė yra pagaminta plokštės formos, kurios vienas galas turi būti tvirtai pritvirtintas prie vidinės dujų įtekėjimo angos 3 pusės, kuri tampa šios plokštės dalimi, paliekant galimybę kitą plokštės galą perkelti tarsi konsolę. Inerciniame filtre saugykloje yra

įrengtos pertvaros 12, kurios nuo KD pašalinimo angos 7 iki angos 8 sudaro kanalus 13. Pastaroji anga 8 saugyklos 1 ertmės sujungia su įeinamąją spiralinio kanalo 2 dalimi. Vienas iš pagrindinių prototipo trūkumų yra didelis aerodinaminis pasipriešinimas (Тананаев 1997).

Skirtingi autoriai daugiakanalių oro valymo įrenginius vadina skirtingai – išcentriniais filtrais, inerciniais filtrais – separatoriais ir kt., tačiau savo konstrukcija jie artimiausi ciklonams, todėl darbe jie vadinami daugiakanaliais ciklonais. Atlikus mokslinės literatūros analizę nerasta duomenų apie daugiakanalių ciklonus, turinčius reguliuojamą skirtingos geometrijos pusžiedžių sistemą.

1.5. Pernašos procesų modeliavimo programos

Dabartiniu metu aplinkosaugos reikalavimai yra gana griežti ir į aplinką išmetami teršalai yra valomi, tačiau dar tenka susidurti su atvejais, kai į atmosferą patenka didesni ar mažesni teršalų kiekiai. Taigi išlieka svarbus dujų bei kietųjų aerozolių sklaidos aplinkoje skaitinio modeliavimo metodas, kuris galėtų įvertinti realioje aplinkoje vykstančius procesus bei jų ypatumus, nes tais atvejais, kai tikslus analizinis judėjimo lygčių sprendimas yra neįmanomas, turi būti taikomi artutiniai lygčių sprendimo metodai – t. y. modeliavimas (Vaitiekūnas 2008).

Pateikiamos pernašos reiškinius aplinkosauginiuose įrenginiuose ir aplinkoje aprašančių lygčių skaitinio sprendimo programos. Programų aprašymuose galima susipažinti su koncentracijos, impulso, šilumos ir masės pernašos procesų modeliavimo lygtimis, jų analiziniais ir skaitiniais sprendiniais, artutiniais diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis sprendimo metodais. Taršos vertinimo modeliai efektyviai naudojami vertinant planuojamos bei vykdomos ūkinės veiklos poveikį aplinkos orui bei vertinant ir valdant aplinkos oro kokybę (Reimekis ir kt. 2004). Naudojamos skirtingos modeliavimo programos, skirtos dujų ir skirtingo dydžio kietųjų dalelių srautams modeliuoti.

Diferencialinių lygčių sprendimo matematiniais metodais pagrįsti programinės įrangos paketai:

Šiuo metodu programinis paketas ANSYS yra taikomas įvairiems stiprumo, dinamikos, elektromagnetizmo, termo, hidromechanikos, biomechanikos ir kitiems uždaviniams spręsti.

Konstrukcijų geometrijai aprašyti ANSYS turi galingą procesorinę dalį su pagrindiniais šiuolaikinių CAD sistemų elementais, taip pat baigtinių elementų tinklėlių generavimo priemonės. Po procesorinės (rezultatų pateikimo) dalies leidžia matyti spalvotas izolinijas, erdvinius spalvinius laukus, vektorius, galimą animaciją. Tas pats geometrinis modelis gali būti taikomas skirtingos fizikinės prigimtės uždaviniams spręsti (pavyzdžiui, įtempių deformacijų būvio ir šilumos laidumo).

Skaiciuojama tokiais etapais – sritis aproksimuojama baigtiniu nesudėtingos formos elementų skaičiumi, kiekvieno elemento srityje diferencialinė lygtis suvedama (apytiksliai) į algebrinių lygčių sistemą, elementų lygtys jungiamos į bendrą sistemą ir gaunamas ieškomas sprendinys. ANSYS svetainėje nurodoma, kad ši programinė įranga gali būti pritaikyta tokių rūšių sprendimams:

- mechanikos (Mechanics),
- multifizikos (Multiphysics),
- skysčių dinamikos (Fluid Dynamics),
- elektromagnetiniams (Electromagnetics),
- skysčio – struktūros sąveikos (Fluid Structure Interaction),
- skaidymo baigtiniais elementais (Meshing),
- išreikštinės dinamikos (Explicit Dynamics),
- mokymo (Academic).

Ši programinė įranga gali būti panaudota šioms šakoms:

- aplinkosaugos (Environmental),
- chemijos pramonės (Chemical Processing),
- energetikos (Power Generation) ir kitur.

ANSYS/FLOTRAN programa ir FLOTRAN CFD (Computational Fluids Dynamics) opcija suteikia galimybę modeliuoti fluidų srautus dvimatėje ir trimatėje erdvėje. Taip pat ANSYS ir FLOTRAN priemonėmis galima atlikti tokias užduotis:

- Rasti dujų slėgio ir temperatūros pasiskirstymą variklio išmetimo sistemoje.
- Tiriant srautų maišymąsi įvertinti šilumos smūgio riziką.
- Analizuoti natūralią konvekciją ir įvertinti termines elektroninių mikro-schemų charakteristikas.
- Tirti šilumos mainus tarp skirtingų fluidų bei tarp fluidų, atskirtų pertvaromis.

Programinės įrangos paketas MAPLE. Naudojant šį programinės įrangos paketą galima atlikti įvairius matematinius skaičiavimus: elipsių diferencialinių lygčių sprendimus, sudaryti naujus algoritmų rinkinius, padėsiančius rasti tikslų (analizinį) sprendinį. Pagrindinės kompiuterio paketo MAPLE taikymo galimybės:

- fizikinių metodų kontrolės duomenų statistinių parametrų kompiuterinis skaičiavimas ir jų analizė;
- analizinis (jei sprendinys egzistuoja) ar skaitinis uždavinių sprendimas;
- tiesinių diagnostinių matricių skaičiavimas;
- identifikacinių bandymų kriterijų skaičiavimas taikant Fišerio funkciją;
- regresinės analizės parametrų skaičiavimas ir jų taikymas.

(Аладьев и Бодявичюс 1999, Paulauskiene 2008).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad tipinių ciklonų efektyvumas siekia 88–98 % šalinant 90 μm KD, esant 2100 kg/m^3 tankiui, ne mažesnio dydžio negu 25–30 μm KD šalina 75–90 % efektyvumu, kai valomų KD tankis – 2700 kg/m^3 .

2. Remiantis empiriniais skaičiavimais galima apytiksliai nustatyti išcentrinio filtro efektyvumo priklausomybę nuo pusžiedžių skaičiaus.

3. Šešiakanalio išcentrinio filtro, kurio našumas 10 000 m^3/h , privalumas – aukštas valymo efektyvumas – 97 %, o trūkumai – dideli matmenys ir dėl didelio cilindrinų pusžiedžių skaičiaus separavimo kameroje aerodinaminis pasipriešinimas.

4. Mokslinėje literatūroje nerasta duomenų apie cilindrinų pusžiedžių reguliavimo sistemą turinčius daugiakanalius ciklonus (išcentrinius filtrus).

Todėl šiame disertaciniame darbe nuspręsta:

1. Patobulinti eksperimentinį cilindrinį daugiakanalį cikloną (keturių ir penkių kanalų) įdiegiant kintamos geometrijos cilindrinų pusžiedžių sistemą;
2. Pasiiekti šešiakanalio išcentrinio filtro kietųjų dalelių išvalymo efektyvumą cilindriname keturkanaliame ir penkiakanaliame ciklone, nustatant optimalius reguliuojamų pusžiedžių tarpus bei tranzitinio ir periferinio oro srautų santykius.

Siekiant įvertinti šių įrenginių galimybes, būtina nustatyti cilindrinio daugiakanalio ciklono KD išvalymo efektyvumo priklausomybę nuo oro srauto greičio, kietųjų dalelių dydžio, tankio ir koncentracijos ir atlikti aerodinaminių procesų daugiakanaliame ciklone modeliavimą, gautuosius rezultatus lyginant su eksperimentiniais.

Oro srauto daugiakanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių kanaluose greičio tyrimai

Cilindrinis daugiakanalis ciklonas skiriasi nuo tipinio ciklono ir išcentrinio filtro separavimo kameros konstrukcija, kurioje yra reguliuojami pusžiedžių tarpai. Buvo sukonstruotas eksperimentinis keturkanalis (trijų pusžiedžių) ir penkiakanalis (keturių pusžiedžių) ciklonas turint tikslą patobulinti jo konstrukciją ir gauti didesnę KD šalinimo iš oro srauto efektyvumą.

Eksperimentinių tyrimų tikslas – nustatyti vienfazio srauto greičio cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono kanaluose pasiskirstymą, ciklono ašinėje dalyje bei oro srauto kiekio santykio cilindrinų pusžiedžių tarpuose pasiskirstymą.

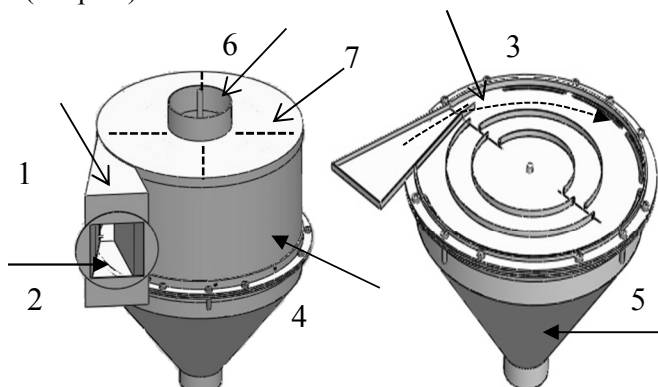
Šiame skyriuje pateikiama oro srauto greičio kanaluose ir pusžiedžių tarpuose tyrimų metodika ir gauti rezultatai. Išmatavus dinaminį slėgį, gauti oro srauto įtekėjimo greičiai į cikloną (į pirmąjį kanalą 2.1 pav.): 12, 14, 16 ir 22 m/s bei cilindrinio daugiakanalio ciklono kanaluose. Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorės straipsnis (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2012).

2.1. Oro srauto greičio kanaluose tyrimų metodika

Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant oro valymo įrenginį – cilindrinį daugiakanalį (keturių ir penkių kanalų) cikloną.

Įrenginio matmenys: cilindrinio korpuso skersmuo – 0,50 m, bendras ciklono aukštis (su kūginiu bunkeriu) – 0,72 m, srauto ištekėjimo angos skersmuo –

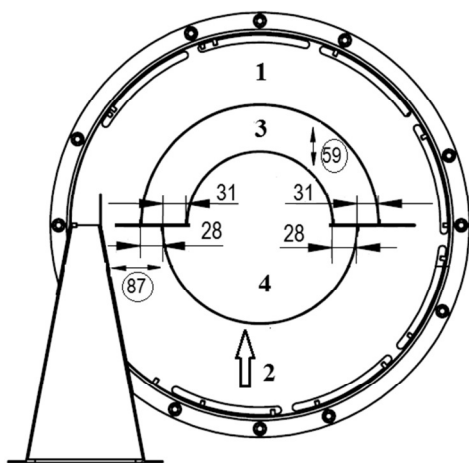
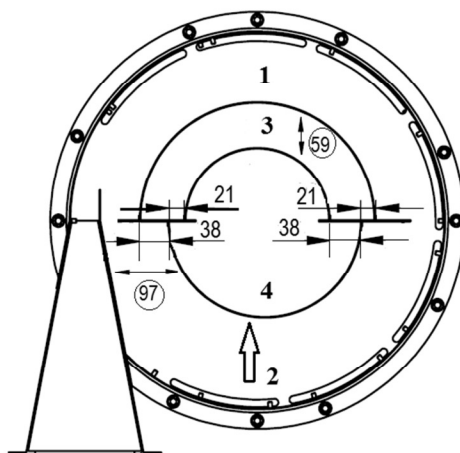
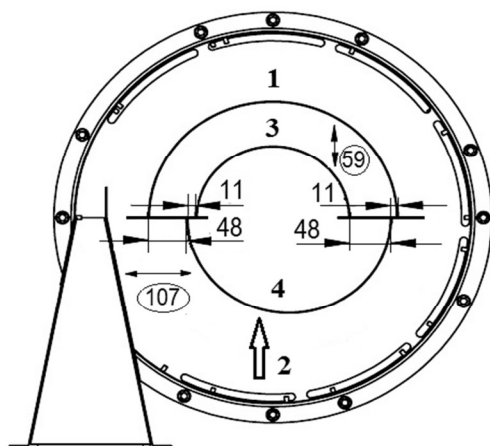
0,16 m, srauto įtekėjimo į konfuzorių angos skersmuo – 0,20 m, į cikloną – $0,034 \times 0,29$, m². Įrenginio konstrukcija nuosekliai sujungta pusžiedžių sistema su kampo posūkiais $\varphi = 0-\pi$, $\pi-2\pi$, $2\pi-3\pi$, $3\pi-4\pi$. Cilindrinio daugiakanalio ciklono konstrukciją sudaro oro srauto įtekėjimo ir ištekėjimo angos, separavimo kamera su reguliuojamais cilindriniais pusžiedžiais bei kūginis bunkeris dalelėms surinkti (2.1 pav.).



2.1 pav. Eksperimentinis cilindrinis daugiakanalis ciklonas: 1 – konfuzorius, 2 – oro srauto įtekėjimo anga į konfuzorių, 3 – oro srauto įtekėjimas į cikloną (į pirmąjį kanalą), 4 – separavimo kamera, 5 – bunkeris, 6 – oro srauto ištekėjimo anga, 7 – dinaminio slėgio matavimo taškai

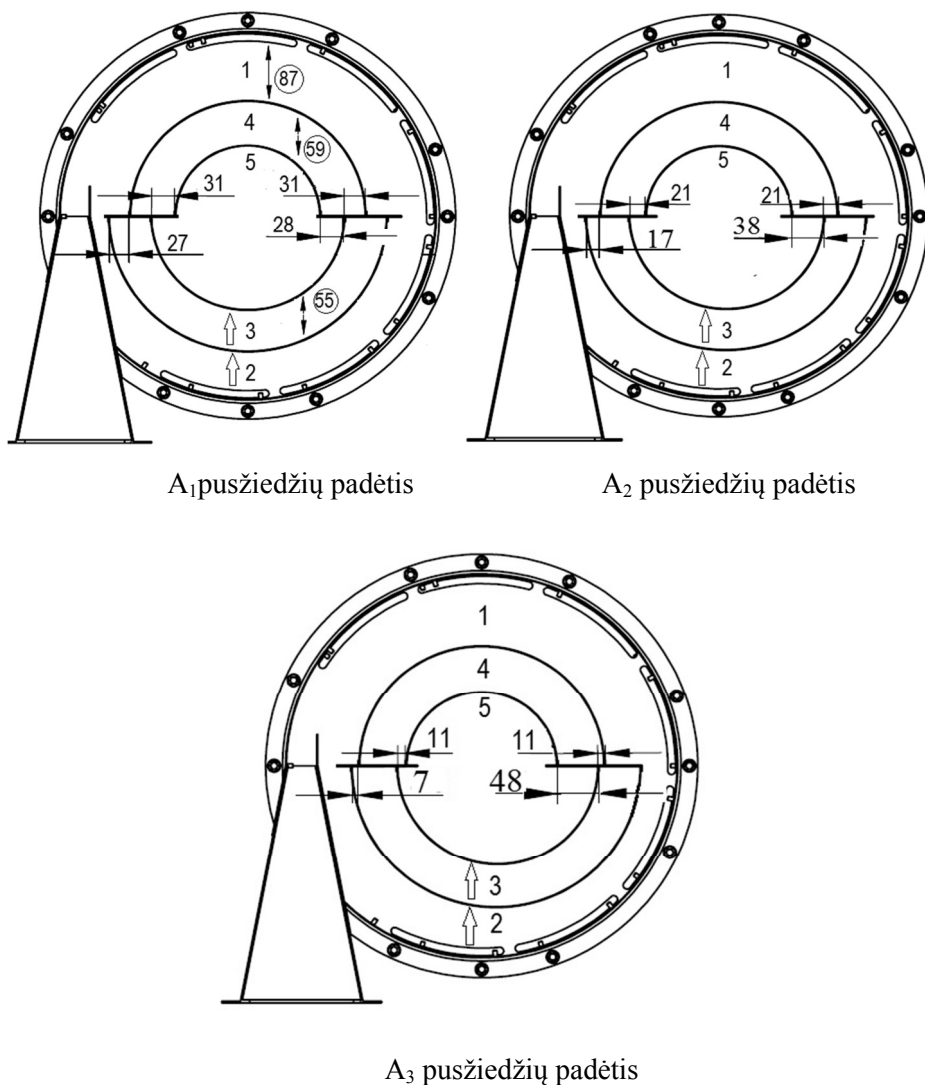
Fig.2. 1. Experimental cylindrical multichannel cyclone: 1 – confusor, 2 – airflow inlet opening into confusor, 3 – airflow inlet into cyclone (into the first channel), 4 – separation chamber, 5 – hopper, 6 – airflow outlet opening, 7 – measurement points of dynamic pressure

Analizuojant daugiakanalius ciklonus (išcentriniai filtrai) buvo nutarta panaudoti keičiamas pusžiedžių padėtis. Tyrimams imtas cilindrinis ciklonas su dviejų modifikacijų pusžiedžiais – trijų ir keturių, gaunant keturkanalį ir penkiakanalį cikloną. Keturkanalį cikloną sudaro 3 pusžiedžiai (2.2 pav.), kurio antrąjį kanalą sudarantis pusžiedis gali keisti savo padėtį lygiarečiu postūmiu iš kairės į dešinę 10 mm (iš A_1 pusžiedžių padėties į A_2 padėtį) ir 20 mm (iš A_2 pusžiedžių padėties į A_3 padėtį). Penkiakanalį sudaro 4 pusžiedžiai (2.3 pav.), kurio antrąjį ir trečiąjį kanalą sudarantys du pusžiedžiai gali keisti savo padėtį lygiarečiu postūmiu iš kairės į dešinę po 10 mm. Tokiu būdu abiejų tipų ciklonai turi 3 pusžiedžių padėtis: A_1 (pusžiedžių spinduliai turi vieną bendrą centrą – ciklono centrinę ašį), A_2 ir A_3 .

A₁ pusžiedžių padėtisA₂ pusžiedžių padėtisA₃ pusžiedžių padėtis

2.2 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių kanalų tarpų schema. Rodykle pažymėti keičiamos padėties pusžiedžiai (1, 2, 3, 4 kanalų eiliškumas; kanalų plotis 2–87 mm, 97 mm, 107 mm, 3–59 mm)

Fig. 2.2. Scheme of the cylindrical four-channel cyclone adjusted semi-rings channels clearances. Semi-rings of the variable position are marked by the arrow (sucession of channels 1, 2, 3, 4; channels width 2– 87 mm, 97 mm, 107 mm, 3–59 mm)



2.3 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių kanalų tarpų schema. Rodykle pažymėti keičiamos padėties pusžiedžiai (1, 2, 3, 4 kanalų eiliškumas; kanalų plotis 1–87 mm, 3–55 mm, 4–59 mm)

Fig. 2.3. Scheme of the cylindrical five-channel cyclone adjusted semi-rings channels clearances. Semi-rings of the variable position are marked by the arrow, (sucession of channels 1, 2, 3, 4; channels width 1–87 mm, 3–55 mm, 4–59 mm)

Tyrimams naudojamos matavimo priemonės ir įranga

Eksperimentiniam tyrimui naudotas Pito-Prandtlio vamzdelis, kuris jungiamas žarnelėmis su diferencialiniu slėgio matuokliu DSM–1 dinaminiam slėgiui išmatuoti (matavimo ribos – 0–20 000 kPa; paklaida – ± 5 Pa); ventiliatorius (RS, modelis NL100); daugiafunkcis matuoklis Testo 400 (temperatūros matavimo ribos: 20–700 °C, paklaida $\pm 0,20$ °C, greičio matavimo ribos: 1–30 m/s, paklaida – $\pm 0,05$ m/s) sujungiamas su NIIOGazo pneumatiniu vamzdeliu (matavimo ribos 4–21 m/s; vamzdelio koeficiento vidutinė vertė $k = 0,70 \pm 0,02$).

Eksperimento eiga

Eksperimentinis daugiakanalio ciklono stendas pateiktas 2.4 paveiksle. Iš ventiliatoriaus (1) pučiamas oro srautas teka ortakiu, kuris sujungtas su konfuzoriumi (2) (2.1 pav). Oro srauto temperatūra ir greitis matuotas daugiakanalio ciklono įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose su daugiafunkciu matuokliu Testo 400 (3, 4), slėgio matuokliu DSM–1 nustatomas įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas (5, 6).

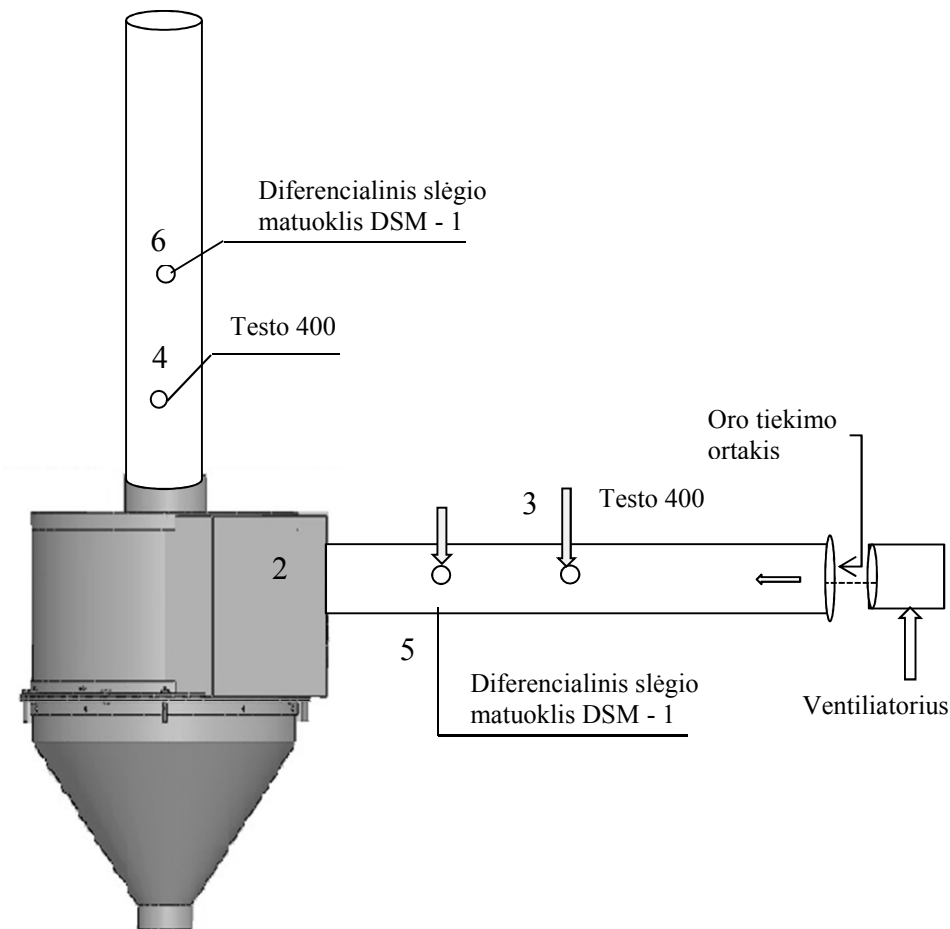
Patikimiausi rezultatai gaunami, kai matavimai atliekami tiesiojoje ortakio atkarpoje, 5–6 D nuo ciklono korpuso ir atstumu 3–4 D už ciklono (D – ortakio skersmuo), kur nėra jokių dujų srauto trikdžių: ventiliatoriaus, sklendės, alkūnės, ortakio susiaurėjimo ar platėjimo ir pan. Ortakyje parinktoje vietoje buvo pragręžtos kiaurymės ir įmontuoti metaliniai 50 mm ilgio atvamzdžiai su užsukamaisiais dangteliais bei padarytos 20–30 mm skersmens angos (LAND 27-98/M-07, Lietuvos statistika 1998).

Vienfazio srauto tyrimai atlikti esant 4 įtekėjimo greičiams į cikloną. Pučiamas oro srautas keičiamas ventiliatoriaus valdymo bloke esančia svirtelė. Pradinis oro srauto greitis ortakyje, kurio matmenys yra: 2 m $\times$ 0,2 m: 4 m/s, 4,5 m/s, 5,0 m/s ir 7,0 m/s.

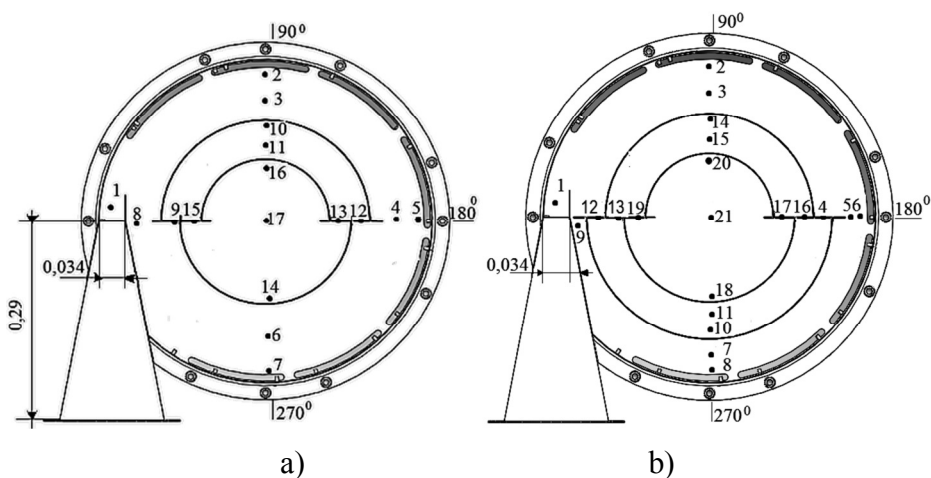
Iš ventiliatoriaus pučiamas oro srautas teka ortakiu, kuris sujungtas su konfuzoriumi (2.1 pav.). Įtekėjimo į cikloną (į pirmąjį kanalą (2.1 pav.)) angos matmenys – 0,29 m $\times$ 0,034 m. Dėl skirtingų skerspjuvio plotų pereinamojoje jungtyje (konfuzoriuje) įtekėjimo ir ištekėjimo vietose susidaro greičio skirtumai. Išmatavus oro srauto dinaminį slėgį pirmajame kanale (2.1 pav, 2.5 (a, b) pav. 1 matavimo taškas), apskaičiuotas oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną – 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 22 m/s (LAND 27-98/M-07). Tyrimams naudoti parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

Siekiant nustatyti vienfazio oro srauto greitį matavimo taškuose, ciklono dangtyje parinktose vietose pragręžiamos kiaurymės (2.1 pav.) numatant galimybę jas užsandarinti. Oro srauto dinaminis slėgis matuotas 2–3 mm atstumu nuo periferinės ir skirtingo spindulio cilindrinų pusžiedžių sienelės, pusžiedžių tarpuose bei daugiakanalio ciklono ašinėje dalyje (2.5 pav.). Cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono matavimo taškai išdėstyti pagal srauto tekėjimo kanalais kryptį (2.5 a, b pav.).

Oro dinaminio slėgio matavimai atlikti nustatant cilindrinio daugiakanalio ciklono pusžiedžių tarpus A_1 , A_2 , A_3 pusžiedžių padėtimis (2.2 ir 2.3 pav.). Keturkanalio ir penkiakanalio ciklonų pusžiedžių tarpų plotis pateikiamas 2.2 ir 2.3 lentelėse.



2.4 pav. Eksperimentinės įrangos schema
Fig. 2.4. Scheme of the experimental equipment



2.5 pav. Oro srauto matavimo taškai cilindrinio keturkanalio (a) ir penkiakanalio (b) ciklono pusžiedžių kanaluose

Fig. 2.5. Air flow measurement points in curvilinear channels of the four-channel (a) and the five – channel (b) cylindrical cyclone

Pito-Prandtlio vamzdelis įstatomas į daugiakanalio ciklono dangčio parinktoje vietoje pragręžtas kiaurymės, kaip parodyta 2.1. paveiksle. Kol matavimas neatliekamas, Pito-Prandtlio vamzdelio galas turi būti nukreiptas pasroviui (LAND 27-98/M-07).

Oro srauto greitis matavimo taške apskaičiuojamas pagal formulę (LAND 27-98/M-07):

$$V = \sqrt{2gP_D / \rho_t}, \quad (2.1)$$

čia: g – laisvo kritimo pagreitis ($g = 9,81 \text{ m/s}$); P_D – dinaminis dujų srauto slėgis matavimo taške, Pa; ρ_t – dujų tankis matavimo sąlygomis, kg/m^3 .

Dujų tankis kg/m^3 matavimo sąlygomis apskaičiuojamas pagal formulę (LAND 27-98/M-07):

$$\rho_t = 0,359 \times \rho_0 \frac{P \pm \Delta P}{273 + t}, \quad (2.2)$$

čia: p_0 – dujų tankis, perskaičiuotas normaliosiomis sąlygomis (0°C , 760 mmHg), kg/m^3 ; P – atmosferos slėgis, mm Hg ; t – dujų temperatūra ortakyje, $^\circ\text{C}$; $\pm P$ – dujų perteklinis slėgis (arba praretėjimas) ortakyje (LAND 27-98/M-07).

Apskaičiuoti oro srauto greičiai pateikiami priede. Daugiakanalio ciklono srauto parametrai pateikti 2.1. lentelėje. Tekėjimo režimą nusako bedimensis dydis Reindso skaičius (pavyzdžiui, tekėjimui ortakyje judėjimas taps turbulentinis, kai

Reinoldso skaičius viršys vertę 2300). Šiam ciklonui ir tipiniams ciklonams esant Re skaičiui $Re > 10^4$ tekėjimas yra turbulentinis. Formulė Reinoldso skaičiui skaičiuoti yra tokia:

$$Re = V_0 h \rho / \mu, \quad (2.3)$$

čia: V_0 – oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną, m/s; h – cilindrinio pusžiedžio aukštis, m; ρ – oro srauto tankis, kg/m^3 ; μ – dinaminė klampa, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$.

2.1 lentelė. Cilindrinio daugiakanalio ciklono parametrai

Table 2.1. Parameters of cylindrical multichanneled cyclone

Oro srauto greitis į pirmąjį kanalą, m/s	$Re \times 10^4$	Cilindrinio keturkanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	Cilindrinio penkiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	Oro srauto debitas Q, m^3/h
12	$2,2 \times 10$	150	172	$439,2 \pm 0,001$
14	$2,5 \times 10$	254	273	$500,4 \pm 0,001$
16	$2,9 \times 10$	307	317	$565,2 \pm 0,001$
22	$4,0 \times 10$	366	375	$781,2 \pm 0,001$

2.2 lentelė. Cilindrinio keturkanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių tarpų plotis

Table 2.2. Width of adjusted channel clearances for cylindrical four-channel cyclone

Matavimo taškai	Pusžiedžių tarpų plotis, A_1 padėtis	Pusžiedžių tarpų plotis, A_2 padėtis	Pusžiedžių tarpų plotis, A_3 padėtis
12	31 mm	21 mm	11 mm
15	28 mm	38 mm	48 mm

2.3 lentelė. Cilindrinio penkiakanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių tarpų plotis

Table 2.3. Width of adjusted channel clearances for cylindrical five-channel cyclone

Matavimo taškai	Pusžiedžių tarpų plotis, A_1 padėtis	Pusžiedžių tarpų plotis, A_2 padėtis	Pusžiedžių tarpų plotis, A_3 padėtis
12	27 mm	17 mm	7 mm
16(19)	31 mm	21 mm	11 mm

2.2. Statistinė duomenų analizė

Daugiakanalio ciklono KD šalinimo efektyvumui nustatyti gauti duomenys buvo sisteminti ir vertinti statistiniais metodais. Eksperimentinio tyrimo metu kiekvienas mėginys buvo imtas 5 kartus. Matavimo taškai oro srauto dulketumo nustatymui pagal filtro masių skirtumą buvo išdėstyti tiesiojoje ortakio atkarpoje atstumu 5–6 D nuo ciklono korpuso ir atstumu 3–4 D nuo ciklono išteikėjimo ortakyje (D – ortakio skersmuo), kur nėra jokių oro srauto trikdžių: ventiliatoriaus, sklendės, alkūnės, ortakio susiaurėjimo ar platinimo ir pan.

Gavus matavimo duomenų rezultatus apskaičiuojamas aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.4)$$

čia: x_i – i-tojo matavimo rezultatas; n – matavimų skaičius.

Matavimo duomenų *aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida* $\sigma_{\bar{x}}$ apskaičiuojama pagal formulę:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}. \quad (2.5)$$

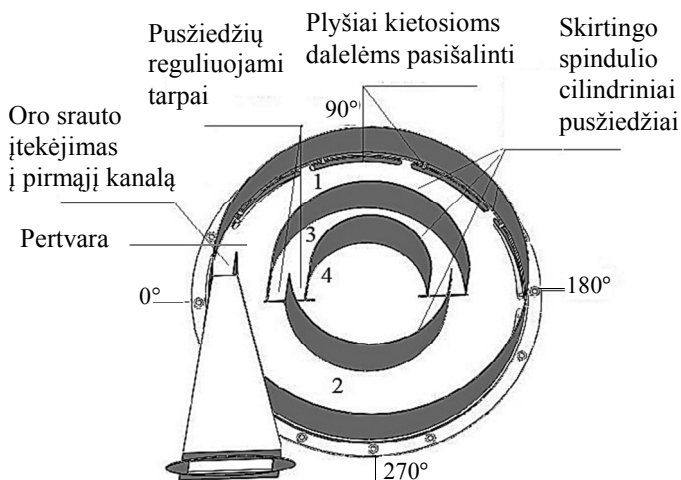
Tuomet *atsioki matavimo vidutinė kvadratinė paklaida* skaičiuojama pagal formulę:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2.6)$$

Darbe statistiniams skaičiavimams naudota Microsoft Office Excel 2003 programa. Matavimų aritmetiniai vidurkiai, aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida, matavimo vidutinė kvadratinė paklaida apskaičiuota naudojant Microsoft Office Excel 2003 statistikos (Statistical) funkcijas.

2.3. Keturkanalio ciklono oro srauto greičio kanaluose tyrimų rezultatai ir analizė

Sujungta nuosekliai cilindrinio daugiakanalio ciklono pusžiedžių sistema susideda iš dviejų plokščių dangčių, trijų skirtingo kreivumo cilindrinio pusžiedžių, reguliuojamų pusžiedžių tarpų, kietoms dalelėms pašalinti plyšių, kurie yra išdėstyti ciklono korpuso pirmajame ir antrajame kanaluose prie periferinės sienelės. Separavimo kameroje skirtingo spindulio cilindriniai pusžiedžiai yra išdėstyti vienas priešais kitą sudarydami kreivalinijinius kanalus su uždariais kontūrais (2.6 pav.). Siekiant nukreipti oro srauto tekėjimą tik į pirmąjį kanalą, prie tangentinės oro srauto angos įrengta pertvara. Pertvaros aukštis yra lygus kameros aukščiui, o plotis – įtekėjimo angos pločiui. Įrengta pertvara atitolina įtekiančio srauto patekimą į artimiausią pusžiedžių tarpą.



2.6 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono schema (1, 2, 3, 4 kanalų eiliškumas)

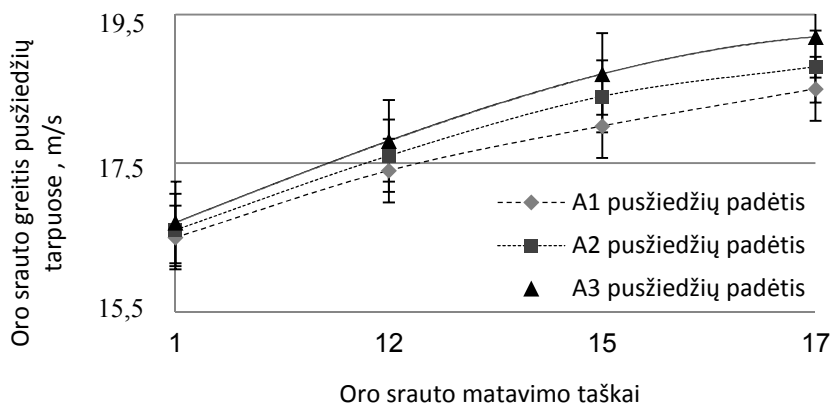
Fig. 2.6. Scheme of the cylindrical four – channel cylindrical cyclone

2.7 paveiksle pateiktas oro srauto greičio pasiskirstymas cilindriniam keturkanaliame ciklone esant vidutiniam srauto įtekėjimo greičiui 16 m/s į cikloną (į pirmąjį kanalą) esant skirtingoms A_1 , A_2 , A_3 pusžiedžių padėtimis (2.2 pav.). Įtekėjęs į cilindrinio keturkanalio ciklono 1 kanalą srautas toliau patenka į 2 kanalą, o iš čia srautas šakojasi į 1 ir 3 kanalus ($\varphi=360^\circ$); iš 3 kanalo srautas dalijasi į du ir patenka į 2 ir 4 kanalus ($\varphi=540^\circ$). Nuosekliai perėjęs visus kanalus, srautas per oro srauto ištekėjimo angą pašalinama iš sistemos (Боров и др. 1994).

Žiedinio srauto pasiskirstymo trečiajame ir ketvirtajame kanaluose oro srauto greitis yra didesnis, nes mažėja kanalų skerspjūvio plotis.

Esant A_1 , A_2 , A_3 pusžiedžių padėtimis, pirmajame ir antrajame kanaluose prie periferinės sienelės 2, 5, 7 bei kanalo skerspjūvio viduryje – 3, 4, 6 matavimo taškuose oro srauto greitis išlieka mažai pakitęs (2.3 a pav).

