VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

Diana Platova

SPIRALINIO DAUGIAKANALIO CIKLONO TYRIMAI IR PRITAIKYMAS

RESEARCH AND APPLIANCE OF SPIRAL MULTICHANNEL CYCLONE

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

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

Saulius Vasarevičius
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Diana Platova

SPIRALINIO DAUGIAKANALIO CIKLONO TYRIMAI IR PRITAIKYMAS

RESEARCH AND APPLIANCE OF SPIRAL MULTICHANNEL CYCLONE

Baigiamasis magistro darbas

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

Vadovas	prof. habil. dr. Pranas Baltrėnas (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	dr. Albertas Venslovas (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	prof. habil. dr. Petras Vaitiekūnas (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lektorė Regina Žukienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)

Vilnius, 2014

Užduoties lapas

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų,
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.
1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Diana Platova, 20084651

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Aplinkos inžinerija, ASmf-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2014 m. birželio 4 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Spiralinio daugiakanalio ciklono tyrimai ir taikymas" patvirtintas 2012 m. lapkričio 8 d. dekano potvarkiu Nr. 339ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Albertas Venslovas, prof. habil. dr. Vaitiekūnas Petras. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Pranas Baltrėnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

	Diana Platova
(Parašas)	(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Aplinkos apsaugos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Aplinkos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4 (aplinkos apsaugos inžinerija)

Pavadinimas	**Spiralinio daugiakanalio ciklono tyrimai ir taikymas**
Autorius	**Diana Platova**
Vadovas	**prof. habil. dr. Pranas Baltrėnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas spiralinis daugiakanalis ciklonas, skirtas iš oro (dujų) srauto pašalinti itin smulkias kietąsias daleles (x < 20 μm). Vertinama viena opiausių didesnių miestų problemų – padidėjusi tarša kietosiomis dalelėmis, jų poveikis aplinkai, žmogui bei klimato kaitai, lydimai įvairių anomalijų. Darbe nagrinėjamos kietųjų dalelių savybės, koncentracijos nustatymo būdai bei atitinkamų oro valymo įrenginių taikymas emisijoms sumažinti. Pateikiama informacija apie esamų ir plačiai taikomų bei patobulintų naujos kartos ciklonų valymo įrenginių įvairovę, jų veikimo principus bei pritaikymą pramonės ir energetikos objektuose. Atlikti eksperimentiniai daugiakanalio spiralinio ciklono aerodinaminių charakteristikų ir valymo efektyvumo tyrimai. Minėti eksperimentiniai tyrimai atlikti, kintant kanalų skaičiui,oro(dujų) srauto pasiskirstymo santykiui į periferinį ir tranzitinį kanalus bei vidutinio oro (dujų)srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje. Atliktas skaitinis nagrinėjamojo ciklono įrenginio modeliavimas. Modeliavimo metu gauti rezultatai palyginti su eksperimentinių tyrimų metu gautais duomenimis, įvertintas jų atitikimas. Pateikiamos baigiamojo darbo išvados bei rekomendacijos.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, apžvalginė dalis, daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika, daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu eksperimentinių tyrimų rezultatai, aerodinaminių charakteristikų skaitinis modeliavimas, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 110 p. teksto be priedų, 55 iliustracijos, 8 lentelės, 83 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: daugiakanalis ciklonas, spiralinis korpusas, kietosios dalelės, oro (dujų) srautas, aerodinaminės charakteristikos, valymo efektyvumas, kreivalinijiniai pusžiedžiai.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Environmental Protection

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Environmental Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4 (Environmental Engineering)

Title	**Research and Appliance of Spiral Multichannel Cyclone**
Author	**Diana Platova**
Academic supervisor	**Prof Dr Habil Pranas Baltrėnas**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

The Master's thesis deals with the spiral multi-channel cyclone intended for the removal of very fine solid particles from the air (gas) flow (x < 20 μm). One of the most pressing problems in the larger cities is addressed, i. e. the increased emissions of solid particles, their impact on the environment, humans and climate change, accompanied by various anomalies. The paper analyzes the characteristics of solid particles, the methods of assessment of their concentration and the application of certain air cleaning equipment to reduce emissions. The paper provides information about the diversity of the exisiting widely used and the improved new-generation cyclone treatment equipment, the principles of their operation and application in industrial and power facilities. The experimental research of aerodynamic characteristics of the spiral multi-channel cyclone and its cleaning efficiency were conducted. These experiments were carried out at the varying number of channels, varying distribution ratio of the air (gas) flow from the peripheral to transit channels and the varying velocity of the medium air (gas) flow inside the cyclone structure. The numerical simulation of the cyclone under consideration was conducted. The simulation results were compared with the data obtained during the experimental research, their compliance was assessed. The conclusions and recommendations are presented.

The paper consists of 8 sections: introduction, theoretical review, the methodology of experimental research of multi-channel cyclone with spiral casing, the results of experimental research of multi-channel cyclone with spiral casing, the numerical simulation of aerodynamic characteristics, the conclusions and recommendations, the list of references.

Pages – 110 pages excluding appendices, 55 figures, 8 tables, 83 references.

Appendices are attached.

Keywords: multi-channel cyclone, spiral casing, solid particles, air (gas) flow, aerodynamic characteristics, cleaning efficiency, curved semi-rings.

TURINYS

ANOTACIJA.....5
ANNOTATION.....6
LENTELIŲ SĄRAŠAS 9
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS 10
ĮVADAS 13
I. ORO (DUJŲ) SRAUTO VALYMO NUO KIETŲJŲ DALELIŲ (KD) TYRIMAI SPIRALINIAME DAUGIAKANALIAME CIKLONE 16
1.1. Kietosios dalelės (KD). Jų savybės 16
1.2. Kietųjų dalelių (KD) susidarymo būdai ir taršos šaltiniai 19
1.3. Ciklonų konstrukcijų analizė 23
1.4. Ciklonų panaudojimas pramonėje bei energetikos objektuose..... 28
1.5. Naujos konstrukcijos ciklonų analizė 33
1.6. Dinaminių procesų ciklonuose modeliavimas 39
1.7. Skyriaus išvados 44
2. DAUGIAKANALIO SPIRALINIO CIKLONO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI..... 46
2.1. Aerodinaminių procesų ciklone tyrimų metodika 49
2.2. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro valymo efektyvumo nustatymo metodika 54
2.3. Eksperimentiniams tyrimams atlikti naudota įranga 57
2.4. Skyriaus išvados 61
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ..... 62
3.1. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto judėjimo greičio tyrimų rezultatai ir jų analizė 62
3.2. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimų rezultatai ir jų analizė 71
3.3. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro valymo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė..... 76
3.4. Skyriaus išvados 82

4. ORO (DUJŲ) SRAUTO SPIRALINIAME DAUGIAKANALIAME CIKLONE SKAITINIS MODELIAVIMAS 84
4.1. Skaitinio modeliavimo metodas ir lygtys 85
4.2. Vienfazio oro (dujų) srauto šešiakanaliame spiraliniame ciklone skaitinis modeliavimas 86
4.3. Vienfazio srauto skaitinio modeliavimo duomenų analizė 87
4.4. Eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas 94
4.5. Skyriaus išvados 96
BENDROSIOS IŠVADOS 97
REKOMENDACIJOS 99
LITERATŪROS SĄRAŠAS 100
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS 108
KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS 109
PRIEDAI 110

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Kietosios dalelės atmosferoje	**17**
1.2 lentelė. C tipo ciklonų techniniai duomenys	**32**
1.3 lentelė. R 14-25-40 pirminio valymo įrenginių techniniai duomenys	**33**
1.4 lentelė. „Буран“ techninės charakteristikos	**35**
3.1 lentelė. Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas, esant skirtingiems parametrams	**76**
3.2 lentelė. Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas, esant skirtingiems parametrams	**83**
4.1 lentelė. Oro (dujų) srauto judėjimo greičių skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	**95**
4.2 lentelė. Aerodinaminio pasipriešinimo skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas	**95**

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Oro teršalų savybės	**17**
1.2 pav. Maksimali 24 val. kietųjų dalelių (KD_{10}) koncentracija aplinkos ore Vilniuje 2012 m	**22**
1.3 pav. Pagrindinės ciklono konstrukcijos	**24**
1.4 pav. Oro valymo ciklono veikimo schema	**25**
1.5 pav. Įvairūs ciklonų tipai	**26**
1.6 pav. Grupinis ciklonas, sudarytas iš dviejų ciklonų	**27**
1.7 pav. Daugiabaterinis multiciklonas	**27**
1.8 pav. ЦН-15 tipo ciklonas	**29**
1.9 pav. ЦП-2 tipo ciklonas	**29**
1.10 pav. ЛИОТ tipo ciklonas	**30**
1.11 pav. СИОТ tipo ciklonas	**30**
1.12 pav. UAB „Mediresta“ gaminama produkcija	**31**
1.13 pav. UAB „Ekofiltras“ gaminamas „C tipo“ ciklonas	**31**
1.14 pav. UAB „Bokštuva“ gaminamas pirminio valymo įrenginys „Soby“	**33**
1.15 pav. Bendras daugiakanalio ciklono „Буран“ vaizdas	**34**
1.16 pav. „Буран“ vidinė konstrukcija	**35**
1.17 pav. Ultragarso sistemas montuojama į cikloną	**36**
1.18 pav. Naujos konstrukcijos ciklonas panaudojant ultragarso bangas	**37**
1.19 pav. Ciklofiltras	**38**
1.20 pav. Ciklofiltro vidinė konstrukcija	**38**
2.1 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu bendras vaizdas	**46**
2.2 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu vidinė konstrukcija	**47**
2.3 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu eksperimentinis stendas	**48**
2.4 pav. Keturių kanalų ciklono vidinė konstrukcija	**50**
2.5 pav. Šešių kanalų ciklono vidinė konstrukcija	**51**
2.6 pav. Aštuonių kanalų ciklono vidinė konstrukcija	**52**
2.7 pav. Slėgio matavimams skirtas antgalis	**53**
2.8 pav. Universalus matuoklis TESTO-400	**58**
2.9 pav. Aspiratorius M-822	**58**
2.10 pav. Laboratorinės analitinės svarstyklės	**59**
2.11 pav. Filtrai AFA-VP-20 -1	**59**
2.12 pav. AFA-VP-20-1 filtrų laikiklis	**60**
2.13 pav. Kietųjų dalelių padavimo purkštuvas	**61**
3.1 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 25/75	**63**
3.2 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant	**64**

šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 50/50	
3.3 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 75/25	**65**
3.4 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 25/75	**66**
3.5 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 50/50	**67**
3.6 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 75/25	**68**
3.7 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 25/75	**69**
3.8 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 50/50	**70**
3.9 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pužiedžių išdėstymo padėčiai 75/25	**71**
3.10 pav. Keturių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose	**72**
3.11 pav. Šešių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose	**73**
3.12 pav. Aštuonių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose	**75**
3.13 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 μm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 25/75	**78**
3.14 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 μm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 50/50	**79**
3.15 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 μm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 75/25	**80**
4.1 pav. Spiralinio ciklono modelio skaičiavimo tinklelio eskizas	**87**

4.1 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio komponenčių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui	**88**
4.2 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio komponenčių pasiskirstymas vektoriais šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui	**89**
4.3 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, esant 50/50 srauto pasiskirstymo santykiui bei 12 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui	**90**
4.4 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio komponenčių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 75/25, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui	**91**
4.5 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio komponenčių pasiskirstymas vektoriais šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 75/25, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui	**92**
4.6 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui bei 12 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui	**93**

ĮVADAS

Problema

Natūraliai gamtoje vykstantys reiškiniai visuomet turėjo įtakos atmosferos oro kokybei. Tačiau, gamtinės kilmės teršalų poveikis nežymus, palyginus su antropogenine tarša, sąlygojama žmogaus ūkinės veiklos. Ypač žymus poveikis aplinkai siejamas su oficialia pramonės epochos pradžia – XVIII a. 7 dešimtmečiu. Oro tarša – pagrindinis veiksnys, sukeliantis klimato kaitą, ozono sluoksnio plonėjimą, aplinkos rūgštėjimą ir kitas problemas.

Viena opiausių didesnių miestų problemų – padidėjusi tarša kietosiomis KD_{10} dalelėmis. Didėjant žmonių skaičiui, didėja ir susidarančių atliekų bei išmetamų teršalų kiekiai, kuriuos lemia tokios priežastys kaip: spartus pasaulinės ekonomikos augimas, didelio masto transporto srautai, besiplečianti pramonė bei energetika, santykinai menkas švariųjų technologijų diegimas. Šių teršalų sklaida atmosferoje, priklausomai nuo taršos šaltinio, yra skirtinga. Pramonės įmonių išmetami teršalai patenka į aukštesnius atmosferos sluoksnius ir ten išsisklaido didelėse teritorijose, tuo tarpu transporto priemonių išmetamos dujos turi savybę kauptis pažemio sluoksnyje.

Ypač smulkių kietųjų dalelių (skersmuo $x<20$ μm) koncentracijos padidėjimas aplinkos ore sąlygojamas tam tikrų klimato veiksnių, kurie neleidžia autotransporto išmestiems teršalams bei dulkėms nuo nepakankamai nuvalytų gatvių išsisklaidyti. Didelės įtakos turi ir intensyvesnis kūrenimas šildant patalpas atšalus orams, taip pat tokie ūkio darbai, kaip statybos, gatvių remontas bei teršalų pernašos iš kitų urbanizuotų teritorijų. Ypač rimtas aplinkos oro taršos pasekmes jaučia didmiesčių gyventojai, dėl vis dažniau pasitaikančių smogo atvejų, kai ore įsivyrauja teršalų migla.

Smulkiosios kietosios dalelės kelia rimtą pavojų ne tik žmonių sveikatai, bet ir sąlygoja klimato kaitą, lydimą įvairių anomalijų. Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis, kietosios dalelės (KD) yra vienas iš teršalų, sukeliantis daugiausia sveikatos problemų. Dėl pastovaus kontakto su aplinkoje esančiomis kietosiomis dalelėmis, prastėja žmonių sveikata – nuo poveikio kvėpavimo takams ir visai organizmo sistemai iki ankstyvos mirties. Labiausiai pažeidžiamos tokios amžiaus grupės, kaip pagyvenę žmonės ir vaikai, taip pat sergantys astma bei širdies ir kraujagyslių ligomis.

Teršalai turi savybę pasklisti didelėse teritorijose nuo taršos šaltinio, todėl aplinkos oro taršos klausimus reikėtų spręsti ne tik regioniniu bet ir globaliu mastu. Žinant, kad pasaulinė ekonomika glaudžiai susijusi su aplinkos tvarkymo sprendimais – daugelis aplinkos kokybės

problemų yra sunkiai arba visai neišsprendžiamos. Todėl, siekiant išspręsti šias problemas, vis labiau griežtinami aplinkosauginiai reikalavimai pramonės objektams, kuriuose fiksuojamos emisijos į atmosferą. Pagal Pasaulinės sveikatos organizacijos rekomendacijas nustatytos pagrindinių teršalų (taip pat ir kietųjų dalelių) ribinės vertės, kurios turi būti pasiektos per tam tikrą laiką ir vėliau nebegali būti viršijamos. Todėl tampa ypač aktualu atlikti operatyvų bei objektyvų kietųjų dalelių koncentracijos nustatymą ir įvertinimą bei pramoninių oro (dujų) srautų valymą, panaudojant įvairių konstrukcijų oro valymo įrenginius.

Darbo aktualumas

Siekiant kontroliuoti ir mažinti oro taršą kietosiomis dalelėmis, sukurta nemažai naujų technologijų. Užterštiems oro (dujų) srautams valyti nuo teršalų dažniausiai naudojami fiziniai ir cheminiai procesai. Pramonėje ir energetikoje, kai išmetami dideli užteršto oro (dujų) tūriai, kietosioms dalelėms ir kitiems teršalams iš oro (dujų) srauto atskirti dažnai taikomas kelių pakopų valymas. Galimas ir vienos pakopos valymas, tokiu atveju oro valymo įrenginys turi pasižymėti aukštu valymo efektyvumu. Tam tinka įrenginiai su uždarų kontūrų sistema, pavyzdžiui, ciklonai. Jau daugiau kaip šimtmetį naudojami įvairių konstrukcijų ciklonai. Šie oro valymo įrenginiai geba pasiekti gana aukštą išvalymo lygį, ypač esant stambesnių frakcijų kietosioms dalelėms. Dėl šios priežasties, šio magistro darbo temą galima sieti būtent su minėtu patobulintu oro valymo įrenginiu, norint parodyti jo pranašumą kietųjų dalelių (KD) valymo procese kitų oro valymo įrenginių atžvilgiu.

Pirmasis ciklonas buvo suprojektuotas, pagamintas ir užpatentuotas 1886 m. S. M. Morze. Tai vienas iš seniausių įrengimų, naudojamų dalelėms sugaudyti. Daugelį metų ciklonas buvo tobulinamas, keičiama jo konstrukcija. Ciklonai, lengvai gaminami – neturi judamųjų dalių, montuojami – gana kompaktiški ir eksploatuojami – santykinai nedidelis aerodinaminis pasipriešinimas. Taip pat šie oro valymo įrenginiai bene vieninteliai geba valyti oro (dujų) srautą nuo kietųjų dalelių net esant aukštoms temperatūroms (300 – 500 ºC). Ciklonų trūkumai: staigus valymo efektyvumo kritimas esant nehermetiškumui, energijos sąnaudų padidėjimas bei slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams, taip pat nepakankamas oro srauto, užteršto ypač smulkiomis ($x<20$ μm) kietosiomis dalelėmis, valymo lygis.

Norint pasiekti ypač gerą oro (dujų) srauto valymo efektyvumą, kai yra šalinamos itin smulkios ($x<20$ μm) kietosios dalelės, taikomi naujos kartos ciklonai su uždara kontūrų sistema, kurios privalumas – viduje esantys kreivalinijiniai kanalai, leidžiantys papildomai filtruoti oro (dujų) srautą nuo itin smulkių kietųjų dalelių. Šio darbo aktualumas – atsižvelgiant į

aerodinamines charakteristikas padidinti oro (dujų) valymo efektyvumą ir pritaikyti naujos kartos daugiakanalį cikloną su spiraliniu korpusu oro (dujų) srautui valyti nuo itin smulkių iki 20 μm kietųjų dalelių.

Darbo naujumas

Atlikus kompleksinius eksperimentinius ir teorinius spiralinio daugiakanalio ciklono tyrimus bei jame vykstančių aerodinaminių procesų modeliavimą, taip pat įvertinus gautų rezultatų duomenis, siekiama sukurti aukšto valymo efektyvumo spiralinį daugiakanalį cikloną ir pritaikyti jį pramonės ir energetikos objektams $x < 20$ μm kietosioms dalelėms šalinti.

Darbo tikslas

- Atlikti kompleksinius eksperimentinius daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srautų judėjimo greičių ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus bei ištirti spiralinio daugiakanalio ciklono valymo efektyvumą, kai valomų kietųjų dalelių (KD) dispersiškumas $x < 20$ μm, taip pat atlikti skaitinio modeliavimo rezultatų analizę.

Darbo uždaviniai

- Ištirti daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto judėjimo greičio ir aerodinaminio pasipriešinimo pasiskirstymą spiralinio daugiakanalio ciklono konstrukcijos viduje;
- Nustatyti skirtingos prigimties kietųjų dalelių (KD) koncentracijas įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose, apskaičiuoti spiralinio daugiakanalio ciklono įrenginio valymo efektyvumą;
- Atlikti daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminių procesų skaitinį modeliavimą.

Praktinė darbo vertė

Darbo rezultatai gali būti sėkmingai panaudoti, pritaikant daugiakanalį cikloną su spiraliniu korpusu kietųjų dalelių (KD), kurių dispersiškumas $x < 20$ μm, valymui pramonės ir energetikos objektuose. Spiralinio daugiakanalio ciklono aukštas valymo efektyvumas leistų pašalinti žymiai smulkesnes kietąsias daleles, nei įprastai yra šalinamos ciklono įrenginiuose. Ciklono konstrukcijos paprastumas, patikimas darbas valant aukštos temperatūros dujas, sąlyginai pastovus hidraulinis pasipriešinimas, gamybos paprastumas ir aukštas valymo efektyvumas leistų sutaupyti nemažai lėšų objektams eksploatuosiantiems minėtą įrenginį.

I. ORO (DUJŲ) SRAUTO VALYMO NUO KIETŲJŲ DALELIŲ (KD) TYRIMAI SPIRALINIAME DAUGIAKANALIAME CIKLONE

1.1. Kietosios dalelės (KD). Jų savybės

Mokslo ir technikos plėtra, spartus pasaulinės ekonomikos augimas, pramonės ir energetikos vystymasis neigiamai įtakoja aplinkos būklę: didėja susidarančių atliekų kiekiai, plečiasi naujai įsisavinamos žemės plotai, sunaudojama vis daugiau energijos išteklių, sparčiai didėja aplinkos tarša, tiesiogiai įtakojanti žmonių sveikatą. Atmosfera teršiama įvairaus pavidalo teršalais, tame tarpe ir kietosiomis dalelėmis (KD). Mažos kietosios ar skystosios dalelės – tai mechaniniai teršalai, kuriais dažnai užteršiama ne tik atmosfera, bet ir litosfera bei hidrosfera. Mechaniniams teršalams taip pat priskiriamos dulkės ir aerozoliai, kurie esant didelėms koncentracijoms tampa ypač pavojingais teršalais. Mažo dispersiškumo dulkės paprastai yra vadinamos kietosiomis dalelėmis (KD) (Misevičius, Baltrėnas 2011; Striška 2001).

Kietąsias daleles (KD – dažnai tekstuose jos vadinamos PM (angl. *particulate matter*)) galima būtų apibrėžti taip: tai ore esančių dalelių ir skysčio lašelių (aerozolių) mišinys, kurio sudėtyje gali būti įvairūs komponentai – rūgštys, sulfatai, nitratai, organiniai junginiai, metalai, dirvožemio dalelės, dulkės, suodžiai ir kt. Smulkios kietosios dalelės pagal dydį skirstomos į grupes ir matuojamos $\mu g/m^3$. KD_{10} – dalelės ore mažesnės nei 10 μm (mikrometrų). Jos kelia didžiulį susirūpinimą ir pavojų, gali prasiskverbti giliai į plaučius ir sukelti didelę grėsmę žmogaus sveikatai. $KD_{2,5}$ – dalelės mažesnės nei 2,5 μm. Laikomos ypač pavojingomis, nes gali prasiskverbti giliau į kvėpavimo takus ir patekti į kraujotakos sistemą (Ekologija 2014; The Inside Story 2009).

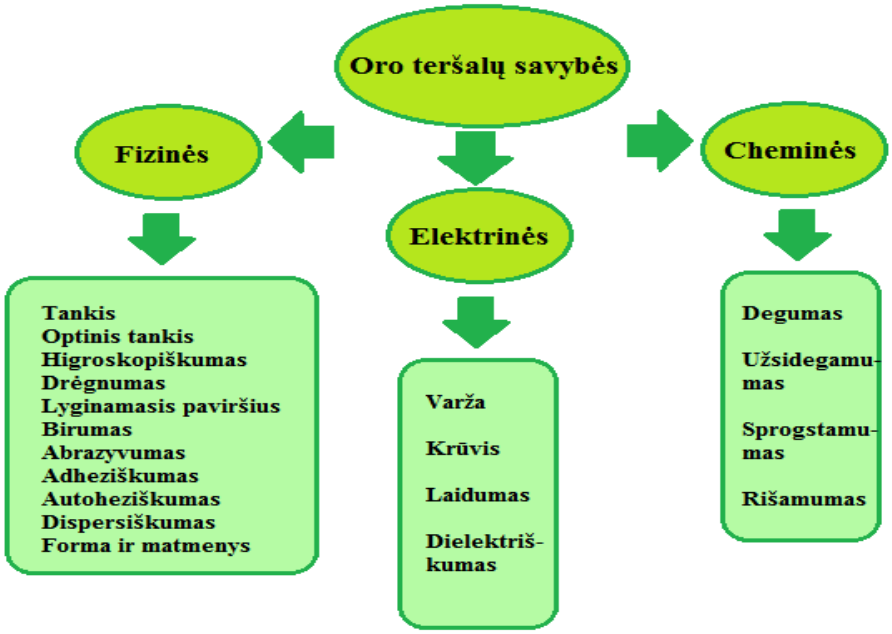
Smulkiosios kietosios dalelės kelia rimtą pavojų ne tik žmonių sveikatai, bet ir sąlygoja klimato kaitą lydimą įvairių anomalijų. Oro tarša kietosiomis dalelėmis – viena pavojingiausiu žmogaus sveikatai, kadangi kietosios dalelės dėl savo smulkumo patenka tiesiai į kvėpavimo takus. Dalelės, išmetamos į atmosferą, skiriasi savo dydžiu bei chemine sudėtimi. Dėl šios priežasties jų įtaka aplinkos būklei ir žmonių sveikatai susijusi su tam tikrais parametrais. Dažniausiai kietųjų dalelių, esančių atmosferoje, skersmuo yra ne didesnis kaip 100 μm. Kietosios dalelės, kurių skersmuo yra didesnis kaip 100 μm, dėl sunkio jėgos nusėda ant žemės, pastatų ir kitų objektų paviršiaus. Smulkiadispersinėmis kietosiomis dalelėmis dažniausiai aplinką teršia katilinės, naudojančios iškastinį kurą bei medieną (išmeta pelenus ir suodžius), pramoniniai objektai (metalo, audinių dulkės), dirvos erozija, fotocheminiai procesai bei

transportas, kuris ne tik išmeta kietasias daleles, bet dar ir pakelia nuo kelio dangos. Kietosios dalelės, kurių skersmuo mažesnis nei 1 µm, susidaro degimo proceso metu, industrinių ir dirvos dalelių skersmuo yra didesnis nei 1 µm. 1.1 lentelėje pateikiami kietųjų dalelių, egzistuojančių atmosferoje, apibūdinimai ir jų pavyzdžiai (Matuliauskaitė 2009; Baltrėnas, Zagorskis 2010).

1.1 lentelė. Kietosios dalelės atmosferoje (Particles in the atmosphere 2012)

KD apibūdinimas	Pavyzdžiai
0,01 – 5 µm - labai mažos	Dažų pigmentai, tabako dūmai, dulkės, jūros druskų dalelės
5 – 100 µm – didesnės	Cemento dulkės, vėjo nešiojamos dirvožemio dalelės, liejyklų dulkės, anglies dulkės
5 – 10 µm – skysto būvio	Rūkas, smogas, lietaus lašai
0,001 – 0,01 µm – biologinės kilmės	Virusai, bakterijos, žiedadulkės, sporos
0,001 – 100 µm – susiformavusios cheminių reakcijų metu	Sieros dioksidas atmosferoje virsta sieros rūgštimi, kuriai reaguojant su atmosferos vandeniu susiformuoja maži lašeliai

Atsižvelgiant į kietųjų dalelių fizines savybes bei cheminę sudėtį, jos gali būti skirstomos į neorganines, organines ir mišrias. Neorganinės dulkės – mineralų (kvarco, asbesto, cemento ir kt.) ir metalų (cinko, aliuminio, geležies, vario, švino, mangano ir kt.) dulkės. Organinėms priskiriamos medvilnės, linų, medžio, miltų, tabako dulkės ir pan.. Mišriomis dulkėmis vadinamos suvirinimo elektra metu susidarantis aerozolis, žolės miltų ir smėlio (SiO_2) dulkės, taip pat turinčios kvarco ir metalų. Kietųjų dalelių savybės pateiktos 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Oro teršalų savybės (Baltrėnas ir kt. 2008)

Kenksmingiausios sveikatai dalelės, kurių skersmuo x < 1 µm. Jos sunkiai išvalomos iš pramoninių procesų metu susidarančių išlakų. Lyjant didelė jų dalis iš atmosferos patenka ant žemės paviršiaus. Kietosios smulkiosios dalelės, kurių skersmuo yra tarp 0,1 ir 1,0 µm, turi įtaką debesų formavimuisi. Dėl intensyvių išmetimų gali tam tikrose vietose padidinti debesuotumą ir kritulių kiekį. Saulės spindulių veikiamos didelės dulkių koncentracijos aplinkos ore esant veikiamos drėgmės gali įtakoti net klimatines sąlygas (Pagrindiniai atmosferos teršalai 2012).

Didelės įtakos kietųjų dalelių koncentracijai ore turi meteorologinės sąlygos. Keli svarbiausi veiksniai yra:

- Atmosferos stabilumas. Esant stabiliai atmosferai sunkiau vykstantis vertikalus maišymasis sudaro nepalankias sąlygas teršalų, o kartu ir kietųjų dalelių, sklaidai;
- Vėjo greitis, kryptis bei turbulencija. Teršalų sklaidos sąlygos pagerėja esant stipriam vėjui ir intensyviai turbulencijai. Vėjas ir turbulencija – tai procesai, kurių metu oro masės dėl temperatūrų skirtumo maišosi žemutiniame atmosferos sluoksnyje (troposferoje).

