VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

Egidijus Baliukas

CILINDRINIO DAUGIAKANALIO DVIEJŲ LYGIŲ CIKLONO TYRIMAI IR PRITAIKYMAS

RESEARCH AND APPLICABILITY OF TWO LEVELS CYLINDRICAL MULTICHANNEL CYCLONE

Baigiamasis magistrinis darbas

Aplinkos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H17004
Aplinkos apsaugos inžinerijos specializacija
Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS 7

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 8

ĮVADAS 12

1. ORO TARŠA KIETOSIOMIS DALELĖMIS, VALYMO PROCESŲ ANALIZĖ BEI NAUJOS KARTOS CIKLONŲ TAIKYMAS 15

1.1. Kietosios dalelės ir jų savybės 15

1.2. Kietųjų dalelių taršos šaltiniai aplinkoje 20

1.3. Tradicinių ciklonų konstrukcijos ypatumai ir analizė 23

1.4. Naujos kartos ciklonų tipai bei modifikacijos 29

1.5. Dinaminių procesų, vykstančių ciklone, modeliavimo programos 33

1.6. Ciklonų panaudojimas skirtingose šalyse 37

1.7. Išvados 45

2. DVIEJŲ LYGIŲ DAUGIAKANALIO CIKLONO EKSPERMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA 46

2.1. Aerodinaminių procesų ciklone tyrimų metodika ir naudojama įranga 50

2.2. Dviejų lygių daugiakanalio ciklono oro valymo efektyvumo tyrimo metodika ir naudojama įranga 56

2.3. Išvados 60

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ 61

3.1. Ciklono aerodinaminių charakteristikų tyrimo rezultatų analizė 61

3.1.1. Keturkanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė 63

3.1.2. Šešiakanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė 70

3.1.3. Aštuonkanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė 76

3.2. Daugiakanalio ciklono oro valymo efektyvumo tyrimo rezultatų analizė 82

3.2.1. Cilindrinio keturkanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė 84

3.2.2. Cilindrinio šešiakanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė..... 86
3.2.3. Cilindrinio aštuonkanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė..... 89
3.3. Išvados 91
4. AERODINAMINIŲ PARAMETRŲ DVIEJŲ LYGIŲ DAUGIAKANALIAME CIKLONE SKAITINIS MODELIAVIMAS 93
4.1. Oro srauto greičių skaitinis modeliavimas..... 95
4.2. Aerodinaminio pasipriešinimo skaitinis modeliavimas 102
4.3. Išvados 110
BENDROSIOS IŠVADOS 111
REKOMENDACIJOS 112
LITERATŪRA..... 113
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS..... 120

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Aplinkos apsaugos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. ……..
Data ….-….-….

Aplinkos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Cilindrinio daugiakanalio dviejų lygių ciklono tyrimai ir pritaikymas**

Autorius **Egidijus Baliukas** Vadovas prof. habil. dr. **Pranas Baltrėnas**

Kalba
[X] lietuvių
[ ] užsienio

Anotacija

Magistro darbe nagrinėjamas cilindrinis daugiakanalis dviejų lygių ciklonas, skirtas kietosioms dalelėms (KD) iš oro srauto šalinti. Pagrindinis tyrimo objektas – cilindrinis daugiakanalis dviejų lygių ciklonas su kintamu pusžiedžių skaičiumi. Darbo tikslas – eksperimentiškai ištirti daugiakanalį dviejų lygių cikloną, taip pat remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais pritaikyti šį oro valymo įrenginį pramonėje bei atlikti vienfazio oro srauto matematinį modeliavimą.

Darbe nustatoma bendrojo efektyvumo ciklone priklausomybė nuo cilindrinių pusžiedžių skaičiaus, oro srauto greičio bei dalelių tankio.

Magistro darbą sudaro 120 puslapių, 4 skyriai, 15 lentelių, 67 paveikslai, bendrosios darbo išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Pirmajame skyriuje analizuota literatūra, išnagrinėta oro tarša KD, pasaulyje ir Lietuvoje naudojamų ciklonų konstrukcijos.

Antrajame skyriuje pateiktos tyrimo metodikos: eksperimentiniuose tyrimuose naudotų medžiagų, įrangos charakteristikos, pateikiamos mėginių ėmimo sąlygos, taikomi KD koncentracijų analizavimo metodai.

Trečiajame skyriuje pateikta eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė.

Ketvirtajame skyriuje aprašomi dinaminių procesų ciklone modeliavimo rezultatai bei jų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais.

Eksperimentiniu būdu buvo nustatytas slėgio, greičio pasiskirstymas ciklone. Gauti eksperimentiniai rezultatai parodė, jog tiriamojo ciklono geriausias efektyvumas yra 92,1 % atskiriant granito daleles iki 20 μm skersmens.

Prasminiai žodžiai:oro valymas, kietosios dalelės, daugiakanalis ciklonas, išcentrinė jėga, valymo efektyvumas, svorinis metodas.

Vilniaus Gedimino Technical University
Environmental Engineering faculty
Environmental protection department

ISBN ISSN
Egz. sk. ……..
Data ….-….-….

Environmental engineering study programme bachelor (master) thesis.

Title **Research and applicability of two levels cylindrical multichannel cyclone**

Author **Egidijus Baliukas** Academic supervisor **Pranas Baltrėnas**

Thesis language
[X] Lithuanian
[ ] Foreign (English)

Anotation

Solid particulates removal from air flow using two levels cylindrical multichannel cyclone is analyzing in the master thesis. The main object of the research is multi-channel cylindrical two-level cyclone with a variable number of half-rings. The aim is to experimentally investigate two-level cyclone, as well as according to experimental studies to adjust this air cleaning equipment in the industry and to make single-phase airflow modeling.

The paper establishes the general efficiency of the cyclone dependence of the cylindrical half-rings number, flow velocity and particle density..

The master thesis consists of 120 pages, 4 chapters, 15 tables, 67 pictures, the general conclusions and recommendations, references.

In first section the literature is analyzed, air pollution is examined, design of cyclones used in Lithuania and all world is analyzed.

Experimental research methodology is described in second section: experimental studies of the materials used, equipment specifications, sampling conditions, analytical methods of particulate concentrations.

The third section presents the experimental results and analysis.

The fourth section describes the dynamic processes in a cyclone simulation results and their comparison with experimental studies.

Airflow velocity and cyclone's system pressure was experimenticaly measured. Achieved experimental results show that the best of cyclone efficiency is 92.1 %, while separating granite particles up to 20 μm in diameter.

Key words: Clean air, particulate matter, multichannel cyclone, centrifugal force, cleaning efficiency, the weighted method.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Deginamos akmens anglies kietųjų dalelių dispersija	**16**
1.2 lentelė. Mazuto degimo kietų dalelių dispersija	**16**
1.3 lentelė. Medienos degimo kietųjų dalelių dispersija	**17**
1.4 lentelė. Daugiakanalių ciklonų efektyvumas valant skirtingas daleles	**27**
1.5 lentelė. Išcentrinio filtro efektyvumas	**28**
1.6 lentelė. Ciklonų techniniai parametrai	**34**
1.7 lentelė. Ciklonų ir valomųjų techniniai parametrai	**34**
1.8 lentelė. UAB „Ekofiltras“ gaminamo ciklono parametrai	**37**
2.1 lentelė. Atstumai tarp puszziedžių esant skirtingoms padėtims	**43**
3.1 lentelė. Greičių pasiskirstymas ciklono įtekėjime skirtinguose lygiuose	**59**
3.2 lentelė. Oro srauto debitai esant skirtingiems įtekėjimo greičiams	**60**
4.1 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių modeliavimo rezultatų palyginimas tarp skirtingų ciklono lygių, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50	**101**
4.2 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimntinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75	**108**
4.3 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimntinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50	**109**
4.4 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimntinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25	**109**

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. KD dydžio palyginimas	**16**
1.2 pav. Kietųjų dalelių taršos šaltiniai	**21**
1.3 pav. Skirtingų kietųjų dalelių dydžio pasiskirstymas	**24**
1.4 pav. Ciklono dalys	**25**
1.5 pav. Oro srauto judėjimas ciklone	**26**
1.6 pav. Oro įtekėjimai: a – tangentinis; b – tęstinis; c – sraigtinis; d – ašinis.	**26**
1.7 pav. Nuoseklusis ciklonų jungimas	**27**
1.8 pav. Grupinis ciklonas	**28**
1.9 pav. Grupinių ciklonų jungimo būdai: 1 – dviejų ciklonų sujungimas; 2 – keturių ciklonų sujungimas; 3 – šešių ciklonų sujungimas	**28**
1.10 pav. Multiciklonas: 1 – oro įtekėjimo kamera; 2 – ciklonas; 3 – oro išleidimo kamera	**29**
1.11 pav. Multiciklone esantis ciklonas	**30**
1.12 pav. Daugiakanalis ciklonas	**31**
1.13 pav. Daugiakanalio ciklono schema: 1 – užteršto oro įtekėjimo atvamzdis, 2 – išvalyto oro išėjimo atvamzdis, 3 – kūginis bunkeris, 4 – žiedinė anga, 5 – uždarų kanalų sistemos dugnas, 6 – kreiviniai kanalai, 7 – oro recirkuliacijos plyšiai, 8 – separacijos kameros korpusas.	**32**
1.14 pav. Daugiakanalių ciklonų blokai	**34**
1.15 pav. Vertikalus daugiakanalis ciklonas	**34**
1.16 pav. Pagrindiniai Rusijoje naudojami ciklonai: a – НИИО ciklono modelis, b – ЛИОТ ciklono modelis, c – СИОТ ciklono modelis	**38**
1.17 pav. Išcentrinis filtras СФ	**38**
1.18 pav. SOBY grūdų valomosios: F – išmetimo vamzdžio skersmuo, mm; I – ciklono aukštis, mm; S – išėjimo į bunkerį skersmuo, mm; L – ciklono spindulys, mm.	**39**
1.19 pav. Baterinio multiciklono schema: 1 – ciklono korpusas, 2 – „rozetės" mentė, 3 – ciklono dangtis, 4 – ciklono bunkeris, 5 – bunkerio sklendė, 6 – pelenų surinkimo dėžė su prispaudėju, 7 – dūmų įėjimo anga, 8 – dūmų išėjimo anga, 9 – valymo durelės, 10 – sprogimo vožtuvas, 11 – atraminis vamzdis, 12 – varžtas ir veržlė atramos tvirtinimui, 13 – atrama	**40**
1.20 pav. Ciklonas AVM 45.02.000	**41**
1.21 pav. Ekofiltras ciklono schema	**42**
1.22 pav. Dviejų lygių ciklonas su integruotu filtru	**43**
1.23 pav. Multiciklonas su skirtingos eilės integruotais ciklonais: a – oro srauto judėjimas bei teršalų susidarymo schema; b – teršalų išleidimo schema	**45**
2.1 pav. Dviejų lygių ciklono įrenginys: 1 – oro srauto įtekėjimo anga, 2 – skirtingo spindulio žiedai, 3 – žiediniai plyšiai, 4 – kūginis dvigubas bunkeris, 5 - ciklono cilindrinio korpuso dugnas,	**47**

6 – lygių perskyrimas, 7 – oro srauto ištekėjimo anga-ortakis, 8 – tarpai tarp skirtingo spindulio žiedų, 9 – oro srauto ištekėjimo iš pirmojo lygio anga.	
2.2 pav. Ciklono eksperimentinis stendas	**48**
2.3 pav. Tranzitinio ir periferinio srautų pasiskirstymas	**49**
2.4 pav. Šešiakanalio ciklono pusžiedžių išdėstymo schemos: a – 50/50 padėtis; b – 25/75 padėtis; c – 75/25 padėtis	**50**
2.5 pav. Oro srauto greičių matavimo schema dviejų lygių ciklone: 1 – dinaminis Pito vamzdelis; 2 – 8 mm skersmens kiaurymės; 3 – skirtingo diametro pusžiedžiai; 4 – pertvara tarp lygių; 5 - ciklono dugnas su segmentiniais žiediniais plyšiais; 6 – kūginis bunkeris; 7 – oro srauto išėjimo anga; 8 – oro srauto greičių matavimo vietos ciklono tangentiniame įtekėjime; 9 – difuzorius.	**52**
2.6 pav. Testo-400 sujugtas su Pito dinaminiu vamzdeliu	**53**
2.7 pav. Slėgio matavimuose panaudotas ortakio atvamzdis	**55**
2.8 pav. Slėgio matavimuose naudotas diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1	**56**
2.9 pav. Filtras AFA–VP–20	**59**
2.10 pav. Antgalių parinkimo nomograma	**60**
2.11 pav. Atvamzdis, įstatomas į ortakį	**60**
2.12 pav. Koncentracijų tyrimo sistema	**61**
3.1 pav. Oro srauto greičių matavimo taškų išdėstymo schema: 1 – skirtingo diametro pusžiedžiai; 2 – segmentiniai plyšiai; 3 – oro srauto iš antrojo lygio išėjimo anga; 4 – oro srauto iš pirmojo lygio išėjimo anga; 5 – įtekančio oro srauto greičio matavimo vieta	**63**
3.2 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**65**
3.3 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**67**
3.4 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**69**
3.5 pav. Dviejų lygių keturkanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose	**70**
3.6 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**71**
3.7 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**73**
3.8 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**75**
3.9 pav. Dviejų lygių šešiakanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose	**76**

3.10 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**77**
3.11 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**79**
3.12 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s	**81**
3.13 pav. Dviejų lygių aštuonkanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose	**82**
3.14. pav. Vibracinis sijotuvas Retsch AS 200	**83**
3.15 pav. Oro srauto iki 20 µm išvalymo efektyvumas esant 4 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas	**85**
3.16 pav. Oro srauto iki 20 µm išvalymo efektyvumas esant 6 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas	**87**
3.17 pav. Oro srauto, užteršto iki 20 µm, išvalymo efektyvumas esant 8 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas	**91**
4.1 pav. Skaičiavimo tinklelio eskizas	**95**
4.2 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 27/75, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**96**
4.3 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 27/75, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**97**
4.4 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 50/50, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**98**
4.5 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 50/50, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**98**
4.6 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 75/25, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**99**
4.7 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 75/25, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**100**
4.8 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono vertikaliajame pjūvyje esant skirtingam pusžiedžių išdėstymui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s. Čia: a) – oro tūrių pasiskirstymo santykis 27/75; b) oro tūrių pasiskistymo santykis 50/50; c) oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25	**102**

4.9 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**103**
4.10 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**104**
4.11 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**105**
4.12 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**105**
4.13 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**106**
4.14 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s	**106**
4.15 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas vertikaliajame pjūvyje esant skirtingam pusžiedžių išdėstymui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s. Čia: a) – oro tūrių pasiskirstymo santykis 27/75; b) oro tūrių pasiskistymo santykis 50/50; c) oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25	**107**

ĮVADAS

Problema

XVIII a. antroje pusėje prasidėjusi pramonės revoliucija padėjo pamatus intensyviai pramonės taršai, kuri ypač padidėjo XX a. dėl intensyvios energetikos, pramonės bei transporto plėtros.

Pagrindinius atmosferos taršos šaltinius galima suskirstyti į mobiliuosius (transporto priemonės) ir stacionariuosius (pramonės bei energetikos įmonės). Stacionarūs taršos šaltiniai sudaro apie vieną trečdalį visos taršos, tačiau didžiąją jos dalį sudaro mechaninės taršos produktai (dulkės, aerozoliai), kuriuos galima išvalyti. Iš visos 1990 m. Lietuvoje už taršą atsiskaičių įmonių teršalų emisijas apie 77 % sudaro dulkės ir aerozoliai, o apie 22 % – dujos (Baltrėnas *ir kt.* 2008).

Dūmai ir dujos, šalinami iš anglimi kūrenamų elektrinių, metalurgijos įmonių bei statybos pramonės įmonių, sudaro 90 % visų į atmosferą patenkančių teršalų. Lokali tarša šiomis dulkėmis ir pelenais yra didžiausia problema. Oro srautai gali pernešti daleles tolimais atstumas ir tai tampa tiek vietine, tiek globalia problema. Vienas iš pagrindinių teršalų yra smulkios kietosios dalelės (KD), kurių skersmuo yra ne didesnis kaip 10 μm (Серебрянский 2004).

Lietuvoje, kai 2003 metais oro kokybę pradėjo vertinti pagal Europos sąjungos reikalavimus, išryškėjo, jog aglomeracijose yra kietųjų dalelių taršos problema. Todėl nuo 2005 m. priimta, kad paros ribinė vertė (50 $\mu g/m^3$) negali būti viršyta daugiau kaip 35 kartus per kalendorinius metus. Smulkios kietosios dalelės, mažesnės kaip 10 μm, gali ilgą laiką išsilaikyti ore ir neigiamai veikti tiek aplinką, tiek patį žmogų, todėl šių dalelių vertinimą reglamentuoja Lietuvos teisės aktai bei ES direktyvos (Baltrėnas *ir kt.* 2008).

Gamybos technologija dar nėra tokia tobula, kad būtų gaminama be atliekų. Todėl, atsižvelgiant į gamybos atliekų kiekį ir sudėtį, būtina jas rinkti bei valyti, kad jos neterštų aplinkos ir nekenktų žmonių sveikatai. Šitaip atmosfera apsaugoma bent iš dalies, nes sulaikyti visas kenksmingas medžiagas techniškai sunkiai įmanoma, be to, norint padidinti oro valymo efektyvumą, reikia sudėtingesnių ir brangesnių įrenginių.

Vietinės valdžios sprendimai nepadeda išspręsti aplinkos oro taršos problemų, todėl sprendimai turi buti priimami globaliniu ar bent regioniniu mąstu. Tiek esama, tiek planuojama vykdyti ekonominė veikla sudėtingais ryšiais yra apribota siūlomais aplinkos tvarkymo sprendimais. Daugelis aplinkosaugos problemų yra neišsprendžiamos, tačiau tai turi būti kontroliuojama, kad pusiausvyra tarp ekonomikos, poveikio žmogui ir ekosistemoms būtų išsaugota (Taršos integruota....2005).

Viena iš labiausiai su sveikata susijusių problemų yra smulkios kietosios dalelės. Patekusios į plaučius dulkės sukelia uždegimines reakcijas kvėpavimo takuose, plaučiuose, per 10–20 metų gali išsivystyti pneumokonjozė. Dulkės veikia odą sukeldamos alerginę reakciją, užkemša prakaito liaukas, dėl to gali susidaryti pūliniai procesai. Dulkės dirgina akių gleivinę, sukelia akies junginės uždegimą (Mechaninė tarša...2012).

Darbo aktualumas

Ciklonai plačiai naudojami pramoniniuose procesuose kietosioms dalelėms atskirti iš oro srauto žemoje temperatūroje ir dūmų dalelėms atskirti deginant kietąjį kurą aukštoje temperatūroje (iki 300–500 °C). Jų konstrukcijose dujų kryptis yra dvejopa – tangentinė ir ašinė. Šie įrenginiai pasižymi paprasta konstrukcija, kompaktiškumu, jų eksploatavimo išlaidos nedidelės, nes viduje nėra judamųjų dalių ir jie nereikalauja daug priežiūros. Ciklonų trūkumai – didelis slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams ir su tuo susijusios energijos sąnaudos (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2012).

Įmonėse kietosios dalelės iš oro valomos viena ar keliomis pakopomis, o pirmoji pakopa dažniausiai yra ciklonas. Kad nereiktų dviejų pakopų, galima naudoti vienos pakopos valymą, tačiau valymo įrenginys turi būti labai efektyvus. Dviejų lygių daugiakanalio ciklono kūrimas yra susijęs su geresniu dulkėto oro nuo smulkių dalelių išvalymo efektyvumu, todėl gamybiniuose procesuose, kur su oru šalinamos smulkios (<20 μm) dalelės, du valymo įrengimus būtų galima pakeisti šiuo naujo tipo ciklonu. Taip pat šis ciklonas aktualus įmonėms, kuriose šalinamo oro srautai yra labai dideli. Tokio valymo įrenginio gabaritai būtų mažesni, tačiau valomo oro tūris liktų toks pat kaip didesnio, vieno lygio ciklono.

Techniniais reikalavimais, kurie taikomi tiek ciklonams, tiek bet kuriam kitam oro valymo įrenginiui, siekiama kuo didesnio oro valymo efektyvumo sukuriant kuo mažesnį aerodinaminį pasipriešinimą. Didėjant aerodinaminiam pasipriešinimui kartu auga ir energijos kiekis, panaudotas didesniam oro srauto pratekejimo kiekiui pasiekti (Chlebnikovas ir Baltrėnas 2011). Todėl tobulinant ciklono konstrukciją siekiama rasti geriausią variantą tarp aerodinaminio pasipriešinimo, kuris priklauso nuo oro srauto greičio, ir oro išvalymo efektyvumo.

Ciklono techniniai parametrai labiausiai priklauso nuo jame esančių pusžiedžių skaičiaus bei jų išdėstymo. Eksperimentiniais tyrimais bus siekiama rasti optimaliausią pusžiedžių skaičių ir išdėstymą, bei pritaikyti šiuos pokyčius skirtingo tankio dalelėms, kad būtų pasiektas didžiausias išvalymo laipsnis. Tai svarbu ir pramonei, nes skirtingose pramonės šakose susidaro nevienodo tankio ir dydžio kietosios dalelės, nuo kurių išmetamas oras turi būti skirtingai valomas.

Darbo naujumas

Tai kompleksiniai cilindrinio daugiakanalio dviejų lygių ciklono ekspermentiniai tyrimai bei jame vykstančių dinaminių procesų modeliavimas.

Darbo tikslas

Ekspermentiškai ištirti dviaukštį daugiakanalį cikloną, pritaikyti jį skirtingoms pramonėms bei atlikti matematinį modeliavimą.

Darbo uždaviniai

- Atlikti ciklono su skirtingu pusžiedžių skaičiumi bei skirtingo tankio dalelėmis ekspermentinius tyrimus;
- Atlikus ciklono efektyvumo nustatymą su skirtingo tankio dalelėmis, pritaikyti konstrukciją įvairioms pramonėms sritims;
- Atlikti dinaminių procesų ciklone modeliavimą.

Darbo praktinė vertė

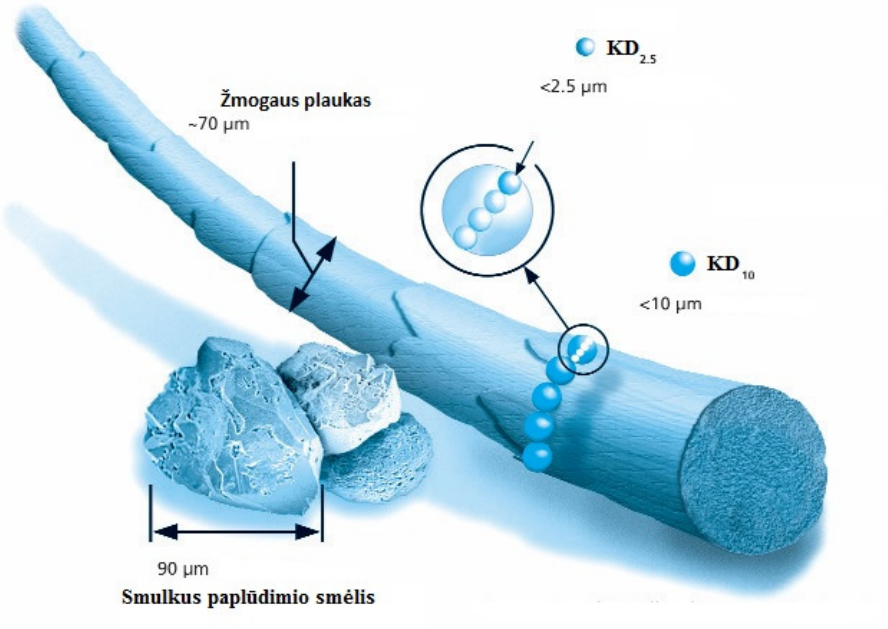
Sėkmingi darbo rezultatai, įrodantys, kad dviejų lygių daugiakanalis ciklonas yra efektyvesnė priemonė atskirti dulkėms iš oro srauto, padės sumažinti kietųjų dalelių emisiją į aplinką. Taip pat skirtingos šio ciklono pritaikymo galimybės leis įrenginį parinkti įvairioms pramonės rūšims ir taip pasiekti maksimalų skirtingų medžiagų išvalymo laipsnį. Tokia, dviejų lygių, konstrukcija yra beveik niekur nenaudota, todėl sėkmingi tyrimai garantuotų tokio ciklono pritaikymą pramonėje.

1. ORO TARŠA KIETOSIOMIS DALELĖMIS, VALYMO PROCESŲ ANALIZĖ BEI NAUJOS KARTOS CIKLONŲ TAIKYMAS

1.1. Kietosios dalelės ir jų savybės

Tarša kietosiomis dalelėmis – tai kietųjų ir skystųjų dalelių mišinys, kurios patenka į aplinkos orą. Šios dalelės gali būti klasifikuojamos keliais būdais (Pagano *et al.* 1998). Pirma, jos gali būti klasifikuojamos į pirmines ir antrines dalelės pagal jų susidarymą. Pirminės dalelės tiesiogiai išmetamos kaip dalelės, tuo tarpu antrinės dalelės susidaro atmosferoje iš pirminių dujų, kai jos patenka į aplinkos orą ir ten jungiasi su jame esančiomis medžiagomis. Taip pat abu dalelių tipai gali nusėsti jau ant esančių dalelių paviršiaus ir sudaryti naujas kietąsias daleles (Marko Vallius 2005; Samet *et al.* 2000).

Antra, kietosios dalelės yra klasifikuojamos pagal jų dydį, kuris kinta nuo kelių nanometrų (nm) iki dešimčių mikrometrų (µm) skersmens. Dydis yra svarbiausias veiksnys, lemiantis dalelių savybes ir jis turi didelę įtaką dalelių formavimosi procesams, fizinėms ir cheminėms savybėms, transformacijai, pernašai ir dalelių šalinimui iš oro srauto. Žymėjimas KD_x apima kietąsias daleles, kurių skersmuo yra mažesnis kaip x µm (dažniausiai x yra 10, 2,5 arba 1 µm) (Seinfeld and Pandis 1998; Rimkus *ir kt.* 2006). 1.1 paveiksle palygintas kietųjų dalelių dydis su žmogaus plauku, kurio vidutinis skersmuo siekia 70 µm.



1.1 pav. KD dydžio palyginimas (Understanding particle...2012)

Veiksnių, kurie lemia teršalų kaupimąsi, ir veiksnių, lemiančių teršalų sklaidą, balansas kontroliuoja teršalų laiko ir erdvės koncentracijos pokyčius (Fang *et al.* 2000). Pirma, suspenduotų kietųjų dalelių koncentracijos ir kiti požymiai yra veikiami taršos šaltinyje vykstančių veiksnių. Susidariusios dalelės gali keisti savo dydį ir sudėtį dėl kondensacijos arba garavimo, koaguliacijos su kitomis dalelėmis ar cheminių reakcijų (Seinfeld and Pandis 1998). Meteorologiniai veiksniai, tokie kaip vėjo greitis ir kryptis, temperatūra, kritulių kiekis ir atmosferos sluoksnio aukštis yra veiksniai, labiausiai veikiantys kietųjų dalelių koncentraciją (Pohjola *et al.* 2000). Aukščiausia KD koncentracija dažnai pastebima esant stabilioms meteorologinėms sąlygoms, pavyzdžiui, kai vėjo greitis būna labai mažas. Taip pat meteorologiniai veiksniai turi poveikį ir dalelių fizinėms bei cheminėms reakcijoms (Pohjola *et al.* 2004).

Tarša kietosiomis dalelėmis iš specifinių šaltinių įtakojama trumpalaikių ir ilgalaikių veiksnių. Pavyzdžiui, šaltuoju metų laiku prasidėjęs šildymas padidina kietųjų dalelių emisijas į atmosferą, tačiau tuo pačiu metu sniego danga sumažina kietųjų dalelių išnešimą nuo žemės paviršiaus. Europoje šaltuoju metų laiku daugiausiai užfiksuojama kietųjų dalelių, kurios mažesnės už 2,5 μm, koncentracijos padidėjimas (Van Dingenen *et al.* 2004; Sitnikovas ir Denafas 2002). Autoriaus manymu, tai įtakoja labai smulkių dalelių ir dūmų kondensacija ir tokių dalelių jungimasis į didesnes.

Kietosios dalelės sudaro apie 10 % oro teršalų emisijų. Jos susidaro gabenant birias medžiagas, jas smulkinant ir sijonant, bei šlifuojant ir poliruojant metalus. Kietosios dalelės sukelia rimtus sveikatos sutrikimus, kurie yra įvairus – nuo nedidelio poveikio kvėpavimo sistemai iki ankstyvos mirties (Mechaninė tarša...2008). Kietųjų dalelių poveikis sveikatai yra toks (Curtis *et al.* 2006, Clifford *et al.* 2007):

- kvėpavimo ligų simptomai (kosėjimas, sunkus kvėpavimas);
- pasunkėjusi plaučių veikla;
- astmos paūmėjimas;
- chroniško bronchito išsivystymas;
- nereguliarus širdies plakimas;
- širdies priepuoliai;
- žmonių, sergančių širdies ar plaučių ligomis, pirmalaikė mirtis.

Kietųjų dalelių poveikis sveikatai priklauso nuo jų rūšies, kiekio, poveikio trukmės bei žmogaus organizmo jautrumo.

Kiekvieną dieną į gydymo įstaigas kreipiasi žmonės dėl paūmėjusių astmos simptomų, širdies veiklos ar kvėpavimo takų sutrikimų. Tokie skaičiaus kitimai siejami su besikeičiančiomis 2,5μm ir

10 µm skersmens dalelių koncentracijomis. Tokios smulkios dalelės yra pernašamos giliai į plaučius ir ne tik pablogina širdies veiklos bei kvėpavimo takų veiklą, bet ir su jomis gali patekti kancerogeninių medžiagų (Matuliauskaitė 2009).

Daugiausia sveikatos sutrikimų sukelia mažesnės už 1 mikrometrą (µm) dydžio dalelės. Dulkės taip pat neigiamai veikia augalijos augimą ir vystymąsi. Tokias daleles yra sunkiausia išvalyti iš pramonės įmonių šalinamo oro, o didžiausia jų dalis iš oro pašalinama lyjant. Esant gausiems išmetimams smulkios dalelės dalyvauja debesų susidaryme ir gali padidinti debesuotumą bei kritulių kiekį tam tikroje vietovėje. Dalelės, kurių dydis apie 1 µm, efektyviai išsklaido matomąją šviesą, taip sumažindamos matomumą, o esant oro drėgnumui, susiformuoja migla (Mechaninė tarša...2008).

Kietųjų dalelių, esančių oro teršaluose, sąvybes galima suskirstyti į (Baltrėnas *ir kt.* 2008):

1) Fizinės – mechaninės (dalelių tankis, hidroskopiškumas, vandens sugeriamumas, santykinis paviršius, birumas, abrazyvumas, dalelių dispersija, adhezija, autohezija, optinės savybės, forma bei matmenys);

2) Elektrinės (elektrinė varža, elektros krūvis, santykinė dialektrinė skvarba, dielektriškumas);

3) Cheminės (sprogumas, degumas, savaiminis užsidegimas, rišamumas).

Oro valymo įrenginių efektyvumas labiausiai priklauso nuo KD fizikinių – cheminių savybių, tokių kaip: dalelių dispersinė sudėtis, tankis, sulipimas, abrazyvumas. Kitos KD savybės yra mažiau svarbios oro valymo įrenginių parinkimui bei valymo efektyvumui.

Dispersinė sudėtis. Dalelės dispersiškumas yra pagrindinė charakteristika, nes pagal dalelių skersmenį parenkami skirtingi oro valymo nuo KD įrenginiai. KD dydžiui nustatyti tinka tiek paprasti (sijojant, separuojant), tiek sudėtingesni (sedimentacija, mikroskopinė analizė) būdai.

Kietųjų dalelių tankis. Svarbi deginių KD savybė yra jų tankis, kuris skirstomas į:

- Tikrąjį (medžiagos dalelės);
- Piltinį;
- Tariamąjį.

Piltinis dalelių tankis svarbus parenkant oro valymo įrenginių bunkerius. Daugumai kuro pelenų piltinis tankis yra 250–1500 kg/m^3. Vienodėjant dalelių dispersiškumui mažėja piltinis tankis, nes didėja oro tarpų tūris. Susigulėjus sluoksniui šis tankis padidėja 1,2–1,5 karto.

Tariamasis tankis yra dalelės masės ir jos tūrio, įskaitant poras, tuštumas ir kt., santykis. Mažesnio tariamojo tankio dalelės lengviau sulaikomos skruberiuose ir rankoviniuose filtruose, o didesnio tariamojo tankio dalelėmis užterštą orą lengviau išvalo elektrostatiniai ir inerciniai oro

valymo filtrai. Tariamasis dalelių tankis gali kisti nuo kelių šimtų iki tūkstančio kg/m^3, tai priklauso nuo dalelių sudėties (Ramesh and Koziski 2001).

Abrazyvumas. Metalo eroziją, valant dūmus ar KD užterštą orą, labiausiai veikia dideli oro srauto judėjimo greičiai ir KD užterštumo koncentracijos, tačiau metalas skirtingai eroduoja dėl skirtingo dalelių kietumo, tankio, formos ir matmenų. Abrazyvumas privalo būti įvertinamas parenkant oro valymo įrenginių sienelių medžiagas, jų storius bei oro tekėjimo greičius (Švencianas 1994).

KD sulipimas. Išcentrinio oro valymo įrenginiuose valymo efektyvumas priklauso nuo KD sulipo tarpusavyje bei dalelių prilipimo prie ciklono sienelių. Užsikimšimas KD yra dažniausiai pasitaikanti ciklono eksploatacinė problema. Pagal sulipimą KD skirstomos į keturias grupes (Baltrėnas *ir kt.* 2008):

- Nesulimpančias;
- Mažai sulimpančias;
- Vidutiniškai sulimpančias;
- Gerai sulimpančias (cemento, molio dulkės).

Be šių fizinių savybių, gali būti vertinamos ir kitos: lipnumas, forma, hidroskopiškumas, lyginamasis paviršiaus plotas, birumas, tačiau jos mažai reikšmingos ir vertinamos tik kai kuriais atvejais. Saugumui svarbus dalelių savaiminis užsiliepsnojimas, degumas ir sprogstamumas. Tai svarbu parenkant valymo įrenginių bunkerius, talpas bei sandėliuojant surinktus teršalus.

Nuo kuro deginimo bei kuro smulkinimo būdo priklauso KD dispersiškumas. Degimo ir dūmų išleidimo dūmtakiais metu vyksta KD koaguliacija ir smulkėjimas, t.y. dispersinė sudėtis nuolat keičiasi, tačiau laikoma, kad iš smulkesnių dalelių susidaro stambesnės frakcijos dalelės ir atvirkščiai (Šležas 2004).

Lietuvoje plačiausiai naudojamos deginamo kuro rūšys yra akmens anglis, mazutas, mediena bei gamtinės dujos. Degant gamtinėms dujoms nesusidaro jokių kietųjų dalelių, tačiau kitų medžiagų degimo išlakose yra kietų dalelių, ir jų pagrindinės savybės pateiktos žemiau.

Akmens anglies degimo išlakų kietų dalelių savybės:

Katilinės išmetamose dujose kietų dalelių dispersija pateikta 1.1 lentelėje. Iš čia matyti, kad akmens anglies degimo išlakuose randamas didžiausias dalelių kiekis net 88–99,5 %, kai dalelių diametras siekia 2,5 μm.

1.1 lentelė. Deginamos akmens anglies kietųjų dalelių dispersija (Masilevičius ir Baltrėnas 1999)

Dalelės diametras d, µm	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63
Kiekis kietų dalelių didesnių už d, masė %	88-99,5	81-99	74-97,8	57-93,5	32-83,5	12-69	2,5-46	0-32

Mechaninės savybės: dalelių tankis ρ = 2070 – 2810 kg/m^3, piltinis tankis (netankinant) ρ_p = 340 – 1390 kg/m^3, piltinis tankis (maksimaliai sutankinus) ρ_{pt} = 420 – 1570 kg/m^3, dinaminis slydimo kampas α_d = 28° – 48°, autoadhezinės jėgos stiprumas F_{ad} = 18 – 134 Pa, abrazyvumo koeficientas (3 klasės plienui) k_a = 0,95, vandens sugeriamumas – 10 – 98 % (kai kurių šachtų anglių deginimo išlakų kietosios dalelės drėkinant vandeniu sulimpa į vientisą gabalą). Daugelis mechaninių – elektrinių kietųjų dalelių savybių priklauso nuo dalelių cheminės sudėties. Kietosiose dalelėse yra šių oksidų: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, TiO_2, Na_2O, K_2O ir SO_3.

Katilinėse deginamo mazuto degimo išlakų kietų dalelių savybės pateiktos 1.2 lentelėje. Iš šios lentelės matyti, kad mazuto dūmuose apie pusė pagal svorį dalelių gali būti mažesnių už 4 µm, orimulsijos dūmuose submikroninių dalelių kiekis gali siekti 99,2 %, tačiau didėjant dalelių dydžiams ir pasiekus 40 µm, jų kiekis sumažėja iki 8 %. Vadinasi, mazuto degimo išlakuose randamas labai nedidelis kietųjų dalelių kiekis.