Tyrimų rezultatai, pateikti 2.7 paveiksle, rodo, kad keičiant keturkanaliame ciklone A_1 į A_2 ir A_3 pusžiedžių padėtis antrajame kanale (2.2 pav.), pusžiedžio tarpuose kinta oro srauto greitis.



2.7 pav. Oro srauto greitis cilindrinio keturkanalio ciklono kanalų tarpuose esant A_1 , A_2 , A_3 padėtimis: 12, 15 ir 17 srauto matavimo taškai (žr. 2.3 (a) pav). Įtekėjimo į cikloną greitis 16 m/s

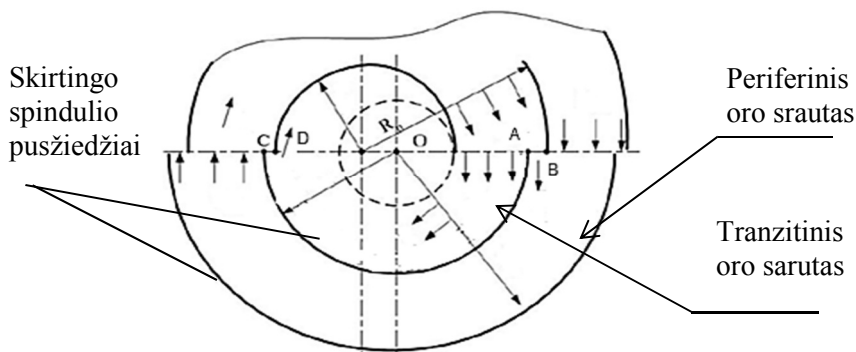
Fig. 2.7. Air flow velocity in cylindrical four-channel cyclone curvilinear channels clearances under 3 different positions of half-rings: 12, 15 and 17 flow measurement points (see Fig.2.3 (a)). Velocity at the inlet into the cyclone is 16 m/s

Esant A_2 pusžiedžių padėčiai oro srauto greitis 12 matavimo taške (tarp trečiojo ir antrojo pusžiedžių tarpo) yra 17,4 m/s, 15 matavimo taške (tarp trečiojo ir ketvirtojo pusžiedžių tarpo) – 18,2 m/s. Minėtuose matavimo taškuose esant A_3 padėčiai srauto greitis yra didesnis – 17,8 m/s ir 19 m/s. Srauto greičio didėjimui įtakos turi mažėjantis pusžiedžių tarpo plotis.

Svarbu pažymėti tai, kad oro srauto greitis didėja ne tik mažėjant pusžiedžių tarpams, bet ir mažėjant cilindrinio pusžiedžio spinduliui. Oro srauto greičio sumažėjimas nustatytas 9 ir 13 matavimo taškuose (2.5 a pav.) esant A_2 ir A_3 pusžiedžių padėtimis. Greičio sumažėjimui įtakos turi sumažėjęs aerodinaminis pasipriešinimas padidėjus pusžiedžio tarpo pločiui. Pavyzdžiui, esant A_1 pusžiedžių padėčiai, 9 srauto matavimo taške greitis yra 13,2 m/s, kuris A_2 A_3 pusžiedžių padėtimis sumažėja iki 12,1 m/s.

Esant skirtingam oro srauto greičio įtekėjimui (į pirmąjį kanalą) 12 m/s, 14 m/s ir 22 m/s bei esant skirtingoms A_1 , A_2 , A_3 pusžiedžių padėtimis, greičių tendencija pusžiedžių kanaluose ir jų tarpuose išlieka panaši, kaip ir analizuojamuoju atveju (16 m/s). Oro srautų greičiai pateikti priede.

Daugiakanaluose ciklonuose kreivalinijinis oro srauto tekėjimas kiekvieno kanalo išėjime dalijasi į dvi dalis. Periferinė srauto dalis – periferinio srauto grįžimas (grįžtamasis srautas) dalijasi kanalus, kuriuos sudaro didesnio spindulio pusžiedžiai. Centrinė srauto dalis – tranzitinis srautas įteka į mažesnio spindulio kanalą ir pratekęs nuosekliai pro visus kanalus išteka per oro srauto ištekėjimo angą). 2.8 paveiksle pateikta, kaip kreivalinijiniuose kanaluose pasiskirsto periferinis (B, C) ir tranzitinis (A, D) oro srautas (Серебрянский и др (2004). Dėl prielaida, kad periferinis ir tranzitinis oro srautas kanalų tarpuose dalijasi pagal tų tarpų skerspjūvio plotų santykį.



2.8 pav. Periferinio ir tranzitinio oro srauto pasiskirstymas daugiakanalio ciklono kanaluose

Fig. 2.8. Circulating and transit air flow distribution in the multichannel cyclone channels (Серебрянский 2004)

2.4 lentelėje pateikti periferinio ir tranzitinio oro srauto kiekio pasiskirstymo santykiai kanalų tarpuose. Keturkanalio ciklono pusžiedžių tarpuose oro srauto kiekio suma (2.4 lentelė) yra lygi vienetui, t. y. visam kanalo nedimensiam plotui, o padalinus iš realaus pločio galima tiksliau nustatyti pratekančio periferinio ir tranzitinio srautų kiekius (2.4 pav.).

Ištekant oro srautui (2.2 pav. A_1 pusžiedžių padėtis) iš antrojo kanalo – į pirmąjį ir trečiąjį (8, 9 matavimo taškai) santykiu 0,68 : 0,32 (tai sudaro 68 % periferinio ir 32 % tranzitinio srauto) (2.4 lentelė), o iš trečiojo kanalo į antrąjį (12 matavimo taškas) ir ketvirtąjį (13 matavimo taškas) santykiu 0,53 : 0,47 (tai sudaro 53 % periferinio ir 47 % tranzitinio srauto).

2.4 lentelė. Oro srauto dalių kiekio pasiskirstymo santykiai keturkanalio ciklono reguliuojamų pusšiedžių tarpuose

Table 2.4. Air flow distribution ratios in the adjustable channels clearances of four-channel cyclone

A ₁ pusšiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusšiedžių tarpuose	Pusšiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
8	59	<u>0,68</u> <i>periferinis</i>
9	28	<u>0,32</u> <i>tranzitinis</i>
12	31	<u>0,53</u> <i>periferinis</i>
13	28	<u>0,47</u> <i>tranzitinis</i>
A ₂ pusšiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusšiedžių tarpuose	Pusšiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
8	59	<u>0,61</u> <i>periferinis</i>
9	38	<u>0,39</u> <i>tranzitis</i>
12	21	<u>0,36</u> <i>perifinis</i>
13	38	<u>0,64</u> <i>tranzitis</i>
A ₃ pusšiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusšiedžių tarpuose	Pusšiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
8	59	<u>0,55</u> <i>periferinis</i>
9	48	<u>0,45</u> <i>tranzitis</i>
12	11	<u>0,19</u> <i>perifinis</i>
13	48	<u>0,81</u> <i>tranzitinis</i>

Esant A₂ pusšiedžių padėčiai, kai tarpkanalis tarpas yra 97 mm ir 59 mm (2.2 pav. 8, 9 matavimo taškai) ištekančio srauto iš antrojo kanalo į pirmąjį ir trečiąjį kanalus, periferinį srautą sudaro 61 %, o tranzitinį 39 %, o iš trečiojo kanalo – į antrąjį ir ketvirtąjį santykiu 0,36 : 0,64 (12, 13 matavimo taškai) (tai sudaro 36 % periferinio ir 64 % tranzitinio srauto). 2.4 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad esant A₂ pusšiedžių padėčiai 12 matavimo taške periferinio srauto tekėjimas yra mažesnis 17 % už A₁ padėtį.

Esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai tarpkanaliniai tarpai yra 107 mm ir 59 mm (2.3 a pav. 8, 9 matavimo taškai) ištekančiojo srauto iš antojo į pirmąjį ir trečiąjį kanalą oro srauto kiekio santykį sudaro 0,55 : 0,45 (tai sudaro 55 % periferinį ir 45 % tranzitinį srautą). Tai rodo, kad 55 % oro srauto grįžta į aktyviają (periferinio) srauto zoną, kurioje srautas pakartotinai pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose. Likusioji 45 % tranzitinio srauto dalis įteka į mažesnio kreivumo kanalą ir išteka per oro srauto ištekimą angą.

Iš trečiojo kanalo – į antrąjį ir ketvirtąjį kanalus (12, 13 matavimo taškai), srauto dalių santykį sudaro 0,19 : 0,81 (tai sudaro 19 % periferinį ir 81 % tranzitinį srautą). Didėjant keturkanaliame ciklone kanalų tarpų pločiui (9, 13 matavimo taškai) nuo 28 mm iki 48 mm, tranzitinio srauto dalis didėja nuo 32 % iki 45 % ir 47 % iki 81 %. Mažėjant keturkanaliame ciklone kanalų tarpų pločiui (12 matavimo taške) nuo 31 mm iki 11 mm, periferinio srauto dalis mažėja nuo 53 % iki 19 %. Mažėjant kanalų tarpų pločiui nuo 31 mm iki 11 mm, oro srauto greitis (12 matavimo taške) didėja nuo 13,8 m/s iki 22,5 m/s. Didėjant keturkanaliame ciklone kanalų tarpų pločiui nuo 28 mm iki 48 mm, oro srauto greitis (9, 13 matavimo taškai) mažėja nuo 13,2 iki 12,1 m/s.

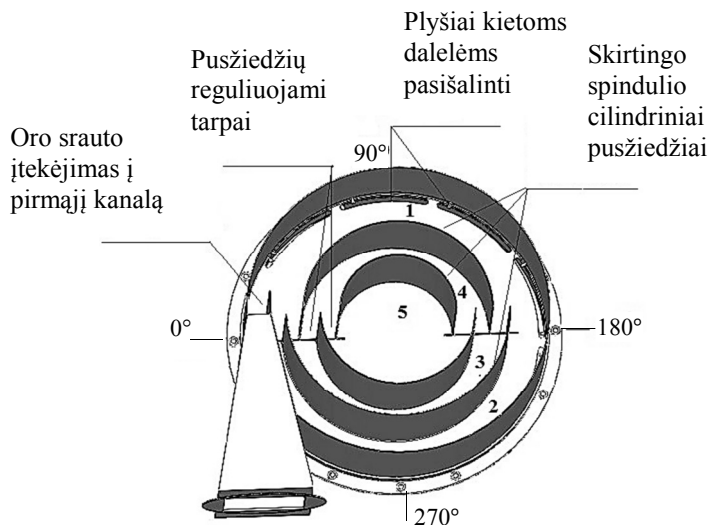
Šie gauti tyrimų duomenys (srauto greičiai, kanalų tarpų pločiai, srauto pasiskirstymo santykiai) panaudoti ciklono efektyvumo KD šalinant iš oro srauto tyrimams.

2.4. Penkiakanalio ciklono oro srauto greičio kanaluose tyrimų rezultatai ir analizė

Penkiakanalo ciklono, turinčio keturis cilindrinis pusžiedžius, (2.9 pav.) skirtingai nei keturkanalio ciklono, oro srautas pereina sukuriniu srautu iš pirmojo kanalo (180°) į antrąjį ir trečiąjį kanalus. Atlikti dinaminio slėgio matavimai pasirinktose matavimo vietose (2.5 b pav.) rodo didėjančią oro srauto greičio pasiskirstymą trečiajame, ketvirtajame ir penktajame kanaluose. Greičio pasiskirstymas buvo išmatuotas esant skirtingoms A_1 , A_2 , A_3 pusžiedžių padėtimis bei skirtingiems oro srauto ištekimą greičiams į cikloną. Itekėjęs srautas į 1 kanalą, kai $\varphi = 180^\circ$ šakojasi į 2 ir 3 kanalus; iš 3 kanalo ($\varphi = 360^\circ$) dalijasi ir patenka į 1 ir 4 kanalus; iš 4 kanalo, kai $\varphi = 540^\circ$, srautas pasiskirsto į 5 ir 3 kanalus.

2.10 paveiksle pateiktas oro srauto tekėjimo greitis, kuris didėja mažėjant pusžiedžių tarpų pločiui: 13, 16 ir 19 matavimo taškuose. Oro srauto greitis 12 matavimo taške didėja nuo 16,9 m/s iki 17,5 m/s, 16 matavimo taške nuo 17,3 m/s iki 17,9 m/s, 19 taške nuo 17,7 m/s iki 18,4 m/s. Greičio sumažėjimas pastebimas 4, 9 ir 12, 17 matavimo taškuose (2.5 b pav.) esant A_2 ir A_3 pusžiedžių padėtimis. Esant A_1 , A_2 ir A_3 pusžiedžių padėčiai, pirmajame ir antrajame

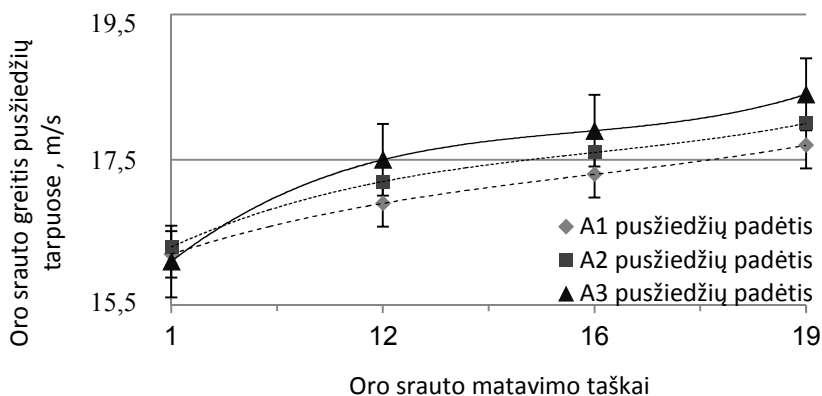
kanaluose prie periferinės sienelės 2, 6, 8 bei kanalo skerspjūvio viduryje – 3, 5, 7 matavimo taškuose oro srauto greitis išlieka mažai pakitęs (2.5 b pav.).



2.9 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono schema

Fig. 2.9. Scheme of the five-channel cylindrical cyclone

Tyrimų rezultatai, pateikti 2.10 paveiksle, rodo, kad keičiant penkiakanaliame ciklone A_1 , A_2 pusžiedžių padėtis antrajame ir trečiajame kanaluose (2.3 pav.), pusžiedžių tarpuose didėja oro srauto greitis. Kaip ir keturkanaliame ciklone srauto greičio didėjimui įtakos turi mažėjantis kanalo tarpo plotis. Atlikti tyrimai parodė, kad esant trimis ir keturiems pusžiedžiams cilindrinio daugiakanalio ciklono konstrukcijoje sudarant keturis ir penkis kreivalinijinius kanalus, oro srauto greitis didėja ne tik mažėjant pusžiedžių tarpams, bet ir mažėjant pusžiedžio spinduliui. 2.5 lentelėje pateikti periferinio ir tranzitinio oro srauto kiekio pasiskirstymo santykiai penkiakanalio ciklono pusžiedžių tarpuose. Penkiakanalio ciklono pusžiedžių tarpuose oro srauto kiekio suma yra lygi kreivalinijinio kanalo pločiui. Oro srautas, tekantis pirmuoju kanalu ties 180° kampu, dalijasi į antrąjį (5 matavimo taškas) ir trečiąjį (4 matavimo taškas) kanalus santykiu 0,32 : 0,68 (tai sudaro 32 % ir 68 %). Vadinasi, 68 % periferinio srauto pakartotinai pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose, o 32 % tranzitinio srauto įteka į mažesnio kreivumo kanalus (mažesnę kreivumo kanalą sudaro mažesnio spindulio pusžiedis).



2.10 pav. Oro srauto greitis cilindrinio penkiakanalio ciklono pusžiedžių tarpuose esant 3 skirtingoms pusžiedžių padėtimis: 12, 16 ir 19 srauto matavimo taškai (žr. 2.3 b pav.). Įtekėjimo į cikloną greitis 16 m/s

Fig 2.10. Air flow velocity in clearances of curvilinear channels of cylindrical five-channel cyclone under 3 different positions of half-rings: 12, 16 and 19 flow measuring points (see Fig. 2.3 b). Velocity at the inlet into the cyclone is 16 m/s

Srautas, ištekančias iš trečiojo kanalo (12, 13 matavimo taškai) patenka į pirmąjį ir ketvirtąjį kanalus santykiu 0,51 : 0,49, o iš ketvirtojo kanalo į penktąjį kanalus (16, 17 matavimo taškai) santykiu 0,53 : 0,47 (tai sudaro 53 % periferinio ir 47 % tranzitinio srauto).

Esant A_2 pusžiedžių padėčiai ištekančias srautas iš pirmojo kanalo pereina į antrąjį (5 matavimo taškas) ir trečiąjį (4 matavimo taškas) kanalus santykiu 0,44 : 0,56. Srautas, ištekančias iš trečiojo kanalo (12, 13 matavimo taškai) patenka į pirmąjį ir ketvirtąjį kanalus santykiu 0,33 : 0,67 (tai sudaro 33 % periferinio ir 67 % tranzitinio srauto), o iš ketvirtojo kanalo į trečiąjį ir penktąjį kanalus (16, 17 matavimo taškai) santykiu 0,36 : 0,64 (tai sudaro 36 % periferinio ir 64 % tranzitinio srauto).

Esant A_3 pusžiedžių padėčiai ištekančias srautas iš pirmojo kanalo pereina į antrąjį (5 matavimo taškas) ir trečiąjį (4 matavimo taškas) kanalus santykiu 0,55 : 0,45 (tai sudaro 55 % periferinio ir 45 % tranzitinio srauto). Srautas, ištekančias iš trečiojo kanalo (12, 13 matavimo taškai) patenka į pirmąjį ir ketvirtąjį kanalus santykiu 0,13 : 0,87 (tai sudaro apie 13 % ir 87 %), o iš ketvirtojo kanalo į trečiąjį ir penktąjį kanalus (16, 17 matavimo taškai) santykiu 0,19 : 0,81 (tai sudaro 19 % ir 81 %).

2.5 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad periferinio oro srauto kiekis 5 matavimo taške pasiskirsto didesniu santykiu A_1 nei A_3 pusžiedžių padėtyje. Skirtumą sudaro 23 %. Skirtumas tarp A_1 ir A_2 pusžiedžių padėčių – 11 %, o A_2 ir A_3 – 15 %.

2.5 lentelė. Oro srauto dalių kiekio pasiskirstymo santykiai penkiakanalio ciklono reguliuojamų pusžiedžių tarpuose

Table 2.5. Air flow distribution ratios in the adjustable channels clearances of five-channel cyclone

A ₁ pusžiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusžiedžių tarpuose	Pusžiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
4	27	<u>0,32</u> <i>tranzitini s</i>
5	59	0,68 <i>periferini s</i>
12	27	<u>0,51</u> <i>periferini s</i>
13	28	0,49 <i>tranzitini s</i>
16	31	<u>0,53</u> <i>periferini s</i>
17	28	0,47 <i>tranzitini s</i>
A ₂ pusžiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusžiedžių tarpuose	Pusžiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
4	38	<u>0,44</u> <i>tranzitis</i>
5	49	0,56 <i>periferini s</i>
12	17	<u>0,33</u> <i>periferini s</i>
13	38	0,67 <i>tranzitini s</i>
16	21	<u>0,36</u> <i>periferini s</i>
17	38	0,64 <i>tranzitini s</i>
A ₃ pusžiedžių padėtis		
Matavimo taškai pusžiedžių tarpuose	Pusžiedžių tarpų plotis mm	Periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis
4	47	<u>0,55</u> <i>tranzitini s</i>
5	39	0,45 <i>periferini s</i>
12	7	<u>0,13</u> <i>periferini s</i>
13	48	0,87 <i>tranzitini s</i>
16	11	<u>0,19</u> <i>periferini s</i>
17	48	0,81 <i>tranzitini s</i>

Kalbant apie A_3 pusžiedžių padėtį, gautieji tyrimų rezultatai sutampa su keturkanalio ciklono tyrimų duomenimis ir taip pat rodo, kad 19 % oro srauto grįžta į aktyvią periferinio srauto zoną (16, 19 matavimo taškas), kurioje srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose. Likusioji (81 %) tranzitinio srauto dalis įteka į penktąjį mažesnio kreivumo kanalą, iš kurio ši dalis patenka vėl į ketvirtąjį kanalą, o likusioji dalis išteka per oro srauto ištėkėjimo angą.

Penkiakanalio ciklono 12 matavimo taške oro srauto dalių kiekio santykio pasiskirstymas esant A_1 pusžiedžių padėčiai gautas 38 % mažesnis nei A_3 pusžiedžių padėties, o 16 matavimo taške – 34 %.

Penkiakanaliame ciklone didžiausias tranzitinio srauto kiekis (nuo 32 % iki 55 %) gauta, kai kanalų tarpų plotis (4 matavimo taškas) yra nuo 27 mm iki 47 mm ir nuo 28 mm iki 48 mm (13 matavimo taškas) nuo 49 % iki 87 %, mažėjančioji periferinio srauto dalis (nuo 51% iki 13 %) gauta, kai kanalų tarpų plotis yra nuo 27 mm iki 7 mm ir nuo 31 mm iki 11 mm (16 matavimo taškas).

Penkiakanaliame ciklone didžiausia oro srauto greičio reikšmė pakito nuo 12,9 m/s iki 22,6 m/s (12 matavimo taškas) ir nuo 13,5 m/s iki 23 m/s (16 ir 19 matavimo taškai), kai kanalų tarpų plotis yra 7 mm 11 mm; mažiausia oro srauto greičio reikšmė – 12,9 m/s ir 12,6 m/s (13, 17 matavimo taškai) gauta, kai kanalų tarpų plotis yra 28 mm 48 mm.

Šie gauti tyrimų duomenys (srauto greičio, kanalų tarpų pločio, srauto pasiskirstymo santykių dydžiai) panaudoti ciklono efektyvumo KD šalinant iš oro srauto tyrimams.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad naudojant keičiamų atstumų pusžiedžius daugiakanaliame ciklone ištėkantis oro srautas iš kiekvieno kanalo dalijasi į dvi dalis – periferinį ir tranzitinį srautą. Periferinė srauto dalis grįžta į prieš tai esantį kanalą, turintį didesnio spindulio pusžiedį, o tranzitinis – į mažėjančius kanalus ir pasišalina iš ciklono.

2. Mažėjant keturkanalio ciklono pusžiedžių tarpų skerspjūvio plociui, tranzitinio oro srauto kiekis didėja iki 81 %, o periferinis srautas mažėja iki 19 %. Penkiakanalio ciklono tranzitinio srauto kiekis didėja iki 87 %, o periferinis srautas mažėja iki 13 %.

3. Oro srauto greičiui didėjant į pirmąjį kanalą nuo 12 m/s iki 22 m/s keturkanaliame ciklone aerodinaminis pasipriešinimas didėja nuo 150 Pa iki 366 Pa, o penkiakanaliame ciklone – nuo 172 Pa iki 375 Pa.

4. Mažėjant keturkanalio ciklono pusžiedžių tarpų plociui nuo 31 mm iki 11 mm, oro srauto greitis (12 ir 15 matavimo taškai) didėja nuo 13,8 m/s iki 22,5 m/s. Penkiakanaliame ciklone didžiausia oro srauto greičio reikšmė – nuo

12,9 m/s iki 22,6 m/s (12 matavimo taškas) ir nuo 13,5 m/s iki 23 m/s (16 ir 19 matavimo taškai) gaunama tada, kai kanalų tarpų plotis yra 7 mm 11 mm.

5. Didėjant keturkanalio ciklono pusžiedžių tarpų skerspjūvio pločiui nuo 28 mm iki 48 mm, oro srauto greitis (9, 13 matavimo taškai) mažėja nuo 13,2 iki 12,1 m/s. Penkiakanaliame ciklone mažiausia oro srauto greičio reikšmė – 12,9 m/s ir 12,6 m/s (13,17 matavimo taškai) gauta, kai kanalų tarpų plotis yra 28 mm 48 mm.

Daugiakanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimai naudojant skirtingos kilmės kietąsias daleles

Skyriuje pateikti cilindrinio daugiakanalio (keturkanalio ir penkiakanalio) ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių tyrimų metodika bei rezultatai.

Tyrimai atlikti keičiant įrenginio separavimo kameroje cilindrinį pusžiedžių skaičių ir padėtis, naudojant skirtingos kilmės KD, turinčias skirtingų savybių. Eksperimentiniams tyrimams naudojamos KD buvo prasijotos pro 20 ir 50 μm sietus.

Tyrimo tikslas – nustatyti, kokią įtaką daugiakanalio ciklono KD šalinimo iš oro efektyvumui turi įrenginio konstrukciniai sprendimai – cilindrinį pusžiedžių skaičius, reguliuojamų pusžiedžių tarpų plotis ir oro srauto santykių pasiskirstymas juose, taip pat srauto greitis bei skirtingos kilmės KD ir jų dispersiškumas.

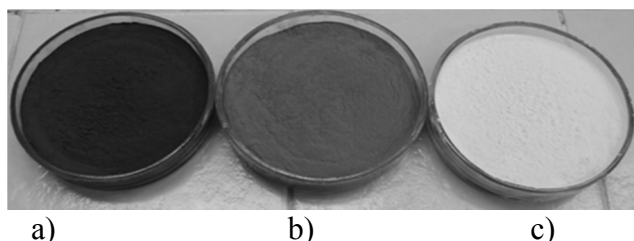
Skyriaus tematika paskelbti trys autorės straipsniai (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2011a, 2012 b; Jakštonienė *et al.* 2011b; Baltrėnas *et al.* 2012a).

Remiantis tyrimų rezultatais, parengta cilindriniam daugiakanaliui ciklonui patentinė paraiška, kuri įteikta LR valstybiniam patentų biurui (Paraiškos Nr. 2011 041, užregistruota 2011 05 12).

3.1. Keturkanalio ir penkiakanalio ciklonų bendro efektyvumo nustatymo tyrimų metodika

Tyrimai atlikti VGTU Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje, naudojant oro valymo įrenginį – cilindrinį daugiakanalį cikloną.

Eksperimentiniams tyrimams pasirinktos skirtingos kilmės KD remiantis jų skirtingomis savybėmis: tankiu ir dispersiškumu – medienos pelenai, tankis 2451 kg/m^3 ; kvarcinio smėlio miltai (SiO_2 silicio dioksidas) – tankis 2427 kg/m^3 ; cemento klinkerio dulkės – tankis 3160 kg/m^3 .



3.1 pav. Eksperimentiniams tyrimams naudojamos KD:
a) medienos pelenai, b) cemento klinkeris c) kvarcinio smėlio miltai

Fig. 3.1. SP used for experimental researches:
a) wood ashes, b) cement clinker dust c) flour of quartz sand

Eksperimentiniams tyrimams naudotos skirtingos kilmės KD buvo prasijotos pro $20 \mu\text{m}$ ir $50 \mu\text{m}$ sietus Aplinkos apsaugos katedroje, naudojant analitinį siutų kratytuvą AS 200 Digital. AB „Akmenės cementas“ laboratorijoje KD dispersinė sudėtis nustatyta lazeriniu granulometru FRITISCH.

Medienos pelenų dispersinė sudėtis pateikta 3.1 lentelėje. Tyrimuose naudotų KD dydis nuo $0,52$ iki $50 \mu\text{m}$. Smulkiadispersinių dalelių nuo $0,52 \mu\text{m}$ iki $7,98 \mu\text{m}$ sudarė – $34,4 \%$, nuo $10,01 \mu\text{m}$ iki $49,02 \mu\text{m}$ dydžio dalelių $65,6\%$.

3.1 lentelė. Medienos pelenų dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Table 3.1. Distribution of wood ash particles according to the size

μm	0,2	0,66	0,82	1,03	1,30	1,63	2,04	2,56	3,22	4,04	5,07
%	0,70	0,70	0,90	2,10	1,50	1,80	2,20	2,50	2,80	4,0	4,5
μm	6,36	7,98	10,01	12,56	15,76	19,77	24,81	31,13	39,07	49,02	
%	4,50	6,40	7,5	7,9	8,10	8,80	9,02	8,30	8,30	8	

Cemento klinkerio KD dispersinė sudėtis pateikta 3.2 lentelėje. Palyginti su medienos pelenais, jo dalelių pasiskirstymas pagal dydį skiriasi. Smulkiadispersinių dalelių dydį nuo 0,52 μm iki 7,98 μm sudaro 28,2 %, o nuo 10,01 μm iki 49,02 μm – 71,8 %.

3.2 lentelė. Cemento klinkerio dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Table 3.2. Distribution of cement clinker dust according to the size

μm	0,52	0,66	0,82	1,03	1,30	1,63	2,04	2,56	3,22	4,04	5,07
%	0,60	0,90	0,80	1,4	1,90	2,20	2,60	2,80	2,55	2,5	2,8
μm	6,36	7,98	10,01	12,56	15,76	19,77	24,81	31,13	39,07	49,02	
%	4,30	5,70	5,50	6,50	7,60	8,90	9,90	10,40	7,50	3,80	

Kvarcinio smėlio miltų dispersinė sudėtis pateikta 3.3 lentelėje. Nuo 0,52 μm iki 7,98 μm bendroje masėje sudaro 43,4 %, o nuo 10,01 μm iki 49,02 μm – 56,6 %.

3.3 lentelė. Kvarcinio smėlio miltų dalelių pasiskirstymas pagal dydį

Table 3.3. Distribution of quartz sand flour particles according to the size

μm	0,52	0,66	0,82	1,03	1,30	1,63	2,04	2,56	3,22	4,04	5,07
%	0,60	0,90	1,30	1,80	2,40	2,90	3,40	3,60	3,80	3,90	4,00
μm	6,36	7,98	10,01	12,56	15,76	19,77	24,81	31,13	39,07	49,02	
%	4,30	4,70	5,50	6,50	7,60	8,90	9,90	10,40	7,50	3,80	

Medienos pelenai susidaro deginant kietąjį kurą (medieną, medienos atliekas). Klinkeris yra pagrindinis cemento gamybos pusfabrikatis. Cementas, kaip galutinis produktas, yra gaunamas sumalant portlandcemenčio klinkerį su gipso bei kitokiais priedais cemento malūnu iki standarto specifikacijose numatyto smulkumo. Kvarcinio smėlio miltai (silicio dioksidas) – svarbiausias komponentas medžiagų, kurios yra plačiai naudojamos pramonėje. Keramikos pramonėje silicio dioksidas (SiO_2) daugiausia naudojamas kaip struktūrinis molio ingredientas ir yra pagrindinė sudedamoji keramikos glazūros dalis. Silicio dioksidas (SiO_2) yra svarbiausias stiklą formuojantis oksidas, todėl kvarcinis smėlis yra pagrindinis visų tipų stiklo ingredientas. Pagrindiniai stiklo gaminiai: stiklo tara, lakštinis stiklas (veidrodžiams, automobiliams ir kt.).

Eksperimentui naudojamos KD, prieš atliekant matavimus, turi būti sausos. Visos medžiagos buvo išdžiovintos 80 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, o po to parą laikytos 24–26 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Eksperimento metu aplinkos temperatūra buvo nuo 20,4 $^{\circ}\text{C}$ iki 22,5 $^{\circ}\text{C}$, o santykinis drėgnis siekė 58 %.

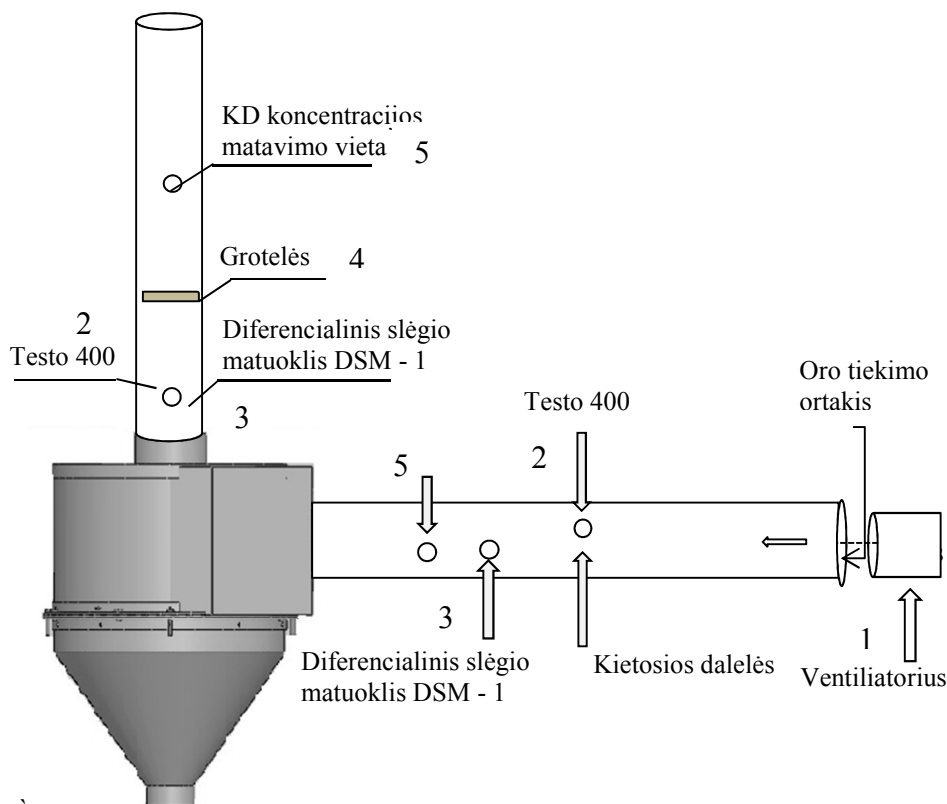
Tyrimams naudojamos matavimo priemonės ir įranga

Eksperimentiniam tyrimui naudotas filtravimo patronas, skirtas išoriniam filtravimui, mėginių paėmimo vamzdelis su antgaliu, elektroaspiratorius, barometras aneroidas, analitinės svarstyklės (matavimo ribos 0–320 g, matavimo tikslumas – $\pm 0,00005$ g), džiovinimo spinta, 0–200 °C, eksikatorius, popieriniai AFA-VP-20-1 filtrai, pincetas, „Cosmos“ oro kompresorius (darbinis slėgis 10 bar), ventiliatorius (RS, NL100 modelis), smėlio purkštuvas, *Sekonda* chronometras, kurio paklaida – $\pm 0,2$ s, daugiafunkcis matuoklis Testo 400 (temperatūros matavimo ribos – 2–70 °C, paklaida $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos – 1–30 m/s, paklaida – $\pm 0,05$ m/s) sujungiamas su pneumatiniu *NIIOGazo* vamzdeliu (matavimo ribos – 4–21 m/s, vamzdelio koeficiento vidutinė vertė – $k = 0,70 \pm 0,02$), diferencialinis slėgio matuoklis DSM – 1 (matavimo ribos – 0–20 000 kPa; paklaida – ± 5 Pa).

Eksperimento eiga

Eksperimentinis stendas pateiktas 3.2 paveiksle. Įjungiant daugiakanalio ciklono sistemą, ventiliatorius (1) pučia oro srautą į ortakį, kuris konfuzoriumi sujungtas su daugiakanalio ciklono oro srauto įvedimo anga. Oro srauto greičiui matuoti daugiakanalio ciklono įtekėjimo ir ištekėjimo angose naudotas daugiafunkcis Testo 400 (2) matuoklis. Slėgio matuokliu DSM-1 buvo nustatytas aerodinaminis įrenginio pasipriešinimas (3). Guminėmis žarnelėmis buvo sujungti DSM-1 matuoklis ir įėjimo ir išėjimo ortakiuose įmontuoti metaliniai 50 mm ilgio atvamzdžiai su užsukamaisiais dangteliais (LAND 27-98/M-07, Lietuvos... 1998). Siekiant sumažinti mėginių ėmimo paklaidą, atsirandančią dėl ciklono oro srauto išėjimo ortakyje susidarancio sūkurinio srauto, kuris gali nublokšti KD prie išorinių sienelių, ortakyje įmontuotos srautą išlyginančios grotelės (4). Išorinio filtravimo būdu KD ėminys buvo imtas, per bandinių paėmimo vamzdelį siurbiant dulkėtą oro srautą iš ortakio (5), sulaukiant KD filtravimo patrone, esančiame ortakio išorėje. Matavimai buvo atlikti naudojant gravimetrinį metodą. Metodo santykinė paklaida neviršija ± 25 % (LAND 28-98/M-08). Purkštuku $0,5 \text{ g/m}^3$ KD koncentracija įleidžiama į ortakį esančią kiaurymę, kurios skersmuo – 0,10 m, atstumas – 1,0 m nuo ventiliatoriaus pajungimo vietos. Oro srauto dulkėtumas nustatytas pagal filtro masių skirtumą. Tyrimuose naudota ši koncentracija: $0,5 \text{ g/m}^3$, 1 g/m^3 , 2 g/m^3 , 4 g/m^3 . Nustatant oro srauto dulkėtumą ortakyje, svarbiausi veiksniai imant dulkių ėminį yra ėminio ėmimo vietos parinkimas, dujų siurbimo greitis ir prasiurbtas dujų tūris. Ėminys paimtas, esant pastoviam dulkėto oro srauto režimui. Patikimiausi rezultatai gaunami, imant ėminius tiesiojoje ortakio atkarpoje 5–6 D nuo ciklono korpuso ir 3–4 D atstumu už ciklono (D – ortakio skersmuo), kur nėra jokių dujų srauto trikdžių: ventiliatoriaus, sklendės, alkūnės, ortakio susiaurėjimo ar plėtimosi ir pan. Ortakį matuoti parinktoje vietoje buvo pragražtos kiaurymės ir įmontuoti metaliniai 50 mm ilgio atvamzdžiai su užsu-

kamaisiais dangteliais bei padarytos 20–30 mm skersmens angos (LAND 27-98/M-07, Lietuvos... 1998).



3.2 pav. Eksperimentinės įrangos schema
Fig. 3.2. Scheme of the experimental equipment

Užteršto oro ėminių paėmimo vidinio antvamzdžio skersmuo – 4 mm, kuris apskaičiuojamas pagal formulę (LAND 28-98/M-08, Lietuvos...1998).