Nemažą įtaką teršalų sklaidai turi ir emisijos šaltinio tipas. Stacionarūs taršos šaltiniai teršalus išmeta į aukštesnius atmosferos sluoksnius, kur palankesnės sąlygos jiems sklaidytis. Tuo tarpu mobilių taršos šaltinių teršalai išmetami į pažeminį atmosferos sluoksnį, kur jų sklaida žymiai mažesnė (Denafas 2001; Bazienė ir kt. 2012).

Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis, dėl prastos aplinkos būklės sukeltų ligų Europos regione miršta nuo 15 iki 20 % visų mirštančiųjų. ES šalyse (Belgijoje, Italijoje, Nyderlanduose, Prancūzijoje, Vokietijoje) atlikti tyrimai rodo, kad nuo 6 % iki 12 % prastos gyvenamosios aplinkos sukeliamų ligų lemia 9 aplinkos veiksniai. Vienas jų yra tarša smulkiosiomis kietosiomis dalelėmis. Žalingo smulkių kietųjų dalelių poveikio mastai gali būti įvairūs. Ši įvairovė apima tiek trumpalaikius nežymius poveikius, tiek ligas, net ir mirtinus atvejus. Padarytos žalos požymiai dažniausiai išryškėja negreit. Neretai padaryta žala tampa akivaizdi praėjus ilgesniam laikotarpiui, kuomet veikimo vietoje susikaupia didesnė teršalų koncentracija. Dalelių prasiskverbimo geba į kvėpavimo sistemą, o tuo pačiu ir į žmogaus organizmą, priklauso nuo dalelių dydžio. Didesnės nei 5 µm dalelės dažniausiai sulaikomos gerklėje arba nosyje. Nuo 0,5 iki 5 µm skersmens dalelės nusėda bronchuose, o nedidelė dalis pasiekia plaučių alveoles. Smulkesnės už 0,5 m dalelės pasiekia plaučių alveoles ir gali jose nusėsti, tam tikra dalis per alveoles patenka ir į kraują (Technologijos.lt 2012; Pagrindiniai atmosferos teršalai 2012; Defanas 2001).

Kietųjų dalelių poveikis sveikatai įvairus – nuo poveikio kvėpavimo takams ir visai sistemai iki ankstyvos mirties. Oro teršalų kenksmingumas žmogaus sveikatai priklauso nuo

tokių parametrų kaip teršalų rūšis, teršalų kiekis, žmogaus kontakto su teršalais trukmė, organizmo jautrumas. Labiausiai pažeidžiamos tokios amžiaus grupės, kaip pagyvenę žmonės ir vaikai, taip pat sergantys astma bei širdies ir kraujagyslių ligomis (Matuliauskaitė 2009; Baltrėnas *et al.* 2008; Lekšaitis, Zagorskis 2011). Dėl pastovaus kietųjų dalelių poveikio žmogaus organizmui daroma žala yra:

- Kvėpavimo takų sudirgimas, kosėjimas ar sunkus kvėpavimas;
- Pasunkėjusi plaučių veikla;
- Astmos paūmėjimas;
- Chroniško bronchito išsivystymas;
- Nereguliarus širdies plakimas;
- Širdies priepuoliai;
- Žmonių, sergančių širdies ar plaučių ligomis, pirmalaikė mirtis.

Taip pat kietosios dalelės turi savybę absorbuoti toksines medžiagas bei mikroorganizmus ir pernešti juos į gilesnius kvėpavimo takus, kas sukelia alergines organizmo reakcijas. Reikėtų paminėti ir tai, kad kietosios dalelės taip pat neigiamai veikia augalų vystymąsi ir augimą, jos sukelia įvairių medžiagų pažeidimus, pavyzdžiui metalų korozija, namų ir audinių užteršimą ir kt. (Bendrasis programavimo...2012; Vasarevičius 2011).

Visiškai išvengti oro taršos kietosiomis dalelėmis neįmanoma, tačiau, siekiant sumažinti neigiamą poveikį žmogaus sveikatai, būtina imtis priemonių šiai taršai mažinti. Siekiant išspręsti šią problemą vis labiau griežtinami aplinkosauginiai reikalavimai pramonės objektams, kuriuose fiksuojamos emisijos į atmosferą, pagal Pasaulinės sveikatos organizacijos rekomendacijas nustatytos pagrindinių teršalų (taip pat ir kietųjų dalelių) ribinės vertės, kurios turi būti pasiektos per tam tikrą laiką ir vėliau nebegali būti viršijamos. Todėl tampa ypač aktualu atlikti pramoninių oro (dujų) srautų valymą nuo kietųjų dalelių, panaudojant įvairių konstrukcijų oro valymo įrenginius (Misevičius, Baltrėnas 2011; Стрелец, Тананаев 2004; Буров *et al*. 2012).

1.2. Kietųjų dalelių (KD) susidarymo būdai ir taršos šaltiniai

Įprasta išskirti dvi svarbiausias antropogeninių taršos šaltinių rūšis – stacionarius ir mobilius. Stacionariųjų šaltinių tarpe didžiausią dalį teršalų išmeta pramonės ir energetikos objektai, mobiliųjų – transportas, traukiniai ir kt. Teršalai gali būti išmetami organizuotai ir neorganizuotai. KD_{10} ir $KD_{2.5}$ į atmosferą patenka iš dviejų pagrindinių šaltinių. Pirmasis – tiesioginis kietųjų dalelių išmetimas į orą iš daugybės šaltinių, tokių kaip transportas, energijos

gavyba, pramonė, taip pat dirvos erozija, vėjo pustomos dulkės ir mechaninis smulkinimas pav.: kasyba, statybos. Iš šių šaltinių išmetamos kietosios dalelės vadinamos „pirminėmis“. Antrasis šaltinis – tai kietųjų dalelių formavimasis atmosferoje tarpusavyje reaguojant su kitais teršalais, pvz., sieros dioksidu, azoto oksidais ir amoniaku, kurie suformuoja kietus sulfatus ir nitratus, o šiems oksiduojantis susidaro organiniai aerozoliai (Aplinkos oro...2006).

Didžiausią, beveik 90 % teršalų dalis, nevienodai veikianti aplinką, susidaro degimo procesų metu: šiluminėse elektrinėse, pramoninėse ir namų ūkio katilinėse, netvarkinguose varikliuose ir pakurose Nuo deginimo metodo labai priklauso pelenų dalis, kuri bus išnešama kartu su dūmais. Pavyzdžiui, katiluose su judančiu ardynu mažiau lakiųjų pelenų (20–40 % bendro pelenų kiekio), fakelinio degimo katiluose žymiai daugiau (80–90 %) (Denafas 2001).

Ypač smulkių kietųjų dalelių (skersmuo x<20 μm) koncentracijos padidėjimas aplinkos ore sąlygojamas tam tikrų klimato veiksnių, kurie neleidžia pramonės objektų ir autotransporto išmestiems teršalams bei dulkėms nuo nepakankamai nuvalytų gatvių išsisklaidyti. Didelės įtakos turi ir intensyvesnis kūrenimas šildant patalpas atšalus orams, taip pat tokie ūkio darbai kaip statybos, gatvių remontas bei teršalų pernašos iš kitų urbanizuotų teritorijų (Gerybaitė, Zagorskis 2013)

Pagal Aplinkos apsaugos agentūros 2013 metų duomenis didžiausi aplinkos oro teršėjai kietosiomis dalelėmis Lietuvoje yra:

1. „Orlen Lietuva“, buvusi „Mažeikių nafta“;
2. „Achema“;
3. AB „Lietuvos elektrinė“;
4. „Akmenės cementas“;
5. „Energijos sistemų servisas“ (Kauno elektrinė).

Kietųjų dalelių koncentracijos padidėjimas dažnai pastebimas dėl šalčių žiemos mėnesiais ir suintensyvėjusios šiluminės energijos gamybos, kuri sąlygoja išmetamų į aplinkos orą teršalų kiekį tiek iš energetikos įmonių, tiek iš individualių namų šildymo įrenginių. Be to, įtakos turi ir Ignalinos atominės elektrinės uždarymas, kai didesnis krūvis gaminant elektrą teko labiau taršioms miestų šiluminėms elektrinėms, o dėl aukštų gamtinių dujų ir elektros kainų dalis gyventojų savo būstų šildymui vietoj jų rinkosi kitokius, taip pat taršesnius būdus (Aplinkos apsaugos...2013; Baltrėnas et al. 2011).

Daugėjant automobilių, atitinkamai labiau teršiama ir atmosfera. Automobilių išmetamų kenksmingų medžiagų praktiškai neįmanoma sugaudyti, todėl visos jos patenka į atmosferą.

Degant kurui, į aplinką išsiskiria anglies monoksidas (80 %), angliavandeniliai (15 %), azoto oksidas (5 %), kietosios dalelės, nedideli kiekiai švino ir kt. nuodingų medžiagų. Deginant skystą kurą, susidaro iš kure esančių nedegių priemaišų, nesudegusios kuro anglies, suodžių, liepsnoje pasigaminusių kietų sieros junginių, degimo oro dulkių. Mazuto degimo dujose apie pusė pagal svorį dalelių gali būti mažesnių už 1 μm. Deginant gamtines dujas, kietųjų dalelių praktiškai nesusidaro. Jų atsiradimo priežastimi gali būti suodžiai ir degimo oro dulkės.

Autotransporto išmetami teršalai dėl nepalankių meteorologinių sąlygų kaupiasi jų išmetimo vietose, kai vyrauja sausi, nevėjuoti orai, prie intensyvaus eismo gatvių fiksuojama didelė kietųjų dalelių koncentracija, ji gerokai sumažėja sustiprėjus vėjui ar palijus. Žiemą, šalčių metu, išmetimas į orą padidėja dėl didesnio autotransporto degalų sunaudojimo bei prasidėjusio šildymo sezono (Morkūnienė 2006; Petrauskas 2005; Baltrėnas ir kt. 2011). 1.2 paveiksle pateikta maksimali 24 val. kietųjų dalelių (KD_{10}) koncentracija aplinkos ore, Vilniuje 2012 m.

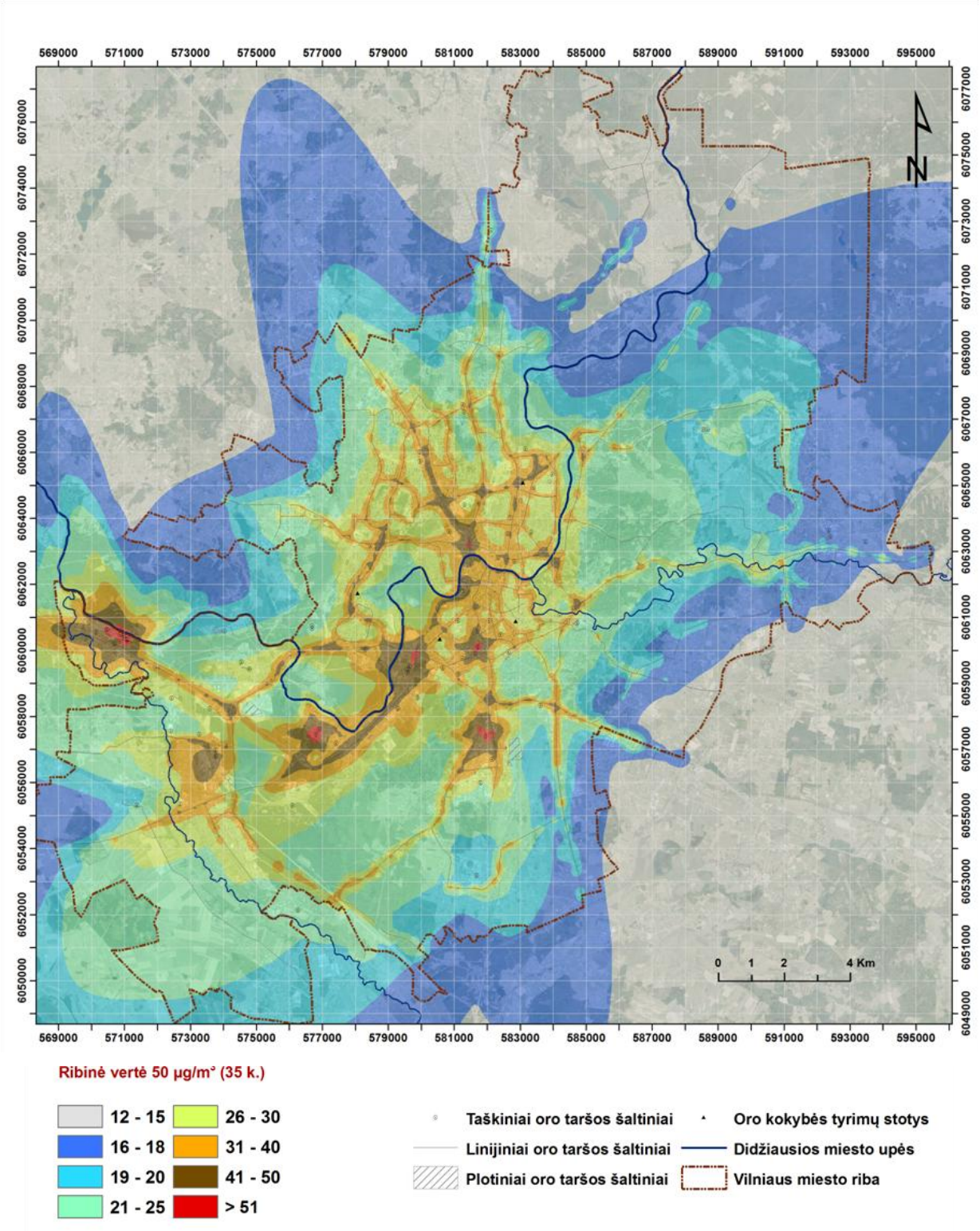
2012 metais kietųjų dalelių koncentracijos buvo matuojamos visose oro kokybės tyrimų stotyse (OKTS). Stebėjimo duomenys rodo, kad oro užterštumas kietosiomis dalelėmis, keliose Vilniaus miesto vietose viršijo ribinę vertę (50 $\mu g/m^3$). Ribinės vertės viršijimas nustatytas didžiųjų gatvių, stipriai apkrautų transporto srautais, vietovėse.

Nagrinėjant taršos į aplinką iš stacionarių taršos šaltinių išmetamų medžiagų struktūrą, išskiriamos tokios kietųjų dalelių rūšys (Aplinkos apsaugos ...2012; Leipus, Butkus 2010):

- Kietosios dalelės A – tai kietosios dalelės, išsiskiriančios šiluminės ir elektros energijos gamybos metu (tai įvairios paskirties katilinių išmetami teršalai);
- Kietosios dalelės B – tai kietosios dalelės, išsiskiriančios gamybos procesuose, deginant organinį kurą (degimo krosnys, stiklo lydymo krosnys ir pan.);
- Kietosios dalelės C – tai kietosios dalelės, išsiskiriančios cheminių reakcijų metu.

Patekę į aplinką teršalai patiria įvairius poveikius, tokius kaip praskiedimas oru (sklaida), cheminiai virsmai, pašalinimas iš atmosferos (išplaunant kartu su krituliais ir t.t.). Visi šie poveikiai savo ruožtu priklauso nuo atmosferoje vykstančių procesų.

Siekiant kontroliuoti ir mažinti į atmosferą patenkančių teršalų kiekius, Lietuva vadovaujasi ES oro apsaugos politiką reglamentuojančiais teisės aktais. Šie teisės aktai yra susiję su reikalavimais, keliamais transporto, energetikos, sveikatos apsaugos ir kituose ūkio sektoriuose.



1.2 pav. Maksimali 24 val. kietųjų dalelių (KD_{10}) koncentracija aplinkos ore Vilniuje 2012 m. (Aplinkos apsaugos... 2013)

Valstybių narių oro kokybės valdymo strategiją išsamiai apibūdina Bendroji aplinkos oro kokybės direktyva, o reikalavimai, keliami konkretiems teršalams, reglamentuojami atitinkamų antrinių direktyvų (Baltrėnas ir kt. 2003)

1.3. Ciklonų konstrukcijų analizė

Atmosferos taršos mažinimo priemonių paskirtis – visiškai ar bent dalinai išvengti teršalų poveikio pasekmių. Antropogeninės kilmės atmosferos tarša mažinama:

- Prevenciniais metodais – daug teršalų išskiriančius procesus keičiant mažiau taršiais procesais; tobulinant teršalus išskiriantį technologinį procesą;
- Valant išmetamąsias dujas („end-of-pipe“ metodas).

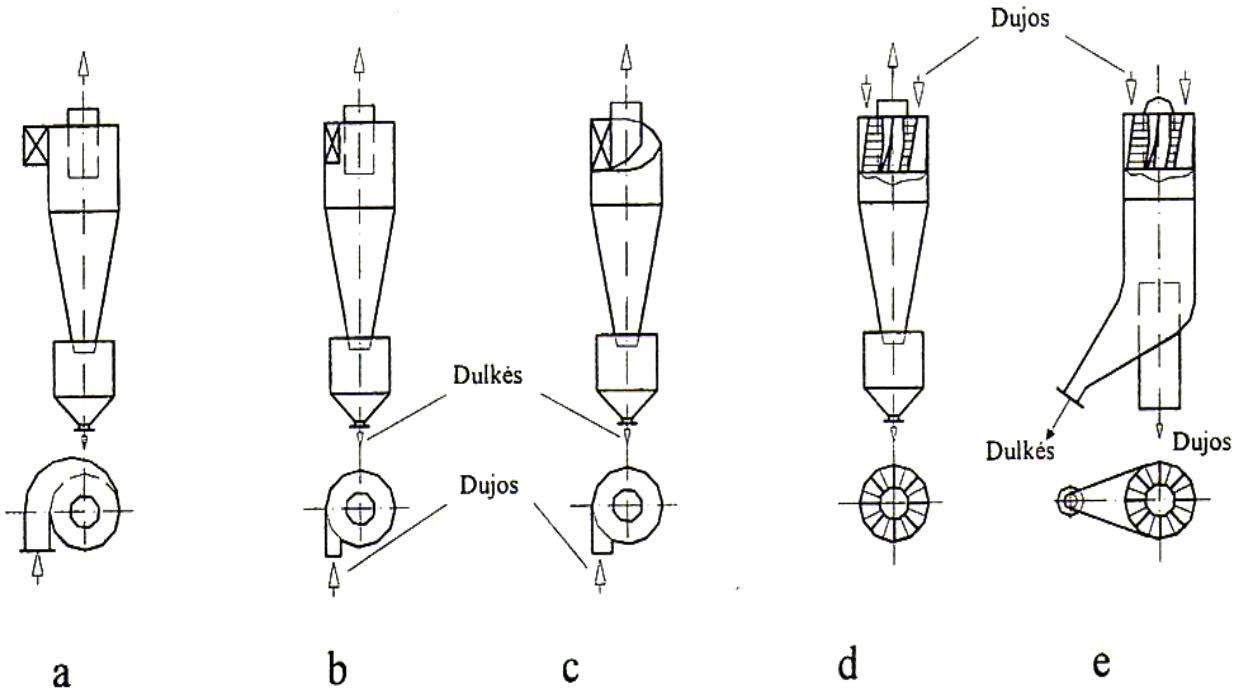
Taršos mažinimo būdai parenkami priklausomai nuo būtino švarumo laipsnio ir nuo pasirenkamų priemonių praktiškumo bei ekonomiškumo. Mechaniniams teršalams iš oro (dujų) srauto šalinti yra sukurta įvairių įrenginių, todėl priklausomai nuo teršalų koncentracijos ir kitų savybių galima pasirinkti tinkamiausius valymo įrenginius. Kietųjų dalelių šalinimas iš dujinių išlakų gali būti vykdomas įvairiais sumetimais. Jei anksčiau tai buvo daroma įrenginių apsaugos ir medžiagų taupymo tikslais, tai paskutiniaisiais dešimtmečiais prioritetas teikiamas darbo ir aplinkos apsaugai (Denafas 2001; Daukšas 2004).

Oro valymo įrenginiai pagal išvalymo laipsnį skirstomi į pirminio ir švariojo valymo įrenginius, pagal valymo metodą – į sausuosius ir šlapiuosius. Sausieji pirminio valymo įrenginiai pagal dulkių surinkimo metodą skirstomi į gravitacinius (dulkių nusodinimo kameras) ir inercinius. Inerciniai skirstomi į ciklonus, žaliuzinius, inercinius ir sūkurinius dalelių sulaikymo įrenginius bei išcentrines orapūtes – dulkėgaudžius. Sausieji švariojo valymo įrenginiai skirstomi į elektrinius (išlydžio, elektrostatinius) ir mechaninius (pluoštinius, akytuosius, grūdėtuosius) filtrus (Baltrėnas ir kt. 2008; Jakštonienė ir kt. 2011).

Užterštiems oro (dujų) srautams valyti nuo teršalų dažniausiai naudojami fiziniai ir cheminiai procesai. Pramonėje ir energetikoje, kai išmetami dideli užteršto oro (dujų) tūriai, kietosioms dalelėms ir kitiems teršalams iš oro (dujų) srauto atskirti dažnai taikomas kelių pakopų valymas. Galimas ir vienos pakopos valymas, tačiau tuomet valymo įrenginys turi būti aukšto valymo efektyvumo. Tam tinka įrenginiai su uždarų kontūrų sistema, pavyzdžiui ciklonai. Jau daugiau kaip šimtmetį naudojami įvairių konstrukcijų ciklonai. Šie oro valymo įrenginiai

geba pasiekti gana aukštą išvalymo lygį, ypač esant stambesnių frakcijų kietosioms dalelėms (Vaiškūnaitė 2011; Ogawa 1997; Gujun *et al.* 2008; Балан *et al.* 2000; Zhao et al. 2006).

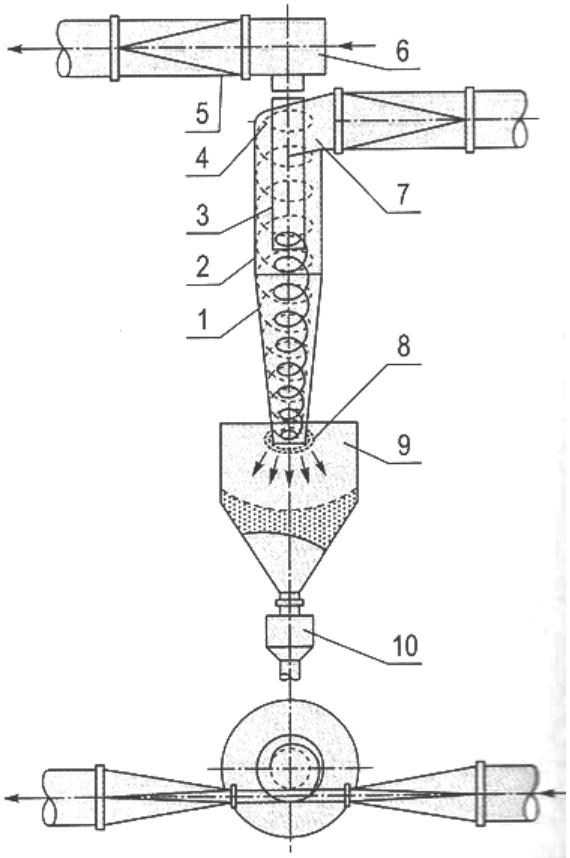
Ciklonų veikimo principas pagrįstas išcentrinių jėgų veikimu, kurios veikia daleles įsuktame oro sraute, įrenginio konstrukcijos viduje. Šių įrenginių konstrukcijose oro (dujų) srauto judėjimas vyksta tangentine arba ašine kryptimi. Ciklonai – labiausiai pramonėje paplitę įrenginiai. Ciklono valymo įrenginį sudaro: korpusas, įtekėjimo bei išmetimo ortakiai, todėl jie lengvai gaminami - neturi judamųjų dalių, montuojami – gana kompaktiški ir eksploatuojami – sąlyginai nedidelis aerodinaminis pasipriešinimas. Taip pat šie oro valymo įrenginiai bene vieninteliai geba valyti oro (dujų) srautą nuo kietųjų dalelių net prie aukštų temperatūrų (300 – 500 ºC). Ciklonų trūkumai: staigus valymo efektyvumo kritimas esant nehermetiškumui, energijos sąnaudų padidėjimas bei slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams, o tai pat nepakankamas oro srauto, užteršto ypač smulkiomis (x<10 μm) kietosiomis dalelėmis, valymo lygis. Ciklonai priklauso pirminio oro valymo įrenginių grupei, pagal valymo metodą yra sausojo valymo, pagal dulkių surinkimo metodą – inerciniai oro valymo įrenginiai (Jakštonienė, Vaitiekūnas 2009; Braz 2004; Zhoue *et al.* 1990; Baltrėnas et al. 2012).



1.3 pav. Pagrindinės ciklono konstrukcijos: a – spiralinis; b – tangencialinis, c – sraigtinis, d – ašinis-priešpriešinis, e – ašinis-tiesiasrautis (Striška 2001)

Dėl paprastumo, pigumo ir patogios eksploatacijos ciklonai labai plačiai naudojami medžio apdirbimo, baldų gamybos, tekstilės, metalo apdirbimo, maisto, plastiko apdirbimo pramonėje ir kt. Šiuos inercinius oro valymo įrenginius galima eksploatuoti lauke ir uždarose patalpose (stacionariuose pastatuose arba kilnojamuose konteineriuose) (Baltrėnas ir kt. 2000; Bernardo et al. 2006; Буров 2010; Ekofiltras 2012). Dažniausiai naudojamų ciklonų konstrukcijos pateiktos 1.3 paveiksle.

Ciklono darbo principas: oro srautas kreipiamas į cikloną vamzdžiu 7, atsimušęs į kreipiamąjį dangtį 4 oro srautas įsukamas ir spiralės pavidalu leidžiasi žemyn cilindru 2. Srautui slenkant žemyn į kūgį 1, dalis jo patenka į išmetamąjį vamzdį 3, kita į bunkerį 9 kartu su išcentrinės jėgos nublokštomis dulkėmis. Bunkeryje susikaupusios dulkės pašalinamos per vožtuvą 10. Principinė oro valymo ciklono veikimo schema pateikta 1.4 paveiksle (Baltrėnas ir kt. 2008; Striška 2001).

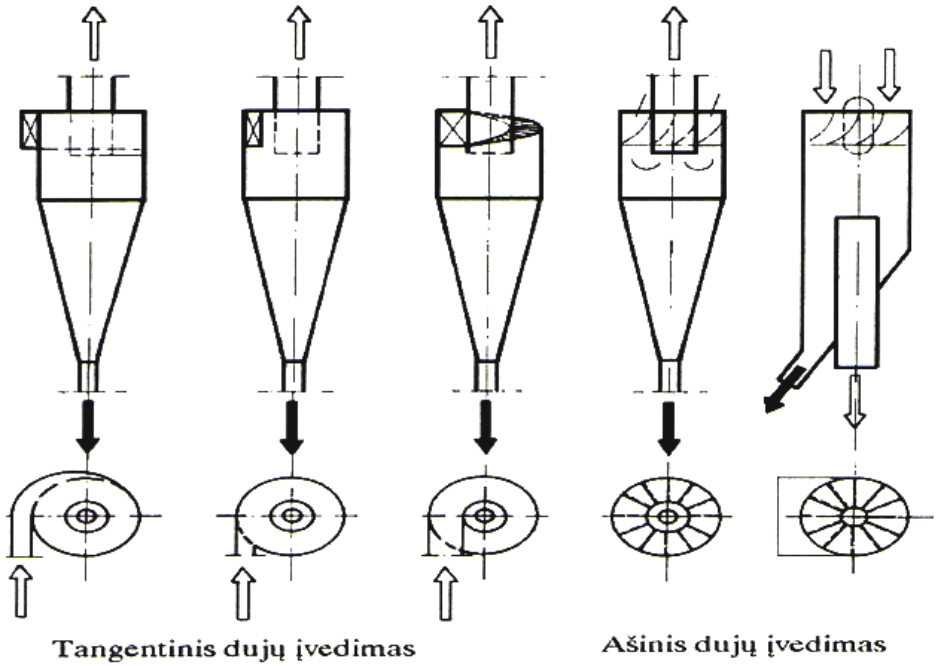


1.4 pav. Oro valymo ciklono veikimo schema: 1 – kūgis; 2 – cilindras; 3 – išmetamasis vamzdis; 4 – spiralės formos dangtelis; 5 – išvalyto oro ortakis; 6 – vidinė spiralė; 7 – oro įpūtimo vamzdis; 8 – anga dulkėms išmesti; 9 –bunkeris, 10 – dulkių vožtuvas

Ciklonų valymo efektyvumas priklauso nuo valomų dulkių dalelių dydžio. Kai dalelių skersmuo d > 10 µm, ciklono valymo efektyvumas siekia 80 % – 95 %. Jei dalelės mažesnės d < 10 mm, tai valymo efektyvumas krenta iki 70 % – 80%. Dėl šios priežastie ciklonus rekomenduojama naudoti tik priminiam valymui, kur valomo oro užterštumas yra didelis ir vidutiniškas, o švariam valymui – rankovinius ar elektrostatinius filtrus. Norint pasiekti geresnį valomo oro srauto išvalymo lygį pirmoje valymo pakopoje, tikslinga didinti ciklono išvalymo efektyvumą, kai dalelių skersmuo d < 10 µm. (Aplinkos kontrolei...2012).