1.2 lentelė. Mazuto degimo kietų dalelių dispersija (Masilevičius ir Baltrėnas 1999)

Dalelės diametras d, µm	4,0	6,3	10	16	25	40
Kiekis kietų dalelių didesnis už d, masė %	99,2	97,4	91,0	77,0	45,5	8

Mechaninės savybės: dalelių tankis ρ = 2040 kg/m3, piltinis tankis (netankinant) ρ_p = 199 kg/m^3, piltinis tankis (maksimaliai sutankinus) ρ_{pt} = 248 kg/m^3, dinaminis slydimo kampas α_d = 37°, autoadhezinės jėgos stiprumas F_{ad} = 47 Pa, vandens sugeriamumas – 100 % (Masilevičius ir Baltrėnas 1999).

Medienos degimo išlakų kietų dalelių savybės:

Medienos deginimo išlakų kietosios dalelės yra juodos spalvos, 100 – 200 µm didumo plaušinės formos. Medienos kietųjų dalelių dispersija pateikta 1.3 lentelėje. Iš šios lentelės matyti, kad medienos deginimo išlakuose apie pusė pagal svorį dalelių gali būti mažesnių už 4 µm ir dalelių kiekis gali siekti 91 %, tačiau didėjant dalelių dydžiams ir pasiekus 630 µm, jų kiekis sumažėja iki 19 %.

1.3 lentelė. Medienos degimo kietųjų dalelių dispersija (Masilevičius ir Baltrėnas 1999)

Dalelės diametras d, µm	4	6,3	100	160	250	400	630
Kiekis kietų dalelių didesnis už d, masė %	91	87	76	65	50	33	19

Mechaninės savybės: dalelių tankis ρ = 1820 kg/m^3, piltinis tankis (netankinant) ρ_p = 260 kg/m^3, piltinis tankis (maksimaliai sutankinus) ρ_{pt} = 320 kg/m^3, dinaminis slydimo kampas α_d = 44°, autoadhezinės jėgos stiprumas F_{ad} = 19 Pa, vandens sugeriamumas – 40 % (Masilevičius ir Baltrėnas 1999).

KD koncentracijos padidėjimo priežastys gali būti šios:

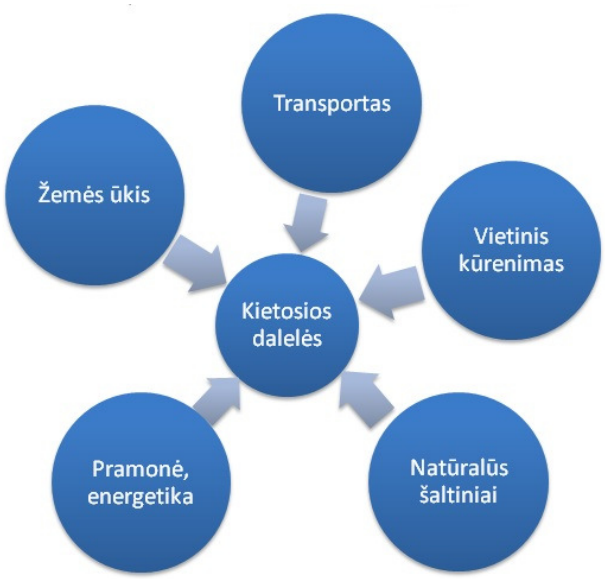
- Padidėja stacionarių teršalų išmetimai šildymo sezono metu;
- Dėl blogai nuvalytų gatvių pavasarį bei vasarą vėjas į orą pakelia daug kietųjų dalelių;
- Gatvių remontas, miškų ir pievų gaisrai;
- Didesni teršalų srautai atnešami iš kaimyninių valstybių;

Šaltuoju metų laiku, kai pradedamas šildymo sezonas, smarkiai padidėja teršalų koncentracija, tai veikia ir padėjusios transporto priemonių kuro sąnaudos. Esant sausiems ir nevėjuotiems orams transporto išmestos ir nuo žemės į orą pakeltos kietosios dalelės kaupiasi išmetimo vietoje. Tokiose vietose KD koncentracija dažnai viršija nustatytas normas, ir sumažėja tik palijus ar sustiprėjus vėjui (Morkūnienė 2006). KD pernaša iš kaimyninių šalių beveik vienodai veikia koncentracijas matavimo vietose, tačiau esant didesnėms teršalų pernašoms koncentracijos prie intnsyvaus eismo gatvių gali būti viršyjamos (Morkūnienė 2005). Nutirpus sniegui ir išsausėjus žemės paviršiui stiprus vėjas pakelia kietąsias daleles nuo nevalytų kelių ir vietų, kur dar nesužaliavę augalai. Be šių veiksnių, kietųjų dalelių koncentraciją ore veikia vykstančios statybos, miškų ir pievų gaisrai (Petrauskas ir Idzelis 2005).

1.2. Kietųjų dalelių taršos šaltiniai aplinkoje

Dauguma KD išlakų yra iš natūralių šaltinių, tokių kaip suspenduotų sausumos dulkių, vandenynų ir jūrų, ugnikalnių, miškų gaisrų. Tačiau šie teršalai į atmosferą patenka gana tolygiai ir dėl to sąlygoja mažą KD koncentracijos padidėjimą žemutinėje troposferoje. Suspenduotos sausumos dulkės, jūros druskos dalelės (daugiausia pakrantėse) ir biomasės degimas (miškų gaisrai) yra didžiausi gamtiniai taršos šaltiniai Europoje (Lazaridis *et al.* 2002). Pagrindiniai antropogeniniai šaltiniai, t.y. žmogaus veiklos sukurtos dalelės, yra transportas, stacionarus degimas, biomasės degimas, bei pramonės ir eismo neorganizuotai išmetami teršalai (dulkės gatvėse). 1.2 paveiksle

pateikti pagrindiniai taršos šaltiniai. Iš antropogeninių šaltinių išmestos KD yra sudėtingas mišinys, nes dauguma šaltinių į orą išmeta tiek pirminės dalelės, tiek dujas, iš kurių vyksta antrinių dalelių formavimasis. Dauguma antropogeninio KD taršos kiekio išsiskiria iš palyginti nedidelių miesto pramoninių rajonų, todėl susidaro išskirtinės vietos, kur pastebimos didelės kietųjų dalelių ir kitų oro teršalų koncentracijos. Pirminės ir susidariusios antrinės dalelės veikia fonines KD koncentracijas, išmestos dalelės gali likti suspensijoje būsenoje kelias dienas ir nukeliauti tūkstančius kilometrų.



1.2 pav. Kietųjų dalelių taršos šaltiniai (Aplinkos oro...2006)

Antropogeninių ir gamtinių šaltinių išmetamas į aplinką kietasias daleles kartais sunku atskirti, pavyzdžiui, neorganizuotai išmetamų dulkių kiekį ir biomasės deginimą (BéruBé *et al.* 1997). Be to, egzistuoja netolygus taršos šaltinių pasiskirstymas geografinių vietovių atžvilgiu. Pavyzdžiui, didžioji dalis išmetamų pirminių kietųjų dalelių rytų Europje yra kilusi iš stacionarių degimo šaltinių ir procesų, o vakarų Europos dalyje išmetamų teršalų kiekis tolygiai pasiskirstęs visiems ekonomikos sektoriams, tačiau transporto priemonių išmetami teršalai vaidina svarbų vaidmenį daugelyje vietų (ApSimon *et al.* 2000). Centrinėje ir šiaurinėje Europoje antropogeninio pobūdžio šaltiniai veikia ilgalaikę vidutinę KD koncentraciją, o dulkės ir miškų gaisrai pietų Europoje (Lazaridis *et al.* 2002).

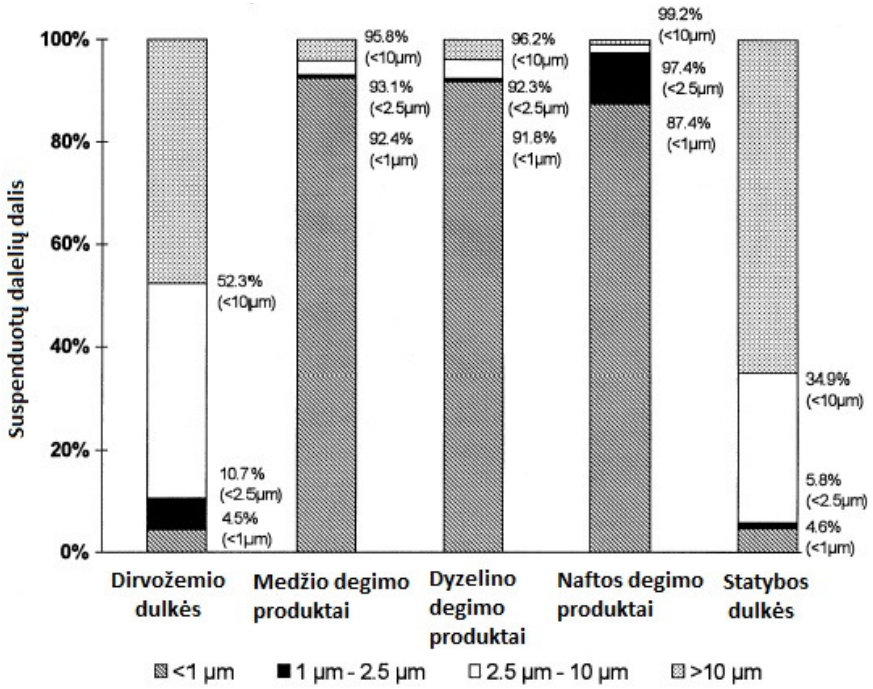
Svarbiausi stacionarūs taršos šaltiniai yra energijos gamybos įmonės, pavyzdžiui, elektrinės, atliekų deginimo įmonės, ir miestų katilinės. Kai kurios pramonės įmonės, tokios kaip, geležies ir plieno gamybos, degina iškastinį kurą ar biomasę, kad gautų energiją ir šilumą, reikalingą gamybos procesams atlikti. Dauguma iš šių šaltinių yra vietiniai, tačiau mažesni ir labiau paplitę šaltiniai, tokie kaip nuosavų namų katilinės taip pat galėtų būti laikomi kaip vietinis šaltinis. Fizinės ir

cheminės savybės iš šių šaltinių išmetamų dalelių priklauso nuo degimo proceso ir kuro rūšies (Marko Vallius 2005).

Nedideli, buityje naudojami kurą deginantys įrenginiai, tokie kaip buitinės virimo ir kepimo krosnys ir šildytuvai skaičiuojami milijardais visame pasaulyje. Tokiems šildymo įrengimams naudojamos skirtingos kuro rūšys, o jos priklauso nuo šalių išsivystymo lygio bei miesto ar kaimo gyvenamojo rajono. Didelė dalis namų ūkių išsivysčiusiose šalyse jau dešimtmečius naudoja šiuolaikinį švarų dujinį ar skystąjį kurą ar elektros energiją, maždaug pusė pasaulio gyventojų vis dar kasdien naudoja nešvarų biomasės kurą (pvz., gyvūnų mėšlą, augalų biomasę, medieną, anglis). KD, sunkiųjų metalų, CO ir kitų oro teršalų lygiai besivystančiose šalyse dažnai viršyja išsivysčiusoms šalims budingas taršos normas (Zhang *et al.* 2000; Zhang and Smith 1996). Miesto ir kaimo vietovėse, tokiose besivystančiose šalyse kaip Kinija ir Pietų Afrika, anglys yra vienas iš pagrindinių buityje naudojamų kuro rūšių. Iš tokių šaltinių išmetami teršalai patenka tiesiai į žmonių gyvenamas vietas, todėl tokių oro teršalų, patenkančių iš mažų šaltinių, poveikis dažnai didesnis nei tų, kurie patenka iš didelių taršos šaltinių (Zhang *et al.* 2000).

Pagrindiniai pramonės procesai, kurių išlakose yra didelė dalis KD, yra metalų ir cheminių medžiagų perdirbimo gamyklos, medžiagų apdirbimo, statybos bei kasybos įmonės. Kietosios dalelės iš tokių šaltinių yra pašalinamos neorganizuotai, jos nėra surenkamos ir į orą patenka iš skirtingų gamybos technologijos vietų (Seinfeld and Pandis 1998). Neorganizuotų KD išmetalų cheminės ir fizikinės savybės priklauso nuo procesų, kurių metu susidaro tarša (Harrison and Yin 2000).

Dalelės, iš skirtingų šaltinių ir procesų, yra dažnai aprašosos pagal jų fizinį dydį, tai pateikta 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Skirtingų kietųjų dalelių dydžio pasiskirstymas (Watson and Chow 2000)

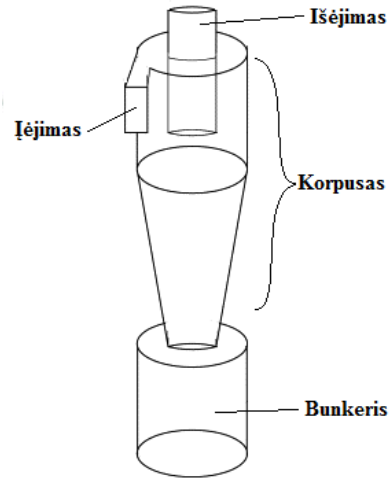
Dėl žemės ūkyje vykstančių mechaninių procesų stambesnės frakcijos dalelės, maždaug 10 – 2,5 µm skersmens, vėjo pakeliamos ir pakimba ore. Žemės ūkio veiklos metu susidariusios dalelės paprastai yra geologinės kilmės, tai vėjo išneštos dulkės nuo laukų, dulkės nuo negrįstų kaimo kelių, taip pat dulkės, patenkančios į orą iš tam tikrų žemės ūkio procesų metu, pavyzdžiui, derliaus nuėmimo, arimo, arba sodinimo. Sausose srityse, ypač vėjuotu laikotarpiu, dulkės kelia susirūpinimą daugeliame žemės ūkio vietovių, ypač sausringuose regionuose. Vėjo pakeltos dulkės, geriausiu atveju, kelia estetinį nepatogumą, o blogiausiu atveju gerokai pablogina matomą, dėl ko gali kilti eismo įvykiai (Claiborn 2006).

1.3. Tradicinių ciklonų konstrukcijos ypatumai ir analizė

Ciklonai – populiariausi oro valymo įrenginiai, kurie naudojami atskirti daleles iš dulkių ir oro mišinio.

Kai dalelių dydis didesnis už 10 µm, ciklono valymo efektyvumas siekia 80 – 95 %. Šiuos valymo įrenginius rekomenduojama naudoti pirminiam dujų valymui, o po jų naudoti rankovinius ar elektrostatinius filtrus. Tačiau kai kuriuose procesuose ciklono pakanka, kad išvalyti orą iki leistinų normų ir išleisti į atmosferą (Baltrėnas *ir kt.* 2000; Zhou and Sao 1990; Liden and Gudmundsson 1997).

Yra keturios pagrindines ciklono dalys: įėjimas, korpusas, bunkeris ir išėjimas (Bernardo *et al.* 2006) (1.4 paveikslas).



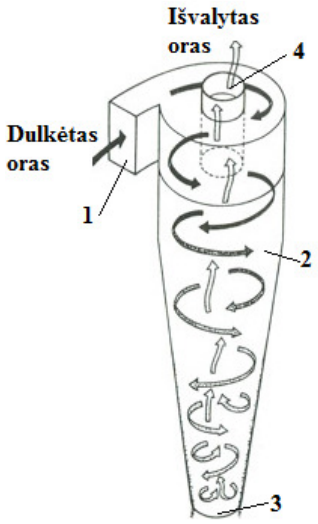
1.4 pav. Ciklono dalys (Mycock *at al.* 1995)

Ciklonai neturi judamų dalių ir būna ivairiausių formų. Jie naudoja inercijos jėgą atskirti daleles iš dujų srauto. Kadangi inercinė jėga sukuriama besisukančio dujų srauto, todėl inercinė jėga dažnai vadinamas išcentrine. Kiekvieną valomą dalelę veikia trys jėgos: gravitacinė, išcentrinė, ir trinties (Mycock *at al.* 1995; Denafas 2000).

Pirmasis dalelių išvalymo žingsnis yra jų nusėdimas palei vidinę ciklono sienelę dėl išcentrinės jėgos (Svarovsky 2000; Gujun Wan *et al.* 2008).

Antras vertikaliųjų ciklonų žingsnis yra dalelių nusodinimas bunkeryje. Skirtingai nei elektrostatiniuose bei rankoviniuose filtruose, dalelių kaupimasis ciklone nepagerina dalelių nusėdimo, kol dalelės pasiekia ciklono kūginę dalį. Dalelės nusėda tokiu dažnumu, kuris priklauso nuo jų sėdimo greičio. Toks nusėdimas yra gana mažas, kai dalelių skersmuo mažesnis nei 10 mikronų. Laimei, dauguma dalelių vertikaliuose ciklonuose išlaiko tam tikrą pagreitį, dėl judėjimo į bunkerį kartu su dujų srautu. Bendro nusėdimo ir pagreičio poveikio pakanka nugabenti daleles ciklono sienele ir kūgine dalimi iki bunkerio. Oro srautas, pasiekęs įėjimą į bunkerį staigiai pakeičia judėjimo kryptį ir sukdamasis kyla iki išmetimo vamzdžio, kur patenka į aplinką ar tolesnius valymo įrenginius (Svarovsky 2000; Gujun Wan *et al.* 2008). 1.5 paveikslė pateikta kaip oro srautai juda ciklone.

Trečiasis žingsnis bendram kietųjų dalelių atskyrimo procese yra pašalinti susikaupusias kietasias daleles iš bunkerio. Itin didelis dalelių susikaupimas įtekėjime į bunkerį gali blokuoti oro srautą ir kietųjų dalelių šalinimas ciklone tampa neefektyvus (Svarovsky 2000).

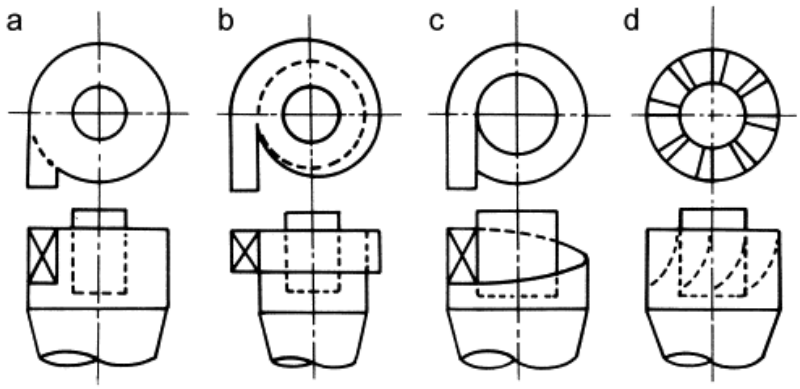


1.5 pav. Oro srauto judėjimas ciklone (Muir 1992)

Keli faktoriai veikia ciklono valymo efektyvumą. Svarbesnieji yra dalelių dydis ir tankis, dujų greitis ciklone, ciklono skersmuo ir dujų išbuvimo trukmė ciklone. Kadangi inercijos jėgos yra naudojamos atskirti daleles iš dujų srauto, išvalymo efektyvumas didėja didėjant dalelių dydžiui ir tankiui bei dujų greičiui ciklone. Išcentrinės jėgos didėja mažėjant ciklono skersmeniui, todėl mažesnio skersmens ciklonai yra efektyvesni nei didesnio skersmens. Ciklonuose, kurių cilindrinė ir kūginė dalys yra ilgesnės, palyginti su jų skersmeniu, dujų išbuvimo laikas yra ilgesnis ir todėl išvalymo efektyvumas didesnis (Hong *et al.* 2012).

Ciklonai nėra naudingi lipnioms dalelėms valyti. Tokias medžiagas sunku pašalinti iš bunkerio ir jos linkusios kauptis ant vidinės ciklono sienelės.

Didesniam dujų sukimosi greičiui pasiekti yra naudojami skirtingi įtekėjimai, pavyzdžiui, tangentinis, tęstinis, sraigtinis ir ašinis (1.6 pav.). Iš jų dažniausiai naudojami tangentiniai ir tęstiniai įtekėjimai.



1.6 pav. Oro įtekėjimai: a – tangentinis; b – tęstinis; c – sraigtinis; d – ašinis. (Cortes and Gil 2007)

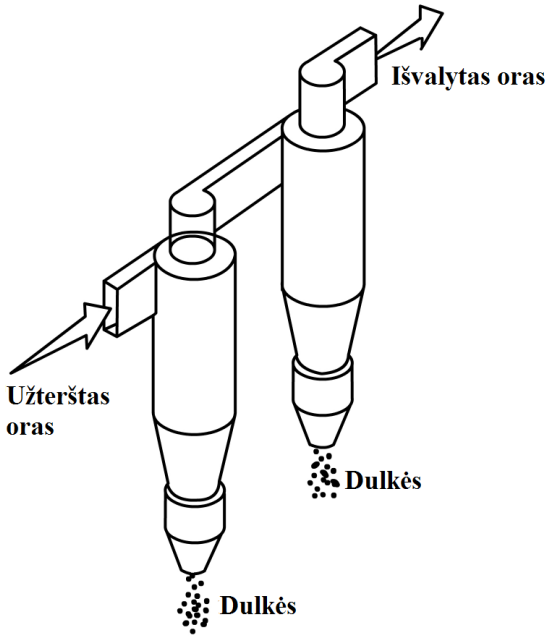
Klasifikuojant ciklonus pagal jų efektyvumą, būdinga išskirti du tipus: didelio efektyvumo ciklonai ir didelio našumo ciklonai (Chermisinoff 1993; Youngmin *et al.* 1999).

Didelio efektyvumo ciklonuose dujų įtekėjimo greitis yra didesnis, tada dujų srautui suteikiama didesnė išcentrinė jėga. Jų skersmuo paprastai yra mažesnis nei 0,3 m ir tokių ciklonų korpusas yra ilgesnis. Sunkesnės dalelės visada sukasi arčiau ciklono sienelės, todėl norint išvalyti smulkias daleles reikia, kad ciklono korpusas būtų ilgas (Chermisinoff 1993).

Didelio našumo ciklonų skersmuo paprastai yra didesnis, efektyvumas kinta nuo vidutinio iki mažiausio, ir jie gali išvalyti didesnius srautus. Tokių įrenginių eksploatacijos kainos ir išvalomo oro kiekio santykis yra geresnis, nei kurių nors kitų valymo įrenginių. Didelio našumo ciklonai plačiai naudojami šlifavimo, poliravimo, pluošto perdirbimo ir medienos apdirbimo procesų metu išsiskyrusioms dulkėms atskirti iš oro srauto. Didelio našumo ciklonai pakankamai gerai išvalo daleles, kurių dydis didesnis nei 50 µm (Chermisinoff 1993).

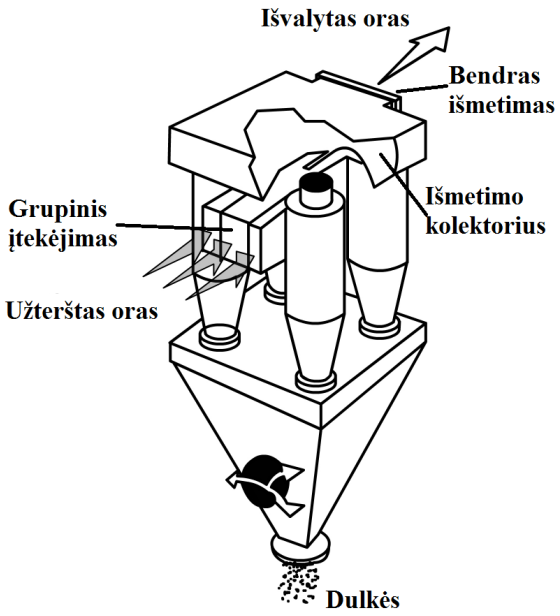
Ciklonai taip pat gali būti sujungiami nuosekliai vienas po kito, arba jungiami į grupes ir vadinami grupiniais ciklonais (Cortes and Gil 2007; Youngmin *et al.* 1999).

Nuoseklus jungimas naudajamas (1.7 paveikslas), kai siekiama geresnio išvalymo efektyvumo, arba kai tikimasi didesnių oro srautų, arba kai siekiama mažesnį cikloną apsaugoti nuo didesnių abrazyvinių dalelių. Tokiu atveju prieš yra statomas didesnis ciklonas, skirtas atskirti iš oro didesnes daleles (Cortes and Gil 2007; Youngmin *et al.* 1999).

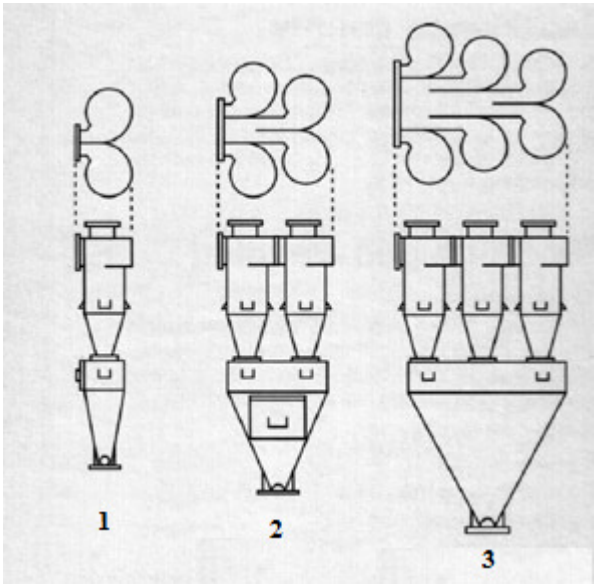


1.7 pav. Nuoseklusis ciklonų jungimas (Cortes and Gil 2007)

Ciklonai gali būti išdėstomi grupėmis naudojant dujų grupinį įtekėjimą, kuriame oro sautas ir dalelių koncentracija pasiskirsto tolygiai visiems ciklonams. Todėl tokiuose ciklonuose yra vienas įtekėjimo ir vienas bendro ištekėjimo vamzdis (1.8 ir 1.9 paveikslai) (Cortes and Gil 2007).



1.8 pav. Grupinis ciklonas (Dust collector...2012)



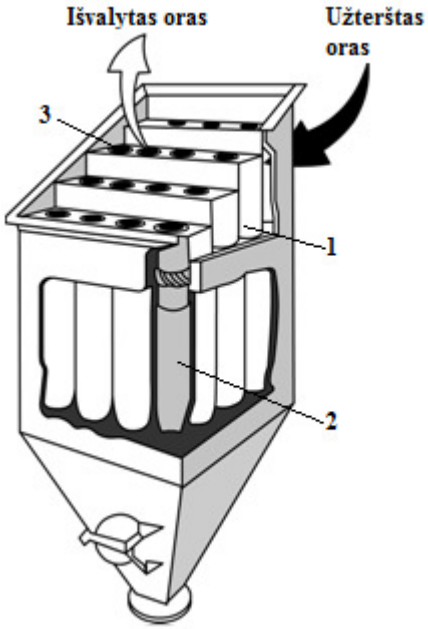
1.9 pav. Grupinių ciklonų jungimo būdai: 1 – dviejų ciklonų sujungimas; 2 – keturių ciklonų sujungimas; 3 – šešių ciklonų sujungimas (Dust collector...2012).

Nors tokie grupiniai ciklonai gali išvalyti didesnį oro kiekį, tačiau jie reikalauja didesnės priežiūros. Turi būti prižiūrima, kad visuose ciklonuose, iš kurių dulkės patenka į bendrą bunkerį, būtų vienodas slėgis. Dėl skirtingų slėgių dulkės iš bunkerio gali patekti į mažesnį slėgį sukuriantį

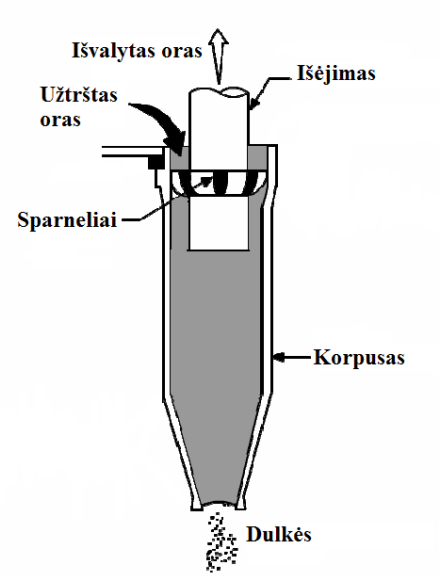
cikloną, ir tai sumažintų viso agregato valymo efektyvumą. Dėl to visi ciklonai ir jų įtekėjimai turi būti identiški, jie turi dirbti vienodomis sąlygomis (Dust collector...2012).

Kai oro valymas reikalauja tiek gero išvalymo efektyvumo tiek didelių oro debitų, tokiu atveju naudojami multiciklonai. Multiciklonų korpusas sudarytas iš daugybės mažų ciklonų, kurie turi bendrą oro įtekėjimą ir ištekėjimą. Ciklonų skersmenys gali svyruoti nuo 15 iki 30 cm, o jų skaičius gali būti nuo keliolikos iki kelių šimtų. 1.10 paveiksle parodytas multiciklonas, sudarytas iš 16 mažesnių (Environmental protection...2012).

Multiciklonų korpusas suskirstytas į tris dalis. Užteršto oro zona yra horizontali. Ji paskirsto orą visiems ciklonams ir atskiria multiciklono korpusą nuo bunkerio. Švaraus oro išleidimo kolektoriuje ciklonų išmetimo vamzdžiai išsidėstę laiptais, mažėjančia tvarka nuo įtekėjimo kolektoriaus. Išmetimo kolektoriaus dugnas skiria išmetimo ir įtekėjimo zonas, o kiekvieno ciklono išmetimo vamzdis eina per tiekiamo oro kolektorių (Environmental protection...2012).



1.10 pav. Multiciklonas: 1 – oro įtekėjimo kamera; 2 – ciklonas; 3 – oro išleidimo kamera (Environmental protection...2012)



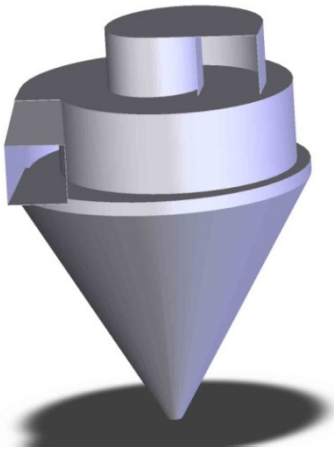
1.11 pav. Multiciklone esantis ciklonas (Environmental protection...2012)

Oras patenka į ciklonus per juose esančius sparnelius, kurie susuka oro srautą (1.11 paveikslas). Kadangi kiekvieno ciklono išvalomas oro srautas yra nedidelis, jie jungiami lygiagrečiai ir turi vieną įtekančio oro srauto kolektorių (Environmental protection...2012).

1.4. Naujos kartos ciklonų tipai bei modifikacijos

Dujų srauto valymas ciklone nuo pelenų ir dulkių – sudėtingas šilumos ir masės mainų procesas, kuris studijuojamas jau beveik 120 metų. Per šį laikotarpį buvo siūloma įvairių tipų ciklonų su daugiau ar mažiau panašių savybių. Ciklonas, kurį sudaro korpusas, išmetimo ir įėjimo vamzdžiai, paprastai gaminamas, montuojamas ir eksploatuojamas, be to universalus ir ekonomiškas (Серебрянский 2004).

Valymo įrengimai su uždarų kontūrų sistema, pavyzdžiui, ciklonai, taip pat yra paprasto dizaino, nesunkiai gaminami ir montuojami (1.12 paveikslas). Jie yra patikimi, universalūs ir ekonomiški. Jų moduliai, skirtingai nuo ciklonų, sujungtų į grupes, pasiekia aukštą dujų valymo kokybę nekeičiant produktyvumo. Tokių prietaisų pagrindas – viduje esantys kreiviniai kanalai, kurie sukuria uždarų kontūrų sistemas. Dulkėtas dujų srautas filtruojamas per kelis sluoksnius pelenų ir dulkių, kurie cirkuliuoja uždarose grandinese. Dulkėto srauto filtravimo ir išcentrinio valymo derinys - nauja kryptis inerciniuose ir dujų valymo filtruose (Балан *ir kt.* 2000).



1.12 pav. Daugiakanalis ciklonas (Балан *ir kt.* 2000)

Tokiuose naujos kartos ciklonuose uždari cilindrinės formos kontūrai yra skirtingo skersmens ir išsidėstę φ=π kampu, jie suformuoti dviejų, skirtingo skersmens, žiedų sienelių. Kiekviena pora gretimų kanalų sudaro vieną uždarą kontūrą. Tokių kanalų skaičius yra priklausomas nuo įrengime esančių žiedų skaičiaus (Серебрянський ir Плашихін 2011).

Uždari kontūrai jungia kanalų išėjimus ir įėjimus tame pačiame lygyje kaip ir kitų sudedamųjų dalių sistemos, ir kaip visa sistema. Uždari kontūrai atlieka kontrolės mechanizmą ryšio, kuris kyla dėl pusžiedžių išdėstymo, t.y. jie stabilizuoja sistemą. Tarpai, kurie yra tarp skirtingo diametro pusžiedžių, gali kompensuoti turbulentinius reikinius, sidarančius pačiuose kanaluose. Keičiant šiuos atstumus galima nustatyti aptimalų oro srautų pasiskirsttmą ir tai visiškai neapsunkina tokių įrenginių kūrimo. Tokiu būdu galima efektyviai kontroliuoti tokius sudėtingus procesus, kaip užteršto oro judėjimas (Серебрянський *ir kt.* 2004).

Dujų srautas yra padalinamas į dvi dalis kiekvieno kanalo išėjime. Periferinė cirkuliuojančio srauto dalis grįžta į kanalą, o centrinis srautas nukreipiamas į kitą kanalą. Praeidamas per visus kanalus iš eilės, oro srautas per centrinę išėjimo angą palieka sistemą. Uždarojo srauto sistemoje, dalelės, kurių masė didesnė nei kritinė, kartu su išcentriniu oro srautu patenka į pirmąjį kanalą ir yra nusodinamos į bunkerį. Dalelės, kurių masė yra mažesnė už kritinę, yra toliau nešamos oro srauto, o vidutinės masės dalelės pasiskirsto skirtingų skersmenų kanaluose ir cirkuliuoja uždaromis grandinėmis (Буров 2002).

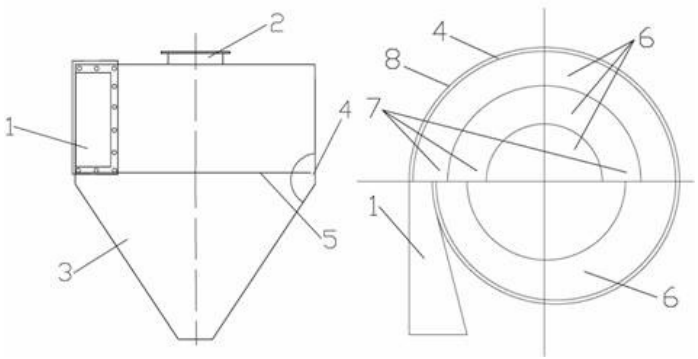
Kai dalelės, judėdamos sitemoje, tampa mažesnėmis ir lengvesnėmis, tada jos keliauja į aukštesnio skaičiaus kanalą (nuo ciklono sienelės link centro) ir yra išnešamos oro srauto. Tačiau kai dalelių masė dėl koaguliacijos mažėja, jos patenka į žemesnio skaičiaus kanalą (nuo centro link ciklono sienelės), ten jos susimaišo su įtekančiu dulkėto oro srautu ir nusėda į bunkerį. Abi galimybės yra įmanomos tik tada, kai dalelės visoje sistemoje užsibūna gan ilgą laiką (Буров 2002).

Tyrėjai Буров (1994), Балан ir kt. (2000) teigia, kad KD išcentrinis atskyrimas ir filtracija – dujų valymo naujovė. Pirmieji KD šalinimo tyrimai daugiakanaliuose ciklonuose pradėti 1960 metais. Šių įrenginių efektyvumas 1990 metais tyrinėtas spalvotosios metalurgijos pramonės gamykloje Ukrainoje (Серебрянский 2004).

Eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikiami 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Daugiakanalių ciklonų efektyvumas valant skirtingas daleles (Буров 1991, Серебрянский 2004)

Parametrai	**n – pusžiedžiu skaicius daugiakanaliame ciklone**				
Kietosios dalelės	Suodžiai	Pelenai	Pelenai	Varis	Fosfatai
Temperatūra, ºC	150	150	150	70	20
Našumas, m3/h	10^5	10^5	10^5	10^5	3000
Aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	150	500	1250	1250	1400
KD koncentracija prieš valymą, g/m^3	82	11,1	16,8	40	20
KD koncentracija po valymo, g/m3	23	2,8	1,8	4	1,2
Efektyvumas, %	70	75	90	90	94
Įrenginio skersmuo, mm	1500	1000	6000	6000	700
Įrenginio aukštis, mm	6500	2700	6000	6000	2000
Įrenginio masė, kg	4500	1000	10000	10000	100



1.13 pav. Daugiakanalio ciklono schema (Серебрянський 2004). Čia: 1 – užteršto oro įtekėjimo atvamzdis, 2 – išvalyto oro išėjimo atvamzdis, 3 – kūginis bunkeris, 4 – žiedinė anga, 5 – uždarų kanalų sistemos dugnas, 6 – kreiviniai kanalai, 7 – oro recirkuliacijos plyšiai, 8 – separacijos kameros korpusas.