Išorinio antvamzdžio skersmuo d , mm:

$$d = \frac{24}{\sqrt{w_{or}}}, \quad (3.1.)$$

čia: w_{or} – dulkteto oro srauto greitis ortakyje.

Dulkių ėminys imtas išorinio filtravimo būdu, naudojant filtravimo patroną su filtrais AFA-VP-20-1 (3.3. pav.). KD sulaikomos ant filtro, prasiurbiant pro jį

orą. Prieš svėrimą filtrai 20–30 min. laikyti eksikatoriuje (džioviklis – lydytas kalcio chloridas). Pasverti filtrai pincetu dedami į kalkės (permatomo popieriaus) vokelius, po to dar į polietileningus maišelius. Paėmus vieną ėminį, išjungiamas elektroaspiratorius, o filtras su KD atsargiai išimamas iš patrono ir pakeičiamas nauju. Eksperimento metu buvo paimti 5 KD bandiniai (LAND 28-98/M-08, Lietuvos...1998), o pagal gautus rezultatus apskaičiuotas aritmetinis vidurkis. Prieš paimant KD ėminius, išmatuotas dinaminis slėgis ortakyje bei oro srauto temperatūra. Bandinio ėmimo trukmė nuo 3–5 min. (esant dulkėtumui 1–100 g/m³).



3.3 pav. KD filtravimo patronas

Fig. 3.3. Filtration socket of SP

Dulkėto oro srauto siurbimo greitis, reikalingas KD ėminiui paimti, laikantis izokinetiškumo sąlygų, apskaičiuotas pagal formulę:

$$V_{or} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 10^{-4} w_{or} \times 10 \times 60 = 47100 \times 10^{-2} \times d^2 w_{or}. \quad (3.2)$$

Dujų tūrio siurbimo greitis V_{or} perskaičiuotas normaliosioms sąlygoms (00 C, 760 mm Hg) pagal formulę:

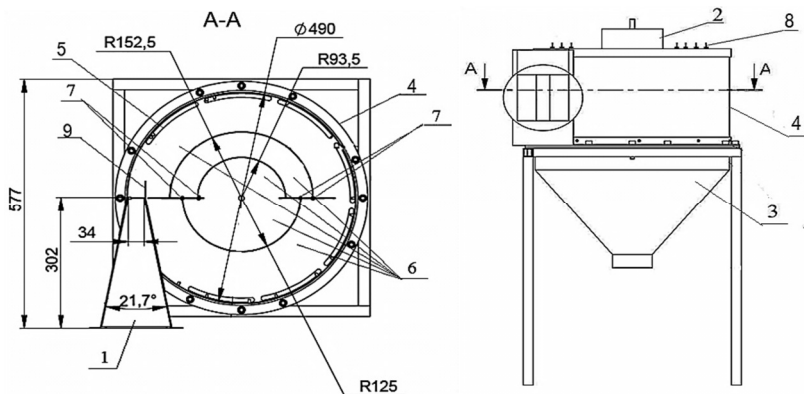
$$V_0 = V_{or} \frac{273(P \pm \Delta P_{or})}{760(273 + T_{or})}. \quad (3.3)$$

čia: V_0 – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliosioms sąlygoms (0 °C, 760 mm Hg); T_{or} – siurbiamojo oro temperatūra, °C; P – atmosferos slėgis;

ΔP_{or} – perteklinis dujų slėgis (arba praretėjimas) ortakyje, mm Hg.

Užterštas KD oro srautas patenka į cilindrinį daugiakanalį cikloną, turintį tris ir keturis skirtingo spindulio pusžiedžius, sudarant keturis ir penkis kreivalinijinius kanalus (3.4–3.5 pav.). Oro srautas tangentine kryptimi įteka pro konfuzorių (1) ir patenka į kamerą (4), kurioje cirkuliuojantis oro srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose (6) ir filtruojasi per pusžiedžių tarpus (7). Kanaluose (6) esančios KD, veikiamos išcentrinės ir svorio jėgos, pasišalina per išsidėsčiusius plyšius seperavimo kameros dugne (5) ir patenka į kūginį bunkerį (3), kuriame pasišalina didžioji KD masė. Likusios smulkesnės dalelės grįžta pro pusžiedžių tarpus (7) į aktyviają pusžiedžių kanalų (6) zoną, filtruojasi toliau ir patenka į

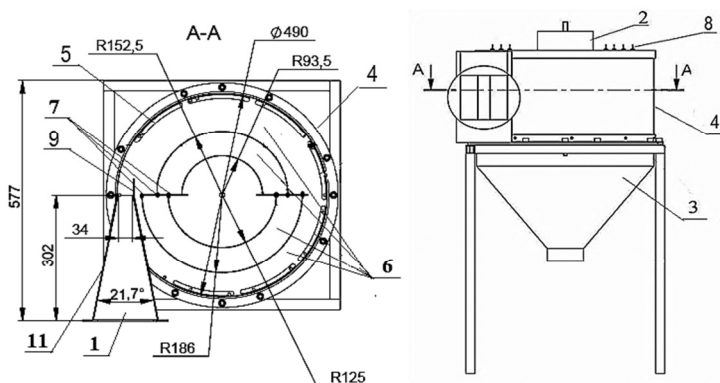
kūginį bunkerį (3). Nuosekliai praėjęs visus kanalus, išvalytasis oro srautas išteka iš sistemos per angą (2).



3.4 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono su reguliuojamais pusžiedžių tarpais principinė schema

Fig. 3.4. Principal scheme of cylindrical four-channel cyclone with adjustable half-ring clearances

Konfuzorius (1), išvalyto oro srauto iškėjimo anga (2), kūginis bunkeris (3), cilindro formos kamera (4) su plyšiais kietosioms dalelėms pasišalinti (5), kreivalinijiniai kanalai su skirtingo spindulio cilindriniais pusžiedžiais (6), tarpai tarp pusžiedžių (7), reguliuojamų pusžiedžių fiksatoriai (8), oro srauto pertvara nuo pusžiedžių pusės (9).



3.5 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono su reguliuojamais pusžiedžių tarpais principinė schema

Fig. 3.5. Principal scheme of the cylindrical five-channel cyclone with adjustable half-ring

Naudojant anksčiau minėtus prietaisus ir metodus, nustatytas cilindrinio penkiakanalio ciklono, turinčio cilindro formos separavimo kamerą, kurioje yra

keturi skirtingo spindulio cilindriniai pusžiedžiai, sudarantys penkis kreivalinijinius kanalus su tarpais (3.5 pav), bendras KD sulaikymo efektyvumas.

Atlikus eksperimentinius cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono tyrimus, gautos cilindrinio daugiakanalio ciklono efektyvumo, oro srauto įtekėjimo greičio, tankio bei pusžiedžių tarpų pločio priklausomybės nuo KD koncentracijos. Naudotos 3 padėtyys cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono pusžiedžių tarpams reguliuoti (2.2. pav.). Ši sistema leido nustatyti optimalų pusžiedžių tarpą efektyviausiai šalinant KD. Bendras KD šalinimo efektyvumas nustatytas skirtingam oro srauto įtekėjimo greičiui ir KD koncentracijai. Kietųjų dalelių koncentracija naudota nuo 0,5 iki 4 g/m³, esant oro srauto įtekėjimo greičiui į cikloną (pirmąjį kanalą) 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s ir 22 m/s. Bendras daugiakanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas apskaičiuotas įvertinus KD koncentraciją prieš ir po šalinimo iš oro srauto.

3.2. Keturkanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimas ir analizė

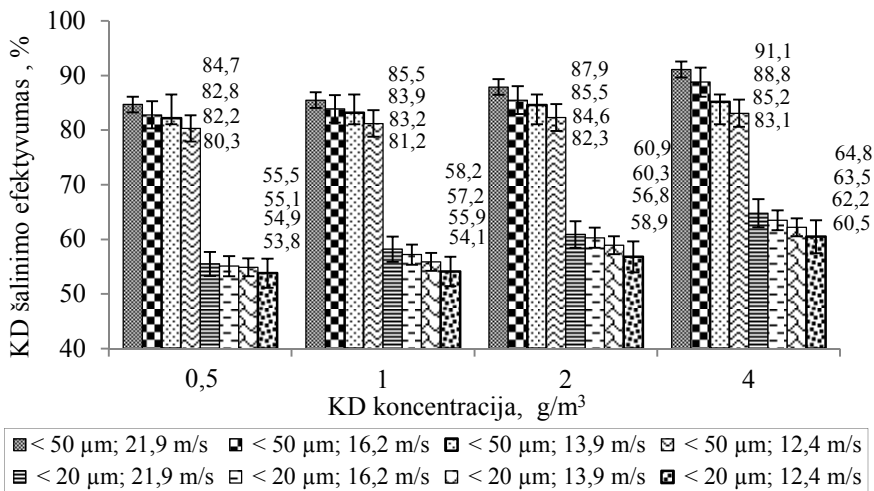
Daugiakanalio ciklono, turinčio cilindro formos separavimo kamerą, bendro efektyvumo tyrimai atlikti esant trims skirtingo spindulio pusžiedžiams sudarant keturis kreivalinijinius kanalus su tarpais (3.4. pav).

Naudotos 3 padėtyys cilindrinio keturkanalio ciklono pusžiedžiams reguliuoti (A_1 , A_2 ir A_3) (2.2 pav). Šiame skyriuje pateikti bendro ciklono efektyvumo tyrimų rezultatai esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai pusžiedžių tarpų plotis 12 ir 13 matavimo taškuose – 11–48 mm (2.3 pav), o oro srautas pasiskirsto 8, 9 matavimo taškuose 0,55 : 0,45 santykiu (tai sudaro 55 % ir 45 %), 12, 13 matavimo taškuose 0,19 : 0,81 santykiu. (2.4 lentelė).

Eksperimentams naudojant skirtingos kilmės daleles ir esant A_1 pusžiedžių padėčiai, oro srautas pasiskirstė 0,53 : 0,47 santykiu 12,13 matavimo taškuose. Eksperimentiniai tyrimų rezultatai gauti 2 % mažesni nei A_3 pusžiedžių padėties. 1,5 % mažesnis efektyvumas gautas nustačius A_2 pusžiedžių padėtį, kai 12,13 matavimo taškuose oro srautas pasiskirsto 0,36 : 0,64 santykiu.

Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant medienos pelenus, kai KD aerodinaminis skersmuo ne didesnis už 20 μ m ar 50 μ m

3.6 paveiksle pateikti tyrimų rezultatai, kai KD dydis buvo nuo 0,52 iki 50 μ m ir nuo 0,52 iki 20 μ m. Nustatyta, kad didžiausias keturkanalio ciklono efektyvumas, šalinant <50 μ m KD, siekė 91,1 %, esant 22 m/s srauto greičiui, 4 g/m³ KD koncentracijai, kai aerodinaminis pasipriešinimas – 366 Pa.



3.6 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo medienos pelenų, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1,0, 2,0, 4,0 g/m³), oro srauto įtekėjimo greičių (12, 14, 16 ir 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens <50 μm ir <20 μm esant A₃ pusžiedžių padėčiai

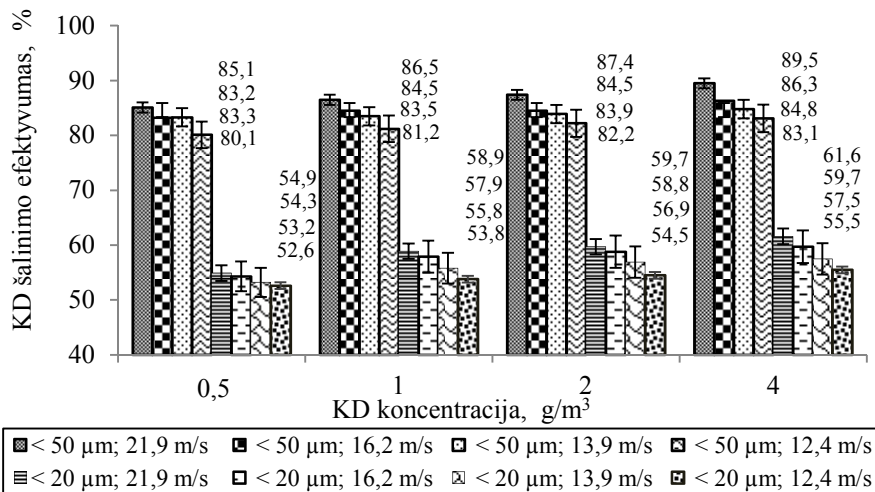
Fig. 3.6. Dependency of the cylindrical four-channel cyclone efficiency on wood ashes, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m³), air flow inlet velocities (12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 22 m/s) and SP in aerodynamic diameter <20 μm and <50 μm under A₃ position of half-rings

Mažiausias KD išvalymo efektyvumas (80,3 %) gautas, esant 12 m/s oro srauto greičiui, 0,5 g/m³ KD koncentracijai, kai 150 Pa. Tyrimų rezultatai rodo, kad esant KD skersmeniui <20 μm bendro efektyvumo reikšmės gautos mažesnės nei naudojant <50 μm skersmens KD. Esant srauto įtekėjimo greičiui 12 m/s, esant 0,5 g/m³ koncentracijai, bendras efektyvumas–53,8–80,3 %, o tai sudaro 26,5 % skirtumą. 22,6 % skirtumas gautas esant 4 g/m³ KD koncentracijai ir srauto greičiui 22 m/s, kai efektyvumas siekia – 64,8–91,1 %. Panašūs bendro efektyvumo skirtumai gauti esant 1 ir 2 g/m³ KD koncentracijoms, kai yra skirtingi srauto įtekėjimo greičio dydžiai.

Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant kvarcinio smėlio miltus, kai KD aerodinaminis skersmuo ne didesnis už 20 μm ar 50 μm

Tyrimams naudojant nuo 0,52 iki 50 μm ir nuo 0,52 iki 20 μm skersmens KD didžiausias efektyvumas (89,5 %) gautas šalinant kietąsias kvarcinio smėlio miltų daleles, esant didžiausiam 22 m/s oro srauto greičiui ir KD 4 g/m³ koncentracijai. Mažiausias efektyvumas (80,1 %) gautas, esant mažiausiai KD koncentracijai ir mažiausiam 12 m/s oro srauto greičiui. Naudojant <20 μm skersmens KD, ben-

dro efektyvumo reikšmės gautos mažesnės negu naudojant $<50 \mu\text{m}$ skersmens KD. Esant mažiausiam srauto greičiui 12 m/s, kai koncentracija – $0,5 \text{ g/m}^3$, bendro efektyvumo reikšmė mažesnė 26,5 %. 27,9 % valymo efektyvumo skirtumas gautas esant didžiausiai 4 g/m^3 KD koncentracijai ir didžiausiam oro srauto greičiui – 22 m/s. Panašus bendro efektyvumo skirtumas pastebimas naudojant tyrimuose 1 ir 2 g/m^3 KD koncentracijas esant skirtingiems oro srauto greičiams (3.7 pav.).



3.7 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo kvarcinio smėlio miltų, $\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos ($0,5, 1, 2, 4 \text{ g/m}^3$), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16 ir 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<50 \mu\text{m}$ ir $<20 \mu\text{m}$ esant A_3 – pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.7. Dependency of the cylindrical four-channel cyclone efficiency on flour of quartz sand, $\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP ($0.5, 1, 2, 4 \text{ g/m}^3$), air flow inlet velocities (12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 22 m/s) and SP in aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A_3 position of half-rings

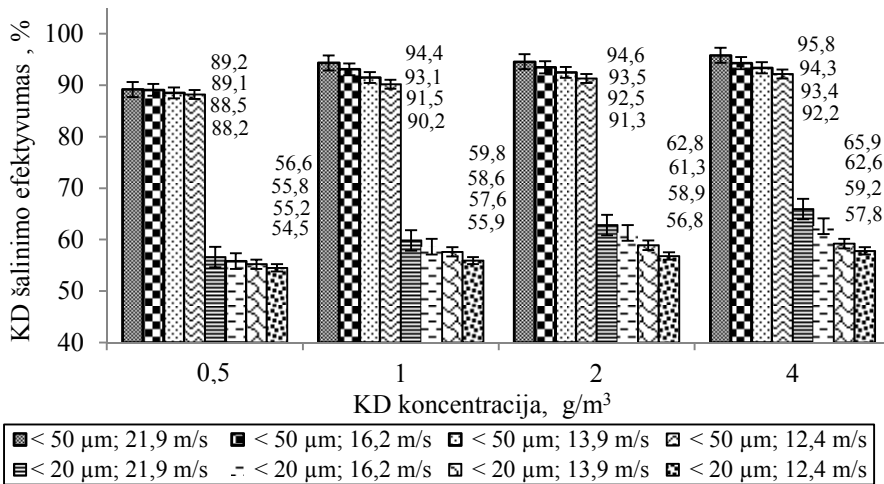
Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant cemento klinkerio KD, kai jų aerodinaminis skersmuo ne didesnis už $20 \mu\text{m}$ ir $50 \mu\text{m}$

KD šalinimo efektyvumas, esant skirtingoms cemento klinkerio KD koncentracijoms ir oro srauto greičiams, pateiktas 3.8 paveiksle. Tyrimuose naudotos nuo $0,52$ iki $50 \mu\text{m}$ ir nuo $0,52$ iki $20 \mu\text{m}$ skersmens KD.

Didžiausias cilindrinio keturkanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas siekė 95,8 %, esant 4 g/m^3 koncentracijai ir 22 m/s oro srauto greičiui (3.8 pav.). Kai cemento klinkerio KD koncentracija – $0,5 \text{ g/m}^3$ esant 12 m/s srauto greičiui, įrenginio efektyvumas siekė 89,2 %. Didėjant kietųjų dalelių koncentracijai nuo

0,5 g/m³ iki 4 g/m³ ir padidėjus oro srauto greičiui iki 22 m/s, keturkanalio ciklo-
no efektyvumas didėja nuo 89,2 % iki 95,8 %.

Naudojant tyrimuose <20 µm KD, bendro efektyvumo reikšmės gautos ma-
žesnės nei naudojant <50 µm kietąsias daleles. Esant oro srauto greičiui
12 m/s, KD koncentracijai 0,5 g/m³ bendras efektyvumas – 54,5–88,2 % (tai
sudaro 33,7 % skirtumą). Esant 4 g/m³ koncentracijai ir oro srauto greičiui
22 m/s, bendras efektyvumas siekia 65,9–95,8 % (tai sudaro 29,9 % skirtumą).



3.8 pav. Cilindrinio keturkanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo cemento klinkerio, $\rho=3160\text{kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4 g/m³), oro srauto itekėjimo greičio (12, 13, 16 ir 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens <20 µm ir <50 µm esant A₃ pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.8. Dependency of the cylindrical four-channel cyclone efficiency on cement clinker dust, $\rho=2890\text{ kg/m}^3$, SP concentration (0.5, 1, 2, 4 g/m³), air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s) and SP of aerodynamic diameter <20 µm and <50 µm under A₃ position of half-rings

Iš 3.6–3.8 paveiksluose pateiktų rezultatų matyti, kad ciklonas efektyviau šalina cemento klinkerio KD, palyginti su medienos pelenais ar kvarcinio smėlio miltais, esant 22 m/s oro srauto greičiui ir 4 g/m³ KD koncentracijai bei A₃ pusžiedžių padėčiai, kai <50 µm skersmens KD pasišalino 4,7 % ir 6,3 % skirtumu, o esant KD <20 µm aerodinaminiam skersmeniui – 1,1 % ir 4,3 %.

Nustatyta, kad ciklonas efektyviau šalina <50 µm skersmens daleles, palyginti su <20 µm skersmens dalelėmis, nepriklausomai nuo jų kilmės.

Analizuodamas tipinį cikloną, tyrėjas Derksenas (2003) nustatė, kad mažesnės dalelės išsisklaido ciklone. Įleidimo dalyje didesnės dalelės išsisklaidomos

vienodai. Vos patekusios į ciklono korpusą, jos iš karto neprilimpa prie sienelės kaip didesnės dalelės, kurios ir patenka į išleidimo vamzdį.

Keturkanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimų rezultatai parodė, kad KD efektyviausiai pasišalino esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai 8, 9 ir 12, 13 matavimo taškuose (2.3 pav. a) periferinis ir tranzitinis srautas pasiskirsto $0,55 : 0,45$ ir $0,19 : 0,81$ santykiu.

Šiuo atveju didžioji tranzitinio srauto dalis (55 %) patenka į aktyvią pirmojo kreivalinijinio kanalo zoną. Mažesnio skersmens dalelės, turinčios mažesnę svorio jėgą, yra veikiamos išcentrinės jėgos, kurios aglomeruojasi su didesnėmis lengvai atsiskiriančiomis dalelėmis ir patenka į kūginį bunkerį, kuriame didžioji kietųjų dalelių dalis pasišalina. Kita likusioji 45 % srauto dalis su smulkesnėmis dalelėmis patenka iš antrojo į trečiąjį kreivalinijinį kanalą (plotis – 59 mm) (12, 13 matavimo taškai), kuriame oro srautas pasiskirsto $0,19 : 0,81$ santykiu.

Keturkanalio ciklono efektyvumas, šalinant iš oro mažesnes nei $50\ \mu\text{m}$ aerodinamino skersmens kietąsias daleles, esant $22\ \text{m/s}$ oro srauto greičiui ir $4\ \text{g/m}^3$ koncentracijai, yra cemento klinkerio KD – 95,8 %, medienos pelenų – 91,1 %, kvarcinio smėlio miltų – 89,5 %, kai periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis – $55 : 45$ (8, 9 matavimo taškai) bei $19 : 81$ (12, 13 matavimo taškai).

Šalinant iš oro mažesnes nei $20\ \mu\text{m}$ aerodinamino skersmens KD, esant $22\ \text{m/s}$ oro srauto greičiui ir $4\ \text{g/m}^3$ koncentracijai, atitinkamai – cemento klinkerio KD – 65,9 %, medienos pelenų – 64,8 %, kvarcinio smėlio miltams – 61,6 %, kai periferinio ir tranzitinio oro srauto dalių kiekio santykis $68 : 32$ (8, 9 matavimo taškai) bei $19 : 81$ (12, 13 matavimo taškai).

Apibendrinant gautus eksperimentinius keturkanalio ciklono duomenis, galima teigti, kad cemento klinkerio KD šalinimo iš oro srauto efektyvumui įtakos turi oro srauto greitis, KD koncentracija ir tankis, esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kurios pusžiedžių tarpų dydis – 11 mm ir 48 mm, kai 8, 9 ir 12, 13 matavimo taškuose periferinis ir tranzitinis srautas pasiskirsto $0,55 : 0,45$ ir $0,19 : 0,81$ santykiu.

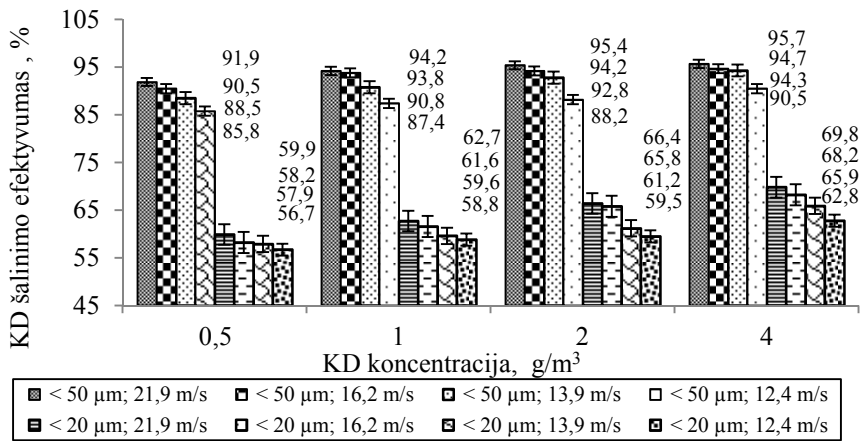
3.3. Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo tyrimas ir analizė

Šio eksperimentinio tyrimo tikslas yra įvertinti cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybę nuo skirtingos KD koncentracijos, t. y. $0,5$, $1,0$, $2,0$, $4,0\ \text{g/m}^3$, skirtingų oro srauto ištekmės greičio dydžių – $12\ \text{m/s}$, $14\ \text{m/s}$, $16\ \text{m/s}$, $22\ \text{m/s}$, KD tankio, cilindrinio pusžiedžių padėties ir oro srauto kiekio pasiskirstymo juose. Šiame skyriuje pateikiami A_1 , A_2 , ir A_3 padėčių tyrimų re-

zultatai. Pusžiedžių tarpų plotis pateiktas 2.3 lentelėje, oro srauto santykių pasiskirstymas – 2.5 lentelėsė.

Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant medienos pelenus, kai aerodinaminis KD skersmuo ne didesnis už 20 μm ir 50 μm

3.9 paveiksle pateikti eksperimentinių medienos pelenų šalinimo pekiakanaliu ciklonu tyrimų rezultatai. Iš pateiktų duomenų matyti, kai KD aerodinaminis skersmuo – $<50 \mu\text{m}$, didžiausias ciklono efektyvumas, esant A_1 pusžiedžių padėčiai, siekė 95,7 % esant didžiausiam 22 m/s oro srauto įtekėjimo greičiui, kai KD koncentracija – 4 g/m^3 . 12 matavimo taške pusžiedžių tarpų plotis – 31 mm, 16, 19 matavimo taškuose – 27 mm, oro srauto kiekis pasiskirsto 0,49 : 51 ir 0,53 : 0,47 santykiu (2.5 lentelė).

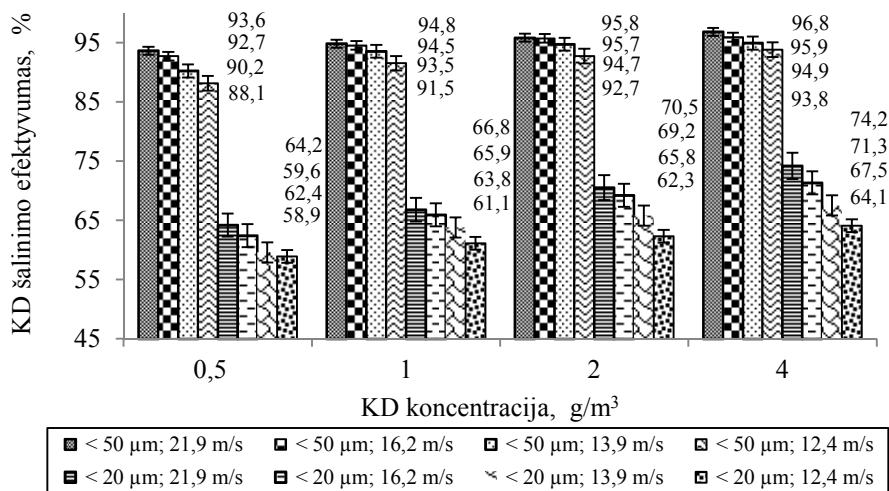


3.9 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo medienos pelenų, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16 ir 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \mu\text{m}$ ir $<50 \mu\text{m}$ esant A_1 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.9. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on wood ashes $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4, g/m^3) air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A_1 positions of half-rings

Mažiausias bendras KD šalinimo efektyvumas gautas, tyrimuose naudojant nuo 0,52 iki 50 μm skersmens KD esant 0,5 g/m^3 koncentracijai, kai oro srauto greitis – 12 m/s, o bendras efektyvumas siekė – 85,5 %. Pateikti tyrimų duomenys rodo, kad KD šalinimo bendras efektyvumas didėja dalelių koncentracijai bei oro srauto įtekėjimo greičiui.

Kai KD aerodinaminis skersmuo – $<20\ \mu\text{m}$, bendras KD šalinimo efektyvumas buvo mažesnis negu $<50\ \mu\text{m}$. Esant mažiausiai KD koncentracijai – $0,5\ \text{g/m}^3$, kai oro srauto greitis – $12\ \text{m/s}$, bendras efektyvumas siekė – $56,7\ \%$. Esant didžiausiai $4\ \text{g/m}^3$ KD koncentracijai ir didžiausiam $22\ \text{m/s}$ oro srauto greičiui, bendras efektyvumas buvo mažesnis negu $<50\ \mu\text{m}$ – $25\ \%$.



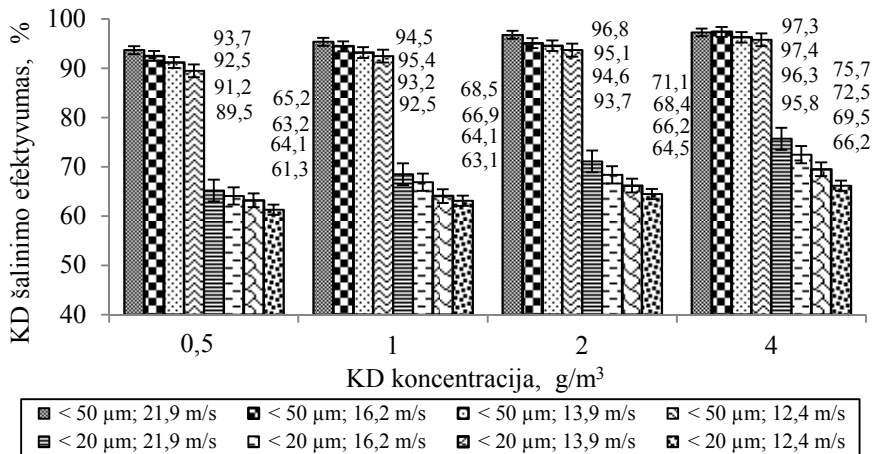
3.10 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo medienos pelenų: $\rho=2451\ \text{kg/m}^3$, KD koncentracijos ($0,5, 1, 2, 4, \text{g/m}^3$), oro srauto įtekėjimo greičio ($12, 14, 16$ ir $22\ \text{m/s}$) ir KD aerodinaminio skersmens $<20\ \mu\text{m}$ ir $<50\ \mu\text{m}$ esant A_2 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.10. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on wood ashes $\rho=2451\ \text{kg/m}^3$, concentration of SP ($0.5, 1, 2, 4, \text{g/m}^3$), air flow inlet velocity ($12, 14, 16$ and $22\ \text{m/s}$), and SP of aerodynamic diameter $<20\ \mu\text{m}$ ir $<50\ \mu\text{m}$ under A_2 position of half-rings

Esant A_2 padėčiai, kai pusžiedžių tarpo plotis – $17\ \text{mm}$ ir $21\ \text{mm}$ dinaminio slėgio $12, 16$, ir 19 matavimo taškuose, oro srauto kiekis pasidalija $0,31 : 0,69$ ir $0,36 : 0,64$ santykiu. Gautas didžiausias bendras ($96,8\ \%$) efektyvumas (3.10 pav.). Mažiausias efektyvumas – $88,1\ \%$ nustatytas esant $12\ \text{m/s}$ oro srauto greičiui, kai medienos KD koncentracija – $0,5\ \text{g/m}^3$.

Kai KD aerodinaminis skersmuo $<20\ \mu\text{m}$, KD išvalymo efektyvumas yra mažesnis. Esant mažiausiai $0,5\ \text{g/m}^3$ koncentracijai, kai oro srauto greitis – $12\ \text{m/s}$, bendras efektyvumas siekė $58,9\ \%$. Didžiausias efektyvumas gautas esant didžiausiai KD koncentracijai $4\ \text{g/m}^3$ ir oro srauto greičiui – $22\ \text{m/s}$. Naudojant A_1 pusžiedžių padėtį gautos didesnės bendro efektyvumo reikšmės negu naudojant A_2 pusžiedžių padėtį, kai KD aerodinaminis skersmuo $<50\ \mu\text{m}$, besiskirian-

čios 1,1 %. Esant KD aerodinaminiam skersmeniui $<20 \mu\text{m}$ KD išvalymo iš oro srauto efektyvumas 4,4 % didesnis negu esant A_2 padėčiai.



3.11 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo medienos pelenų: $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4, g/m³), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \mu\text{m}$ ir $<50 \mu\text{m}$ esant A_3 pusžiedžių padėčiai

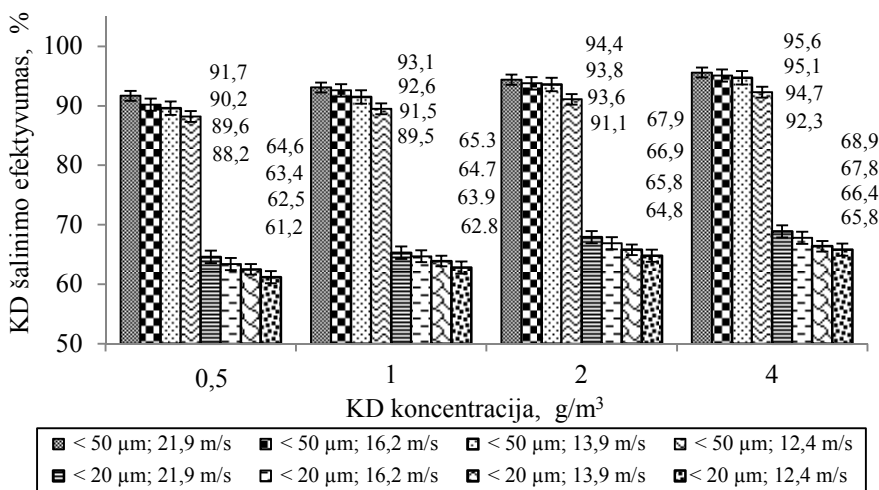
Fig. 3.11. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on wood ashes $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m³), air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A_3 position of half-rings

Bendro efektyvumo tyrimai esant A_3 pusžiedžių padėčiai pateikti 3.11 pav. Tarpų plotis 12, 16 ir 19 matavimo taškuose (2.3 b pav.) buvo 7 ir 11 mm, oro srautas pasiskirsto 0,13 : 0,87 ir 0,19 : 81 santykiu. Gauti eksperimentinių tyrimų duomenys rodo, kad geriausias bendras medienos pelenų KD šalinimo efektyvumas gautas esant A_3 pusžiedžių padėčiai. Kai KD aerodinaminis skersmuo – $<50 \mu\text{m}$ ir $<20 \mu\text{m}$, didėjant KD koncentracijai, oro srauto greičiui bei mažėjant pusžiedžių tarpų pločiui, KD šalinimo iš oro srauto efektyvumas didėja. Lyginant A_3 pusžiedžių padėties eksperimentinių tyrimų duomenis su A_1 A_2 pusžiedžių padėties duomenimis gautos didesnės bendro efektyvumo reikšmės. Esant A_3 pusžiedžių padėčiai – 97,3 % ir 75,7 %, esant A_2 pusžiedžių padėčiai – 96,8 % ir 74,2 %, esant A_1 pusžiedžių padėčiai – 95,7 % ir 69,8 %. Medienos pelenų šalinimo iš oro srauto efektyvumui įtakos turi oro srauto greitis, KD koncentracija, esant A_3 pusžiedžių padėčiai bei oro srauto santykių pasiskirstymas. Esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai KD aerodinaminis skersmuo $<50 \mu\text{m}$ ir $<20 \mu\text{m}$, penkia-

kanalio ciklono efektyvumo reikšmės didesnės lyginant su keturkanaliu ciklonu 4,2 % ir 10,9 %.

Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant kvarcinio smėlio miltus, kai KD aerodinaminis skersmuo ne didesnis už 20 μm ir 50 μm

3.12 paveiksle pateikti kvarcinio smėlio miltų pasiūalinimo ciklone eksperimentinių tyrimų rezultatai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti keičiant cilindrinį pusžiedžių padėtis.



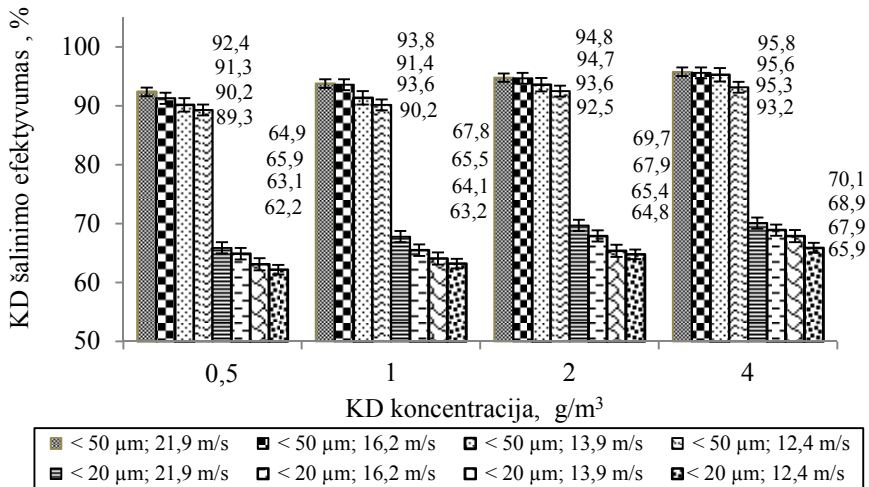
3.12 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo kvarcinio smėlio miltų: $\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4 g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 21 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens <20 μm ir <50 μm esant A_1 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.12. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on flour of quartz sand, $\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocities (12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 22 m/s) and SP in aerodynamic diameter <20 μm and <50 μm under A_1 position of half-rings

Nustatytas didžiausias KD pasiūalinimo efektyvumas – 95,6 %, esant A_1 pusžiedžių padėčiai, mažiausias – 88,2 %. Kai KD aerodinaminis skersmuo <20 μm , bendras KD pasiūalinimo efektyvumas yra mažesnis nei naudojant <50 μm skersmens KD. Tačiau esant didžiausiam oro srauto greičiui 22 m/s ir maksimaliausiai KD koncentracijai, reikšmė yra didesnė – 1,1 %, lyginant su bendrojo efektyvumu, tyrimuose naudojant medienos pelenus.

3.13 ir 3.14 paveiksluose pateikti bendro efektyvumo tyrimų rezultatai, esant A_2 ir A_3 pusžiedžių padėtimis. Iš 3.13 paveikslo matyti, kad esant A_3 pusžiedžių padėčiai gautas didžiausias efektyvumas šalinant kvarcinio smėlio miltus –

95,8 %, kai KD aerodinaminis skersmuo yra nuo 0,52 iki 50 μm siekia 95,8 %, kai KD skersmuo nuo 0,52 iki 20 μm – 70,1 %.