Dulkių šalinimo iš oro (dujų) srauto procesas turėtų vykti palaikant didelį oro (dujų) srauto judėjimo greitį ir turėtų būti taikomi maži ciklonų skersmenys, tačiau smarkiai padidinus oro greitį, galimi dulkių išnešimo atvejai. Dėl to didinant valymo efektyvumą reikėtų mažinti ciklono skersmenį, o ne didinti oro (dujų) judėjimo greitį ciklone. Nustatyta, kad optimalus ciklono aukščio ir skersmens santykis H:D = 2–3 (Daukšas 2004; John, W. 2012).

Pagal valomų dujų įvedimo kryptį ciklonai skirstomi į tangentinius ir ašinius (1.5 pav.). Patekusios į ašinį cikloną dujos prie įėjimo pritvirtintų sparnelių dėka keičia savo judėjimo kryptį. Ašinių ciklonų efektyvumas yra mažesnis, nei tangentinių, bet jie ypač tinka valant didelius dujų debitus (Denafas 2001).



1.5 pav. Įvairūs ciklonų tipai (Denafas 2001)

Pavieniai ciklonai turi kairįjį ar dešinįjį dujų srauto sukimo prietaisą. Dešiniuoju vadinamas dujų srauto sukimas pagal laikrodžio rodyklę (žiūrint iš išmetimo vamzdžio pusės),

kairiuoju – srauto sukimas prieš laikrodžio rodyklę. Sukimo kryptis parenkama atsižvelgiant į ciklono padėtį schemoje, taip pat į ciklonų išdėstymą grupėje (Baltrėnas ir kt. 2000).

1.6 pav. Grupinis ciklonas, sudarytas iš dviejų ciklonų (All biz 2012)

1.7 pav. Daugiabaterinis multiciklonas (Tonetti Filtri 2012)

Paprastai ciklonai dirba po viena, kai jų skersmuo yra nuo 475 iki 2500 mm. Priklausomai nuo valomo dujų srauto kiekio, ciklonai montuojami atsižvelgiant į jų našumą. Jei vieno ciklono našumas yra per mažas įrengiami grupiniai (gali būti dviejų, keturių, šešių, aštuonių ciklonų ir t.t.) ciklonai. Daugiablokiai ciklonai turi nuo 6 iki kelių šimtų blokų. Jie paprastai talpinami uždarame bunkeryje. 1.6 paveiksle pavaizduotas grupinis ciklonas.

Nedidelio skersmens ciklonų, paprastai ašinių, baterija, kitaip vadinama multiciklonu, gali sulaikyti iki 1 μm dydžio daleles. 1.7 paveiksle pateiktas multiciklono vaizdas.

Valant dujas multiciklone sunaudojama daug energijos, slėgio kritimas didelis. Tuo pačiu dujų debitas per atskirą cikloną esti mažesnis, nes didelis valomųjų dujų kiekis paskirstomas į daug tokių ciklonų.

1.4. Ciklonų panaudojimas pramonėje bei energetikos objektuose

Ciklonai įgavo platų panaudojimą šalinant kietąsias daleles procesuose, vykstančiose pramonėje bei energetikos objektuose, esant tiek žemoms tiek ir sąlyginai aukštoms (300–500°C) oro (dujų) srauto temperatūroms. Siekiant pagerinti valomo oro (dujų) srauto išvalymo laipsnį, nuolatos tobulinamos esamų ir kuriamų ciklonų konstrukcijos, atliekami eksperimentiniai tyrimai. Sūkurinių srautų judėjimas ciklone turi nemažai įtakos kietųjų dalelių atskyrimui iš oro (dujų) srauto. Dujų bei kietųjų dalelių srauto judėjimas ciklone seniai yra daugybės eksperimentinių, teorinių bei skaitinių tyrimų objektas (Gujun et al. 2008; Jakštonienė, Vaitiekūnas 2011).

Šiuo metu yra daugybė skirtingų ciklonų modelių. Rusijos pramonėje plačiai naudojami ЛИОТ, СИОТ, НИИО ciklonų modeliai.

ЦН-15 tipo ciklonas (НИИО modelis) yra vienas iš universalių ciklono tipų. Šie ciklonai skirti sausam dujų, išsiskiriančių technologiniuose procesuose (džiovinimo, degimo ir t.t.), valymui, o taip pat aspiraciniam orui valyti. ЦН-15 tipo ciklonai naudojami juodojoje ir spalvotojoje metalurgijoje, chemijos, naftos, mašinų gamybos, statybinių medžiagų pramonėje (Baltrėnas ir kt. 2000; PromPortal 2012).

Ciklonų ЦН–15 negalima naudoti sprogimo pavojų sukeliančioje aplinkoje, taip pat nerekomenduojami naudoti lipnioms dulkėms gaudyti, ypač kai yra maži ciklonų diametrai (Baltrėnas ir kt. 2000).

1.8 pav. ЦН–15 tipo ciklonas (PromPortal 2012)

ЦП–2 tipo ciklonas naudojamas oro srautui valyti nuo dulkių, išsiskiriančių iš kietojo kuro džiovinimo ir malimo sistemų. Šio tipo ciklonus plačiai naudoja chemijos ir naftos perdirbimo pramonėje bei metalurgijos pramonėje. Taip pat galimas šių ciklonų panaudojimas įvairiuose pramoniniuose procesuose oro (dujų) srauto valymui nuo įprastų dulkių (ЗЕНИТ 2012).

1.9 pav. ЦП–2 tipo ciklonas (Промышленные вентиляторы 2012)

ЛИОТ tipo ciklonas naudojamas grubiam ir vidutiniam oro srauto valymui nuo sausų, nelipnių dulkių. Oro srauto valymas vyksta dėka išcentrinių jėgų. Šie ciklonai gaminami su kairiuoju ir dešiniuoju oro srauto įtekėjimu. ЛИОТ tipo ciklonai daugiausiai naudojami stambioms dulkėms pašalinti. Rekomenduojama po šio ciklono oro srautą valyti antroje pakopoje – švariojo valymo (ЗЕНИТ 2012).

1.10 pav. ЛИОТ tipo ciklonas (УкрЭнерго-Альянс 2012)

СИОТ tipo ciklonas skirtas grubiam ir vidutiniam oro srauto valymui nuo sausų, nelipnių dulkių. Dažnai naudojamas džiovinimo procesų metu, deginant kurą, cukraus bei krakmolo pramonėje. Šių ciklonų konstrukcija pasižymi tuo, kad jie neturi cilindrinės korpuso dalies, todėl išmetamasis vamzdis taip pat trikampis ciklono įėjimo atvamzdžio skersmuo, įvedami į jo kūginę dalį (Baltrėnas ir kt. 2000).

1.11 pav. СИОТ tipo ciklonas (Уквентсистемы 2012)

Lietuvoje taip pat gaminami oro valymo įrenginiai – ciklonai. Šia veikla labiausiai užsiima tokios įmonės kaip UAB „Mediresta“, UAB „Ekofiltras“, UAB „Bokštuva“ UAB „Eneka“, UAB „Axis Technologies“.

1.12 pav. UAB „Mediresta” gaminama produkcija (Mediresta 2012)

UAB „Mediresta“ užsiima nestandartinių metalo gaminių gamyba. Įmonė jau nuo 1993 metų dirba metalo apdirbimo srityje. Vienas iš šios įmonės gaminamų gaminių yra įvairių matmenų masės nusodinimo ciklonai. Ciklonų pritaikymas galimas prie esamos linijos (Mediresta 2012).

1.13 pav. UAB „Ekofiltras” gaminamas „C tipo“ ciklonas (Ekofiltras 2012)

UAB „Ekofiltras“ sėkmingai dirba nuo 1999 metų. Visa įmonės gaminama produkcija skirta oro filtravimui komercinėse, visuomeninėse, gamybinėse bei gyvenamosiose patalpose. Įmonė gali įvykdyti nestandartinius užsakymus ir išspręsti bene kiekvieną oro filtravimo problemą. UAB „Ekofiltras“ siūlo „C tipo“ ciklonus, skirtus stambių dulkių frakcijų atskyrimui dulkių ištraukimo sistemose (1.13 pav.). Ciklonai tinkami medžio, popieriaus, grūdų ir kitoms pramonėms. Ciklonai gaminami iš 1–2 mm skardos ir yra cinkuoti (Ekofiltras 2012).

1.2 lentelė. C tipo ciklonų techniniai duomenys: A – cilindrinės dalies diametras, E – išėjimo vamzdžio diametras, S – apatinio išėjimo vamzdžio diametras, I – įėjimo vamzdžio diametras, H – ciklono aukštis (Ekofiltras 2012)

Tipas	**Našumas max, m^3/h**	**A, mm**	**E, mm**	**S, mm**	**I, mm**	**H, mm**
C 60	2000	600	250	200	200	1700
C 80	4000	800	350	250	200	2000
C 100	5000	1000	400	250	250	2700
C 120	8000	1200	450	300	300	3000
C 150	10000	1500	600	300	500x400	3450
C 180	12000	1800	650	300	500x400	3850
C 200	16000	2000	700	300	600x400	4200
C 220	21000	2200	800	300	700x400	4500
C 250	25000	2500	800	300	700x400	4650

UAB „Bokštuva“ siūlo įrengimus ir pažangiausias technologijas įvairių specializacijų ir dydžių ūkiams. „Soby“ pirminio valymo įrenginio modeliai R 14–25–40 naudojami 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. Lanksti modulinė konstrukcija, pirminio valymo įrenginys susideda iš orapūtės, oro srauto reguliatoriaus ir ciklono. Pirminio valymo įrenginio pastatymas ir sujungimas vamzdžiais priklauso nuo objekto dydžio ir jo įrengimų išdėstymo. Orapūtė ir oro srauto reguliatorius gali būti pastatomi bet kuriame vamzdyno sistemos taške. Kaip taisyklė, jie statomi pirminio valymo įrengimo zonoje. Oro srauto reguliatorius pastatomas lengvai prieinamose vietose (Bokštuva 2012).

1.14 pav. UAB „Bokštuva" gaminamas pirminio valymo įrenginys „Soby" : 1 – įbyrėjimo anga, 2 – išbyrėjimo anga, 3 – oro srauto nukreipimo į cikloną vamzdis, 4 – grūdų atskyrimo įrenginys, 5 – ciklonas (Bokštuva 2012)

1.3 lentelė. R 14-25-40 pirminio valymo įrenginių techniniai duomenys (UAB „Bokštuva"):

Modelis	El. v., kW	Našumas, t/h.	Oro kiekis, m^3/h	Viso įrenginio svoris, kg	Ciklono svoris, kg
R14	0,75	12-14	1400	32	14
R25	2,2	20-25	2400	78	30
R40	5,5	40-50	5500	185	52

Pirminio valymo įrenginys veikia oro separacijos principu. Veikiami sunkio jėgos grūdai krenta žemyn link išbyrėjimo angos 2. Sudarytas orapūtės oro srautas nukreipiamas aukštyn 3, ištraukia lengvas priemaišas (dulkes, pelus ir t.t.) ir pučiamas į cikloną 5, kur vyksta jų nusodinimas (Bokštuva 2012).

1.5. Naujos konstrukcijos ciklonų analizė

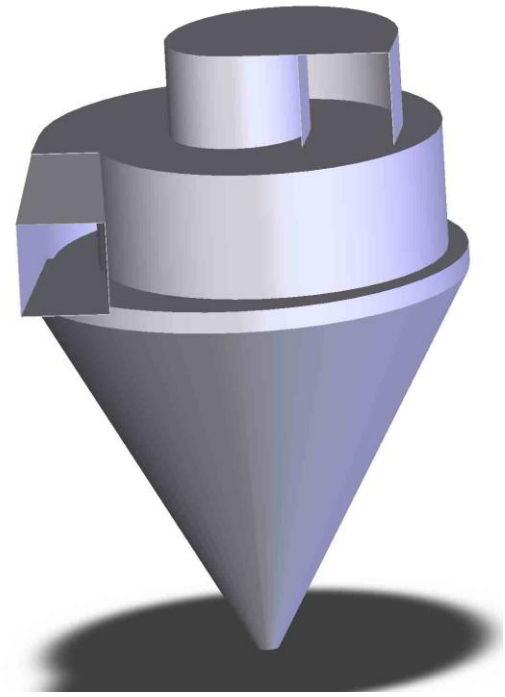
Lokali atmosferos tarša pelenais ir dulkėmis – viena iš labiausiai nerimą keliančių šiuolaikinių aplinkosaugos problemų. Kartu su plieno ir statybos pramonės bei energetikos objektų į aplinką išmetamais dūmais ir įvairių procesų dujomis į atmosferą patenka daugiau nei 90% visų išmetamų pelenų ir dulkių. Kietosios dalelės turi savybę kauptis ir sąlygojamos daugelio veiksnių keliauti didelius atstumus, veikdamos aplinką ir jos komponentus (Серебрянский 2004).

„Буран”

Dažnai oro užterštumo lygis siejamas su plačiai naudojama ciklonų dulkių surinkimo įranga ir jos efektyvumu bei kitais parametrais. Kietųjų dalelių pašalinimo iš oro (dujų) srauto efektyvumo didinimas, veikiant išcentrinėms jėgoms, susijęs su ciklono uždarų kontūrų tobulinimų, taikant naujos krypties teorines ir metodines žinias. Dėl šios priežasties vis dažniau įprastų konstrukcijų ciklonai pakeičiami naujesnių konstrukcijų daugiakanaliais ciklonais (Серебрянский 2012; Chlebnikovas, A., Baltrėnas, P. 2012).

Norint pasiekti ypatingai gerą oro (dujų) srauto valymo efektyvumą, kai yra šalinamos ypač smulkios ($x<10$ μm) kietosios dalelės, taikomi naujos kartos ciklonai su uždara kontūrų sistema, kur pagrindas yra viduje esantys kreivalinijiniai kanalai. Uždari cilindrinės formos kontūrai išsidėstę $\varphi=\pi$ kampu ir yra skirtingo skersmens. Pora gretimų kanalų sudaro uždarą kontūrą (Балан *et al.* 2000; Буров 2010).

Užteršto oro (dujų) srauto valymas naujos kartos ciklonuose vyksta filtruojantis pro kelis grįžtančio (cirkuliuojančio uždarose grandyse) oro (dujų) srauto sluoksnius. Keičiant atstumus tarp kreivalinijinių pusžiedžių reguliuojamas ir nustatomas optimalus oro (dujų) srauto debitas patenkantis į tranzitinį ir periferinį kanalus, tokiu būdu reguliuojant oro (dujų) srauto valymo proceso eigą.

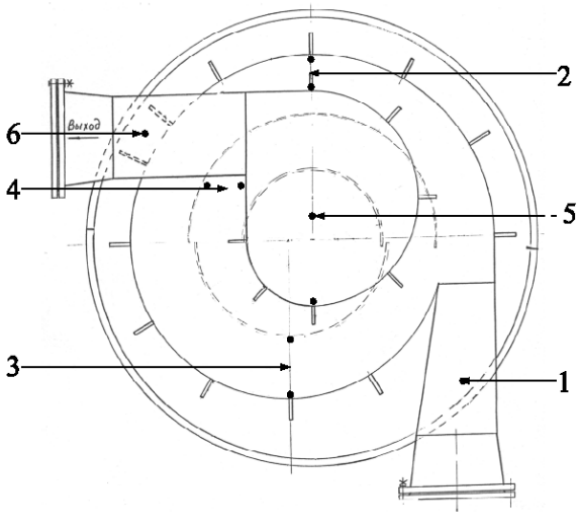


1.15 pav. Bendras daugiakanalio ciklono „Буран” vaizdas (Серебрянский 2004)

1.4 lentelė. „Буран” techninės charakteristikos (Серебрянский 2004)

Našumas		2500	5000	10000
Gabaritai:	Ilgis, mm	1600	1500	2210
	Plotis, mm	1600	1510	2000
	Aukštis, mm	1800	1900	2985
	Sienelių storis, mm	5	5	5
Svoris, kg		1457	1278	603

Dulkių gaudytuvai „Буран” nesudėtingos konstrukcijos, lengvai montuojami ir eksploatuojami, patikimi, universalūs ir ekonomiški. „Буран” veikimo principas pagrįstas išcentrinių jėgų veikimu ciklono kanaluose. Dulkių dalelės, judėdamos žemėjančios spiralės kryptimi, nukreipiamos prie ciklono sienelių Priklausomai nuo poreikio, šie ciklonai būna vertikalūs ir horizontalūs. Dujų srautas ties kiekvieno kanalo pradžia pasidalina į dvi dalis. Periferinis cirkuliacinis oro srautas grįžta į kanalo pradžią, o centrinis tranzitinis – keliauja į sekantį kanalą. Tokiu būdu perėjęs visus kanalus šis oro srautas pašalinamas iš sistemos pro centrinę valyto oro srauto angą (Карамушко и др. 2012; Meier, Mori 1999).



1.16 pav. „Буран” vidinė konstrukcija: 1 – įėjimo anga 2 – pirmas kanalas; 3 – antras kanalas; 4 – trečias kanalas; 5 – vidinė ertmė, 6 – išėjimo anga (Серебрянский 2004)

Minėtoje sistemoje dalelės, kurių masė didesnė nei kritinė, pirmame kanale pagriebiamos cirkuliacinio oro srauto ir nusodinamos bunkeryje. Dalelės, kurių masė mažesnė kritinės –

išnešamos tranzitinio oro srauto, o tos kurių masė patenka į ribas tarp kritinės ir mažesnės už kritinę, – cirkuliuoja ciklono kanaluose (Карамушко и др. 2012).

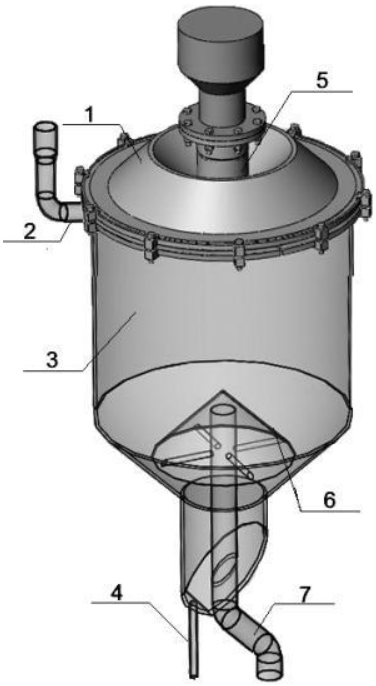
Palyginus cikloną su „Буран”, pastarasis turi keletą privalumų: aukštas oro srauto išvalymo lygis nuo dulkių, nepriklausomai nuo valomų dujų užterštumo lygio, mažesnis aerodinaminis pasipriešinimas, didelis našumas, galimybė valyti dujas nuo ypač smulkių dulkių, mažesnis dujų abrazyvinis poveikis aparato korpusui (Карамушко и др. 2012; Morsi, Alexander 1972).

Naujos konstrukcijos ciklonas panaudojant ultragarso bangas

Dar vienas būdas galintis padidinti ciklono valymo efektyvumą – ciklono konstrukcijos patobulinimas, paremtas ultragarsinių virpesių panaudojimu. Valymo efektyvumo padidėjimas paremtas kietųjų dalelių koaguliacija dėl ultragarso poveikio.

1.17 pav. Ultragarso sistema montuojama į cikloną (Хмелев и др. 2009)

Įrenginys yra sudarytas iš sandaraus korpuso, kurio pagrindiniais elementais yra viršutinis 1 ir apatinis 6 atšvaitai, formuojantys cilindriniame ciklone 3 vienodus akustinius laukus. Ultragarso bangos dvigubo atspindžio nuo reflektoriaus dėka, tolygiai paskirstyto visame ciklono kameros tūryje 3. Norint sukurti aukšto efektyvumo įrenginį, ciklono konstrukcijos matmenys pasirenkami tokiu būdu, kad realizuoti rezonansinį nuolatinį bangų režimą ir užtikrinti reikiamą oro srauto išbuvimo trukmę įrenginyje. Valomos dujos į cikloną patenka įėjimo vamzdžio 2 dėka. Išvalytos dujos pašalinamos per išėjimo vamzdį 7 (Хмелев и др. 2009; Шалунов 2008).



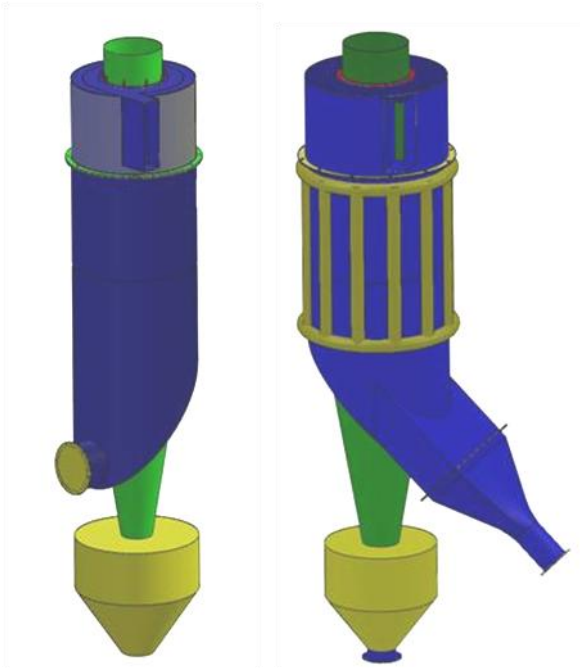
1.18 pav. Naujos konstrukcijos ciklonas panaudojant ultragarso bangas: 1 – viršutinis atšvaitas, 2 – iėjimo vamzdis, 3 – ciklono korpusas, 4 – nuvedimas į bunkerį, 5 – ultragarso bangų sistema, 6 – apatinis atšvaitas, 7 – išėjimo vamzdis (Хмелев и др. 2009)

Kietosios dalelės su kelis kartus padidėjusia mase dėl ultragarso sąlygojamos koaguliacijos ir dėl to padidėjusio išcentrinės jėgos veikimo yra nustumiamos link išorinės ciklono sienelės ir per vamzdį 4 patenka į bunkerį (Хмелев и др. 2009).

Ciklofiltras

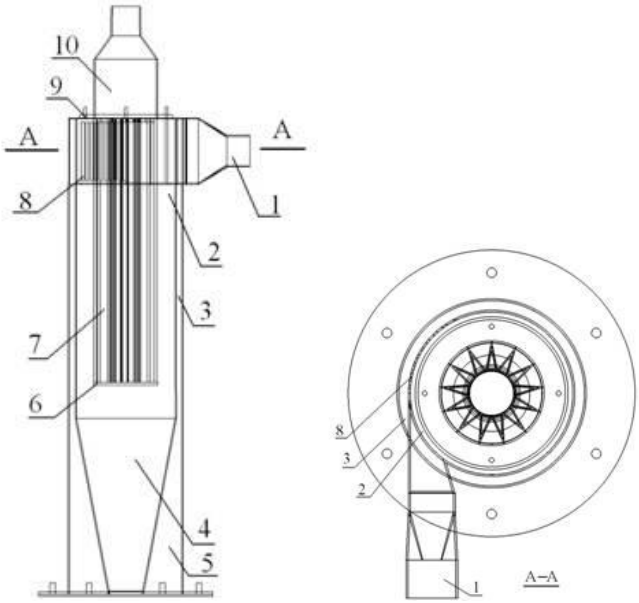
Įprasto ciklono valymo efektyvumui padidinti sugalvota į jį integruoti rankovinį filtrą. Toks oro valymo įrenginys pavadintas – ciklofiltru. Ciklofiltrai skirti dulkėtam oro srautui (dujoms) valyti nuo dulkių įvairiose pramonės šakose: metalurgijos, chemijos, energetikos, medienos apdirbimo, statybos ir kt. Šio įrenginio pagrindą sudaro gofruota regeneruojama filtruojanti kasetė, įmontuota patobulintame dvigubo korpuso ciklone (EKOLOGenergy 2013; Серебрянский, Плашихин 2012).

Svarbiausios ciklofiltro savybės: aukštas valymo efektyvumas, mažesnis energijos suvartojimas, mažesni įrenginio gabaritai, veiklos sąnaudų sumažėjimas taikant automatizuotą regeneraciją, patogus priėjimas prie ciklofiltro elementų, palengvinantis priežiūrą (EKOLOGenergy 2013).



1.19 pav. Ciklofiltras (EKOLOGenergy 2013)

Ciklofiltre oro srauto valymas vyksta dviem etapais. Pirmasis etapas – dulkių atskyrimas pirmajame ciklono ketvirtyje. Antrasis etapas – smulkių kietųjų dalelių filtravimas gofruotoje filtro kasetėje. Filtruojanti medžiaga parenkama priklausomai nuo valomų dujų temperatūros, drėgmės ir dulkių dispersijos. Filtruojanti medžiaga montuojama ant standaus rėmo. Regeneracija atliekama panaudojant 0,3 - 0,6 MPa suslėgto oro slėgį (EKOLOGenergy 2013).



1.20 pav. Ciklofiltro vidinė konstrukcija: 1 – įėjimo vamzdis, 2 – vidinis cilindro formos korpusas, 3 – išorinis cilindro formos korpusas, 4 – vidinis bunkeris, 5 – išorinis bunkeris, 6 – dangtis, 7 - filtruojanti kasetė, 8 – žaliuzinis elementas, 9 – veržlės, 10 – išėjimo vamzdis (Серебрянский, Плашихин 2012)

Ciklofiltro veikimo principas: dulkėtas oro srautas per įėjimo vamzdį 1 patenka į vidinį cilindro formos korpusą 2. Veikiama išcentrinių jėgų, sunkesnių kietųjų dalelių frakcija, koncentruojasi ties vidinio cilindrinės formos korpuso sienele ir per plyšius 8 patenka į išorinį cilindrinės formos korpusą 3. Tokiu būdu, stambiadispersinė frakcija nusėda bunkeryje 5. Apvalytas nuo stambesnės dispersijos dalelių, oro srautas toliau yra filtruojamas vidiniame cilindrinės formos korpuse įmontuotoje filtruojančioje kasetėje 7. Išvalytas oras pašalinamas iš įrenginio per išėjimo vamzdį (EKOLOGenergy 2013).

1.6. Dinaminių procesų ciklonuose modeliavimas

Atmosferos užterštumas sukelia vis daugiau problemų, susijusių su aplinkos oro tarša – ozono sluoksnio pokyčiai, rūgščiojo lietaus susidarymas, šiltnamio reiškinys, visuomenės sveikatos lygio prastėjimas, neigiamas poveikis ekosistemų būklei ir kt. Aktualiausi gamtos reiškinių tyrimo uždaviniai, formuluojami matematikos kalba, retai sprendžiami analiziniais metodais. Siekiant kontroliuoti, vertinti bei pagerinti aplinkos būklę atsirado būtinybė naudoti programas, kurių modelių rezultatais remiantis, gaunamas aplinkos taršos vertinimo rezultatas. Pagrindinis gamtosaugos, energetikos, ekonomikos ir kitų sričių uždavinių tyrimo ir sprendimo būdas – skaitiniai metodai (Vaitiekūnas 2007).

Oro taršos vertinimas – metodas, naudojamas pamatuoti, paskaičiuoti, numatyti (prognozuoti) ar įvertinti aplinkos oro užterštumo tam tikru teršalu lygį (Valstybinės visuomenės...2012).

Matematinis modeliavimas – tiriamojo proceso ar reiškinio, aprašyto diferencialinėmis lygtimis ir apriboto vienareikšmiškumo sąlygomis, skaitinis ar analizinis sprendimas, t.y. matematinio modelio sudarymas ir jo realizavimas, uždavinio sprendinio radimas. Atliekant matematinį modeliavimą uždavinio sprendiniai gaunami daugiausia skaitiniu būdu. Sprendžiant uždavinius padaryta didžiulė pažanga – naudojamos galingos skaičiavimo mašinos. Kai per sekundę galima atlikti šimtus milijonų matematinių operacijų ir atminties tūriai dideli, prasideda tiesioginis gamtos procesų modeliavimas, kuris iki šiol buvo galimas tik eksperimentuojant (Vaitiekūnas 2003).

Modelių naudojimas leidžia geriau įvertinti erdvinį teršalų pasiskirstymą, skirtingai negu matavimai, kurie yra tik taškas erdvėje. Geriausia kombinacija atliekant vertinimą – lygiavertis matavimo ir modeliavimo duomenų panaudojimas (Valstybinės visuomenės...2012). Taip pat naudojant modelius yra galimybė padidinti oro kokybės kontrolės efektyvumą šalies ar vietiniu

lygmeniu, atlikti analizę rengiant veiksmų planus ir programas oro kokybei pagerinti bei įvertinti priimamų priemonių efektyvumą (Petraitis 2010).