Daugiakanalio ciklono schema pateikta 1.13 paveiksle. Jis veikia taip: užteršto oro srautas įėjęs pro tangentinio įleidimo atvamzdį 1 patenka į separacijos kamerą 8. Dėl išcentrinio judėjimo dulkės koncentruojasi periferineje kiekvieno kanalo 6 dalyje, ir per kanalus jungiančius tarpus atkeliauja iki pirmųjų dviejų kanalų. Patekusios į šiuos kanalus dulkės, veikiamos išcentrinių jėgų, spaudžiamos prie išorinės sienelės, kur per žiedinę angą 4 patenka į cilindrinį bunkerį 3, o lengvesnės ir mažesnės dalelės pro recirkuliacijos angas 7 patenka į separavimo zoną. Oras, tekėdamas pro recirkuliacijos plyšius, sukuria oro „užuolaidą“, pro kurią atitekantis užterštas oras yra papildomai filtruojamas.

Moksliniais tyrimais nustatyta, jog daugiakanalio ciklono KD atskyrimo teorinę priklausomybę nuo pusžiedžių skaičiaus galima apytiksliai nustatyti pagal 1.1 formulę. Skaičiavimo rezultatai pateikti 1.5 lentelėje. KD atskyrimo iš oro srauto koeficientas skaičiuojamas pagal formulę (Балан *ir kt.* 2002, Серебрянский 2004):

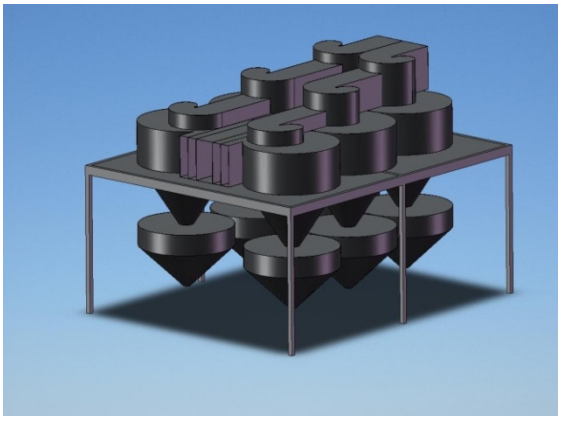
$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + 2^{n-1}}; \qquad (1.1)$$

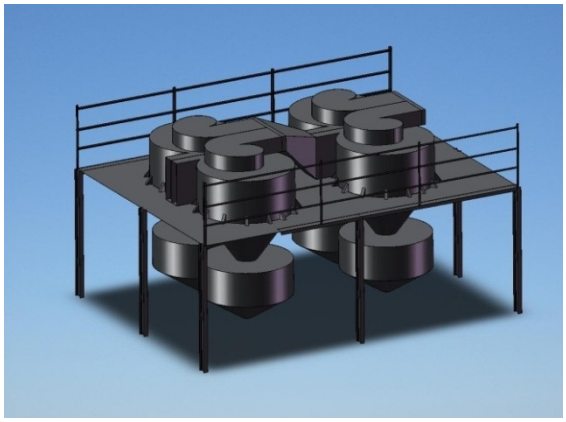
Čia: n – pusžiedžių skaičius daugiakanaliame ciklone, η – KD atskyrimo koeficientas.

1.5 lentelė. Išcentrinio filtro efektyvumas (Серебрянский ir Новаковский 2009)

Išcentrinio filtro kanalų skaičius, n									
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Oro valymo naudingumo koeficientas, %									
80	89	94,2	97	98,4	99,2	99,61	99,805	99,9025	99,95

Atskiri išcentriniai filtrai gali būti jungiami į blokus po du, keturis, šešis ir t.t (1.14 kairysis paveikslas). Taip sukuriama sistema, kuri geba išvalyti daug didesnį oro debitą. Tokie blokai gali būti naudojami ir pakopiniam oro valymui (1.14 dešinysis paveikslas). Ši sistemapasiekia itin aukštą dulkėto oro valymo efektyvumą (Серебрянский 2011).



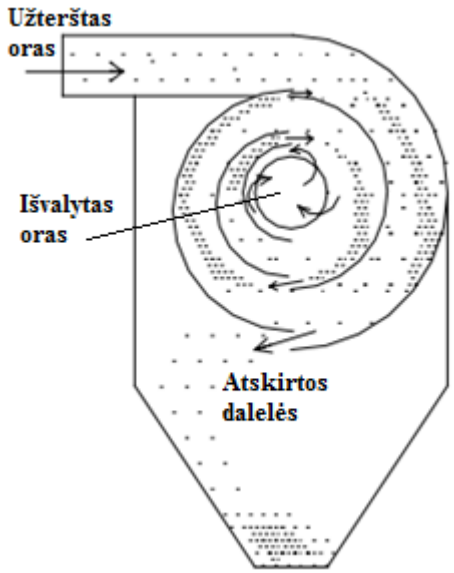


1.14 pav. Daugiakanalių ciklonų blokai (Серебрянский 2011)

Išcentriniai filtrai gali būti sėkmingai naudojami įvairiose pramonės šakose. Jų ilgaamžiškumą įrodo vienoje Moldavijos metalurgijos gamykloje įrengtas išcentrinis filtras, kuris sėkmingai veikia jau 7 metus, o prieš tai buvęs įprastas ciklonas ЦН-15 tarnaudavo vos pusė metų (Серебрянский 2011).

Dideliam oro debitui išvalyti reikia gan didelio valymo įrenginio, o didėjant pačiam įrenginiui krenta ir jo valymo efektyvumas. Dėl to buvo sukurtas dviejų lygių išcentrinis oro valymo filtras, kuriame separacijos kamera padalinta į du aukštus ir dėl šios priežasties galima išvalyti du kartus didesnį oro kiekį (Серебрянский 2011).

Daugiakanalis ciklono modelis gali būti pritaikomas ir vertikalioje padėtyje (1.15 pav).



1.15 pav. Vertikalus daugiakanalis ciklonas (Стрелец ir Тананаев 2002)

Toks vertikalus daugiakanalis ciklonas paremtas įprasto ciklono veikimo principu, tačiau yra sudėtingesnis ir pažangesnis. Jis skirtas atskirti sausoms dulkėms iš oro srauto. Veikimo principas toks pat kaip ir horizontalaus išcentrinio filtro, tačiau išcentrinis oro judėjimas vyksta vertikaliai, o išvalytas oras išeina horizontaliu vamzdžiu (Стрелец ir Тананаев 2002).

1.5. Dinaminių procesų, vykstančių ciklone, modeliavimo programos

Pastaruoju metu matematinis modeliavimas yra taikomas ne tik akademiniuose moksluose, bet ir pramonėje. Skaičiuojamoji fluidų dinamika naudojama norint suvokti procesus, susijusius su

fluidų judėjimu. Dabar sukurta daug programinių paketų, todėl vartotojams yra lengviau įsisavinti skaičiuojamąją fluidų dinamiką ir suprasti fluidų judėjimą. Nors programinė įranga yra plačiai prieinama, apie skaičiuojamosios fluidų dinamikos priemones mokoma universitetuose, kuriuose mokymo lygis gali būti labai aukštas (Remeikis ir Ulevičius 2004).

Modeliavimas yra plačiai taikomas aplinkos apsaugos bei daugelyje kitų mokslo ir inžinerijos sričių (Remeikis ir Ulevičius 2004). Modeliavimas – tai procesų, kuriuos sudėtinga ar nepatogu tyrinėti gamtinėmis sąlygomis, tyrimas naudojant jų sudarytus modelius. Modeliavimas gali būti suprantamas ir kaip vieno reiškinio savybių tyrimas panaudojant panašaus reiškinio savybes. Skaitinis modeliavimas – tai tiriamojo reiškinio, aprašyto diferencialinėmis lygtimis ir apriboto vienareikšmiškumo sąlygomis, skaitinis ar analizinis sprendimas (Petraitis 2010).

PHOENICS 3.5 VR matematinis modelis

Tai WINDOWS programa. PHOENICS programiniame pakete naudojamas pernašos lygčių diskretizavimo metodas yra baigtinių tūrių metodas. PHOENICS 3.5.0 programinės įrangos matematinio modeliavimo paketas gali modeliuoti pernašos procesus vykstančius atmosferoje, hidrosferoje ir geosferoje (Vaitiekūnas 2008):

- šilumos ir masės mainai, koncentracijos;
- šilumos mainai konvekcija, spinduliavimu ar laidumu;
- kiti sudėtingi šilumos mainų procesai;,
- turbulencinių srautų skaitinis modeliavimas;
- kietųjų dalelių judėjimas, dvifazio srauto skaitinis modeliavimas;
- cheminės kinetikos uždaviniai, cheminių procesų skaitinis modeliavimas;
- dvifazis degimo modelis;
- pernašos procesai oro sraute;
- daugiatinklis sprendimas.

COMSOl Multiphysics

Modeliavimo programinė įranga, skirta bet kokiems fluidų judėjimams modeliuoti. Šios programos CFD modulis skirtas modeliuoti sistemas, kuriose vyksta sudėtingi fluidų srautų judėjimo procesai. Kaip ir kituose COMSOL produkto moduliuose, CFD modulis suteikia paruoštas fizikines sąsajas, kurios yra sukonfigūruotas gauti modelio įvestis per grafinę vartotojo sąsają (GUI), ir naudoti šias įvestis aprašant modelį lygtimis. CFD modulis yra aprūpintas fizikinėmis sąsajomis, kurios leidžia modeliuoti dauguma fluido judėjimo aspektų, įskaitant spūdžių fluidų,

izoterminių, neniutoninių, dviejų fazių, ir srautų per poringą terpę laminarinį ir turbulentinį judėjimus. CFD modulis gali būti naudojamas kaip standartinis įrankis atlikti skaičiuojamąją skysčių dinamiką (CFD), arba šis modulis gali būti jungiamas su kitais COMSOL moduliais, kuriuose nagrinėjamas fluidų judėjimas (CFD module...2012).

CFD modulio grafinė vartotojo sąsaja suteikia pilną kontrolę visiems modeliavimo proceso etapams. Tai apima šiuos veiksmus:

- pasirinkus atitinkamą srauto aprašymą, pavyzdžiui vienfazis arba dviejų fazių, laminarinis arba turbulentinis srautas ir t.t.;
- kurti arba įterpti modelio geometriją;
- apibrėžti fluidų savybės;
- įrašyti šaltinio kraštines sąlygas arba redaguoti pagrindines fluido modelio lygtis;
- pasirinkti tinklelio elementus ir kontroliuoti tinklelio tankumą;
- pasirinkti sprendinius ir patikslinti juos, jei reikia.

ANSYS matematinis modelis

ANSYS – tai universalus modeliavimo programinis paketas, kuris skaitiniu būdu geba spręsti įvairius mechaninius uždavinius. Pagrindinės lygtys sprendžiamos ir įvairios kraštinės sąlygos įvertinamos naudojant baigtinių elementų metodą. ANSYS programinis paketas suteikia galimybę:

- Kurti kompiuterinius struktūrų, produktų, komponentų, detalių ar sistemų modelius arba perkelti ir modifikuoti CAD modelius;
- Modeliuoti įvairias darbines konstrukcijų apkrovas;
- Tirti medžiagų fizines reakcijas į įvairių rūšių poveikį: įtempimų, temperatūros, elektromagnetinio lauko ir kt.;
- Iš anksto optimizuoti kuriamo produkto dizainą, taip sumažinant gamybos išlaidas;
- Atlikti kuriamo produkto testavimą aplinkoje, kurioje realiomis sąlygomis tyrimų atlikti neįmanoma (Vaitiekūnas 2008).

ANSYS programoje įdiegta išsami grafinė vartotojo sąsaja, suteikianti vartotojui lengvą priėjimą prie programos funkcijų, komandų, dokumentacijos ir nuorodų. Intuityvi meniu sistema padeda vartotojui orientuotis ANSYS programoje.

ANSYS/FLOTRAN programa ir FLOTRAN CFD (Computational Fluids Dynamics) operacija suteikia galimybę modeliuoti fluidų srautus dvimatėje ir trimatėje erdvėje. Naudojant šias programas ir FLOTRAN CFD elementus FLUID 141 bei FLUID 142, galima modeliuoti:

- Kėlimo ir stabdymo procesus ant aerodinaminių paviršių;

- Didelių greičių srautus (viršgarsinius);
- Kompleksinę, trimatę tekėjimo lenktuose vamzdžiuose struktūrą (Vaitiekūnas 2008; Paulauskienė 2008).

Taip pat ANSYS priemonių ir FLOTRAN pagalba galima atlikti tokias užduotis:

- Rasti dujų slėgio ir temperatūros pasiskirstymą variklio išmetimo sistemoje;
- Tirti terminę stratifikaciją ir numatyti avarijas vamzdynų sistemose;
- Tiriant srautų maišymąsi įvertinti šilumos smūgio riziką;
- Analizuoti natūralią konvekciją ir įvertinti termines elektroninių mikroschemų charakteristikas;
- Tirti šilumos mainus tarp skirtingų fluidų bei tarp fluidų, atskirtų pertvaromis (Vaitiekūnas 2008; Paulauskienė 2008).

ADMS 4 matematinis modelis

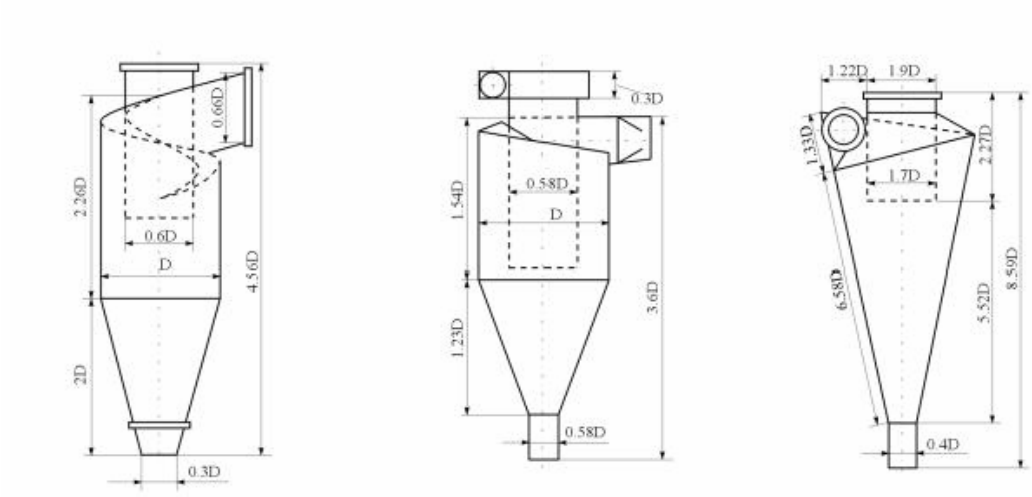
ADMS 4 yra lokalaus mastelio (mikromastelio) atmosferos dispersijos modeliavimo sistema. Tai naujos kartos oro dispersijos modelis, kuris reiškia, kad atmosferos ribinio sluoksnio savybės yra aprašomos dviem parametrais: a) ribinio sluoksnio gyliu; b) Monin–Obukov ilgiu – vietoj vieno diskretaus parametro – Paskvilio stabilumo klasės. Dispersija konvekcinėmis meteorologinėmis sąlygomis skaičiuojama asimetriniu Gauso koncentracijų pasiskirstymu. ADMS 4 gali vienu metu modeliuoti nuolatinius išmetimus ir momentinius bei nuo laiko priklausomus išmetimus. Industrinių šaltinių emisijų greičiai dažniausiai kinta laike (Vaitiekūnas 2008).

ADMS 4 gali modeliuoti emisijų greičio kitimą kartu su kintamais dydžiais: emisijos temperatūra, išmetimo greičiu, šaltinio skersmeniu ir vandens sudėtimi dūmuose.

ADMS 4 modeliuoja trumpojo laikotarpio teršalų koncentracijų svyravimus. Be to, modelis gali suskaičiuoti kvapų koncentracijas naudodamas 15 minučių vidurkinimo laikotarpius. Kvapų modulis taip pat atsižvelgia į turbulencijos ir meteorologinių sąlygų kitimą. ADMS 4 turi radioaktyvumo modulį, kuris skaičiuoja šaltinių išmestų radioaktyvių medžiagų pusamžius. Modelyje įrašyta daugiau kaip 800 izotopų pusamžių ir gali suskaičiuoti gama spindulių dozių lygius (Vaitiekūnas 2008).

1.6. Ciklonų panaudojimas skirtingose šalyse

Rusijoje yra keletas mokslo organizacijų, kurios naudoja cikloninius įrenginius kietoms dalelėms atskirti iš oro srauto: NIIOGaz institutas Maskvoje, darbo apsaugos Sverdlovsko Institutas Jekaterinburge, Rostovo valstybinis Universitetas (Rostov – on – Dono). NIIOGaz institute naudojami krumpliaratinės ir kūgiškos struktūros ciklonai (1.6 pav.). Plačiausiai paplitę ciklonų modeliai Rusijos pramonėje yra: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15y, ЦН-24. Šie ciklono modeliai atsižvelgiant į našumą, įrengiami po vieną arba po du, keturis, šešis ar aštuonis ir jungiami į grupes (Ватин ir Стрелец 2003).



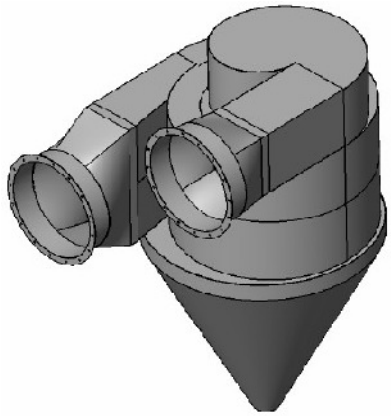
1.16 pav. Pagrindiniai Rusijoje naudojami ciklonai: a – НИИО ciklono modelis, b – ЛИОТ ciklono modelis, c – СИОТ ciklono modelis (Ватин ir Стрелец 2003)

Rusijoje pagrindinės pramonės šakos, kuriose taikomi cikloniniai įrenginiai yra šie:

- Abrazyvinėms dulkėms (suodžiams, talkams) valyti naudojami НИООТ ciklonai,
- Gaminti ploviklius, gaudyti kokso dulkes liejyklose naudojami ЦН-15 ir СДК–ЦН–33 ciklono modeliai. Šio tipo ciklonai pasiekia apie 97 – 98 % efektyvumą.
- Pluoštinėms dulkėms surinkti naudojami ЦКК ciklonai, kur efektyvumas pasiekiamas net iki 99 %, tačiau tokių dulkių diametras yra didelis (Ватин ir Стрелец 2003).

Ukrainoje, Kijavo mieste esantis Šiluminės fizikos technikos institutas kuria bei gamina daugiakanalius ciklonus, kitaip vadinamus išcentriniais filtrais СФ. Ciklonai kuriami pagal patentą, išduotą ukrainoje Nr. 78157.

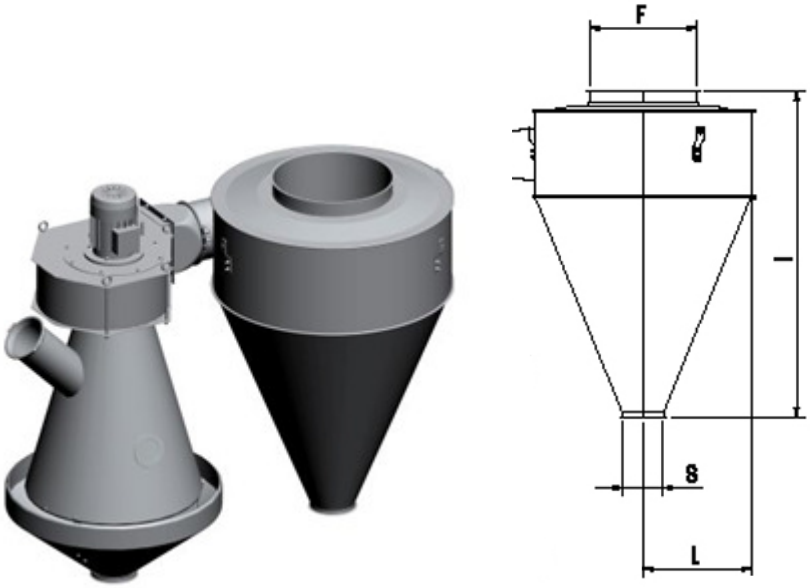
Ciklonai skirti išvalyti orą nuo dulkių ir dūmų. Tokie ciklonai pasižymi daug didesniu efektyvumu, nei populiarūs rusiški СИОТ ar ЦН ciklonai.



1.17 pav. Išcentrinis filtras СФ (Информационный быллетень 2008)

Pagrindinės įmonės, kurios gamina ciklonus Lietuvoje yra šios: UAB „Bokštuva“, UAB „Axis Technologies“, UAB „Agvasa“, UAB „Eneka“, UAB „Ekofiltras“.

UAB „Bokštuva“ pasinaudodama Danijos SOBY firma pradėjo gaminti pirminio valymo įrenginius R 14-25-40 (1.18 pav.). Šis pirminio valymo įrenginys naudojamas lengvų priemaišų pašalinimui: iš žirnių, grūdinių kultūrų, kukurūzų ir pupelių. Šio tipo įrenginiai statomi taip, kad visa transportuojama masė praeitų per jį, prieš patenkant grūdams į džiovyklą, saugojimo aruodus ar grūdų bokštus. Pirminio valymo įrenginys susideda iš orapūtės, oro srauto reguliatoriaus ir ciklono (Pirminio valymo...2012).



1.18 pav. SOBY grūdų valomosios: F – išmetimo vamzdžio skersmuo, mm; I – ciklono aukštis, mm; S – išėjimo į bunkerį skersmuo, mm; L – ciklono spindulys, mm. (Pirminio valymo...2012)

Ciklonų R 14/25/40 techniniai parametrai pateikti 1.5 ir 1.6 lentelėse (Pirminio valymo...2012)

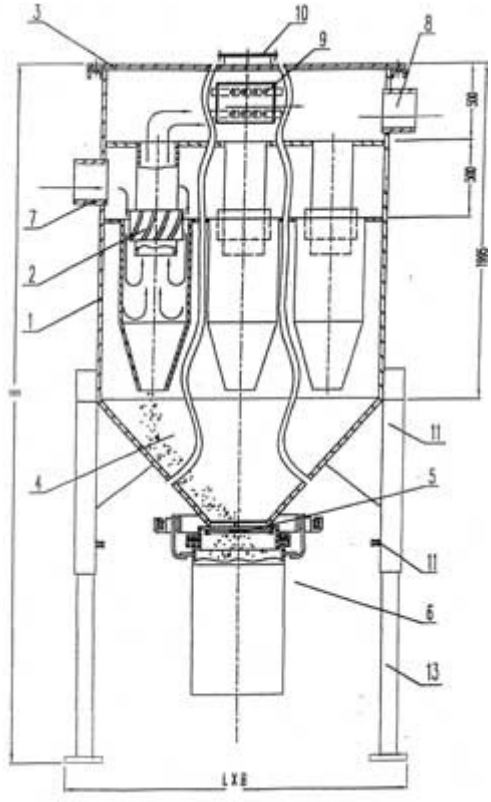
1.6 lentelė. Ciklonų techniniai parametrai (Pirminio valymo...2012)

Modelis	**F**	**I**	**S**	**L**
R14	300	892	150	276
R25	400	1210	200	399
R40	400	2400	200	350

1.7 lentelė. Ciklonų ir valomųjų techniniai parametrai (Pirminio valymo...2012)

	R14	**R25**	**R40**
Variklio tipas	0,75 kW; 3000 aps/min	2,2 kW; 3000 aps/min	5,5 kW; 3000 aps/min
Našumas, t/val	12 – 14	20 – 25	40 – 50
Oro debitas, m^3/val	1400	2400	5500
Oro išėjimo vamzdžio skersmuo, mm	150	200	300
Maksimalus vamzdyno ilgis iki ciklono, m	18	24	21
Svoris, kg	32	78	52
Ciklono svoris, kg	14	30	52

Firma „Axis Technologies“ gamina multiciklonus, kurie skirti lakiems pelenams atskirti nuo dūmų. Tokie bateriniai multiciklonai naudojami uždaroje patalpoje (stacionariuose pastatuose arba kilnojamuose konteineriuose) (Baterinis multiciklonas...2012).



1.19 pav. Baterinio multiciklono schema: 1 – ciklono korpusas, 2 – „rozetės" mentė, 3 – ciklono dangtis, 4 – ciklono bunkeris, 5 – bunkerio sklendė, 6 – pelenų surinkimo dėžė su prispaudėju, 7 – dūmų įėjimo anga, 8 – dūmų išėjimo anga, 9 – valymo durelės, 10 – sprogimo vožtuvas, 11 – atraminis vamzdis, 12 – varžtas ir veržlė atramos tvirtinimui, 13 – atrama (Baterinis multiciklonas...2012)

Kietųjų ir lakiųjų dalelių atskyrimas iš dūmų vyksta dėl inercinės jėgos poveikio, kai kietosios dalelės juda besisukančiu srautu ciklono valymo įrenginyje. Iš valymo įrenginio kietosios dūmų dalelės patenka į pelenų surinkimo talpą arba per pelenų dozatorių išleidžiamos į pelenų kanalą (Baterinis multiciklonas...2012).

UAB „Agvasa“ gamina mažuosius ciklonus (AVM 45.02.000). Mažieji ciklonai (AVM 45.02.000) (1.20 pav.) skirti pjuvenoms, žolės miltams, kombinuotiems pašarams atskirti iš oro srauto (Mažieji ciklonai...2012).

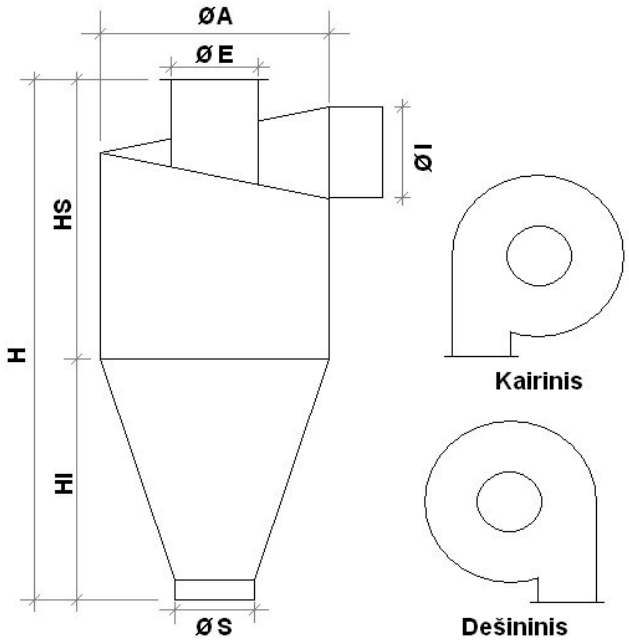


1.20 pav. Ciklonas AVM 45.02.000 (Mažieji ciklonai...2012)

Ciklono (AVM 45.02.000) techniniai duomenys:

- Vibracijos amplitudė – ne daugiau 0,55 mm.
- Oro srauto greitis – 24–27 m/s.
- 5,5 kW el. variklio apsukos – 2800–3000 aps./min.
- Matmenys: aukštis – 2208 mm, skersmuo – 800 mm, masė – 940–970 kg (Mažieji ciklonai...2012).

UAB „Ekofiltras“ gamina ciklonus, skirtus stambių dulkių frakcijų atskyrimui dulkių ištraukimo sistemose. Ciklono parametrai pateikiami Ciklonai yra skirti transportuojamą medžiagą atskirti iš oro srauto. Jie tinkami medžio, popieriaus, grūdų ir kt. pramonėms (Ciklonai...2012).



1.21 pav. Ciklono schema (Ciklonai...2012)

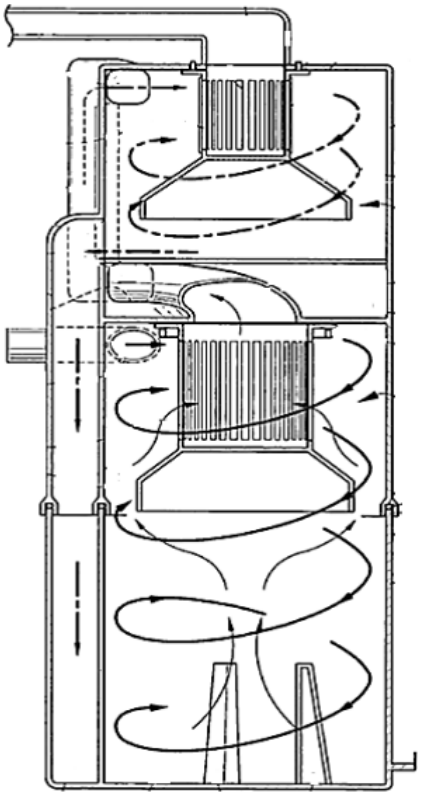
1.8 lentelė. UAB „Ekofiltras“ gaminamo ciklono parametrai (Ciklonai...2012)

Tipas	Našumas, m^3/val	øA,mm	øE, mm	øS, mm	øI, mm	H, mm
C60	2000	600	250	200	200	1700
C80	4000	800	350	250	200	2000
C100	5000	1000	400	250	250	2700
C120	8000	1200	450	300	300	3000
C150	10000	1500	600	300	500x400	3450
C180	12000	1800	650	300	500x400	3850
C200	16000	2000	700	300	600x400	4200
C220	21000	2200	800	300	700x400	4500
C250	25000	2500	800	300	700x400	4650

Ciklonai gali būti naudojami ir kaip pirminis dalelių atskirtuvas prieš smulkaus valymo filtrus. Jie gaminami iš 1–2 mm skardos ir yra cinkuoti. Cikloną galima užsakyti su pastatymo kojomis arba be jų. Užsakant pasirenkamas dešininis ar kairinis variantai (1.21 pav).

Ciklonas (1.22 paveikslas), kuris du kartus išvalo kietosiomis dalelėmis užterštą orą, susideda iš dviejų ciklonų: pirmojo ciklono ir antrojo ciklono esančio virš pirmojo ciklono. Ciklonas susideda iš nešvarus oro įleidimo angos, kuri prijungta prie apatinėje dviejų aukštų ciklono pakopos. Pirmoje pakopoje išvalytas oras pro integruotą filtrą per išleidimo angą patenką į antroje pakopoje esantį cikloną – filtrą. Antrame lygyje jau dalinai apvalytas oras papildomai filtruojamas

per filtrą ir dėl susidariusio didelio oro srauto greičio išmetamas į išorę per filtrą, kuriame papildomai išvalomi teršalai ir nešvarumai (Oh *et al.* 2006).

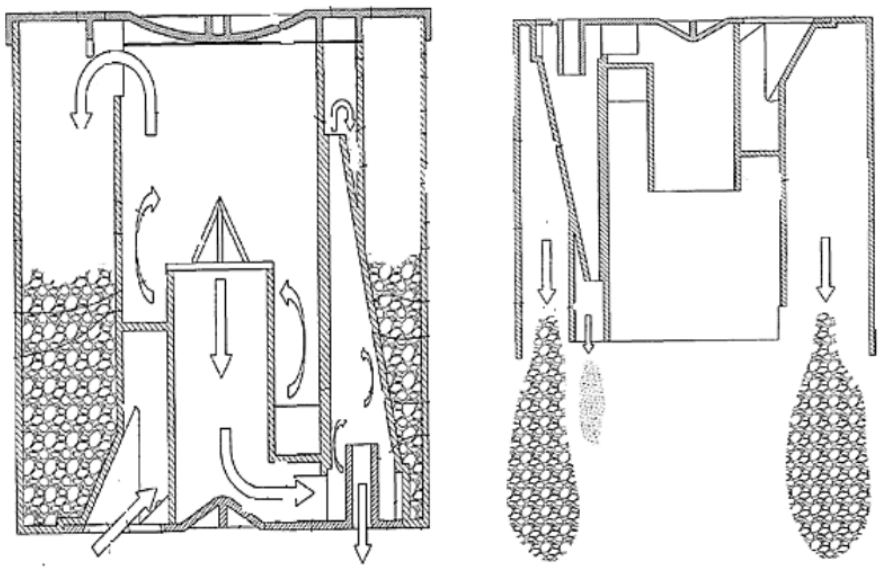


1.22 pav. Dviejų lygių ciklonas su integruotu filtru (Oh *et al.* 2006)

Kinijos mokslininkai (Oh *et al.* 2009) užpatentavo multicikloną pav. 1.23. Šiuo metu multiciklonas dulkių surinkėjas sukurtas ir tapo plačiai naudojamas. Šis multiciklonas atskiria teršalus iš oro dviem ar daugiau etapų, o ypač efektyvus atskiriant smulkius teršalus. Tradicinio multiciklono dulkių surinkėjo pavyzdys yra pateiktas 1.23 paveiksle

Šio išradimo tikslas yra sukurti kelių pakopų dulkių surinkėją, kuris turi aukštą dulkių surinkimo efektyvumą, nes ciklono viduje nevyksta oro susidūrimas. Kitas šio išradimo tikslas yra sukurti multicikloną, kuris turi aukštą dulkių surinkimo efektyvumą ir ilgą filtro tarnavimo laiką, nes surinkti teršalai išsisklaido keliose šio įrenginio dalyse.

Dar vienas šio išradimo tikslas yra sukurti mažagabaritinį oro valymo įrenginį, turintį erdvę, kurioje teršalai renkami skirtingose pusėse (Oh *et al.* 2009).



a b

1.23 pav. Multiciklonas su skirtingos eilės integruotais ciklonais. Čia: a – oro srauto judėjimas bei dulkių surinkimo schema; b – teršalų išleidimo schema (Oh *et al.* 2009)

Multiciklono dulkių surinkėjo veikimo principas yra teršalų šalinimas dviem etapais. Vakuumo generatorius generuoja siurbimo jėgą ir užterštas oras per siurbimo angą apačioje patenka į pirmąjį cikloną. Multiciklonas atskiria nuo teršalų prisotintą orą išsiurbdamas jį per siurbimo angą ir skirtingose dulkių surinkimo kamerose surenka teršalus. Šis ciklonas susideda iš pirmojo ciklono, verčiančio teršalų prisotintą orą sukurti taip, kad būtų atskirti gana dideli teršalų kiekiai. Pirmoji dulkių surinkimo kamera, kuri surenka teršalus iš pirmojo ciklono, o į antrąjį cikloną patenka oras iš pirmojo ciklono. Tuo metu padidėja sūkurinis oro srautas, tam kad būtų maksimaliai galima atskirti ir surinkti smulkiausias kietaisiais daleles (Oh *et al.* 2009).

1.7. Išvados

1. Kietosios dalelės sudaro apie 10 % oro teršalų emisijų. Jos susidaro gabenant birias medžiagas, jas smulkinant ir sijonant, bei šlifuojant ir poliruojant metalus. Kietosios dalelės sukelia rimtus sveikatos sutrikimus, kurie yra įvairus – nuo nedidelio poveikio kvėpavimo sistemai iki ankstyvos mirties.

2. Svarbiausi stacionarūs taršos šaltiniai yra energijos gamybos įmonės, pavyzdžiui, elektrinės, atliekų deginimo įmonės, ir miestų katilinės. Kai kurios pramonės įmonės, tokios kaip, geležies ir plieno gamybos, degina iškastinį kurą ar biomasę, kad gautų energiją ir šilumą, reikalingą gamybos procesams atlikti. Dauguma iš šių šaltinių yra vietiniai, tačiau mažesni ir labiau paplitę šaltiniai, tokie kaip nuosavų namų katilinės taip pat galėtų būti laikomi kaip vietinis šaltinis. Fizinės ir cheminės savybės iš šių šaltinių išmetamų dalelių priklauso nuo degimo proceso ir kuro rūšies.

3. Pagrindiniai pramonės procesai, kurių išlakose yra didelė dalis KD, yra metalų ir cheminių medžiagų perdirbimo gamyklos, medžiagų apdirbimo, statybos bei kasybos įmonės. Kietosios dalelės iš tokių šaltinių yra pašalinamos neorganizuotai, jos nėra surenkamos ir į orą patenka iš skirtingų gamybos technologijos vietų.

4. Dujų srauto valymas ciklone nuo pelenų ir dulkių – sudėtingas šilumos ir masės mainų procesas, kuris studijuojamas jau beveik 120 metų. Per šį laikotarpį buvo siūloma įvairių tipų ciklonų su daugiau ar mažiau panašių savybių. Ciklonas, kurį sudaro korpusas, išmetimo ir įėjimo vamzdžiai, paprastai gaminamas, montuojamas ir eksploatuojamas, be to universalus ir ekonomiškas. Tai yra bene populiariausi oro valymo įrenginiai.