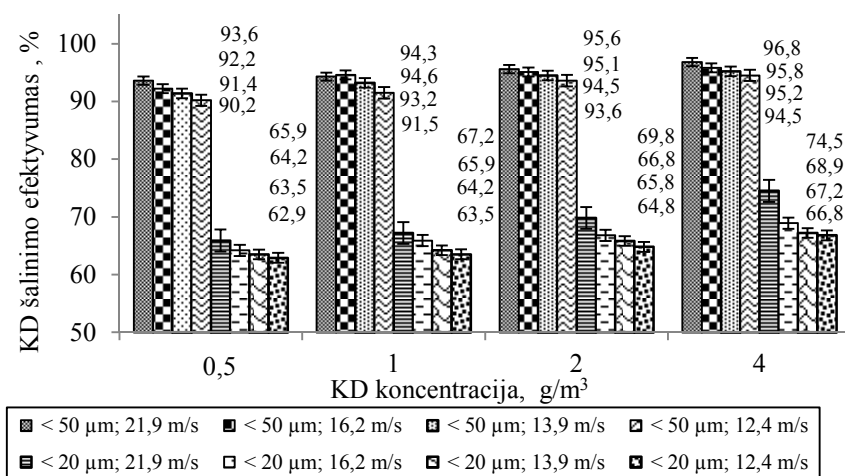
3.13 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo kvarcinio smėlio miltų: $\rho=2427 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \mu\text{m}$ ir $<50 \mu\text{m}$ esant A_2 padėčiai

Fig. 3.13. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on flour of quartz sand, $\rho=2427 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocities (12 m/s, 14 m/s, 16 m/s; 22 m/s) and SP in aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A_2 position of half-rings

3.14 paveiksle matyti, kad esant A_3 pusžiedžių padėčiai gautas didžiausias efektyvumas šalinant kvarcinio smėlio miltus – 96,8 %, kai KD aerodinaminis skersmuo $< 50 \mu\text{m}$. Bendras pasišalinimo efektyvumas siekė – 74,5 %, kai KD aerodinaminis skersmuo $<20 \mu\text{m}$.

Lyginant eksperimentinių tyrimų duomenis, gautus esant A_3 pusžiedžių padėčiai, su tyrimų rezultatais, gautais esant A_1 ir A_2 pusžiedžių padėtimis, kvarcinio smėlio miltų bendro efektyvumo reikšmės gautos didesnės: esant A_3 pusžiedžių padėčiai – 96,8 % ir 74,5%, esant A_2 pusžiedžių padėčiai – 95,8 % ir 70,1 %, o esant A_1 pusžiedžių padėčiai – 95,6 % ir 68,9 %.

Kvarcinio smėlio miltų išvalymo efektyvumui įtakos turi oro srauto greitis, KD koncentracija esant A_3 pusžiedžių padėčiai bei oro srauto kiekio santykių pasiskirstymas. Esant A_3 padėčiai, kai KD aerodinaminis skersmuo $<50 \mu\text{m}$ ir $<20 \mu\text{m}$, penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo reikšmės gautos didesnės, palyginti su keturkanalio ciklono bendrojo efektyvumu, 7,3 % ir 13,0 %.



3.14 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo kvarcinio smėlio miltų, $\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \text{ μm}$ ir $<50 \text{ μm}$, esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.14. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on cement clinker dust, $\rho = 3160 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \text{ μm}$ and $<50 \text{ μm}$ under A_1 position of half-rings

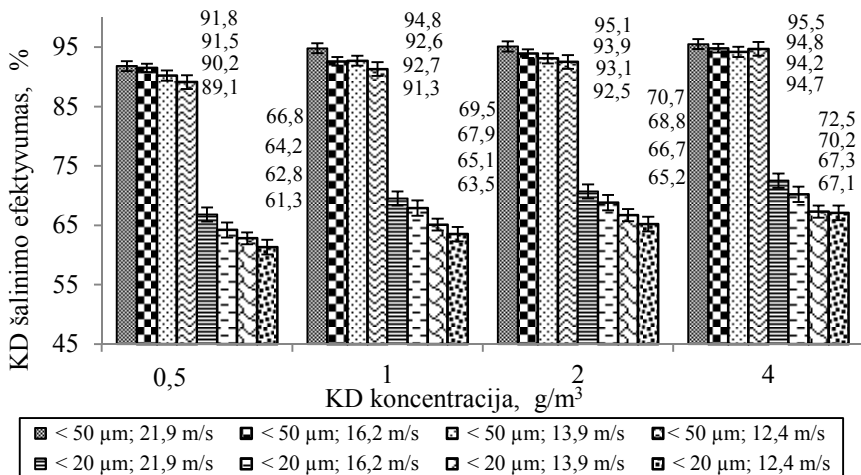
Bendro efektyvumo tyrimų rezultatai naudojant cemento klinkerio KD, kai jų aerodinaminis skersmuo ne didesnis už 20 μm ir 50 μm

Įvertinant eksperimentinių tyrimų rezultatus naudojant cemento klinkerio KD, kai jų skersmuo $<50 \text{ μm}$, nustatyta, kad didžiausias daugiakanalio ciklono bendras efektyvumas siekė 95,5 % esant 4 g/m^3 KD koncentracijai ir 22 m/s oro srauto greičiui.

Mažiausias – 89,1 % – bendras efektyvumas gautas šalinant KD, kai jų koncentracija buvo 0,5 g/m^3 esant 12 m/s oro srauto greičiui (3.15 pav.). Esant 14 m/s ir 16 m/s oro srauto greičio dydžiams, kietųjų dalelių išvalymo iš oro efektyvumas didėjo didėjant KD koncentracijai. Tyrimų duomenys rodo, kad didėjant KD koncentracijai ir oro srauto greičiams bendras efektyvumas didėja nuo 89,1 % iki 95,5 % esant A_1 pusžiedžių padėčiai.

Kai KD aerodinaminis skersmuo $<20 \text{ μm}$, bendras KD šalinimo efektyvumas yra mažesnis, t. y. siekia nuo 66,8 % iki 72,5 %. Šių tyrimų rezultatai patvirtino anksčiau gautus rezultatus, t. y. eksperimentuose naudojant medienos pelenus bendras KD šalinimo iš oro srauto efektyvumas gautas taip pat mažesnis nei at-

liekant tyrimus, kai KD aerodinaminis skersmuo $<50 \mu\text{m}$ esant A1 pusžiedžių padėčiai.

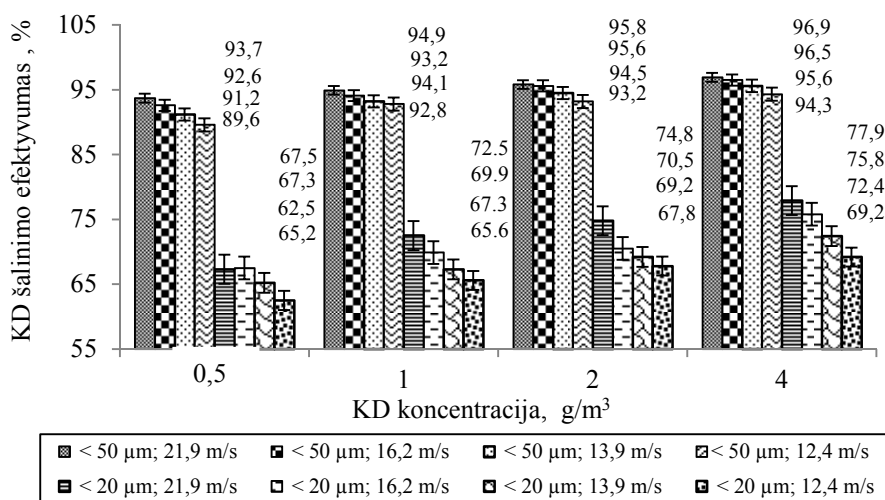


3.15 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo cemento klinkerio: $\rho=3160 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5, 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \mu\text{m}$ ir $<50 \mu\text{m}$ esant A₁ pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.15. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on cement clinker dust, $\rho=3160 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A₁ position of half-rings

3.16 paveiksle pateikti tyrimų rezultatai gauti esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A₂ pusžiedžių padėčiai. Reguluojamų pusžiedžių tarpų plotis 13, 16 ir 19 matavimo taškuose (2.3 b pav.) buvo 17 mm ir 21 mm, oro srautui pasidalijus 0,33 : 0,67 ir 0,36 : 0,64 santykiu. Išmatavus cemento klinkerio KD koncentraciją esant A₂ pusžiedžių padėčiai nustatytas didžiausias KD pasišalinimo efektyvumas – 96,9 %, kai oro srauto greitis – 22 m/s. Mažiausias – 89,6 % – bendras įrenginio efektyvumas gautas, kai pradinė cemento klinkerio KD koncentracija – 0,5 g/m^3 , o oro srauto greitis – 12 m/s.

Kai KD aerodinaminis skersmuo $<20 \mu\text{m}$, bendras KD šalinimo efektyvumas buvo mažesnis nuo 67,5 % iki 77,9 %. Mažėjant srauto greičiui ir KD koncentracijai, KD išvalymo efektyvumas mažėja (3.16 pav.).

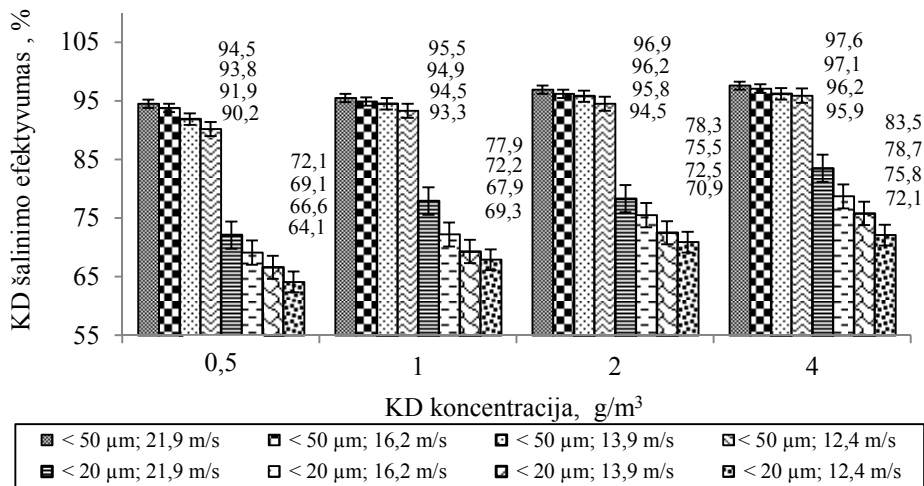


3.16 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo cemento klinkerio: $\rho=3160 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12; 14; 16; 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \mu\text{m}$ ir $<50 \mu\text{m}$ esant A_2 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.16. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on cement clinker dust, $\rho=3160 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \mu\text{m}$ and $<50 \mu\text{m}$ under A_2 position of half-rings

Esant A_3 pusžiedžių padėčiai ciklone pasiektas aukštas (97,6 %) KD šalinimo bendras efektyvumas penkiakanaliame ciklone didėjant oro srauto greičiui ir KD koncentracijai nuo 0,5 g/m^3 iki 4 g/m^3 (3.17 pav.). Tyrimų duomenys rodo, kad pasiekta 0,3 % didesnė bendrojo efektyvumo reikšmė, palyginti su reikšmėmis, gautomis naudojant medienos pelenus, ir 0,8 % didesnis bendras efektyvumas, naudojant kvarcinio smėlio miltus, kai kietųjų dalelių skersmuo $<50 \mu\text{m}$.

Panašius tyrimų rezultatus gavo ir kiti tyrėjai. Siekdamas įvertinti oro srauto greičio bei kietųjų dalelių koncentracijos įtaką tipiniam ciklonui, tyrėjas Zhongli kartu su kitais mokslininkais (2009) atliko bendro ciklono efektyvumo tyrimus. Jie tyrimuose naudojo kalcio karbonato, kurio tankis 2700 kg/m^3 , kietąsias daleles. Tirtųjų kietųjų dalelių aerodinaminis skersmuo buvo nuo 0,6 iki $40 \mu\text{m}$. Kietųjų dalelių koncentracija buvo nuo 5 iki 2000 mg/m^3 esant 10, 15, 20 ir 25 m/s oro srauto greičiams. Tyrėjai nustatė, kad bendras KD šalinimo efektyvumas didėja, didėjant oro srauto greičiui bei kietųjų dalelių koncentracijai.



3.17 pav. Cilindrinio penkiakanalio ciklono efektyvumo priklausomybė nuo cemento klinkerio: $\rho = 3160 \text{ kg/m}^3$, KD koncentracijos (0,5 1, 2, 4, g/m^3), oro srauto įtekėjimo greičio (12, 14, 16, 22 m/s) ir KD aerodinaminio skersmens $<20 \text{ μm}$ ir $<50 \text{ μm}$ esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 3.17. Dependency of the cylindrical five-channel cyclone efficiency on cement clinker dust, $\rho = 3160 \text{ kg/m}^3$, concentration of SP (0.5, 1, 2, 4 g/m^3), air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), and SP of aerodynamic diameter $<20 \text{ μm}$ and $<50 \text{ μm}$ under A_3 position position of half-rings

Kai dalelių aerodinaminis skersmuo $<20 \text{ μm}$, bendras dalelių išvalymo iš oro efektyvumas buvo mažesnis nei šalinant $<50 \text{ μm}$ skersmens daleles. Penkiakanalio ciklono bendras efektyvumas, gautas lyginant su keturkanalio ciklono bendruoju efektyvumu, didesnis 1,8 %, kai dalelių aerodinaminis skersmuo $<20 \text{ μm}$ ir 17,6 %, kai dalelių aerodinaminis skersmuo – $<50 \text{ μm}$.

Cortes and Gilas (2007) apžvelgė kietųjų dalelių koncentracijos poveikio pasišalinimo efektyvumui modelius ir laikėsi nuomonės, kad laikinas mažų dalelių prikibimas prie didesnių arba jų nešimas ciklono viduje gali būti reikšmingas padidėjusio efektyvumo faktorius didėjant kietųjų dalelių koncentracijai.

Didžiausias bendras penkiakanalio ciklono efektyvumas, šalinant iš oro mažesnes nei 50 μm skersmens kietąsias daleles, esant 22 m/s oro srauto greičiui ir 4 g/m^3 koncentracijai, cemento klinkerio KD siekė 97,6 %, medienos pelenų – 97,3 %, kvarcinio smėlio miltų – 96,8 %, o šalinant 20 μm skersmens kietąsias daleles, esant 22 m/s oro srauto greičiui ir 4 g/m^3 koncentracijai, cemento klinkerio KD siekė 83,5 %, medienos pelenų – 75,7 %, kvarcinio smėlio miltų – 74,5 %, o šalinant 10 μm skersmens kietąsias daleles, esant 22 m/s oro srauto greičiui ir 4 g/m^3 koncentracijai, cemento klinkerio KD siekė 78,7 %, medienos pelenų – 75,8 %, kvarcinio smėlio miltų – 72,1 %.

kai periferinio ir tranzitinio oro srauto kiekio santykis – 55 : 45 (4, 5 matavimo taškai), 13 : 87 (12, 13 matavimo taškai) ir 19 : 81 (16, 17 matavimo taškai).

Apibendrinant 3,9–3,17 paveikslus pateiktus ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių tyrimų rezultatus, matyti, kad cilindrinio daugiakanalio ciklono efektyvumas didėja, didėjant KD koncentracijai bei srauto greičiui. Panašius tyrimus atliko ir kiti mokslininkai, tirdami tipinius Stairdmondo ciklonus.

Kietųjų dalelių koncentracijai siekiant iki 50 g/m^3 , esant oro srauto greičiui nuo 15 m/s iki 20 m/s, panašų efektą yra pastebėję Hoffmannas ir kt. (1991), taip pat kietųjų dalelių koncentracijai siekiant iki $24,5 \text{ kg/m}^3$ ir oro srauto greičiui esant nuo 18 m/s iki 27 m/s, Fassani ir kt. (2000).

Zhongli *et al.* (2009), atlikę oro srauto greičio matavimus ir srauto lauko modeliavimą, teigia, kad didėjant kietųjų dalelių koncentracijai ypač smarkiai sumažėja tangentinis dujų greitis ciklono viduje. Todėl galima manyti, kad KD surinkimo ciklone efektyvumas mažėja didėjant kietųjų dalelių koncentracijai dėl mažesnės išcentrinės jėgos ciklone. Tačiau matavimų rezultatai parodė, kad surinkimo efektyvumas stabiliai kyla didėjant kietųjų dalelių koncentracijai, nors esant didelei kietųjų dalelių koncentracijai, išcentrinė jėga mažėja dėl mažesnio tangentinio dujų greičio.

Prognozės apie KD koncentracijos įtaką bendram surinkimo efektyvumui yra negausios (Mothes *et al.* 1988). Ciklono bendras efektyvumas, kai kietųjų dalelių koncentracija siekia nuo $1,0 \text{ g/m}^3$ iki $24,5 \text{ kg/m}^3$, yra ištirtas geriau. Tačiau literatūros šaltiniuose paskelbti eksperimentų ir skaitinio modeliavimo rezultatai, kai kietųjų dalelių koncentracija mažesnė nei $1,0 \text{ g/m}^3$, yra gana negausūs (Zhongli *et al.* 2009).

Daugiakanalio ciklono efektyvumas cemento klinkeriui ($\rho = 3160 \text{ kg/m}^3$) ir medienos pelenams ($\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$) yra didesnis nei kvarcinio smėlio miltams ($\rho = 2427 \text{ kg/m}^3$). Nors kvarcinio smėlio miltų ir medienos pelenų tankiai yra artimi, KD šalinimo efektyvumas gautas mažesnis. Toks ciklono efektyvumas tokio tipo dalelėms gaunamas dėl kvarcinio smėlio miltų ir medienos pelenų didesnio smulkiadispersinių dalelių kiekio bendroje masėje, kai dalelių dydis nuo $0,52 \text{ }\mu\text{m}$ iki $7,98 \text{ }\mu\text{m}$ sudarė 43,4 % ir 34,4 %.

Pagal 3.4 lentelės pateiktus tyrimų rezultatus matyti, kad cilindrinio penkiakanalio ir keturkanalio ciklono, kai kietųjų dalelių skersmuo $<50 \text{ }\mu\text{m}$ ir $<20 \text{ }\mu\text{m}$, KD šalinimo iš oro efektyvumas priklauso nuo cilindrinų pusžiedžių padėties, kai kanalų tarpų skerspjūvio plotis yra 7–11 mm ir 11 mm.

Atlikti tyrimai parodė, kad penkiakanaliame ciklone KD šalinimo efektyvumas didėja kai periferinio ir tranzitinio oro srauto kiekio santykis – 55 : 45 (4, 5 matavimo taškai), 13 : 87 (12, 13 matavimo taškai) ir 19 : 81 (16, 17 matavimo taškai). Keturkanaliame ciklone, kai 8, 9 ir 12, 13 matavimo taškuose periferinis ir tranzitinis srautas pasiskirsto 0,55 : 0,45 ir 0,19 : 0,81 santykiu.

3.4 lentelė. Penkiakanalio ir keturkanalio ciklono KD šalinimo iš oro srauto efektyvumas esant pusžiedžių tarpų skerspjūvio pločiui 7 mm – 11 mm ir 11 mm (A_3 pusžiedžių padėtis)

Table. 3.4. SP purification efficiency of the five-channel and four-channel cyclone under clearances of half-rings of 7 mm – 11 mm and 11 mm (A_3 position of semi-rings)

Kietosios dalelės	Oro srauto greitis m/s	Penkiakanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas, % $< 50 \mu\text{m}$	Keturkanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas, % $< 50 \mu\text{m}$	Efektyvumo skirtumas, % šalinant KD
Medienos pelenai	16 22	97,4 97,3	88,8 91,1	8,6 6,2
Kvarcinio smėlio miltai	16 22	96,8 95,8	86,3 89,5	10,5 6,3
Cemento klinkeris	16 22	97,6 97,1	94,3 95,8	3,3 1,3
Kietosios dalelės	Oro srauto greitis m/s	Penkiakanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas, % $< 20 \mu\text{m}$	Keturkanalio ciklono KD šalinimo efektyvumas, % $< 20 \mu\text{m}$	Efektyvumo skirtumas, % šalinant KD
Medienos pelenai	16 22	72,7 75,7	63,5 64,8	9,2 10,9
Kvarcinio smėlio miltai	16 22	74,5 68,9	59,7 61,6	14,8 7,3
Cemento klinkeris	16 22	83,5 78,7	62,6 65,9	20,9 12,8

3.5 lentelėje pateiktas cilindrinio (keturkanalio, penkiakanalio) ir spiralinio (išcentrinis filtras) keturkanalio, penkiakanalio ir šešiakanalio tyrimo rezultatų palyginimas. Iš pateiktų duomenų matyti, jog cilindrinio daugiakanalio ciklono, esant A_3 pusžiedžių padėčiai, KD šalinimo efektyvumas didesnis nei išcentrinio filtro.

Keturkanalių, cilindrinio ciklono (A_3 pusžiedžių padėtis) KD išvalymo iš oro srauto efektyvumas didesnis už spiralinio išcentrinio filtro efektyvumą:

- šalinant cemento klinkerio dulkes – 6,8 %;
- šalinant medienos pelenus – 3,1 %;
- šalinant kvarcinio smėlio miltus – 0,5 %.

Penkiakanalių, cilindrinio ciklono (A_3 pusžiedžių padėtis) KD išvalymo iš oro srauto efektyvumas didesnis už spiralinio išcentrinio filtro efektyvumą:

- šalinant cemento klinkerio dulkes – 3,4 %;
- šalinant medienos pelenus – 3,3 %;
- šalinant kvarcinio smėlio miltus – 2,6 %.

Cilindrinio penkiakanalio ciklono (A_3 pusžiedžių padėtis) KD išvalymo iš oro srauto efektyvumas didesnis už spiralinio išcentrinio filtro efektyvumą:

- šalinant cemento klinkerio miltus – 0,6 %;
- šalinant medienos pelenus – 0,3 %;
- šalinant kvarcinio smėlio miltus cilindrinio penkiakanalio ciklonu šešiakanalis išcentrinis filtras efektyvesnis – 0,2 %.

3.5 lentelė. Cilindrinio daugiakanalio ciklono ir spiralinio išcentrinio filtro efektyvumo priklausomybė nuo kanalų skaičiaus separavimo kameroje

Table. 3.5. Dependency of the cylindrical multi-channel cyclone and the helical centrifugal filter efficiency on the number of channels in the separation chamber

Parametrai	Cilindrinis daugiakanalis ciklonas. A_3 pusžiedžių padėtis		Daugiakanalis ciklonas (spiralinis išcentrinis filtras)		
	n = 4	n = 5	n = 4	n = 5	n = 6
KD šalinimo efektyvumas, %			89	94,2	97,0
Šalinant cemento klinkerio KD	95,8	97,6			
Šalinant medienos pelenus	91,1	97,3			
Šalinant kvarcinio smėlio miltus	89,5	96,8			

Cemento klinkerio ($\rho = 3160 \text{ kg/m}^3$) ir medienos pelenų ($\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$) kietosioms dalelėms šalinti rekomenduojamas cilindrinis penkiakanalis ciklonas esant A_3 pusžiedžių padėčiai ir esant pusžiedžių tarpo skerspjūvio pločiui – 7 mm ir 11 mm, kai periferinio ir tranzitinio srauto kiekis siekė – 45 % ir 55 %, (4, 5 matavimo taškai), 13% ir 87 % (12, 13 matavimo taškai), o 16, 17 matavimo taškuose 19 % ir 81 %.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Didžiausias cilindrinio keturkanalio ciklono bendras efektyvumas šalinant iš oro mažesnes nei $50\text{ }\mu\text{m}$ aerodinaminio skersmens kietąsias daleles, esant 22 m/s oro srauto greičiui ir 4 g/m^3 koncentracijai, siekė nuo $92,2\%$ iki $95,8\%$, o $20\text{ }\mu\text{m}$ kietųjų dalelių efektyvumas yra nuo $62,6\%$ iki $65,9\%$, kai KD tankis buvo 2427 kg/m^3 ir 3160 kg/m^3 , periferinio srauto dalis siekė iki 55% , o tranzitinio – 45% .

2. Nustatyta, kad naudojant penkiakanalį cikloną gautos vidutiniškai $1,8\%$ didesnės KD išvalymo bendrojo efektyvumo reikšmės, palyginti su keturkanaliu ciklonu, šalinant iš oro mažesnes nei $50\text{ }\mu\text{m}$ aerodinaminio skersmens daleles, o šalinant iš oro mažesnes nei $20\text{ }\mu\text{m}$ – $17,6\%$. Oro srautui pasidalijus į periferinį ir tranzitinį kiekį, didėja KD šalinimo efektyvumas, nes penkiakanaliame ciklone kietosios dalelės, esančios užteršto oro sraute, susiduria su didesniu aerodinaminių kliūčių skaičiumi.

3. Tyrimais nustatyta, kad penkiakanalis ciklonas efektyviau šalina KD nei šešiakanalis išcentrinis filtras, t.y. klinkerio kietąsias daleles – $3,4\%$, medienos pelenų – $3,3\%$, kvarcinio smėlio miltų – $2,6\%$.

Skirtingos dispersijos kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto daugiakanaliame ciklone tyrimas ir analizė

Ciklonas yra vienas iš plačiausiai naudojamų įrenginių KD atskirti nuo oro ar apdorojamų dujų. Tačiau daugelio ciklonų trūkumas yra žemas mažesnių nei $5\ \mu\text{m}$ dalelių surinkimo efektyvumas, o ypač tai akivaizdu, kai reikia laikytis griežtų reikalavimų dėl sveikatai žalingų dalelių išmetimo į orą (Youngmin *et al* 2000; Coker 1993).

Skyriuje pateikti cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklonų smulkia-dispersinių KD šalinimo rezultatai, esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai pusžiedžių tarpų skerspjūvio plotį sudaro keturkanalio 11 mm bei penkiakanalio 7 mm ir 11 mm. Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant skirtingos kilmės KD: medienos pelenus (tankis $2451\ \text{kg/m}^3$), cemento klinkerio dulkes (tankis $3160\ \text{kg/m}^3$) ir kvarcinio smėlio miltus (tankis $2427\ \text{kg/m}^3$). Aerodinamis kietųjų dalelių skersmuo – nuo $1\ \mu\text{m}$ iki $10\ \mu\text{m}$.

Darbo tikslas – nustatyti cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono smulkiadispersinių dalelių pasišalinimo efektyvumą. Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorės straipsnis (Jakštonienė *et al* 2011a).

4.1. Keturkanalio ir penkiakanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo nustatymo metodika

Tyrimai atlikti VGTU Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje, naudojant oro valymo įrenginį – cilindrinį daugiakanalį cikloną. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotos tokios pačios KD, kaip ir bendrojo efektyvumo tyrimuose (2 skyrius). Remiantis atliktais bendro efektyvumo tyrimų rezultatais, pateiktais III skyriuje, smulkiadispersinėms dalelėms tirti tikslinga taikyti A_3 ciklono padėtį.

Atlikus smulkiadispersinių KD tyrimus esant A_1 pusžiedžių padėčiai, kai oro srautas pasiskirsto 0,53 : 0,47 santykiu, tyrimų rezultatai gauti 4 % mažesni nei naudojant A_3 pusžiedžių padėtį. Smulkiadispersinių KD šalinimas iš oro srauto gautas 3 % mažesnis, nustačius A_2 pusžiedžių padėtį, kai oro srautas pasiskirsto 0,36 : 0,64 santykiu. Tolesni eksperimentiniai smulkiadispersinių KD šalinimo iš oro tyrimai atlikti tik esant A_3 pusžiedžių padėčiai, kai keturkanalio ciklono tarpų plotis – 11 mm, penkiakanalio ciklono – 7–11 mm (2.3 pav.) o periferinio oro srauto dalis – 19 %, tranzitinio oro srauto dalis – 81 %.

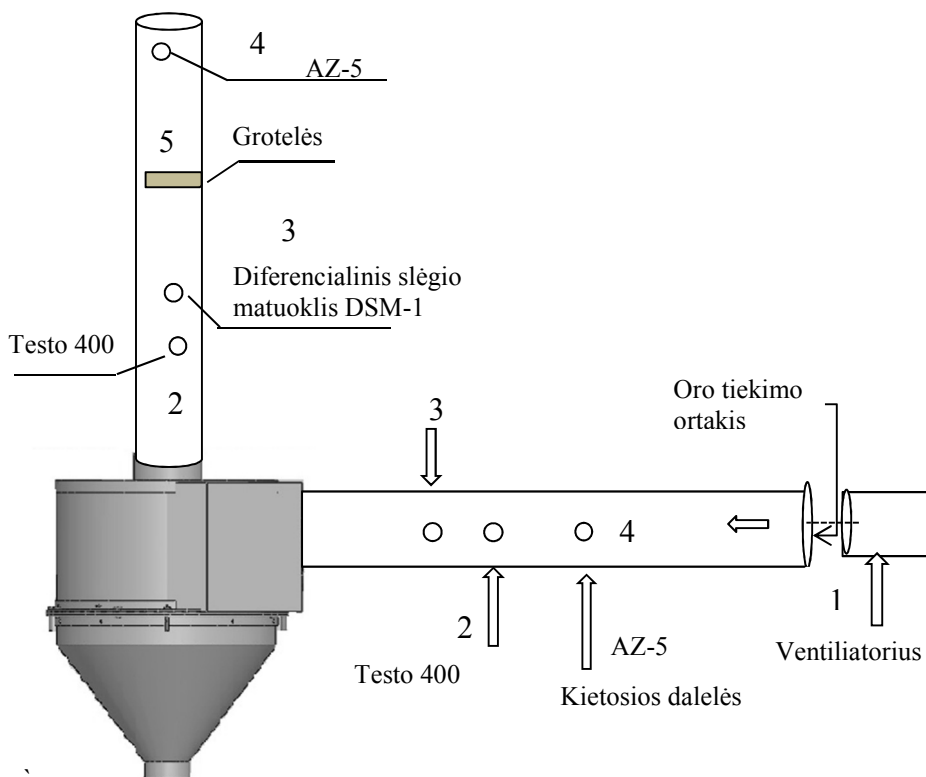
Tyrimams naudojamos matavimo priemonės ir įranga

Eksperimentiniam tyrimui naudotas oro kompresorius „Cosmos“, kurio darbinis slėgis – 10 barų, ventiliatorius (RS, modelis NL100), smėlio purkštuvus *Sekonda*, chronometras (paklaida $\pm 0,2$ s), daugiafunkcis matuoklis Testo 400 (temperatūros matavimo ribos – 2–70 °C, paklaida – $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos – 1–30 m/s, paklaida – $\pm 0,05$ m/s) sujungiamas su pneumatiniu NIIOG azo vamzdeliu (matavimo ribos 4–21 m/s); vamzdelio koeficiento vidutinė vertė $k = 0,70 \pm 0,02$, diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa, paklaida – ± 5 Pa), elektroaspiratorius, kietųjų dalelių skaitiklis AZ-5 (dalelių registravimo ribos nuo 0,4–10 μm , aplinkos temperatūra nuo 10–35 °C, atmosferos slėgis 750 $\pm$ 30 mm, proceso aplinkos drėgmė – 80 %; kietųjų dalelių koncentracijos matavimo diapazonas nuo $1 \cdot 10^{-3}$ iki 300 m^{-3} , dalelių srautas – 1,2 L/min.; paklaida – ± 20 %).

Eksperimento eiga

Eksperimentinis stendas pateikiamas 4.1 paveiksle. Į cikloną vamzdziumi buvo tiekiamas oro srautas, o per KD angą buvo purškiamos bandomosios kietosios dalelės, išsklaidžius jas suspaustu oru esant 8 barų slėgiui. Orą į daugiakanalio ciklono sistemą pučia kanalinis ventiliatorius (1). Oro srauto greičiui matuoti daugiakanalio ciklono įtekėjimo ir ištekėjimo angose buvo naudojamas daugiafunkcis Testo 400 matuoklis (2). Srauto greitis matavimo taške apskaičiuojamas pagal (3.1) ir (3.2) formules (LAND 28-98/M-08). Slėgio matuokliu DSM-1 nustatomas aerodinaminis įrenginio pasipriešinimas (3). Kietųjų dalelių skaitik-

lis AZ-5 (4) buvo naudojamas atliekant dalelių dydžio pasiskirstymo (nuo $1\ \mu\text{m}$ iki $10\ \mu\text{m}$) matavimus, remiantis dalelių skaičiumi/l. Skaitiklis veikia matuojant atskiros KD šviesos sklaidą. Kadangi egzistuoja ryšys tarp KD matmenų ir jos išsklaidytos šviesos, taip pat galimas dalelių pasiskirstymo pagal dydžius matavimas. Dalelių skaitiklį sudaro optinis detektorius, oro įsiurbimo ir srauto kontrolės mazgai bei elektroniniai mazgai (Valuntaitė 2009). Siekiant sumažinti mėginių ėmimo paklaidą, atsirandančią dėl ciklono oro srauto išteklėjimo vamzdyje susidarančio sūkurinio srauto, kuris gali nublokšti daleles pirmiausia prie išorinių sienelių, vamzdyje įmontuotos srautą tiesinančios grotelės (5).



4.1 pav. Eksperimentinės įrangos schema
Fig 4.1. Scheme of the experimental equipment

Tyrimuose naudotos sausos kietosios dalelės. Kietosios dalelės buvo išdžiovintos $80\ ^\circ\text{C}$ temperatūroje, o po to parą laikytos $24\text{--}26\ ^\circ\text{C}$ temperatūroje.

Eksperimento metu aplinkos temperatūra kito nuo 20,4 °C iki 22,5 °C, o santykinė drėgmė siekė 58 %.

Eksperimentinių tyrimų metu oras įtekėjimo anga patenka į cikloną. Matuokliu Testo 400 įeinančiame ir išeinančiame ortakyje išmatuojamas oro srauto greitis. Purkštuku įleidžiama tam tikra KD koncentracija į ortakyje esančią kiaurymę, kurios skersmuo – 0,10 m, atstumas nuo ventiliatoriaus pajungimo vietos – 1,0 m.

Tyrimuose naudotos šios KD koncentracijos: 0,5 g/m³, 1,0 g/m³, 2,0 g/m³ ir 4,0 g/m³. Patikimiausi kietųjų dalelių koncentracijos nustatymo rezultatai gautami, imant ėminį tiesiojoje ortakio atkarpoje 3–4 D atstumu už ciklono (D – ortakio skersmuo), kur nėra jokių dujų srauto trikdžių: ventiliatoriaus, sklendės, alkūnės, ortakio susiaurėjimo ar plėtimosi ir pan. Ortakyje matuoti parinktoje vietoje pragręžtos kiaurymės ir įmontuoti metaliniai 50 mm ilgio atvamzdžiai su užsukamais dangteliais bei padarytos 20–30 mm skersmens angos (LAND 27-98/M-07, Lietuvos... 1998).

Naudojant anksčiau minėtus prietaisus ir metodus, nustatytas smulkiadispersijų dalelių išvalymo daugiakanaliame ciklone efektyvumas, esant skirtingam oro srauto greičiui ir kietųjų dalelių koncentracijai. Tyrimuose naudota 0,5–4,0 g/m³ KD koncentracija, esant oro srauto greičiui ortakyje: 4, 4,5, 5 ir 7 m/s bei oro srauto greičiui pirmajame kanale – 12, 14, 16 ir 22 m/s. Oro srauto greitis pirmajame kanale apskaičiuotas pagal 2.4 formulę.

Kietųjų dalelių koncentracija iki tam tikro aerodinaminio skersmens buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$C = a \times b / 100, \text{ g/m}^3, \quad (4.1)$$

čia: a – bendra vidutinė kietųjų dalelių koncentracija (išmatuota svoriniu metodu), g/m³; b – dalis kietųjų dalelių iki tam tikro aerodinaminio skersmens, %.

Dalis kietųjų dalelių iki tam tikro aerodinaminio skersmens apskaičiuota pagal formulę:

$$B = d / e, \quad (4.2)$$

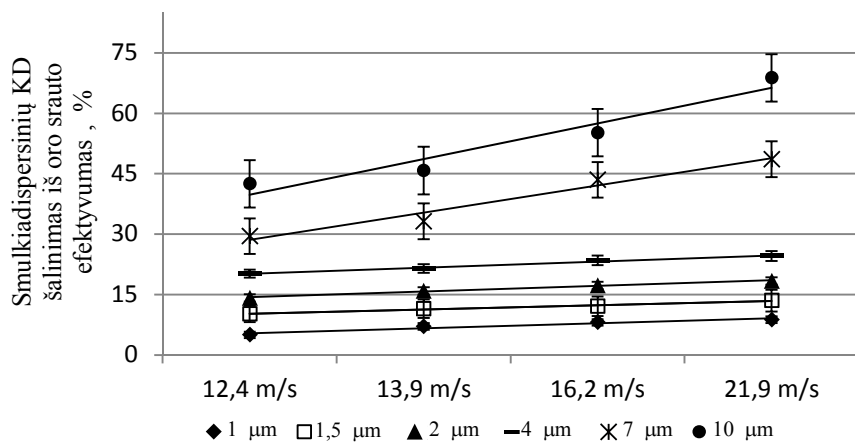
čia: d – skaičius kietųjų dalelių iki tam tikro aerodinaminio skersmens išmatuotas su AZ – 5 litre; e – suminis skaičius kietųjų dalelių iki 10 µm išmatuotas su AZ-5 litre.

4.2. Keturkanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo tyrimų rezultatai ir analizė

Medienos pelenų KD šalinimo iš oro srauto pagal aerodinaminį skersmenį tyrimų rezultatai ir analizė

Atlikus ekperimentinius tyrimus gautos keturkanalio ciklono KD pasišalinimo efektyvumo priklausomybės nuo skirtingos kilmės KD, tankio, koncentracijos ir įtekančio oro srauto greičio.