Kriterijai, pagal kuriuos turėtų būti pasirenkamas oro kokybės modelis ūkinės veiklos poveikiui aplinkos orui vertinti, patvirtinti vadovaujantis Ūkinės veiklos poveikiui aplinkos orui vertinti teršalų sklaidos skaičiavimo modelių pasirinkimo rekomendacijomis, patvirtintomis Aplinkos apsaugos agentūros direktoriaus 2008 m. gruodžio 9 d. įsakymu Nr. AV-200 (2008, Nr. 143-5768) (Valstybinės visuomenės...2012).

Pagrindiniai kriterijai yra (Valstybinės visuomenės...2012):

- Galimybė paskaičiuoti teršalų koncentraciją aplinkos ore;
- Modelis, priklausomai nuo tyrimo tikslo, turi apimti linijinius, ploto bei taškinius taršos šaltinius;
- Erdvinė skiriamoji geba turi būti bent 10–100 m.;
- Galimybę naudoti 1994 m. Lietuvos koordinačių sistemą (LKS–94) taršos šaltinių koordinatėms apibrėžti;
- Modelis turi turėti galimybę nustatyti išmetamų teršalų išmetimų pokyčius laike, t.y. valandos, dienos ar mėnesio pokyčius;
- Modelis turi turėti galimybę įvertinti reljefo poveikį teršalų sklaidai ir kt.

Šiuo metu Lietuvoje rekomenduojami tokie modeliai kaip: ADMS, BREEZE AERMOD, Varsa, CadnaA ir kt.

Matematinis modeliavimas taip pat labai plačiai naudojamas pramonėje, energetikos objektuose ir fluidų dinamikos studijose, siekiant suprasti fluidų judėjimo tendencijas. Pasinaudojus norimu programiniu paketu (pasirinkimas gana didelis), galima gauti norimus srautų tekėjimo rezultatus. Tiesa norint pasinaudoti modeliavimo programa, reikalingas ne menkas žinių bagažas. Toliau pateikiami modeliavimo programų, naudojamų aplinkoje ir įvairiuose įrenginiuose cirkuliuojantiems fluidams modeliuoti, aprašymai.

Programos „VARSA“ aprašymas

Pramoninių objektų išmetamų į atmosferos orą kenksmingųjų medžiagų koncentracijų skaičiavimo metodiką nustato Lietuvos Respublikoje taikomos aplinkos kokybės kontrolės normos. Šių normų turi būti laikomasi projektuojant įmones, ribojant rekonstruojamų ir veikiančių įmonių teršalų skleidimą į atmosferą (Petraitis 2010). Taikant atmosferos oro užterštumo programą „VARSA“, apskaičiuojama tik maksimali koncentracijos vertė, kuri būtų

pasiekta esant nepalankiausioms sklaidos sąlygoms, nenaudojant arba naudojant minimalų realių meteorologinių duomenų kiekį (Petraitis ir kt. 2001). Programos „VARSA“ dažniausiai naudojami meteorologiniai duomenys – vidutinės aukščiausios dienos temperatūros šalčiausių ir karščiausių metų mėnesių, taip pat daugiamečiai vėjo greičiai bei pasiskirstymai pagal kryptis (Petraitis ir kt. 2003).

Sudarant modelį, darbų eiliškumą nustato pats vartotojas. Svarbu išlaikyti loginę darbų atlikimo tvarką: duomenų įvedimas → skaičiavimai → rezultatų analizė ir spausdinimas (Petraitis 2010).

1. Duomenų įvedimas:
    - Objekto įrašo su jo duomenimis sukūrimas;
    - Objekto pasirinkimas;
    - Šaltinių duomenų įvedimas;
    - Teršalų duomenų įvedimas;
    - Teršalų kiekio duomenų įvedimas;
    - Skaičiavimo varianto duomenų įvedimas;
    - Foninių koncentracijų duomenų įvedimas;
    - Sanitarinės apsaugos zonos duomenų įvedimas (Petraitis 2010).
2. Pradinių duomenų kontrolė. Programa patikrina sąsajas tarp rinkmenų ir jei klaidų nėra, leidžia iškviesti skaičiavimo programą, priešingu atveju, reikia taisyti pradinius duomenis ir dar kartą iškviesti tikrinimo programą (Petraitis 2010).
3. Skaičiavimas.
4. Šaltinio išmetamo teršalo nusėdimo koeficiento taisymas. Šis etapas vykdomas tik tada, kai koeficientas, apibūdinantis teršalo nusėdimo atmosferoje greitį, vieno teršalo skirtingų šaltinių yra skirtingas (Petraitis 2010).
5. Koncentracijų skaičiavimas.
6. Grafinės informacijos formavimas, analizė ir spausdinimas.
7. Lentelių sudarymas, analizė ir spausdinimas.
8. Sanitarinės-apsaugos zonos apskaičiavimas, analizė ir spausdinimas (Petraitis 2010).

„VARSA“ programinis paketas naudojamas kenksmingų priemaišų maksimalių išmetimų skaičiavimui. Gauti rezultatai taikomi nustatant didžiausius leistinus išmetimus, taip pat įgyvendinant atitinkamas aplinkosaugines priemones.

Programos „ISC-AERMOD View“ aprašymas

Kompiuterinių programų paketas „ISC-AERMOD View“ - teršalų sklaidos modelis, LR aplinkos ministerijos rekomenduojamas taikyti atliekant strateginio ir visapusiško teršiančių medžiagų poveikio aplinkai vertinimą. Atsižvelgiant į apribojimų kiekį bei reikiamų duomenų įvedimo kiekį ir pavidalą, Lietuvos sąlygoms labiausiai tinka ISC3 modelis. Tai Gauso tipo nusistojusio dūmų debesies modelis (Petraitis 2010).

ISC3 modelis įvertina kietųjų dalelių bei aerozolių frakcijų nusėdimą, o taip pat gali sudaryti išmetamo teršalo sklaidos koncentracijų lauką. Gali būti vertinami plotiniai, linijiniai, tūrio bei šachtiniai taršos šaltiniai. Modelis įvertina ir vietovės, kurioje vyksta sklaidos procesas, ypatumus, reljefą, teritorijos užstatymas (Petraitis 2010).

Šis modelis yra išskirtinis dėl to, kad modeliuojant būtini labai detalūs meteorologiniai duomenys (debesuotumas, oro temperatūra, santykinis oro drėgnumas, vėjo kryptis, slėgis, vėjo greitis, debesų aukštis nuo Žemės paviršiaus, kritulių kiekis). Esant tokiam tikslumui galima gauti labai didelę koncentracijų vidurkių įvairovę konkrečiu atveju (Petraitis 2010).

ISC3 modelis rekomenduojamas taikyti tokiais atvejais:

- Kai nagrinėjamos iki 50 km pernašos;
- Toksinių medžiagų emisija į orą nenutrūkstama.

ISC-AERMOD programoje, skirtingai nei daugelyje kitų, vartotojas gali pats nustatyti, kokio laiko intervalo vidutinę koncentraciją jis nori apskaičiuoti: vidutinę mėnesinę, vidutinę metinę ar didžiausiąją vienkartinę (Petraitis 2010).

Programos „PHOENICS“ aprašymas

„PHOENICS“ (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series) modeliavimo paketas naudojamas nuo 1981 m. ir yra sukurtas CHAM *Ltd*. of Wimbledon. Tai SFD programinės įrangos paketas, kuris taiko baigtinių tūrių metodą pernašos procesų lygtims spręsti naudojant sureguliuotą tinklelį, kurio topologija reguliari (Vaitiekūnas 2010; Hu *et al*. 2005; Ma et al. 2000). Pernašos procesai:

- Koncentracijos, šilumos ir masės mainai;
- Sudėtingų šilumos mainų procesai;
- Pernašos procesai oro sraute;
- Šilumos mainai laidumu, konvekcija, spinduliavimu;

- Dvifazių srautų skaitiniai metodai, kietųjų dalelių pernaša;
- Turbulencijos skaitinis modeliavimas.

„PHOENICS“ modeliavimas palengvina numatyti, suprasti įrenginių veikimą, gamtinius procesus, gyvųjų organizmų organų funkcijas. Šioje programoje modeliavimas atliekamas fizikinius dėsnius aprašančiomis matematinėmis lygtimis (Vaitiekūnas 2010; Konoverskytė, Vaitiekūnas 2010; Liden, Gudmundsson 1997).

„PHEONICS“ programos matematinės galimybės yra plačios, todėl ją galima pritaikyti įvairių uždavinių sprendimui:

- Inžineriniai uždaviniai (šiluminio laidumo reiškinys pamatuose ir statiniuose, nestacionarių dvifazių reiškinių modeliavimas ir kt.);
- Gamtosauginiai uždaviniai (išmetamų į atmosferą ar vandenį cheminiams teršalams modeliuoti);
- Gyvieji organizmai (veninio ar arterinio kraujo srautų kūne ar net pačioje širdyje modeliavimas).

„PHEONICS“ susideda iš trijų pagrindinių ir trijų papildomų kompiuterinių kodų. Pagrindiniai yra ikiprocesoriai SATELLITE – interpretatorius, naudotojo pateiktas komandas duomenų faile perduoda EARTH, kuri jas supranta ir įsimena; VR Editor – leidžia pamatyti geometriją su kontrolės vaizdo mygtukais; ir procesorius EARTH – turi pagrindinę srautų modeliavimo programinę įrangą. Papildomieji yra procesoriai PHOTON, VR Viewer ir atskira informacinė programa POLIS (Vaitiekūnas 2007; Kavaliauskas, Vaitiekūnas 2001; Kaya, Karagoz 2008).

Programos „Maple“ aprašymas

„Maple“ matematinė sistema yra skirta universaliam matematiniam modeliavimui, sprendžiant taikomuosius uždavinius įvairiose srityse. Ji apima daugybę skaičiavimo ir (arba) simbolinės matematikos metodų, turi patogią grafinę sąsają, yra galimybė apdoroti duomenis, kurti įvairaus tipo modelius, spręsti diferencialines, integralines bei algebrines lygtis ir pan. Pastarosios funkcijos vykdomos naudojant specializuotas vidines kalbas, kurioms įsisavinti reikia tam tikro laiko (Sakalauskas ir kt. 2012). „Maple“ taikymo galimybės:

- Analizinis ar skaitinis uždavinių sprendimas;
- Veiksmai su tiesinėmis matricomis;
- Regresinės analizės parametrų skaičiavimas;

- Identifikacinių bandymų kriterijų skaičiavimas taikant Fišerio funkciją;
- Rezultatų grafinis vaizdavimas ir kt.

„Maple“ matematinė sistema labiau skirta aukštajam universitetiniam išsilavinimui bei sudėtingiems uždaviniams spręsti. Ši sistema taip pat nereikalauja ypatingų kompiuterio išteklių, be to ji turi dideles simbolinių skaičiavimų galimybes. Pasižymi puikiomis grafikos galimybėmis, gana sudėtinga interaktyvaus dialogo forma. Šia sistema gali naudotis tik aukšto lygio profesionalai (Sakalauskas ir kt. 2012).

Programos „ANSYS“ aprašymas

ANSYS Fluent programinis paketas apima didelę įvairovę modeliavimo procesų. Skaičiavimams ir skysčių dinamikos modeliavimui sukurta daugybė inžinerijos srities programų. ANSYS programinė įranga ypatingai taikoma gaminio projektavimo procesų metu, taip pat optimizuojant įvairaus pobūdžio procesus, kai analizuojami skysčių srauto ir šilumos perdavimo ar trumpalaikiai kompleksiniai tarpusavyje reaguojantys srautai. ANSYS programinė įranga remiasi baigtinių elementų metodu, sprendžiant pagrindines lygtis ir įvertinant kraštines sąlygas.

ANSYS programinis paketas suteikia galimybę:

- Kurti tam tikrų produktų, detalių, komponentų ar sistemų modelius arba perkelti ir modifikavus panaudoti CAD modelius;
- Tirti medžiagų fizines reakcijas: įtempimus, temperatūras, elektromagnetinius laukus ir kt.;
- Sumažinant gamybos išlaidas, optimizuojant gaminamo produkto dizainą;
- Atlikti kuriamo produkto testavimą aplinkoje, kurioje realiomis sąlygomis tyrimų atlikti neįmanoma.

1.7. Skyriaus išvados

1. Įprasta išskirti dvi svarbiausias antropogeninių taršos šaltinių rūšis – stacionarius ir mobilius. Tarp stacionarių šaltinių didžiausią dalį teršalų išmeta pramonės ir energetikos objektai, kurie teršalus išmeta organizuotai ir neorganizuotai.

2. Kietąsias daleles galima būtų apibūdinti kaip ore esančių dalelių ir skysčio lašelių (aerozolių) mišinį, kurio sudėtyje gali būti įvairūs komponentai – rūgštys, sulfatai, nitratai, organiniai junginiai, metalai, dirvožemio dalelės, dulkės, suodžiai ir kt. KD_{10} dalelės kelia

didžiulį susirūpinimą, nes gali prasiskverbti giliai į plaučius ir sukelti didelę grėsmę žmogaus sveikatai. $KD_{2,5}$ dalelės laikomos ypač pavojingomis, nes gali prasiskverbti į gilesnius kvėpavimo takus ir patekti į kraujotakos sistemą. Atmosferos taršos mažinimo būdų paskirtis – visiškai ar bent iš dalies išvengti teršalų poveikio pasekmių. Mechaniniams teršalams iš oro valyti yra sukurta įvairių įrenginių, todėl priklausomai nuo teršalų koncentracijos, kitų savybių galima pasirinkti tinkamiausius valymo įrenginius. Ciklonai įgavo platų panaudojimą šalinant kietąsias daleles procesuose, vykstančiuose pramonės bei energetikos objektuose.

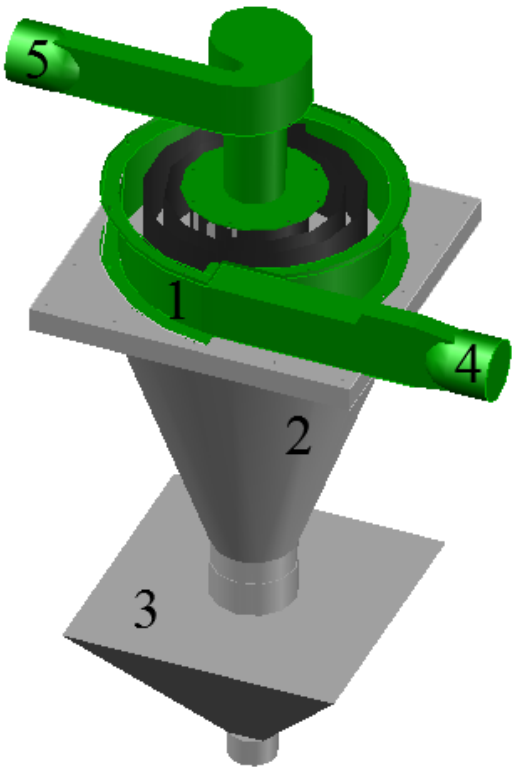
3. Šiuo metu yra daugybė skirtingų ciklonų modelių. Rusijos pramonėje plačiai naudojami ЛИОТ, СИОТ, НИИО ciklonų modeliai. Tačiau vis dažniau įprastų konstrukcijų ciklonai pakeičiami naujesnių konstrukcijų patobulintais ir efektyvesniais ciklonais, tokiais kaip, daugiakanaliai ciklonai „Буран”, ciklonai su integruotais ultragarso bangas skleidžiančiais įrenginiais, ciklofiltrais.

4. Modelių naudojimas leidžia geriau įvertinti erdvinį teršalų pasiskirstymą, skirtingai negu matavimai, kurie yra tik taškas erdvėje. Matematinis modeliavimas labai plačiai naudojamas pramonėje, energetikos objektuose ir fluidų dinamikos studijose, siekiant suprasti fluidų judėjimo tendencijas. Pasinaudojus norimu programiniu paketu (ANSYS, PHOENICS, MAPLE, ISC-AERMOD View), galima gauti norimus srautų tekėjimo rezultatus, įvertinant turbulenciją, dalelių savybes, sunkio jėgas.

2. DAUGIAKANALIO SPIRALINIO CIKLONO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Antrajame magistro darbo skyriuje yra nuosekliai aprašoma eksperimentinių tyrimų atlikimo metodika, tyrimams atlikti naudoti įrenginiai bei prietaisai, sąlygos atliekant eksperimentinius tyrimus, eksperimentams naudotos medžiagos bei mėginių analizavimo metodai. Pateikta tyrimų metodika parengta atsižvelgiant į Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos normatyvinius dokumentus.

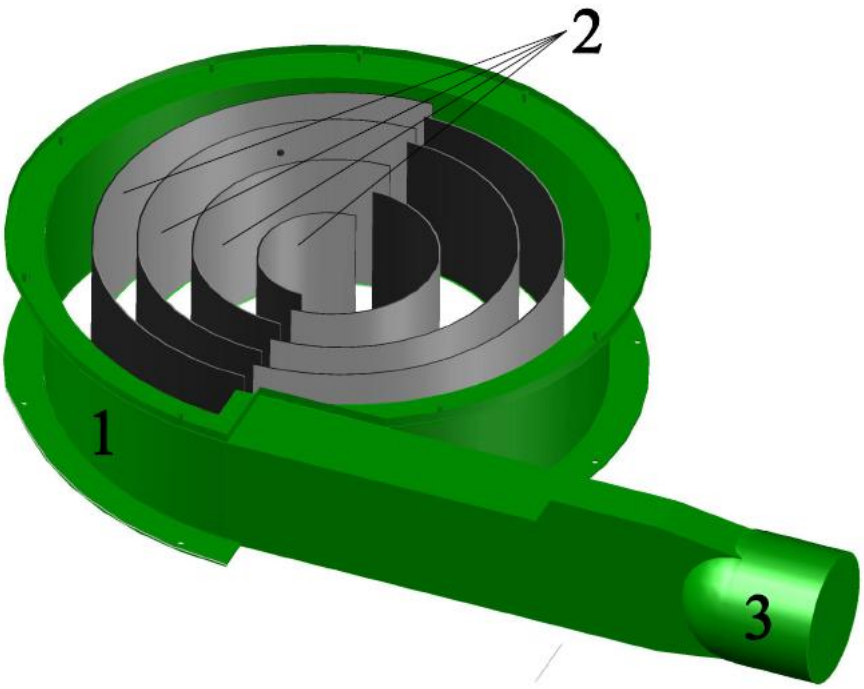
Eksperimentiniai efektyvumo nustatymo tyrimai buvo atlikti su patobulintu daugiakanaliu ciklonu, turinčiu spiralinį korpusą, kuris įrengtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje (VGTU AAK). Minėtos konstrukcijos ciklonas pritaikytas oro (dujų) srautui valyti nuo itin smulkių ($x \leq 20$ μm) kietųjų dalelių ir gali būti naudojamas kaip alternatyva elektrostatiniam filtrui. Oro valymas gali vykti esant padidėjusiai temperatūrai ir drėgmei. Bendras ciklono vaizdas pateiktas 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu bendras vaizdas: 1 – spiralinis ciklonas; 2,3 – kietųjų dalelių sulaikymo bunkeris; 4 – oro (dujų) srauto įtekėjimo ortakis; 5 – oro (dujų) srauto ištekėjimo ortakis

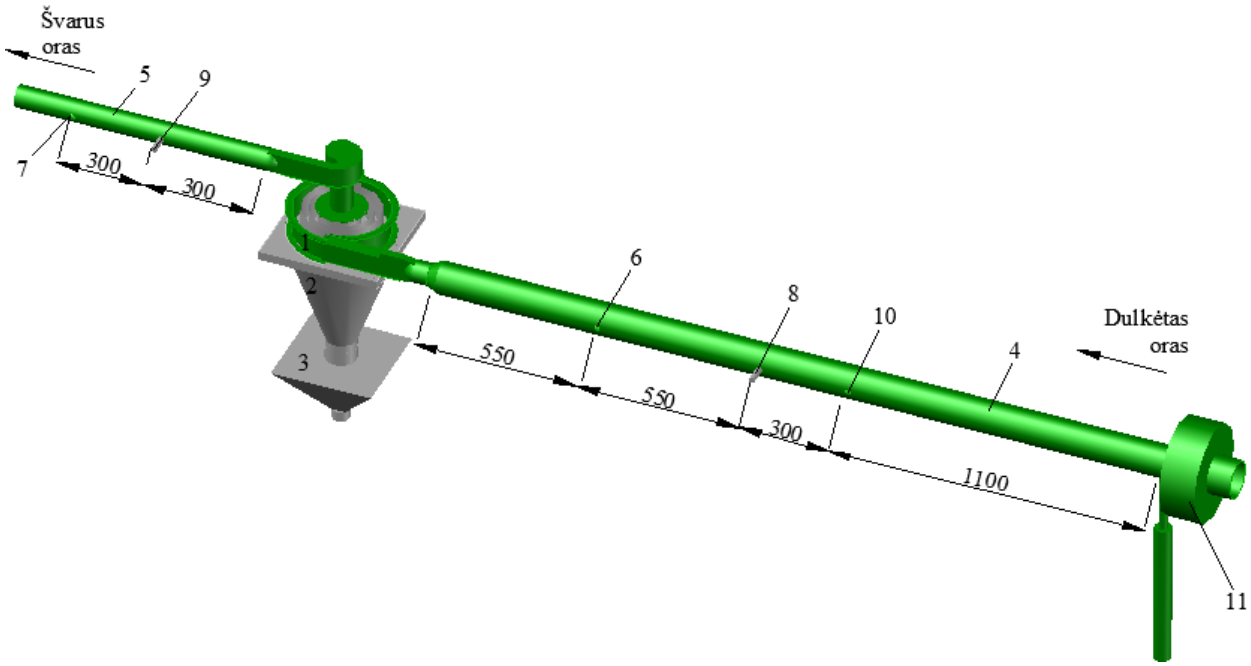
Sistema susideda iš ventiliatoriaus Flymo Twisret 2200 XV (galingumas 2,2 kW), kurio dėka sukuriamas reikiamas įtekančio oro (dujų) srauto greitis. Užterštas kietosiomis dalelėmis oro (dujų) srautas yra paimamas iš aplinkos ir įtekėjimo ortakiu 4, kurio diametras 110 mm, paduodamas į spiralinio daugiakanalio ciklono separavimo kamerą 1. Čia išcentrinių jėgų dėka kietosios dalelės atskiriamos iš oro (dujų) srauto ir nukrenta į dvigubą ciklono bunkerį 2 ir 3. Iš sistemos, ištekėjimo ortakiu 5, kurio diametras 75 mm, pašalinamas jau išvalytas oro (dujų) srautas (2.3 pav.).

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo eksperimentuojama su keturių, šešių ir aštuonių kanalų spiraliniais ciklonais, kur pagrindą sudaro atitinkamai 3, 5, ir 7 skirtingo spindulio kreivalinijiniai pusžiedžiai. Kiekvienu atveju buvo bandomos tris skirtingos ciklono vidaus konstrukcijos, keičiant atstumus tarp skirtingo spindulio kreivalinijinių pusžiedžių, t.y. juos išdėstant skirtingomis padėtimis, tokiu būdu keičiant periferinio ir tranzitinio oro (dujų) srautų santykius. Pasirinktos padėtys: 25/75 periferinio (grįžtamojo) oro (dujų) srauto tūris 25 % mažesnis už tranzitinio (tekančio į sekantį kanalą) oro (dujų) srauto tūrį: 50/50 – oro (dujų) srauto tūriai pasiskirsto po lygiai; 75/25 – periferinio oro (dujų) srauto tūris yra 25 % didesnis nei tranzitinio. Vidinė spiralinio ciklono konstrukcija pavaizduota 2.2 pav. Kaip pasiskirsto valomo oro (dujų) srautas ciklono konstrukcijos viduje pavaizduota 2.4 pav.



2.2 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu vidinė konstrukcija: 1 – spiralinio ciklono korpusas; 2 – kreivalinijiniai pusžiedžiai, 3 – oro (dujų) srauto įtekėjimo ortakis

Kietosiomis dalelėmis užterštas oro (dujų) srautas įtekėjęs į separavimo kamerą pirmiausia patenka į pirmąjį spiralinio ciklono kanalą, jam pasibaigus - filtruojasi per skirtingus tarpus tarp kreivalinijinių pusžiedžių (25/75; 50/50 arba 75/25), kur atitinkamas oro (dujų) srauto tūris nukeliauja į periferinį kanalą, o kita dalis – į tranzitinį. Toks oro (dujų) srauto tūrio pasiskirstymas vyksta kiekvieno kanalo pabaigoje. Kietosios dalelės, veikiamos išcentrinių jėgų, yra nustumiamos link periferinės kanalo sienelės, kur per segmentinius plyšius, nukrenta į dvigubą bunkerį ir yra kaupiamos. Oro (dujų) srauto tūris perėjęs visus spiralinio ciklono kanalus yra pašalinamas iš sistemos per oro (dujų) srauto ištekėjimo ortakį. Oro (dujų) srauto dalis patenkantį į periferinį kanalą sudaro „užuolaidą“ atitekančiam dulkėtam orui. Eksperimentinis įrenginio stendas pateiktas 2.3 pav.



2.3 pav. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu eksperimentinis stendas: 1 – daugiakanalis ciklonas su spiraliniu korpusu; 2 ir 3 – dvigubas bunkeris; 4 – įtekėjimo ortakis; 5 – ištekėjimo ortakis; 6 – kietųjų dalelių prieš valymą mėginių paėmimo vieta; 7 – kietųjų dalelių po valymo mėginių paėmimo vieta; 8 ir 9 – sistemos sukuriamo pasipriešinimo matavimo antgaliai; 10 – kiaurymė, skirta kietosioms dalelėms suleisti; 11- ventiliatorius

Minėtos oro (dujų) srauto užuolaidos dėka yra papildomai filtruojamas dulkėtas oras nuo itin smulkių kietųjų dalelių (x<20 μm). Tokia filtracija žymiai padidina ciklono įrenginio valymo efektyvumą. Tokiu pat principu valomas oro (dujų) srautas pereina visus kanalus ir yra pašalinamas iš sistemos.

2.1. Aerodinaminių procesų ciklone tyrimų metodika

Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto judėjimo greičio tyrimo metodika

Užterštas kietosiomis dalelėmis oro (dujų) srautas yra paimamas iš aplinkos ir įtekėjimo ortakiu 4, kurio diametras 110 mm, paduodamas į spiralinio daugiakanalio ciklono separavimo kamerą 1. Čia išcentrinių jėgų dėka kietosios dalelės atskiriamos iš oro (dujų) srauto ir nukrenta į dvigubą ciklono bunkerį 2 ir 3. Iš sistemos, ištekėjimo ortakiu 5, kurio diametras 75 mm, pašalinamas jau išvalytas oro (dujų) srautas (2.3 pav.).

Oro (dujų) srauto greičio matavimams atlikti ciklono konstrukcijos viduje, ciklono dangtyje padarytos specialios kiaurymės, kurios suteikia galimybę panaudojant *Pito-Prandtlio* vamzdelį išmatuoti oro (dujų) srauto greitį atitinkamuose taškuose kiekviename daugiakanalio ciklono kanale.

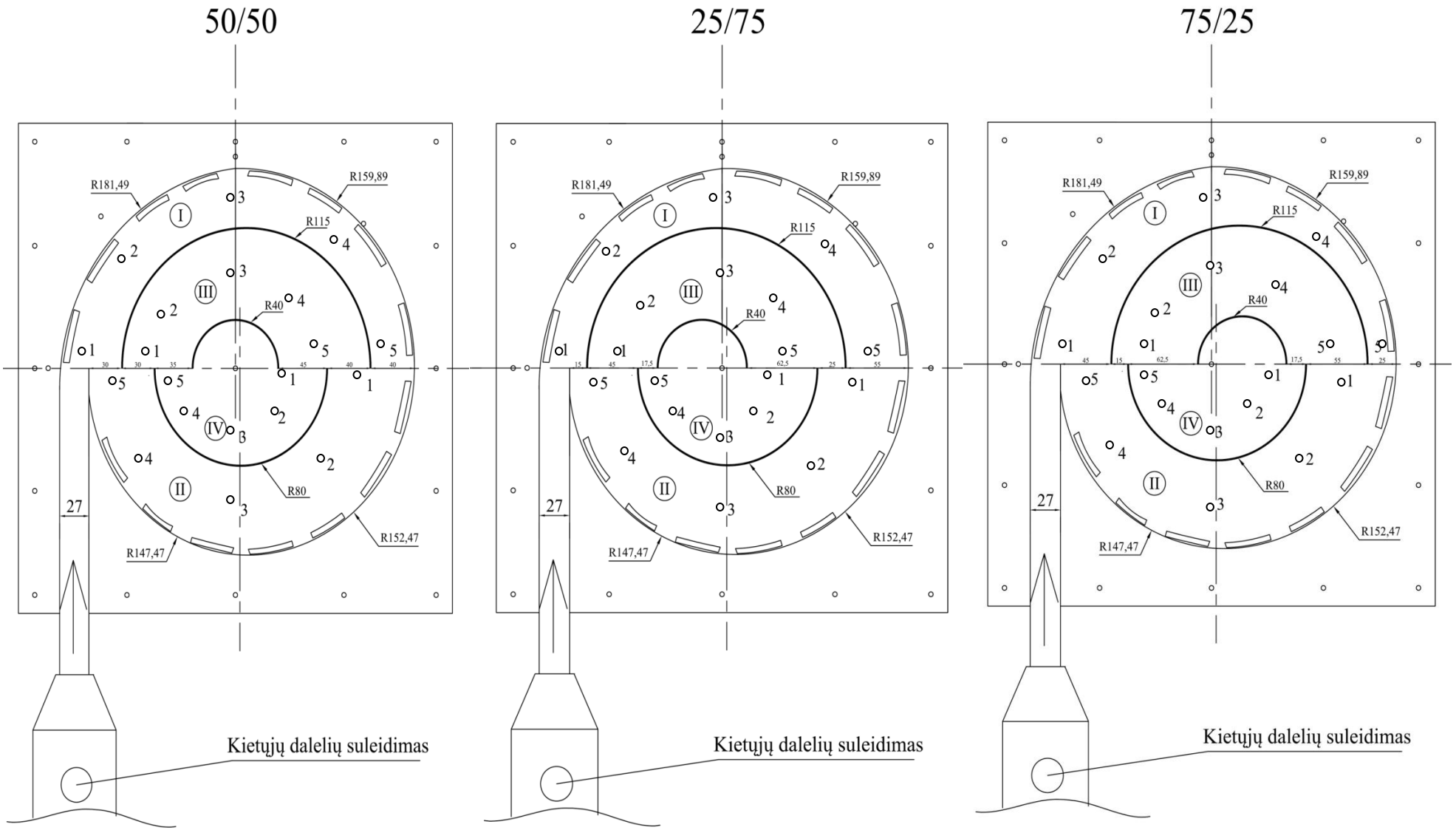
Siekiant sumažinti gautų matavimo rezultatų vidurkio paklaidą, kanalų taškuose, kuriuose matuojamas oro (dujų) srauto greitis, matavimai atliekami devynis kartus (po tris kartus periferijos pasienio sluoksnyje, kiekvieno kanalo skerspjūvio viduryje ir prie vidinės kanalo sienelės).