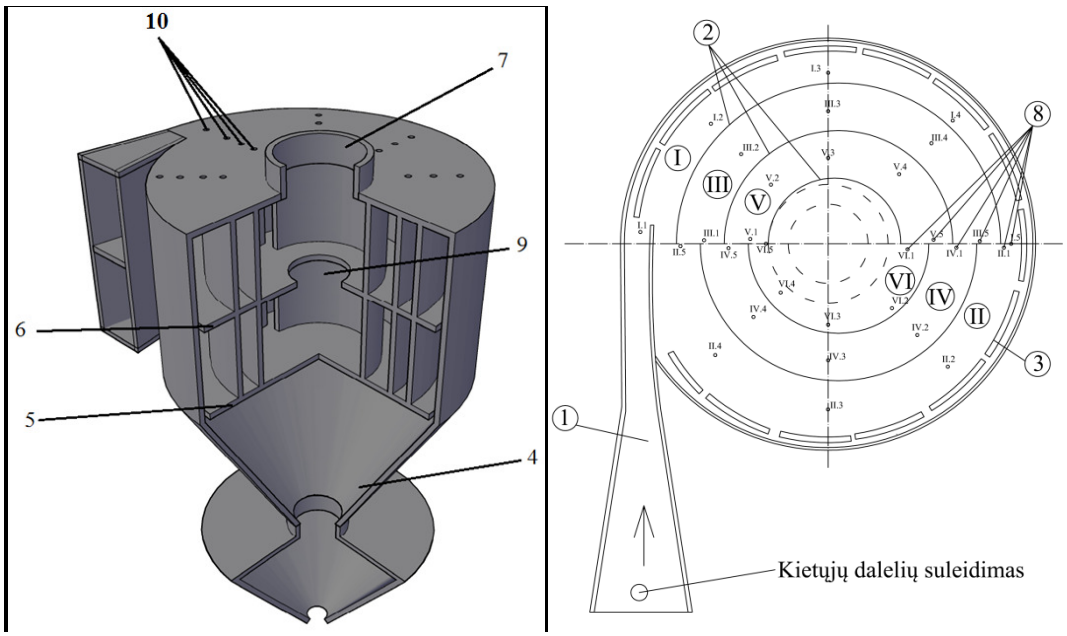
5. Naujos kartos daugiakanaliai ciklonai pasižymi ypač aukštu užteršto oro išvalymo efektyvumu, todėl puikiai tinka naudoti netgi vietoje rankovinių filtrų.

2. DVIEJŲ LYGIŲ DAUGIAKANALIO CIKLONO EKSPERMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Skyriuje pateikti dviejų lygių cilindrinio daugiakanalio (keturkanalio, šešiakanalio ir aštuonkanalio) ciklono aerodinaminių charakteristikų ir oro valymo efektyvumo eksperimentinių tyrimų metodika.

Tyrimai atliekami naudojant skirtingos kilmės KD ir keičiant įrenginio separavimo kameroje cilindrinių pusžiedžių skaičių ir padėtis. Eksperimentiniams tyrimams naudojamos KD buvo prasijotos pro 20 µm sietą.

2.1 paveiksle pateikta tyrimuose naudojamo dviejų lygių šešiakanalio cilindrinio ciklono aksonometrija ir vidinės konstrukcijos schema.



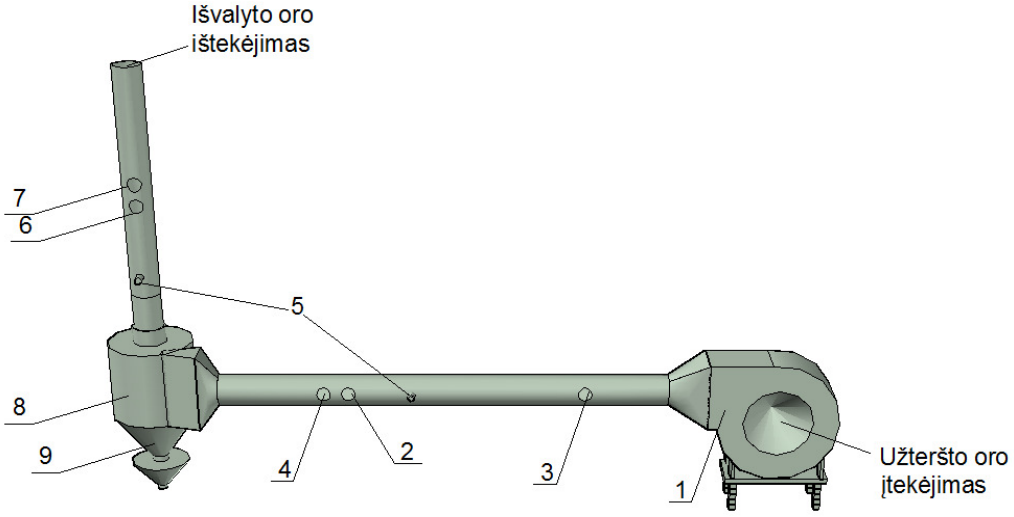
2.1 pav. Dviejų lygių ciklono įrenginys: 1 – oro srauto įtekėjimo anga, 2 – skirtingo spindulio žiedai, 3 – žiediniai plyšiai, 4 – kūginis dvigubas bunkeris, 5 - ciklono cilindrinio korpuso dugnas, 6 – lygių perskyrimas, 7 – oro srauto ištekėjimo anga-ortakis, 8 – tarpai tarp skirtingo spindulio žiedų, 9 – oro srauto ištekėjimo iš pirmojo lygio anga.

Dviejų lygių ciklonas lyginant su įprastais išcentriniais oro valymo įrenginiais šalina smulkiasias kietąsias daleles išcentrine jėga ir filtravimu, vykstančiu tarpuose tarp kreivalinijinių kanalų (8). Ciklono įtekėjime oro srautas yra dalinamas į dvi lygias dalis ir patenka į skirtingus lygius (pirmąjį ir antrąjį). Srautas per kanalų tarpus dalinamas į dvi dalis: oro srautas su didesnėmis dalelėmis patenka į didesnio spindulio kanalą, ir atkelevęs iki pirmojo (I) kanalo nukrenta į bunkerį

(4), antroji srauto dalis su smulkesnėmis dalelėmis filtruojasi per oro srautą ir patenka į mažesnio spindulio kanalą. Iš pirmojo lygio išvalytas oras pro angą (9) patenka į anrtą lygį ir susimaišęs su antrojo lygio oru išteka per išėjimo angą (7).

Šio įrenginio skersmuo – 0,50 m, cilindrinės dalies aukštis – 0,30 m, kūginės (dulkių surinkėjo) – 0,43 m, įtekėjimo angos plotas – 0,30x0,034 m.

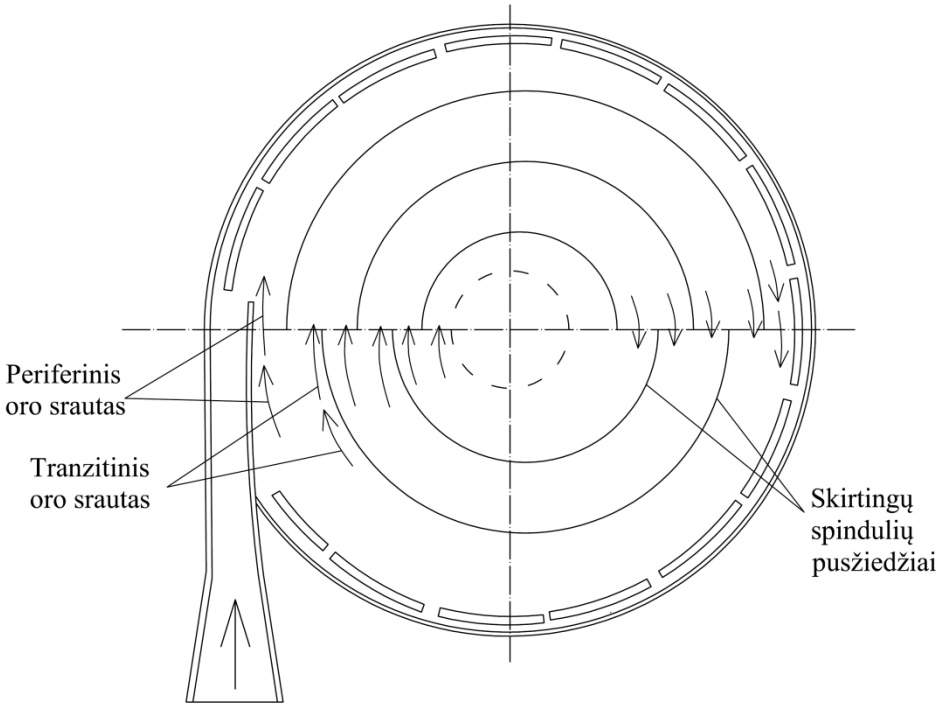
Ciklono eksperimentinio stendo schema pavaizduota 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Ciklono eksperimentinis stendas. 1 – Iščentrinis ventiliatorius; 2 – dalelių koncentracijos prieš valymą pasiurbimo vieta; 3 – dalelių suleidimo vieta; 4 – oro srauto greičio matavimo vieta įtekėjimo ortakyje su sparneliniu anemometru; 5 – sistemos sukuriamo pasipriešinimo matavimo antgaliai; 6 – dalelių koncentracijos po valymo pasiurbimo vieta;; 7 – oro srauto greičio matavimo vieta ištekėjimo ortakyje su sparneliniu anemometru; 8 – dviejų lygių ciklonas; 9 – dvigubas bunkeris.

Stendą sudaro ortakių sistema, kurie pagaminti iš PVC vamzdžių ir kurie sujungia pagrindinius sistemos elementus – oro srautą sukuriantį iščentinį ventiliatorių bei oro valymo įrenginį – cikloną. Taip pat vamzdžiais yra nuvedamas išvalytas oro srautas į išmetimo atvamzdį, kuris laboratorijoje sujungtas su vedinimo oro ištraukimo sistema.

Magistrinio darbo eksperimentai buvo atliekami keičiant cilindrinių pusžiedžių išdėstymo tvarką, t.y. keičiant grįžtančio (periferinio) ir toliau tekančio (tranzitinio) oro srautų santykį. Tranzitinio ir periferinio srautų pasiskirstymo schema pateikta 2.3 paveiksle.



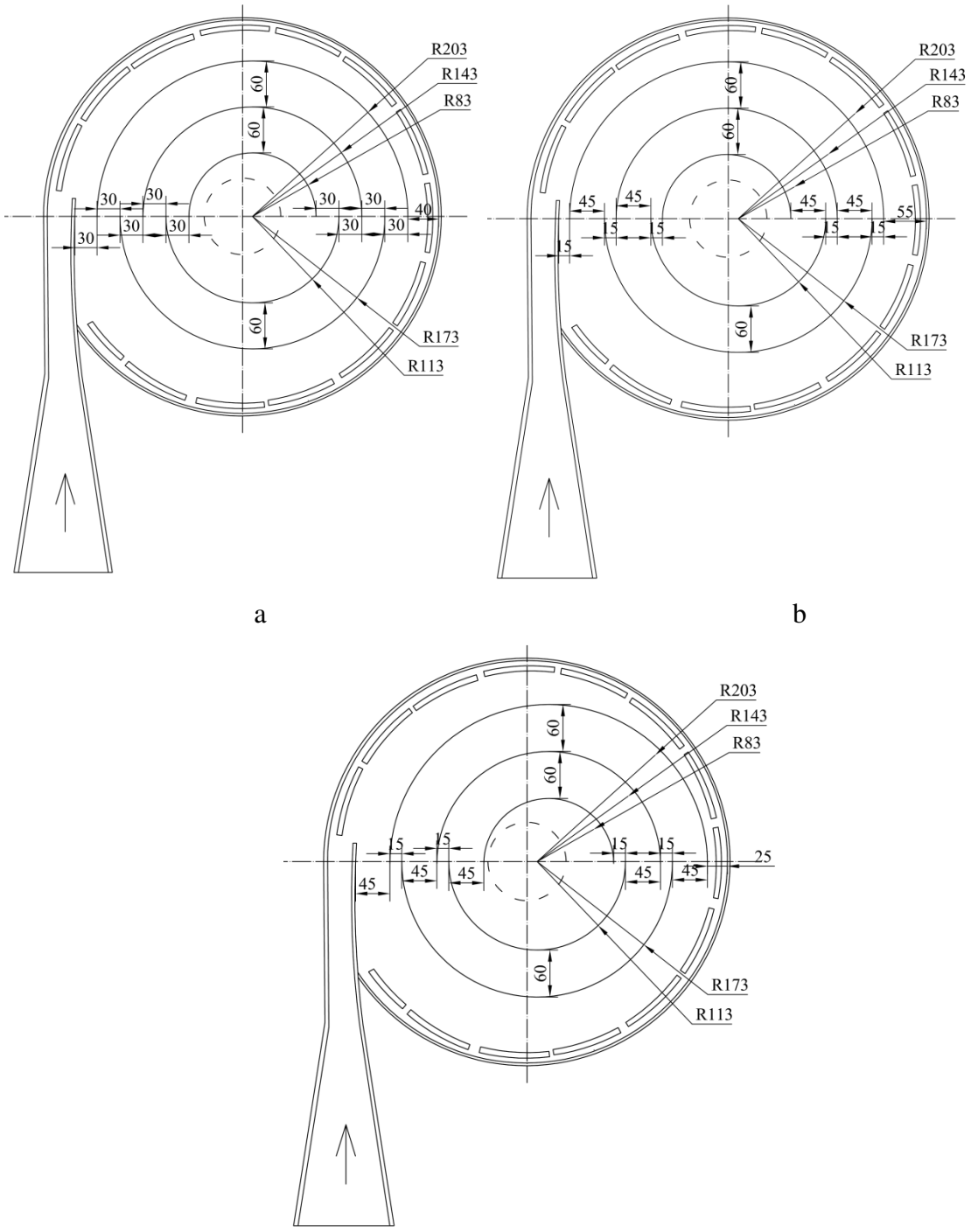
2.3 pav. Tranzitinio ir periferinio srautų pasiskirstymas

Pasirinktos trys išdėstymo padėtys:

1. Periferinio oro srauto tūris lygus tranzitinio oro srauto tūriui (50/50 padėtis);
2. Periferinis oro srauto tūris 25 % didesnis už tranzitinį oro tūrį (75/25 padėtis);
3. Periferinis oro srauto tūris 25 % mažesnis už tranzitinį oro srauto tūrį (25/75 padėtis).

2.1 lentelė. Atstumai tarp pusžiedžių esant skirtingoms padėtims

Kanalų skaičius	Atstumas tarp pusžiedžių įtekėjimuose į kanalus, mm					
	50/50 padėtis		25/75 padėtis		75/25 padėtis	
	Periferinio srauto plotis	Tranzitinio srauto plotis	Periferinio srauto plotis	Tranzitinio srauto plotis	Periferinio srauto plotis	Tranzitinio srauto plotis
4	40	40	20	60	60	20
6	30	30	15	45	45	15
8	20	20	10	30	30	10



2.4 pav. Šešiakanalio ciklono pusžiedžių išdėstymo schemos: a – 50/50 padėtis; b – 25/75 padėtis; c – 75/25 padėtis

2.1 lentelėje pateikti atstumai tarp pusžiedžių įtekėjimuose į kanalus vietoje. Padėties pavadinimas, pvz. 25/75, reiškia, jog periferinis srautas užima 25 % nuo viso srauto, o tranzitinis – 75 %. 2.4 paveiksle pavaizduoti šešiakanalio ciklono visų padėčių išdėstymo schemos. Panašus išdėstymas yra ir esant kitam kanalų skaičiui, skiriasi tik atstumai, kurie pateikti 2.1 lentelėje.

2.1. Aerodinaminių procesų ciklone tyrimų metodika ir naudojama įranga

Šio tyrimo tikslas – nustatyti vienfazio srauto greičio dviejų lygių cilindrinio keturkanalio, šešiakanalio ir aštuonkanalio ciklono kanaluose pasiskirstymą, oro srauto pasiskirstymą tarp lygių, bei nustatyti vidinės konstrukcijos įtaką bendram ciklono pasipriešinimui. Šiame skyriuje pateikiama oro srauto greičio ir slegio kanaluose tyrimų metodika.

Aerodinaminių charakteristikų aprašymui atliekami ir ortakių sistemoje bei dviejų lygių daugiakanalio ciklono konstrukcijos viduje eksperimentiniai tyrimai, nustatant dinaminius slėgius.

Dinaminis slėgis susideda iš atmosferinio ir statinio slėgių sumos. Statinis slėgis parodo skirtumą tarp pasipriešinimo, išmatuoto tiesiame ortakyje, ir pasipriešinimo, sukuriamo oro srautui išeinant iš ortakio į aplinką. Dinaminis slėgis didėja, didėjant oro srauto greičiui sistemoje.

Eksperimento metu naudojama įranga:

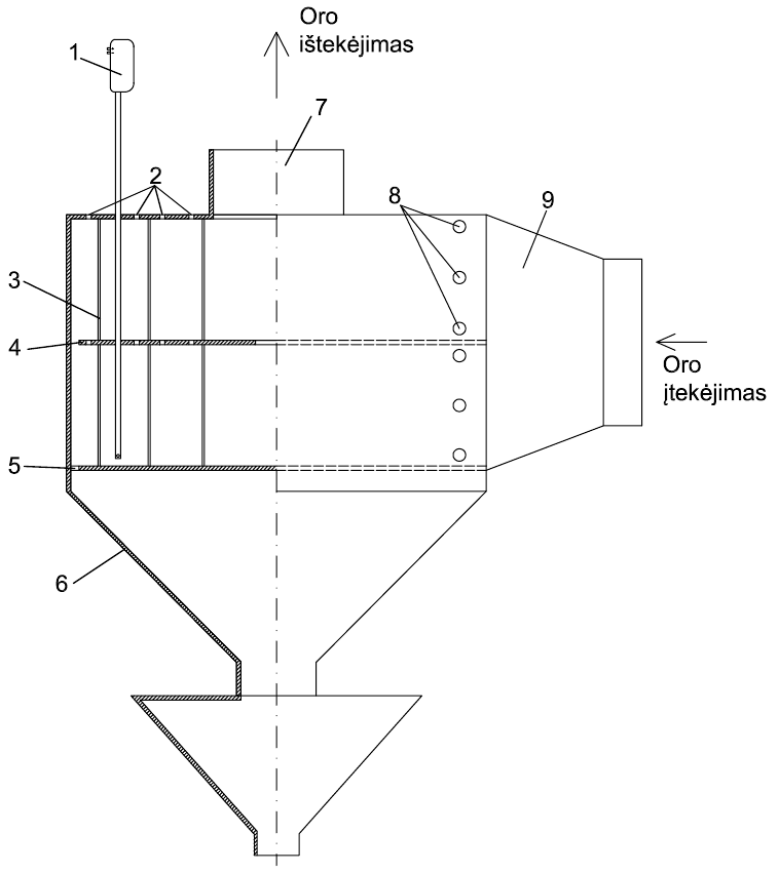
1. Daugiafunkcis matuoklis TESTO-400;
2. Diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1;
3. Sparnelinis zondinis anemometras;
4. Guminės žarnelės;
5. Pito vamzdelis.

Tyrimai buvo atliekami su vienfaziu oro srautu. Ciklono dangtyje ir lygių pertvaroje buvo padarytos specialios 8 mm kiaurymės, per kurias matavimo prietaisais buvo išmatuoti oro srauto greičiai ciklono įrenginio viduje (2.5 paveikslas).

Eksperimento metu oras iš aplinkos patenka į ortakių sistemą. Oro srovė sudaroma išcentrinio ventiliatoriaus (Alteko RFE 355–30, galingumas 4,4 kW) veikimu. Įeinančio oro srauto ortakio skersmuo siekia 200 mm. Išėjimo ortakis yra 160 mm skersmens.

Dinaminis oro srauto greitis išmatuotas matuokliu TESTO-400 (temperatūros matavimo ribos: 20–70 ^{o}C, paklaida ± 0,2 ^{0}C, greičio matavimo ribos: 1–30 m/s, paklaida ±0,05 m/s), panaudojant Pito dinaminį vamzdelį, sujungtą žarnelėmis su šiuo matuokliu.

Oro greitis matuotas kiekviename ciklono kanale 5 taškuose: kanalo pradžioje ir pabaigoje, kanalo viduryje ir 45º kampu nuo kanalo pradžios ir pabaigos. Maksimaliam matavimo tikslumui pasiekti, viename taške matuojama trijuose lygiuose: 2 cm nuo kanalo viršaus, kanalo vidurį ir 2 cm nuo kanalo apačios.



2.5 pav. Oro srauto greičių matavimo schema dviejų lygių ciklone: 1 – dinaminis Pito vamzdelis; 2 – 8 mm skersmens kiaurymės; 3 – skirtingo diametro pusžiedžiai; 4 – pertvara tarp lygių; 5 - ciklono dugnas su segmentiniais žiediniais plyšiais; 6 – kūginis bunkeris; 7 – oro srauto išėjimo anga; 8 – oro srauto greičių matavimo vietos ciklono tangentiniame įtekėjime; 9 – difuzorius

Visi matavimai atlikti keičiant ventiliatoriaus sukuriamą oro srauto debitą. Taip įvertinami oro srauto greičiai įrenginyje priklausomai nuo skirtingo ventiliatoriaus sukuriamo oro debito. Oro kiekiai keičiami ventiliatoriaus valdymo bloke, kuris reguliuojamas taip, kad vidutiniai greičiai ciklono viduje būtų 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s.

Matuojant oro srauto greičius, dinaminis Pito vamzdelis guminėmis žarnelėmis, kurių vidinis skersmuo lygus 6 mm, išorinis – 8 mm, per priedėlį sujungiamas su matuokliu Testo-400 (2.6 paveikslas). Dviejų lygių ciklono separavimo kameros dangtyje bei lygių pertvaroje padarytos kiaurymės suteikia galimybę išmatuoti oro srauto tekėjimo greičius vidinės pusžiedžių bei periferijos pasienio sluoksniuose, tarpuose tarp pusžiedžių. Bendras sistemos sukuriamas slėgis matuojamas prijungiant diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa). Prieš matuojant sistemos pasipriešinimą, daugiafunkciu matuokliu TESTO-400 ir anemometru matuojam greitis įėjimo ir išėjimo ortakiuose, taip įsitikinant, kad oro srautas yra stabilus.



2.6 pav. Testo-400 sujugtas su Pito dinaminiu vamzdeliu

Oro srauto greičių matavimai ciklono kanaluose ir ortakiuose atliekami po tris kartus, taip sumažinama bandymų rezultatų paklaida bei atmetamos sisteminės klaidos.

Pagal išmatuotus oro srauto greičius apskaičiuotas oro srauto debitas įtekėjimo ortakyje bei už ištekėjimo iš ciklono ortakyje panaudojant daugiafunkcį matuoklį TESTO-400 bei sparninį anemometrą. Tiksliems oro srauto greičio matavimams atlikti buvo panaudotas diferencialinis slėgio matuoklis, kurio pagalba buvo stebimas oro srauto nusistovėjimas.

Vieta kurioje atliekami oro srauto greičio matavimai turi būti tiesioje atkarpoje su stabiliu oro srautu. Ortakio atkarpoje per 5–6 skersmens dydžius iki matavimo vietos ir per 3–4 skersmenis už matavimo vietos neturi būti jokių srauto trikdžių: sklendžių, alkūnių, ventiliatorių ir pan.(LAND 1998).

Paruošus parinktą matavimo vietą, įrengus atvamzdį, slėgio matavimams ir angas – greičio matavimams, paruošiama matavimo įranga. Prieš naudojimą pneumatinis vamzdelis patikrinamas, ar nėra akivaizdžių gedimo požymių, ir įsitikinama, kad slėgio matavimo angos yra švarios ir neužkimštos. Pneumatiniai vamzdeliai sujungiami su slėgio matuokliais guminėmis žarnelėmis: pneumatinio vamzdelio bendro slėgio atvamzdis prijungiamas prie specialaus antgalio su ženklu (+) matuoklio korpuse, o pneumatinio vamzdelio statinio slėgio atvamzdis – prie antgalio su ženklu (-).

Oro srauto greičio matavimai atliekami ortakio centre ir kiekviename parinktame taške, atsižvelgiant į ortakio skersmenį. Pneumatinio vamzdelio galas nukreipiamas prieš dujų tėkmės kryptį. Vamzdelis stumiamas per skersmenį nuo artimesnės ortakio sienelės prie tolimesnės, sustojant kiekviename pasirinktame taške. Tokiu pat būdu matuojamas ir oro srauto greitis, naudojantis sparneliniu zondiniu anemometru. Išmatuojant bendro ir statinio slėgio skirtumus, t.y. dinaminį slėgį, paskui atvirkščiai (traukiamas nuo tolimesnės ortakio sienelės iki artimesnės) bei oro srauto greičius. Tame pačiame taške rezultatai neturi skirtis daugiau kaip 15 %. Matavimai kitame ortakio skerspjūvyje atliekami analogiškai.

Oro srautų greičiai sistemos ortakiuose buvo išmatuoti, naudojantis sparneliniu zondiniu anemometru, prijungtu prie daugiafunkcio matuoklio TESTO-400. Dinaminių slėgių ciklono konstrukcijoje bei dujų greičių matavimų sistemos ortakiuose dydžiai, matuojami kiekvienas po tris kartus, sumažinant gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaida. Dinaminių slėgių ciklono konstrukcijoje bei aerodinaminio pasipriešinimo matavimų dydžiai, matuojami kiekvienas po tris kartus, taip išvengiama sisteminių klaidų bei sumažinama gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaida. Visi slėgiai išmatuoti keičiant kanalinio ventiliatoriaus tiekiamo oro srauto debitą.

Dinaminių slėgių nustatymas daugiakanalio dviejų lygių ciklono konstrukcijos viduje, pradėdamas nuo to, kad oras iš aplinkos paduodamas į ortakių sistemą. Oro srovė sukuriama veikiant išcentriniam ventiliatoriui (Alteko RFE 355–30, galingumas 4,4 kW). Matuokliu TESTO-400 (temperatūros matavimo ribos: 20–70 ^{0}C, paklaida ± 0,2 ^{0}C, greičio matavimo ribos: 1–30 m/s, paklaida ± 0,5 %), panaudojant dinaminį Pito vamzdelį išmatuojamas dinaminis dujų slėgis, įstatant vamzdelį į padarytas įrenginio dangtyje kiaurymes. Slėgis išmatuojamas kiekvieno žiedo bei periferijos pasienio sluoksniuose, tarpuose tarp žiedų (atstumo viduryje) – tai daroma abejuose lygiuose.

Sistemos slėgių matavimų metodika

Pilnutinio (aerodinaminio) slėgio reikšmė lygi statinio ir dinaminio slėgio sumai. Statinis slėgis parodo ortakių sistemos ir ciklono įrenginio pasipriešinimą, slėgio nuostolius sistemoje. Dinaminis slėgis didėja, didėjant oro srauto greičiui ortakyje, arba dėl skerspjūvio susiaurėjimo, tuo pačiu statinis slėgis mažėja.

Guminėmis žarnelėmis buvo sujungti matavimo prietaisas ir atvamzdžiai, įmontuoti į įeinančio ir išeinančio oro srauto ortakius, kurių skersmuo parinktas, remiantis „LAND 27–98/M–07. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas“ metodika. Tokiu būdu registruojami diferencialinio slėgio matuoklio parodymai.

Slėgių matavimui eksperimentiniuose tyrimuose panaudojamas daugiafunkcis matuoklis Testo-400, prie jo prijungiamos guminės žarnelės 6 mm vidinio ir 8 mm išorinio skersmens. Eksperimentinio stendo konstrukcijoje ortakiuose įmontuoti specialūs atvamzdžiai, kurių vidinis skersmuo siekia 7 mm, išorinis – 10 mm, prie kurių prijungiamos žarnelės slėgio matavimams su diferencialiniu slėgio matuokliu DSM-1 (2.8 paveikslas) (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa) (2.7 paveikslas).



2.7 pav. Slėgio matavimuose panaudotas ortakio atvamzdis

Aerodinaminis slėgis parodo dinaminio bei statinio slėgio sumos reikšmę. Tyrimai atliekami prijungiant vieną žarnelę prie atvamzdžio, esančio prieš oro valymo įrenginį, kitą – už valymo įrenginio, pagal oro srauto kryptį.



2.8 pav. Slėgio matavimuose naudotas diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1

Dujų srauto greičio nustatymas dinaminiu Pito vamzdeliu

Dujų srauto greitis ciklono kanaluose buvo nustatomas periferijoje, kiekvieno kanalo skerspjūvio viduryje, 2 mm atstumu nuo kiekvieno kreivalinijinio žiedo paviršiaus bei įrenginio ašyje. Visi slėgiai išmatuoti keičiant kanalinio ventiliatoriaus pučiamo oro srauto debitą, taip nustatant srautų greičių kitimą, priklausomai nuo paduodamo oro kiekio. Pučiamas oro srautas keičiamas ventiliatoriaus valdymo bloke, kuris reguliuojamas taip, kad vidutiniai greičiai ciklono viduje būtų 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s.

Metodas skirtas dujų srauto 1 m/s ir didesniam greičiui matuoti ortakiuose. Dujų srauto greičio ir tūrio debito matavimo ortakyje didžiausia paklaida neturi viršyti ± 10% (LAND 1998).

Dujų srauto greitis *w*, m/s, matavimo taške apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = \sqrt{\frac{2gP_d}{g_t}}; \qquad (2.1)$$

čia: P_d – dinaminis dujų slėgis matavimo taške, mmH_2O;

g – laisvo kritimo pagreitis (g = 9,81 m/s^2);

g_t – dujų tankis matavimo sąlygomis, kg/m^3 (LAND 1998).

Dujų tankis g_t, kg/m^3, matavimo sąlygomis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$g_t = 0{,}359 \cdot g_0 \cdot \frac{P \pm \Delta P}{273 + t}; \qquad (2.2)$$

čia: g_0 - dujų tankis, perskaičiuotas normaliosiomis sąlygomis (0 ^{0}C, 760 mmHg), kg/m^3;

P - atmosferos slėgis, mmHg; t - dujų temperatūra ortakyje, ^{0}C;

$\pm\Delta P$ – dujų perteklinis slėgis (arba praretėjimas) ortakyje (LAND 1998).

Atliekant apskaičiavimus naudojamas dujų slėgio matavimo vienetų perskaičiavimas į SI sistemos vienetus:

1 mmHg=133 Pa; 1mmH_2O=9,81 Pa.

Dinaminis slėgis P_D yra lygus bendro P_B ir statinio P_S slėgių skirtumui. Kadangi dinaminis slėgis yra proporcingas dujų greičio kvadratui, todėl dujų srauto greitis ortakyje įvertinamas netiesioginiu būdu, fiksuojant dinaminio slėgio svyravimus (LAND 1998).

2.2. Dviejų lygių daugiakanalio ciklono oro valymo efektyvumo tyrimo metodika ir naudojama įranga

Efektyvumo tyrimo tikslas – nustatyti, kokią įtaką dviejų lygių daugiakanalio ciklono KD šalinimo iš oro efektyvumui turi cilindrinių pusžiedžių skaičius, oro tūrių, patenkančių į kanalus, sąntykiai, taip pat srauto greitis bei skirtingos kilmės KD.

Metodas skirtas vienkartinei ir paros kietųjų dalelių koncentracijoms nustatyti gyvenamosios aplinkos ore (atsižvelgiant į prasiurbto per filtrą oro tūrį) diapazonuose: 0,26–50 mg/m^3 (vienkartinė); 0,007–0,69 mg/m^3 (paros); 0,04–4,2 mg/m^3 (paros, esant automatiniam ciklišKam bandinio paėmimui po 30 min 12 kartų per parą); 0,17−16,7 mg/m^3 (paros, esant rankiniam ciklišKam bandinio paėmimui po 30 min 3 kartus per parą), kai lyginamosios oro sąnaudos 5 dm^3/(min×cm^2) (LAND 1998).

Koncentracijos nustatymo metu naudojama įranga:

1. Aspiratorius, oro siurbimo greičio paklaida ± 6%;
2. Elektroninės laboratorinės svarstyklės AG–204, padalos vertė 0,1 mg;
3. Filtro laikikliai;
4. Filtrai AFA–VP–20;
5. Teršalų padavimo purškiklis;
6. Guminės žarnelės;

Pagal ekspertų įvertinimus, nustatant kietųjų dalelių koncentraciją gyvenamosios aplinkos ore diapazonuose 0,26−50; 0,007−0,69; 0,04−4,2; 0,17−16,7 mg/m^3, santykinė paklaida neviršija ± 25 %. Ant filtro sulaikytų dalelių masės nustatymo didžiausia absoliučioji paklaida – 0,2 mg. Per filtrą prasiurbto oro tūrio matavimo didžiausia santykinė paklaida – ± 6 % (LAND 1998).

Matavimai atliekami su stendu, kuris pateiktas 2.2 paveiksle. Pirmiausiai paruošiami AFA−VP−20 tipo filtrai, kurie naudojami kietųjų dalelių koncentracijoms nustatyti. Filtrai pasveriami ir užrašomi filtrų numeriai bei pradinės jų masės. Prieš tai jie 1 valandą turi būti laikomi patalpoje, kurioje bus sveriami. Norint išvengti filtro darbinio paviršius pažeidimų, atliekant visas operacijas filtras imamas pincetu už kraštelio (LAND 1998).

Pasverti švarūs filtrai įdedami į permatomo popieriaus vokelius, ant kurių užrašomas filtro numeris ir pradinė masė. Šie vokeliai dedami į polietileninius maišelius (LAND 1998).

Filtras su paimtu dulkių bandiniu atsargiai išimamas iš filtro laikiklio, sulenkiamas per pusę dulkėtu paviršiumi į vidų ir įdedamas atgal į permatomo popieriaus vokelį, po to į polietileninį maišelį. Ant vokelio užrašomi duomenys (LAND 1998):

- bandinio paėmimo vieta ir laikas;
- pradinis ir galutinis dujų skaitiklio rodmenys (arba oro siurbimo greitis ir trukmė pagal rotametrą);
- oro, prasiurbto per skaitiklį arba rotametrą, temperatūra;
- atmosferos slėgis bandinio paėmimo metu.
- Po to laboratorijoje nustatoma filtro dulkių masė.

Nustatymo sąlygos

Sveriant filtrus privaloma laikytis šių sąlygų:

- oro temperatūra (20±10)°C,
- atmosferos slėgis (84,0−106,7) kPa arba (630−800) mm Hg stulpelio,
- oro drėgnumas, esant 25 °C temperatūrai, ne didesnis kaip 80 %.

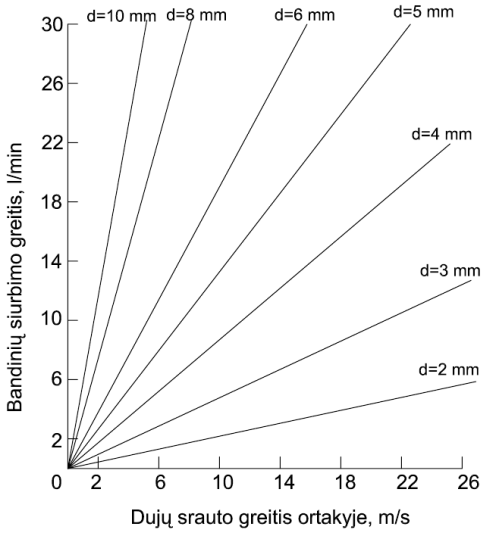
Prieš svėrimą filtras ne trumpiau kaip valandą laikomas patalpoje, kurioje bus sveriamas. Jeigu bandinio paėmimo metu santykinis oro drėgnumas artimas 100 %, būtina pasiekti, kad filtro su bandiniu masė būtų pastovi. Tam filtras įdedamas į stiklinę lėkštelę ir patalpinamas 2 valandoms į eksikatorių su kalio chloridu arba 30−50 min į 40−50 °C temperatūros džiovinimo spintą, o po to 40−50 min laikomas patalpoje (eksikatoriuje), kurioje bus sveriamas. Jeigu sveriant filtro masė keičiasi, džiovinimas pakartojamas. Pasvertas filtras įdedamas į tą patį kalkės vokelį ir polietileninį maišelį. Ant vokelio užrašoma galutinė filtro su dulkėmis masė ir kruopščiai supakuojami ir saugojami neribotą laiką.



2.9 pav. Filtras AFA–VP–20

Prieš įjungiant eksperimentinį stendą, guminėmis žarnelėmis sujungiami specialūs ortakiuose montuojami dulkių bandinių paėmimo vamzdeliai (2.11 paveikslas), į kuriuos įsukami pagal oro srauto greitį ortakiuose parinkti antgaliai.

Kadangi dulkių bandinių paėmimo vamzdelis turi keletą keičiamų įvairaus dydžio antgalių, kuriuos keičiant galima naudoti vieną vamzdelį, esant skirtingiems srauto greičiams ortakyje. Reikiamo antgalio diametras d, mm, parenkamas pagal 2.10 paveiksle pateiktą nomogramą (LAND 28-98).