Skirtingos kilmės smulkiadispersių KD išvalymo iš oro srauto efektyvumui įvertinti tyrimuose naudotos 1–10 μm skersmens KD. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotos skirtingo tankio KD koncentracijos – 0,5 g/m³ ir 4,0 g/m³, esant skirtingam oro srauto greičiui – 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s ir 22 m/s. Skirtingos dispersijos KD dalelių šalinimo ciklone tyrimų rezultatai pateikti 4.2 paveiksle.



$$R^2 = 0.9364 \quad R^2 = 0.9796 \quad R^2 = 0.9909 \quad R^2 = 0.9882 \quad R^2 = 0.9684 \quad R^2 = 0.9359$$

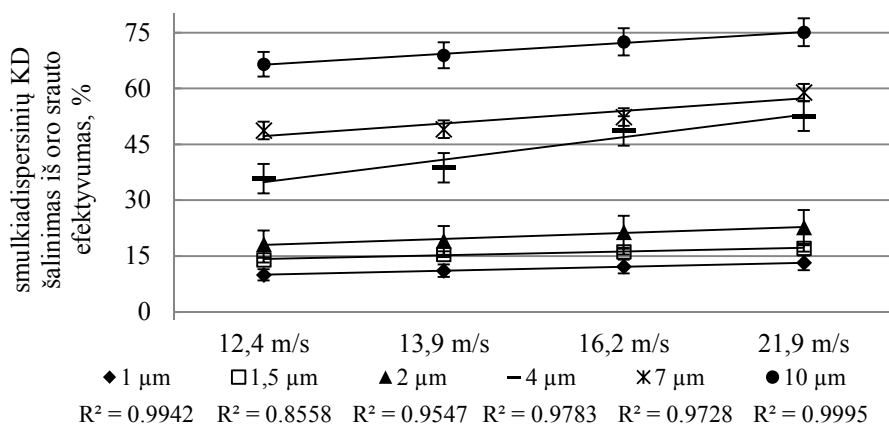
4.2 pav. Skirtingos dispersijos medienos pelenų šalinimas iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam keturkanaliame ciklone esant 0,5 g/m³ koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – 2451 kg/m³ esant A₃ pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.2. Efficiency dependencies of purification of different size wood ashes from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under different concentration of 0.5 g/m³, and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 2451 kg/m³ under A₃ position of half-rings

Gautų tyrimų duomenys rodo, kad $1\ \mu\text{m}$ ir $1,5\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių išvalymo iš oro srauto efektyvumas – 5,1 % ir 10,2 % gautas esant mažiausiam oro srauto greičiui – 12 m/s. $2\ \mu\text{m}$ ir $4\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių šalinimas svyruoja nuo 14,2 % iki 20,2 %. $7\ \mu\text{m}$ ir $10\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas atitinkamai – 29,5 % ir 42,5 %.

Keturkanaliame ciklone šalinant $4\ \mu\text{m}$ ir didesnio skersmens KD, šalinimo efektyvumas didėja, augant kietųjų dalelių aerodinaminiam skersmeniui tirtųjų oro srauto greičių dydžių intervale.

Medienos pelenų dalelių koncentracijai padidėjus nuo $0,5$ iki $4,0\ \text{g/m}^3$ KD šalinimo efektyvumas gautas didesnis (4.3 pav.). $1\ \mu\text{m}$ skersmens kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumas, esant mažiausiam oro srauto greičiui – 12 m/s – 10,0 %. Šio dydžio KD, esant $0,5\ \text{g/m}^3$ koncentracijai, šalinimo efektyvumas – tik 5 %. $1,5\ \mu\text{m}$ KD šalinimo efektyvumas šiek tiek didesnis nei $1\ \mu\text{m}$ dalelių ir siekia nuo 14,0 % iki 17,1 %. $2\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių, esant didesniais oro srauto greičiui, šalinimo efektyvumas – 22,8 %, t. y. 9,2 karto didesnis nei $1\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių.



4.3 pav. Skirtingos dispersijos medienos pelenų šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriname keturkanaliame ciklone esant $4\ \text{g/m}^3$ koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – $2451\ \text{kg/m}^3$ esant A_3 pusžiedžių padėčiai

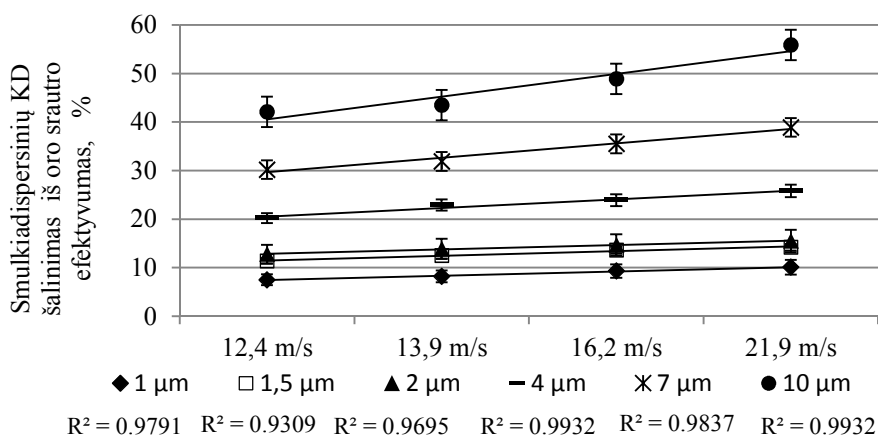
Fig. 4.3. Efficiency dependencies of purification of different size wood ashes from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under different concentration of $4\ \text{g/m}^3$, and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – $2451\ \text{kg/m}^3$ under A_3 position of half-rings

Žymiai didesnis išvalymo efektyvumas gautas pašalinant $4\ \mu\text{m}$ KD – nuo 35,8 % iki 52,6 %. Efektyviausiai pašalintos $10\ \mu\text{m}$ kietosios dalelės, valymo

efektyvumui, esant skirtingam oro srauto greičiui, siekiant nuo 66,5 % iki 75,1 %. Mažą smulkiadispersių kietųjų dalelių nuo 1 μm iki 4 μm išvalymo efektyvumą galėjo lemti mažas dalelių kiekis bendroje masėje (3.1 lentelė).

Kvarcinio smėlio miltų šalinimo iš oro srauto pagal aerodinaminį skersmenį tyrimų rezultatai ir analizė

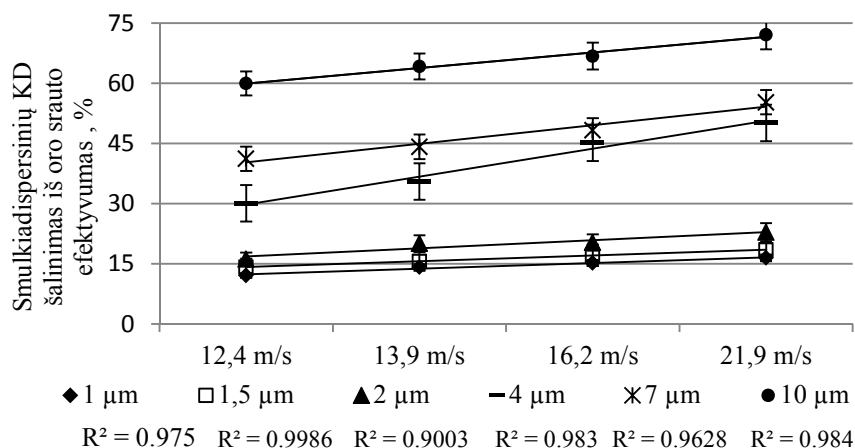
Naudojant tyrimuose 0,5 g/m³ kvarcinio smėlio KD koncentraciją, esant mažiausiam oro srauto greičiui – 12 m/s, didžiausias 1 μm kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumas – 7,5 %. Didėjant kietųjų dalelių koncentracijai ir oro srauto greičiui 1 μm dalelių šalinimo efektyvumas didėja iki 10,1 %. 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas – 55,9 %, esant 22 m/s, o oro srauto greičiui sumažėjus iki 12 m/s – 42,1 %. Smulkiadispersinių kvarcinio smėlio miltų dalelių keturkanaliame ciklone pašalinimo efektyvumas buvo mažesnis, palyginti su medienos pelenais. Mažą šių kietųjų dalelių išvalymo efektyvumą galėjo lemti mažesnis kvarcinio smėlio dalelių tankis (2427 kg/m³), maža KD koncentracija bei mažas smulkiadispersinių dalelių (nuo 1 μm iki 4 μm) kiekis bendroje masėje (3.2 lentelė). Atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad ciklone esant oro srauto greičiui nuo 12 m/s iki 22 m/s geriau pašalinamos 7–10 μm nei mažesnės 1–4 μm kietosios dalelės.



4.4 pav. Skirtingos dispersijos kvarcinio smėlio miltų KD šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam keturkanaliame ciklone esant 0,5 g/m³ koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – 2427 kg/m³ esant A₃ pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.4. Efficiency dependencies of purification of different size quartz sand flour SP from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under concentration of 0.5 g/m³ and air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), density – 2427 kg/m³ under A₃ position of half-rings

4.5 paveiksle pateikiami kvarcinio smėlio miltų KD pasišalinimo pagal jų dispersiją rezultatai, esant 4 g/m^3 KD koncentracijai. Tyrimų duomenys rodo, kad $10 \text{ }\mu\text{m}$ kietųjų dalelių pasišalinimo efektyvumas siekia 72,1 %, esant didžiausiam – 22 m/s oro srauto greičiui. Tyrimuose naudojant $0,5 \text{ g/m}^3$ KD koncentraciją, esant tam pačiam oro srauto greičiui, gautas $10 \text{ }\mu\text{m}$ 55,9 % pasišalinimo efektyvumas, kuris 16,2 % yra mažesnis negu naudojant medienos pelenus, o $7 \text{ }\mu\text{m}$ – 16,4 %, $4 \text{ }\mu\text{m}$ – 24,3 %, $1 \text{ }\mu\text{m}$ – 6,4 %, $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ – 4,3%, $2 \text{ }\mu\text{m}$ – 7,4 %. Manoma, kad mažą kietųjų dalelių išvalymo efektyvumą galėjo lemti mažas smulkiadispersių dalelių (nuo $1 \text{ }\mu\text{m}$ iki $4 \text{ }\mu\text{m}$) kiekis bendroje masėje (3.2 lentelė).



4.5 pav. Skirtingos dispersijos kvarcinio smėlio miltų šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam keturkanaliame ciklone esant 4 g/m^3 koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – 2427 kg/m^3 esant A_3 pusžiedžių padėčiai

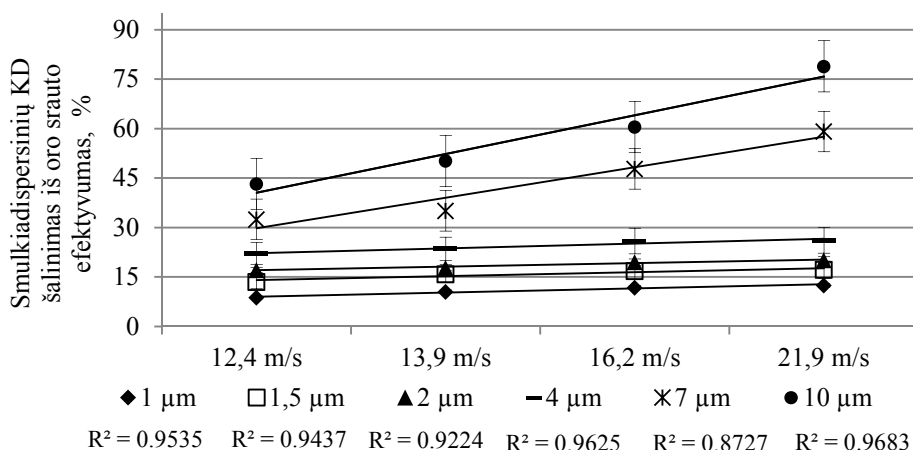
Fig. 4.5. Efficiency dependencies of purification of different size quartz sand flour SP from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under concentration of 4 g/m^3 and air flow inlet velocity (12, 14, 16, 22 m/s), density – 2427 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

Cemento klinkerio KD šalinimas iš oro, pagal aerodinaminį skersmenį, tyrimų rezultatai ir analizė

Kaip matyti iš 4.6 paveikslo, esant $0,5 \text{ g/m}^3$ $1 \text{ }\mu\text{m}$ ir $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ kietųjų dalelių koncentracijai, pasišalinimo efektyvumas – 8,8 % ir 13,5 %, kai mažiausias oro srauto greitis – 12 m/s. $2 \text{ }\mu\text{m}$ ir $4 \text{ }\mu\text{m}$ kietųjų dalelių pasišalinimo ciklone efektyvumas siekia nuo 17,1 % iki 22,1 %. Didesnį – $7 \text{ }\mu\text{m}$ ir $10 \text{ }\mu\text{m}$ kietųjų dalelių išvalymo

efektyvumas siekia – 32,5 % ir 43,2 %. Šalinant iš oro 1–10 μm kietąsias daleles, išvalymo efektyvumas auga, didėjant oro srauto greičiui.

Smulkiadisversės 1–4 μm cemento klinkerio kietosios dalelės pašalinamos iš oro srauto 3 % efektyviau nei medienos pelenų ir kvarcinio smėlio dalelės. Keturkanalis ciklonas cemento klinkerio 10 μm KD šalina daugiau nei 75 % esant 0,5 g/m^3 koncentracijai.

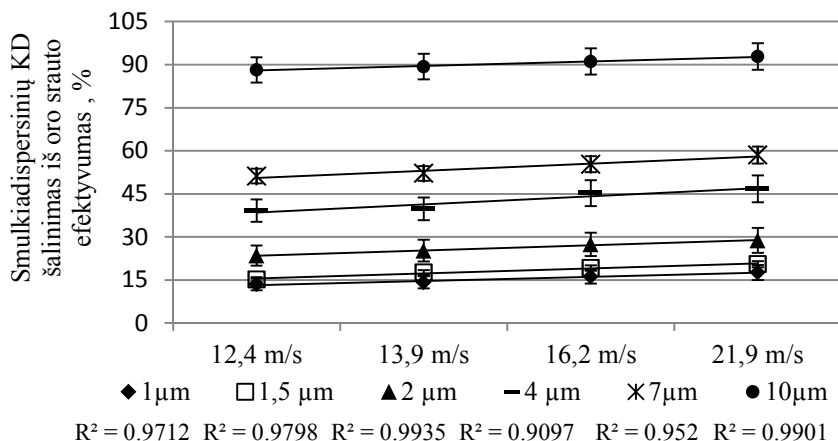


4.6 pav. Skirtingos dispersijos cemento klinkerio KD šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam keturkanaliame ciklone esant 0,5 g/m^3 koncentracijai (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – 3160 kg/m^3 esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.6. Efficiency dependencies of purification of different size cement clinker SP from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under different concentration of 0.5 g/m^3 , (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 3160 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

Esant didesnei – 4 g/m^3 koncentracijai cemento klinkerio KD šalinimo efektyvumas gautas didesnis (4.7 pav.). 1 μm kietųjų dalelių pasišalinimo efektyvumas, esant mažiausiam 12 m/s oro srauto greičiui – 13,5 %. Didėjant oro srauto greičiui iki 22 m/s, kietųjų dalelių efektyvumas didėja iki 17,6 %. 1,5 μm KD pasišalinimo keturkanaliame ciklone efektyvumas šiek tiek didesnis nei 1 μm kietųjų dalelių ir siekia nuo 15,2 % iki 20,5 %. 2 μm kietųjų dalelių, esant didesniai 22 m/s oro srauto greičiui, pasišalinimo efektyvumas – 28,8 %, t. y. 8 % didesnis nei 1 μm . Žymiai didesnis (nuo 39,2 % iki 46,8 %) išvalymo efektyvumas gautas naudojant tyrimuose 4 μm KD. Šalinimo efektyvumas esant 10 μm kietosioms dalelėms ir esant skirtingam oro srauto greičiui, siekė nuo 88,2 % iki 92,8 %. Manoma, kad mažą smulkiadisversių dalelių (nuo 1 μm iki

4 μm) išvalymo efektyvumą galėjo lemti mažas kietųjų dalelių kiekis bendrojoje masėje (3.1 lentelė).



4.7 pav. Skirtingos dispersijos cemento klinkerio KD šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam keturkanaliame ciklone esant 4 g/m^3 koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16, 22 m/s), tankis – 3160 kg/m^3 esant A^3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.7. Efficiency dependencies of purification of different size cement clinker SP from the air flow in the cylindrical four-channel cyclone under different concentration of 4 g/m^3 , (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 3160 kg/m^3 under A^3 position of half-rings

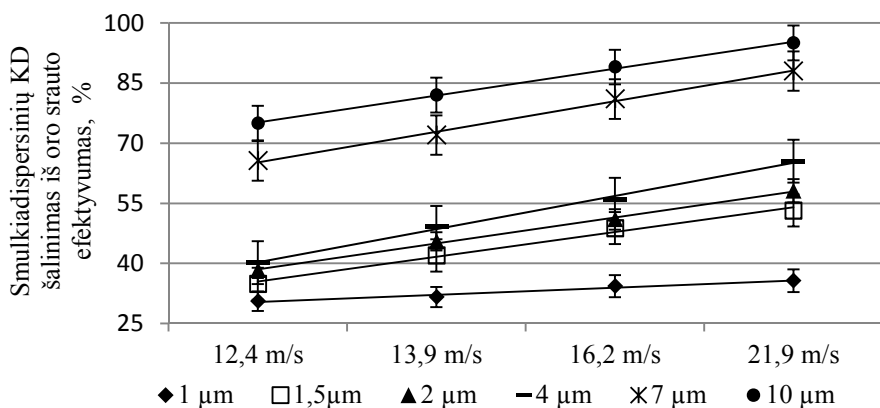
Tirdamas smulkiadispersinių dalelių pašalinimo efektyvumą, Derksenas (2003) nustatė, kad mažesnės nei $4 \mu\text{m}$ kietosios dalelės ciklone išsisklaido. Tyrėjas nustatė, kad esminį vaidmenį atskyrimo procese atlieka turbulencija. Mažos dalelės turbulencija išsklaido po cikloną ir jos greičiausiai pakliūna į srautą pro išėjimo vamzdį viršuje. Kuo didesnės kietosios dalelės, tuo daugiau jų susikaučia sienelių zonoje, iš kurios (dėl bendro dujų srauto sunkio jėgos veikimo) jos palaipsniui juda į ciklono bunkerį.

Remiantis pateiktų keturkanalio ciklono tyrimų naudojant skirtingos prigimtės KD rezultatais nustatyta, kad tarp efektyvumo ir oro srauto greičio bei KD koncentracijos yra stiprus tiesinis ryšys. Kuo didesnis oro srauto greitis, tuo didesnis KD pašalinimo efektyvumas esant įvairiam KD dydžiui ($1 \mu\text{m}$, $1,5 \mu\text{m}$, $2,0 \mu\text{m}$, $4,0 \mu\text{m}$, $7,0 \mu\text{m}$, $10,0 \mu\text{m}$). Visų matavimų atvejais determinacijos koeficientas R^2 yra arti 1, o tai rodo, kad tarp oro srauto greičio, KD koncentracijos ir valymo efektyvumo yra stiprus tiesinis ryšys.

4.3. Penkiakanalio ciklono smulkiadispersinių kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto efektyvumo tyrimų rezultatai ir analizė

Medienos pelenų KD šalinimo iš oro srauto pagal aerodinaminį skersmenį tyrimų rezultatai ir analizė

Medienos pelenų dalelių dydis yra nuo 0,52 iki 50 μm . Dalelės, kurių dydis $>10 \mu\text{m}$, vidutiniškai sudaro kiek daugiau už 42,1 %, o $<10 \mu\text{m}$ – 57,9 % visų dalelių. Dalelės, kurių dydis $<10 \mu\text{m}$ – 36,9 %. Tyrimų rezultatai rodo, kad KD pašalinimo efektyvumas didėja su jų dydžiu, priklausomai nuo įtekančio į cikloną srauto greičio ir didėjančios dalelių koncentracijos (4.8 pav.).



$$R^2 = 0.9706 \quad R^2 = 0.9894 \quad R^2 = 0.9974 \quad R^2 = 0.9997 \quad R^2 = 0.9961 \quad R^2 = 0.9987$$

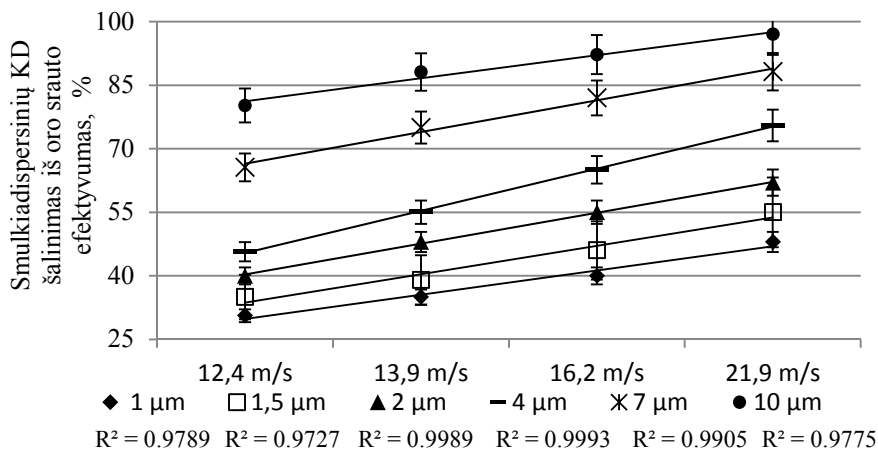
4.8 pav. Skirtingos dispersijos medienos pelenų šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriname penkiakanaliame ciklone esant 0,5 g/m³ koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s), tankis – 2451 kg/m³ esant A₃ pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.8. Efficiency dependencies of purification of different size wood ashes from the air flow in the cylindrical five-channel cyclone under concentration of 0.5 g/m³ and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 2451 kg/m³ under A₃ position of half-rings

Eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad kietųjų dalelių, kurių skersmuo yra 1 μm , esant 0,5 g/m³ koncentracijai, kai oro srauto greitis – 12 m/s, išvalymo efektyvumas – 30,6 %. Esant didžiausiam – 22 m/s oro srauto greičiui, išvalymo iš oro srauto efektyvumas padidėja iki 35,7%. 1,5 μm KD pašalinamos 34,9 %

efektyvumu esant 12 m/s oro srauto greičiui, o kai oro srauto greitis 22 m/s, išvalymo efektyvumas – 53,2 %.

4.9 paveiksle pateikti ciklono efektyvumo eksperimentinių tyrimų rezultatai naudojant 4 g/m^3 koncentraciją. Penkiakanalio ciklono efektyvumas šalinant $1 \mu\text{m}$ atitinkamai padidėja nuo 30,6 % iki 48,4 % (4.8 ir 4.9 pav.). Lyginant su $0,5 \text{ g/m}^3$ medienos pelenų koncentracija, esant 22 m/s oro srauto greičiui, KD išvalymo efektyvumas yra 12,7 % didesnis ir siekia 48 %. Vadinasi, galima teigti, kad didėjančiam KD šalinimo efektyvumui turi įtakos didesnė KD koncentracija bei didėjantis srauto greitis.



4.9 pav. Skirtingos dispersijos medienos pelenų šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės cilindriniam penkiakanaliame ciklone esant 4 g/m^3 koncentracija ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s), tankis – 2451 kg/m^3 esant A_3 pusšiedžių padėčiai

Fig. 4.9. Efficiency dependencies of purification of different size wood ashes from the air flow in the cylindrical five-channel cyclone under concentration of 4 g/m^3 and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 2451 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

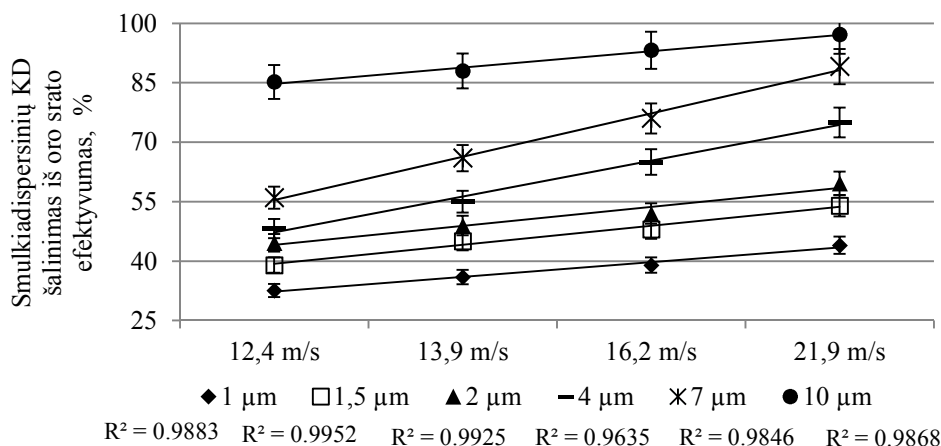
$10 \mu\text{m}$ medienos pelenų pasišalinimo efektyvumas – 80,2 % gautas, kai KD koncentracija siekia $4,0 \text{ g/m}^3$, esant 12 m/s oro srauto greičiui. Oro srauto greičiui padidėjus iki 22 m/s, KD pasišalinimo efektyvumas – 97,3 % (4.9 pav.). Atliekant eksperimentinius tyrimus su $1,0$ ir $2,0 \text{ g/m}^3$ KD koncentracijomis nustatyta panaši pasišalinimo efektyvumo kitimo tendencija.

Tarp šių analizuojamų parametrų – KD šalinimo efektyvumo ir oro srauto greičio bei KD koncentracijos – yra stiprus tiesinis ryšys (4.8 ir 4.9 pav.). Kuo didesnis oro srauto greitis, tuo pasiekiamas didesnis KD pasišalinimo efektyvu-

mas esant įvairiam KD dydžiui (1,0 μm , 1,5 μm , 2,0 μm , 4,0 μm , 7,0 μm , 10,0 μm), kai KD koncentracija skirtinga (0,5–4,0 g/m^3). Visų eksperimentinių tyrimų atvejais determinacijos koeficientas R^2 yra arti 1, o tai rodo, kad tarp oro srauto greičio, KD koncentracijos ir šalinimo efektyvumo yra stiprus tiesinis ryšys.

Cemento klinkerio KD šalinimo iš oro srauto pagal aerodinaminį skersmenį tyrimų rezultatai ir analizė

4.10 ir 4.11 paveiksluose pateikti penkiakanalio ciklono efektyvumo eksperimentinių tyrimų rezultatai naudojant cemento klinkerio daleles. Šių KD dydis yra nuo 0,59 iki 50 μm . Kietosios dalelės, kurių dydis $>10 \mu\text{m}$, sudaro apie 36,5 %, o $<10 \mu\text{m}$ – 63,5 %. KD pasišalinimo efektyvumas didėja augant KD koncentracijai ir oro srauto greičiui (4.10 pav). 1 μm cemento klinkerio šalinimo efektyvumas – 32,6 %, esant 0,5 g/m^3 koncentracijai, kai oro srauto greitis – 12 m/s, o oro srauto greičiui padidėjus iki 22 m/s – 44,0 %.

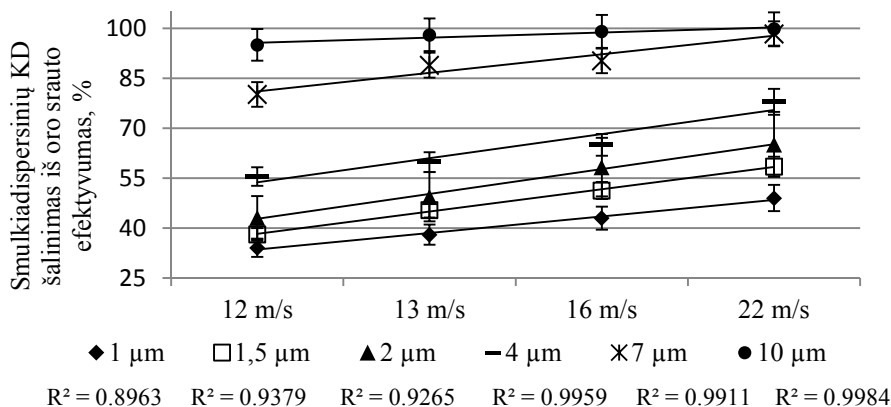


4.10 pav. Skirtingos dispersijos cemento klinkerio šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės penkiakanaliame ciklone esant 0,5 g/m^3 koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s), tankis – 3160 kg/m^3 esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.10 Efficiency dependencies of purification of different size cement clinker from the air flow in the five-channel cyclone under concentration of 0.5 g/m^3 and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 3160 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

KD penkiakanaliame ciklone pasišalinimo efektyvumas, šalinant iš oro 1,5–4 μm cemento klinkerio daleles yra didesnis nei pasiektas keturkanaliame ciklone. 7 μm KD šalinimo penkiakanaliame ciklone, didėjant oro srauto greičiui

nuo 12 iki 22 m/s, efektyvumas siekia nuo 56,0 % iki 89,1 %, 10 μm dalelėms – nuo 85,2 % iki 97,2 %. Skirtingos dispersijos KD šalinimas yra akivaizdžiai didesnis nei esant 0,5 g/m³ cemento klinkerio koncentracijai (4.11 pav.). Esant 12, 14, 16 ir 22 m/s oro srauto greičiui, 1,5 μm ir 2,0 μm cemento klinkerio dalelių šalinimo efektyvumas padidėja vidutiniškai apie 5,2 %, KD koncentracijai padidėjus nuo 0,5 g/m³ iki 4,0 g/m³.



4.11 pav. Skirtingos dispersijos cemento klinkerio išvalymo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės penkiakanaliame ciklone esant skirtingai koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s) 4 g/m³ koncentracija, tankis 3160 kg/m³ esant A₃ pusžiedžių padėčiai

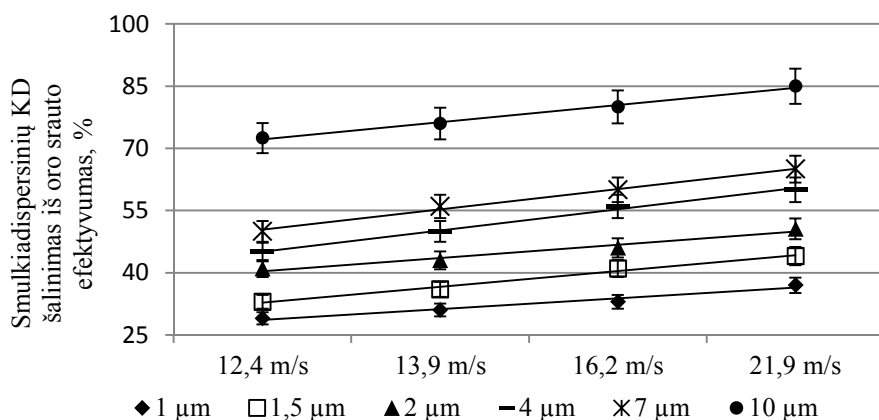
Fig. 4.11. Efficiency dependencies of purification of different size cement clinker from the air flow in the five-channel cyclone under concentration of 4 g/m³ and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 3160 kg/m³ under A₃ position of half-rings

Tarp oro srauto greičio, cemento klinkerio dalelių koncentracijos ir oro valymo efektyvumo nustatytas stiprus tiesinis ryšys, nes determinacijos koeficientas R^2 yra gaunamas arti 1. Skirtingos dispersijos cemento klinkerio KD pašalinimo efektyvumas buvo didesnis negu medienos pelenų dalelių efektyvumas. Galima teigti, kad tam įtakos galėjo turėti ne tik didėjanti KD dalelių koncentracija ar oro srauto greitis, bet ir cemento klinkerio tankis, kuris yra didesnis nei medienos pelenų.

Kvarcinio smėlio miltų šalinimo iš oro srauto pagal aerodinaminį skersmenį tyrimų rezultatai ir analizė

Kvarcinio smėlio KD aerodinaminis skersmuo – 0,59–50,0 μm . Dalelės, kurių dydis 10 μm ir daugiau, vidutiniškai sudaro apie 52,7 %, o mažesnių nei 10 μm dalelių – 47,3 %.

Esant 0,5 g/m^3 kvarcinio smėlio KD koncentracijai, 10 μm dydžio KD pašalintos 72,5–85,0 % efektyvumu, o šalinant 1 μm KD efektyvumas – 29–37,0 % (4.12 pav.).



$$R^2 = 0.9657 \quad R^2 = 0.989 \quad R^2 = 0.9673 \quad R^2 = 0.9946 \quad R^2 = 0.9934 \quad R^2 = 0.9942$$

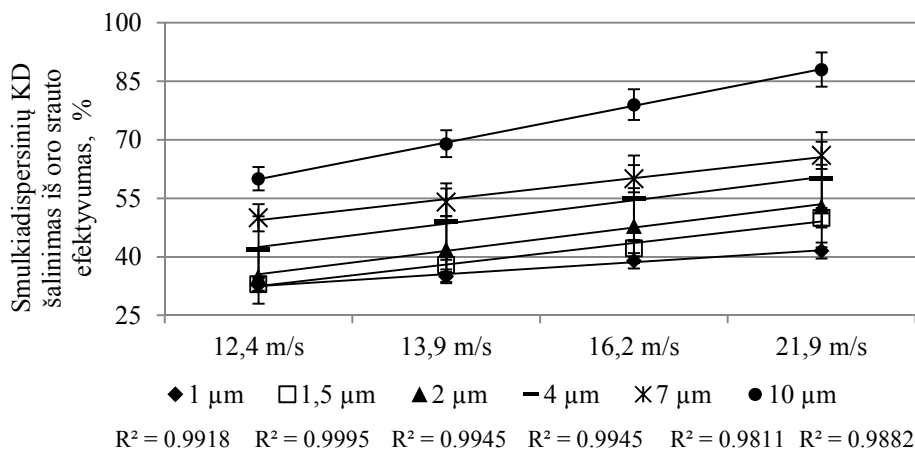
4.12 pav. Skirtingos dispersijos kvarcinio smėlio miltų išvalymo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės penkiakanaliame ciklone esant 0,5 g/m^3 koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s), tankis 2427 kg/m^3 esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.12. Efficiency dependencies of purification of different size quartz sand flour from the air flow in the five-channel cyclone under concentration of 0.5 g/m^3 and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 2427 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

10 μm KD šalinimo penkiakanaliame ciklone efektyvumas – 88,0 %, esant 4,0 g/m^3 koncentracijai, kai didžiausio oro srauto greitis – 22 m/s (4.13 pav.).

Medienos pelenų ir cemento klinkerio KD, esant minėtai koncentracijai ir oro srauto greičiui, pasišalinimo efektyvumas yra atitinkamai – 97,0 % ir 98,0 %. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad 10 μm medienos pelenų ir cemento klinkerio KD surinkta ciklone 10,0 – 11,0 % daugiau nei kvarcinio smėlio KD. Mažiausias kvarcinio smėlio KD šalinimo efektyvumas gautas šalinant iš oro srauto 1 μm daleles – 32,8–41,6 %, esant 12, 14, 16 ir 22 m/s oro srauto greičio dydžiams (4.13 pav). Matyti, kad tarp šių analizuojamųjų parametrų – KD šalinimo efektyvumo ir oro srauto greičio bei KD koncentracijos yra

stiprus tiesinis ryšys (4.12 ir 4.13 pav.). Kuo didesnis oro srauto greitis, tuo pasiekiamas didesnis KD pasišalinimo efektyvumas, esant skirtingam KD aerodinaminiam skersmeniui (1,0 μm , 1,5 μm , 2,0 μm , 4,0 μm , 7,0 μm , 10,0 μm) bei skirtingai KD koncentracijai. Tarp oro srauto greičio, kvarcinio smėlio dalelių koncentracijos ir oro valymo efektyvumo nustatytas stiprus tiesinis ryšys, nes determinacijos koeficiento R^2 reikšmė yra arti 1,0.



4.13 pav. Skirtingo dydžio kvarcinio smėlio miltų šalinimo iš oro srauto efektyvumo priklausomybės penkiakanaliame ciklone esant 4 g/m^3 koncentracijai ir oro srauto įtekėjimo greičiui (12, 14, 16 ir 22 m/s), 4 g/m^3 koncentracija, tankis – 2427 kg/m^3 esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Fig. 4.13. Efficiency dependencies of purification of different size quartz sand flour from the air flow in the five-channel cyclone under concentration of 4 g/m^3 and air flow inlet velocity (12, 14, 16 and 22 m/s), density – 2427 kg/m^3 under A_3 position of half-rings

Apibendrinant pateiktus eksperimentinių tyrimų rezultatus galima teigti, kad smulkiadispersinių dalelių šalinimo efektyvumui reikšmės turi cilindrinį pusžiedžių skaičius, t. y. penkiakanalis ciklonas efektyviau šalina kietąsias daleles negu keturkanalis ciklonas, A_3 pusžiedžių padėtis, oro srauto greitis ir didėjanti KD koncentracija.

Ukrainos mokslininkai Serebryansky ir Prijomov (2007) nustatė, kad prie cilindrinio pusžiedžio esančios sienelės pabaigoje (oro srauto kiekio dalijimosi vietoje) susidaro kietųjų dalelių „dinaminė užtvara“ (kietųjų dalelių sandara), kurioje vyksta kietųjų dalelių koaguliacija. Todėl galima daryti prielaidą, kad esant A_3 pusžiedžių tarpų ploiui smulkiadispersioms dalelėms yra galimybė ko-

aguluoti susidarant didesnio skersmens kietosioms dalelėms. Atsiskyrus periferinio oro srauto daliai koaguliavusios dalelės patenka į bunkerį.

4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Keturkanalio ciklono efektyvumas šalinant 10 μm kietąsias daleles esant didžiausiai 4 g/m^3 koncentracijai ir 22 m/s oro srauto greičiui, kai periferinio oro srauto dalis – 55 %, o tranzitinio oro srauto dalis – 45 %, siekia 92,8 %, o penkiakanalio – 99,8 %.