Atliekant oro (dujų) srauto greičių matavimus spiralinio ciklono kanaluose buvo reguliuojami kreivalinijinių pusžiedžių kanalų tarpai, tokiu būdu buvo reguliuojamas oro tūris patenkantis iš esamo kanalo į prieš tai buvusi kanalą. Pasirinktos tris padėtys – 25/75 (kai į periferinį kanalą patenka 25 % oro (dujų) srauto tūrio, o į tranzitinį – 75 %), 50/50 (kai į periferinį kanalą patenka 50 % oro (dujų) srauto tūrio, o į tranzitinį – 50 %), 75/25 (kai į periferinį kanalą patenka 75 % oro (dujų) srauto tūrio, o į tranzitinį – 25 %). Atlikus matavimus su visomis kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis, siekiama nustatyti geriausią pusžiedžių išdėstymo padėtį bei parinkti optimalias įrenginio aerodinamines savybes.

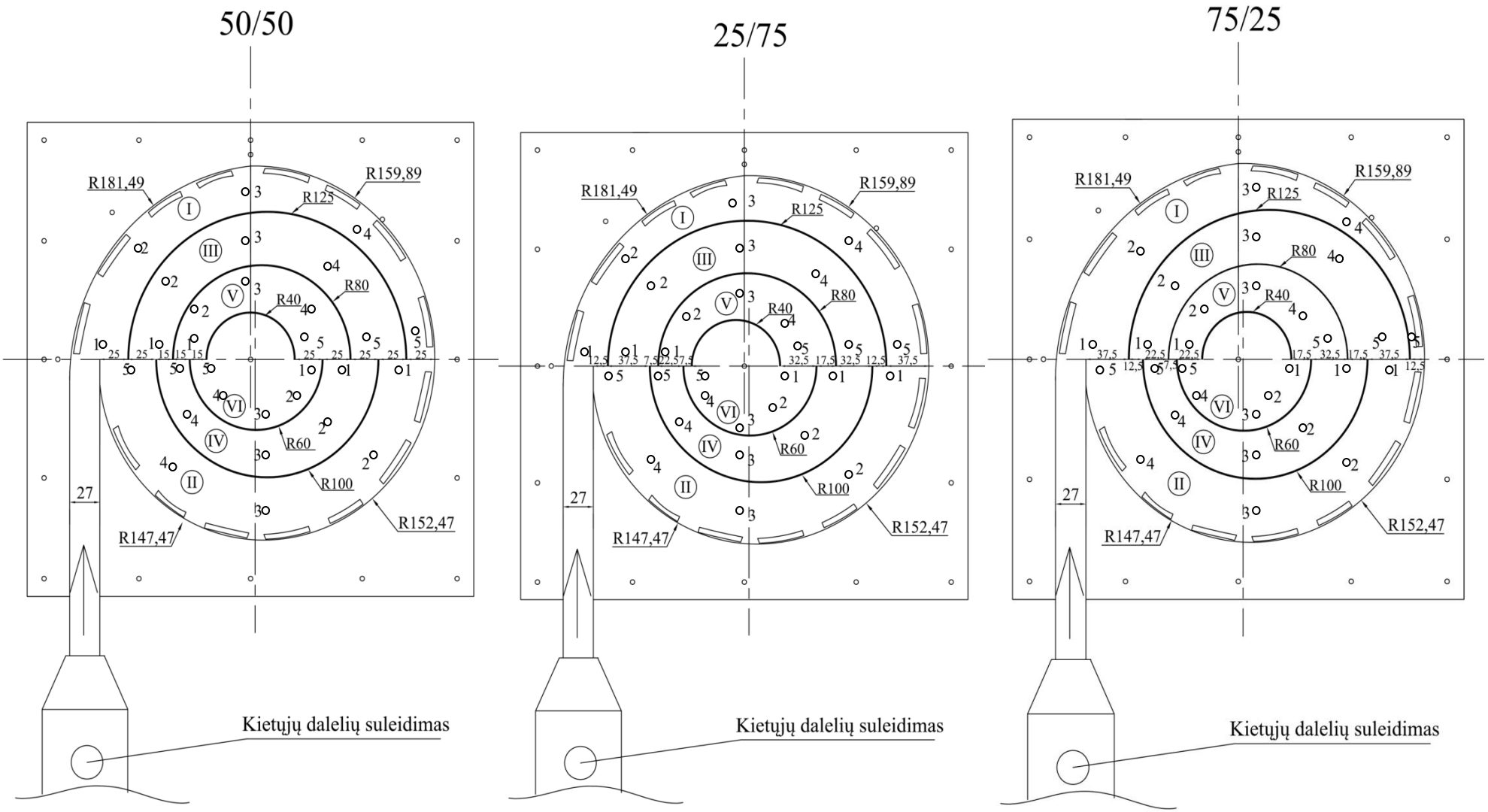
Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu vidinė konstrukcija su skirtingomis kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis pavaizduota 2.4 paveiksle.

Šešių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu vidinė konstrukcija su skirtingomis kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis pavaizduota 2.5 paveiksle.

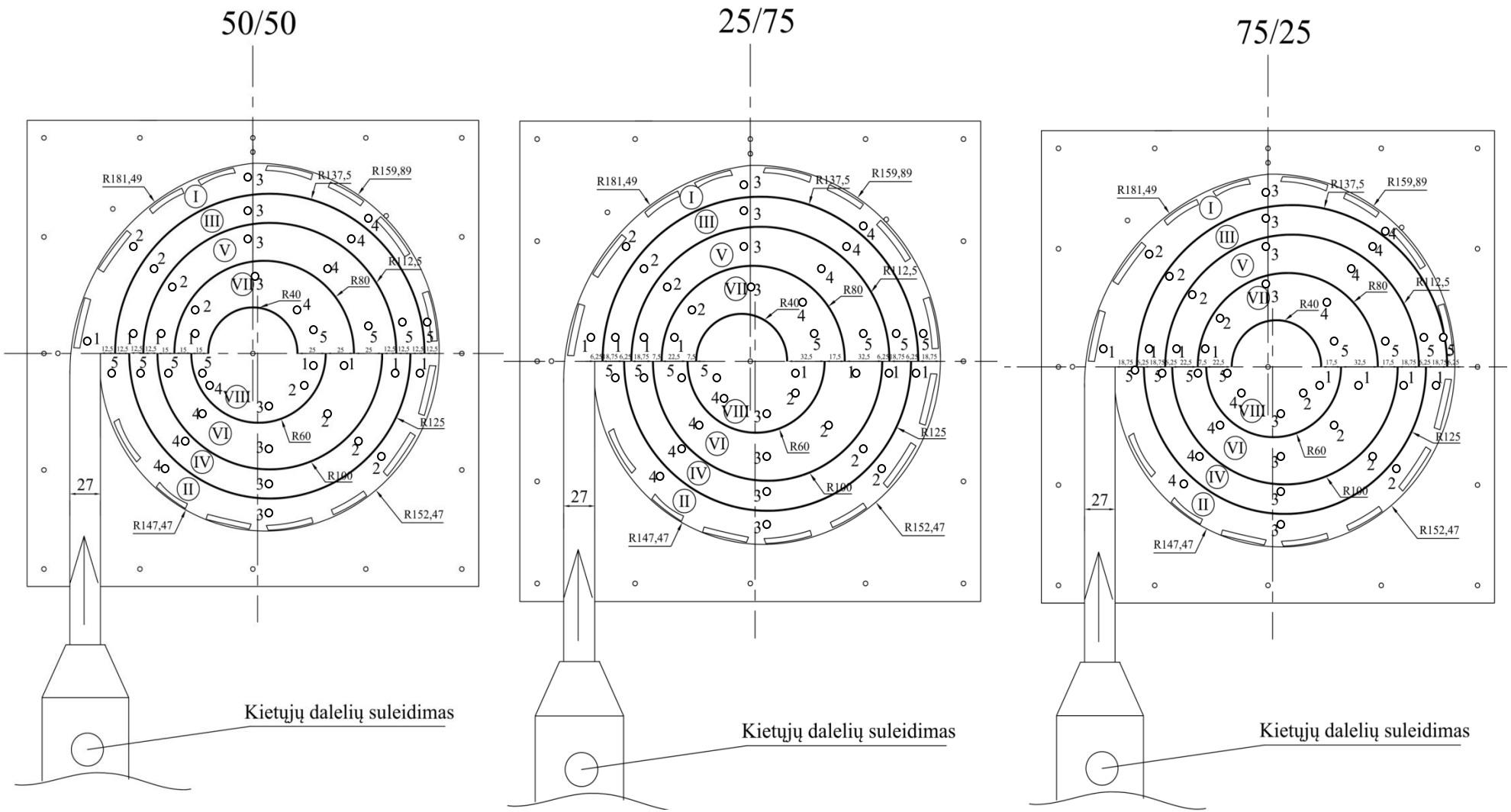
Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu vidinė konstrukcija su skirtingomis kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis pavaizduota 2.6 paveiksle.



2.4 pav. Keturių kanalų ciklono vidinė konstrukcija su kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis 50/50; 25/75; 75/25 atitinkamai: I-IV – ciklono kanalai; 1-5 – oro (dujų) srauto greičio matavimo taškai R1-R3 – kreivalinijiniai pusžiedžiai



2.5 pav. Šešių kanalų ciklono vidinė konstrukcija su kreivalinijinių puždiedžių išdėstymo padėtimis 50/50; 25/75; 75/25 atitinkamai: I-VI – ciklono kanalai; 1-5 – oro (dujų) srauto greičio matavimo taškai R1-R5 – kreivalinijiniai puždiedžiai



2.6 pav. Aštuonių kanalų ciklono vidinė konstrukcija su kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtimis 50/50; 25/75; 75/25 atitinkamai: I-VIII – ciklono kanalai; 1-5 – oro (dujų) srauto greičio matavimo taškai R1-R7 – kreivalinijiniai pusžiedžiai

Oro (dujų) srautas įtekėjęs į separavimo kamerą pirmiausia patenka į pirmąjį (I) ciklono kanalą, toliau tekėdamas oro (dujų) srautas filtruojasi per skirtingus tarpus tarp pusžiedžių (25/75; 50/50 arba 75/25) kur atitinkama oro (dujų) srauto dalis patenka į prieš tai buvusi kanalą, o kita dalis – į sekantį kanalą. Kietosios dalelės, veikiamos išcentrinių jėgų, per segmentinius plyšius, esančius prie periferinės sienelės, nukrenta į bunkerį kur yra kaupiamos. Tokiu pat principu valomas oro (dujų) srautas pereina visus kanalus ir yra pašalinamas per išeinančio oro srauto ortakį.

Oro (dujų) srauto greičio eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami, remiantis „LAND 27-98/M-07 Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas“ metodika.

Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimo metodika

Norint nustatyti daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu pasipriešinimą, būtina žinoti kaip išreiškiami dinaminis bei aerodinaminis slėgiai. Dinaminis slėgis P_D yra lygus bendro P_B ir statinio P_S slėgių skirtumui. Aerodinaminis slėgis yra dinaminio bei statinio slėgių suma (LAND 1998).

Daugiakanalio spiralinio ciklono pasipriešinimas nustatomas atliekant oro slėgio matavimus įtekėjimo bei ištekėjimo ortakiuose, prijungus diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1 (matavimo ribos 0 - 20000 kPa; paklaida ± 5 Pa). Matavimai atliekami prijungus diferencialinio slėgio matuoklį žarnelėmis prie specialiai slėgio matavimams įmontuotų antgalių (2.7 pav), esančių ant įtekėjimo ir ištekėjimo ortakių pagal oro (dujų) srauto judėjimo kryptį.

2.7 pav. Slėgio matavimams skirtas antgalis

Dinaminio slėgio eksperimentiniai tyrimai, ortakis bei dinaminio dujų slėgio matavimo taškų išdėstymas parinkti, remiantis „LAND 27-98/M-07 Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas“ metodika.

2.2. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro valymo efektyvumo nustatymo metodika

Pagrindinis eksperimentinių tyrimų uždavinys, lemiantis tolesnį įrenginio pritaikymą, - valymo efektyvumo nustatymas. Eksperimentams pasirinktas vienas labiausiai taikomų koncentracijos nustatymo metodų – svorio metodas. Minėtas metodas yra sąlyginai tikslus, santykinė metodo paklaida neviršija ± 25 %.

Tyrimams pasirinktos dalelės yra skirtingos prigimties. Tokiu būdu siekiama nustatyti geriausią nagrinėjamo oro valymo įrenginio pritaikymą, tam tikroje pramonės šakoje, atsižvelgiant į pasirinktų kietųjų dalelių fizines savybes: tankį, birumą ir dispersiškumą. Prieš atliekant bandymus, parinktų kietųjų dalelių bandiniai yra džiovinami laboratorinėje elektros krosnyje 100 ^{0}C temperatūroje iki pastovaus svorio, drėgmės pašalinimui. Esant reikalui kietosios dalelės susmulkinamos panaudojant Retsch RM200 malūną.

Išdžiovintos dalelės sijojamos per atitinkamus sietus, panaudojant vibracinį įrenginį – bandinių kratytuvą. Kadangi eksperimentiniams bandymams panaudojamos tik 0 − 20 μm dalelių dydžio dalelių mėginių dalys, bandymams yra panaudojami 20 μm akučių dydžio sietai.

Kietųjų dalelių suleidimas vyksta daleles pučiant į sistemos įtekėjimo ortakį už ventiliatoriaus srovės kryptimi, pasinaudojant purkštuku, prijungtų prie kompresoriaus, sudarančio 6 bar slėgio suspausto oro srovę. Dalelės, patekusios į ortakį, yra veikiamos oro srovės, sudaromos dėl kanalinio ventiliatoriaus (galingumas 2,2 kW) veikimo ir patenka į separavimo kamerą (2.3 pav.).

Kietųjų dalelių koncentracijos nustatymas svorio metodu

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 $dm^3/(min \times cm^2)$ (LAND 1998).

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).

Pirmiausiai paruošiami AFA−VP−20 tipo filtrai, naudojami kietųjų dalelių koncentracijoms nustatyti, pasveriant ir užrašant filtrų numerius ir pradines jų mases. Prieš tai jis 1 valandą laikomas patalpoje, kurioje bus sveriamas. Kad nebūtų sugadintas filtro darbinis paviršius, atliekant visas operacijas filtras imamas pincetu už kraštelio (LAND 1998).

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

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

• 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 (LAND 1998).

Prieš įjungiant eksperimentinį stendą, guminėmis žarnelėmis sujungiami specialūs ortakiuose įmontuoti atvamzdžiai, įeinančio ir išeinančio oro srautų ortakiuose, kurių vidinis skersmuo siekia 7, išorinis − 10 mm, ir oro filtrų patronai. Į patronus įstatomi daleles (kietąsias daleles) sulaikantys AFA−VP−20 tipo audinio filtrai (2.11 pav.), prasiurbiant per juos tam tikrą oro tūrį. Antrąja žarnele sujungiamas antrasis patrono antgalis ir aspiratoriaus įėjimas siurbiamam orui. Pirmasis filtras, sujungtas su įeinančio oro srauto ortakiu, parodo įeinančios koncentracijos reikšmę, nustatant dalelių masę svėrimo būdu. 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 (LAND 1998).

Kietųjų dalelių masės koncentracija ore apskaičiuojama pagal formulę:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0}; \tag{2.1}$$

čia:

C – dulkių koncentracija, mg/m^3;

m_1 – filtro be kietųjų dalelių masė, mg;

m_2 – filtro su kietosiomis dalelėmis masė, mg;

V_0 – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis, m^3.

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

$$V_0 = \frac{T_0 p}{p_0(273+t)} u(t_2 - t_1) = K \frac{pV}{273+t} \tag{2.2}$$

čia:

V_0 – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis, dm^3;

u – oro siurbimo greitis paimant bandinį, dm^3/min;

V – per filtrą prasiurbto oro tūris, dm^3;

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).

Per filtrą prasiurbto oro tūrį perskaičiuoti normaliosioms sąlygoms galima ir pagal paprastesnę formulę:

$$V_0 = K'V \tag{2.3}$$

čia:

V – per filtrą prasiurbto oro tūris, dm^3;

K' – perskaičiavimo koeficientas.

2.3. Eksperimentiniams tyrimams atlikti naudota įranga

Minėtiems eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo naudojama toliau išvardinta matavimo įranga ir priemonės:

1. Daugiafunkcinis matuoklis TESTO-400;
2. Pito-Prandtlio vamzdelis;
3. Aspiratorius;
4. Filtrų patronai;
5. Sparnelinis anemometras;
6. Laboratorinės elektroninės analitinės svarstyklės;
7. Filtrai AFA-VP-20-1;
8. Kietųjų dalelių padavimo purkštuvas;
9. Kietųjų dalelių bandinių paėmimo guminės žarnelės;
10. Kietųjų dalelių bandinių paėmimo guminių žarnelių antgaliai;
11. Priedelis, skirtas Pito-Prandtlio vamzdelį sujungti su daugiafunkciniu matuokliu Testo-400;
12. Diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1.

<u>Daugiafunkcinis matuoklis TESTO-400</u>

TESTO 400 yra nešiojama modulinė matavimo sistema. Šią sistemą sudaro valdymo įtaisas, analizatorius ir ėminių ėmimo zondai. Valdymo blokas rodo matavimų rezultatų duomenis. Šiuo prietaisu gali būti atliekami oro srauto greičio, slėgio, temperatūros drėgmės ir kitų parametrų matavimai, papildomai prijungiant atitinkamus zondus. Šį prietaisą lengva naudoti

dėl nedidelio svorio (0,5 kg) ir kompaktiškumo, taip pat privalumas – vienu metu galima išanalizuoti daugelio matavimų parametrus (Универсал прибор 2013).

2.8 pav. Universalus matuoklis TESTO-400

Aspiratorius M-822

Aspiratorius M-822 yra naudojamas oro bandiniams paimti. Priklausomai nuo dulkių koncentracijos oro sraute, iš kurio imami oro mėginiai, dulkių koncentracijoms nustatyti, prasiurbiama daugiau ar mažiau oro, siekiant sumažinti matavimų paklaidas. Šiuo prietaisu galima traukti iki 20 litrų oro per minutę.

2.9 pav. Aspiratorius M-822

Laboratorinės analitinės svarstyklės

Kompaktiškos, aukštos analitinės svarstyklės, skirtos filtrams sverti ir kietųjų dalelių masei nustatyti.

Šių svarstyklių privalumai: stumdomos durys, trumpas stabilizavimo laikas, apšviečiamas LCD ekranas, skaitmenų aukštis 17 mm, automatinis vidinis koregavimas (Deska 2013).

2.10 pav. Laboratorinės analitinės svarstyklės

Filtrai AFA-VP-20-1

Filtrai AFA-VP-20-1 yra skirti dispersinių priemaišų ore nustatymui. Šie filtrai naudojami kai dujų temperatūra yra iki 150°C. Prieš svėrimą filtrai 20–30 min džiovinami džiovinimo spintoje, esant 80°C temperatūrai, arba 2–3 val. laikomi eksikatoriuje. AFA-VP-20 filtrai yra 47 mm skersmens darbinio paviršiaus, filtrų pasipriešinimas oro (dujų) srautui siekia 15–18 Pa. (LAND 28-98/M-08).

2.11 pav. Filtrai AFA-VP-20 -1

Paėmus dulkių bandinius, filtrai laikomi eksikatoriuje ne mažiau kaip 2–3 val., po to pasveriami. Nustatant filtro su dulkėmis masę, būtina atsižvelgti į tuščiojo filtro masės pokytį. Bandinių paėmimo metu į darbo žurnalą įrašomi šie duomenys: data, laikas, filtro numeris, dujų bandinio siurbimo greitis, temperatūra ir praretėjimas prieš reometrą, temperatūra ir perteklinis slėgis ortakyje, dinaminis slėgis ortakyje bei atmosferos slėgis (LAND 28-98/M-08).

Filtrų patronai

Imant dulkių bandinį išorinio filtravimo būdu, naudojami filtravimo patronai. Šie laikikliai skirti įstatyti AFA-VP-20 filtrus (LAND 28-98/M-08).

2.12 pav. AFA-VP-20-1 filtrų laikikliai

Į filtravimo patroną įdedamas pasvertas filtras ir įjungiama orapūtė. Baigus vieno bandinio paėmimą, išjungiama orapūtė, filtras su dulkėmis atsargiai išimamas iš patrono ir pakeičiamas nauju (LAND 28-98/M-08).

Kietųjų dalelių padavimo purkštuvas

Atliekant spiralinio daugiakanalio ciklono bendruosius efektyvumo tyrimus, dulkių suleidimui į įtekėjimo ortakį, naudojamas kietųjų dalelių padavimo purkštuvas, pateiktas 2.7 paveiksle.

2.13 pav. Kietųjų dalelių padavimo purkštuvas

Purkštuvas veikia prijungus kompresorių. Plastikinis antgalis yra įtvirtinamas ortakyje, o per metalinį antgalį paduodamos kietosios dalelės.

2.4. Skyriaus išvados

1. Eksperimentiniai tyrimai atliekami su patobulintu naujos kartos spiraliniu daugiakanaliu ciklonu. Minėtas įrenginys gali pašalinti itin smulkias (nuo 2 μm) kietąsias daleles ir pasiekti puikų bendrą oro (dujų) valymo efektyvumą. Spiralinis daugiakanalis ciklonas gali būti plačiai pritaikytas pramonės ir energetikos objektuose gamybos ir veiklos procesuose susidarančioms kietosioms dalelėms šalinti.

2. Siekiant atlikti spiralinio daugiakanalio ciklono visapusiškus eksperimentinius tyrimus buvo paruoštos oro (dujų) srauto tyrimo metodika, slėgių tyrimo metodika, oro valymo efektyvumo nustatymo metodika.

3. Atliekant oro (dujų) srauto greičių matavimus spiralinio ciklono kanaluose buvo reguliuojami kreivalinijinių pusžiedžių kanalų tarpai, tokiu būdu buvo reguliuojamas oro tūris patenkantis iš esamo kanalo į prieš tai buvusi kanalą. Pasirinktos tris padėtys – 25/75, 50/50, 75/25.

4. Nustatant bendrą įrenginio – daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu pasipriešinimą oro slėgio matavimai atlikti įtekėjimo bei ištekėjimo ortakiuose.

5. Įrenginio oro valymo efektyvumui nustatyti buvo remtasi kietųjų dalelių koncentracijos nustatymu svoriniu metodu. Apibrėžtos eksperimentų nustatymo sąlygos bei formulės kietųjų dalelių masės koncentracijai ore apskaičiuoti.

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

3.1. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto judėjimo greičio tyrimų rezultatai ir jų analizė

Eksperimentiniai oro (dujų) srauto greičio matavimai daugiakanalio ciklono kanaluose atlikti, išdėstant matavimo taškus tokia tvarka, kad galima būtų stebėti oro (dujų) srauto greičio kitimą kiekviename kanale.

Oro (dujų) srauto greičiai buvo matuojami kiekviename kanale penkiuose taškuose (2.4, 2.5, 2.6 pav.). Gauti duomenys pateikiami greičio grafikų pavidalu, taip, kad būtų galima matyti greitį kiekviename iš matavimo taškų. Svarbu paminėti, kad eksperimentų metu keičiant kreivalinijinių pusžiedžių skaičių, oro (dujų) srauto įtekėjimo greitis į cikloną skyrėsi.

Oro (dujų) srauto judėjimo greičių šešių kanalų ciklone pasiskirstymas, esant vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono kanaluose 8 m/s

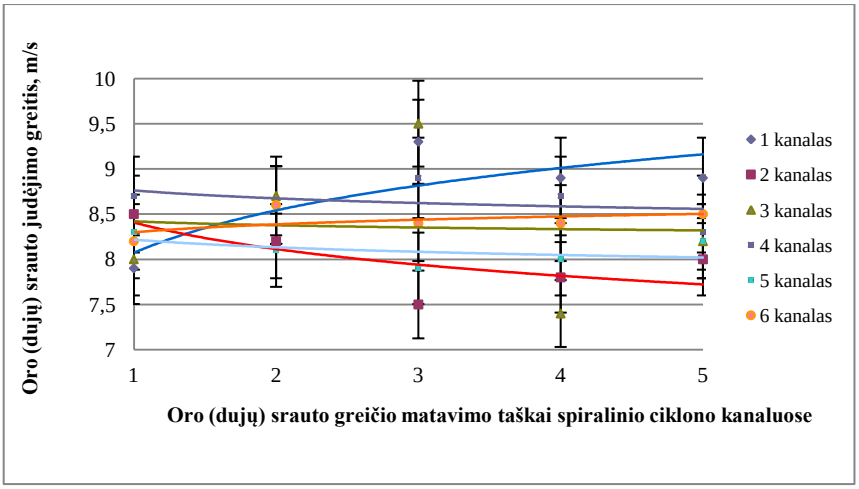
3.1, 3.2 ir 3.3 paveiksluose pateikiami oro (dujų) srauto judėjimo kiekviename kanale greičių grafikai prie nustatyto vidutinio oro (dujų) srauto judėjimo greičio 8 m/s ciklono konstrukcijos viduje.

Maksimalus vidutinis oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas I kanale, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi ir siekia 8,72 m/s. Kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas yra 50/50, maksimalus oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas taip pat I kanale ir yra 8,22 m/s, o tai yra 5,7 % mažesnis, nei esant padėčiai 25/75. Išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 padėtimi, maksimalus greitis nustatytas II kanale ir yra 8,20 m/s, kas yra 6,0 % mažiau negu 25/75 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju ir 0,3 % mažiau negu 50/50 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju.

Minimalus oro (dujų) srauto greitis 7,84 m/s nustatytas III kanale, esant 75/25 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai, prie padėties 50/50 minimalus greitis užfiksuotas V kanale ir siekia 7,92 m/s, t.y. 1,0 % didesnis nei prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 75/25. Didžiausias minimalus greitis 8,0 m/s užfiksuotas prie kreivalinijinių pusžiedžių padėties 25/75 ir yra II kanale, t.y. 1,0 % didesnis nei prie padėties 50/50 ir 2,0 % didesnis nei prie padėties 75/25.

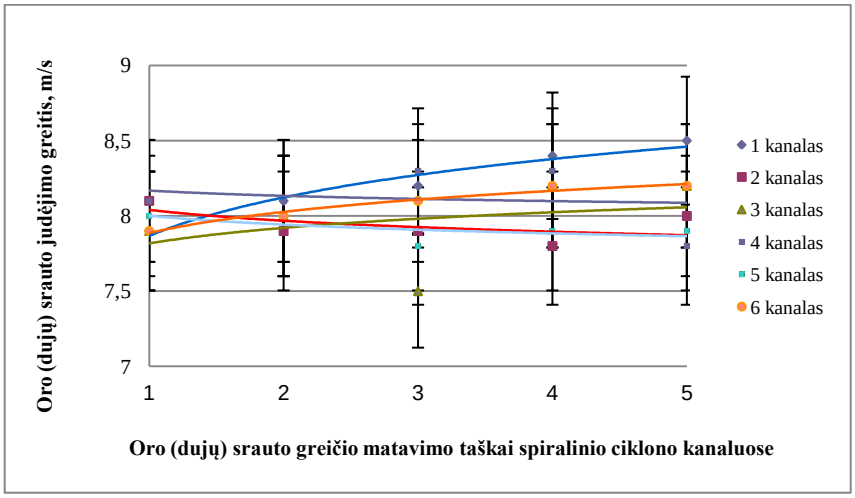
Oro (dujų) srauto netolygus didėjimas išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 ir 75/25 padėtimis pasireiškia dėl besikeičiančių kanalų skerspjūvio plotų, kas įtakoja nevienodą oro (dujų) debitą atitinkamuose matavimo taškuose. Dėl tokių konstrukcijos ypatumų matomi oro (dujų) srauto greičio skirtumai, keičiant kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis.