2.10 pav. Antgalių parinkimo nomograma



2.11 pav. Atvamzdis, įstatomas į ortakį

Tokie atvamzdžiai įstatomi įeinančio ir išeinančio oro srautų ortakiuose, prie jų jungiamos žarnelės ir oro filtrų patronai. Į patronus įstatomi KD sulaikantys AFA−VP−20 tipo filtrai (2.9 pav.). Antrąja žarnele sujungiamas antrasis patrono antgalis ir aspiratoriaus įėjimas siurbiamam orui (2.12 paveikslas).



2.12 pav. Koncentracijų tyrimo sistema

Pirmasis filtras, sujungtas su įeinančio oro srauto ortakiu, parodo įeinančios koncentracijos reikšmę, nustatant dalelių masę svoriniu metodu. Antrasis – parodo oro koncentraciją kietosiomis dalelėmis po valymo. Tokiu būdu pagal žinomo prasiurbto oro tūrio reikšmę bei filtrų masių skirtumą, apskaičiuojame ciklono oro valymo efektyvumą tiriamoms kietosioms dalelėms.

Kietųjų dalelių masės koncentracija ore apskaičiuojama pagal formulę:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0}; \qquad (2.3)$$

čia: C – dulkių koncentracija, g/m^3;

m_1 – filtro be kietųjų dalelių masė, g;

m_2 – filtro su kietosiomis dalelėmis masė, g;

V_0 – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis, l.

Per filtrą prasiurbto oro tūris normaliomis sąlygomis (t = 0 °C (T_0 = 273K) ir p_0 = 760 mm Hg stulpelio (101,3 kPa)) perskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_0 = \frac{T_0 p}{p_0 (273 + t)} u(t_2 - t_1) = K \frac{pV}{273 + t}; \qquad (2.4)$$

čia: V_0 – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis, l;

u – oro siurbimo greitis paimant bandinį, l/min;

V – per filtrą prasiurbto oro tūris, l;

t – siurbiamo oro temperatūra, °C;

$(t_2 - t_1)$ – bandinio paėmimo trukmė, min;

p – atmosferos slėgis oro bandinio paėmimo metu, mm Hg stulpelio arba kPa;

K – perskaičiavimo koeficientas (jei atmosferos slėgis p matuojamas kPa – K = 2,7 ir jeigu mm Hg stulpelio – K = 0,358).

Oro, užterštо KD, išvalymo efektyvumas apskaičiuojamas pagal (2.5) formulę:

$$\eta = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1} \cdot 100\ \%. \qquad (2.5)$$

čia: C_1 – dulkių koncentracija prieš įrenginį, g/m^3;

C_2 – dulkių koncentracija už įrenginio, g/m^3;

2.3. Išvados

1. Eksperimentiniai bandymai atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedros laboratorijoje, kur yra įrengtas dviejų lygių daugiakanalis cilindrinis ciklonas.

2. Eksperimentų metu nustatoma bendras įrenginio oro išvalymo efektyvumas, oro srauto greičiai ciklono kanaluose ir bendras sistemos sukuriamas aerodinaminis pasipriešinimas. Daugiafunkcinis matuoklis TESTO–400 naudojamas oro srauto greičio, temperatūros, slėgio nustatymui ciklono vidinėje konstrukcijoje, bei įėjimo ir išėjimo ortakiuose.

3. Bendras dviejų lygių ciklono sukuriamas pasipriešinimas matuojamas daugiafunkciniu slėgio matuoliu DSM–1.

4. Kietųjų dalelių (KD) kiekiams ir koncentracijoms nustatyti naudojamas svorinis metodas, kur dalelės sulaikomos ant AFA tipo filtro, prasiurbiant per jį orą.

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

3.1. Ciklono aerodinaminių charakteristikų tyrimo rezultatų analizė

Šio eksperimento tyrimo tikslas – nustatyti vienfazio srauto greičio cilindrinio dviejų lygių daugiakanalio (keturkanalio, šešiakanalio ir aštuonkanalio) ciklono kanaluose pasiskirstymą esant skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims.

Šiame skyriuje pateikiama oro srauto greičio kanaluose ir ciklono sukuriamo pasipriešinimo tyrimo gauti rezultatai.

Pagal išmatuotus greičius, pateikiami rezultatai esant trims skirtingiems vidutiniams greičiams ciklone (16 m/s vidutinis greitis, 12 m/s ir 8 m/s vidutinis greitis).

Greitis matuojamas abejuose lygiuose, kaip parodyta 2.5 paveiksle. Kadangi tiek I, tiek II ciklono lygių tūriai yra tokie patys, o pertvara tarp lygių padalija cikloną per pusę, tai greičiai abejuose lygiuose yra vienodi arba skiriasi keliomis dešimtosiomis m/s dalimis. Tai įrodo išmatuoti oro srauto greičiai įtekėjime (3.1 lentelė) ir abiejų lygių kanaluose.

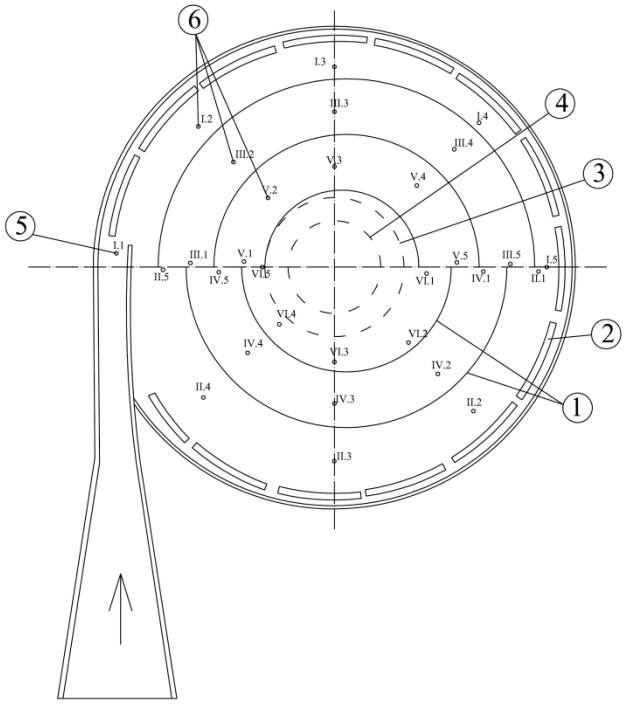
Siauriausioje įtekėjimo į cikloną vietoje, esant maksimaliam greičiui (16 m/s vidutinis greitis), greitis I lygyje 2 cm nuo lygio viršaus siekia 25,1 m/s; per vidurį – 25,6; 2 cm nuo apačios – 25,2 m/s. Esant tam pačiam atitekančiam oro debitui, II lygyje tuose pačiuose matavimo taškuose greičiai atitinkamai yra: 2 cm nuo viršaus – 24,8 m/s; per vidurį – 25,9 m/s; 2 cm nuo apačios – 25,3 m/s. Šis nedidelis skirtumas gali būti vertinamas kaip matavimo paklaida ir tuomet galima teigti, jog oro tūris, petenkantis į abu lygius, yra vienodas. Dujų srauto greičiai įtekėjime bei ištekėjime, esant skirtingiems oro debitams (16, 12 ir 8 m/s vidutiniams greičiams), pateikti 3.1 lentelėje.

Keičiant ciklono viduje esančių kanalų išdėstymą greitis įtekėjime kinta nežymiai kaip ir esant lygiam oro srauto pasiskirstymui įtekėjime į kanalus. Greitis nekinta, nes reguliatoriumi nustatomi tokie ventiliatoriaus sūkiai, kad greitis ciklone išliktų panašus visiems atvejams.

3.1 lentelė. Greičių pasiskirstymas ciklono įtekėjime skirtinguose lygiuose

Vidutinis oro greitis ciklone, m/s	I lygis			II lygis		
	2 cm nuo lygio viršaus	Vidurys	2 cm nuo lygio dugno	2 cm nuo lygio viršaus	Vidurys	2 cm nuo lygio dugno
16	25,1	25,6	25,2	24,8	25,9	25,3
12	20,3	21,1	20,8	20,5	21,0	20,5
8	14,8	15,9	14,9	15,1	15,7	14,6

Matavimo taškai ciklono kanaluose išdėstyti taip, kad būtų galima įvertinti greičio kitimo tendencijas kiekviename kanale. Šešiakanalio ciklono matavimo taškų išdėstymo schema pateikta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Oro srauto greičių matavimo taškų išdėstymo schema: 1 – skirtingo diametro pusžiedžiai; 2 – segmentiniai plyšiai; 3 – oro srauto iš antrojo lygio išėjimo anga; 4 – oro srauto iš pirmojo lygio išėjimo anga; 5 – įtekančio oro srauto greičio matavimo vieta

Oro srauto greičiai prieš ir už ciklono išmatuoti sparneliniu anemometru. Matuojama tik ortakiuose prieš ir už įrenginio, nes ciklono konstrukcija neleidžia pamatuoti greičio su sparneliniu anemometru vidinėje dalyje. Prieš cikloną esančiame 200 mm skersmens ortakyje didžiausias greitis yra, kai ventiliatoriaus sukuriamas oro srautas yra maksimalus (655 m^3/h) ir siekia 5,8 m/s, o už ciklono esančiame 160 mm skersmens ortakyje didžiausias yra 8,7 m/s greitis. Pagal išmatuotus greičius apskaičiuoti oro srauto debitai, kurie pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Oro srauto debitai esant skirtingiems įtekėjimo greičiams

Ventiliatoriaus sukuriamas oro debitas įtekėjime, m^3/h	Ventiliatoriaus sukuriamas oro debitas ištekėjime, m^3/h	Prieš cikloną	Po ciklono
		Greitis, m/s	Greitis, m/s
655	630	5,8	8,7
530	514	4,7	7,1
395	376	3,50	5,2

3.1.1. Keturkanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė

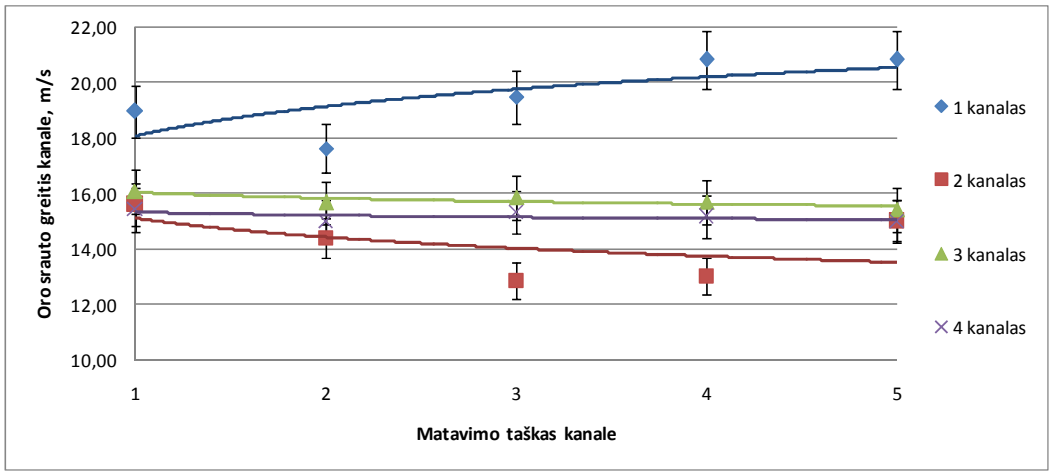
Oro srauto greičių dviejų lygių keturkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui

Keturkanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis oro srautas 50 % didesnis už periferinį srautą (25/75 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 19,0 m/s ir pabaigoje pakyla 1,8 m/s (3.2 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 1,1 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,1 karto.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 9 %, o antrajame – 7 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 20,8 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 27,7 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 1,2 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 12,6 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 14,7 m/s.

3-ame ir 4-ame kanaluose oro srauto greitis tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,5 m/s, o antrajame lygyje 0,6 m/s. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl aerodinaminio pasipriešinimo poveikio.



3.2 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 4-jame kanaluose pastebimas tolygus greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 4 % trečiajame ir 3 % ketvirtajame kanaluose. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 4,2 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,5 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,7 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 4-ojo kanalo ir siekia 0,5 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Lyginant šiuos duomenis su esančiais prie mažesnio ciklono našumo (12 m/s ir 8 m/s vidutinio greičio) pastebėta, kad mažėjant vidutiniam greičiui mažėja skirtumas tarp 1-ojo ir 2-ojo kanalų greičių. Esant 16 m/s vidutiniam greičiui skirtumas yra nuo 3,4 m/s pirmajame iki 5,9 m/s paskutiniame matavimo taške. Sumažinus ciklono vidutinį greitį iki 12 m/s šis skirtumas sumažėja

atitinkamai 28 % ir 21 %. Kai vidutinis greitis nustatomas 8 m/s, tai šis skirtumas yra 31 % ir 37 % mažesnis lyginant su 16 m/s vidutinio greičio duomenimis.

Mažinant vidutinį greitį ciklone mažėja greičio augimas pirmajame kanale. Esant didžiausiam našumui 1-ame kanale greitis didėja 10% nuo kanalo pradžios iki pabaigos. Sumažinus vidutinį greitį ciklone iki 12 m/s augimas siekia 7,5 %, o vidutinį greitį sumažinus iki 8 m/s – 7 %.

Oro srauto greičių dviejų lygių keturkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui

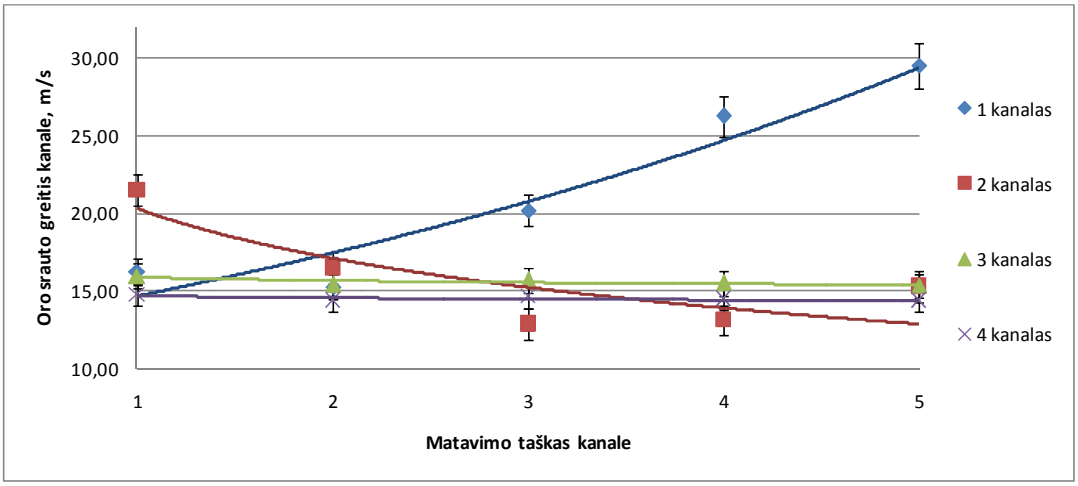
Vidinę pusžiedžių padėtį pakeitus taip, kad tranzitinis oro srautas lygus periferiniam srautui (50/50 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 16,2 m/s ir pabaigoje pakyla 13,3 m/s (3.3 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 1,9 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,8 karto.

Lyginant oro srauto greičius ciklono kanaluose, kurie yra esant 50/50 pusžiedžių išdėstymo padėčiai su anksčiau pateiktais (25/75 padėtimi) pastebėta, kad didžiausias skirtumas yra tarp pirmojo bei antrojo kanalų greičių. Didinant periferinio srauto dalį pirmasis kanalas pastumiamas į dešinę, todėl praplatėja pirmojo kanalo pradžia, o pabaiga susiaurėja.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 6 %, o antrajame – 6 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 29,5 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 36,1 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 1,0 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 12,2 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 14,6 m/s.

3-ame ir 4-ame kanaluose oro srauto greitis tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,6 m/s, o antrajame lygyje 0,9 m/s. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl aerodinaminio pasipriešinimo poveikio.



3.3 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,7 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,7 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 4-ojo kanalo ir siekia 0,7 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 4-jame kanaluose pastebimas tolygus greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 5 % trečiajame ir 2 % ketvirtajame kanaluose. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos. Antrajame kanale greičio mažėjimas vyksta dėl prieš jį esančio kanalo įtakos, kai iš pirmojo kanalo atiteka 29 m/s greitis.

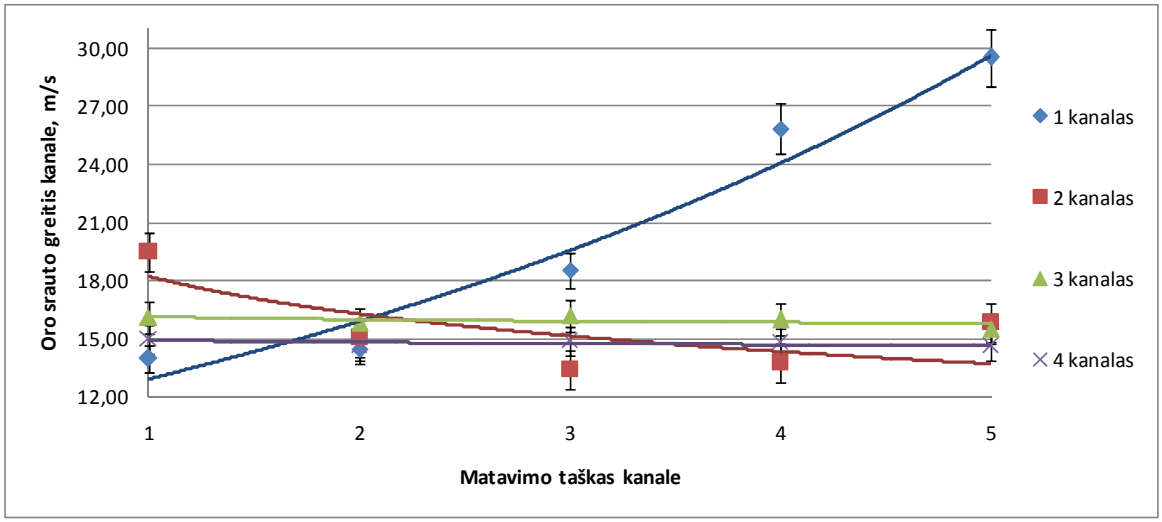
Oro srauto greičių dviejų lygių keturkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiui

Keturkanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį pakeitus taip, kad periferinis oro srautas 50 % didesnis už tranzitinį srautą (75/25 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 14,0 m/s ir pabaigoje pakyla 15,5 m/s (3. 4 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 4,9 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 2,1 karto.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 17 %, o antrajame – 18 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 29,5 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 26,5 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 0,9 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 13,1 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 15,5 m/s.

3-ame ir 4-ame kanaluose oro srauto greitis tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,7 m/s, o antrajame lygyje 0,8 m/s. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl aerodinaminio pasipriešinimo poveikio.



3.4 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas keturkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 4-jame kanaluose pastebimas tolygus greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 4 % trečiajame ir 3 % ketvirtajame kanaluose. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 4,1 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas. 2-ame kanale greitis mažėja apie 30 %, nes iš pirmojo į antrąjį kanalą atitika 29,5 m/s oro srautas.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,5 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,9 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 4-ojo kanalo ir siekia 0,5 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

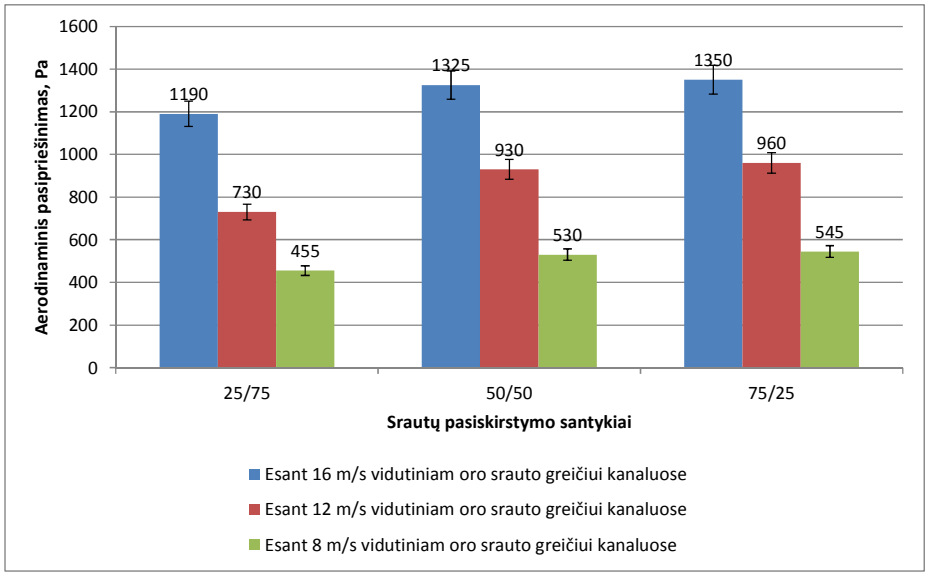
Keturkanalio dviejų lygių ciklono sukuriamo pasipriešinimo tyrimas

Išnagrinėjus keturkanalio ciklono aerodinaminius pasipriešinimus nustatyta, kad didžiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra gauta esant maksimaliam 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui kanaluose, išdėstant kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju. Tokiu atveju gautas 1350 Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra 1,9 % didesnis nei atvejis, kai yra išdėstoma 50/50 srautų pasiskirstymo santykiais, esant tam pačiam oro srauto greičiui ciklono kanaluose.

Pagal nustatytus keturkanalio ciklono aerodinaminius pasipriešinimus galima teigti, kad didžiausia parametro vertė, esant 8 m/s vidutiniam oro srauto greičiui, yra lygi 545 Pa. Maksimalus pasipriešinimas sukuriamas esant vyraujančiam periferiniam srautui, 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, kai grįžtamojo srauto dalis į ankstesnius kanalus yra didesnė už srautą, judantį link įrenginio ašies į sekančius kanalus.

Kai srautų pasiskirstymo santykiuose periferinis bei tranzitinis srautai yra lygūs (50/50), tuo atveju nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra 2,8 % mažesnis ir lygus 530 Pa.

Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant didesnei tranzitinio oro srauto daliai (25/75 srautų pasiskirstymo santykių atvejis). Gautas 455 Pa aerodinaminis pasipriešinimas, kuris 1,2 karto yra mažesnis nei esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams.



3.5 pav. Dviejų lygių keturkanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose

Pagal 3.5 pav. galima matyti, kad esant mažiems greičiams (8 m/s), aerodinaminių pasipriešinimų vertės ženkliai sumažėja, lyginant su atvejais esant 12 m/s ir 16 m/s srauto greičiams ciklono kanaluose. Galima teigi, kad aerodinaminio pasipriešinimo verčių skirtumo tarp skirtingų srautų pasiskirstymo santykių atvejų mažėjimas, lemia tai, kad esant 8 m/s srauto greičiui kanaluose, yra patiriami energijos nuostoliai, kurie gali būti nenustatyti dėl jų labai mažų verčių, artėjančių paklaidos dydžio vertei. Dėl to, nustatant aerodinaminį pasipriešinimą, gali būti užfiksuotas tik slėgių pokytis, įvertinant oro srauto judėjimu sukuriamą dinaminį slėgį.

Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas gautas esant mažiausiems oro srauto greičiams (vidutinis oro srauto greitis kanaluose 8 m/s) bei 25/75 srautų pasiskirstymo santykiams. Mažiausia

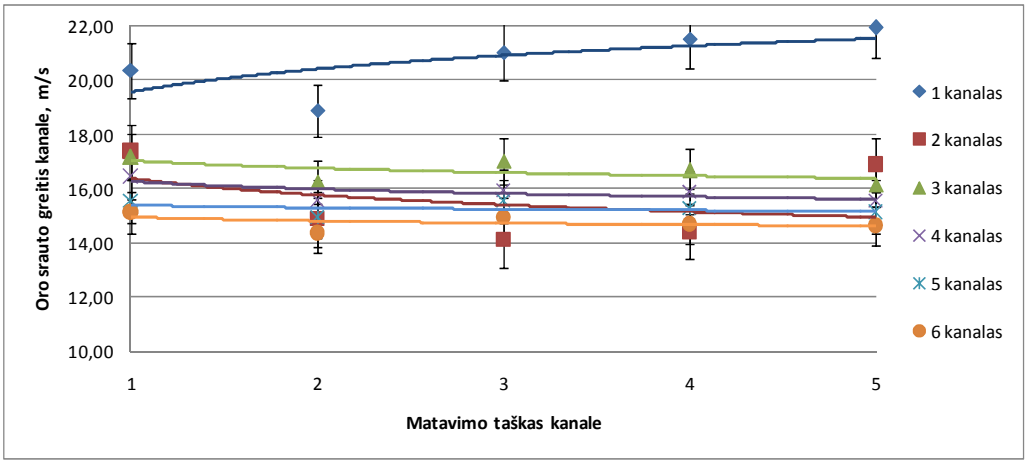
aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra lygi 455 Pa (8 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, 25/75 srautų pasiskirstymo santykiai).

3.1.2. Šešiakanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė

Oro srauto greičių dviejų lygių šešiakanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui

Šešiakanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis oro srautas 50 % didesnis už periferinį srautą (25/75 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 20,4 m/s ir pabaigoje pakyla 1,6 m/s (3.6 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 1,1 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,1 karto.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 8 %, o antrajame – 7 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 21,9 m/s reikšmę antrajame lygyje.



3.6 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 26,2 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,5 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 13,3 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 16,1 m/s.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale nuolat mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,7 m/s, o antrajame lygyje 0,8 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 6-jame kanaluose pastebimas greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 5 – 7 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 7,0 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas.

Šioje padėtyje išmatuotus greičius kanaluose lyginant su esančiais prie mažesnio ciklono našumo (12 m/s ir 8 m/s vidutinio greičio) pastebėta, kad mažinant ciklono našumą mažėja skirtumas tarp 1-ojo ir 2-ojo kanalų vidutinių greičių. Esant 16 m/s vidutiniam greičiui skirtumas yra 5,2 m/s. Sumažinus ciklono vidutinį greitį iki 12 m/s šis skirtumas sumažėja atitinkamai 17 %, o kai vidutinis greitis nustatomas 8 m/s, tai šis skirtumas tampa dar 4 % mažesnis lyginant su 12 m/s vidutinio greičio duomenimis.

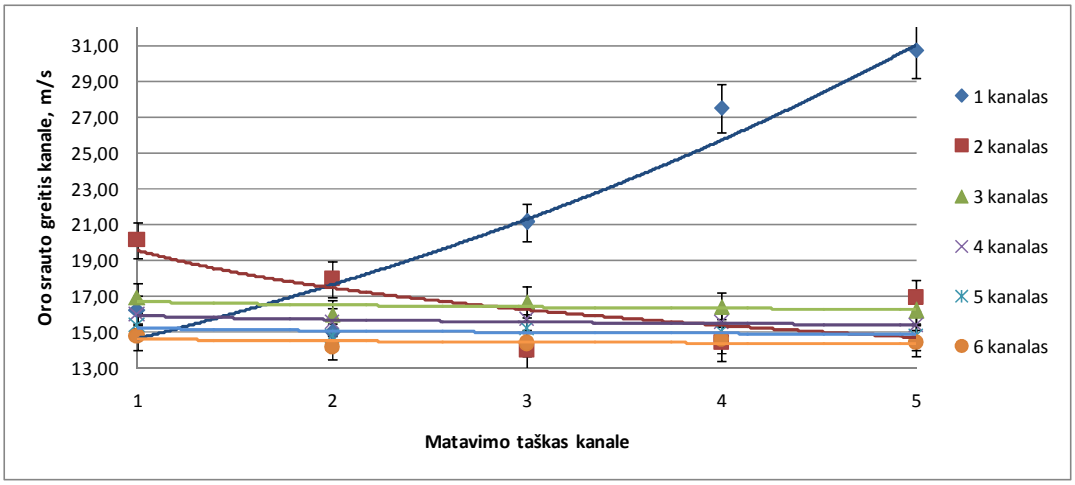
Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,7 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,7 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 6-ojo kanalo ir siekia 0,8 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Stebimas vidutinių ciklono oro srauto greičių skirtumo tarp lygių mažėjimas, kai mažinamas į cikloną patenkančio oro našumas. Sumažinus vidutinį ciklono greitį 4 m/s (nuo 16 m/s iki 12 m/s arba nuo 12 m/s iki 8 m/s) skirtumas tarp pirmojo ir antrojo lygių sumažėja 0,3 – 0,4 m/s.

Oro srauto greičių dviejų lygių šešiakanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui

Šešiakanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis ir periferinis srautai lygūs (50/50 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 16,2 m/s ir pabaigoje pakyla 14,5 m/s (3.7 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 2,2 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,9 karto.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 8 %, o antrajame – 8 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 29,7 m/s reikšmę antrajame lygyje.



3.7 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 32,1 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,2 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki

minimalios 12,9 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 15,9 m/s.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,8 m/s, o antrajame lygyje 0,9 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 1,0 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,5 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 6-ojo kanalo ir siekia 1,1 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 6-jame kanaluose pastebimas greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 2 – 5 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 4,8 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas. 2-ame kanale greitis mažėja apie 25 %, nes iš pirmojo į antrąjį kanalą atiteka 31 m/s oro srautas.

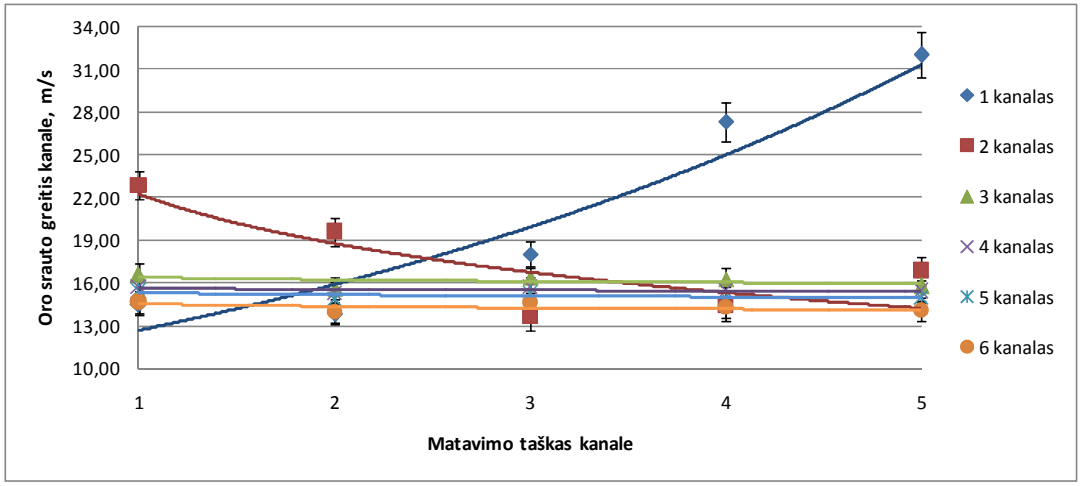
Oro srauto greičių dviejų lygių šešiakanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiui

Šešiakanalio ciklono vidinę pusziedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis oro srautas 25 % mažesnis už periferinį srautą (75/25 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 14,5 m/s ir pabaigoje pakyla 17,1 m/s (3.8 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 5,5 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 2,3 karto.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,4 m/s, o antrajame lygyje 0,4 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 17 %, o antrajame taip pat 17 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 31,6 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 30,8 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 3,1 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 13,1 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 16,3 m/s.



3.8 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 6-jame kanaluose pastebimas tolygus greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 2 – 4 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 4,1 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos, todėl ilgesniame kanale oro srauto greitis mažėja daugiau. Iš pirmojo į antrąjį kanalą atiteka 32 m/s oro srautas, todėl 2-ame kanale greitis mažėja 29 %.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,5 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,8 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 6-ojo kanalo ir siekia 0,6 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje

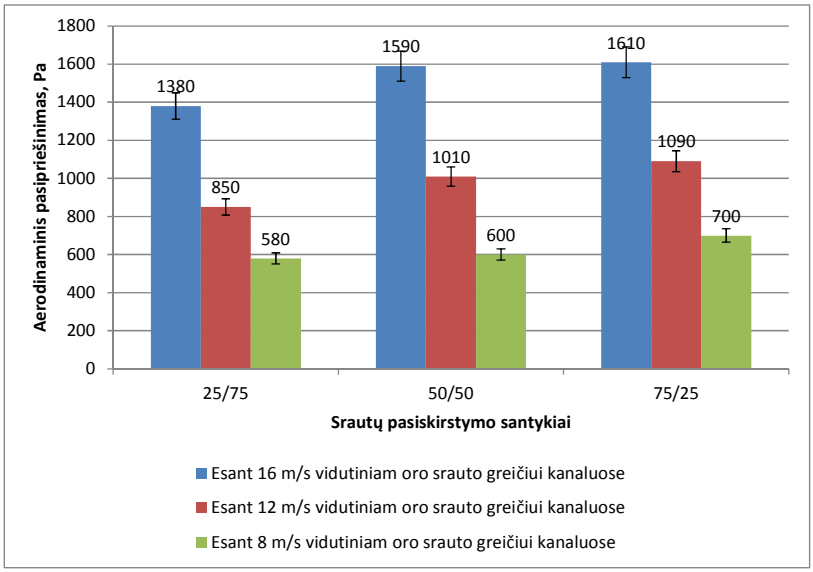
didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Šešiakanalio dviejų lygių ciklono sukuriamo pasipriešinimo tyrimas

Pagal atliktus dviejų lygių šešiakanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose, nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, ir siekia 1610 Pa.

Esant vienodam srautų pasiskirstymo santykių atvejui, aerodinaminis pasipriešinimas yra apytikriai lygus 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju nustatytai vertei. Nagrinėjant vyraujančio tranzitinio (judančio link įrenginio ašies) srauto 25/75 srautų pasiskirstymo santykių atveju nustatytą aerodinaminį pasipriešinimą, galima matyti 1.5 pav., kad vertė yra mažiausia – 1380 Pa, tai sudarė 14,3 % lyginant su didžiausia aerodinaminio pasipriešinimo verte.

Galima teigti, kad esant dviejų lygių šešiakanalio ciklono konstrukcijai, aerodinaminio pasipriešinimo vertės yra didesnės, lyginant su keturkanaliu ciklonu, o jų verčių pokyčiai priklausomai nuo srautų pasiskirstymo santykių yra siauresnio kitimo intervalo. Todėl galima manyti, kad dėl to, kad sudarant šešiakanalio ciklono konstrukciją, kiekvieno kanalo skersplotis yra mažesnis, lyginant su keturkanaliu ciklonu, srautų pasiskirstymo santykių atvejai skirtingai veikia oro srauto judėjimo trajektoriją. Taip, šešiakanaliame ciklone srautui judant kanalais ties srautų pasiskirstymo zonomis, esant mažesnio pločio kanalams, vyksta skirtingu trajektorijų aptekėjimas, dėl ko susidaro ir skirtingi energijos nuostoliai, atsispindintis aerodinaminio pasipriešinimo vertėse.



3.9 pav. Dviejų lygių šešiakanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose

Kaip galima matyti 3.9 pav., esant 25/75 ir 50/50 srautų pasiskirstymo santykių atvejais, aerodinaminio pasipriešinimo vertės, esant 8 m/s greičiui ciklone, yra apytiksliai vienodos. Todėl galima manyti, kad esant mažiems oro srauto greičiams kanaluose, mažėja srauto turbulentiškumas, artėjant link laminarinio tekėjimo pobūdžio, bei srautų pasiskirstymo zonose, srautas nesudarydamas papildomu sūkurių, aptekant kreivalinijinių pusžiedžių briaunas, apibrėžta trajektorija patenka į atitinkamo kanalo pradžią. Šiuos pokyčius pagrindžia tokios pat priklausomybės jau minėto, keturkanalio ciklono atveju gautos vertės, esant 8 m/s oro srauto greičiui ciklono kanaluose.

Išnagrinėjus šešiakanalio ciklono aerodinaminius pasipriešinimus nustatyta, kad didžiausia iš nagrinėtų atvejų aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra gauta esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui kanaluose, nustačius vyraujančio periferinio srauto 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejį. Tokiu atveju gautas 1610 Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra apytiksliai 2 % didesnis nei atvejis, kai buvo matuotas aerodinaminis pasipriešinimas esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiams.