2. Keturkanalis ciklonas gali pašalinti iš oro srauto smulkiadispersines – 1 iki 7 μm aerodinaminio skersmens kietąsias daleles, pasiekdamas 1 μm – 17,6 %, 2 μm – 28,8 %, 4 μm – 46,8 %, 7 μm – 58,5 % valymo efektyvumą.

3. Penkiakanalis ciklonas gali pašalinti iš oro srauto smulkiadispersines – 1 iki 7 μm aerodinaminio skersmens kietąsias daleles, pasiekdamas 1 μm – 49,1 %, 2 μm – 65,1 %, 4 μm – 77,9 %, 7 μm – 98,3 % valymo efektyvumą.

4. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad kietųjų dalelių šalinimo iš oro srauto daugiakanaliuose ciklonuose efektyvumas didėja, didėjant kietųjų dalelių tankiui, koncentracijai – nuo 1 iki 4 g/m^3 , KD aerodinaminiam skersmeniui – nuo 1 iki 10 μm , oro srauto greičiui – nuo 12 iki 22 m/s, didėjančiam tranzitinio oro srauto kiekiui, esant įrenginio aerodinaminiam pasipriešinimui – nuo 150 Pa iki 375 Pa.

Daugiakanalio ciklono aerodinaminių procesų modeliavimas

Nagrinėjama oro kietųjų dalelių aerodinamika daugiakanaliame (trijų ir keturių žiedų) ciklone su tangentiniu srauto įtekėjimu. Vienfazio ir dvifazio srauto modeliavimui naudotas PHOENICS 3.5 programinės įrangos paketas. Oro srauto judėjimo ciklone matematinį modelį sudarė Navje ir Stokso (laminariniam atvejui) ir Reinoldso (turbulentiniam srautui) trimačių diferencialinių lygčių sistema. Pernašos diferencialinės lygtys nespūdžiam turbulentiniam srautui ciklono viduje skaitiškai spręstos baigtinių tūrių metodu naudojant RNG (Renormalization Group $k-\epsilon$ model) vienfaziam srautui ir Reynoldso įtempimų modelį (RSM). Cheno-Wood'o $k-\epsilon$ modelio modifikacija panaudota dvifaziam srautui su KD modeliuoti. Dvifazio srauto (oro – KD) modeliavimas atliktas su skirtingo dydžio dalelėmis – 1, 2, 10, 20 ir 50 μm panaudojant IPSA (Inter-Phase-Slip Algorithm) metodą (Spalding 2002). Modeliavimas atliktas, kai oro srauto įtekėjimo greitis – 12–22 m/s, Reinoldso skaičius $2,2 \times 10^4 - 4,2 \times 10^4$, kuris rodo turbulentinį srauto tekėjimą ciklone. Modeliavimo rezultatai palyginti su eksperimentiniais rezultatais. Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2009; Jakštonienė ir Vaitiekū-

nas 2010 a; Vaitiekūnas ir Jakštonienė 2010 b; Vaitiekūnas *et al* 2010 c; Jakštonienė *et al* 2011 d; Blatrėnas *et al* 2012 a).

5.1. Dvifazio srauto modeliavimo lygtys

Naudojant PHOENICS programą galima įvertinti tokius procesus, kaip turbulenciją, sunkio jėgas, jų judėjimą erdvėje, atlikti vienfazių ir dvifazių pernašos procesų modeliavimą, o metodu GENTRA gali būti apskaičiuotos kietųjų dalelių trajektorijos ir kitos galimybės: FLAIR – pernašos procesai oro sraute; MIGAL – daugiatainklis sprendimas; IN-FORM – programavimas.

Vienfaziam ir dvifaziam srautui ciklone modeliuoti naudota PHOENICS programa (skaitiniu „IPSA“ metodu) (Spalding 2002).

Daugiafaziai srautai yra charakterizuojami kaip turintys du ar daugiau fluidų, reliatyviai judančių vienas kito atžvilgiu. Diferencialinės lygtys apibendrin-toje formoje užrašomos taip (Spalding 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \Phi_i) + \text{div}(r_i \rho_i \mathbf{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_{\Phi_i} \mathbf{grad} \Phi_i) = r_i S_{\Phi_i}, \quad (5.1)$$

čia: t – laikas; r_i – i fazės tūrinė dalis; ρ_i – i fazės tankis; Φ_i – i fazės priklausomas kintamasis, kaip momentas masės vienetui, turbulencijos energija, fazės tūrinė dalis, kt.; $\mathbf{v}_i$ – i fazės greičio vektorius; Γ_i – kintamojo Φ_i mainų koeficientas; S_{Φ_i} – srauto (šaltinio) narys kintamajam Φ_i .

Tolydumo lygtis fazei i yra gaunama iš (5.1) lygties įstatant vienetą vietoje Φ_i :

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i) + \text{div}(r_i \rho_i \mathbf{v}_i) = r_i S_{\Phi_i}, \quad (5.2)$$

čia: S_{Φ_i} – išreiškia masės srauto įtekėjimo dydį per tūrio vienetą į fazę, pav., pernešant iš vienos fazės ir įsiskverbiant į kitą fazę.

Diskretinė lygčių sistema sprendžiama baigtinių tūrių metodu.

Fazės sąvoka. Žodis „fazė“ vartojama termodinaminiu požiūriu, kai yra išskirtos kietoji, skystoji ar dujinė fazės. Tačiau skaitinio modeliavimo atveju yra praplėsta fazės sąvoka. Tas leidžia įvairaus tankio smėlio daleles, garo burbulus ir kitus įvairius dydžius nagrinėti kaip atskiras fazes.

Kiekviena fazė laikoma kaip turinti savo atskiras greičio komponentes. Fazės greitis susietas su tarpfazine momento pernaša, o fazės koncentracija siejasi su tarpfazine masės pernaša. Kiekviena fazė gali būti charakterizuojama ‘fragmento dydžiu’. Juo gali būti kietosios dalelės skersmuo, paviršiaus plotas (Spalding 2002).

Iš (5.1) lygčių sprendinių gaunamos r_i , u_i , v_i , w_i priklausomųjų kintamųjų reikšmės. Šios lygtys turi tarpfazinių pernašos procesų matematinės išraiškas dydžiams, kurie dažnai yra empiriniai, gauti iš eksperimentinių duomenų. Kelių fazių atveju, jų tūrinių dalių suma tenkina sąlygą:

$$\sum r_i = 1, \quad (5.3)$$

Kai dvi fazės visai užpildo esamą erdvę, jų tūrinių dalių suma: $r_1 + r_2 = 1$.

Fazės tvermės dėsnis. Fazės tvermės lygtis bet kokiam fazės i kintamajam Φ_i , yra:

$$d(r_i \rho_i \Phi_i)/dt + \text{div}(r_i \rho_i \mathbf{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_{\varphi i} \mathbf{grad}(\Phi_i) - \Phi_i \Gamma_{ri} \mathbf{grad}(r_i)) = S_i + S_{ip}, \quad (5.4)$$

čia: r_i – fazės tūrinė dalis, m^3/m^3 ; ρ_i – fazės tankis, kg/m^3 ; $\mathbf{v}_i$ – fazės greičio vektorius, m/s ; $\Gamma_{\varphi i}$ – difuzijos fazės viduje koeficientas, Ns/m^2 ; Γ_{ri} – fazės difuzijos koeficientas, Ns/m^2 ; S_i – fazės viduje tūrio srautas, $\text{kg} \times (\text{iš } \Phi \text{ dimensijos}) / (\text{m}^3 \text{s})$; S_{ip} – tarpfazinis tūrio srautas, $\text{kg} \times (\text{iš } \Phi \text{ dimensijos}) / (\text{m}^3 \text{s})$.

Lygčių sprendimas baigtinių tūrių metodu

Integruojant (5.1.) tipo lygtis kiekvienos cėlės visu tūriu V apribotu paviršiumi A , panaudojant divergencijos teoremą

$$\iint_A dA (r_i \rho_i \mathbf{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_{\varphi i} \mathbf{grad} \Phi_i)_n = \iiint_V dV [r_i S_i - \frac{\partial}{\partial t} (r_i \rho_i \Phi_i)]. \quad (5.5)$$

o tai sudaro diskretizavimo baigtiniais tūriais metodo pagrindą (Patankar 1980).

SFD naudojimas modeliuojant srautą ciklonuose taikant optimalią modeliavimo schemą CFD pakankamai tiksliai galima užfiksuoti sudėtingą tėkmės dalelių sąveiką (Youngmin *et al.* 1999).

5.2. Skaitinis vienfazio oro srauto daugiakanaliame ciklone modeliavimas

Trimatės judėjimo (5.1) lygtys, kai $r_i = 1$, yra vienfazio srauto pernašos lygtis.

Skaitiniai modeliai ekonominiu požiūriu yra daug kartu pigesni negu fizikinis eksperimentas. Pastaraisiais metais skaitinis modeliavimas vis plačiau taikomas pernešimo procesų tyrimuose, o suprantamas kaip bendrųjų pernešimo lygčių sistemos sprendimas (Vaitiekūnas *ir kt.* 2004a).

(5.1) vektorinė lygtis skaliarine forma oro srauto judėjimui daugiakanaliame ciklone nustatyti sprendžiama keturių lygčių sistema: 3 – *Navje-Stokso*, 1 – tolydumo. Šių lygčių vidutiniam turbulentiniam tekėjimui, kai visos srauto fizikinės savybės pastovios matematinės išraiškos (Vaitiekūnas 1998) yra tokios:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right), \quad (5.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5.7)$$

čia: p – slėgis, N/m², Pa; μ – dinaminio klampio koeficientas, N·s/m²; ρ – tankis, kg/m³, F_x , F_y , F_z – masės jėgų vektoriaus projekcijos į koordinačių ašis.

Visos trys (5.6) tipo lygtys išreiškia devynis turbulentinius įtempimus, vadinamus *Reinoldso* įtempimais, kurie sudaro įtempių tenzorių, ir esant jų simetriškumo sąlygai (Vaitiekūnas 1998) atrodo taip:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \equiv -\rho \begin{vmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{vmatrix}. \quad (5.8)$$

Reinoldso įtempimai laikomi turinčiais formą, panašią į klampius momento lygčių įtempimus. Tris (5.6) lygtis naudojanti turbulentinės klampies hipoteze galima užrašyti taip:

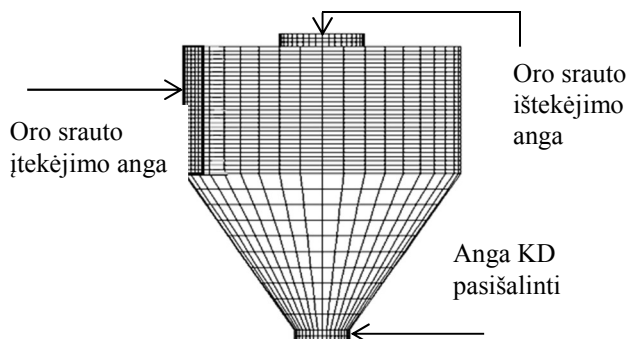
$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial z} \right],$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial v}{\partial z} \right], \quad (5.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial w}{\partial z} \right],$$

$$\mu_r = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5.10)$$

čia: μ_T – turbulentinės klampos koeficientas, k – kinetinė turbulencijos energija, $k = (1/3) (u'^2 + v'^2 + w'^2)^{1/2}$, ε – turbulentinės kinetinės energijos disipacijos greitis. (5.7), (5.9) ir (5.10) lygtis reikia papildyti antros eilės RNG k -epsilon turbulencijos modelio lygtimis. Matematinį modelį sudaro šešių diferencialinių lygčių sistema (kintamieji p , u , v , w , k ir ε) su ribinėmis sąlygomis.



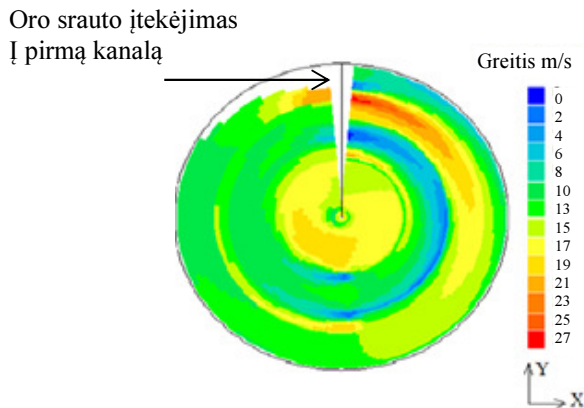
5.1 pav. Cilindrinio daugiakanalio ciklono skaičiavimo tinklelio eskizas
(žr. 2.1 pav.)

Fig. 5.1. Draft of calculation grid for cylindrical multichannel cyclone
(look at Fig. 2.1)

Pradinės ir kraštinės sąlygos. Pagal fizikinį modelį (2.1 pav.) sudarytas ciklono skaitinis modelis, jo diskretizacija, padalijus cilindrinę erdvę baigtinių tūrių elementais. Tai matyti 5.1 paveiksle, kuriame visiems 6 kintamiesiems kiekviename elemente parinktos pradinės reikšmės. (5.7), (5.9) ir (5.10) lygčių kraštinės sąlygas sudaro: įtekėjimo (visiems 6 kintamiesiems), ištekėjimo (nulinė slėgio reikšmė), greičio prilipimo prie kietųjų sienelių (ciklono vidinių, pusžiedžių abiejų pusių: $u = v = w = 0$) reikšmės.

Pagal fizikinį modelį (žr. 2.1 pav.) būtina sudaryti skaitiniam modeliui jo diskretizaciją ir padalyti cilindrinę erdvę baigtinių tūrių elementais. 5.1 paveiksle pateikta ciklono modeliavimo sritis trimatėje erdvėje cilindrinėje koordinačių sistemoje, kuri suskirstyta į ląsteles x , y , z koordinačių ašių kryptimis (Bernardo *et al.* 2005). Koordinačių pradžia yra ciklono apačioje: koordinatė z eina ciklono vertikaliaja ašimi į viršų (0–0,72 m), x – kampinė koordinatė radianais (0– 2π), y – radialinė (0– $R = 0,25$ m, t. y. nuo ciklono vertikalsiosios ašies iki ciklono korpuso sienelės). Ciklono tinklinė sritis bendroju atveju sudaryta iš $x \times y \times z = 40 \times 36 \times 45 = 64800$ (5.1 pav.) ir $x \times y \times z = 60 \times 36 \times 45 = 97\,200$ tūrinių ląstelių. Tai kontrolinės greičio ląstelės, kuriose skaičiuojamos radialinės, tangentinės ir ašinės krypties greičio komponentės, slėgis, tūrinės fazių dalys, turbulencijos charakteristikos. Oro srauto įtekėjimui (anga cilindro šone) į ciklo-

ną naudoti keturi greičiai: 12, 14, 16 ir 22 m/s. Ištekėjimui (anga ciklono viršuje) buvo įvertintos nulinio slėgio sąlygos. Anga ciklono apačioje – KD šalinti.



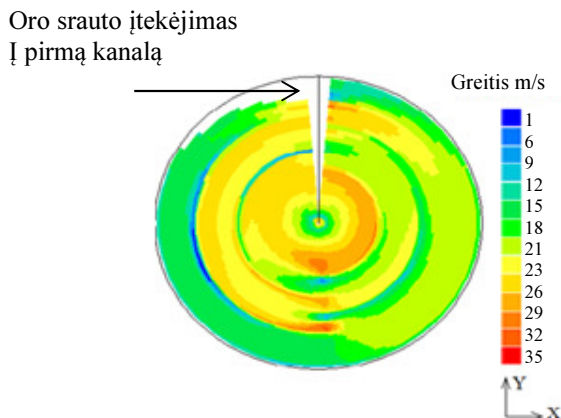
5.2 pav. Greičio dydžių (u) m/s pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14$ m nuo ciklono viršaus cilindriniam keturkanaliame ciklone esant įtekėjimo greičiui $u_{in} = 16$ m/s, A_1 pusžiedžių padėčiai

Fig. 5.2. Distribution of velocities (u), m/s in the cross-section $Z = 0,14$ m from the cyclone top in the cylindrical four-channel cyclone under inlet velocity of $u_{in} = 16$ m/s, in the first position of the half-rings

5.2 paveiksle pateikti tangentinio greičio kontūrai keturkanaliame ciklone, kai įtekėjimo greitis yra 16 m/s, esant A_1 (žr. 2.4 a pav.) padėčiai (skaitinė – spalvinė skalė rodo greičius nuo 2 m/s (tamsiai mėlyna) iki 27 m/s (raudona)). Įtekėjęs į ciklono pirmąjį (prie šoninės ciklono sienos) pusžiedžio kanalą srautas, slėgio veikiamas, nuosekliai prateka visą kanalų sistemą ir per centrinę ciklono dalį išteka lauk.

5.3 paveiksle pateikti greičio kontūrai ciklone, kai oro srauto įtekėjimo greitis – 22 m/s. Penkiakanaliame ciklone (žr. 2.4 pav.), esant keturiems cilindriniams pusžiedžiams, parodomas greičių sumažėjimo egzistavimas, kaip ir 5.2 paveiksle esant trimis cilindriniais pusžiedžiams.

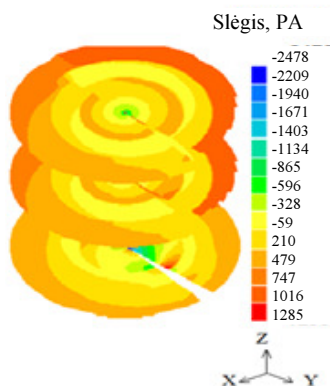
5.3 paveiksle skaitinė-spalvinė skalė rodo greičius nuo 1 iki 35 m/s. Dominuojantis greičio dydis šiame ciklono skerspjūvyje yra kaip įtekėjimo greičio (spalvos nuo šviesiai žalios iki rausvos), t. y. greičio dydis nuo 9 iki 35 m/s. Prie ciklono kietųjų sienelių ir pusžiedžių sienelių greitis sumažėja iki nulinio dydžio (prilipimas prie kietųjų sienelių) – viso skerspjūvio spalvinė skalė rodo greičio dydžius nuo 0 iki 35 m/s.



5.3 pav. Greičio (u) m/s pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14$ m nuo ciklono viršaus esant cilindriniam penkiakanaliaiame ciklone įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22$ m/s, A_1 pusžiedžių padėčiai

Fig. 5.3. Velocities (u), m/s in the cross-section $Z = 0,14$ m from the cyclone top in the cylindrical five-channel cyclone under the first position of half-rings, having inlet velocity of $u_{in} = 22$ m/s

5.4 paveiksle apskaičiuotas slėgis $-p$ (Pa) rodo neigiamą (su minuso ženklu) slėgį, bei nukrypimus nuo atmosferinio slėgio. Norint gauti šį realų slėgį kiekvienai teorinei reikšmei reikia pridėti 10^5 Pa. Tokiu būdu neigiamo slėgio nebegausime. Atmosferinio slėgio reikšmės tuomet bus tokios: nuo 97 522 iki 101 285 Pa (nuo -2478 iki 1285 Pa).

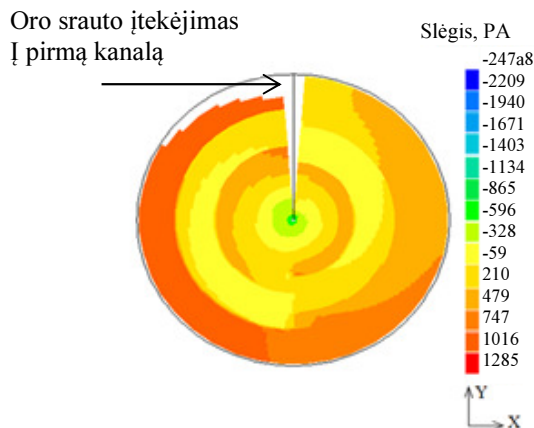


5.4 pav. Penkiakanalio ciklono slėgio p (P1), Pa pasiskirstymas trijose z plokštumose: 0,1, 0,14 ir 0,28 m nuo ciklono viršaus esant 22 m/s įtekėjimo greičiui, A_1 pusžiedžių padėčiai

Fig. 5.4. Five-channel cyclone pressure p (P1), Pa distribution in three z plains: 0,1, 0,14 and 0,28 m from the cyclone top. Inlet velocity is 22 m/s, the first position of semi-rings

Visų skerspjūvių slėgio pasiskirstymas yra panašus tiek ciklono apačioje, tiek viduryje, tik didėjant aukščiui, t. y., viršutinėje įrenginio dalyje matyti didėjantis maksimalus slėgis: maksimalios teigiamos slėgio reikšmės yra 1285 Pa. Skerspjūvyje prie ciklono cilindrinės dalies dugno ($z = 0,1$ m) didžiausias teigiamas p yra 479 Pa (šviesiai raudona spalva). Tą lemia susidaręs pasienio sluoksnis apatinėje ciklono plokštumoje. Centriname skerspjūvyje ($z = 0,14$ m) ir viršutiniame ($z = 0,24$) jis siekia 1116–1285 Pa (tamsesnė raudona spalva). Ciklono centrinės ašies aplinkoje slėgis p yra neigiamas: nuo -59 iki -1134 Pa, o pačioje ašyje (centre) jis siekia net iki 1403 – 1671 Pa.

5.5 paveiksle pateikti slėgio pasiskirstymo kontūrai plokštumoje $z = 0,14$ m (vaizdas iš viršaus). Šiame skerspjūvyje p reikšmių skalę sudaro nuo -529 iki 1285 Pa. Visame ciklono tūryje slėgis kinta nuo -2478 iki 1285 Pa.



5.5 pav. Penkiakanalio ciklono slėgio p (P1), Pa pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14$ m nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_1 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22$ m/s (5.4 pav. vidurinio ciklono skerspjūvio padidintas vaizdas iš viršaus)

Fig. 5.5. Five-channel cyclone pressure p (P1), Pa distribution in the cross-section $Z = 0,14$ m from the cyclone top under the first position of rings of the cylindrical five-channel cyclone, inlet velocity $u_{in} = 22$ m/s (Fig. 5.4. enlarged view of the middle cyclone cross-section from the top)

Slėgio p kitimas ciklono kanale prie šoninių sienelių, kur vyksta KD nusėdimas į ciklono bunkerį, pagal perimetrą kinta taip: kai $\varphi = 5^\circ$, tai $p \approx 230$ Pa, $\varphi = 90^\circ - p \approx 479$ Pa, $\varphi = 180^\circ - p \approx 1016$ Pa, $\varphi = 270^\circ - p \approx 1285$ Pa. Pagal slėgio pasiskirstymą ciklone galima spręsti ir apie tangentinio greičio pasiskirstymą kanaluose vertikaliuose skerspjūviuose pagal aukštį. Ciklone turime penkis kanalus, kurių aukštis yra kaip ciklono cilindrinės dalies – $0,29$ m, juose greičio

dydžiai yra pasiskirstę panašiai, tik išimtis – greičio kontūrai prie ciklono dugno, kur maksimalus greitis yra mažesnis, palyginti su esančiu viduriniame ir viršutiniame skerspjūviuose (pagal slėgio analogiją su 5.4 ir 5.5 pav.). 5.3 paveiksle matyti ciklono kanaluose greičio kitimas, kuris mažėja nuo maksimalaus kanalų viduryje iki nulinio prie kietųjų sienelių.

Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų analizė

Palyginimui parinkti cilindrinio keturkanalio ciklono matavimo taškai, esantys pusžiedžių tarpuose (žr. 2.3. (a) pav.). Modeliavimo rezultatai (5.2 pav.) buvo palyginti su eksperimentiniais rezultatais, kurie pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Keturkanalio ciklono vienfazio srauto greičio eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas esant A1 pusžiedžių padėčiai

Table 5.1. Comparison of experimental and simulation results of cylindrical multichannel cyclone single-phase flow velocity. A1 position of half-rings of four-channel cyclone.

Greičio matavimo taškai	Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną (į pirmąjį kanalą) 12; 14; 16 ir 22 m/s esant A ₁ pusžiedžių padėčiai:											
	Eksperimentiniai tyrimai	Skaitiniai modeliavimo tyrimai	Paklaida %	Skaitiniai modeliavimo tyrimai	Eksperimentiniai tyrimai	Paklaida %	Eksperimentiniai tyrimai	Skaitiniai modeliavimo tyrimai	Paklaida %	Skaitiniai modeliavimo tyrimai	Eksperimentiniai tyrimai	Paklaida %
	12	14	-12	14	14,9	-7,2	16	16	0	22	22,5	-14,1
9	13,2	14,5	-9,8	14,5	14,9	-2,8	17,0	15,2	+10,6	22,1	22,4	-1,3
12	13,8	13,3	+3,6	15,3	15,1	+1,3	17,4	16,1	+7,5	22,5	22,0	+2,2
13	13,1	12,7	+3	15,5	15,4	+0,6	17,4	17,3	+1,8	21,9	25,0	-14,1
15	14,6	12,3	+15,7	16,7	14,1	+15,6	18,2	18,7	-2,7	22,5	19,1	+15,1

Vidutinė santykinė paklaida $\pm 7,1$ %

Esant oro srauto įtekėjimo greičiui – 12 m/s, kaip matyti iš 5.1 lentelės, A_2 kanalo 9 matavimo taške eksperimentiniai rezultatai yra mažesni (13,2–14,5 m/s) ir sudaro lokalią santykinę paklaidą – 9,8 %. Trečiojo kanalo, esant 12 matavimo taške, eksperimentinių tyrimų rezultatai yra didesni nei skaitinių rezultatų sudarant nedidelę lokalią santykinę paklaidą – $\pm 3,6$ %. Trečiojo kanalo 13 matavimo taške gauti rezultatai rodo, kad eksperimentinių tyrimų greitis yra didesnis nei skaitinių $+3$ %, o 15 matavimo taške eksperimentinių tyrimų greitis yra didesnis nei skaitinių $+15,7$ %. Bendras modeliavimo greičio dydžių laukas parodytas 5.2 paveiksle, tačiau palyginimui paimtos skaitinės reikšmės iš rezultatų, esančių kiekvienoje tūrinėje ląstelėje, masyvo. Apibendrinant gautus duomenis (5.1 lentelė), tyrimų rezultatų sutapimo tikslumas yra geras, vidutinę santykinę paklaidą sudarė $\pm 7,1$ %. Didesnės vidutinės santykinės paklaidos gautos esant įtekėjimo greičiui 12 ir 22 m/s, atitinkamai 9,0 ir 9,4 %, o mažesnės esant greičiui 14 ir 16 m/s – atitinkamai 5,5 ir 4,4 %.

5.2 lentelė. Penkiakanalio ciklono vienfazio srauto greičio eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas esant A_1 pusžiedžių padėčiai (Įtekėjimo greitis: 12 m/s, 16 m/s ir 22 m/s)

Table 5.2. Comparison of velocity experimental and simulation results of cylindrical multichannel cyclone single-phase flow. A_1 position of cylindrical half-rings of five-channel cyclone. (Inlet velocities: 12 m/s, 16 m/s and 22 m/s)

Greičio matavimo taškai	Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną 12 m/s			Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną 16 m/s			Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną 22 m/s		
	Greitis m/s	Modeliavimas	Paklaida %	Greitis m/s	Modeliavimas	Paklaida %	Greitis m/s	Modeliavimas	Paklaida %
1	12	12	0	16	16	0	22	22	0
4	12,6	13,1	-4,0	16,6	16,7	-0,6	22,0	22,3	-1,4
5	12,7	15,1	-18,9	16,7	15,5	7,2	21,9	18,7	14,6
6	12,6	13,7	-8,7	16,8	20,3	-21,0	22,1	31,0	-40,3
9	13,5	12,8	5,2	17,4	18,6	-6,9	22,5	27,0	-20,0
12	12,9	11,0	14,7	16,9	14,3	15,4	22,4	24,2	-8,0
13	12,9	13,1	-0,16	17,0	18,9	-11,2	22,4	20,8	7,1
16	13,5	11,9	11,8	17,3	16,7	3,5	22,5	26,8	-19,1
17	13,5	14,8	-9,6	17,4	18,0	-3,4	22,5	25,2	-12,0
19	13,7	13,8	-0,73	17,2	16,7	2,9	22,8	21,2	7,0
Vidutinė santykinė paklaida %			±7,4			±7,2			±12,9

Penkiakanalio cilindrinio ciklono (5.2 lentelė) greičio dydžių kanaluose eksperimentinė (2.8 – 2.9 pav.) ir modeliavimo greičio (esant įtekėjimo greičiui 12, 16 ir 22 m/s) palyginimo bendra vidutinė paklaida yra $\pm 9,2$ %. Didžiausia palyginimo vidutinė santykinė paklaida yra esant 22 m/s įtekėjimo greičiui, mažesnės paklaidos gautos esant įtekėjimo greičiui 12 ir 16 m/s, atitinkamai 7,4 ir 7,2 %.

5.3. Dvifazio srauto daugiakanaliame ciklone skaitinis modeliavimas

Modeliavimo sritis yra cilindrinė ciklono erdvė su įmontuotais cilindriniais pusžiedžiais, dugne prie šoninių sienelių yra radialinės angos KD iškristi į bunkerį (3.4 pav.), įtekėjimo anga yra visu ciklono aukščiui, ištekėjimo anga – ciklono viršutinėje cilindro dalyje (3,1 ir 5,1 pav.). Modeliuojant dvifazį srautą lygčių skaičius yra dukart didesnis, palyginti su vienfazio tekėjimo ciklone modeliavimu, t. y. $p_1, p_2, u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2, r_1, r_2, k$ ir ε , o (5.9) lygčių sistema taikyta pirmajai ir antrajai srauto fazei. Greičio komponentės lygtyje kintamasis w_2 yra gravitacijos jėgų vektorius su neigiamu ženklu (z koordinatė kryptis yra vertikaliai aukštyn). Cheno-Wood'o *k-epsilon* modelio modifikacija panaudota dvifazio srauto turbulencijai modeliuoti (Spalding 2002).

Pradinės sąlygos dvifaziam srautui ciklono visame tūryje: greitis yra lygus įtekėjimo greičiui u_{in} visose cilindrinėse koordinatėse, KD fazės tūrinės dalys $r_2 = 1,63 \cdot 10^{-6}$, o tai atitinka medienos pelenų koncentraciją 4 g/m^3 ($r_2 = 4,1 \cdot 10^{-7}$, kai 1 g/m^3), o $r_1 = 1 - r_2$.

Kraštinės sąlygos: įtekėjimas į cikloną (ciklono A_1 kanalą) $(u_1 = u_2)_{in}$ – nuo 12 iki 22 m/s, slėgis $p_{in} = \rho \cdot u_{in}$, $r_{2,in} = 0,000001631$, $k = k_{in}$, $\varepsilon = \varepsilon_{in}$, KD fazės tūrinė dalis gauta perskaičiavus įtekėjimo koncentraciją: 1 ir 4 g/m^3 ; arba nulinės reikšmės, sprendžiant nestacionarias (5.1) lygtis; ištekėjimas per ciklono viršutinę angą: slėgis $p = 0$. KD tankis ρ naudojamas skaičiuojant antrosios fazės lygtis (Vaitiekūnas ir kt. 2004 a).

Dvifaziam (oro, kietų dalelių) srautui ciklone skaičiuoti naudota *k-epsilon* modelio modifikacija, pasiūlyta Cheno ir Woodo (Spalding 2002), kuri apima papildomų tūrinių srauto narių turbulencijos modelio lygtyse įvedimą:

$$S_{k,p} = -(2\rho_d r_1 r_2 k / T_p)(1 - \exp(-B_k T_p / T_e)) , \quad (5.11)$$

$$S_{\varepsilon,p} = -2\rho_d r_1 r_2 \varepsilon / T_p , \quad (5.12)$$

čia: ρ_d – dispersinės fazės tankis, kg/m^3 ; r_1 ir r_2 – tūrinės tolydinės (pirmos) ir dispersinės (antros) fazių dalys; B_k – empirinė konstanta (0,0825); T_p ir T_e – yra

atitinkamai laiko skalės, charakterizuojančios dalelių priklausomybę didelio mastelio sukurių judėjime:

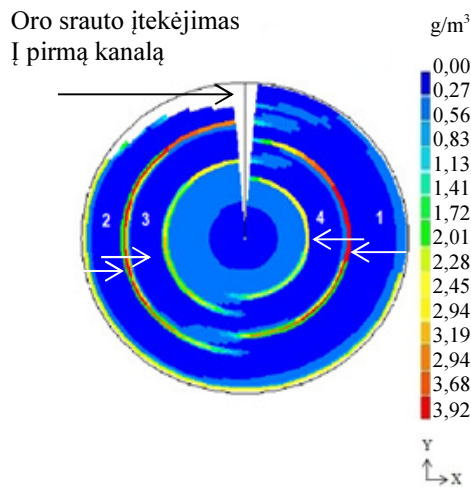
$$T_p = p_d V_s r_2 / F, \quad (5.13)$$

$$T_e = C_t k / \varepsilon, \quad (5.14)$$

čia: C_t – empirinė konstanta (0,165); V_s – absoliutus šlyties greičių vektorių dydis; F – tarpfazinės trinties jėgos absoliutinis dydis tūrio vienetu.

5.11 ir 5.12 išraiškos visada yra neigiamos ir veikia mažindamos kintamųjų turbulentinės kinetinės energijos k ir jos disipacijos greičio ε reikšmes, o turbulentinę klampą gali sumažinti arba padidinti esant KD sraute. (5.11) – (5.14) lygtys ir duoda Cheno-Wood'o k - ε modelio modifikaciją dvifaziam srautui modeliuoti. Tyrimams naudojant KD koncentraciją (medienos pelenai, tankis 2451 kg/m^3) $4,0 \text{ g/m}^3$, pervedus į fazės tūrinę dalį, gauname $r_{2,in} = 1,63 \cdot 10^{-6}$ (0,000001631).

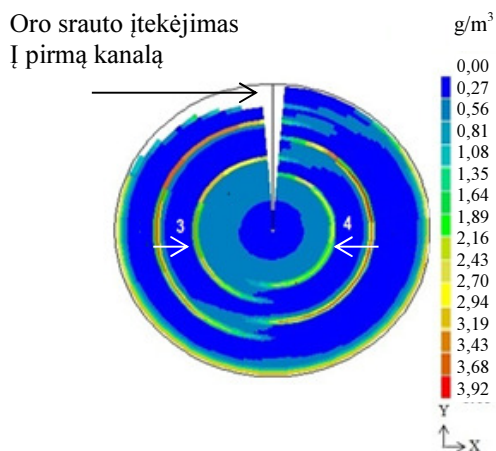
5.6–5.8 paveiksluose pateikti KD tūrinės dalies kontūrai skerspjūvyje $z = 0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant penkiakanalio ciklono pirmai žiedų padėčiai, įtekėjimo greičiui 22 m/s , dalelių dydžiams $40, 20, 10 \text{ }\mu\text{m}$ (2.4 ir 5.3 pav.).



5.6 pav. KD ($4,0 \text{ g/m}^3$) koncentracijos pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_1 pusžiedžių padėčiai, srauto įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 50,0 \text{ mikrometrų}$

Fig. 5.6. SP distribution of concentration in the cross-section $Z = 0.14 \text{ m}$ from the top of cyclone under the 1st position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{sp} = 50.0 \text{ microns}$, (4.0 g/m^3)

5.6 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai esant $50\ \mu\text{m}$ įtekėjimo KD 4 g/m^3 koncentracijai. Iš skaitinės-spalvinės skalės turime, kad šiame ciklono skerspjūvyje didžiausia KD koncentracija yra $3,92\ \text{g/m}^3$, mažiausia – $0,27\ \text{g/m}^3$. Koncentracija ciklono centre tarp artimiausių cilindrinų pusžiedžių (3 – R125 ir 4 – R93,5): $0,83\text{--}0,56\ \text{g/m}^3$. Koncentracijos artimos maksimaliai – $3,92\ \text{g/m}^3$ (raudona spalva) yra prie vidinių pusžiedžių 2 – R186 ir 1 – R152,5 sienelių. Oro srauto įtekėjime prie ciklono periferinės sienelės ir prie cilindrinų pusžiedžių (R125, R93,5) yra mažesnės koncentracijos (gelsva, žalsva spalva) apie pusę maksimalios koncentracijos $1,72\text{--}2,28\ \text{g/m}^3$. Tai yra mažesnės išcentrinės jėgos, esant mažesniai spinduliui, poveikio rezultatas. Mažiausia koncentracija yra ciklono skerspjūvyje, priešingose pusžiedžių pusėse nuo ciklono centro. Koncentracija vėl yra didesnė prie ciklono šoninių sienų, kur didesnis kampinio greičio spindulys – didesnė išcentrinė jėga. Tokie srautai susidaro KD veikiant išcentrinei jėgai ir filtracijai pro tarpkanalinius tarpus (KD srauto perėjimas iš mažesnio spindulio pusžiedžio į didesnį).

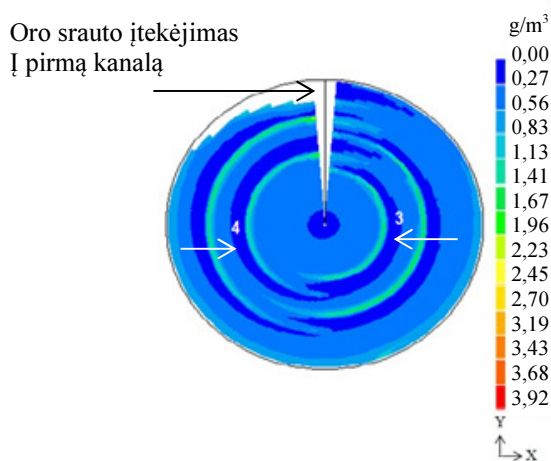


5.7 pav. KD ($4,0\ \text{g/m}^3$) koncentracijos pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14\ \text{m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono pirmajai A_1 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22\ \text{m/s}$, $d_{KD} = 20,0\ \text{mikrometrų}$

Fig. 5.7. SP distribution of concentration(R2) in the cross-section $Z = 0.14\ \text{m}$ from the top of cyclone under the 1st position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22\ \text{m/s}$, $d_{sp} = 20.0\ \text{microns}$, ($4,0\ \text{g/m}^3$)

Panašus koncentracijų išsidėstymas yra $20\ \mu\text{m}$ KD srauto ciklone, esant kitoms vienodoms sąlygoms, (5.7 pav.). Pateiktame ciklono skerspjūvyje iš skaitinės-spalvinės skalės turime, kad KD didžiausia koncentracija yra $3,92\ \text{g/m}^3$, o mažiausia koncentracija yra $0,27\ \text{g/m}^3$. Koncentracija ciklono centre tarp artimiausių pusžiedžių yra tokia 3 – R125 ir 4 – R93,5): $0,81\text{--}2,70\ \text{g/m}^3$.