3.1 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai atitinkamuose taškuose visuose kanaluose, esant 25/75 pusžiedžių išdėstymo padėčiai. Kaip matyti iš grafiko, oro (dujų) srauto judėjimo greitis visuose kanaluose nežymiai didėja artėjant link ciklono ašies. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 8,72 m/s, antrajame – 8,00 m/s (9,0 % sumažėja periferinio kanalo atžvilgiu), trečiajame – 8,36 m/s (4,3 % padidėjimas), ketvirtajame – 8,64 m/s (3,2 % padidėjimas), penktajame – 8,10 m/s (3,5 % padidėjimas), šeštajame – 8,42 m/s (6,7 % sumažėjimas). Bendrai oro (dujų) srauto greitis, praėjęs visus kanalus sumažėja 4,7 %.



3.1 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 25/75

3.2 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai visuose kanaluose, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 8,22 m/s (6,1 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), antrajame – 7,94 m/s (0,8 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), trečiajame – 7,96 m/s (5,0 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), ketvirtajame – 8,12 m/s (6,4 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), penktajame – 7,92 (2,3 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), šeštajame – 8,08 m/s (4,2 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai).

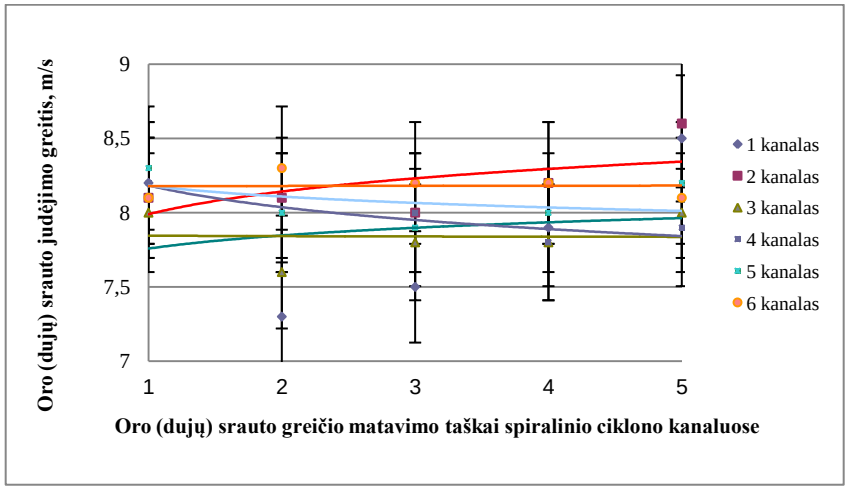


3.2 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 50/50

Oro (dujų) srauto greičio nežymus sumažėjimas stebimas visuose kanaluose. Šis sumažėjimas paremtas didesniu oro (dujų) debitu (50 %) patenkančiu į periferinį kanalą. Susidarant didesnėms kliūtims, ventiliatoriui sunkiau užtikrinti tolygų oro (dujų) srauto greitį ciklono kanaluose.

3.3 paveiksle parodyti oro (dujų) srauto greičiai, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 7,88 m/s (10,7 % mažesnis nei prie 25/75 padėties ir 4,3 % mažesnis nei prie 50/50 padėties), antrajame – 8,20 m/s (2,4 % didesnis nei prie 25/75 padėties ir 3,2 % didesnis nei prie 50/50 padėties), trečiajame – 7,84 m/s (6,6 % mažesnis nei prie 25/75 padėties ir 1,5 % mažesnis nei prie 50/50 padėties), ketvirtajame – 7,98 m/s (8,3 % mažesnis nei prie 25/75 padėties ir 1,8 % mažesnis nei prie 50/50 padėties), penktajame – 8,08 m/s (0,3 % mažesnis nei prie 25/75 padėties ir 2,0 % didesnis nei prie 50/50 padėties), šeštajame – 8,18 m/s (2,9 % mažesnis nei prie 25/75 padėties ir 1,2 % mažesnis nei prie 50/50 padėties).

Kreivalinijinius pusžiedžius išdėsčius 75/25 padėtimi, 75 % oro (dujų) debito nukreipiama į periferinį kanalą. Dėl šios priežasties oro (dujų) srauto greitis dar labiau sumažėja, lyginant su 25/75 ir 50/50 padėtimis. Taip pat reikėtų paminėti, kad oro (dujų) srauto judėjimo greičiai ciklono kanaluose skiriasi dėl nevienodo kreivalinijinių kanalų skerspjūvio ploto. Didėjant kanalo skerspjūvio plotui, oro (dujų) srauto judėjimo greitis mažėja, mažėjant kanalo skerspjūvio plotui – atitinkamai oro (dujų) srauto judėjimo greitis didėja.



3.3 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 75/25

Iš gautų eksperimento duomenų apskaičiuotas vidutinis oro (dujų) srauto greitis ciklono konstrukcijos viduje (visų kanalų vidutinis greitis). Prie padėties 25/75 vidutinis greitis gautas 8,37 m/s; esant padėčiai 50/50 – 8,04 m/s, o 75/25 – 8,03 m/s.

Lyginant oro (dujų) srauto greičius prie visų padėčių, nustatyta, kad vidutiniai greičiai kanaluose prie padėties 25/75 yra 4,1 % didesni nei esant 50/50 padėčiai ir 4,2 % nei prie 75/25 padėties, o prie 50/50 padėties 0,1 % didesni nei prie 75/25 padėties.

Prieita išvados, kad kuo didesnis oro srautas yra nukreipiamas į prieš tai buvusi kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“, tuo pačiu dėl padidėjusių pasipriešinimo jėgų greitis pradeda mažėti.

Oro (dujų) srauto judėjimo greičių šešių kanalų ciklone pasiskirstymas, esant vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono kanaluose 12 m/s

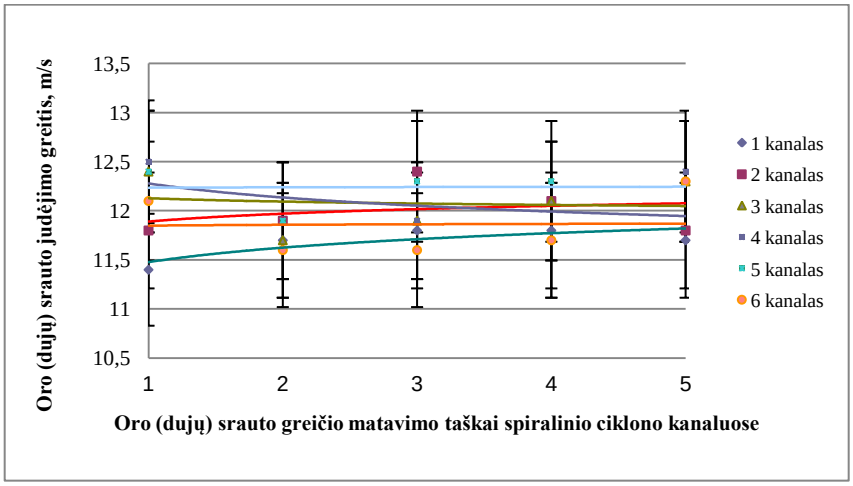
3.4, 3.5 ir 3.6 paveiksluose pateikiami oro (dujų) srauto judėjimo kiekviename kanale greičių grafikai prie nustatyto vidutinio oro (dujų) srauto judėjimo greičio 12 m/s ciklono konstrukcijos viduje.

Maksimalus vidutinis oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas V kanale, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi ir siekia 12,24 m/s. Kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas yra 50/50, maksimalus oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas taip pat IV kanale ir yra 12,28 m/s, tai yra beveik tiek pat kaip ir esant padėčiai 25/75. Kai oro (dujų) srautas pasiskirsto santykiu 75/25, maksimalus greitis nustatytas II kanale ir yra 12,44 m/s, kas yra 1,6 % daugiau negu 25/75

kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju ir 1,3 % daugiau negu 50/50 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju.

Minimalus oro (dujų) srauto greitis 11,98 m/s nustatytas I ir IV kanaluose, esant 75/25 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai, prie padėties 50/50 minimalus greitis užfiksuotas II kanale ir siekia 11,9 m/s, t.y. 0,7 % mažesnis nei prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 75/25. Minimalus greitis 11,68 m/s užfiksuotas prie kreivalinijinių pusžiedžių padėties 25/75 ir yra I kanale, t.y. 1,8 % mažesnis nei prie padėties 50/50 ir 2,5 % mažesnis nei prie padėties 75/25.

Kaip ir prieš tai nagrinėtu atveju (kai nagrinėtas fiksuotas 8 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje) oro (dujų) srauto netolygus didėjimas išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 ir 75/25 padėtimis pasireiškia dėl besikeičiančių kanalų skerspjūvio plotų, kas įtakoja nevienodą oro (dujų) debitą atitinkamuose matavimo taškuose. Dėl tokių konstrukcijos ypatumų matomi oro (dujų) srauto greičio skirtumai, keičiant kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis.

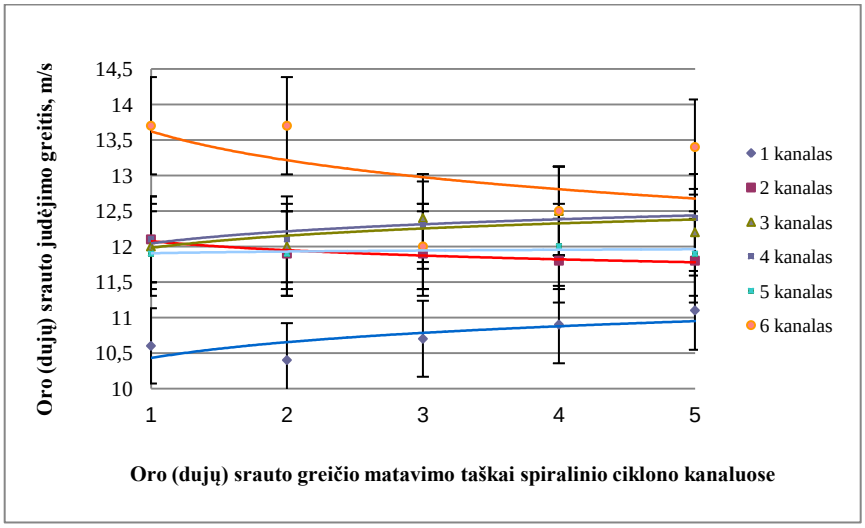


3.4 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 25/75

3.4 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai atitinkamuose taškuose visuose kanaluose, esant 25/75 pusžiedžių išdėstymo padėčiai. Kaip matyti iš grafiko, oro (dujų) srauto judėjimo greitis visuose kanaluose nežymiai didėja artėjant link ciklono ašies. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 11,68 m/s, antrajame – 12,00 m/s (2,7 % padidėja periferinio kanalo atžvilgiu), trečiajame – 12,08 m/s (0,7 % padidėjimas), ketvirtajame – 12,08 m/s (išlieka toks pats), penktajame – 12,24

m/s (1,3 % padidėjimas), šeštajame – 11,86 m/s (3,1 % sumažėjimas). Bendrai oro (dujų) srauto greitis, praėjęs visus kanalus padidėja 1,6 %.

3.5 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai visuose kanaluose, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 10,74 m/s, antrajame – 11,90 m/s (0,8 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), trečiajame – 12,22 m/s (1,2 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai), ketvirtajame – 12,28 m/s (1,7 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), penktajame – 11,94 (2,5 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), šeštajame – 13,06 m/s (3,4 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai).



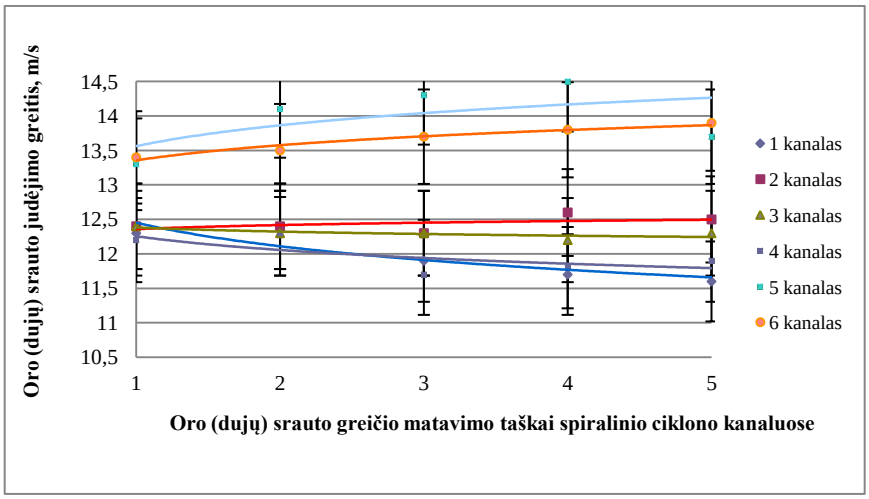
3.5 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 50/50

Oro (dujų) srauto greičio nežymus sumažėjimas stebimas visuose kanaluose. Šis sumažėjimas taip pat paremtas didesniu oro (dujų) debitu (50 %) patenkančiu į periferinį kanalą. Susidarant didesnėms kliūtims, ventiliatoriui sunkiau užtikrinti tolygų oro (dujų) srauto greitį ciklono kanaluose.

3.6 paveiksle parodyti oro (dujų) srauto greičiai, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 11,98 m/s, antrajame – 12,44 m/s, trečiajame – 12,30 m/s, ketvirtajame – 11,98 m/s, penktajame – 13,98 m/s, šeštajame – 13,66 m/s.

Kreivalinijinius pusžiedžius išdėsčius 75/25 padėtimi, 75 % oro (dujų) debito nukreipiama į periferinį kanalą. Dėl šios priežasties oro (dujų) srauto greitis dar labiau sumažėja, lyginant su 25/75 ir 50/50 padėtimis. Taip pat reikėtų paminėti, kad oro (dujų) srauto judėjimo greičiai ciklono kanaluose skiriasi dėl nevienodo kreivalinijinių kanalų skerspjūvio ploto.

Didėjant kanalo skerspjūvio plotui, oro (dujų) srauto judėjimo greitis mažėja, mažėjant kanalo skerspjūvio plotui – atitinkamai oro (dujų) srauto judėjimo greitis didėja.



3.6 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 75/25

Iš gautų eksperimento duomenų apskaičiuotas vidutinis oro (dujų) srauto greitis ciklono konstrukcijos viduje (visų kanalų vidutinis greitis). Prie padėties 25/75 vidutinis greitis gautas 11,99 m/s; esant padėčiai 50/50 – 12,13 m/s, o 75/25 – 12,06 m/s.

Lyginant oro (dujų) srauto greičius prie visų padėčių, nustatyta, kad vidutiniai oro (dujų\0 srauto judėjimo greičiai kanaluose prie padėties 25/75 yra 1,15 % mažesni nei esant 50/50 padėčiai ir 0,6 % didesni nei prie 75/25 padėties, o prie 50/50 padėties 0,6 % didesni nei prie 75/25 padėties.

Prieita išvados, kad kuo didesnis oro srautas yra nukreipiamas į prieš tai buvusi kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“, tuo pačiu dėl padidėjusių pasipriešinimo jėgų greitis pradeda mažėti.

Oro (dujų) srauto judėjimo greičių šešių kanalų ciklone pasiskirstymas, esant vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono kanaluose 16 m/s

3.7, 3.8 ir 3.9 paveiksluose pateikiami oro (dujų) srauto judėjimo kiekviename kanale greičių grafikai prie nustatyto vidutinio oro (dujų) srauto judėjimo greičio 16 m/s ciklono konstrukcijos viduje.

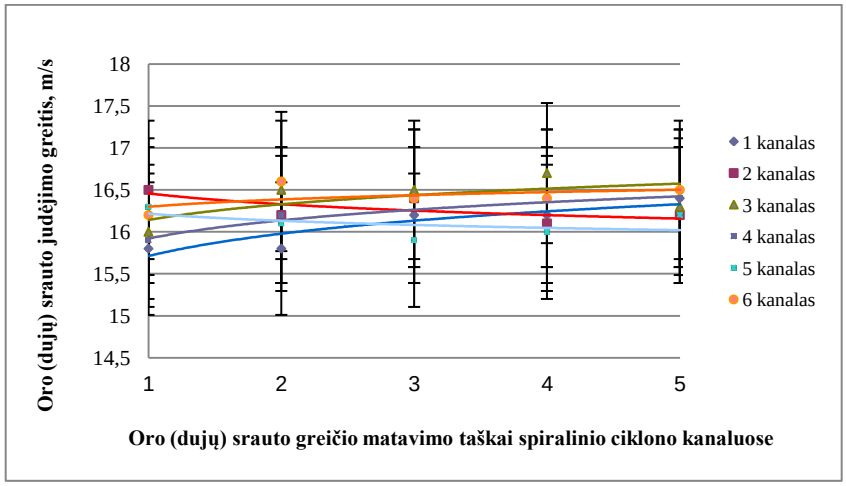
Maksimalus vidutinis oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas VI kanale, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi ir siekia 16,42 m/s. Kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas

yra 50/50, maksimalus oro (dujų) srauto greitis užfiksuotas taip pat VI kanale ir yra 16,82 m/s. Kai oro (dujų) srautas pasiskirsto santykiu 75/25, maksimalus greitis nustatytas VI kanale ir yra 16,18 m/s.

Minimalus oro (dujų) srauto greitis 15,80 m/s nustatytas III kanale, esant 75/25 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai, prie padėties 50/50 minimalus greitis užfiksuotas I kanale ir siekia 15,88 m/s, t.y. 0,5 % didesnis nei prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 75/25. Minimalus greitis 16,08 m/s užfiksuotas prie kreivalinijinių pusžiedžių padėties 25/75 ir yra I kanale, t.y. 1,3 % didesnis nei prie padėties 50/50 ir 1,8 % didesnis nei prie padėties 75/25.

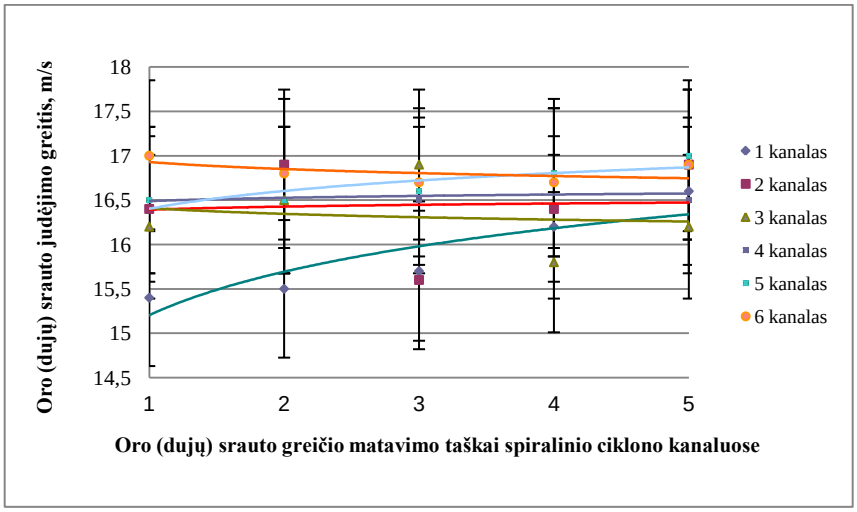
Kaip ir prieš tai nagrinėtais atvejais (kai nagrinėtas fiksuotas 8 ir 12 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje) oro (dujų) srauto netolygus didėjimas išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 ir 75/25 padėtimis pasireiškia dėl besikeičiančių kanalų skerspjūvio plotų, kas įtakoja nevienodą oro (dujų) debitą atitinkamuose matavimo taškuose. Dėl tokių konstrukcijos ypatumų matomi oro (dujų) srauto greičio skirtumai, keičiant kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis.

3.7 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai atitinkamuose taškuose visuose kanaluose, esant 25/75 pusžiedžių išdėstymo padėčiai. Kaip matyti iš grafiko, oro (dujų) srauto judėjimo greitis visuose kanaluose nežymiai didėja artėjant link ciklono ašies. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 16,08 m/s, antrajame – 16,28 m/s (1,2 % padidėja periferinio kanalo atžvilgiu), trečiajame – 16,40 m/s (0,7 % padidėjimas), ketvirtajame – 16,22 m/s (1,1 % padidėja periferinio kanalo atžvilgiu), penktajame – 16,10 m/s (0,7 % sumažėjimas), šeštajame – 16,42 m/s (1,9 % padidėjimas). Bendrai oro (dujų) srauto greitis, praėjęs visus kanalus padidėja 4,1 %.



3.7 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 25/75

3.8 paveiksle pateikti oro (dujų) srauto greičiai visuose kanaluose, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 15,88 m/s (1,2 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), antrajame – 16,44 m/s (1,0 % mažesnis nei esant 25/75 padėčiai), trečiajame – 16,32 m/s (0,5 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai), ketvirtajame – 16,54 m/s (2,0 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai), penktajame – 16,68 (3,6 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai), šeštajame – 16,82 m/s (2,4 % didesnis nei esant 25/75 padėčiai).

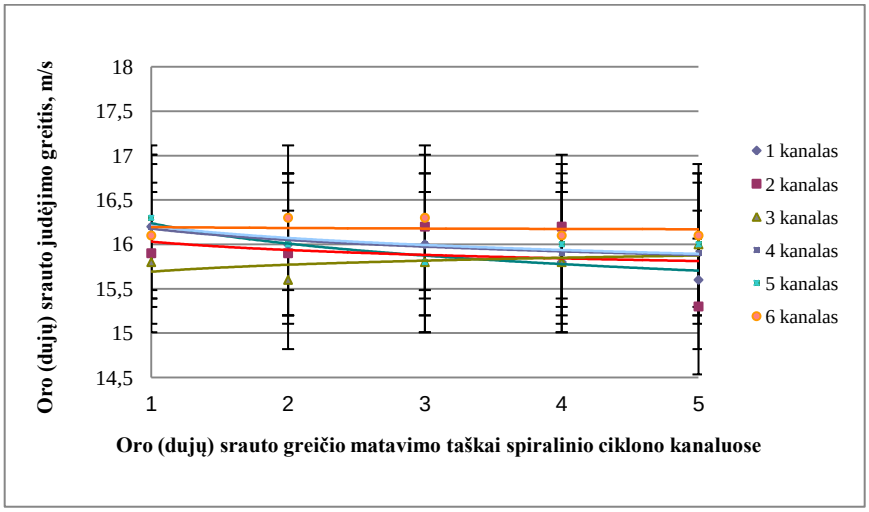


3.8 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 50/50

Oro (dujų) srauto greičio nežymus sumažėjimas stebimas visuose kanaluose. Šis sumažėjimas taip pat paremtas didesniu oro (dujų) debitu (50 %) patenkančiu į periferinį kanalą. Susidarant didesnėms kliūtims, ventiliatoriui sunkiau užtikrinti tolygų oro (dujų) srauto greitį ciklono kanaluose.

3.9 paveiksle parodyti oro (dujų) srauto greičiai, išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 padėtimi. Pirmajame kanale vidutinis greitis siekia 15,92 m/s, antrajame – 15,90 m/s, trečiajame – 15,80 m/s, ketvirtajame – 16,00 m/s, penktajame – 16,02 m/s, šeštajame – 16,18 m/s.

Kreivalinijinius pusžiedžius išdėsčius 75/25 padėtimi, 75 % oro (dujų) debito nukreipiama į periferinį kanalą. Dėl šios priežasties oro (dujų) srauto greitis dar labiau sumažėja, lyginant su 25/75 ir 50/50 padėtimis. Taip pat reikėtų paminėti, kad oro (dujų) srauto judėjimo greičiai ciklono kanaluose skiriasi dėl nevienodo kreivalinijinių kanalų skerspjūvio ploto. Didėjant kanalo skerspjūvio plotui, oro (dujų) srauto judėjimo greitis mažėja, mažėjant kanalo skerspjūvio plotui – atitinkamai oro (dujų) srauto judėjimo greitis didėja.



3.9 pav. Oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas ciklono kanaluose, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui ir kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 75/25

Iš gautų eksperimento duomenų apskaičiuotas vidutinis oro (dujų) srauto greitis ciklono konstrukcijos viduje (visų kanalų vidutinis greitis). Prie padėties 25/75 vidutinis greitis gautas 16,25 m/s; esant padėčiai 50/50 – 16,45 m/s, o 75/25 – 15,97 m/s.

Prieita išvados, kad kuo didesnis oro srautas yra nukreipiamas į prieš tai buvusi kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“, tuo pačiu dėl padidėjusių pasipriešinimo jėgų greitis pradeda mažėti.

Nežymūs nukrypimai taip pat gali būti sąlygojami ištraukimo sistemos ventiliatoriaus, kuriuo sukuriama nedidelė oro trauka, sujungus su nagrinėjamuoju ciklono stendu (Chlebnikovas, Baltrėnas 2011).

3.2. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimų rezultatai ir jų analizė

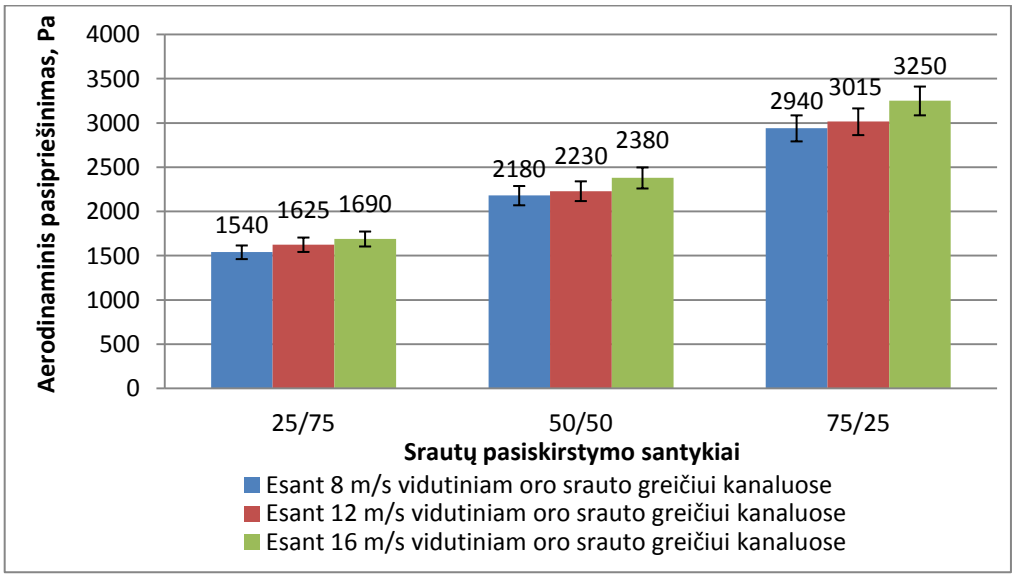
Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu pasipriešinimas buvo nustatomas atliekant oro slėgio matavimus įtekėjimo bei ištekėjimo ortakiuose, prijungus diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1.

Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimų rezultatai

Atlikus keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, esant 8 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui, nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas, esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, ir

siekia 1690 (± 5 %) Pa. Esant didesniam grįžtamajam (periferiniam) srautui, kai srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, nustatytas pasipriešinimas yra beveik 10,5 % mažesnis už 50/50 srautų pasiskirstymo santykio atveju nustatytą vertę. Nagrinėjant srautų pasiskirstymo santykį 25/75, kai tranzitinio (judančio link įrenginio ašies) srauto dalis yra didesnė už grįžtamąjį srautą (25/75 srautų pasiskirstymo santykis) aerodinaminis pasipriešinimas gautas mažiausias, lygus 1260 (± 5 %) Pa.

Ištyrus daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu 12 m/s vidutinio oro (dujų) srauto greičio atvejį, nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas, esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, pasipriešinimas lygus 2380 (± 5 %) Pa. Esant vienodiems srauto pasiskirstymo santykiams (50/50 srautų pasiskirstymo santykiai), aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra mažesnė 6,7 %, lyginant su vyraujančio periferinio srauto santykiu (75/25 srautų pasiskirstymo santykiai). Kai periferinio oro srauto dalis yra mažesnė už tranzitinį, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiams, nustatytas pasipriešinimas yra mažiausias esant 12 m/s vidutiniam oro srauto greičiui kanaluose ir lygus 2180 (± 5 %) Pa. Pastarojo vertė yra 9,2 % mažesnė už 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejį ir 2,3 % – 50/50 atveju.