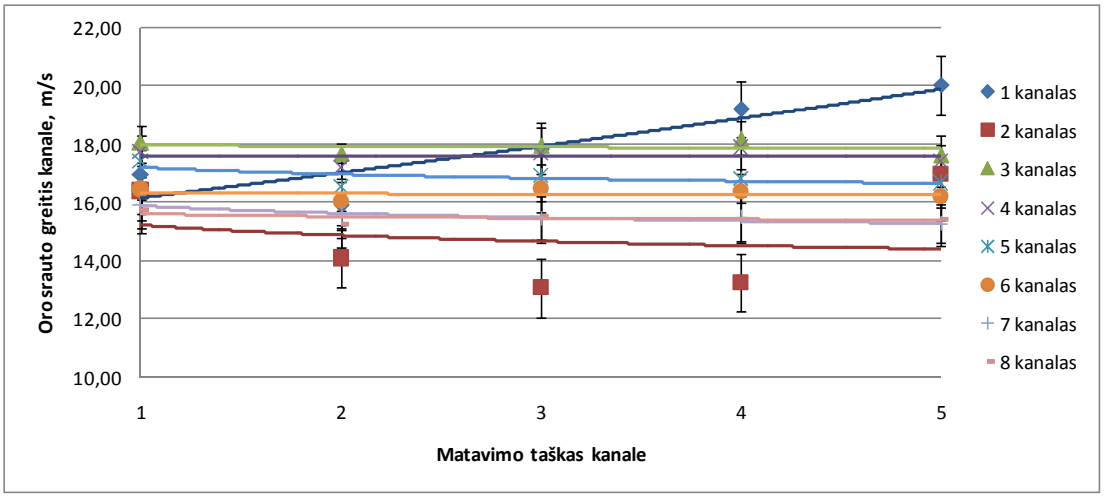
3.1.3. Aštuonkanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų analizė

Oro srauto greičių dviejų lygių aštuonkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 7 %, o antrajame – 8 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 20,0 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Aštuonkanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis oro srautas 25 % didesnis už periferinį srautą (25/75 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 17,0 m/s ir pabaigoje pakyla 3,0 m/s (3.10 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja,

nes pirmasis kanalas pradžioje yra 1,23 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,18 karto.



3.10 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 25/75 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 20,5 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,3 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 11,2 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 16,2 m/s.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,7 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,8 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 7-ojo kanalo ir siekia 0,7 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 8-jame kanaluose pastebimas greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 3 – 5 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 5,0 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale nuolat mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,6 m/s, o antrajame lygyje 0,7 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename

kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.

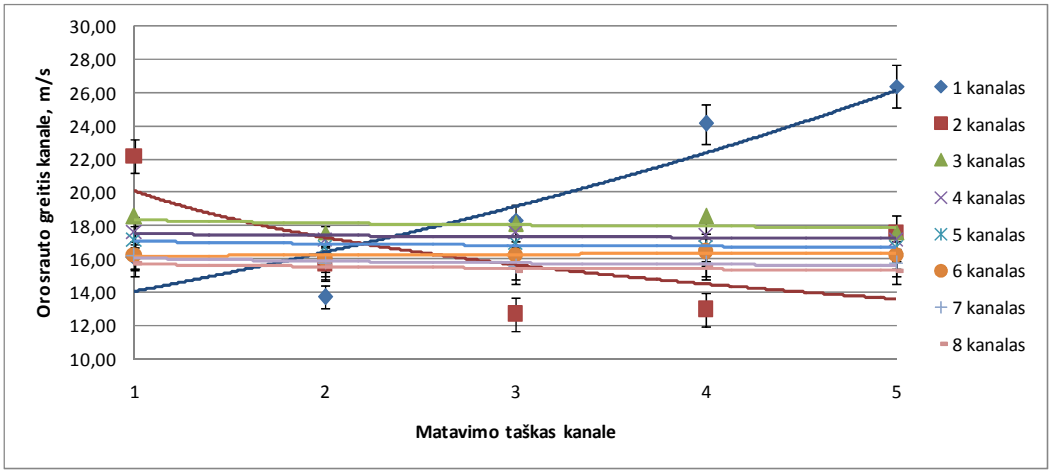
Oro srauto greičių dviejų lygių aštuonkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui

Aštuonkanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis ir periferinis srautai yra lygūs (50/50 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 16,1 m/s ir pabaigoje pakyla 10,3 m/s (3.11 pav.). Didėjimo tendencija pirmajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 2,12 karto platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 1,64 karto.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 15 %, o antrajame – 16 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 26,4 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 29 % mažesnis nei pirmajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,5 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 11,0 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 16,6 m/s.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale nuolat mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,6 m/s, o antrajame lygyje taip pat 0,6 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.



3.11 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 50/50 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 8-jame kanaluose pastebimas greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 3 – 5 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir siekia 5,0 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas. Dėl didelio greičio pirmojo kanalo pabaigoje stebimas greičio mažėjimas 2-ame kanale nuo jo pradžios iki pabaigos. 2-ame kanale greitis mažėja 20 %.

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 1,0 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,8 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 3-ojo kanalo ir siekia 1,0 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Oro srauto greičių dviejų lygių aštuonkanaliame ciklone pasiskirstymas, kai yra 16 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiui

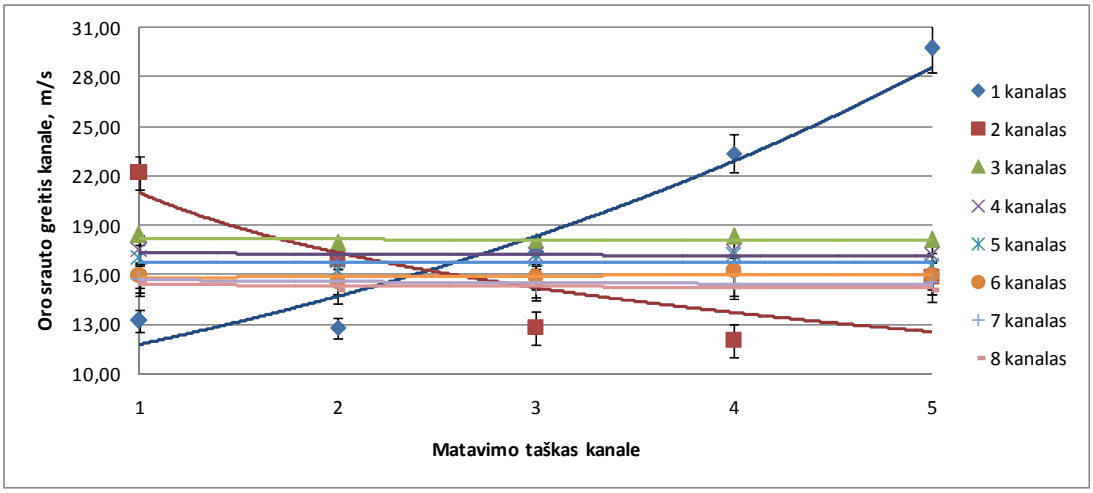
Aštuonkanalio ciklono vidinę pusžiedžių padėtį nustačius taip, kad tranzitinis oro srautas 25 % mažesnis už periferinį srautą (75/25 oro tūrių pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 13,2 m/s ir pabaigoje padidėja 2,25 karto pasiekdamas didžiausią 29,7 m/s reikšmę (3.12 pav.). Didėjimo tendencija 1-ame kanale stebima ir

pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes pirmasis kanalas pradžioje yra 4 kartus platesnis nei pabaigoje ir išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį oro srauto greitis padidėja 2,25 karto.

Antrojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 25 % mažesnis nei 1-ame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinius kreivalinijinius pusžiedžius, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krenta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,2 m/s, o 3-ame taške nukrenta iki minimalios 11,7 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 17,8 m/s.

Pirmojo bei antrojo lygio 1-ame kanale, antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 13 %, o antrajame – 12 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greičio kritimas vyksta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas grįždamas į ankstesnįjį kanalą susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, ir kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 28,9 m/s reikšmę antrajame lygyje.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale nuolat mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-ojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,9 m/s, o antrajame lygyje taip pat 0,9 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-ojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kuris yra veikiamas tik aerodinaminio pasipriešinimo. Greičio mažėjimas vyksla dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.



3.12 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas aštuonkanalio ciklono antrojo lygio kanaluose, kai oro srautų pasiskirstymo sankykis yra 75/25 ir vidutinis greitis ciklone 16 m/s

Tarp pirmojo ir antrojo lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,7 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,7 m/s). Didžiausias skirtumas yra tarp abiejų lygių 1-ojo kanalo ir siekia 0,8 m/s. Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmo lygio prieš ištekėdamas iš ciklono turi praeiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

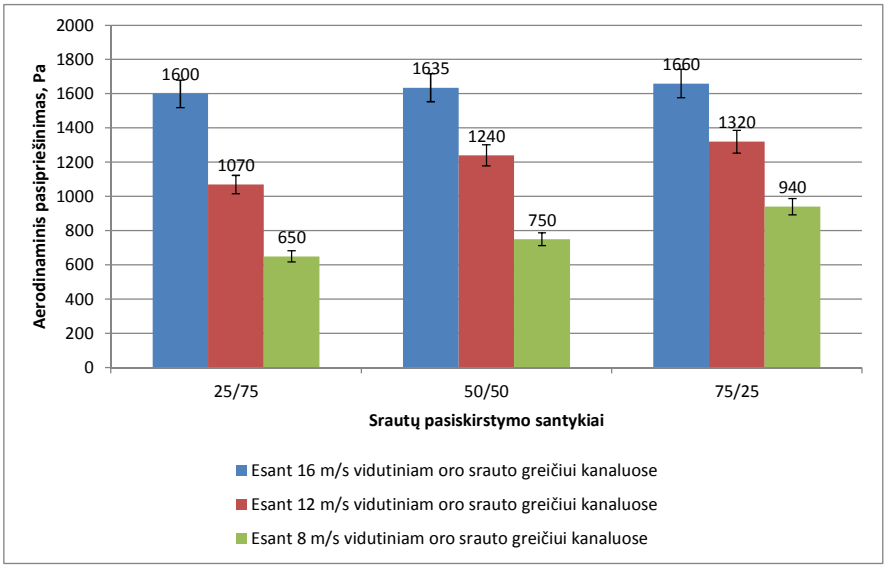
Pirmojo bei antrojo lygio 3-jame – 8-jame kanaluose pastebimas greičio mažėjimas nuo kanalo pradžios link pabaigos, mažėjimas siekia 2 – 4 %. Didžiausias greičio sumažėjimas yra 3-jame kanale ir antrajame lygyje siekia 4,0 %. Tekėdamas kanalu oro srautas nuolat kontaktuoja su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautas yra labiau veikiamas trinties jėgos, todėl 3-ame kanale užfiksuotas didesnis greičio sumažėjimas. Dėl 30 m/s greičio 1-ojo kanalo pabaigoje stebimas greičio mažėjimas 2-ame kanale nuo jo pradžios iki pabaigos. 2-ame kanale greitis mažėja 28 %.

Aštuonkanalio dviejų lygių ciklono sukuriamo pasipriešinimo tyrimas

Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas, esant mažiausiam 8 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose, nustatytas esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, kai didžioji dalis srauto grįžta į ankstesnius kanalus, nustatyta vertė siekia 940 Pa.

Esant vienodiems 50/50 periferinio bei tranzitinio srautų pasiskirstymo santykiams, periferinio srauto dalis yra mažesnė nei esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra 20 % mažesnis ir lygus 750 Pa (3.12 pav.).

Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant didesnei tranzitinio srauto daliai (25/75 srautų pasiskirstymo santykiai). Gautas 650 Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra 30,9 % mažesnis, nei esant maksimalaus aerodinaminio pasipriešinimo, esant 8 m/s oro srauto greičiui aštuonkanaliame ciklone 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju.



3.13 pav. Dviejų lygių aštuonkanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių, esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s vidutiniams oro srauto greičiams kanaluose

Išnagrinėjus aštuonkanalio ciklono aerodinaminius pasipriešinimus nustatyta, kad didžiausia iš nagrinėtų atvejų aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra gauta esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose, nustačius vyraujančio periferinio srauto 75/25 srautų pasiskirstymo santykius, aerodinaminis pasipriešinimas lygus 1660 Pa, kuris yra apytikriai lygus atvejui, kai srautų pasiskirstymo santykiai buvo nustatyti 50/50 bei 3,6 % – esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykių atveju (3.12 pav.).

Mažiausias pasipriešinimas yra gautas esant mažiausiems greičiams (vidutinis oro srauto greitis kanaluose 8 m/s) bei nustačius 25/75 srautų pasiskirstymo santykius, kai periferinis srautas yra mažesnis už tranzitinį srautą, kuris juda link įrenginio ašies į tolimesnius kanalus. Mažiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra lygi 650 Pa (8 m/s vidutinis oro srauto greitis kanaluose, 25/75 srautų pasiskirstymo santykių atvejis).

3.2. Daugiakanalio ciklono oro valymo efektyvumo tyrimo rezultatų analizė

Šiame skyriuje pateikta dviejų lygių cilindrinio daugiakanalio (keturių, šešių ir aštuonių kanalų) ciklono bendro efektyvumo eksperimentinių bandymų rezultatai.

Tyrimai atlikti su trijų skirtingų tankių bei savybių dalelėmis, taip pat keičiant separavimo kameroje išdėstytų kreivalinijinių puszіedžių skaičių ir tūrių, patenkančių į kanalus, pasiskirstymą.

Kietosios dalelės, naudojamos eksperimentams, buvo prasijotos pro 20 μm sietus.

Tyrimo tikslas – nustatyti dviejų lygių daugiakanalio ciklono valymo efektyvumą, taip pat nustatyti kokią įtaką šio ciklono KD šalinimo efektyvumui turi įrenginio vidinė konstrukcija – cilindrinių pusžiedžių skaičius ir oro srauto pasiskirstymas įtekėjimuose į kanalus.

Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamos skirtingos dalelės pasirinktos dėl jų skirtingo tankio: stiklo dulkės (SiO_2), medienos pelenai, medienos dulkės ir granito dulkės.

KD sijojamos naudojant vibracinį sijotuvą Retsch AS 200 (3.13 paveikslas) ir į jį įstatytą 20 µm sietą.



3.14. pav. Vibracinis sijotuvas Retsch AS 200 (Sieve Shakers 2013)

Stiklo dalelės, persijotos per 20 µm sietą, kurių skersmuo iki 2,7 µm sudarė - 10,0 %, iki 9,3 µm dydžio dalelių buvo 50,0%, o 90 % sudarė dalelės, kurių dydis iki 18,6 µm. Vidutinis stiklo KD dispersiškumas siekia 10,0 µm.

Granito dalelės, persijotos per 20 µm sietą, kurių skersmuo iki 2,7 µm sudarė - 10,0 %, iki 12,6 µm dydžio dalelių buvo 50,0%, o 90 % sudarė dalelės, kurių dydis iki 26,2 µm. Nors dalelės ir persijotos per 20 µm sietą, tačiau jos yra netaisyklingos formos ir dėl to didesnių matmenų dalelė galėjo iškristi pro 20 µm skylę. Vidutinis granito KD, persijotų per 20 µm sietą, dispersiškumas yra 13,7 µm.

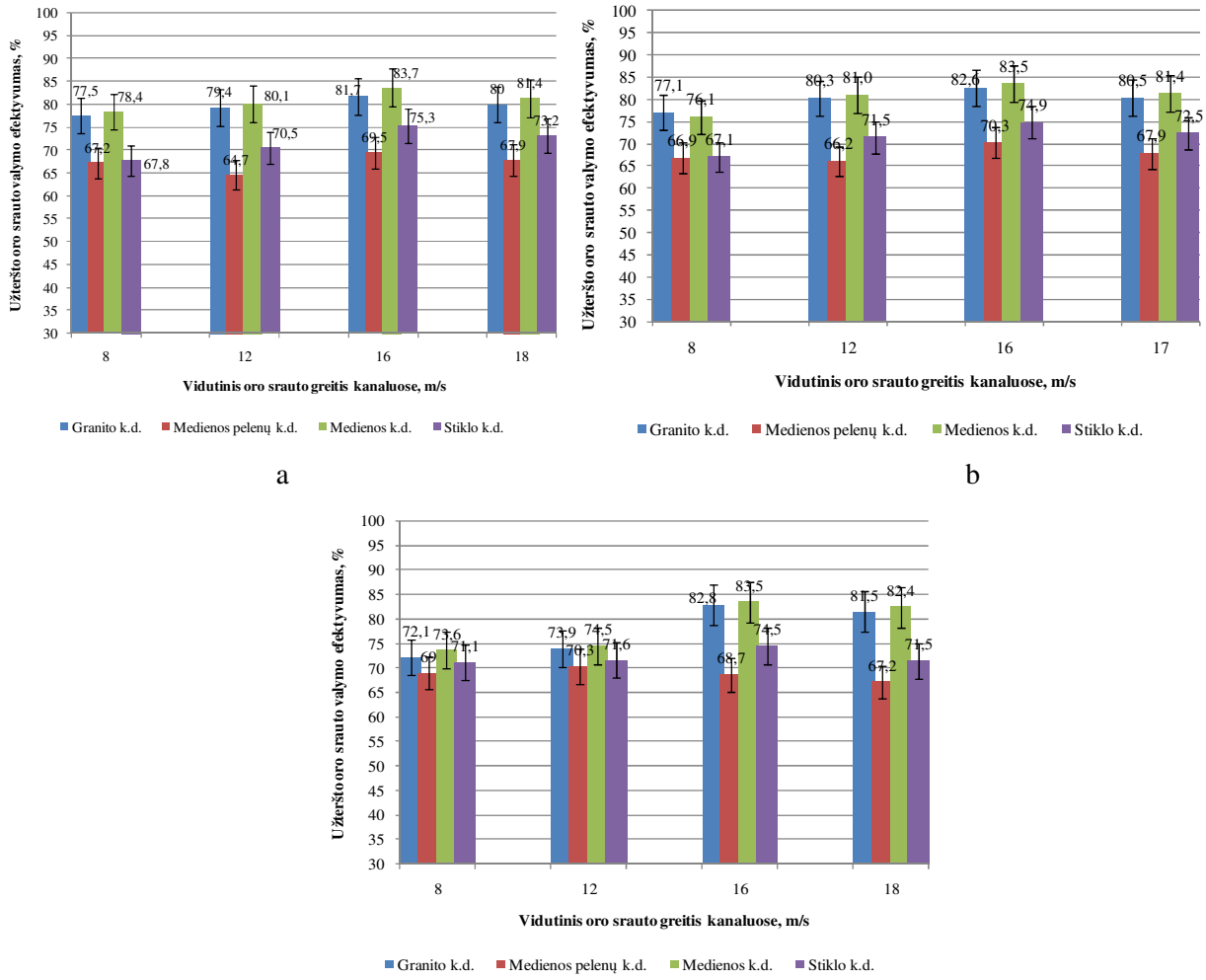
Medienos dalelių, persijotų per 20 µm sietą, kurių skersmuo iki 4,31 µm sudarė - 10,0 %, iki 14,2 µm dydžio dalelių buvo 50,0%, o 90 % sudarė dalelės, kurių dydis iki 29,7 µm. Vidutinis medienos KD, persijotų per 20 µm sietą, dispersiškumas yra 16,0 µm.

3.2.1. Cilindrinio keturkanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė

Didžiausias oro valymo nuo 0 μm iki 20 μm dalelių efektyvumas yra nustatytas esant dideliems greičiams (16 m/s) bei 25/75 tūrių pasiskirstymo santykiams, kurio vertė siekia 83,5 %, t.y. 0,7 % didessnis nei efektyviausiu atveju, panaudojant granito daleles, kai vertė siekė 82,8 %. Oro srauto, užteršto stiklo dalelėmis iki 20 μm dydžio valymo efektyvumas yra didžiausias iš visų trijų greičių atvejų ir lygus 74,5 %. Mažinant vidutinį oro srauto greitį kanaluose iki 12 m/s, efektyvumas krenta 2,9 %, ir yra lygus 71,6 %. Tendencija išlieka ir vertinant dviejų lygių keturkanalio ciklono valymo efektyvumą, esant mažiems greičiams (8 m/s), vertės siekia 71,1 % (3.14 c paveikslas). Esant 18 m/s greičiui ciklono kanaluose kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumas sumažėja, lyginant su atveju esant 16 m/s oro greičiui. Smulkiadispersių stiklo dalelių atskyrimas esant dideliam (16 m/s) bei vidutiniam (12 m/s) greičiams nustatytas apytikriai vienodas, ir vidutiniškai lygus 71,3 %.

Apibendrinant valymo efektyvumo atliktų tyrimų rezultatus, nagrinėjant keturkanalį cikloną, esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiams atvejį, galima teigti, kad efektyviausiai valymas vyksta esant orui užterštam smulkiadispersėmis iki 20 μm medienos kietosiomis dalelėmis, vidutiniškai 1,2 % mažesnės vertės yra gautos nagrinėjant granito kietosiomis dalelėmis užterštą srautą.

Minėtais teršalais užterštas srautas yra valomas daugiau nei 1,15 karto efektyviau nei medienos pelenų bei stiklo kietosiomis dalelėmis, kurių vertės skiriasi vidutiniškai 4 % tarpusavyje. Granito bei medienos kietosiomis dalelėmis užterštam srauto valymui labiausiai yra tinkami dideli greičiai ciklono kanaluose (16 m/s), o medienos pelenų ir stiklo vidutiniai bei dideli, tačiau jų įtaka yra mažiau reikšminga oro valymo efektyvumo vertėms.



3.15 pav. Oro srauto iki 20 µm išvalymo efektyvumas esant 4 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas

Didžiausios efektyvumų vertės, esant 25/75 oro srautų pasiskirstymui, yra gautos esant dideliems greičiams, kurie lygūs 16 m/s, o nagrinėtas keturkanalio ciklono atvejis yra tinkamiausias medienos bei granito kietosiomis dalelėms atskirti. Medienos dalelių atskyrimas iš užteršto oro srauto vyksta 83,5 % efektyvumu, o granito 0,7 % mažiau – 82,8 %. Kaip jau buvo analizuota, didžiausi efektyvumai yra gauti esant dideliems greičiams (16 m/s), tačiau esant vidutiniams greičiams, kai vertės siekia 12 m/s, valymo efektyvumų pasiskirstymas esant stiklo ir medienos pelenų dalelių panaudojimo atvejams nėra pastebėta staigaus verčių kritimo. Šiuo atveju vidutinis visų nagrinėtų atvejų efektyvumų skirtumas esant dideliam ir vidutiniam greičiams yra 5,9 %, o dideliam ir mažam greičiui – 7,7 %. Taip pat galima pastebėti, kad mažiausias skirtumas tarp visų efektyvumų verčių yra pasiekiamas esant mažiems greičiams, tarp didžiausios ir mažiausios vertės jis buvo lygus tik 5,2 %. Todėl galime teigti, kad esant mažiems greičiams bei dalelėms nuo 0 µm

iki 20 μm, didžiausią įtaką valymo efektyvumo dydžiui daro kietųjų dalelių prigimtis, jų savybės, o aerodinaminiai parametrai veikia mažiau nei esant dideliems greičiams.

Lyginant su jau analizuotais srautų pasiskirstymo santykių atvejais gautais valymo efektyvumais, šiuo atveju gautos vertės yra didesnės 2 – 3 %, dėl ko galima daryti išvadą, kad vykstanti užteršto srauto filtracija, padidina bendrąjį valymo efektyvumą. Didžiausias valymo efektyvumas pasiektas valant granito bei medienos kietosiomis dalelėmis užterštą oro srautą.

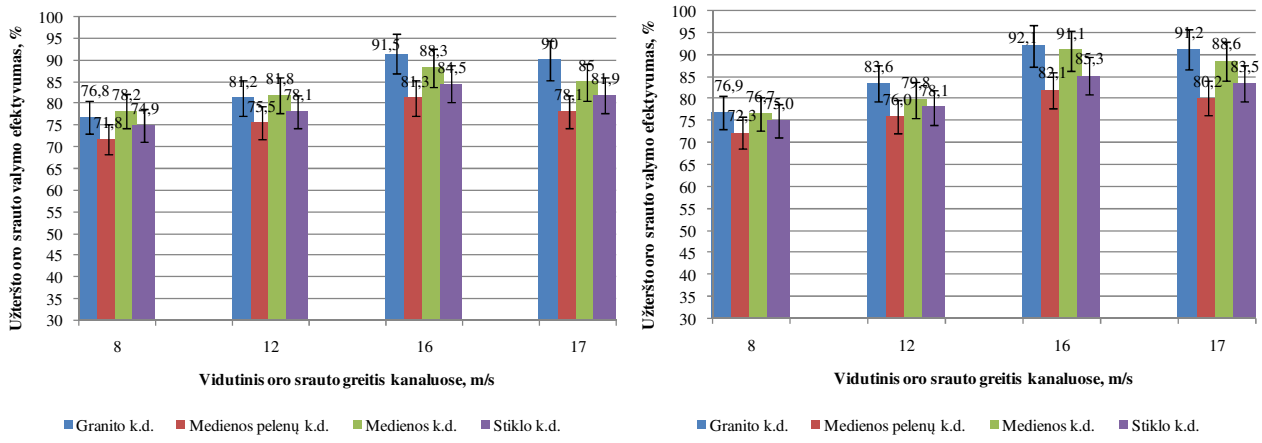
Apibendrinant dviejų lygių keturkanalio ciklono valymo efektyvumo, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams, rezultatus, panaudojant užterštą smulkiadispersėmis iki 20 μm dydžio kietosiomis dalelėmis oro srautą, galima teigti, kad atvejis yra vienas iš palankiausių. Efektyvumų vertės yra panašios į 50/50 srautų pasiskirstymo santykių atvejį, o atskirais atvejais efektyvumas yra didesnis daugiau nei 2 %. Tendencijos išlieka panašios, efektyvumų palyginime tarp skirtingų dalelių atvejų. Atvejais, kai buvo valomas užterštas granito ir medienos kietosiomis dalelėmis oro srautas, valymo efektyvumas buvo vidutiniškai daugiau nei 10,5 % didesnis nei tais atvejais, kai buvo panaudojamas medienos pelenais ar stiklo kietosiomis dalelėmis užterštas srautas (3.14 b pav.).

Pastarųjų dviejų teršalų oro sraute atskyrimas yra gana panašus, tačiau esant vidutiniams bei dideliems oro srauto greičiams efektyviau buvo valomas srautas, užterštas granito kietosiomis dalelėmis, o esant mažiems greičiams (8 m/s) – medienos dalelėmis. Esant dideliems greičiams tiriamo oro, užteršto medienos pelenų bei stiklo dalelėmis valymo efektyvumo vertės skiriasi mažiau nei 1 %, tačiau esant mažiems bei vidutiniams greičiams skirtumas didėja beveik iki 3 %. Todėl medienos pelenais užteršto srauto valymui yra tinkami dideli oro srauto greičiai ciklono kanaluose (16 m/s).

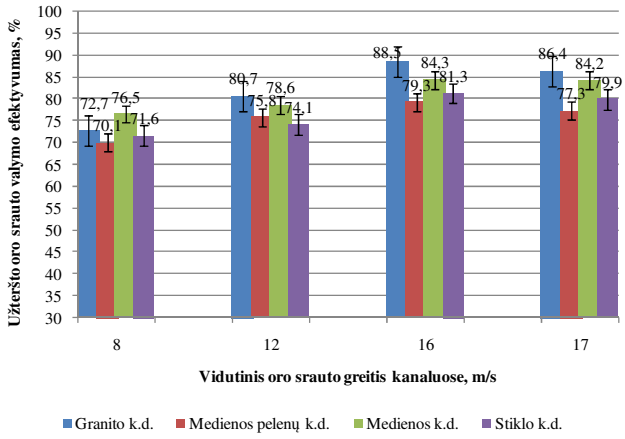
3.2.2. Cilindrinio šešiakanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė

Atlikus bendrojo valymo efektyvumo eksperimentinius tyrimus, esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiams bei panaudojant užterštą medienos pelenų nuo 0 iki 20 μm dydžio kietosiomis dalelėmis oro srautą, nustatytas didžiausias efektyvumas siekė 79,3 %, esant 16 m/s oro srauto greičiui ciklono kanaluose. Pagal 3.15 pav. galima matyti, kad valymo efektyvumas didėja, didėjant vidutiniam oro srauto greičiui ciklone, todėl esant 12 m/s ir 8 m/s oro srauto greičiams valymo efektyvumai, panaudojant medienos pelenų kietąsias daleles mažesni ir atitinkamai siekia 75,8 % ir 70,1 %. Esant 17 m/s greičiui ciklono kanaluose kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumas sumažėja, lyginant su atveju esant 16 m/s oro greičiui.

Iš 3.15 c pav. duomenų matyti, kad šešiakanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalinamos granito kietosios dalelės, blogiausiai – medienos pelenų. Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų k.d. atskyrimo efektyvumo siekia 3 – 7 % ir šis skirtumas didėja didinat vidutinį oro srauto greitį kanaluose.



a b



c

3.16 pav. Oro srauto iki 20 µm išvalymo efektyvumas esant 6 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas

Esant minimaliam 8 m/s greičiui didžiausias efektyvumas yra valant medienos k.d. užterštam orui ir siekia 76,5 %. Esant vidutiniam greičiui didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito k.d., taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Granito dalelės iš oro srauto išskiriamos geriausiai, nes jų tankis yra didžiausias iš visų tyrinėtų dalelių. Medienos dalelės, nors ir mažiausio tankio, išskiriamos taip pat labai gerai, nes jų organinės savybės leidžia joms lengviau sukibti tarpusavyje.

Iš 3.15 a pav. duomenų matyti, kad šešiakanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalinamos granito kietosios dalelės, blogiausiai – medienos pelenų. Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų k.d. atskyrimo efektyvumo siekia 2 – 11 % ir šis skirtumas didėja didinat vidutinį oro srauto greitį kanaluose. Esant minimaliam 8 m/s greičiui didžiausias efektyvumas yra valant granito k.d. užterštam orui ir siekia 78,2 %. Esant vidutiniam greičiui didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito k.d., taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Mažiausias bendrasis efektyvumas išmatuotas valant medienos pelenais užterštą orą ir siekia 71,8 % esant mažiausiam greičiui.

Granito kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas nuo 0 μm iki 20 μm skersmens, mažiausias atskyrimo iš oro srauto efektyvumas, esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 50/50, nustatytas esant 8 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ir siekia – 78,2 %. Didėjant vidutiniam oro srauto greičiui ciklone stebimas staigus efektyvumo padidėjimas. Padidinus oro srauto greitį iki 12 m/s efektyvumas padidėja 3,9 %, o kai greitis yra 16 m/s efektyvumas pasiekia maksimalią 88,5 % reikšmę.

Iš 3.15 b paveiksle pateikto grafiko duomenų matyti, kad šešiakanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalinamos granito kietosios dalelės, blogiausiai – medienos pelenų.

Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų k.d. atskyrimo efektyvumo siekia 4 – 12 % ir šis skirtumas didėja didinat vidutinį oro srauto greitį kanaluose. Esant minimaliam 8 m/s greičiui didžiausias efektyvumas yra valant granito k.d. užterštam orui ir siekia 76,9 %. Esant vidutiniam greičiui didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito k.d., taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Mažiausias bendrasis efektyvumas išmatuotas valant medienos pelenais užterštą orą ir siekia 72,3 % esant mažiausiam greičiui.

Granito kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas nuo 0 μm iki 20 μm skersmens, mažiausias atskyrimo iš oro srauto efektyvumas, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiui, nustatytas esant 8 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose ir siekia – 76,9 %. Didėjant vidutiniam oro srauto greičiui stebima efektyvumo didėjimo tendencija (3.15 b paveikslas). Padidinus oro srauto greitį iki 12 m/s efektyvumas padidėja 6,3 %, o kai greitis yra 16 m/s efektyvumas pasiekia maksimalią 92,1 % reikšmę.

Manoma, kad esant 16 m/s greičiui bei esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejui, susidaro tinkamas sūkurinis srautas, kuris nukreipia daleles link periferinės sienelės, kur teršalų dalelės yra nusodinamos ciklono bunkeryje, patenkant pro segmentinius plyšius esančius

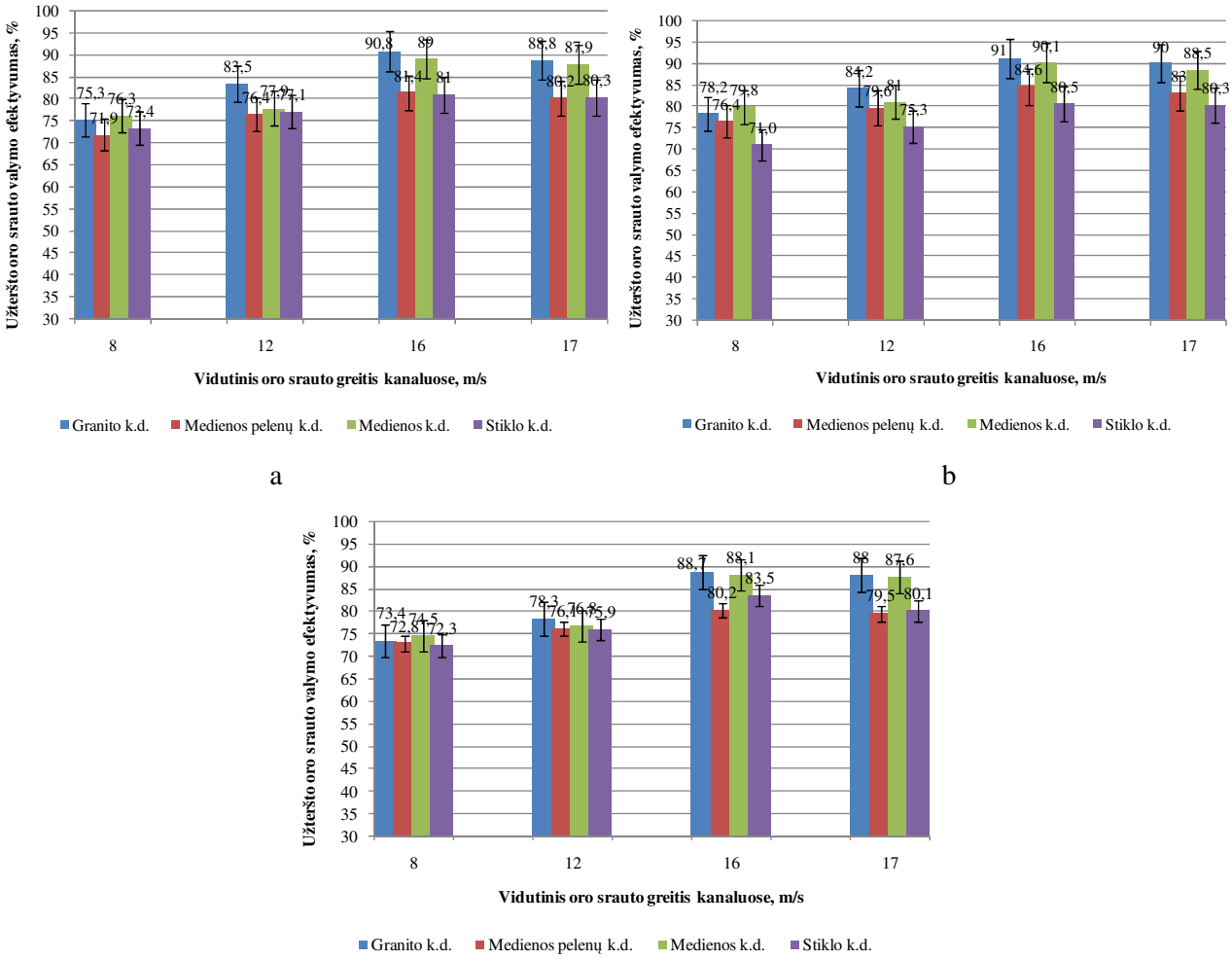
separavimo kameros dugne. Be to, didėjant srauto greičiui, pasireiškia didesnis turbulentiškumas, bei dalelės kontaktuoja tarpusavyje intensyviau, dėl to sulipimo tikimybė ir to pasėkoje efektyvesnis nusodinimas suintensyvėja.

3.2.3. Cilindrinio aštuonkanalio dviejų lygių ciklono efektyvumo tyrimas ir analizė

Iš 3.5 paveiksle pateikto grafiko duomenų matyti, kad aštuonkanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalina granito kietąsias daleles, blogiausiai – medienos pelenų.

Granito kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas nuo 0 μm iki 20 μm skersmens, didžiausias atskyrimo iš oro srauto efektyvumas, nustatytas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ir siekia – 88,7 %. Didėjant vidutiniam oro srauto greičiui ciklone stebima efektyvumo didėjimo tendencija (3.16 c paveikslas). Padidinus oro srauto greitį nuo 8 m/s iki 12 m/s efektyvumas padidėja 4,9 %, o kai greitis ciklono kanaluose pakinta nuo 8 m/s iki 16 m/s efektyvumų skirtumas lygus 15,3 %. Esant 17 m/s greičiui ciklono kanaluose kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumas sumažėja, lyginant su atveju esant 16 m/s oro greičiui.