Šiame paveiksle maksimali koncentracija yra $3,68 \text{ g/m}^3$, kiek mažesnė už 5.6 paveiksle pateiktą maksimalią koncentraciją ($3,92 \text{ g/m}^3$). Šis koncentracijos prie cilindrinį pusžiedžių sienelių padidėjimas atrodo kaip spiralinis kietųjų dalelių pluoštas, pereinantis vis į tolesnius nuo ciklono centro radialinius kanalus per tarpkanalinius tarpus (2.4 pav.). Tas rodo, kad kuo didesnės dalelės, tuo daugiau jų susikaupia prie ciklono kameros sienelių ir pasišalina į bunkerį į bunkerį. Ciklono efektyvumas, nustatytas eksperimentiniu būdu, yra 97,3 %, modeliavimo – 94,2 %, paklaida yra 3,1 %. Iš 5.6–5.7 paveikslų pateiktų rezultatų matyti, kad KD koncentracijos ciklono ašinėje dalyje nėra. $20 \mu\text{m}$ didesnės dalelių koncentracijos yra susidariusios tarp antrojo ir trečiojo (9, 13 matavimo taškas (2.2 (b) pav.)) bei pirmojo ir antrojo kanalo tarpų (4 matavimo taškas). 5.6 paveiksle pateiktos $40 \mu\text{m}$ dalelių koncentracijos minėtuose taškuose yra šiek tiek mažesnės. Tai rodo, kad išsišakojant oro srautui kanalo tarpuose, srauto sukurs daugiau veikia didesnės dalelės nei mažesnės. Nevienodas KD koncentracijos susitelkimas yra ant ciklono separavimo kameros bei cilindrinį pusžiedžių sienelių. Pagal 5.7 paveiksle modeliavimo efektyvumas ciklone yra 68 %, o eksperimentinio – 74,2 %, rezultatų palyginimo paklaida yra 6,2 %. Lyginant su 5.6 paveikslu rezultatais (eksperimentinis efektyvumas – 97,3 %), čia ciklono efektyvumas yra žymiai mažesnis (74,2 %), o ir paklaida yra didesnė – 6,2 %.



5.8 pav. KD ($4,0 \text{ g/m}^3$) koncentracijos pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = -0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A1 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 10,0 \text{ mikrometrų}$

Fig. 5.8. SP distribution of concentration in the cross-section $Z = -0.14 \text{ m}$ from the top of cyclone under the 1st position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{sp} = 10.0 \text{ microns}$, ($4,0 \text{ g/m}^3$)

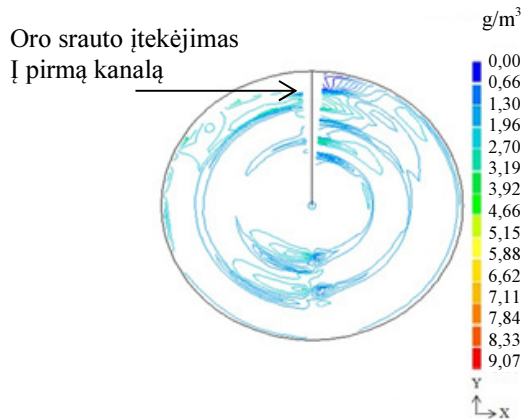
5.8 paveiksle pateiktos 10 μm KD koncentracijos išsisklaidymas ciklone. Visame ciklono tūryje KD koncentracija yra 3,92–0,27 g/m^3 . Minėto ciklono skerspjūvyje skaitinė-spalvinė skalė rodo, kad šiame skerspjūvyje KD koncentracija yra 2,2–0,27 g/m^3 , koncentracija ciklono centre tarp artimiausių cilindrinų pusžiedžių (3 – R125 ir 4 – R93,5): 0,83–0,56 g/m^3 . Tas rodo, kad šie rezultatai nuo 5.6 ir 5.7 paveikslų rezultatų jau skiriasi daugiau, nes yra mažesni srautai ir mažiau kontrastingi koncentracijų plotai. KD tūrio frakcija yra didelė visame ciklono plote, nes šios dispersijos dalelės bendrame ciklono tūryje pasiskirsčiusios vienodžiau, nėra didesnių maksimumų (maksimumas yra apie du kartus mažesnis palyginti su 5.6 ir 5.7 pav.). Šio dydžio dalelių koncentracijos pasiskirstymas yra matomas ciklono pirmjame ir antrajame kanalų centriniuose dalyje bei mažesnė koncentracijos dalis prie separavimo kameros sienelių. Šiek tiek mažesnės koncentracijos susidariusios prie trečiojo, ketvirtojo ir penktojo cilindrinų pusžiedžių vidininių pusės sienelių.

Derksenas (2003), analizuodamas tipinį cikloną, nustatė, kad mažesnės dalelės išsisklaido ciklone. Įtekėjimo dalyje didesnės dalelės išsklaidomos vienodai. Vos patekusios į ciklono korpusą, jos iš karto neprilimpa prie sienelės, kaip kad dar didesnės dalelės, bet turi galimybę patekti į silpną trumpą srautą, kuris nukreipia dujas nuo žiedo tarp sukuriu ieškiklio ir ciklono sienelės į išteklėjimo vamzdį ir pasišalina. Modeliavimo rezultatai, kaip rodo 5.8 pav., panašūs su Derkseno (2003; 2006) atliktais tyrimais. Lyginant 5.8 pav. ciklono efektyvumo 67 % su atitinkamais eksperimentiniais (75 %), palyginimo paklaida gauta $\pm 8\%$, t. y. dar didesnė negu 5.7 paveiksle.

5.9 paveiksle pateikiamas medienos pelenų 2 μm skersmens KD pasiskirstymas skerspjūvyje Z – 0,14 m nuo ciklono viršaus esant 22 m/s srauto įtekėjimo greičiui. Minėtame paveiksle pateikti KD koncentracijos izolinijų pasiskirstymo modeliavimo rezultatai, kurie yra tokie: visame ciklono tūryje nuo 0,66 iki 9,07 g/m^3 ; ciklono plokštumoje esant 0,14 m nuo ciklono viršaus, kaip rodo spalvinės-skaitinės skalės reikšmės, tačiau šioje plokštumoje kontūrai neapima visos spalvinės skalės, užsibaigia šviesiai žalia spalva (koncentracijos yra nuo 0,66 iki 4,66 g/m^3).

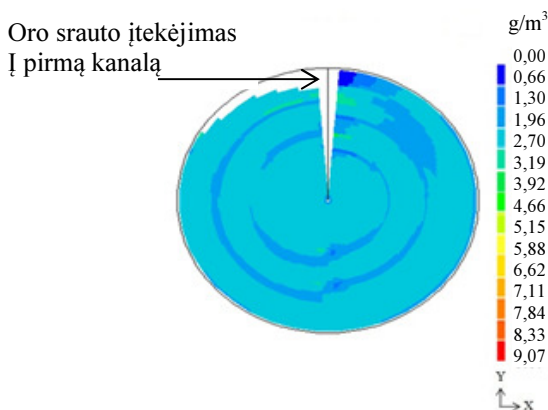
Tie patys rezultatai pateikti ir 5.10 paveiksle tik KD koncentracija pateikta kaip plotas. Analizuojant 5.9 ir 5.10 paveiksluose pateiktus rezultatus susidaro platesnis ir išsamesnis vaizdas. 5.10 paveiksle pateikti KD spalviniai koncentracijos plotai esant tai pačiai spalvinei-skaitinei scalei (5.10 pav.) apibrėžia vienodos koncentracijos plotus, kuriuose koncentracija yra nuo 0,7 iki 4,7 g/m^3 : koncentracija yra 0,7 g/m^3 (tamsi mėlyna spalva), koncentracija yra 1,3 g/m^3 (mėlyna), koncentracija yra 2,7 g/m^3 (šviesiai mėlyna), koncentracija yra 4,7 g/m^3 (žalia spalva). KD tūrio frakcija yra mažai veikiamą išcentrinį jėgų visame ciklone, nes šios dispersijos dalelės bendrame ciklono tūryje pasiskirsčiusios vienodžiau, nėra

didesnių maksimumų (maksimumas yra $4,7 \text{ g/m}^3$, o minimumas – apie $0,7 \text{ g/m}^3$). Šio dydžio dalelių ciklono efektyvumas yra neaukštas.



5.9 pav. KD ($4,0 \text{ g/m}^3$) koncentracijos izolinijų pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = -0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_3 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 2,0 \text{ mikrometrai}$

Fig. 5.9. SP distribution isolines of concentration in the cross-section $Z = -0.14 \text{ m}$ from the top of cyclone under the 3rd position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 2.0 \text{ microns}$, ($4,0 \text{ g/m}^3$)

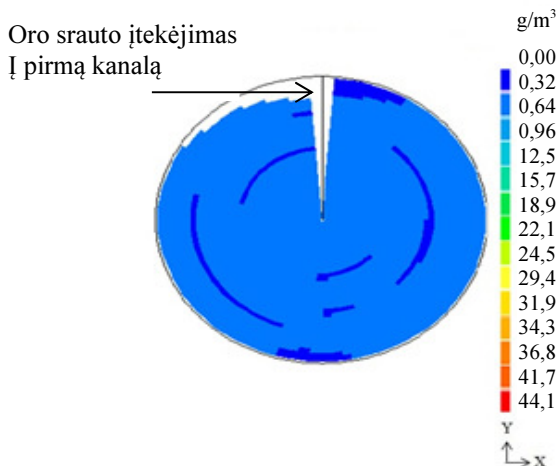


5.10 pav. KD ($4,0 \text{ g/m}^3$) koncentracijos pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = -0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_3 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 2,0 \text{ mikrometrai}$

Fig. 5.10. SP distribution of concentration in the cross-section $Z = -0.14 \text{ m}$ from the top of cyclone under the 3rd position of the cylindrical five-channel cyclone rings, inlet velocity $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 2.0 \text{ microns}$, ($4,0 \text{ g/m}^3$)

Modeliavimo būdu gautas ciklono efektyvumas naudojant (3.4) formulę yra 54 %, o eksperimentiniu (4.10 pav.) – 57 %, kuriuos lygindami gauname ± 3 % nesutaptį, o esant įtekėjimo greičiui 12 m/s – eksperimentinis efektyvumas 39 %, modeliavimo – 45 %, taigi nesutaptis sudaro $\pm 15,4$ %, vidutinė santykinė paklaida sudaro 9,2 %.

5.11 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai esant 1 μm KD, kuriuos reikia analizuoti kartu su 5.12 pav. Sunkiausiai pavyksta realizuoti dvifazio srauto modeliavimą, nes koncentracijos srautai beveik visoje plokštumoje yra vienodi, taigi KD nesikaupia ar kaupiasi labai nežymiai prie ciklono kietųjų sienelių. Išcentrinė jėga jų beveik neišskiria iš dujų srauto, tad tokio dydžio KD yra tarsi dujinė medžiaga, tačiau daugkartinio filtravimo proceso ir modeliavimo metu dalis KD yra iš dujų srauto atskiriama.

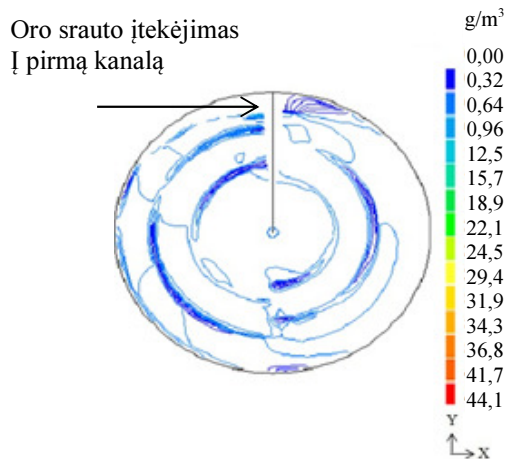


5.11 pav. KD ($4,0 \text{ g/m}^3$) koncentracijos pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14 \text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_3 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{KD} = 1,0 \text{ mikrometras}$

Fig. 5.11 SP distribution of concentration in the cross-section $Z = 0.14 \text{ m}$ from the top of cyclone under the 3rd position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22 \text{ m/s}$, $d_{sp} = 1.0 \text{ micron}$, (4.0 g/m^3)

5.11 ir 5.12 paveiksle spalvinės-skaitinės skalės yra vienodos, o koncentracijų plotai pateikti skirtingais ir papildančiais vienas kitą būdais: plotais ir izolinijomis. Kreivės rodo koncentraciją, kuri yra nuo $0,32$ iki $0,96 \text{ g/m}^3$ ir yra išsidėsčiusi visame ciklono tūryje, KD nesikaupia prie vidinių pusžiedžių pusių ir prie ciklono šoninių sienų, tad čia nėra didesnės koncentracijų pasiskirstymo kontrastingumo, ciklono efektyvumas $30,6 \text{ \%} - 50 \text{ \%}$. Modeliavimo metu gauta ciklono efektyvumo reikšmė yra apie $33 \text{ \%}$, o eksperimentinė (4.10 pav.) – 48

%, taigi rezultatų nesutaptį sudaro ± 15 %, o esant įtekėjimo greičiui 12 m/s eksperimentu nustatytas efektyvumas – 30,6 %, modeliavimu – 33 %, taigi nesutaptis sudaro $\pm 2,4$ %. Mažų dalelių ($1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$) ir įtekėjimo koncentracijų ($0,5\text{--}1\text{ g/m}^3$) uždaviniais matematinis modelis $\pm 15,0$ % tikslumu aproksimuoja eksperimentinius ciklono efektyvumo rezultatus (5.9–5.12 pav.).



5.12 pav. KD ($4,0\text{ g/m}^3$) koncentracijos izolinių pasiskirstymas skerspjūvyje $Z = 0,14\text{ m}$ nuo ciklono viršaus esant cilindrinio penkiakanalio ciklono A_3 pusžiedžių padėčiai, įtekėjimo greičiui $u_{in} = 22\text{ m/s}$, $d_{KD} = 1,0\text{ mikrometras}$

Fig. 5.12. SP distribution isolines of concentration in the cross-section $Z = 0,14\text{ m}$ from the top of cyclone under the 3rd position of cylindrical five-channel cyclone half-rings, inlet velocity $u_{in} = 22\text{ m/s}$, $d_{SP} = 1.0\text{ micron}$, (4.0 g/m^3)

5.12 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai esant $1\text{ }\mu\text{m}$ KD, $4,0\text{ g/m}^3$ įtekėjimo koncentracijai, kurios pasiskirstymas yra toks: visame ciklono tūryje proceso metu KD koncentracija yra nuo $0,32$ iki $44,1\text{ g/m}^3$. Mėlynos spalvos skaitinės skalės reikšmės yra kaip ir 5.11 pav. Kontūro izolinijos apima vienodos koncentracijos plotus, likusioji ciklono plokštumos dalis (5.11 pav. šviesesnė mėlyna spalva, 5.12 pav. – balta, nespaltota dalis) turi koncentraciją, lygią ar kiek didesnę už $0,96\text{ g/m}^3$.

Kaip matyti iš pateiktų 5.6–5.8 paveikslų, didesnės dalelės juda link sienelės ir atsiskiria dėl didelės išcentrinės jėgos. Dalelių skersmeniui didėjant iki 10 ir $20\text{ }\mu\text{m}$, jos ima kauptis ant šoninių ciklono sienelių ir cilindrinų pusžiedžių sienelių. Tačiau, kaip teigia Gujun ir kt. (2008), 1 ir $5\text{ }\mu\text{m}$ dydžio dalelės prie sienelių nesikaupia.

Kietųjų dalelių koncentracijos pasiskirstymo rezultatai rodo, kad išcentrinė jėga neturi didelės įtakos mažų dalelių judėjimui ir lemia žemesnį mažų dalelių surinkimo efektyvumą. Modeliavimo metu $1,0 \mu\text{m}$ dydžio dalelių pasiskirstymas pastebimas visame ciklono cilindro tūryje su nežymiu koncentracijos padidėjimu prie kietų sienelių esant įtekėjimo greičiui 22 m/s .

Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų analizė

Lygtys šiam uždaviniui yra tokios: trys Reinoldso lygtys u , v ir w greičio komponentėms, tolydumo ir dvi turbulencijos lygtys, visų šių lygčių apibendrinta vektorinė forma yra 5.1 lygtis. Kraštinės sąlygos prie kietųjų sienų (cilindrinio korpuso, abiejose pusėse cilindrinį pusžiedžių) taikytos kaip prilipimo prie sienelių esant turbulentiniam srautui, t. y. taikant logaritminio greičio profilio dėsnį. 5.1 lygčių sistema buvo naudojama tiek stacionariam aerodinaminiam procesui, tiek nenuostoviam. Esant žinomai įtekėjimo koncentracijai ($0,5$, $1,0$, $2,0$ ir $4,0 \text{ g/m}^3$) belieka gauti ištekėjimo per angą (3.8 pav.) koncentraciją (iš 440 lokalų koncentracijos reikšmių surasti vidutinę – $11 \times 40 = 440$) ir pagal (3.4) formulę apskaičiuoti kiekvieno atvejo ciklono efektyvumą. Galima gauti geriausią efektyvumo sprendinį parenkant įvairius turbulencijos modelius, iš jų ir RSM.

5.3 lentelė. Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių (žr. 3.4 poskyrį) ir modeliavimo rezultatų palyginimas: medienos pelenų KD, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, koncentracija $0,5\text{--}4 \text{ g/m}^3$, KD skersmuo $0,52\text{--}50 \mu\text{m}$ esant penkiakanalio ciklono A_1 pusžiedžių padėčiai

Table 5.3. Comparison of experimental (see Section 3.4) and simulation results of general efficiency of five-channel cyclone. Wooden ashes SP, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration – $0.5\text{--}4.0 \text{ g/m}^3$, SP diameter – $0.52\text{--}50 \mu\text{m}$. A_1 position of half-rings

Įtekėjimo greitis, m/s	Koncentracija, g/m^3	Eksperimentinių tyrimų efektyvumas, %	Skaitinių tyrimų efektyvumas, %	Santykinė paklaida, %
12	4,0	90,5	95,8	-5,3
12	0,5	88,5	91,4	-2,9
14	4,0	94,3	96,0	-1,7
16	4,0	94,7	96,5	-1,8
22	4,0	95,7	96,8	-1,1
22	0,5	91,9	95,8	-3,9

Vidutinė santykinė paklaida $\pm 2,79 \%$

Ciklono efektyvumo palyginimo rezultatų sutapimo tikslumas yra labai geras, nes tai yra penkiakanalio ciklono A_1 pusžiedžių padėtis, kurioje gali būti pasiekti gana tikslūs modeliavimo rezultatai. Įtekėjimo koncentracija imta kaip

kraštinė sąlyga, o išteklėjimo KD koncentracija imta kaip integralinė (integruojant visu paviršiaus plotu išteklėjimo angos viso KD koncentracijos 440 reikšmių).

<50 μm dalelėms ciklono efektyvumo skaitinio modeliavimo rezultatai yra artimi fizinio eksperimento rezultatams (viso keturi rezultatai), o 5.3 lentelėje – iš 6 palyginimo su eksperimentiniais rezultatais gautas aukštas (vidutinė santykinė paklaida) $\pm 2,8 \%$ sutapimo laipsnis, kas rodo teorinio modelio tinkamumo tokio pobūdžio (dvifaziams) uždaviniams skaičiuoti.

5.4 lentelė. Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių (žr. 3.4 poskyrį) ir modeliavimo rezultatų palyginimas. Medienos pelenų KD, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, koncentracija 0,5–4,0 g/m^3 , KD skersmuo 0,52–50 μm esant. A₃ pusžiedžių padėčiai

Table 5.4. Comparison of experimental (see Section 3.4) and simulation results of general efficiency of five-channel cyclone. Wooden ashes SP, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration – 0.5 – 4.0 g/m^3 , SP diameter – 0.52–50 μm . A₃ position of half-rings

Ištekėjimo greitis, m/s	Eksperimentinių tyrimų, efektyvumas, %	Skaitinių tyrimų, efektyvumas, %	Santykinė paklaida, %	Koncentracija, g/m^3
12	89,5	94,7	-5,2	0,5
12	95,8	94,2	1,7;	4,0
22	93,7	94,9	-1,2	0,5
22	97,3	94,3	3,1;	4,0

Vidutinė santykinė paklaida – $\pm 2,8 \%$

Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo (trečias skyrius) eksperimentinių ir skaitinių rezultatų palyginimas parodė, kad tiek esant pirmajai, tiek trečiajai cilindrinio pusžiedžių padėčiai sutapimas yra vienodai geras: eksperimentiniai rezultatai rodė 93,9–97,3 % efektyvumą, skaitiniai – 94,2–94,7 %.

Visai kitoks palyginimo rezultatų sutapimo laipsnis yra gautas tiriant smulkiadisperses KD, aprašytas disertacijos ketvirtajame skyriuje. Lyginami efektyvumai: eksperimentiniai – nuo 39 iki 64,8 %, modeliavimo – nuo 50,4 iki 55,4 %. Pateikti 5.3 ir 5.4 lentelių rezultatai yra aukšto efektyvumo, palyginti su 5.5 lentelėje pateiktais žemo efektyvumo rezultatais, kurių sutapimo laipsnis yra vidutinis.

Penkiakanalio cilindrinio ciklono dujų srauto eksperimentinių ir modeliavimo greičių kanaluose palyginimo vidutinės santykinės paklaidos, esant 12, 16 ir 22 m/s greičiui, atitinkamai gautos – 7,4 %, 7,2 % ir 13,0 %. Bendra rezultatų palyginimo vidutinė santykinė paklaida yra $\pm 9,2 \%$. Šiuo atveju bendra santykinė palyginimo paklaida yra 2,1 % didesnė už keturkanalio ciklono eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų paklaidą.

5.5 lentelė. Penkiakanalio ciklono smulkiadisversių KD efektyvumo eksperimentinių (žr. 4.2 poskyrį) ir modeliavimo rezultatų palyginimas: medienos pelenų KD, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, koncentracija $0,5\text{--}4,0 \text{ g/m}^3$, KD skersmuo $1\text{--}2 \text{ }\mu\text{m}$, esant A_3 pusžiedžių padėčiai

Table 5.5. Comparison of experimental (see Section 3.4) and simulation results of general efficiency of five-channel cyclone. Wooden ashes SP, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, concentration – $0.5\text{--}4.0 \text{ g/m}^3$, SP diameter – $1\text{--}2 \text{ }\mu\text{m}$. A_3 position of cylindrical half-rings

Įtekėjimo greitis, m/s	Įtekėjimo koncentracija, g/m^3	KD, μm	Eksperimentinių tyrimų efektyvumas, %	Skaitinių tyrimų, efektyvumas, %	Santykinė paklaida, %
14	0,5	1,0	44,3	50,4	-10,3
14	4,0	1,0	46,9	50,6	-7,9
16	0,5	1,5	39,6	49,7	-25,5
16	0,5	2,0	44,5	54,2	21,8
22	4,0	1,5	55,5	52,5	5,4
22	4,0	2,0	64,8	55,4	14,5

Vidutinė santykinė paklaida – $\pm 14,23 \text{ }\%$

Trečiajame disertacijos skyriuje pateikti cilindrinio daugiakanalio ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių tyrimų rezultatai. Palyginus penkiakanalio ciklono bendrąjį eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų efektyvumą (medienos pelenų KD, $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, koncentracija $0,5\text{--}4 \text{ g/m}^3$, KD skersmuo – $0,47\text{--}40 \text{ }\mu\text{m}$) A_1 pusžiedžių padėtis, vidutinė santykinė paklaida yra gauta $\pm 1,48\%$, o esant A_3 pusžiedžių padėčiai – $\pm 1,41 \text{ }\%$. Panaudojant integralinę KD ištekejimo per ciklono angą 6 (2.1 pav.) skaičiavimo metodiką gauti skaitiniai rezultatai yra gana artimi eksperimentiniams.

Ketvirtąjį disertacijos skyriaus eksperimentiniams rezultatams buvo atlikti analogiški teoriniai skaičiavimai. Palyginus penkiakanalio ciklono skirtingo skersmens KD eksperimento ir modeliavimo metu nustatytus efektyvumo rezultatus (medienos pelenų KD $\rho = 2451 \text{ kg/m}^3$, koncentracija $0,5\text{--}4,0 \text{ g/m}^3$, KD aerodinaminis skersmuo $1,0\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$), esant A_3 cilindrinų pusžiedžių padėčiai, vidutinė santykinė paklaida yra $\pm 14,23 \text{ }\%$. Šiuo atveju paklaida gauta žymiai didesnė, palyginti su trečiojo skyriaus rezultatais, nes čia tirtos smulkiadisversės KD, kurioms ciklono efektyvumą buvo sunkiau nustatyti tiek eksperimentiniu, tiek modeliavimo būdu.

Naudojant aprašytas ciklono modifikacijas, atliktas skaitinis modeliavimas su kitais įtekėjimo greičio dydžiais. Išanalizuoti skaitinio modeliavimo rezultatai ir pasiūlyta optimaliausia penkiakanalio ciklono konfigūracija (III ciklono pusžiedžių padėtis) su rekomendacija tolesniems teoriniams tyrimams. Kietųjų dalelių koncentracijos pasiskirstymo rezultatai rodo, kad išcentrinė jėga neturi didelės įtakos mažų dalelių judėjimui ir lemia

žemesnį mažų dalelių surinkimo efektyvumą. Modeliavimo metu $1,0 \mu\text{m}$ dydžio dalelių pasiskirstymas pastebimas visame ciklono cilindro tūryje esant įtekėjimo greičiui 12–22 m/s.

Siekiant ištirti daugiakanalio ciklono parametrų įtaką kietųjų dalelių atskyrimui iš dujų srauto sudarytos bendro efektyvumo nustatymo skaičiavimo metodikos (skaitinis eksperimentas).

Ciklono efektyvumo skaitinis eksperimentas, atitinkantis fizikinį modelį (geometriją ir lygtis), naudojant trimates Reinoldso (5.1–5.5 lygtis) su Chen-Wood'o turbulencijos modeliu (5.11–5.14 lygtys), panaudojant integralinę KD ištekėjimo išraišką yra tinkama priemonė prognozuojant daugiakanalio ciklono KD procesus taikant įvairias pradines kraštines sąlygas. Sudaryta bendro efektyvumo nustatymo skaičiavimo metodika (skaitinis eksperimentas) su $\pm 15,0\%$ tikslumu aproksimuojanti eksperimentinius dvifazio srauto rezultatus. Analizuojant turimus eksperimentinius rezultatus galima nustatyti didesnių teorinių nesusitapčių priežastis. Jis galėtų būti viena iš priemonių teoriniam modeliavimui, testavimui ir tolesniam modelio tobulinimui.

5.4. Penktojo skyriaus išvados

1. Skaitinio modelio taikymas leido įvertinti modeliavimo duomenų patikimumą. Dėl mažų paklaidų šis modelis gali būti taikomas vienfazio srauto greičio pasiskirstymo keturkanalio ciklono kanaluose, esant įtekėjimo greičiui nuo 12 iki 22 m/s, vertinti, skaitiniam modeliui neatititinkant eksperimentinių rezultatų – $\pm 7,1\%$; o penkiakanaliam ciklonui – $\pm 9,2\%$. Skaitinis modeliavimas priimtinu tikslumu atitinka eksperimentinius greičio dydžius keturkanalio ir penkiakanalio ciklono kanaluose.

2. Penkiakanalio ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas naudojant medienos pelenų KD, esant $0,5\text{--}4 \text{ g/m}^3$ koncentracijai, kai KD skersmuo $0,47\text{--}50 \mu\text{m}$: esant, vidutinė santykinė paklaida yra $\pm 1,48\%$, ir $\pm 1,41\%$. Skaitinis modelis gerai atitinka eksperimentinius ciklono efektyvumo rezultatus šalinant iki $50 \mu\text{m}$ aerodinaminio skersmens kietąsias daleles.

3. Vidutinė santykinė paklaida tarp eksperimentinio ir modeliavimo rezultatų yra $\pm 14,2\%$, kai penkiakanaliame ciklone šalinamos $1\text{--}2 \mu\text{m}$ aerodinaminio skersmens medienos pelenų KD, esant $0,5\text{--}4,0 \text{ g/m}^3$ koncentracijai.

4. Kietųjų dalelių koncentracijos ciklone pasiskirstymo rezultatai rodo, kad išcentrinė jėga neturi didelės įtakos mažų dalelių judėjimui ir lemia žemesnį mažų dalelių surinkimo efektyvumą, (30,6–50 %). Aerodinaminio $1,0 \mu\text{m}$ skersmens kietųjų dalelių ciklone šalinimo efektyvumas, kai įtekėjimo greitis –

22 m/s, siekia – 48,0 %, o modeliavimo metu nustatytas 33 % efektyvumas, taigi rezultatų nesutaptis – ± 15 %.

5. Sudaryta bendro ciklono efektyvumo nustatymo skaičiavimo metodika (skaitinis eksperimentas), atitinkanti eksperimentinius dvifazio srauto rezultatus su $\pm 15,0$ % paklaida. Gautas matematinis-skaitinis modelis gali būti naudojamas kaip tyrimo priemonė, esant kitiems parametrams ir įtekėjimo greičio dydžiams

Inžineriniai sprendimai

Šiame skyriuje aprašomas oro valymo įrenginys – cilindrinis daugiakanalis ciklonas, pasižymintis aukštu efektyvumu šalinant iš oro srauto kietąsias daleles (KD). Šį įrenginį taikyti skatina didėjanti oro tarša KD bei griežtėjantys aplinkos apsaugos reikalavimai dėl sveikatai žalingų KD išmetimo į orą.

Parengtos ir įteiktos dvi patentinės paraiškos patentui gauti: Daugiakanalis ciklonas (cilindrinis korpusas). LR Valstybinis patentų biuras paraiškos NR. 2011 041 (Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas P.; Sigal, A.; Serebryanskyy, D.; Jakštonienė, I. 2011). Daugiakanalis ciklonas (spiralinis korpusas). Ukrainos valstybiniam intelektinės nuosavybės departamentui, paraiškos Nr. 2011 03389 (Baltrėnas, P.; Serebryanskyy, D.; Jakštonienė, I. 2011).

6.1. Daugiakanalio ciklono taikymo sritys ir konstrukciniai sprendimai

Cilindrinis daugiakanalis ciklonas yra skirtas orui (dujoms) valyti, išskiriant iš jų kietąsias daleles (KD). Pagal valymo metodą šis įrenginys priskiriamas prie sausojo oro valymo įrenginių. Pagal atliktus eksperimentinius tyrimus šis įrenginys gali būti naudojamas medienos pelenams ir cemento klinkeriui šalinti.

Norint cilindrinį daugiakanalį cikloną pritaikyti kitam oro debitui, reikia geometrinius ciklono parametrus (ciklono separavimo kameros skersmenį ir aukštį) perskaičiuoti pagal šią apytikslę teorinę formulę:

$$G_2 = G_1 \times 4 \sqrt{\frac{X_2}{X_1}}, \quad (6.1)$$

čia: G_2 – projektuojamojo ciklono geometrinis parametras, G_1 – patobulinto cilindrinio daugiakanalio ciklono geometrinis parametras, m; m ; X_1 – sukurto ciklono debitas, m^3/s ; X_2 – projektuojamo ciklono debitas, m^3/s .

Projektuojamo ciklono korpuso skersmenį padaline iš patobulinto ciklono skersmens surandame geometrinio panašumo koeficientą – 1,18, kuris taikomas projektuojamo ciklono pusžiedžių spindulių suradimui ir išdėstymui ciklono separavimo kameroje. O projektuojamo ciklono reguliuojamų pusžiedžių skersp-jūvio plotį galime paskaičiuoti žinant periferinio ir tranzitinio srauto santykius (2.5 lentelė).

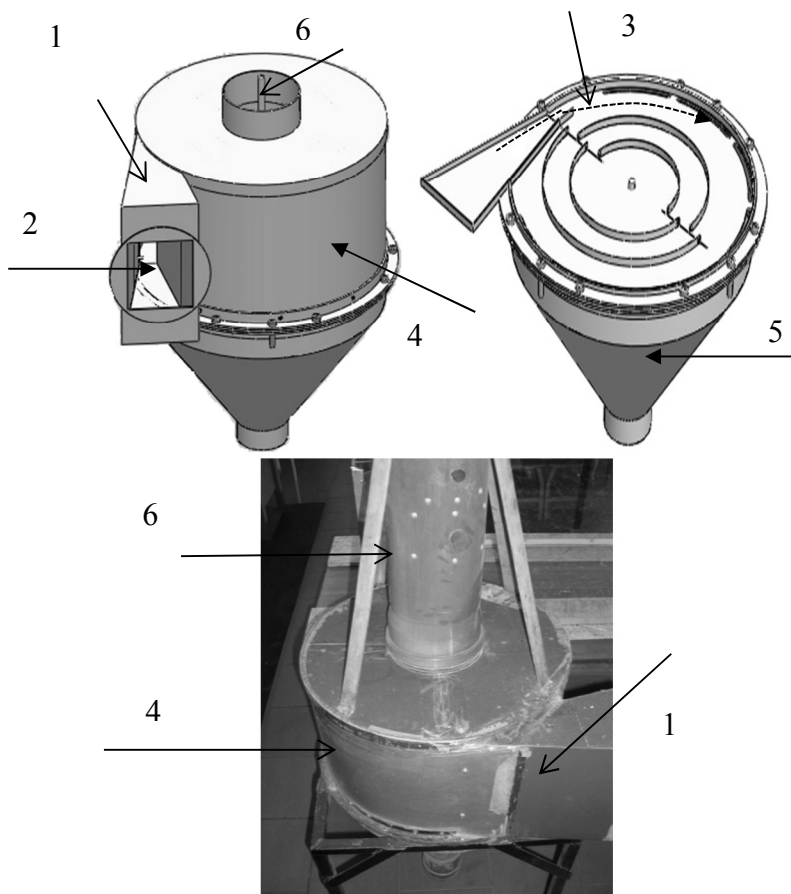
Ši empirinė formulė gauta atlikus matematinę to paties tipo daugiakanalių ciklonų, valančių skirtingus užteršto kietosiomis dalelėmis oro debitus, analizę. Duomenys matematinei analizei imti iš internetinio šaltinio: <http://www.ecologenergy.narod.ru/Publish/m0219.pdf> lyginant 2500 ir 10 000 m^3/h debito daugiakanalius ciklonus.

Patobulintas eksperimentinis cilindrinis daugiakanalis ciklonas su reguliuojama pusžiedžių tarpų sistema

Šis cilindrinis daugiakanalis ciklonas turi skirtingo spindulio cilindrinis pusžiedžius su reguliuojamais tarpais bei plyšius separavimo kameroje kietosioms dalelėms pasišalinti (6.1, 6.2 pav.). Patobulinta ciklono konstrukcija padidina KD šalinimo efektyvumą. Aukštas išvalymo laipsnis pasiekiamas, kai kietosios dalelės yra valomos išcentrine jėga, filtravimo būdu bei reguliuojant pusžiedžių tarpų plotą. Siekiant nukreipti oro srauto tekėjimą tik į pirmąjį kanalą, prie tangentinės oro srauto angos yra įrengta pertvara. Pertvaros aukštis yra lygus kameros aukščiui, o plotis – įtekėjimo angos pločiui. Tokia daugiakanalio ciklono konstrukcija skirtingos kilmės dulkėms leidžia individualiai reguliuoti įrenginio sistemą maksimaliam kietųjų dalelių valymui iš oro srauto.

Įrenginio matmenys: cilindrinio korpuso skersmuo – 0,50 m, bendras ciklono aukštis (su kūginiu bunkeriu) – 0,72 m, srauto išteklėjimo angos skersmuo – 0,16 m, srauto įtekėjimo (į pirmąjį kanalą) angos dydis – $0,034 \times 0,29, m^2$.

Įrenginio konstrukciją sudaro konfuzorius (1) užteršto kietosiomis dalelėmis oro srauto įtekėjimo (2) oro srauto įtekėjimo anga (3) į pirmą kanalą, cilindro formos kamera (4), kūginis bunkeris (5), išvalyto oro srauto išteklėjimo anga (6), (6.1, 6.2 pav.).