3.10 pav. Keturių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose

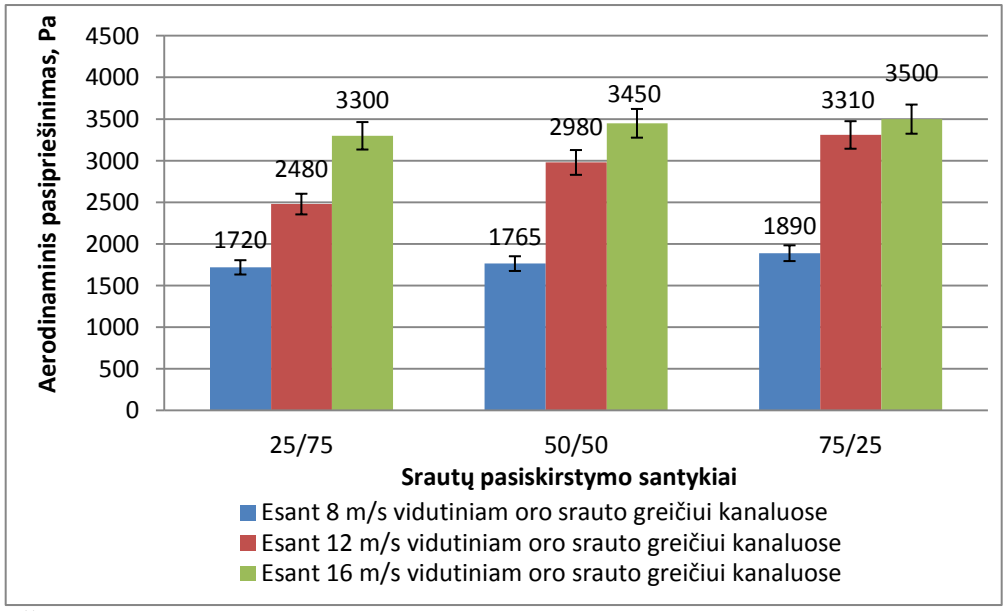
Pagal nustatytus keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminius pasipriešinimus galima teigti, kad didžiausia parametro vertė, esant 16 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto greičiui, yra lygi 3250 (± 5 %) Pa. Maksimalus pasipriešinimas sukuriamas esant 75/25 tranzitinio/periferinio srautų pasiskirstymo santykio atveju, kai srautų pasiskirstant vyrauja

periferinis srautas. Esant 50/50 tranzitinio/periferinio srautų pasiskirstymo santykio atvejui, kai grįžtamojo srauto dalis į ankstesnius kanalus yra lygi srautams, judantiems link įrenginio ašies į sekančius kanalus, tuo atveju nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra 7,8 % mažesnis ir lygus 3015 (± 5 %) Pa. Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant didesnei tranzitinio oro (dujų) srauto daliai (25/75 srautų pasiskirstymo santykiai). Gautas 2940 (± 5 %) Pa aerodinaminis pasipriešinimas, kuris 75 Pa yra mažesnis nei esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiams.

Išnagrinėjus keturių kanalų ciklono aerodinaminius pasipriešinimus nustatyta, kad didžiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra gauta esant maksimaliam 16 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto greičiui kanaluose, išdėstant kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 tranzitinio/periferinio srauto pasiskirstymo santykiu. Tokiu atveju gautas 3250 (± 5 %) Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra 10,5 % didesnis nei atvejis, kai yra išdėstoma 25/75 srautų pasiskirstymo santykiais.

Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas gautas esant mažiausiems oro (dujų) srauto greičiams (vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis kanaluose 8 m/s) bei 25/75 srautų pasiskirstymo santykiams. Mažiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra lygi 1540 (± 5 %) Pa (8 m/s vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis kanaluose, 25/75 srautų pasiskirstymo santykiai).

Šešių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimų rezultatai



3.11 pav. Šešių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose

Atlikus šešių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, kai oro srauto pasiskirstymo santykis skirtingas, nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto judėjimui ciklono kanaluose, nepriklausomai nuo kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties ir siekia 3300 Pa prie 25/75 padėties, 3450 Pa prie 50/50 padėties ir 3500 Pa prie 75/25 padėties (3.5 pav.).

Esant mažesniam 12 m/s oro srauto vidutiniam judėjimo greičiui ciklono kanaluose, kai srautų pasiskirstymo santykiai yra tokie patys, nustatytas pasipriešinimas visais atvejais yra mažesnis už pasipriešinimą, nustatytą prie vidutinio oro srauto judėjimo greičio 16 m/s. Nagrinėjant atvejį, kai oro srauto vidutinis judėjimo greitis 8 m/s aerodinaminis pasipriešinimas gautas mažiausias ir yra lygus 1720 Pa prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 25/75, 1765 Pa prie padėties 50/50 ir 1890 Pa, esant padėčiai 75/25 (3.11 pav.).

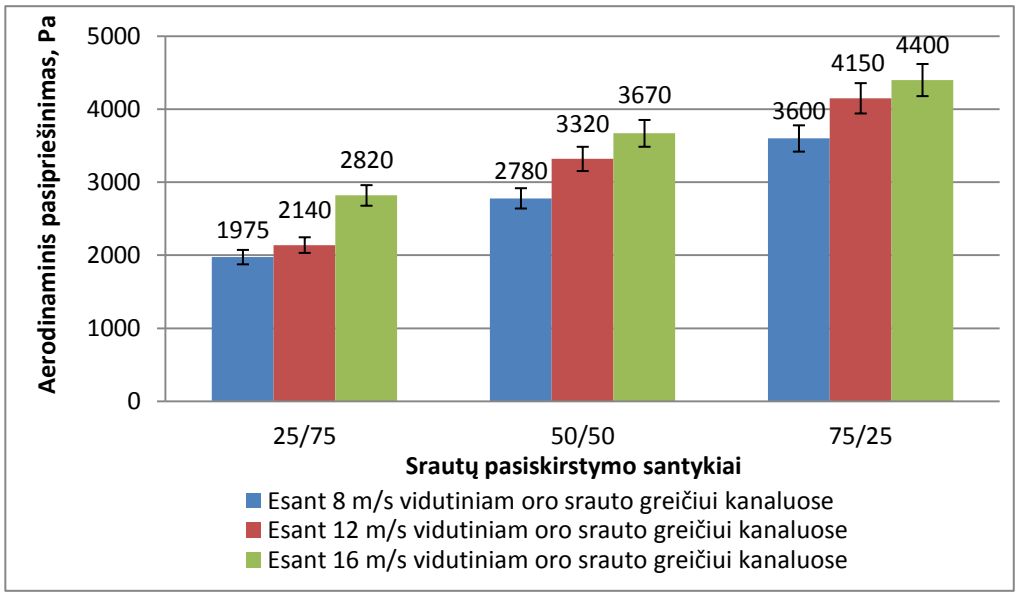
Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu slėgių tyrimų rezultatai

Atlikus aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, esant minimaliam 8 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto greičiui, nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, ir siekia 2820 (± 5 %) Pa. Esant mažesniam periferiniam srautui – 25/75 srauto pasiskirstymo santykis, nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra mažesnis 8,4 %, lyginant su 50/50 srauto pasiskirstymo santykio atveju. Nagrinėjant atvejį, kai tranzitinio (judančio link įrenginio ašies) oro (dujų) srauto dalis yra mažesnė už periferinį (75/25 srauto pasiskirstymo santykis) aerodinaminis pasipriešinimas gaunamas didžiausias, lygus 2820 (± 5 %) Pa.

Nagrinėjant atvejį, kai buvo nustatytas 12 m/s vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis kanaluose, ištirta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, ir siekia 3670 (± 5 %) Pa. Esant vienodam 50/50 tranzitinio/periferinio srauto pasiskirstymo santykiui, periferinio oro (dujų) srauto dalis yra mažesnė nei esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra 10,5 % mažesnis ir lygus 3320 (± 5 %) Pa. Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra nustatytas, esant didesnei tranzitinio srauto daliai (25/75 srauto pasiskirstymo santykis), kuri juda link įrenginio ašies. Gautas 2780 (± 5 %) Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra 32,0 % mažesnis nei esant maksimalaus aerodinaminio pasipriešinimo, kai buvo nustatytas 75/25 srauto pasiskirstymo santykis, esant 12 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greičiui aštuonių kanalų ciklone.

Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas, esant didžiausiam 16 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto greičiui, nustatytas esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui, kai didžioji dalis srauto grįžta į ankstesnius kanalus, nustatyta vertė siekia 4400 (± 5 %) Pa. Esant vienodiems 50/50 periferinio bei tranzitinio srauto pasiskirstymo santykiams, periferinio srauto dalis yra mažesnė nei esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykio atveju, nustatytas aerodinaminis pasipriešinimas yra 6,0 % mažesnis ir lygus 4150 (± 5 %) Pa. Mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant didesnei tranzitinio srauto daliai (25/75 srauto pasiskirstymo santykis). Gautas 3600 (± 5 %) Pa aerodinaminis pasipriešinimas yra 22,2 % mažesnis nei esant maksimalaus aerodinaminio pasipriešinimo 16 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greičiui šešių kanalų ciklone, kai srauto pasiskirstymo santykis 75/25.

Išnagrinėjus aštuonių kanalų ciklono su spiralinių korpusu aerodinaminius pasipriešinimus nustatyta, kad didžiausia iš nagrinėtų atvejų aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra gauta esant 16 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto greičiui ciklono kanaluose, nustačius nevienodus 75/25 srauto pasiskirstymo santykius, aerodinaminis pasipriešinimas lygus 4400 (± 5 %) Pa.



3.12 pav. Aštuonių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo srauto pasiskirstymo santykio, esant 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s vidutiniams oro (dujų) srauto greičiams ciklono kanaluose

Mažiausias pasipriešinimas yra gautas esant mažiausiems greičiams (vidutinis oro (dujų) srauto greitis ciklono kanaluose 8 m/s) bei nustačius 25/75 srauto pasiskirstymo santykį, kai periferinis srautas yra mažesnis už tranzitinį srautą, kuris juda link įrenginio ašies į tolimesnius

kanalus. Mažiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė yra lygi 1975 (± 5 %) Pa (8 m/s vidutinis oro (dujų) srauto greitis kanaluose, 25/75 srauto pasiskirstymo santykis).

3.3. Daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu oro valymo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto valymo efektyvumai nuo kietųjų dalelių (x<20 μm), esant skirtingiems oro (dujų) srauto tūrio pasiskirstymo santykiams (25/75, 50/50, 75/25) ir skirtingiems oro (dujų) srauto judėjimo greičiams ciklono konstrukcijos viduje (8 m/s, 12 m/s, 16m/s) pateikti 3.1 lentelėje.

Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu geriausias oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas nustatytas, kai oro (dujų) srautas pasiskirsto 75/25 santykiu, t.y. bendras efektyvumas vidutiniškai apie 7,4 % didesnis nei prie srautų pasiskirstymo santykio 50/50 ir apie 13,0 % didesnis nei prie 25/75.

Išmatavus kietųjų granito dalelių (x<20 μm) koncentracijas prieš ir po valymo (t.y. įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose), apskaičiuoti oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumai siekia 74,8 % - 89,7 %. Geriausiai kietosios granito dalelės yra pašalinamos kai oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, prasčiausiai – 25/75. Vertinant vidutinį oro (dujų) srauto judėjimo greitį ciklono konstrukcijos viduje, nustatyta, kad geriausiai valymo procesas vyksta prie vidutinio 12 m/s greičio.

3.1 lentelė. Keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas, esant skirtingiems parametrams

Vid. oro (dujų) srauto greitis	**8 m/s**	**12 m/s**	**16 m/s**
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 25/75			
Granitas (x<20 μm)	75,3	80,1	74,8
Mediena (x<20 μm)	68,4	76,8	73,0
Medienos pelenai (x<20 μm)	63,9	70,6	67,9
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 50/50			
Granitas (x<20 μm)	82,1	82,3	77,9
Mediena (x<20 μm)	77,7	80,9	77,9
Medienos pelenai (x<20 μm)	73,8	76,5	72,2
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 75/25			
Granitas (x<20 μm)	87,4	89,7	83,5
Mediena (x<20 μm)	84,4	88,6	85,4
Medienos pelenai (x<20 μm)	80,1	86,7	82,2

Kietųjų medienos dalelių pašalinimo iš oro (dujų) srauto efektyvumas siekia 68,4 % - 88,6 %. Prasčiausiai kietosios medienos dalelės pašalinamos, esant srautų pasiskirstymo santykiui 25/75, geriausiai, kaip ir granito atveju, – 75/25. Lyginant medienos kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumą iš oro (dujų) srauto su granito kietųjų dalelių pašalinimu – geriau yra išvalomas oro (dujų) srautas nuo kietųjų granito dalelių.

Kietosios medienos pelenų dalelės keturių kanalų spiraliniame ciklone yra pašalinamos 63,9 % - 86,7 % efektyvumu, t.y. prasčiausiai granito ir medienos kietųjų dalelių atžvilgiu. Efektyviausiai kietosios medienos pelenų dalelės yra pašalinamos kai oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, o vidutinis oro dujų srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje yra 12 m/s.

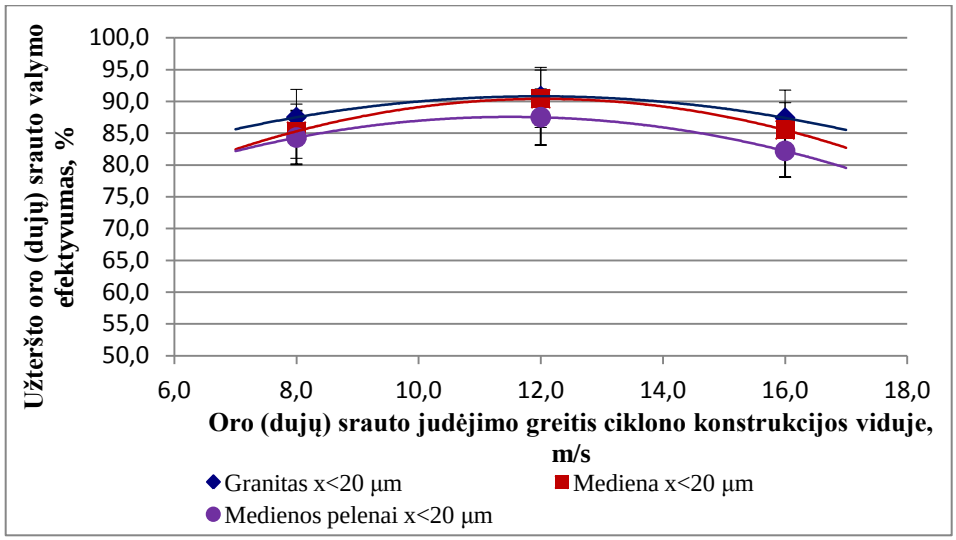
Apibendrinant eksperimentinių tyrimu rezultatus su keturių kanalų spiraliniu ciklonu, prieita išvados, kad visų nagrinėtų kietųjų dalelių atžvilgiu efektyviausiai valymo procesas vyksta kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 75/25 padėtimi, t.y. oro (dujų) srautas pasiskirsto 75 % periferinio ir 25 % tranzitinio oro (dujų) srauto santykiu. Optimalus vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklone 12 m/s visais kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atvejais. Taip pat nustatyta, kad minėtas oro valymo įrenginys labiausiai tinka šalinti kietąsias granito daleles, blogiausiai šalinamos kietosios medienos pelenų dalelės.

Atlikus eksperimentinius tyrimus su kietųjų granito dalelėmis ($x<20$ μm) bei nustačius koncentracijas prieš ir po valymo (įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose), apskaičiuotas didžiausias oro (dujų) išvalymo efektyvumas, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, kai oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 25/75 siekė 90,8 %, prie oro (dujų) srauto judėjimo greičio ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie greičių 8 m/s ir 16 m/s užfiksuoti oro (dujų) valymo efektyvumai nuo kietųjų granito dalelių mažesni ir atitinkamai siekia 87,5 % ir 87,4 % (3.13 pav.).

Kietosios medienos dalelės pašalinamos geriausiai, esant oro (dujų) srauto judėjimo greičiui 12 m/s ciklono konstrukcijos viduje – 90,4 %, prie greičių 8 m/s ir 16 m/s oro (dujų) valymo efektyvumas atitinkamai siekia - 85,3 % ir 85,5 %.

Kietųjų medienos pelenų dalelių ($x<20$ μm) didžiausias išvalymo efektyvumas, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, kai oro (dujų) srautas pasiskirsto santykiu 25/75, siekė 87,5 %, prie oro (dujų) srauto judėjimo greičio ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie oro (dujų) srauto judėjimo greičių 8 m/s ir 16 m/s ciklono konstrukcijos viduje, oro (dujų) valymo efektyvumas sumažėja ir atitinkamai yra 85,4 % ir 84,0 % (3.13 pav.). Lyginant su keturių kanalų spiraliniu

ciklonu kietosios dalelės 14,5 % geriau pašalinamos šešių kanalų spiraliniame ciklone, kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 25/75.



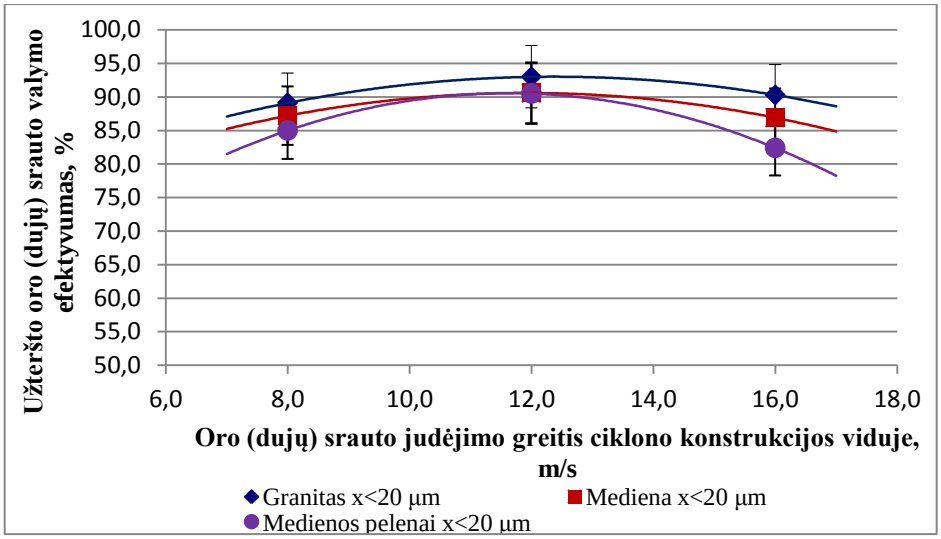
3.13 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 µm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 25/75

Kietųjų granito dalelių (x<20 µm) pašalinimo efektyvumas, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, siekė 93,0 %, prie oro (dujų) srauto judėjimo greičio ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie greičių 8 m/s ir 16 m/s oro (dujų) valymo efektyvumai nuo kietųjų granito dalelių mažesni ir atitinkamai siekia 89,1 % ir 90,3 %. Lyginant su šešių kanalų spiraliniu ciklonu, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi, bendras oro (dujų) valymo efektyvumas nuo kietųjų granito dalelių yra 2,2 % didesnis, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 50/50 padėtimi (3.14 pav.).

Kietųjų medienos dalelių (x<20 µm) didžiausias išvalymo efektyvumas, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, siekė 90,6 %, esant oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie oro (dujų) srauto judėjimo greičių 8 m/s ir 16 m/s - oro (dujų) valymo efektyvumas sumažėja iki 87,2 % ir 86,9 % atitinkamai (3.14 pav.).

Kietųjų medienos pelenų dalelių (x<20 µm) didžiausias išvalymo efektyvumas, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, siekė 90,5 %, esant oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie oro (dujų) srauto judėjimo greičių 8 m/s ir 16 m/s ciklono konstrukcijos viduje oro (dujų) valymo

efektyvumas sumažėja ir atitinkamai yra 85,0 % ir 82,4 %. Lyginant su šešių kanalų spiraliniu ciklonu, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi, bendras vidutinis oro (dujų) valymo efektyvumas yra apie 1,5 % didesnis, esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui kai oro (dujų) srauto santykis 50/50 (3.8 pav.). Lyginant su keturių kanalų spiraliniu ciklonu kietosios dalelės 10,4 % geriau pašalinamos šešių kanalų spiraliniame ciklone, kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 50/50.



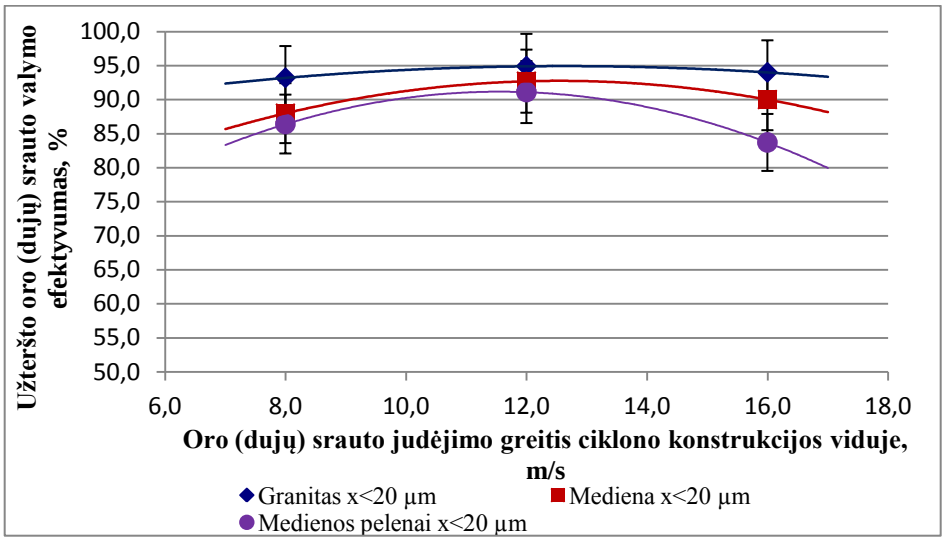
3.14 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 µm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 50/50

Kietosios granito dalelės (x<20 µm), esant oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykiui 75/25 geriausiai pašalinamos – 94,9 % efektyvumu, esant vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui 12 m/s ciklono konstrukcijos viduje. Esant 8 m/s ir 16 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greičiams, oro (dujų) valymo efektyvumai nuo kietųjų granito dalelių mažesni ir atitinkamai yra 93,2 % ir 94,0 % (3.15 pav.).

Atliekant eksperimentinius tyrimus su kietosiomis medienos dalelėmis, nustatyta, kad esant šešių kanalų spiraliniam ciklonui, efektyviausiai – 92,7 % - valymo procesas vyksta prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 75/25, kai vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis 12 m/s. Prie greičių 8 m/s ir 16 m/s valymo efektyvumas prastesnis – 88,0 % ir 90,0 % atitinkamai (3.15 pav).

Kietosios medienos pelenų dalelės (x<20 µm) efektyviausiai – 91,1 % sugaudomos šešių kanalų spiraliniame ciklone išdėsčius kreivalinijinius pusžiedžius 75/25 padėtimi, kai oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Prie oro (dujų) srauto judėjimo

greičių 8 m/s ir 16 m/s oro (dujų) valymo efektyvumas sumažėja ir atitinkamai siekia 86,4 % ir 83,7 % (3.15 pav). Lyginant su keturių kanalų spiraliniu ciklonu kietosios dalelės 5,1 % geriau pašalinamos šešių kanalų spiraliniame ciklone, kai kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 75/25.



3.15 pav. Oro (dujų) valymo nuo kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas x<20 µm, efektyvumai, esant skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams šešių kanalų ciklono konstrukcijos viduje, prie oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykio 75/25

Vertinant bendrą vidutinį oro (dujų) srauto valymo efektyvumą, nustatyta, kad visų rūšių tyrinėtos kietosios dalelės efektyviausiai pašalinamos iš oro (dujų) srauto, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 75/25 padėtimi, t.y. kai periferinio srauto dalį sudaro 75 %, o tranzitinę – 25 % atitekančio oro (dujų) srauto. Tai paaiškinama didžiausia grįžtamojo oro (dujų) srauto sudaroma oro užuolaida, kuri papildomai filtruoja užterštą orą (dujas).

Geriausias oro (dujų) srauto valymo efektyvumas pasiektas, esant oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s.

Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto valymo efektyvumai nuo kietųjų dalelių (x<20 µm), esant skirtingiems oro (dujų) srauto tūrio pasiskirstymo santykiams (25/75, 50/50, 75/25) ir skirtingiems oro (dujų) judėjimo greičiams ciklono konstrukcijos viduje (8 m/s, 12 m/s, 16m/s) pateikti 3.2 lentelėje.

Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu geriausias oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas nustatytas, kai oro (dujų) srautas pasiskirsto 75/25 santykiu, t.y. bendras efektyvumas vidutiniškai apie 0,5 % didesnis nei prie srautų pasiskirstymo santykio 50/50 ir apie 3,3 % didesnis nei prie 25/75.

Išmatavus kietųjų granito dalelių (x<20 μm) koncentracijas prieš ir po valymo (t.y. įtekėjimo ir ištekėjimo ortakiuose), apskaičiuoti oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumai siekia 84,9 % - 93,0 %. Geriausiai kietosios granito dalelės yra pašalinamos kai oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, prasčiausiai – 25/75. Vertinant vidutinį oro (dujų) srauto judėjimo greitį ciklono konstrukcijos viduje, nustatyta, kad geriausiai valymo procesas vyksta prie vidutinio 12 m/s greičio.

3.2 lentelė. Aštuonių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto išvalymo efektyvumas, esant skirtingiems parametrams

Vid. oro (dujų) srauto greitis	**8 m/s**	**12 m/s**	**16 m/s**
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 25/75			
Granitas (x<20 μm)	85,4	91,9	84,9
Mediena (x<20 μm)	82,4	89,1	84,1
Medienos pelenai (x<20 μm)	81,6	84,0	80,1
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 50/50			
Granitas (x<20 μm)	87,3	93,0	89,7
Mediena (x<20 μm)	86,6	90,6	86,4
Medienos pelenai (x<20 μm)	85,4	87,7	81,4
Oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis 75/25			
Granitas (x<20 μm)	87,6	93,0	89,7
Mediena (x<20 μm)	87,9	92,1	90,2
Medienos pelenai (x<20 μm)	83,3	89,0	79,9

Kietųjų medienos dalelių pašalinimo iš oro (dujų) srauto efektyvumas siekia 82,4 % - 92,1 %. Prasčiausiai kietosios medienos dalelės pašalinamos, esant srautų pasiskirstymo santykiui 25/75, geriausiai, kaip ir granito atveju – 75/25. Lyginant medienos kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumą iš oro (dujų) srauto su granito kietųjų dalelių pašalinimu – geriau yra išvalomas oro (dujų) srautas nuo kietųjų granito dalelių.

Kietosios medienos pelenų dalelės aštuonių kanalų spiraliniame ciklone yra pašalinamos 80,1 % - 89,0 % efektyvumu, t.y. prasčiausiai granito ir medienos kietųjų dalelių atžvilgiu. Efektyviausiai kietosios medienos pelenų dalelės yra pašalinamos kai oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, o vidutinis oro dujų srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje yra 12 m/s.

Lyginant spiralinio ciklono įrenginio valymo efektyvumą, kai oro (dujų) srauto tūrio santykis 25/75, kietosios dalelės 12,5 % geriau pašalinamos aštuonių kanalų spiraliniame ciklone nei esant keturių kanalų spiraliniam ciklonui, bet 2,0 % blogiau nei šešių kanalų spiraliniame ciklone. Kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 50/50 padėtimi, geriausiai valymo procesas

vyksta taip pat šešių kanalų spiraliniame ciklone (16,0 % geriau nei keturių ir 0,7 % geriau nei aštuonių kanalų spiraliniuose ciklonuose). Esant oro (dujų) srauto tūrio pasiskirstymo santykiui 75/25, geriausias kietųjų dalelių pašalinimo efektyvumas taip pat nustatytas šešių kanalų spiraliniame ciklone (5,1 % geresnis nei keturių ir 2,3 % geresnis nei aštuonių kanalų spiraliniuose ciklonuose).

Apibendrinant eksperimentinių tyrimu rezultatus su aštuonių kanalų spiraliniu ciklonu, prieita išvados, kad visų nagrinėtų kietųjų dalelių atžvilgiu efektyviausiai valymo procesas vyksta kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 75/25 padėtimi. Optimalus vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklone 12 m/s. Taip pat nustatyta, kad efektyviausiai šalinamos kietosios granito dalelės, blogiausiai - kietosios medienos pelenų dalelės.

Eksperimentinių tyrimų metu gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad norint efektyviausiai šalinti kietąsias daleles, tūrėtų būti pasirinktą šešių kanalų spiralinio ciklono konstrukcija, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 75/25 padėtimi, t.y. kai oro (dujų) srauto tūris pasiskirsto į 75 % periferinį srautą ir 25 % į tranzitinį. Tokiu būdu sudarant 75 % papildomą filtravimą dėl periferinio srauto sudaromos oro užuolaidos, kuri itin gerai padeda atskirti smulkiąsias kietąsias daleles, kas žymiai padidina įrenginio valymo efektyvumą. Vertinant vidutinį oro (dujų) srauto judėjimo greitį ciklone, nustatyta, kad efektyviausiai valymas vyksta 12 m/s.