Stiklo kietųjų dalelių, nuo 0 iki 20 μm skersmens didžiausias atskyrimo iš užteršto oro srauto efektyvumas, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiams, nustatytas prie 16 m/s vidutinio oro srauto greičio ir siekė 83,5 % (3.16 c paveikslas). Stebima efektyvumo didėjimo tendencija priklausomai nuo vidutinio oro srauto greičio. Padidinus minimalų greitį nuo 8 m/s iki 12 m/s efektyvumas padidėjo 3,6 %, o padidinus nuo 8 m/s iki 16 m/s vidutinio greičio padidėjimas siekia 11,2 %. Esant 17 m/s greičiui ciklono kanaluose kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumas sumažėja, lyginant su atveju esant 16 m/s oro greičiui. Stiklo kietosios dalelės, dėl savo savybių (didelis dalelių lipnumas), sąveikaudamos tarpusavyje koaguliuoja, bei dėl didėjančio svorio yra lengviau nusodinamos. Eksperimentiniuose tyrimų rezultatuose, gauto skirtingo dispersiškumo valymo efektyvumo skirtumo mažėjimas, didėjant oro srauto greičiui ciklono kanaluose, pagrindžia pastarąją prielaidą. Kadangi didėjant srauto greičiui, pasireiškia didesnis turbulentiškumas, bei dalelės kontaktuoja tarpusavyje intensyviau, dėl to koaguliacija ir to pasėkoje efektyvesnis nusodinimas suintensyvėja.



3.17 pav. Oro srauto, užteršto iki 20 µm, išvalymo efektyvumas esant 8 kanalams ir skirtingoms pusžiedžių išdėstymo padėtims: a – 50/50 pusžiedžių išdėstymas; b – 75/25 pusžiedžių išdėstymas; c – 25/75 pusžiedžių išdėstymas

Iš 3.16 a paveikslo duomenų matyti, kad aštuonkanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalinama granito kietąsias dalelės, blogiausiai – medienos pelenų. Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų k.d. atskyrimo efektyvumo siekia 5 – 8 % ir šis skirtumas didėja didinat vidutinį oro srauto greitį kanaluose.

Esant minimaliam 8 m/s greičiui didžiausias efektyvumas yra valant medienos k.d. užterštą orą ir siekia 76,3 %. Esant vidutiniam greičiui didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito k.d., taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Granito dalelės iš oro srauto išskiriamos geriausias, nes jų tankis yra didžiausias iš visų tyrinėtų dalelių. Medienos dalelės, nors ir mažiausio tankio, išskiriamos taip pat labai gerai, nes jų organinė sandara leidžia joms lengviau sukibti tarpusavyje.

Oro valymo efektyvumo tyrimai buvo atlikti panaudojant medienos pelenais užterštą oro srautą, esant aštuonkanaliam ciklonui, 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju. Pagal gautus rezultatus galima matyti, kad, kaip ir kitomis nuo 0 iki 20 kietosiomis dalelėmis užteršto srauto valymas vyksta efektyviausiai esant dideliems greičiams (16 m/s), buvo pasiekta 84,6 % vertė, o Lyginant su medienos bei stiklo dalelių nuo 0 μm iki 20 μm dydžio panaudojimo atvejais, efektyvumas yra gautas atitinkamai 4,1 % didesnis ir 5,5 % mažesnis (3.16 b pav.).

Apibendrinant visų nagrinėtų dviejų lygių aštuonkanalio ciklono valymo efektyvumo rezultatus, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, galima sakyti, kad smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis užteršto oro srauto efektyvumo vertės yra apytikriai lygios arba yra virš 80 %, o tam tikrom sąlygom – net virš 90 %. Efektyviausiai valymo procesas vyksta, valant orą, užterštą medienos bei granito kietosiomis dalelėmis, kurių vertės esant dideliam 16 m/s greičiui buvo nustatytos atitinkamai 90,1 % ir 91,2 %.

3.3. Išvados

1. Išmatuoti greičiai ciklono įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose ir pagal juos apskaičiuoti pratekantys oro debitai. Didžiausias greitis šešiakanalio ciklono įtekėjimo ortakyje yra 5,8 m/s, atitinkamai jo debitas lygus 655 m^3/h; ištekėjime didžiausias oro srauto greitis yra 8,7 m/s, o pratekantis dujų tūris – 630 m^3/s. Ciklono pasipriešinimas veikia pro jį einantį oro srautą, todėl oro debitas ciklono išėjime gali būti truputį (šiuo atveju 25 Pa) mažesnis už įeinantį oro debitą.

2. Dviejų lygių ciklono įtekėjime esanti pertvara dalina oro srautą į dvi lygias dalis, todėl esant 6 kanalam į abu ciklono lygius patenka po 328 m^3/h, kuris lygus pusei ortakyje esančio tūrio.

3. Didžiausias greitis dviejų lygių ciklono viduje yra esant 75/25 kanalų išdėstymo padėčiai. Šešiakanalio ciklono, kai oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25, I-ojo kanalo pabaigoje greitis siekia siekia 31,6 m/s. Kai padėtis yra 50/50, greitis tame pačiame taške yra 29,7 m/s, o 25/75 padėčiai – 21,9 m/s. Taip yra todėl, kad didinant periferinį srautą pirmasis ciklono pusžiedis atitraukiamas į dešinę ir viso kanalo pradžios bei pabaigos santykis tampa lygus 5,5 karto. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 šis santykis yra 2,2 karto, o esant santykiui 25/75 – 1,1 karto.

4. Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui, nustatytas esant aštuoniems kanalams bei 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams, esant vyraujančiam periferiniam srautui, nustatyta vertė siekia 1660 Pa. Aštuonkanalio ciklono sukuriamas pasipriešinimas yra didžiausias esant visiems vidutiniams greičiams ciklone, nes aštuonkanaliame ciklone kanalų plotis yra 2 kartus mažesnis nei keturių kanalų, dėl to oro srautui sunkiau tekėti ir aerodinaminis pasipriešinimas didėja. Mažiausias pasipriešinimas sukuriamas

keturkanalio ciklono. Didėjant ciklono kanalų skaičiui, tuo pačiu mažėjant ciklono kanalų skersploščiui, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srautų pasiskirstymo santykių tampa vis silpnesnė, ir atvirkščiai.

5. Dviejų lygių aštuonkanalio ciklono didžiausias 91 % oro valymo efektyvumas yra pasiektas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose užterštam didelio tankio granito smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis iki 20 μm dydžio bei 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju. Oro valymo efektyvumas didėja, didėjant oro srauto greičiui kanaluose nuo 8 m/s iki 16 m/s. Greičio priklausomybė oro valymo efektyvumui užterštam iki 20 μm dalelėmis, labiausiai pasireiškia esant 25/75 ir 50/50 srautų pasiskirstymo santykiams. Valymo efektyvumai vidutiniškai padidėja minėtų greičių intervale 11,5 %.

6. Valant granito KD užterštą orą yra optimalus vidutinis 16 m/s oro srauto greitis ciklono kanaluose. Šešiakanaliame ciklone esant nustatytiems 50/50 ir 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams efektyviausiai yra valomas smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis užterštas srautas, pasiekiamas didžiausias atitinkamai 91,5 % ir 92,1 % efektyvumas.

7. Medienos dalelėmis (mažo tankio) užteršto oro srauto didžiausias valymo efektyvumas pasiekiamas šešiakanaliame ciklone, esant 16 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose. Smulkiadispersėmis dalelėmis iki 20 μm dydžio užterštas oro srautas yra valomas efektyviausiai esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejui, pasiekiant 91,1 %. Medienos dalelės, nors ir mažiausio tankio, yra valomos efektyviai, nes jų organinės savybės leidžia joms geriau koaguliuoti ir dėl to greičiau nusėsti į bunkerį.

8. Užterštame oro sraute medienos pelenų atskyrimas vyksta efektyviausiai esant 16 m/s oro srauto greičiui ciklono kanaluose. Užteršto nuo 0 iki 20 μm dydžio kietosiomis dalelėmis srautas efektyviausiai yra valomas aštuonkanaliame ciklone esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atveju, kai yra pasiekiamas 84,6 % išvalymo laipsnis. Mažo tankio pelenai nesulimpa tarpusavyje taip kaip medienos dalelės, todėl plevena oro sraute. Dėl to pelenų dalelės lengviau išnešamos ir aštuonkanaliame ciklone, kadangi orui sunkiau praeiti, pasiekiamas geresnis valymo efektyvumas nei šešiakanaliame ciklone.

4. AERODINAMINIŲ PARAMETRŲ DVIEJŲ LYGIŲ DAUGIAKANALIAME CIKLONE SKAITINIS MODELIAVIMAS

Šiame skyriuje nagrinėjama aerodinaminių parametrų pokytis daugiakanaliame dviejų lygių ciklone su tangentiniu srauto įtekėjimu. Vienfazio srauto modeliavimui naudotas ANSYS CFX programinės įrangos paketas. Oro srauto judėjimo ciklone matematinį modelį sudaro Navje ir Stokso (laminariniam judėjimui) ir Reinoldso (turbulentiniam srautui) trimačių diferencialinių lygčių sistema. Ciklono viduje turbulentinis srautas aprašomi baigtinių tūrių metodu naudojant Reinoldso įtempimų ir *k-epsilon* diferencialines lygtis.

Reinoldso įtempimų modelis yra grindžiamas judėjimo lygtimis visų Reinoldso įtempių komponentų ir sklaidos normomis. Reinoldso įtempių modelio judėjimo lygtys sprendžiamos atskirais įtempimo komponentais.

Algebriniai Reinoldso įtempimų modeliai sprendžia Reinoldso įtempimų algebrines lygtis, o diferencialiniai Reinoldso įtempimo modeliai sprendžia diferencialines judėjimo lygtis atskirai kiekvienam Reinoldso įtempių komponentui.

Reinoldso judesio kiekio vidutiniam oro srauto greičiui lygis pateiktas (4.1) formulėje:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_i U_j\right) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] = -\frac{\partial p''}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i u_j}\right) + S_{Mi} \qquad (4.1)$$

Čia: p'' – pakeistas slėgis, S_M – kūną veikiančių jėgų suma, $\rho\overline{u_i u_j}$ - nepastovių Reinoldso įtempimų dedamoji

k-epsilon modelyje *k* yra turbulentinio srauto kinetinė energija ir yra apibrėžta kaip srauto greičių kaita. *k-ε* modelis apjungia du naujus kintamuosius į lygčių sistemą.Tęstinumo lygtis pateikta (4.2) formulėje:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j\right) = 0 \qquad (4.2)$$

Judesio kiekio lygtis (4.3) yra:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_i U_j\right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] + S_M \qquad (4.3)$$

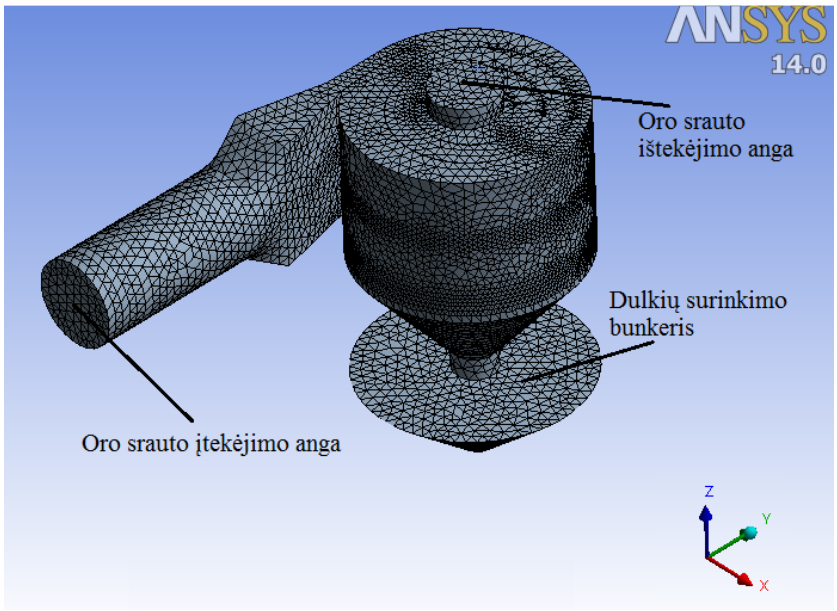
S_M – kūną veikiančių jėgų suma, μ_{eff} – turbulentinio klampumo koeficientas, p' – pakeistas slėgis

Pakeistasis slėgis apskaičiuojamas pagal (4.4) formulę:

$$p' = p + \frac{2}{3} pk + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \tag{4.4}$$

Oro srautas dviejų lygių ciklone aprašytas skaitiniu baigtinių tūrių metodu. Šiame skaitiniame modelyje įtraukti keturi nežinomieji (p, u, v, w), t. y. slėgis ir trys greičio komponentai, kurie aprašyti keturių lygčių sistema.

Ciklono skaičiavimo tinklelis sudarytas naudojant kreivalinijines cilindrines (x, y, z) koordinates, bei naudojant artumo funkciją, kuri leidžia automatiškai sutankinti tinklelį svarbiausiose vietose. Tinklelis sudarytas iš 233964 elementų. Skaičiavimo tinklelio eskizas pateiktas 4.1 paveiksle.



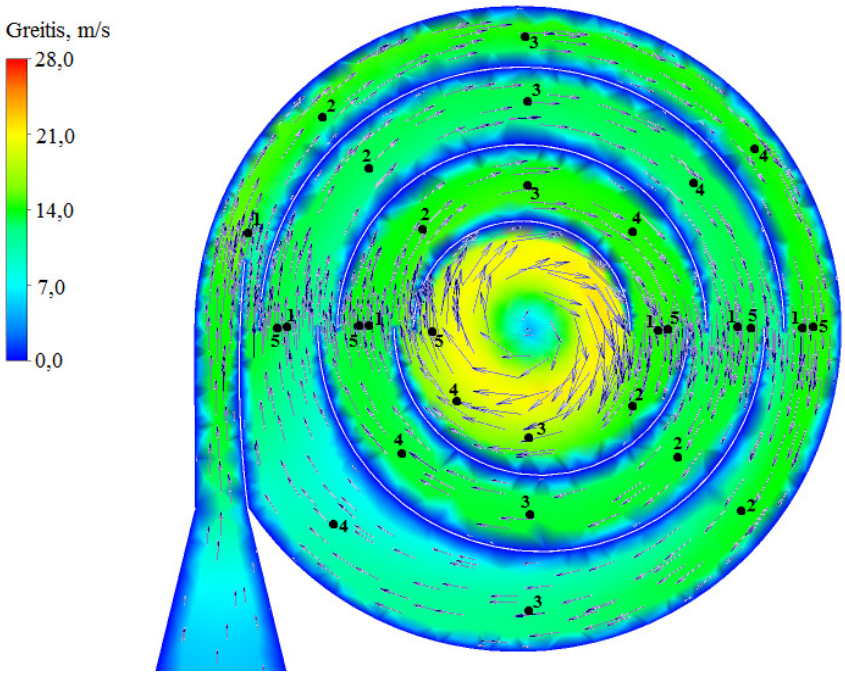
4.1 pav. Skaičiavimo tinklelio eskizas

Skaitinis modeliavimas atliktas panaudojant eksperimentinius duomenis. Dėl didelės eksperimentų apimties buvo pasirinkti tik optimaliausias variantas – dviejų lygių šešiakanalis ciklonas, kai vidutinis greitis ciklone yra 16 m/s. Šiuo atveju išmatuotas įtekėjimo greitis buvo 5,8 m/s.

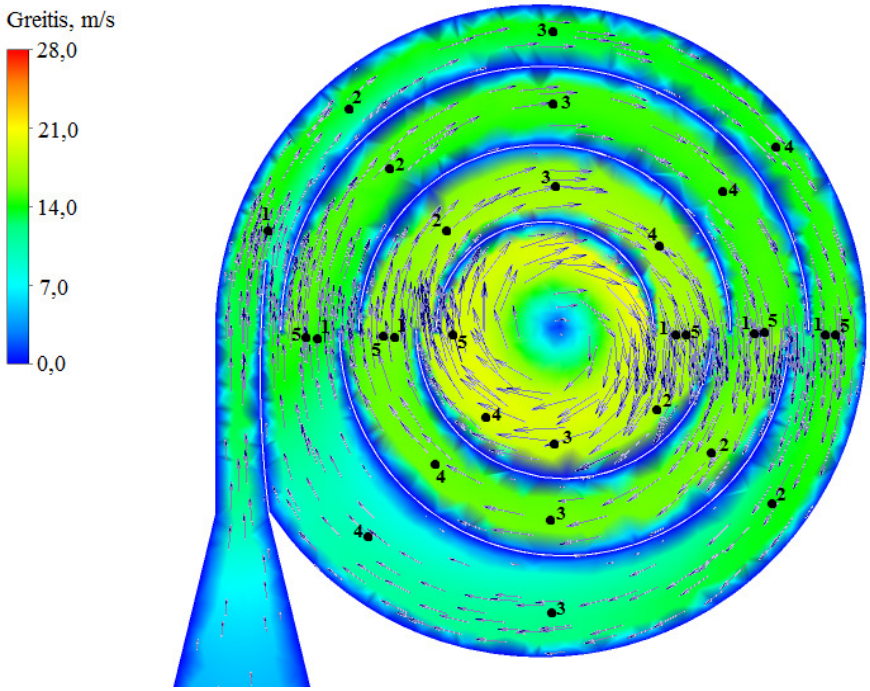
Aerodinaminių parametrų pasiskirstymas nagrinėtas trijose plokštumose: x-y plokštumoje pjūviuose per ciklono pirmąjį bei antrąjį lygius, z-x plokštumoje pjūyje per ciklono centrą.

4.1. Oro srauto greičių skaitinis modeliavimas

4.2 ir 4.3 paveiksluose pateikti greičio pasiskirstymai šešiakanalio ciklono pirmajame bei antrajame lygiuose, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose apie 16 m/s, o oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75. Ciklono įtekėjimo pradžioje, kai srautas teka apvaliu ortakiu greitis siekia apie 6 m/s. Susiaurėjus įtekėjimui greitis padidėja iki 16 m/s.

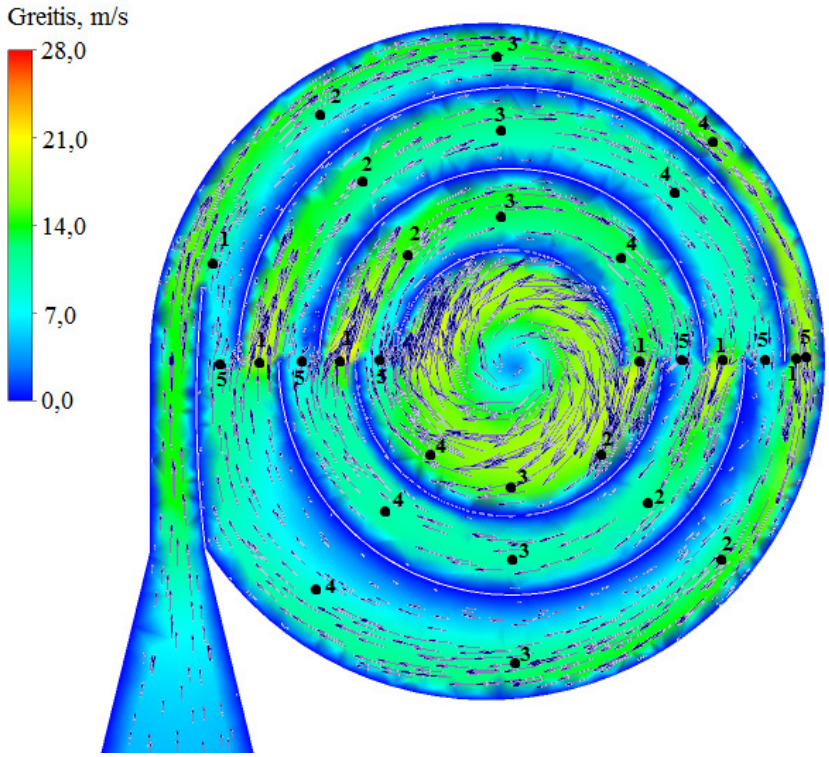


4.2 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 27/75, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

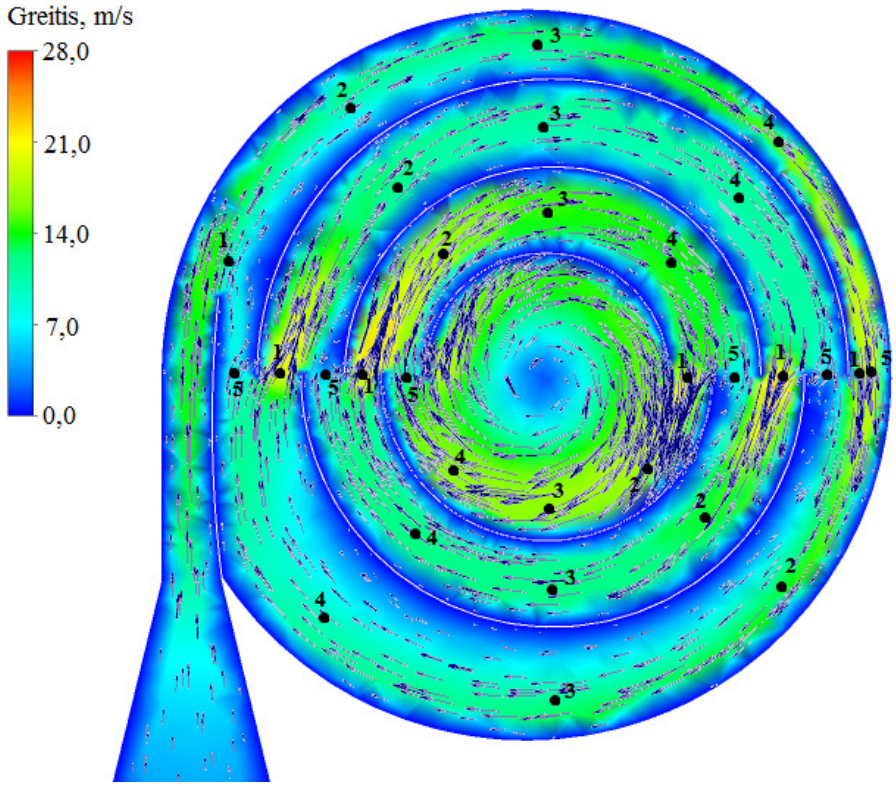


4.3 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 27/75, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

Esant padėčiai 25/75 oro srauto greitis visuose kanaluose išlieka apie 16 m/s, nes kanalų skerspjūvio plotai yra vienodi. Antrojo kanalo vyduryje skerspjūvio plotas pradeda didėti ir oro srauto greitis nukrenta iki 13 m/s. Artėjant link ciklono vidurio oro srauto greitis ima didėti ir paskutiniajame kanale siekia apie 19 m/s. Tyrinėjant oro srauto judėjimo kryptį, kuri atvaizduota vektorine išraiška, galima teigti, kad mažesnioji dalis oro sauto grįžta į ankstesnį kanalą, o didesnioji srauto dalis teka į sekantį kanalą.

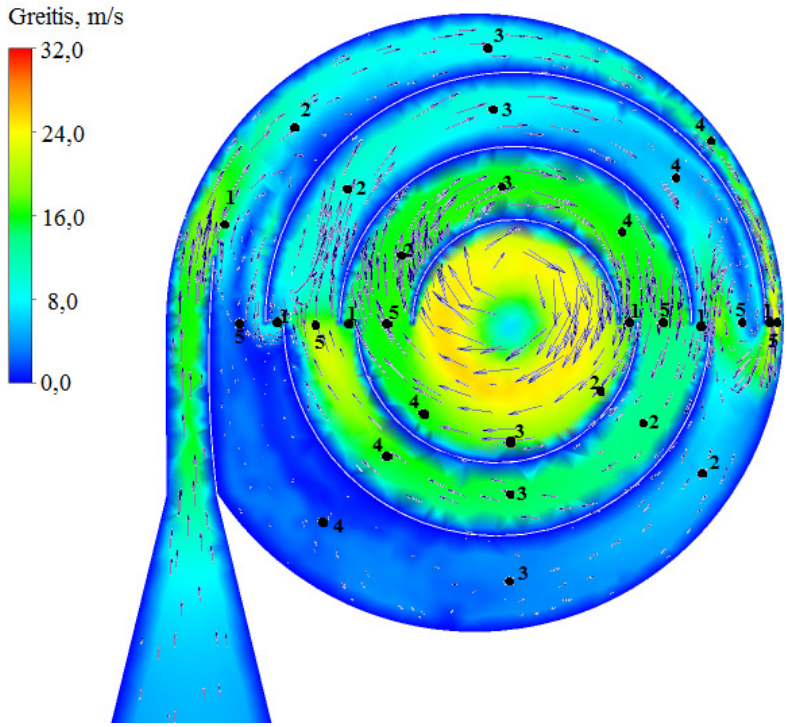


4.4 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 50/50, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

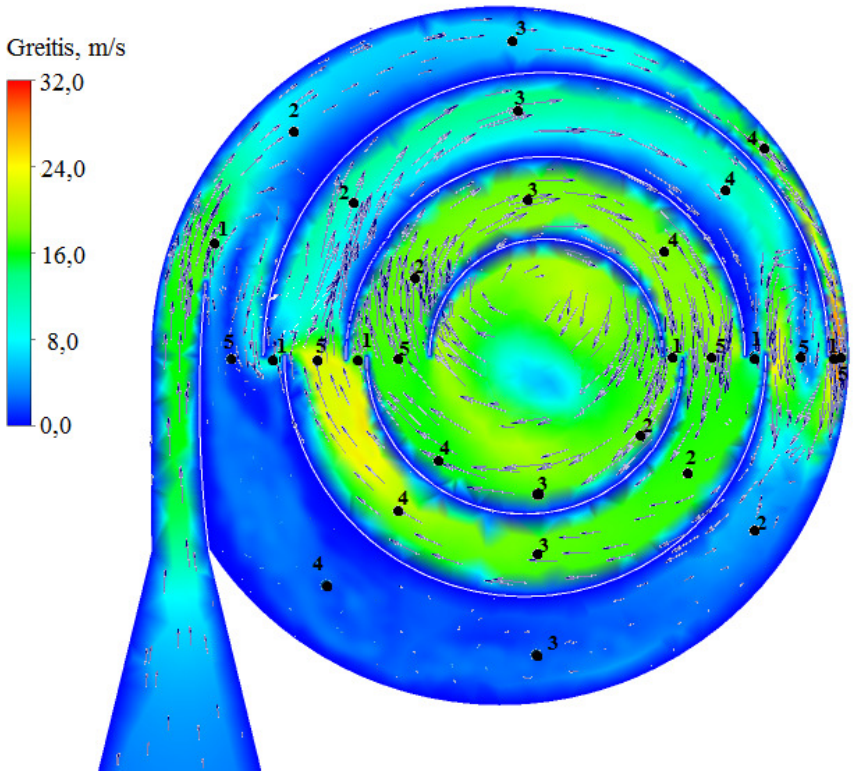


4.5 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 50/50, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

Pekeitus oro srautų pasiskirstymo santykį į 50/50 arba į 75/25 pusžiedžiai paslenkami į dešinę pusę. Dėl to pirmojo kanalo pabaigoje susiaurėja skerspjūvio plotas ir atitinkamai padidėja oro srauto greitis. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 pirmojo kanalo pabaigoje oro srauto greitis yra 22 m/s, o esant santykiui 75/25 oro srauto greitis pasiekia 26 m/s vidutinį greitį. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50, tai ciklono centrinėje ašyje, kur oro srautas išteka, greitis yra apie 8 m/s, o apie šią ašį susiformuoja apie 18 m/s oro srauto sūkurys.



4.6 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 75/25, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s



4.7 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant oro srautų pasiskirstymo santykiui 75/25, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

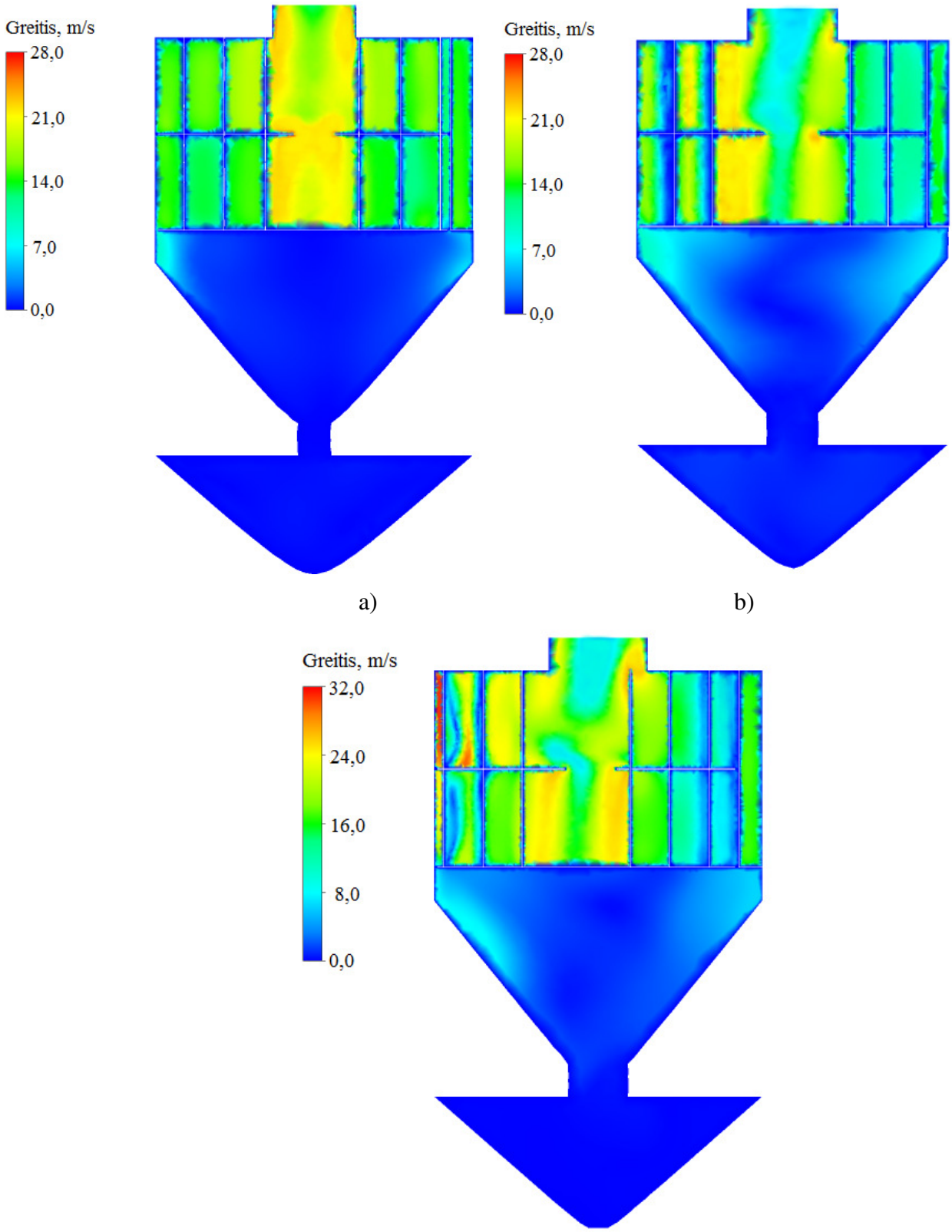
4.6 ir 4.7 paveiksluose pateiktas oro srauto greičių pasiskirstymas ciklono kanaluose pirmajame ir antrajame lygyje, kai oro srautų pasiskirstymo santykiai yra 75/25. Greičių pasiskirstymas yra panašus abejuose ciklono lygiuose. Tačiau matoma, kad antrajame lygyje oro srauto greitis yra didesnis. Atlikus eksperimentinius tyrimus ši tendencija taip pat pastebėta.

Nagrinėjant oro srautų pasiskirstymą pastebėta, kad dalis oro srauto pasiurbiama iš pirmojo kanalo į trečiąjį. Taip pat vyksta ir pirmojo kanalo pabaigoje, kai iš antrojo kanalo pradžios dalis oro srauto pasiurbiama į ketvirtąjį kanalą. Dėl šios priežasties abiejuose ciklono lygiuose antrojo kanalo greitis siekia vos 7 m/s.

4.1 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių modeliavimo rezultatų palyginimas tarp skirtingų ciklono lygių, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50

	Oro srauto greičiai pirmajame lygyje, m/s					Oro srauto greičiai antrajame lygyje, m/s					Skirtumas, %				
	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas
1 kanalas	16,0	16,0	17,1	18,6	18,7	16,5	16,3	17,6	19,1	19,2	-3,1	-1,9	-2,9	-2,7	-2,7
2 kanalas	17,6	15,1	13,3	13,0	13,8	18,2	15,5	13,8	13,5	14,3	-3,4	-2,6	-3,8	-3,8	-3,6
3 kanalas	16,6	15,7	15,5	13,2	12,8	17,1	16,2	16,0	13,6	13,2	-3,0	-3,2	-3,2	-3,0	-3,1
4 kanalas	16,6	15,1	13,2	13,2	13,1	17,0	15,8	13,8	13,7	13,7	-2,4	-4,6	-4,5	-3,8	-4,6
5 kanalas	17,0	15,1	15,1	15,0	15,0	17,6	15,5	15,5	15,4	15,4	-3,5	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7
6 kanalas	17,0	15,0	14,9	14,8	14,8	17,5	15,5	15,4	15,3	15,3	-2,9	-3,3	-3,4	-3,4	-3,4

4.1 lentelėje palyginti oro srauto greičiai, gauti modeliavimo metu skirtinguose ciklono lygiuose. Visuose atvejuose antrojo lygio oro srauto greitis didesnis nei pirmajame lygyje. Skirtumas svyruoja nuo 1,9% iki 4,6%. Tokia tendencija išlieka keičiant oro srauto pasiskirstymo santykius į 25/75 bei į 75/25.

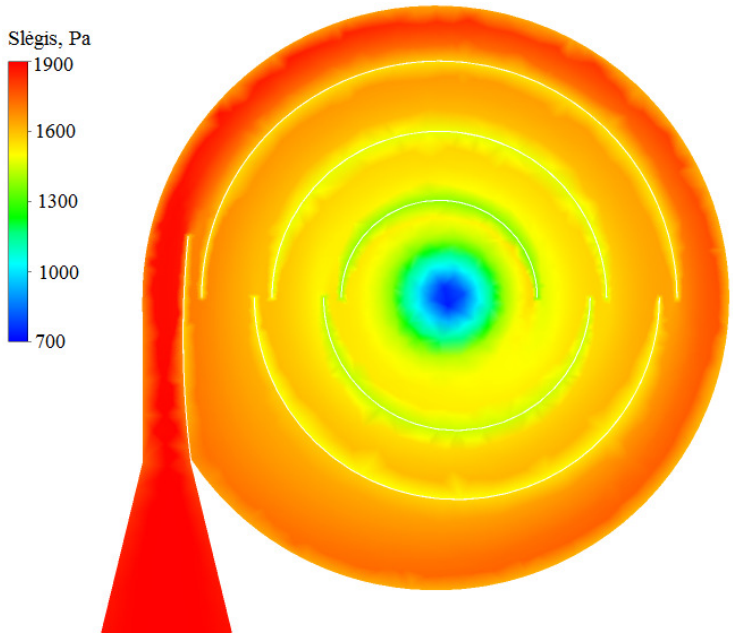


4.8 pav. Oro srauto greičių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono vertikaliajame pjūvyje esant skirtingam pusžiedžių išdėstymui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s. Čia: a) – oro tūrių pasiskirstymo santykis 27/75; b) oro tūrių pasiskistymo santykis 50/50; c) oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25

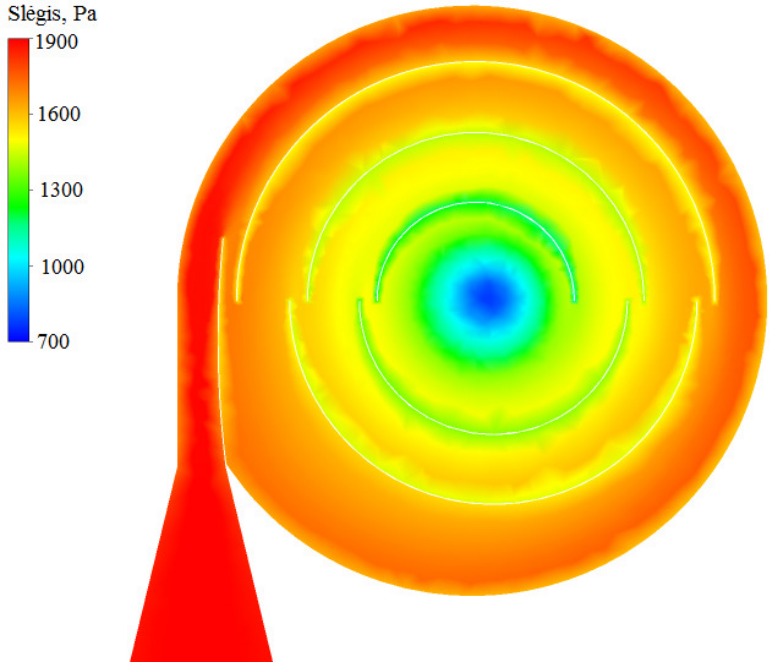
4.8 paveiksle pateiktas oro srauto greičio pasiskirstymas vertikalioje ciklono plokštumoje. Iš šio pjūvio matyti, kad spalvos pasiskirsčiusios taip pat kaip ir horizontaliame pjūvyje. Tai reiškia, kad greičiai yra vienodi. Tangentine kryptimi tekėdamas oro srautas juda link centro ir kyla į viršų, todėl į ciklono dulkių nusodinimo bunkerį beveik nepatenka. Pirmajame bunkeryje šalia sienelės oro srauto greitis pasiekia iki 7 m/s greitį, tačiau į antrąjį bunkerį nepatenka. Pirmajame bunkeryje oro srauto greitis didesnis tada, kai periferinis oro srautas didesnis, t.y. 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykis.