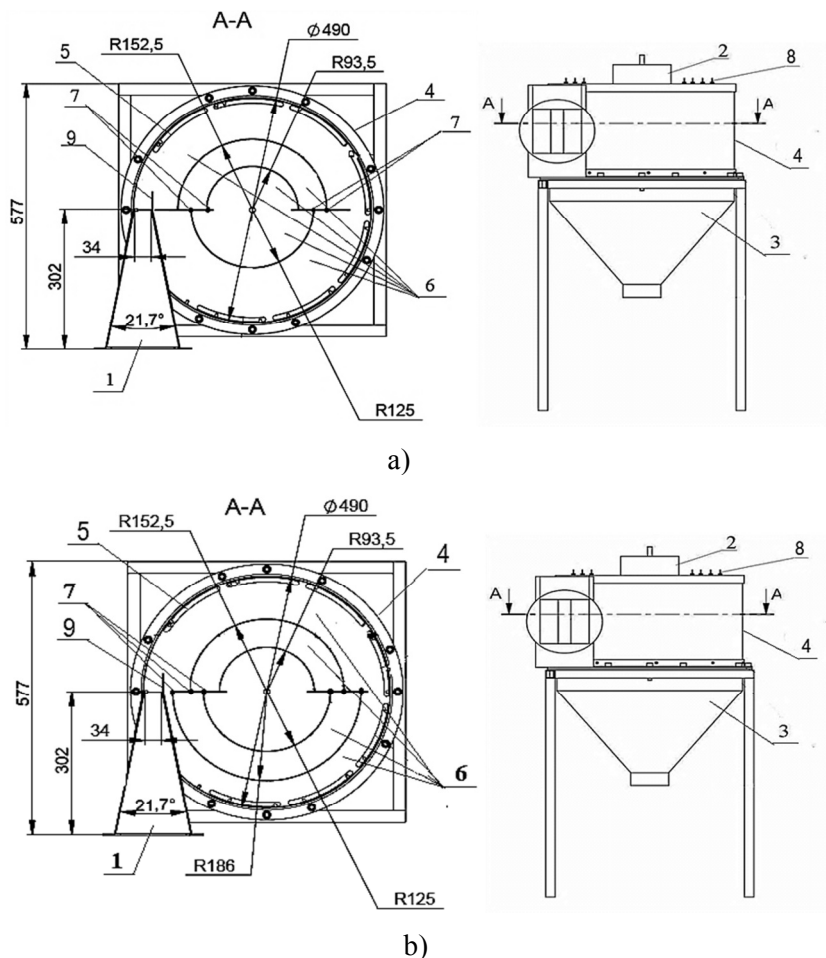
6.1 pav. Eksperimentinis cilindrinis daugiakanalis ciklonas:
 1 – konfuzorius, 2 – oro srauto įtekėjimo anga į konfuzorių, 3 – oro srauto
 įtekėjimas į cikloną (į pirmąjį kanalą), 4 – separavimo kamera,
 5 – bunkeris, 6 – oro srauto ištekėjimo anga/ortakis

Fig. 6.1. Experimental cylindrical multichanneled cyclone : 1 – confusor,
 2 – air flow inlet into the confusor opening, 3 – air flow inlet into the
 cyclone (into the first channel), 4 – separation chamber, 5 – tank,
 6 – air flow outlet opening/ duct

Įrenginio veikimo principas

Oro srautas tangentine kryptimi įteka pro įtekėjimo angą (1) ir patenka į kamerą (4), kurioje cirkuliuojantis oro srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose (6) ir filtruojasi per oro srautą – kietųjų dalelių pusžiedžių tarpus (7). Oro srauto

tekėjimas tik į pirmą kanalą nukreipiamas pertvara nuo pusžiedžių pusės (9). Kanaluose (6) esančios kietosios dalelės, veikiamos išcentrinės ir svorio jėgos, pasišalina per išsidėsčiusius plyšius seperavimo kameros dugne (5) ir patenka į kūginį bunkerį (3), kuriame pasišalina didžioji kietųjų dalelių masė. Likusios smulkesnės dalelės grįžta pro pusžiedžių tarpus (7) į aktyviąją kanalų (6) zoną, filtruojasi toliau ir patenka į kūginį bunkerį (3). Nuosekliai perėjęs visus kanalus, išvalytasis oro srautas išteka iš sistemos per išėjimo angą (2) (6.2 a, b pav.).



6.2 pav. Cilindrinio keturkanalio ir penkiakanalio ciklono su reguliuojamais pusžiedžių tarpais principinė schema

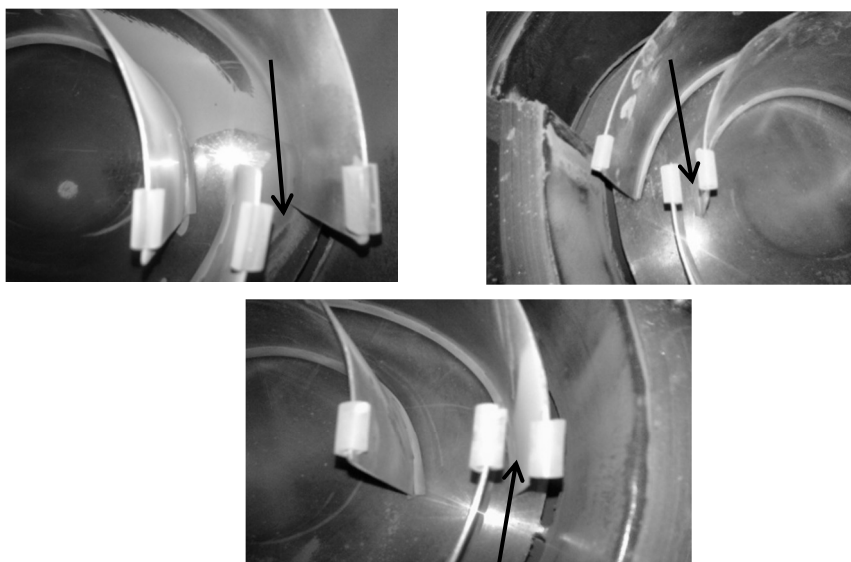
Fig. 6.2. Principal scheme of cylindrical four-channel and five channel cyclone with adjustable curvilinear channel clearances

Remiantis tyrimų rezultatais parengta ir įteikta patentinė paraiška LR patentų biurui, paraiškos NR. 2011 041 (Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Sygal, A.; Serebryansky, D.; Jakštonienė, I. 2011).

Išradimo tikslas – patobulinti ciklono konstrukciją bei padidinti kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą iš oro srauto. Aukštas KD išvalymo laipsnis pasiekiamas, kai kietosios dalelės yra šalinamos išcentrine jėga, filtravimo būdu bei reguliuojant cilindrinį pusžiedžių tarpus (6.3 pav.).

Eksperimentiniais tyrimais buvo nustatyta, kad KD šalinimo iš oro srauto efektyvumas didėja, mažėjant pusžiedžių tarpų skerspjuvio pločiui. Dėl to cirkuliuojančiame sraute ciklono kanaluose padidėja dinaminis slėgis bei išcentrinė jėga. Didžioji dalis mažesnio aerodinaminio skersmens kietųjų dalelių, turinčių mažesnę svorio jėgą, yra stipriau veikiamos išcentrinės jėgos, patenka į mažesnio kreivumo kanalus ir pasišalina iš pirmojo ir antrojo kanalų į kūginį ciklono bunkerį. Be to, pusžiedžių tarpų plotį ir atstumą tarp pusžiedžių galima keisti, pasinaudojus įrengta fiksuojamąja priemone ciklono dangtyje (8) (6.2 pav.).

Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad cilindrinis daugiakanalis ciklonas efektyviai išvalo medienos kuro pelenais ir cemento klinkerio dalelėmis užterštą oro srautą.



6.3 pav. Cilindrinio daugiakanalio ciklono reguliuojami pusžiedžių tarpai
Fig. 6.3. Adjustable clearances of curvilinear channels for cylindrical multi-channel cyclone

Autorės atlikti keturkanalio spiralinio ciklono tyrimai, Ukrainos mokslų akademijos šiluminės fizikos institute, Kijeve, naudojant Čerkasovo elektrinės anglies pelenus (tankis – 2500 kg/m^3) bei silicio karbidą (tankis – 3200 kg/m^3). Siekiant įvertinti kietųjų dalelių įtaką eksperimentinio įrenginio darbui, buvo tiriamas bendras kietųjų dalelių šalinimo, reguliuojant pusžiedžių tarpus esant pradinei kietųjų dalelių koncentracijai – 10 ir 22 g/m^3 ir 5 m/s – 7 m/s oro srauto greičiui, efektyvumas. Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad didžiausias bendras kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas pasiekiamas, naudojant anglies pelenus – 98,5 %, silicio karbidą – 92,5 %. Toks valymo efektyvumas pasiekiamas, kai pusžiedžių tarpų plotis esant 1247 Pa ir 1290 Pa aerodinaminiam pasipriešinimui – 3 mm.

Spiralinis daugiakanalis ciklonas rekomenduojamas tolesniems eksperimentiniams tyrimams norint nustatyti šias įrenginio efektyvumo priklausomybes: kietųjų dalelių koncentraciją, tankį, oro srauto greitį, oro srauto kiekio pasiskirstymą bei geometrinį parametrų įtaką.

Remiantis tyrimų rezultatais parengta ir įteikta spiraliniam daugiakanaliui ciklonui patentinė paraiška Ukrainos valstybiniam intelektinės nuosavybės departamentui, paraiškos Nr. 2011 03389 (Baltrėnas, P.; Serebryansky, D.; Jakštonienė, I. 2011).

6.2. Šeštojo skyriaus išvados

1. Kietųjų dalelių šalinimui iš oro srauto patobulintas cilindrinis daugiakanalis ciklonas, turi reguliuojamą pusžiedžių tarpų sistemą. Penkiakanalio ciklono bendras efektyvumas – 97,6 %, esant 7 mm ir 11 mm pusžiedžių tarpo skerspjūvio pločiui, kai periferinio ir tranzitinio srauto dalys siekia 45% ir 55 % (4, 5 matavimo taškai), 19 % ir 81 % (16, 17 matavimo taškai) bei 13 % ir 87 % (12, 13 matavimo taškai).

2. Patobulinto penkiakanalio ciklono su reguliuojama pusžiedžių tarpų sistema efektyvumas prilygsta šešiakanaliui išcentriniam filtrui.

3. Sudaryta empirinė formulė siūloma taikyti kitų oro debitų cilindriniams daugiakanaliams ciklonams su kintama pusžiedžių tarpų sistema.

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad daugiakanalių ciklonų (išcentriniai filtrai) kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas priklauso nuo cilindrinų pusžiedžių skaičiaus įrenginyje. Todėl remiantis kitų mokslininkų patirtimi yra galimybė patobulinti ciklono konstrukciją.

2. Maksimalų 97,6 % kietųjų dalelių šalinimo iš dujų (oro) srauto efektyvumą galima pasiekti penkiakanaliame ciklone reguliuojant pusžiedžius.

3. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad didėjant kietųjų dalelių koncentracijai nuo 0,5 iki 4 g/m³ bei oro srauto greičiui nuo 12 iki 22 m/s, kai periferinio srauto dalis – 45 %, o tranzitinio srauto dalis – 55 % bendras keturkanalio ciklono efektyvumas siekia – 95,8 %, penkiakanalio – 97,6 % šalinant iš oro srauto mažesnes nei 50 μm kietąsias daleles ir 65,9 – 83,5 % mažesnes nei 20 μm daleles.

4. Penkiakanalio ciklono efektyvumas šalinant 10 μm kietąsias daleles siekia 99,8 %, tai lėmė kietųjų dalelių tankis – 3160 kg/m³, didžiausia 4 g/m³ koncentracija, oro srauto greitis – 22 m/s, kai periferinio oro srauto kiekio pasiskirstymas siekė 45 %, o tranzitinio – 55 %.

5. Kietųjų dalelių koncentracijos ciklone pasiskirstymo rezultatai rodo, kad išcentrinė jėga neturi didelės įtakos 1 μm smulkiadispersinių dalelių judėjimui ir lemia 18–50 % žemesnį dalelių šalinimo efektyvumą.

6. Nustatyta, kad mažesnėms nei $50\ \mu\text{m}$ dalelėms penkiakanalio ciklono efektyvumo skaitinio modeliavimo rezultatai yra artimi fizinio eksperimento rezultatams, esant įtekėjimo greičiui nuo 12 iki 22 m/s bei $0,5\text{--}4,0\ \text{g/m}^3$ kietųjų dalelių koncentracijai. Gautų rezultatų vidutinė santykinė paklaida $\pm 2,8\ \%$ rodo teorinio modelio tinkamumą tokio pobūdžio (dvifaziams) uždaviniams skaičiuoti.

7. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad nustatant optimalius reguliuojamų pusžiedžių tarpus penkiakanalis ciklonas efektyviau šalina kietąsias daleles nei šešiakanalis išcentrinis filtras, t. y.: klinkerio kietąsias daleles – 3,4 %, medienos pelenus – 3,3 %, kvarcinio smėlio miltus – 2,6 %.

Literatūra ir šaltiniai

Anuszewski, J.; Larson, T. V. A. 1992. Summary of Emissions Characterizations and Non – Cancer Respiratory Effects of wood smoke. *University of Washington, Dept of Civil Engineering*. 25 p.

Aplinkos būklė. 2001. Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerija. Vilnius, 2002. Aplinkos oro kokybės vertinimo vadovas. 2006. Nacionalinių taršos mažinimo bei oro kokybės vertinimo programų paruošimas *EuropeAid/114743/D/SV/LT*.

Atakan, A.; Irfan, K. 2003. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Department of Mechanical Engineering, Uludag University, Bursa 16059, Turkey. Aerosol Science* 34 (2003): 937–955.

Bernardo, S.; Mori, M.; Peres, A.P.; Dionísio, R.P. 2005. 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles, *Powder Technology* 162(2006): 190–200.

Boysan, F.; Ayers, W.H.; Swithenbank, J. A. 1982 A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design, *Institution of Chemical Engineers* 60: 222–230.

Carruthers D. J.; Holroyd R. J.; Hunt J. C. R.; Weng W. S.; Robins A. G.; Apsley D. D.; Thompson D. J. and Smith, F. B. 1994. *Atmospheric Dispersion Modeling System (ADMS)*. Cambridge Environmental Research Consultants.

Chu K.W.; Wang B.; Yu A.B.; Vince A. 2009. CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones. *Powder Technology* 193(2009): 235–247.

Coker, K. Understand cyclone design, *Chem. Eng. Prog.* 51 1993. Dec.

Cristea, E. D.; Malfa, E.; Coghe, A. 1996. 3-D numerical simulation and measurement of strongly swirling heavy dust-laden flow inside a cyclone separator. *3rd International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*. Crete.

Cortes, C.; Gil, A. 2007. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators, *Progress in Energy and Combustion Science* (33):409–452.

Denafas, G. 2000. Atmosferos apsauga . I dalis. Aplinkos oro tarša ir kontrolė. Kaunas: Technologija.

Derksen, J. J. 2003. Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone, *AIChE Journal* 49: 1359–1371.

Derksen, J. J.; Sundaresan, S.; van den Akker, H. E. A. 2006. Simulation of mass loading effects in gas–solid cyclone separators, *Power Technology* 163: 59–68.

Dirgo, J.; Leith, D. 1985. Performance of theoretically optimized cyclones, *Filtration and Separation*: 119– 125 (March/April)

Fluent, Inc., 2004. Fluent 6.1.22 Users' Guide.

Gimbun, J.; Chuah, T.G.; Fakhru'l-Razi, A.; Choong, T. S. Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study. *Chem. Eng. Prog.* 44: 7–12.

Gong, A. L.; Wang, L. Z. (2004). Numerical study of gas phase flow in cyclones with the repds. *Aero Technol.* 38: 506–512.

Gregg, W. W. 1995. High efficiency cyclones for powder processing applications, 9: 240.

Griffiths, W. D.; Boysan, F. 1996. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modeling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science* 27: 281–304.

Gujun, W.; Guogang, S.; Xiaohu, X.; Mingxian, S. 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator, *Powder Technology* 183(2008): 94–104.

Hideto, Y.; Kouichiro, Ono.; Kunihiro, F.. 2004. The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones, *Powder Technology* 149 (2005) 139– 147.14

Hoekstra, A. J.; Derksen, J. J.; Van Den Akker, H. E. A. 1999. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, *Chemical Engineering Science* 54: 2055– 2065.

Hoffmann, A. C; Stein, L. E. 2002. Gas Cyclone and Swirl Tubes-Principles, Design and Operation, Springer-Verlag, Berlin.

- Hu, L. Y.; Zhou, L. X.; Zhang, J.; Shi, M. X. 2005. Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator, *AIChE Journal* 51(3): 740–749.
- Hu, S.; Firth, B.; Vince, A.; Lees, G. 2001. Prediction of dense medium cyclone performance from large size density tracer test, *Minerals Engineering* 14: 741–751.
- Fassani, F.L.; Jr, L.G. A. 2000. Study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency, *Powder Technology* (107) 60–65.
- Indicators for Sustainable Energy Development //International Atomic Energy Agency, International Energy Agency. Overview, 2002.
- Youngmin, J.; Chi, T.; Madhumita, B. Ray . 1999. Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones. *Powder Technology* 113(2000): 97–108.
- Koch, W. H.; Licht, W. L. 1980. *Ind. Air Pollut. Eng. Mag.* 175 p.
- LAND 28-98/M-08. 1998. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamosiose dujose nustatymas. Svorio metodas. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos įsakymas Nr. 69.Vilnius.
- LAND 27-98/M-07. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos įsakymas Nr. 69.Vilnius.
- Leith, D.; Licht, W. 1972. The collection efficiency of cyclone type particle collectors: a new theoretical approach. *AIChE Symp* 68 (126): 196–206.
- Liden, G., Gudmundsson, A. (1997). Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design, *J. Aerosol Science*. 28(5): 853.
- Lietuvos statistikos departamentas. Teršalų išmetimas į atmosferą iš stacionarių taršos šaltinių [žiūrėta 2009 m. rugpjūčio 22 d.]. 2009. Prieiga per internetą: <http://db1.stat.gov.lt/statbank/SelectVarVal/Define.asp?Maintable=M8010401&PLanguage=0>.
- Ma, H.; Ingham, D. B.; Wen, X. 2000. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones. *Elsevier science, Great Britain* 31 (9): 1097–1119.
- Molerus, O.; Gluckler, M. 1996. Development of a cyclone separation with new design, *Powder Technology*. 37.
- Moore, M. E.; McFarland, A. R. 1996. Design methodology for multiple inlet cyclones, *Environ. Sci. Technol.* 30_271.
- Morsi S. A., Alexander A. J. 1972. An investigation of particle trajectories in twophase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics* 55 (2):193–208.

Mothes, H.; Löffler, F. 1988. Prediction of particle removal in cyclone separators, *International Chemical Engineering* (28):51–55.

Nieuwland J. J.; R. Meijer.; J. A. M. Kuipers.; W.P.M. van Swaaij. 1996 Measurements of solids concentration and axial solids velocity in gas–solid two-phase flows, *Powder Technology* 87: 127–139

Ogawa, A. 1997. *Appl. Mech. Rev.*, 50 (3): 97.

Oro kokybės tyrimų zonoje apžvalga [žiūrėta 2009 m. lapkričio 27 d.] 2008. Prieiga per internetą: http://oras.gamta.lt/files/Zona_2008.pdf

Oro kokybės tyrimų Vilniaus aglomeracijoje apžvalga. 2010 [žiūrėta 2011 m. sausio 28 d.]. Prieiga per internetą: http://oras.gamta.lt/files/Vilniaus_agl_2010.pdf

Oro ir triukšmo tarša. Europos parlamentas [žiūrėta 2011 m. liepos 28 d.]. 2011. Prieiga per internetą:
http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact_sheets/info/data/policies/environment/article_7297_lt.htm.

Ovadnevaitė, J.; Kvietkus, K.; Šakalys, J. 2006. Long range Transport and Temporal Variations PM_{2.5} Concentrations at the Eastern Coast of the Baltic Sea. *Journal of Environment Assessment*.

Pagano, P.; de Zaiacom, T.; Scarcella E.; Bruni, S.; Calamosca, M. 1998. Mutagenic activity of total and particlesized fraction of urban particulate matter. *Environmental Science and Technology*. 30: 3512–3516.

Paulauskienė, T. 2008. Oro taršos lakiisiais organiniais junginiais tyrimas ir jos mažinimas naftos terminaluose. Daktaro disertacija. Vilnius, 2008. 104 p.

Patterson, P.A.; Munz, R.J. Gas and particle flow patterns at room and elevated temperatures, *Canadian Journal of Chemical Engineering* 74. 1996. 213–221 (April).

Ramesh, A.; Koziski, J. A. 2001. Investigations of ash topography /morphology//U. S. New YOK, *Environmental Pollution* 111(2): 255–262.

Raoufi, A.; Shams, M.; Kanani, H. 2008. CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*: 1–9.

Ray, M. B.; Luning, P. E.; Hoffmann, A. C.; Beumer M. I. L; Plomp, A. 1997. Post cyclone_PoC.: an innovative way to reduce the emission of fines from industrial cyclones, *Ind. Eng. Chem. Res.* 36_2766.

Reddy, M. 2003. Fluent India, Personal Communication, mxr@fluent.co.in.

Revoldas, V., Denafas, G. 1999. Atmosferos taršos šaltinių katilinėse vertinimo metodikų tyrimai, Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba, 2(9): 42–50. Kaunas: Technologija.

Rim, D.; Novoselac, A. 2009 Transport of particulate and gaseous pollutants in the vicinity of a human body. *Building and Environment* 44: 840–1849.

Rimkus, E.; Stankūnavičius, G.; Bukantis A. 2006. Meteorologinių veiksnių poveikis KD2.5 aerozolio koncentracijos kaitai Preiloje. *Vilniaus universitetas. GEOGRAFIJA*. T. 42(2): 56–64.

Saltzman, B. E.; Hochstrasser, J. M. 1983. Design and performance of miniature cyclones for respirable aerosol sampling, *Environ. Sci. Technol.* 17_418.

Samet, J. M.; Zeger, S. L.; Dominici, F.; Curriero, F.; Coursac, I.; Dockery, D. W.; Schwartz, J.; Zanobetti, A. 2000. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II orbidity and mortality from air pollution in the United States. *Research Report of the Health Effect Institute*. 94(2): 5–79.

Schwartz, J.; Dockery, D. W.; Neas, L. M. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of Air & Waste Management Association*. 46: 927–939.

Shi, L. M.; Bayless, D. J. 2007. Comparison of boundary conditions for predicting the collection efficiency of cyclones, *Powder Technology* 173: 29–37.

Sitnikovas, D.; Denafas, G. 2003. Įvairių šilumos gamintojų ir vartotojų grupių įtaka aplinkos oro taršai // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 11(Sup.1): Ila-Iig. ISSN 1648-6897. [ICONDA].

Slack, M. D.; Prasad, R. O.; Bakker, A.; Boysan, F. 2000. Advances in cyclone modeling using unstructured grids, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 78A 1098.

Sommerfeld, M., Ho, C. H. 2003. Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology* 131: 1–6.

Spalding, D. B. 2002. PHOENICS 3.5 VR.CHAM. London. <http://www.cham.co.uk>

Strauss, N. 1966. *Industrial Gas Cleaning*. Pergamon Press, New York.

Štreimikienė, D.; Čiegis, R. 2001. Ekonominės žalos vertinimas stacionariems atmosferos taršos šaltiniams Lietuvoje, *Environmental research, engineering and management* 1(15): 12–22.

Štreimikienė, D.; Konstantinavičiūtė, I. 2003. Lietuvos energetikos plėtros prioritetai ir subalansuotumo rodikliai., *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba* 1(23): 31-43 ISSN 1392-1649.

Šležas, R. 2004. ES GPGB dideliems kurą deginantiems įrenginiams ir jų palyginimas su esama situacija Lietuvos energetikos sektoriuje. Lietuvos energetikos institutas. Degimo procesų laboratorija.

Švenčianas, P. 1994. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje. Kaunas: Technologija.

Valstybinis aplinkos oro monitoringas. Aplinkos apsaugos agentūra [interaktyvus] [žiūrėta 2009m. rugpjūčio 17 d.]. 2009. Prieiga per internetą: <<http://oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=cd221b5f-a5f0-4cc2-a19e-c2eb5b503538> >.

Vaitiekūnas, P. 2011. Koncentracijos, šilumos ir masės (triukšmo) pernašos procesų modeliavimo programos. Duomenų bankas. Vilnius, VGTU. 44 p.

Vaitiekūnas, P.; Banaitytė, R. 2007. Modeling of motor transport exhaust dispersoin. *Journal of environmental engineering and landscape management*. 15(1): 39-46. prieiga per internetą: http://www.jeel.vgtu.lt/upload/environ_zurn/1-39-46-jeelm-2007-baltr.pdf. ISSN 1648-6897.

Vaitiekūnas, P.; Katinas, V.; Markevičius, A. 2004. Simulation of conductive-convective heat transfer n a natural basin. *J. of Environmental Engineering and Landscape Management*. 12(2): 58–62.

Valuntaitė, V. 2009. Technogeninio ozono susidarymo, sklaidos tyrimai ir vertinimas. Daktaro disertacija. Vilnius, Technika. 75 p.

Zhou, L. X.; Soo, S. L. 1990 Gas solid flow and collection of solids in a cyclone separator, *Powder Technology* 63(1): 45–53.

Zhao, B.; Su, Y.; Zhang, J. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration, *Trans IC-hemE. PA, Chemical Engineering Research and Design* 84: 1158–1165.

Zannetti, P. 1993. Numerical simulation modelling of air pollution: an overview, in Air Pollution, *Computational Mechanics Publications, Southampton*, 3–14.

Zhongli, Ji.; Zhiyi, Xion.; Xiaolin, Wu.; Honghai, Chen.; Hongxiao Wu. 2009. Experimental investigations on a cyclone separator performance at an extremely low particle concentration, *Powder Technology* (191):254–259.

Wang, B.; Xu, D. L.; Chu, K. W.; Yu, A. B. 2006. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator, *Applied Mathematical Modelling* 30: 1326–1342.

Wood, C. J. 1990. A performance model for coal-washing dense medium cyclones, Ph.D thesis, University of Queensland, Australia.

Аладьев, В. З; Богдвичюс, М. А. 1999. Решение физико-технических и математических задач с пакетам Мапле V. Вилнюс. Техника. 686 с.

Алиев, Г. М. А. 1986. Техника пилеулавливание и очистке промышленных газов. Москва: Металлургия, 88 с.

Асламова, В. С.; Асламов, А. А; Жабей, А. А. 2007. Способ определения эффективности пылеулавливания циклонов. Патент РУ 2 358 810.

Асламова, В. С. 2008. Прямоточные циклоны. Теория, расчёт, практика. Федеральное агенство по образованию. Ангарская государственная техническая академия, 250 с.

Белюсов, В. В. 1988. Теоретические основы процессов газоочистки. Москва: Металлургия. 255 с.

Бурдаков, В. 2007. Космический сегмент российской энергосистемы. Техника молодёжи. -№4. С-16-19

Буров, А. А., Буров, А. И., Котляревский, П. А., Кошур, Н. Х., Мальгота, А. А. Центробежный сепаратор.//Патент РФ№2016665.-Б.И-1994.-№14.

Буров, А. А.; Серебрянский, Д. А.; Лепихин, А. П., Деревянченко, И. В. 2004. Использование пылеуловителей новой конструкции вместо циклонов // Металлург. 5: 23–27.

Буров, А. И. Гидравлика стратифицированных криволинейных течений в аппаратах с обратными связями. Дисс. д. т. н., Одесса, 1991. 278 с.

Балан, С. А., Буров, А. А., Буров, А. И. 2000. Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутыми контурами.//Тр. Одесского политехнического университета. Научный и производственно-практический сборник.- Одесса, 2(11): 56–59.

Балан, С. А., Буров, А. А., Буров, А. И., Серебрянский, Д. А. 2002. Аппарат с замкнутыми контурами.Сб. научных статей. Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов. Харьков.

Ватин, Н. И.; Стрелец, К. И. 2003. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон. Санкт-Петербург, 14 с.

Штокман, Е. А. 1998. Очистка воздуха. Москва: издательство АСВ. 320 с.

Федоров, Б. С.; Чекалов, Л. В. и др. Экотехника. Экологический консорциум "РОСГАЗООЧИСТКА". Режим доступа: [<http://kondore.newmail.ru/Kniga> 20.05.2002].

Русанов, А. А. 1983.Справочник по пыли и золоулавливанию. Энергоатомиздат. 312 с.

Тананаев, А. В. 1997. Инерционный фильтр-сепаратор. Патент РФ 2080939 от 26.01.

http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact_sheets/info/data/policies/environment/article_7297_lt.htm

Коузов П.А.; Мальгин А.Д.; Скрябин Г.М. 1993.Очистка газов и воздуха от пыли в химическом промышленности. СПб: Химия, 320 с.

Кочетов, О. С.; Голубева, М. В. 2007. Цыклон–фильтр. Патент RU 2 338 601 С1.

Серебрянский, Д. А; Приемов, С. И. 2007. Центробежный фильтр. Патент UA 78157.

Серебрянский, Д. А; Новаковский, Е. В. 2009. Очистка газов от пыли в центробежных фильтрах. Промышленная теплотехника. Киев Но 2-С. 55-61.

Серебрянский, Д. А. 2009. Центробежный фильтр пылеулавливания. Химическое и нефтегазовое машиностроения N. 6.

Серебрянский, Д. А. 2004. Повышение эффективности газоочистки тепловых Энергетических установок Дисс. д. т. н., Одесса, 20 с.

Лепихин, А. П.; Деревянченко, И. В.; Буров, А. А.; Серебрянский, Д. А. 2004. Использование пылеуловителей новой конструкции вместо циклонов. *Металлург*, №5 – С52–55. [interaktyvus] [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 8 d.] 2011. Prieiga per internetą: <http://www.ecologenergy.com/Opredelenie-energozatrata-na-ochistku-gazov.html>.

Зайчковский, Я. 1979. Обеспыливание в промышленности. Москва. Стройиздат.

Пылеулавливающие оборудование. [interaktyvus] [žiūrėta 2011 m. rugpjūčio 10 d.]. 2011. Prieiga per internetą: <http://www.cikloni.ru/item.php?uid=9>.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I. 2010b. Analysis of numerical modelling of turbulence in the conical reverse flow cyclon. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Vilnius: Technika. ISSN 1648-6897. 18 (4): 321-328. IF=1.958 (Thomson ISI Web of Science).

Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I.; Serebryansky, D. 2010c. Analysis of numerical modelling of turbulence in the multichannel cyclone. *Journal of Chemical and Process Engineering – Inżynieria Chemiczna i Procesowa*. ISSN 0208-6425. 31(4):635-647. IF=0,2 (ISI Master List)

Baltėrnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I.; Konoverskytė, S. 2012a. Study of Gas–Solid Flow in a Multichannel Cyclone. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Vilnius: Technika. ISSN 1648-6897. 20 (2):129-137. IF=1.958 (Thomson ISI Web of Science).

Jakštonienė, I., Vaitiekūnas, P. 2009. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo taikymas kūginiam grįžtamojo srauto ciklonui. [Application of computable fluid dynamics modelling for conical cyclone of reverse flow].

Mokslas–Lietuvos ateitis. Aplinkos apsaugos inžinerija 1(4): 51–55. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus).

Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2010a. Dujų turbulencijos ciklone modeliavimas. [Modelling of gas cyclone turbulence]. *Mokslas–Lietuvos ateitis. Aplinkos apsaugos inžinerija* 2(5): 17–23. ISSN 2029-2341. (Index Copernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2011a .Daugiakanalio ciklono efektyvumo tyrimai. [Researches on the efficiency of multichannel cyclone]. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Aplinkos inžinerija: Straipsnių rinkinys*. ISBN 978-9955-28-956-2. Lietuva, Vilnius. Technika, 8-22 (Index Copernicus).

Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. Oro srauto greičio cilindrinio daugiakanalio ciklono kanaluose tyrimai. 2012b. *Mokslas–Lietuvos ateitis. Aplinkos inžinerija. Straipsnių rinkinys*. Lietuva, Vilnius: Technika, 11-14. ISBN 978-9955-28-956-2 (Index Copernicus).

Jakštonienė, I.; Serebryansky, D.; Vaitiekūnas, P. 2011b. Experimental research on the work of centrifugal Filter when eliminating solid particles from clinker cooling system. *The 8th International Conference, Environmental Engineering, selected paper*, May 19–20, 2011. ISBN 978-55-28-826-8. (1 Volume). Vilnius Gediminas Technical University Press „Technika“, 134–138.

Priedas. Oro srauto greičiai ciklono kanaluose

P1 lentelė. Keturkanalio ciklono oro srauto greičiai kanaluose. (Įtekėjimo greičiai: I – 12, II – 14, III – 16 ir IV 22 m/s)

Table P1. Four-channel cyclone air flow velocities in channels (inflow velocities I – 12, II – 14, III – 16 ir IV – 22 m/s)

Oro srauto greičio matavimo taškai pusšiedžių tarpuose		Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₁ pusšiedžių padėčiai, m/s				Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₂ pusšiedžių padėčiai, m/s				Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₃ pusšiedžių padėčiai, m/s			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I Kanalas	1	12,0	14,0	16,0	22,0	12,0	14,0	16,0	22,0	12,0	14,0	16,0	22,0
	2.	12,2	13,7	16,0	21,6	12,3	13,8	16,0	21,6	12,5	13,8	16,1	21,6
	3	12,4	13,9	16,2	21,9	12,1	13,6	16,3	21,9	12,2	14,0	16,4	21,9
	4	12,5	14,1	16,6	22,0	12,4	13,8	16,5	22,3	12,3	14,1	16,4	21,9
	5	12,7	14,5	16,7	21,9	12,7	13,9	16,7	22,5	12,8	14,2	16,6	22,1
II Kanalas	6	12,6	14,4	16,8	22,1	12,4	13,9	16,9	22,7	12,4	14,4	16,8	22,3
	7	12,9	14,6	17,0	22,4	12,3	13,8	17,1	22,5	12,3	14,1	16,6	22,1
	8	13,1	14,4	16,9	22,3	12,1	13,7	16,9	22,3	12,2	13,9	16,4	21,9
	9	13,2	14,5	17,0	22,1	12,1	13,5	16,5	22,1	12,1	13,7	16,5	22,3
III Kanalas	10	13,4	14,8	17,2	22,4	12,4	13,8	16,6	22,4	12,3	13,8	16,7	22,5
	11	13,6	15,0	17,3	22,3	12,7	13,5	16,9	22,5	12,6	14,2	17,0	22,8
	12	13,8	15,3	17,4	22,5	13,2	15,1	17,7	22,9	12,9	13,9	17,8	22,5
	13	13,1	15,5	17,4	21,9	12,4	14,8	17,3	21,1	13,4	14,6	16,4	22,9
	14	14,0	16,5	17,8	22,2	13,6	15,5	17,8	21,8	13,6	15,6	18,5	23,5
	15	14,6	16,7	18,2	22,5	14,0	15,9	18,0	22,2	14,1	16,1	19,0	23,9
IV Kanalas	16	13,5	15,9	18,6	21,4	13,2	14,8	18,8	22,4	13,1	15,3	19,5	24,0
	17	14,8	16,3	18,8	22,4	14,3	15,2	18,5	22,6	14,5	15,4	19,4	24,2

P2 lentelė. Penkiakanalio ciklono oro srauto greičiai kanaluose. (Įtekėjimo greičiai: I – 12, II – 14, III – 16 ir IV – 22 m/s)

Table P1. Five-channel cyclone air flow velocities in channels (inflow velocities I – 12, II – 14, III – 16 ir IV – 22 m/s)

Oro srauto greičio matavimo taškai pusšiedžių tarpuose		Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₁ pusšiedžių padėčiai, m/s				Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₂ pusšiedžių padėčiai, m/s				Oro srauto įtekėjimo greitis į cikloną esant A ₃ pusšiedžių padėčiai, m/s			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I Kanalas	1	12,0	14,0	16,0	22,0	12,0	14,0	16,0	22,0	12,0	14,0	16,0	22,0
	2.	12,2	13,7	16,0	21,6	12,3	13,8	16,0	21,6	12,5	13,8	16,1	21,6
	3	12,4	13,9	16,2	21,9	12,1	13,6	16,3	21,9	12,2	14,0	16,4	21,9
	4	12,6	14,1	16,6	22,0	12,4	13,8	16,4	22,3	12,0	13,9	16,2	21,9
	5	12,7	14,5	16,7	21,9	12,9	14,2	16,9	22,7	13,0	14,5	16,8	22,4
	6	12,6	14,4	16,8	22,1	13,1	14,5	16,9	22,9	13,3	14,7	17,0	22,6
II Kanalas	7	12,9	14,6	17,0	22,4	12,3	13,8	17,1	22,5	12,3	14,1	16,6	22,1
	8	13,1	14,4	16,9	22,3	12,1	13,7	16,9	22,3	12,2	13,9	16,8	21,9
	9	13,5	14,9	17,4	22,5	12,6	13,8	17,1	22,5	12,4	14,1	16,9	22,8
III Kanalas	10	12,9	14,5	16,9	22,4	12,8	14,2	16,9	22,8	12,7	14,5	16,9	22,4
	11	12,8	14,3	16,7	22,1	12,5	14,0	16,4	22,3	12,2	14,1	16,4	22,1
	12	12,9	14,5	16,9	22,4	12,9	14,5	17,3	22,4	12,6	14,7	17,5	22,6
IV Kanalas	13	12,9	14,5	17,0	22,4	12,9	14,5	16,8	22,4	12,6	14,7	16,5	22,6
	14	13,5	14,9	17,4	22,5	13,1	14,7	16,8	22,5	12,5	14,8	16,9	22,8
	15	13,3	14,5	17,3	22,3	13,5	13,8	17,4	22,5	12,4	14,1	17,5	22,9
	16	13,5	14,9	17,3	22,5	13,8	14,1	17,5	22,8	12,6	14,5	17,9	23,0
	17	13,5	14,9	17,4	22,5	13,5	13,8	17,1	22,5	12,4	14,1	16,8	22,8
V Kanalas	18	13,7	15,2	17,6	22,8	13,5	13,8	16,8	22,5	12,4	14,1	16,5	22,8
	19	13,7	15,2	17,7	22,8	13,8	14,1	17,9	22,8	12,6	14,5	18,4	23,0
	20	13,9	15,8	17,9	23,2	14,1	14,5	17,8	23,0	12,7	14,7	17,5	23,2
	21	14,2	16,4	18,5	23,5	14,4	14,8	18,0	23,3	12,9	14,9	17,8	23,5

Inga JAKŠTONIENĖ

CILINDRINIO DAUGIAKANALIO CIKLONO SU REGULIUOJAMAIŠ
PUSŽIEDŽIAIS TYRIMAI IR TOBULINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija (04T)

RESEARCHES AND DEVELOPMENT OF CYLINDRICAL MULTICHANNEL
CYCLONE WITH ADJUSTABLE HALF-RINGS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

2012 12 21. 13,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 16A, 01111 Vilnius