4.2. Aerodinaminio pasipriešinimo skaitinis modeliavimas

4.9 ir 4.10 paveiksle pateiktas oro srauto sukuriamo pasipriešinimas ciklono pirmojo bei antrojo lygio kanaluose esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui.

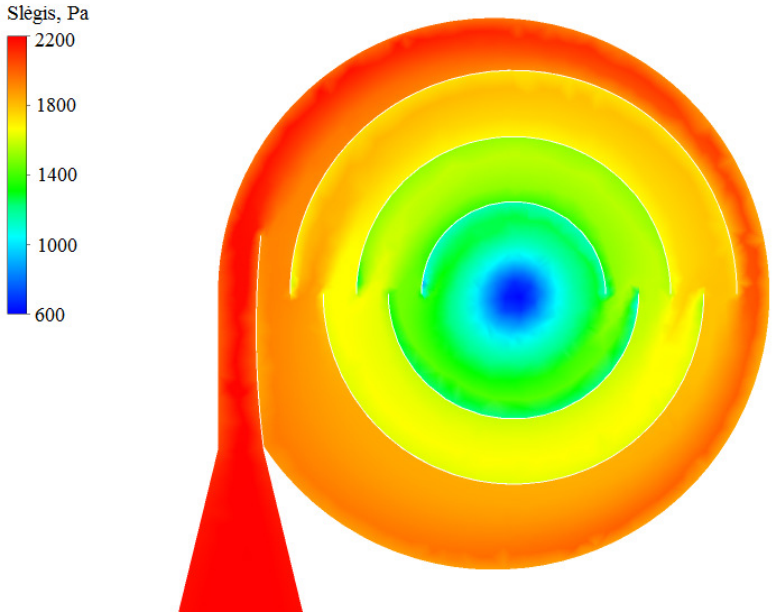


4.9 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

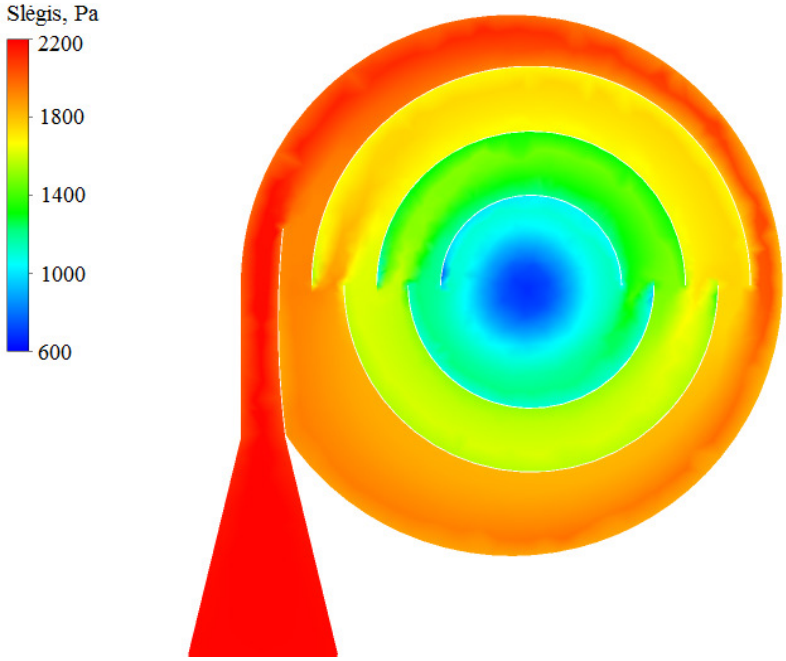


4.10 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

Mažiausias pasipriešinimas yra esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui. Reikšmės spalvų skalėje kinta nuo 700 Pa (tamsiai mėlyna spalva) iki 1900 Pa (raudona spalva). Bendras sistemos aerodinaminis pasipriešinimas turi siekti apie 1200 Pa. Didžiausias pasipriešinimas sukuriamas pirmajame ciklono kanale. Ištekėjimo angos link aerodinaminio pasipriešinimo reikšmė mažėja.

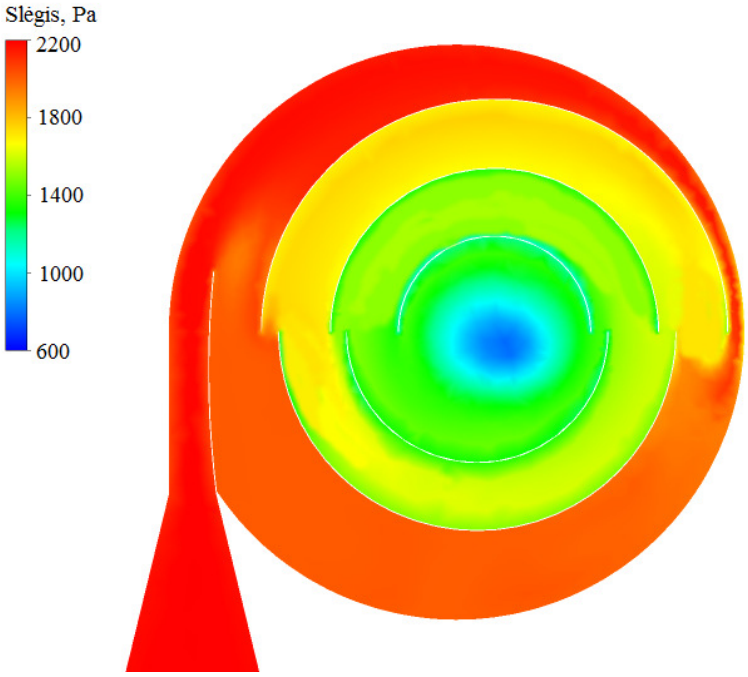


4.11 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

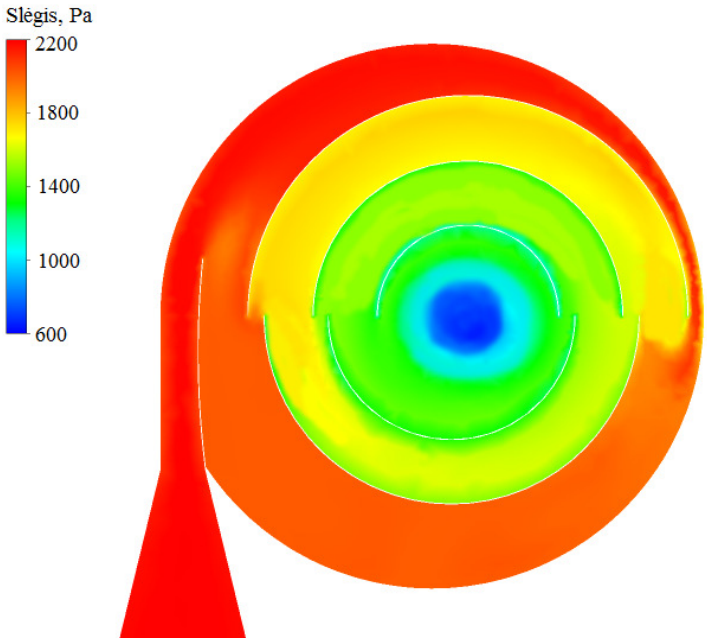


4.12 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

Pakeitus pusžiedžių išdėstymo padėtį į 50/50 padidėja sistemos sukuriamas aerodinaminis pasipriešinimas (4.11 ir 4.12 paveikslai). Didžiausia reikšmė yra ciklono įtekėjime ir pirmojo kanalo pradžioje, slėgis siekia 2200 Pa. Pirmojo kanalo pabaigoje slėgis pradeda mažėti ir mažėja iki ištekėjimo angos, kur pasiekia minimalią 600 Pa ribą. Antrajame lygyje, paskutiniame kanale sistemos slėgis yra mažesnis nei pirmajame lygyje.



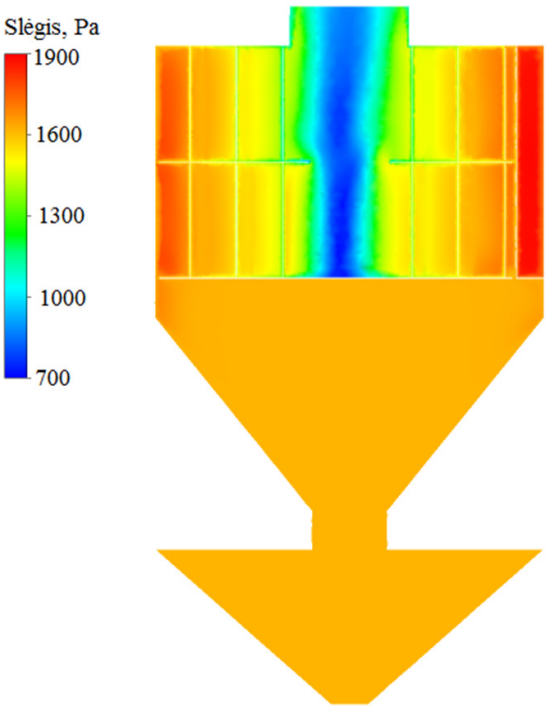
4.13 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono pirmajame lygyje esant 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

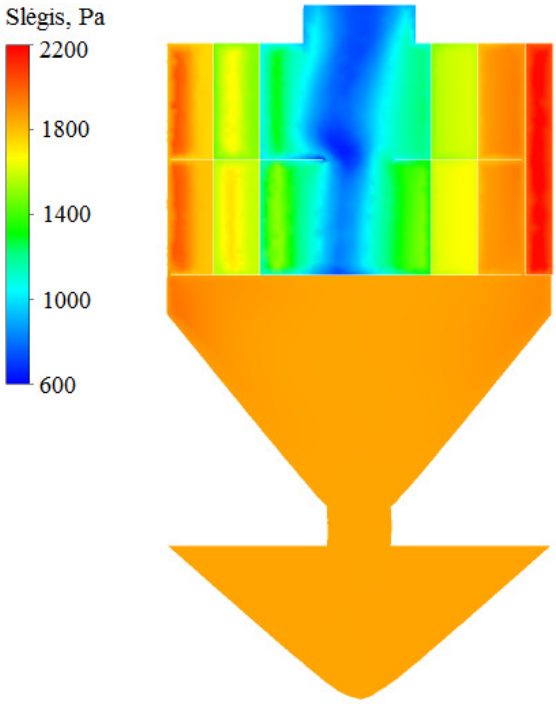


4.14 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas šešiakanalio ciklono antrajame lygyje esant 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s

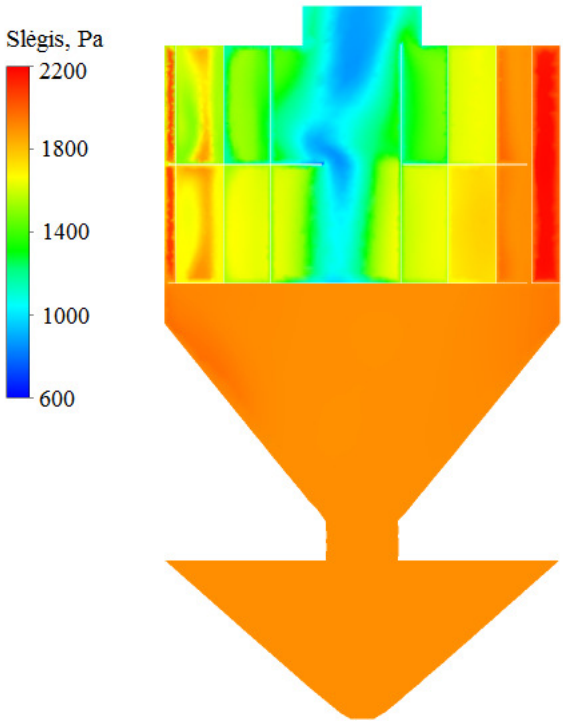
Nagrinėjant gautus oro slėgio duomenis, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25 matoma, kad skaitiniu modeliavimu gauta oro srauto reikšmė yra didžiausia, lyginant su kitomis pusžiedžių išdėstymo padėtimis.

Antrajame ciklono lygyje aerodinaminio pasipriešinimo reikšmės labai artimos reikšmėms pirmajame lygyje.





a) b)



c)

4.15 pav. Oro srauto aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymas vertikaliajame pjūvyje esant skirtingam pusžiedžių išdėstymui, kai vidutinis greitis ciklono kanaluose 16 m/s. Čia: a) – oro tūrių pasiskirstymo santykis 27/75; b) oro tūrių pasiskistymo santykis 50/50; c) oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25

Vertikaliajame ciklono pjūvyje, kuriame spalvine skale atvaizduotas slėgio pasiskirstymas (4.15 pav.). Kaip ir pjūvyje x-y plokštumoje matoma, kad didžiausias slėgis sukuriamas pirmajame kanale. Esant pusžiedžių išdėstymo padėčiai 75/25 slėgis pasiekia maksimalią 2200 Pa reikšmę pirmajame kanale, o pakeitus cilindrinių pusžiedžių padėtį į 25/75 maksimalus slėgis siekia 1900 Pa. Padidinus grįžtamojo (periferinio) oro srauto dalį oro srautui sunkiau pratekėti link ištekėjimo ortakio ir pasipriešinimas padidėja apie 16 %.

Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas

4.2 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimntinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75

	Eksperimentiniai oro srauto greičiai, m/s					Modeliavimo metu gauti oro srauto greičiai, m/s					Skirtumas, %				
	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas
1 kanalas	16,2	14,9	21,1	27,5	30,7	15,2	15,5	18,5	19,8	26,2	6,2	-3,9	12,3	28,0	4,7
2 kanalas	20,1	17,9	13,9	14,4	16,8	20,8	18,1	13,6	12,3	13,9	-3,4	-1,1	2,2	14,6	17,3
3 kanalas	16,8	15,9	16,6	16,3	16,1	16,5	15,2	15,1	15,1	14,8	1,8	4,4	9,0	7,4	8,1
4 kanalas	15,9	15,5	15,7	15,5	15,3	16,2	15,8	15,5	15,1	14,7	-1,9	-1,9	1,3	2,6	3,9
5 kanalas	15,3	14,7	15,1	15,0	14,7	16,0	15,9	16,0	16,0	15,9	-4,4	-7,5	-5,6	-6,3	-7,5
6 kanalas	14,8	14,5	14,9	14,8	14,7	15,9	16,0	16,7	17,5	19,2	7,4	10,3	12,1	18,2	30,6

Esant oro srautų pasiskirstymo sanykiui 25/75 bei 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui šešiakanaliame ciklone pirmajame taške eksperimentiniai rezultatai yra didesni, santykine paklaida siekia 6,2 %. Antrajame matavimo taške didesnė oro srauto greičio reikšmė gauta modeliavimo metu, skirtumas yra 3,9 %. Bendras modeliavimo greičio dydžių laukas pateiktas 4.2 paveiksle. Apibendrinus gautus duominis (4.2 lentelė) matyti, kad duomenų sutapimas yra gana geras. Didžiausias nesutapimas yra šeštojo kanalo 5 matavimo taške ir yra 28,0 %.

4.3 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50

	Eksperimentiniai oro srauto greičiai, m/s					Modeliavimo metu gauti oro srauto greičiai, m/s					Paklaida, %				
	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas
1 kanalas	20,3	18,0	21,0	21,5	21,9	16,5	16,3	17,6	19,1	19,2	18,7	9,4	16,2	11,2	12,3
2 kanalas	17,3	14,8	14,1	14,4	16,8	18,2	15,5	13,8	13,5	14,3	-5,2	-4,7	2,1	6,3	14,9
3 kanalas	17,1	16,2	17,0	16,6	16,1	17,1	16,2	16,0	13,6	13,2	0,0	0,0	5,9	18,1	18,0
4 kanalas	16,4	15,5	15,9	15,8	15,5	17,0	15,8	13,8	13,7	13,7	-3,7	-1,9	13,2	13,3	11,6
5 kanalas	15,5	14,9	15,5	15,2	15,1	17,6	15,5	15,5	15,4	15,4	-13,5	-4,0	0,0	-1,3	-2,0
6 kanalas	15,1	14,3	14,9	14,7	14,6	17,5	15,5	15,4	15,3	15,3	-15,9	-8,4	-3,4	-4,1	-4,8

4.3 lentelėje pateikti šešiakanalio ciklono su 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykiu apibendrinti greičių duomenys. Eksperimentiniai duomenys lyginti su skaitinio modeliavimo rezultatais, kurie atvaizduoti 4.4 paveiksle. Vidutinė santykinė paklaida siekia $\pm$ 8,1 %. Didžiausias nesutapimas yra pirmojo kanalo pirmame matavimo taške, šiuo atveju eksperimentiniai duomenys yra 18,7 % didesni nei skaitinio modeliavimo. Nagrinėjant skaitinio modeliavimo rezultatus pastabėta, kad oro srauto greitis kanalo pradžioje yra 2 – 4 m/s didesnis nei pabaigoje.

4.4 lentelė. Šešiakanalio ciklono oro srauto greičių eksperimntinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas, kai oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25

	Eksperimentiniai oro srauto greičiai, m/s					Modeliavimo metu gauti oro srauto greičiai, m/s					Paklaida, %				
	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas
1 kanalas	14,5	13,8	18,0	27,3	32,0	15,4	13,2	13,8	24,2	25,0	-6,2	4,3	23,3	11,4	21,9
2 kanalas	22,8	19,5	13,6	14,3	16,8	18,1	9,8	6,8	5,8	5,9	20,6	49,7	50,0	59,4	64,9
3 kanalas	16,5	15,8	16,3	16,2	15,7	10,6	10,1	10,5	9,4	14,4	35,8	36,1	35,6	42,0	8,3
4 kanalas	15,7	15,3	15,6	15,4	15,4	16,0	15,7	16,2	16,6	18,5	-1,9	-2,6	-3,8	-7,8	-20,1
5 kanalas	15,4	15,1	15,2	14,9	14,9	16,3	16,5	16,5	16,3	16,2	-5,8	-9,3	-8,6	-9,4	-8,7
6 kanalas	14,6	13,9	14,5	14,2	14,0	18,2	18,1	18,1	16,9	16,0	-24,7	-30,2	-24,8	-19,0	-14,3

4.4 lentelėje pateikti šešiakanalio ciklono su 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiu apibendrinti greičių duomenys. Vidutinė santykinė paklaida yra ± 22,0 %. Didžiausias nesutapimas yra antrojo kanalo kanalo paskutiniame (penktame) matavimo taške, šiuo atveju eksperimentiniai duomenys yra 64,9 % didesni nei skaitinio modeliavimo. Duomenų palyginimo metu pastebėta, kad ketvirtajame – šeštajame kanaluose oro srauto greičiai, gauti modeliavimu, buvo didesni vidutiniškai 12,7 %.

Remiantis skaitinio modeliavimo metu gautais oro srauto greičio rezultatais nustatyta, kad eksperimentiniais tyrimais gauti oro srauto greičių duomenys yra panašūs į gautus modeliavimo metu, todėl skaitinis modelis yra tinkamas.

4.3. Išvados

1. Šiame skyriuje nagrinėjama aerodinaminių parametrų pokytis daugiakanaliame dviejų lygių ciklone su tangentiniu srauto įtekėjimu. Vienfazio srauto modeliavimui naudotas ANSYS CFX programinės įrangos paketas. Oro srauto judėjimo ciklone matematinį modelį sudaro Navje ir Stokso (laminariniam judėjimui) ir Reinoldso (turbulentiniam srautui) trimačių diferencialinių lygčių sistema.

2. Skaitinio modeliavimo rezultatais, kai pusžiedžių išdėstymo padėtis 25/75 oro srauto greitis visuose kanaluose išlieka apie 16 m/s, nes kanalų skerspjūvio plotai yra vienodi. Antrojo kanalo vyduryje skerspjūvio plotas pradeda didėti ir oro srauto greitis nukrenta iki 13 m/s. Pekeitus oro srautų pasiskirstymo santykį į 50/50 arba į 75/25 pusžiedžiai paslenkami į dešinę pusę. Dėl to pirmojo kanalo pabaigoje susiaurėja skerspjūvio plotas ir atitinkamai padidėja oro srauto greitis. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 pirmojo kanalo pabaigoje oro srauto greitis yra 22 m/s, o esant santykiui 75/25 oro srauto greitis pasiekia 26 m/s vidutinį greitį.

3. Skaitinio modeliavimo metu gautas mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra esant 25/75 oro srautų pasiskirstymo santykiui. Reikšmės spalvų skalėje kinta nuo 700 Pa (tamsiai mėlyna spalva) iki 1900 Pa (raudona spalva). Bendras sistemos aerodinaminis pasipriešinimas turi siekti apie 1200 Pa. Didžiausias pasipriešinimas sukuriamas pirmajame ciklono kanale. Ištekėjimo angos link aerodinaminio pasipriešinimo reikšmė mažėja.

4. Remiantis skaitinio modeliavimo metu gautais oro srauto greičio rezultatais nustatyta, kad eksperimentiniais tyrimais gauti oro srauto greičių duomenys yra panašūs į gautus modeliavimo metu, todėl skaitinis modelis yra tinkamas.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Ciklonų įrenginiai yra perspektyvūs dėl nedidelių eksploatacinių išlaidų, paprasti, nebrangiai pagaminami, kompaktiški, neturi judančių dalių ir nereikalauja daug priežiūros bei pasižymi gana dideliu išvalymo efektyvumu net iki 99 %. Naujos kartos daugiakanaliai ciklonai pasižymi ypač aukštu užteršto oro išvalymo efektyvumu, todėl puikiai tinka naudoti netgi vietoje rankovinių filtrų.

2. Didžiausias greitis dviejų lygių ciklono viduje yra esant 75/25 kanalų išdėstymo padėčiai. Šešiakanalio ciklono, kai oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25, I-ojo kanalo pabaigoje greitis siekia siekia 31,6 m/s. Kai padėtis yra 50/50, greitis tame pačiame taške yra 29,7 m/s, o 25/75 padėčiai – 21,9 m/s. Taip yra todėl, kad didinant periferinį srautą pirmasis ciklono pusžiedis atitraukiamas į dešinę ir viso kanalo pradžios bei pabaigos santykis tampa lygus 5,5 karto. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 šis santykis yra 2,2 karto, o esant santykiui 25/75 – 1,1 karto.

3. Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui, nustatytas esant aštuoniems kanalams bei 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams, esant vyraujančiam periferiniam srautui, nustatyta vertė siekia 1660 Pa. Aštuonkanalio ciklono sukuriamas pasipriešinimas yra didžiausias esant visiems vidutiniams greičiams ciklone, nes aštuonkanaliame ciklone kanalų plotis yra 2 kartus mažesnis nei keturių kanalų, dėl to oro srautui sunkiau tekėti ir aerodinaminis pasipriešinimas didėja.

4. Nustatyta, kad valant KD užterštą orą yra optimalus vidutinis 16 m/s oro srauto greitis ciklono kanaluose. Šešiakanaliame ciklone esant nustatytiems 50/50 ir 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams efektyviausiai yra valomas smulkiadispersėmis granito KD užterštas srautas, pasiekiamas didžiausias atitinkamai 91,5 % ir 92,1 % efektyvumas. Smulkiadispersėmis medienos dalelėmis, iki 20 μm dydžio, užterštas oro srautas yra valomas efektyviausiai esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejui, pasiekiant 91,1 %.

5. Remiantis skaitinio modeliavimo metu gautais oro srauto greičio rezultatais nustatyta, kad eksperimentiniais tyrimais gauti oro srauto greičių duomenys yra panašūs į gautus modeliavimo metu, todėl skaitinis modelis yra tinkamas aprašant aerodinaminius procesus daugiakanaliame ciklone.

REKOMENDACIJOS

1. Statybinių žaliavų pramonėje, kur naudojamos didelio tankio medžiagos (granitas, klinkeris, cementas), biokuro katilinėse, kur susidaro dideli suodžių ir pelenų kiekiai, taip pat medienos apdirbimo pramonėje rekomenduoju diegti dviejų lygių daugiakanalį cikloną. Šis įrenginys preciziškai išvalytų išmetamą orą nuo smulkiadispersių (iki 20 μm) dalelių,o dviejų lygių sistema leistų padidinti išvalomo oro debitą du kartus.

2. Oro, užteršto kietosiomis dalelėmis, valymui rekomenduoju naudoti dviejų lygių cilindrinį šešiakanalį cikloną, kuriame pusžiedžiai išdėstyti 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkančia padėtimi, bei vidutinis oro srauto greitis kanaluose neviršija 16 m/s. Šiuo atveju užteršto oro valymo efektyvumas didžiausias ir siektų 92,1 % valant granito daleles ir 91,5 % valant medienos daleles, kurių dydis neviršija 20 μm.

3. Atlikus eksperimentinius tyrimus su dviejų lygių cilindriniu daugiakanaliu ciklonu, galima daryti išvadą, kad norint pasiekti labai aukštą išcentrinio oro valymo įrenginio efektyvumą, reikia tinkamai derinti daugiakanaliame ciklone vykstančius išcentrinės jėgos ir filtracijos procesus.

4. Norint padidinti dviejų lygių daugiakanalio ciklono praktiškumą bei pritaikomumą, reikia įrengti konstrukcinius patobulinimus, kurių pagalba būtų galima reguliuoti oro srautų pasiskirstymą tarp kanalų.

LITERATŪRA

Aleksandro Stulginskio Universitetas. 2008. [interaktyvus] Mechaninė tarša. Prieiga per internetą: <http://www.asu.lt/nm/l-projektas/-Aplinkos_tarsa/titlas.htm>

ApSimon, H.; Gonzalez del Campo, M.; Adams, H. 2000. Modelling long – range transport of primary particulate material over Europe, *Atmos Environ 35*: 343-352.

Baltrėnas, P.; Butkus, D.; Oškinis, V.; Vasarevičius, S.; Zigmontienė, A. 2008. Aplinkos apsauga. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 290 p.

Baterinis multiciklonas BC [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2012 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.axis.lt/lt/grupes-imones/axis-technologies/biokuro-katiliniu-iranga/kat/dumu-ir-pelenu-salinimo-iranga/baterinis-multiciklonas-bc.html>

Bernardo, S.; Mori, M.; Peres, A.P.; Dionı´sio, 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.

BéruBé, K.; Jones, T.; Williamson, B. 1997. Electron microscopy of urban airborne particulate matter, *European Microscopy and Analysis:* 9–11.

Chermisinoff, P. 1993. *Air pollution control and design for industry*. New York: Marcel Dekker. 150 p.

Ciklonai [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2012 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ekofiltras.lt/index.php?module=editable&action=list&e_header_id=1125636>

Claiborn, S. 2006. Agriculture and Air Quality – Airborne Particulate Matter, *Workshop on Agricultural Air Quality*. Pullman: 355–357.

Clifford, S.; Zhang, J.; Sigsgaard, T.; Jantunen, M.; Lioy, P.; Samson, R.; Karol, M. 2007. Current state of the Science: health effects and indoor environmental Quality, *Environmental Health Perspectives 115*: 958–964.

Cortés , C.; Gil, A. 2007. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators, *Energy and Combustion Science*, *Volume 33, Issue 5.* Zaragoza: 409–452.

Curtis, L.; Rea, W.; Smith-Willis, P.; Fenyves, E.; Pan, Y. 2006. Adverse health effects of outdoor air pollutants, *Environment International 32*: 815–830.

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

Dust Collector Cyclone [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2012 m. gruodžio 14 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.iklimnet.com/expert_hvac/dust_collector_cyclone.html>

Elsayed, K.; Lacor, C. 2011. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Appl Math Modell, 35 (4)*: 1952–1968.

Elsayed, K.; Lacor, C. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations, *Chem. Eng. Sci., 65 (22)*: 6048–6058.

Environmental protection agency. 2012. Control of particulate matter emissions: cyclones. Virginia. 31 p.

Fang, G.; Chang, C.; Wu, Y.; Wang, N.; Wang, V. 2000. Comparison of particulate mass, chemical species for urban, suburban and rural areas in central Taiwan, *Chemosphere (41)*. Taichung, 49–59.

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.

Harrison, R.; Yin, J. 2000. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?, *Sci Total Environ 249*: 85–101.

Hong, C.; Kim, B.; Kwon, K.; Park, C. 2012. The effect of cyclone shape and dust collector on gas – solid flow and performance *in World Academy of Science, Engineering and Technology (61).* Cheonan: 252–257.

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.

Kaya, F.; Karagoz, I. 2008. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science* 94(10): 1273–1278.

Kępa, A. 2013. The efficiency improvement of a large-diameter cyclone – The CFD calculations, *Separation and Purification Technology, Volume 118:* 105–111.

LAND 28-98/M-08. 1998. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamosiose dujose nustatymas. Svorio metodas. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos isakymas 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 isakymas Nr. 69.Vilnius.

Lazaridis, M.; Semb, A.; Larssen, S.; Hjellbrekke, A.; Hov, O.; Hanssen J.; Schaug. J. 2002. Measurements of particulate matter within the framework of the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), *Sci Total Environ 285*: 209–235.

Liden, G., Gudmundsson, A. 1997. Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating condi- tions and cyclone design, *J. Aerosol Science 28(5):* 853–859.

Matuliauskaitė, A. 2009. Oro tarša kietosiomis dalelėmis, jos itaka gyvenimo kokybei ir tašos mažinimo patalpose priemonės. „Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 114–117.

Mažieji ciklonai [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2012 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.agvasa.lt/index.php?sub=gaminiai&id=ciklonai&lg=lt>

Mycock, J.; McKenna, J.; Theodore, L. 1995. *Handbook of air pollution control engineering and technology*. New York: CRC Press. 175 p.

Morkunienė, J.; Baltrėnas, P. 2006. Žirmūnų ir Žvėryno rajonų kietųjų dalelių koncentracijos ore nustatymo lyginamieji tyrimai. 9–osios jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 194–199.

Morkunienė, J.; Baltrėnas, P. 2005. Vilniaus miesto Žirmųnų ir Žvėryno rajonų taršos kietosiomis dalelėmis analizė ir įvertinimas. 8–osios jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 97–102.

Muir D. 1992. *Dust and fume control*. Warwickshire: Institution of Chemical Engineering. 132 p.

Oh, Jang-keun; Han, Jung-gyun; Kim, Tak-soo. 2009. A multi cyclone dust collector for a vacuum cleaner. European Patent EP 1 774 890 B1

Pagano, P.; de Zaiacomo, 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 lakiaisiais organiniais junginiais tyrimas ir jos mažinimas naftos terminaluose. Daktaro disertacija. Vilnius, 2008. 104 p.

Petraitis, E.; Vasarevičius, S. 2003. Kietųjų dalelių sklaidos atmosferoje skaitinis modeliavimas taikant „Varsa“, „Phoenics“ ir „Surfer“ programas. *6-osios jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities“*. Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 65–73.

Petraitis, E. 2010. Skaitinis modeliavimas aplinkos apsaugoje. Vilnius: Technika. 164 p.

Petrauskas, L.; Idzelis, R. L. 2005. Klaipėdos miesto taršos kietosiomis dalelėmis analizė. 8– osios jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Aplinkos apsaugos inžinerija. Vilnius: Technika, 121–128.

Pirminio valymo SOBY valomosios [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2012 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.bokstuva.lt/lt/grudu-sandeliavimo-iranga/valomosios/pirminio-valymo-soby-danija>

Pohjola, M.; Kousa, A.; Aarnio, P.; Koskentalo, T.; Kukkonen J. 2000. Meteorological Interpretation of Measured Urban PM2.5 and PM10 Concentrations in the Helsinki Metropolitan Area, *Air Pollution VIII*. Wessex: Institute of Technology, 110–114.

Pohjola, M.; Rantamäki, M.; Kukkonen, J.; Karppinen, A.; Berge, E. 2004. Meteorological evaluation of a severe air pollution episode in Helsinki. Helsinki: Boreal Environ, 75-87.

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

Remeikis, V.; Ulevičius, V. 2004. Oro taršos modeliavimo metodų taikymas Lietuvoje. Fizikos institutas. Vilnius. 94 p.

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

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.

Seinfeld, J.; Pandis S. 1998. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: John Wiley & Sons. 29 p.

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):* 12–23. ISSN 1648-6897.

Svarovsky, L. 2000. Gas cyclones. London. 17 p.

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

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

United States Environmental Protection Agency. 2012. Understanding particle pollution. New York, 1-2.

Vaitiekūnas, P. 2008. Koncentracijos, šilumos ir masės (triukšmo) pernašos procesų modeliavimo programos. Vilnius. VGTU. 30 p.

Vallius, M. 2005. Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air. Kuopio, 15-25.

Van Dingenen, R.; Raes, F.; Putaud, J.; Baltensperger, U.; Charron, A.; Facchini, M.; Decesari, S. 2004. A European aerosol phenomenology 1: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, *Atmos Environ (38)*: 61–77.

Watson, J.; Chow, J. 2000. Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research. Reno. 113 p.

Zhang, J.; Smith, K. 1996. Hydrocarbon emissions and health risks from cookstoves in developing countries, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 6*: 147–161.

Zhang, J.; Smith, K.; Ma, Y.; Ye, S.; Jiang, F.; Qi, W.; Liu, P. 2000. Greenhouse gases and other pollutants from household stoves in China: a database for emission factors, *Atmospheric Environment 34*: 37–49.

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

Балан С.А.; Буров А.А.; Буров А.И. 2000. Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутыми контурами, *Научный и производственно-практический сборник*. Одесса. 56–59.

Буров А.А. 2002. Багатоканальний відцинтровий золопиловловлювач для аспірації теплоєнергетичного обладнання: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Одесса. 19 р.

Балан С.А.; Буров А.И.; Буров А.А.; Серебрянский Д.А. 2002. Аппарат с замкнутыми контурами. Одесса. 6 р.

Серебрянский, Д.А. 2011 Высокоэффективный центробежный фильтр для очистки газов. Киев. 8 р.

Серебрянский, Д.А. 2004. Повышение эффективности газоочистки тепловых энергетических установок. Одесса. 155 р.

Стрелец К.И.; Тананаев А.В. Эффективность инерционных фильтров-сепараторов. Санкт-Петербург. 2002. 21–24.

Ватин, Н.И.; Стрелец, К.И. 2003. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон. Санкт-Петербург. 65 р.

Плашихін, С.В.; Серебрянський, Д.О. 2011. Стендові випробування відцентрового фільтра і циклофільтра при уловлюванні золи твердопаливного котла. Одесса. 89–94.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Mokslinėse konferencijose pristatyti pranešimai

1. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2013. Oro srauto greičių pasiskirstymo dviejų lygių ciklone eksperimentiniai tyrimai. *16–oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ / Mokslinis pranešimas.* Vilnius, 2013 balandžio 11 d.

2. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Dviejų lygi cilindrinio ciklono su skirtingu kanalų skaičiumi eksperimentiniai tyrimai. *17–oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ / Mokslinis pranešimas.* Vilnius, 2014 balandžio 10 d.

3. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Experimental Researches and Comparison of Cylindrical Multiple Levels Six–channel Cyclone. *9th International Conference “Environmental Engineering”/ Mokslinis pramešimas.* Vilnius, 2014 gagužės 23 d.

Kitose konferencijose pristatyti pranešimai

1. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Trijų lygių cilindrinio daugiakanalio ciklono maketo kūrimas. *Vilniaus miesto aplinkos apsaugos forumas „Visuomenės aplinkosauginis sąmoningumas – darnaus vystymosi prielaida“.* Vilnius, 2013 kovo 18 d.

Publikacijos žurnaluose, mokslo leidiniuose

1. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2013. Oro srauto greičių pasiskirstymo dviejų lygių ciklone eksperimentiniai tyrimai. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Aplinkos apsaugos inžinerija 5(4)*: 330 – 306. *ISSN 2029-2341.*

2. Baltrėnas, P; Baliukas, E. 2013. Experimental researches on cylindrical two-level six-channel cyclone. *Journal of Environmental Health Science and Engineering. ISSN: 1735-1979* (Recenzuojamas)

3. Baltrėnas, P; Baliukas, E. 2014. The Experimental Aerodynamic Parameters Research of the Three-level Multichannel Cylindrical Cyclone. *Environmental technology. ISSN 0959-3330* (Recenzuojamas)

4. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Dviejų lygių cilindrinio ciklono su skirtingu kanalų skaičiumi eksperimentiniai tyrimai. *17–oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“*. (Atiduotas spaudai)

5. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Experimental Researches and Comparison of Cylindrical Multiple Levels Six–channel Cyclone. *9th International Conference "Environmental Engineering"*. (Atiduotas spaudai)

6. Baliukas, E.; Baltrėnas, P. 2014. Trijų lygių cilindrinio daugiakanalio ciklono maketo kūrimas. *Vilniaus miesto aplinkos apsaugos forumas „Visuomenės aplinkosauginis sąmoningumas – darnaus vystymosi prielaida“*. (Atiduotas spaudai)