3.4. Skyriaus išvados

1. Nustatyti vidutiniai oro (dujų) srauto greičiai ciklono kanaluose. Prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 25/75 vidutinis greitis gautas 8,37 m/s; esant padėčiai 50/50 – 8,04 m/s, o 75/25 – 8,03 m/s. Lyginant oro (dujų) srauto greičius prie visų padėčių, nustatyta, kad vidutiniai greičiai kanaluose prie padėties 25/75 yra 4,1 % didesni nei esant 50/50 padėčiai ir 4,2 % nei prie 75/25 padėties, o prie 50/50 padėties 0,1 % didesni nei prie 75/25 padėties.
2. Nustatyta, kad kuo didesnis oro (dujų) srautas yra nukreipiamas į periferinį kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“ periferiniame kanale, papildomai filtruojanti užterštą orą nuo itin smulkių ($x<20$ μm) kietųjų dalelių, tuo pačiu dėl padidėjusių pasipriešinimo jėgų greitis pradeda nežymiai mažėti. Nukreipiant 50 % oro (dujų) srauto į periferinį kanalą, vidutinis greitis sumažėja 4,1 % lyginant su atveju, kai į periferinį kanalą patenka 25 % oro (dujų) srauto. Nukreipus 75 % oro (dujų) srauto į periferinį kanalą, greitis sumažėja 4,2 %

lyginant su atveju, kai į periferinį kanalą patenka 25 % oro (dujų) srauto ir 0,1 % lyginant su atveju, kai į prieš tai esantį kanalą patenka 50 % oro (dujų) srauto.

3. Atlikus daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, kai oro srauto pasiskirstymo santykis skirtingas bei skirtingas kanalų skaičius (keturi, šeši ir aštuoni), nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto judėjimui ciklono kanaluose, nepriklausomai nuo kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties, t.y. nepriklausomai nuo oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykio. Maksimalus ciklono įrenginio pasipriešinimas užfiksuotas, esant aštuonių kanalų spiraliniam ciklonui prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 75/25 ir siekė 4400 (± 5 %) Pa. Taip pat nustatyta, kad mažėjant oro (dujų) srauto vidutiniam judėjimo greičiui ciklono kanaluose, pasipriešinimas taip pat sumažėja. Minimalus daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu pasipriešinimas užfiksuotas, esant keturių kanalų spiraliniam ciklonui, kai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi prie oro (dujų) srauto judėjimo greičio 8 m/s ir siekė 1540 (± 5 %) Pa.

4. Atlikus keturių kanalų ciklono su spiraliniu korpusu oro (dujų) srauto valymo efektyvumo eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad didžiausias išvalymo efektyvumas pasiekiamas, esant oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykiui 75/25 ir valomo oro (dujų) srauto judėjimo greičiui 12 m/s ciklono konstrukcijos viduje. Kietųjų granito dalelių, naudotų eksperimentiniuose tyrimuose, pašalinimo efektyvumas siekia 89,7 %, medienos - 88, 6 %, medienos pelenų – 86,7 %.

5. Šešių kanalų spiralinio ciklono eksperimentiniai tyrimai parodė, kad, esant kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėčiai 75/25 ir vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui 12 m/s ciklono konstrukcijos viduje, oro (dujų) srauto valymo procesas vyksta geriausiai. Esant minėtai ciklono konstrukcijai kietosios granito dalelės pašalinamos 94,9 % efektyvumu, medienos kietosios dalelės – 92,7 % efektyvumu, medienos pelenų kietosios dalelės – 91,1 % efektyvumu.

6. Įvertinus kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis aštuonių kanalų ciklone, oro (dujų) srauto judėjimo greitį ciklono konstrukcijos viduje nustatyta, kad kietosios dalelės, kurių dispersiškumas $x<20$ μm geriausiai pašalinamos iš oro (dujų) srauto, kai aštuonių kanalų ciklono kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi taip pat 75/25 padėtimi, palaikant oro (dujų) srauto judėjimo greitį ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s. Čia kietųjų granito dalelių pašalinimo efektyvumas siekia 93,0 %, medienos – 92,1 %, medienos pelenų – 89,0 %.

7. Eksperimentinių tyrimų metu taip pat nustatyta, kad oro (dujų) srautas efektyviausiai yra valomas nuo kietųjų granito dalelių, medienos kietosios dalelės valomos 2,2 % prasčiau negu granito, o medienos pelenų kietosios dalelės pašalinamos 3,8 % prasčiausiai negu granito ir 1,6 % negu medienos kietosios dalelės.

4. ORO (DUJŲ) SRAUTO SPIRALINIAME DAUGIAKANALIAME CIKLONE SKAITINIS MODELIAVIMAS

„ANSYS” visame pasaulyje gerai žinoma ir įvairiose pramonės ir gamybos srityse plačiai naudojama programinė įranga, skirta inžineriniams uždaviniams modeliuoti. „ANSYS“ programiniai paketai leidžia globaliai nagrinėti projektuojamą objektą, sukuriant produkto ir jo darbinės terpės skaitinį modelį. Naudojant „ANSYS“ paketus, nuo pat pirminio projektavimo iki galutinio testavimo, dauguma inžinerinių problemų sprendžiamos greitai ir efektyviai. Programa, skirta sistemoms analizuoti (atliekami kietų ir skystų kūnų, dujų bei elektromagnetinių laukų statiniai ir dinaminiai skaičiavimai) baigtinių elementų metodu. Ji asociatyviai naudoja mazgo projektą ir leidžia išbandyti įvairius projekto variantus bei optimizuoti gaminį, naudojantis grįžtamaisiais ryšiais. Taip išvengiama gamybos klaidų, gamybinių sutrikimų ir inžinerinio perprojektavimo (AGA 2014).

Magistro darbo modeliavimo uždaviniams išspręsti yra pasinaudojama ANSYS Fluent programinių paketu, sudarant matematinį modelį, remiantis baigtinių tūrių metodu. Sudarius nagrinėjamo spiralinio ciklono geometriją, įvedus atitinkamus parametrus, norima gauti vienfazio oro (dujų) srauto parametrų kitimą įrenginio konstrukcijos viduje bei palyginti juos su fizikinio modelio eksperimentinių tyrimų metu gautais rezultatais.

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 CFD programa operacija suteikia galimybę modeliuoti fluidų srautus dvimatėje ir trimatėje erdvėje. Naudojant šias programas ir CFD elementus galima modeliuoti: kėlimo ir stabdymo procesus ant aerodinaminių paviršių, didelių greičių srautus (AGA 2014).

Parametrų kitimas modelyje, apskaičiuojamas programa, esant vienodoms sąlygoms su fizikiniu modeliu: įvertinamos eksperimentinių tyrimų metu nustatytos tinkamiausios šešiakanalio ciklono pusžiedžių išdėstymo padėtys (50/50 ir 75/25), optimaliausias vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje (12 m/s) bei aerodinaminis pasipriešinimas prie minėtų srauto pasiskirstymo santykių ir vidutinio oro (dujų) srauto judėjimo greičio.

Pagal sudaryto modelio šešiakanalio spiralinio ciklono greičio ir slėgio parametrų kitimą galima nustatyti charakteringas vietas, kurios įtakoja efektyvų valymo įrenginio veikimą. Taip pat

įmanoma nustatyti galimas eksperimentinių tyrimų paklaidas, lyginant jas su teoriniu matematiniu modeliu.

Šio darbo tikslas − išanalizuoti skaitinio modeliavimo modelius, taikomus dujų judėjimui ciklone aprašyti ir atlikti oro (dujų) srauto skaitinį modeliavimą spiraliniame ciklone.

4.1. Skaitinio modeliavimo metodas ir lygtys

Skaitinio modeliavimo esmė − padalinti nagrinėjamą sritį į daug kontrolinių tūrių ir pakeisti dalines diferencialines lygtis jų algebriniais ekvivalentais. Gaunama algebrinių lygčių aibė, kurią galima išspręsti taikant iteracinius metodus ir gauti kintamųjų – greičio komponentės ir slėgio − pasiskirstymą lauke, priklausantį nuo ribinių sąlygų, apibūdinančių konkretų uždavinį (Bernardo et al. 2006; Patterson, Munz 1996).

Daugiafaziai srautai charakterizuojami kaip turintys du ar daugiau fluidų, reliatyviai judančių vienas kito atžvilgiu. Diferencialinės lygtys apibendrintoje formoje užrašomos:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(r_i \rho_i \Phi_i\right) + \operatorname{div}\left(r_i \rho_i \mathbf{v}_i \Phi_i - r_i \Gamma_{\Phi i} \mathbf{grad} \Phi_i\right) = r_i S_{\Phi i} \tag{4.1}$$

čia:

r_i – tūrinė fazės i dalis;

ρ_i – fazės i tankis;

Φ_i – fazės i priklausomas kintamasis;

$\mathbf{v}_i$ Φ_i – fazės greičio vektorius;

Γ_i – kintamojo Φ_i mainų koeficientas;

$S_{\Phi i}$ – srauto (šaltinio) narys kintamajam Φ_i;

t – laikas.

Įstačius vienetą vietoj Φ_i gaunama fazei i tolydumo lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(r_i \rho_i\right) + \operatorname{div}\left(r_i \rho_i \mathbf{v}_i\right) = r_i S_{\Phi i}\,, \tag{4.2}$$

čia:

$S_{\Phi i}$ - masės srauto įtekėjimo dydis per tūrio vienetą į fazę.

4.2. Vienfazio oro (dujų) srauto šešiakanaliame spiraliniame ciklone skaitinis modeliavimas

Modeliuojant vykstančius procesus nagrinėjama vidinė ciklono aplinka, kurioje oro srautas juda sukdamasis apie ciklono ašį tam tikru greičiu. Tuomet tokią aplinką galima aprašyti taikant Navje ir Stokso trimačiu diferencialinių lygčių sistemą, diskretizuotą baigtiniais tūriais.

Oro (dujų) srauto greičių modeliavime (nustatyme) panaudojamos vidutinės oro (dujų) srauto judėjimo greičių variacijos. Kiekvienu atveju yra pateikiami oro (dujų) srauto fazės greičiai. Pagal esančią spektro liniuote įmanoma nustatyti vyraujančius greičius tam tikrame ciklono kanale bei spiralinės dalies aukštyje.

Antrojo aerodinaminio parametro nustatymui yra panaudojama tokia pat metodika, kaip ir srauto greičių nustatyme, šiuo atveju taip pat apsiribojama tik vienos fazės – oro (dujų) slėgių ciklone.

Skaitiniam modeliui pagal fizikinį modelį būtina sudaryti jo diskretizaciją, t.y. padalinti spiralinę erdvę baigtinių tūrių elementais. Skaitiniam modeliui sprendžiama 4 lygčių sistema: 3 – Navje-Stokso, 4 – tolydumo lygtis. Šių lygčių matematinės išraiškos yra tokios:

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

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\rho F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)-\rho\left(\frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{v'}^2}{\partial y}+\frac{\partial\overline{v'w'}}{\partial z}\right) \qquad (4.3)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (4.4)$$

čia:

p – slėgis, Pa;

μ – dinaminės klampos koeficientas, N·s/m^2;

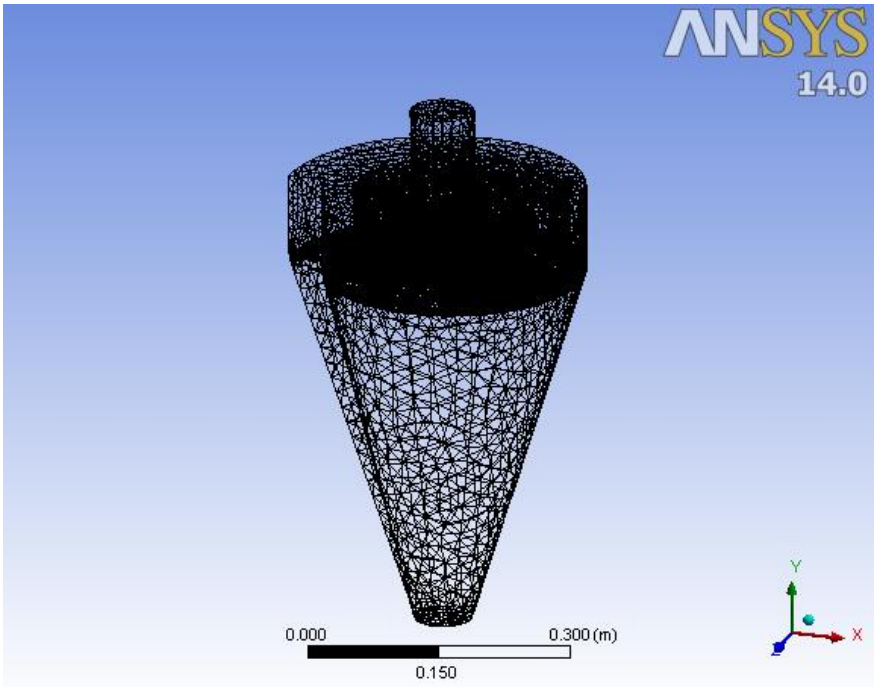
ρ – tankis, kg/^{3},

F_x, F_y, F_z – masės jėgų vektoriaus projekcijos į koordinačių ašis.

Keičiant anksčiau minėtus parametrus yra pateikiami gauto matematinio modelio rezultatai dvimatėje erdvėje, skirtinguose pjūviuose. Nagrinėjami pjūviai, esantis tik ciklono korpuso dalyje, atmetant fluido tekėjimą bunkeryje bei ties oro srauto išėjimo anga. Gauti matematinio modelio oro srauto greičio judėjimo rezultatai yra palyginami su fizikinio modelio eksperimentiniais tyrimais, stebima, ar duomenis yra patikimi abiem atvejais ir nesiskiria daugiau kaip 20 %.

4.3. Vienfazio srauto skaitinio modeliavimo duomenų analizė

Sudaryto skaitinio modelio pagalba darbe buvo siekiama nustatyti oro (dujų) srauto judėjimo parametrų ir aerodinaminio pasipriešinimo kitimą šešiakanalio spiralinio ciklono modelio pjūviuose, kintant veikimo parametrų vertėms.

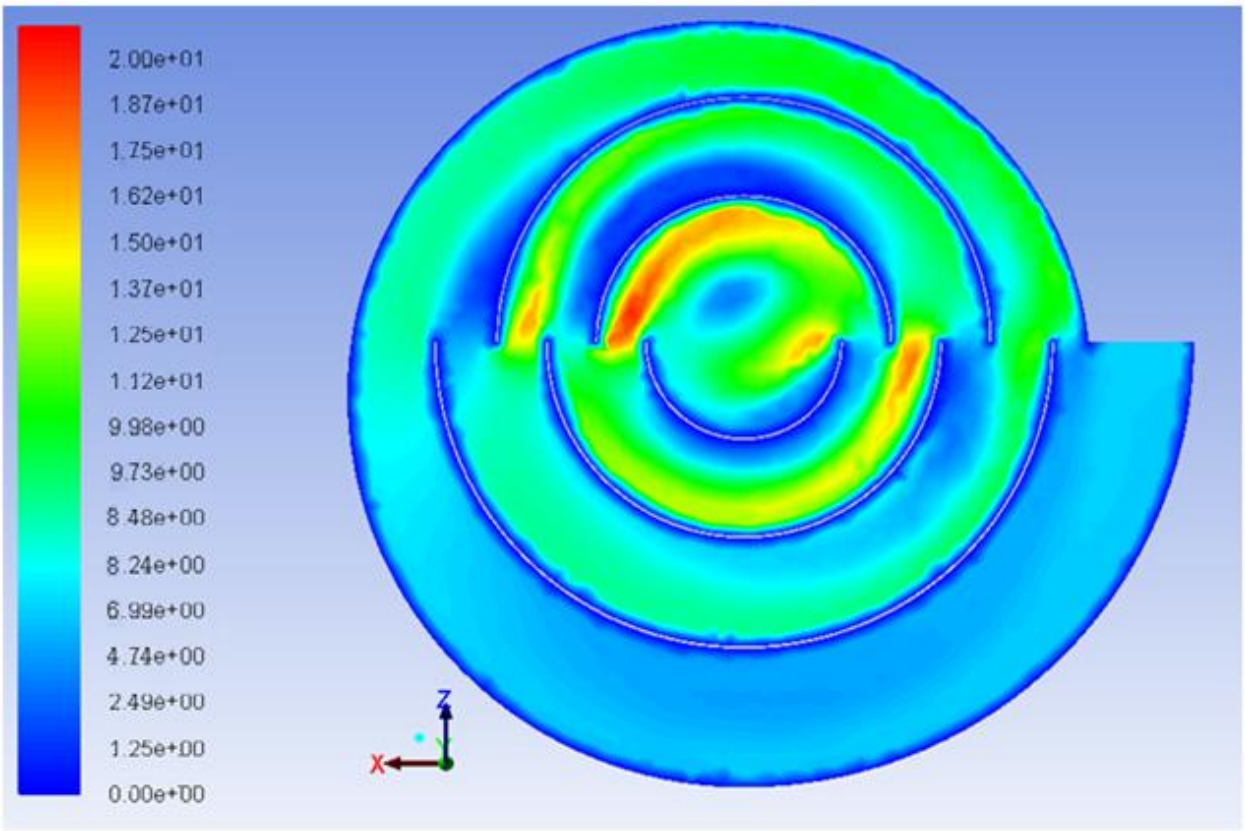


4.1 pav. Spiralinio ciklono modelio skaičiavimo tinklelio eskizas

Modeliuotas tiriamas objektas – spiralinis šešių kanalų ciklonas. Minėto ciklono konstrukcijos matmenis: skersmuo 0,32 m; separavimo kameros aukštis 0,098 m, oro įtekėjimo angos skersmuo 0,07 m, oro ištekėjimo angos skersmuo 0,07 m. Ciklono skaičiavimo tinklelis sudarytas naudojant cilindrines (x, y, z) koordinates. Tinklelio eskizas pateiktas 4.1 paveiksle.

Dėl didelės eksperimentinių tyrimų rezultatų apimties modeliavimui pasirinktos dvi optimaliausios šešių kanalų spiralinio ciklono konstrukcijos. Modeliavimo uždavinys spręstas

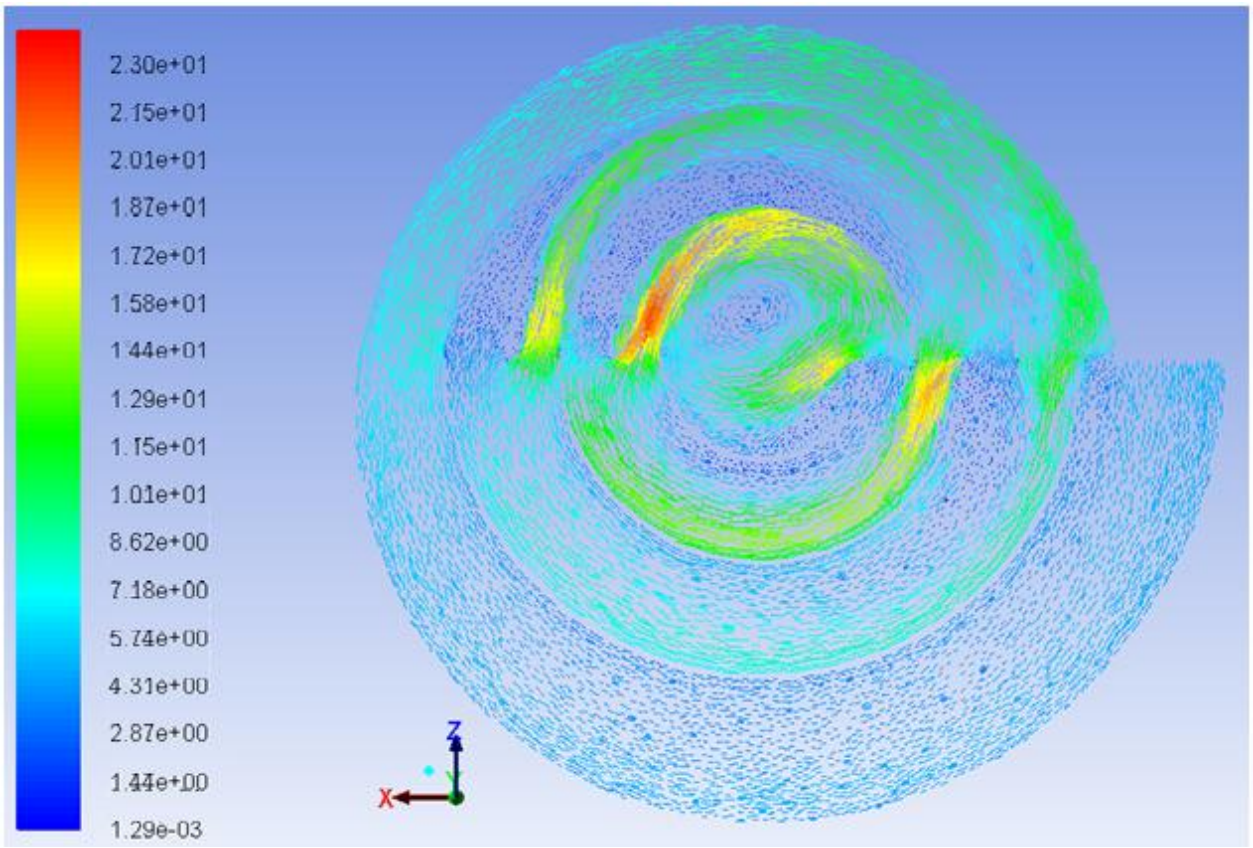
kintant: oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykiui, t.y. nagrinėjamos dvi kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtys (50/50 ir 75/25) eksperimentinių bandymų pripažintos tinkamiausiomis bei oro (dujų) srauto judėjimo greitis ciklono konstrukcijos viduje 12 m/s, t.y. – optimaliausias. Abiem atvejais įtekėjimo greitis į cikloną buvo 6,2 m/s. Greičio kitimas įrenginio pjūvyje, einančiame per ciklono separavimo kameros centrą, t.y. 4,9 cm aukštyje (visas separavimo kameros aukštis 9,8 cm), pavaizduotas 4.2 pav.



4.2 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui

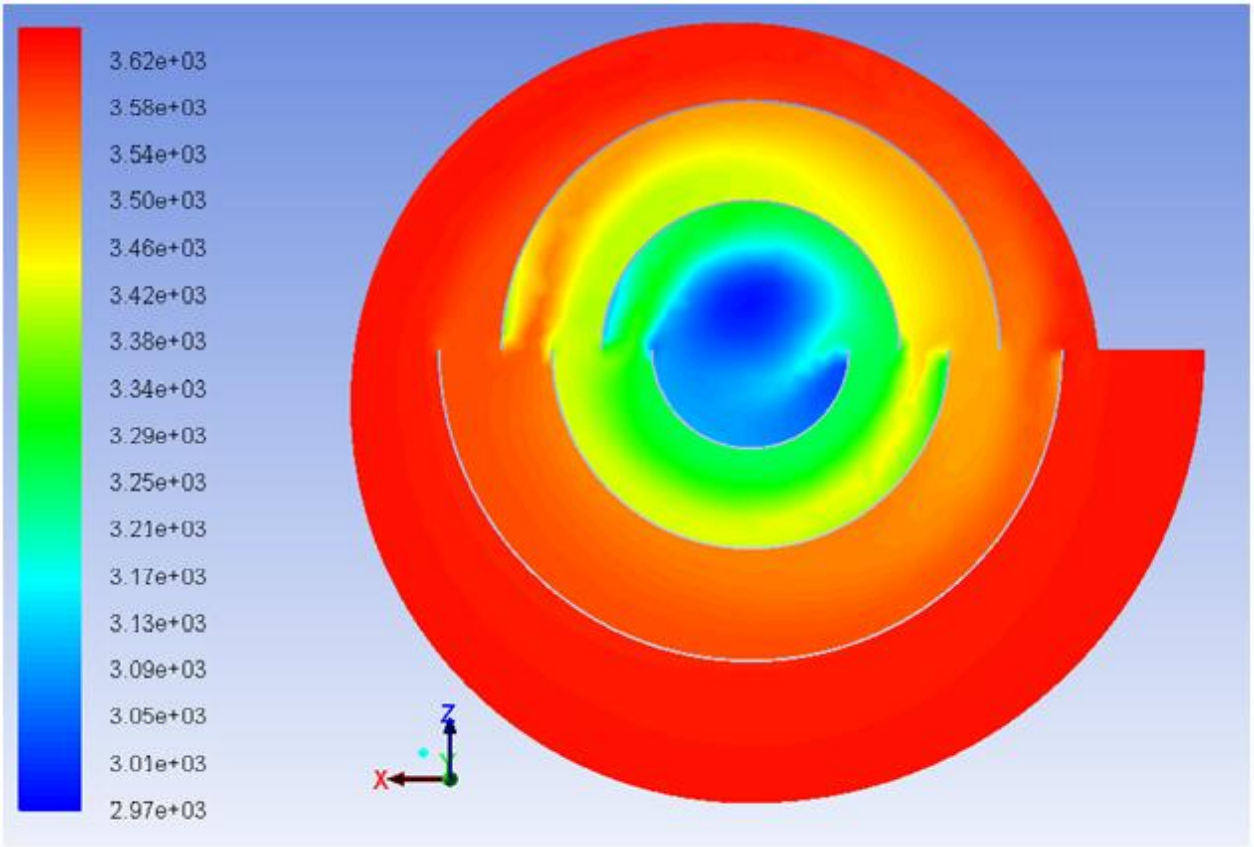
Nagrinėta oro fazė, sutampanti su cilindrinių koordinačių ašies kryptimi X, kuri atitinka išilginį srauto judėjimą. Oro srauto fazės (4.2 pav.) maksimali srauto judėjimo greičio vertė siekia 18,7 m/s, kuri išryškėja šeštojo kanalo pradžioje, artėjant link įrenginio ašies. Minimalūs greičiai pasiskirsto antrojo kanalo pradžioje ties tranzitine sienele bei spiralinio ciklono ketvirtajame kanale taip pat ties tranzitine sienele, čia jie yra lygūs – 4,7 m/s. Minimalus oro (dujų) srauto judėjimo greitis minėtuose taškuose toks sąlyginai mažas dėl oro (dujų) srauto judėjimo trajektorijos pasiskirstymo ciklono kanaluose, kurią nulemia pasipriešinimo jėgos. Pirmajame

kanale vidutinis greitis siekia apie 7,0 m/s. Pereidamas į antrąjį kanalą oro (dujų) srauto greitis padidėja ir pradžioje kanalo siekia 8,5 m/s, o antrojo kanalo pabaigoje – 11,2 m/s. Trečiojo kanalo pradžioje srauto greitis prie periferinės kanalo sienelės yra 12,0 m/s, tuo tarpu tranzitinėje kanalo dalyje tesiekia apie 5,0 m/s, tačiau artėjant link trečiojo kanalo vidurio srauto greitis išsilygina ir yra 9,7 m/s. Ketvirtojo kanalo pradžioje ties periferine sienele pastebimas srauto greičio padidėjimas iki 15,0 m/s, tranzitinėje kanalo dalyje greitis tesiekia 4,0 m/s. Ketvirtojo kanalo pabaigoje vidutinis srauto greitis siekia apie 12,5 m/s. Penktajame kanale stebimas srauto greičio didėjimas, čia vidutinis greitis siekia kanalo pradžioje apie 16,0 m/s, toliau kanale apie 14,0 m/s – 15,0 m/s. Šeštojo kanalo pradžioje srauto greitis pasiekia maksimumą – 18,3 m/s, vidutinis kanalo greitis siekia 13 m/s. Įvertinus skaitinio modelio rezultatus, nustatyta, kad šešių kanalų spiralinio ciklono vidutinis srauto greitis siekia 11,5 m/s, tuo tarpu eksperimentinių tyrimų metu nustatytas vidutinis oro (dujų) srauto judėjimo greitis siekė 12,1 m/s. Paklaida tarp modelio duomenų ir eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų nesiekia 5 %, kas leidžia sakyti, kad gauti rezultatai tyrimų ir modeliavimo būdais yra patikimi.



4.3 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas vektoriais šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 50/50, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui

4.3 paveiksle pateikta nagrinėta oro fazė vektorine išraiška. Iš paveikslo matyti, kaip vektoriai veikiami išcentrinių jėgų yra nukreipiami link periferinių kanalų sienelių, gaunamas sūkurys apie centrinę ciklono ašį prie oro (dujų) srauto ištekėjimo angos. Kanalų pabaigos ir pradžios sankirtose akivaizdžiai matyti, kad didžioji dalis oro (dujų) srauto keliauja į tranzitinius kanalus, tuo tarpu į periferinius kanalus patenka tik nedidelė dalis bendro oro (dujų) srauto debito. Taip pat matyti, kad srauto pasiskirstymo vietose ketvirtame, penktame ir šeštame kanaluose susidaro nedideli sūkuriai. Šiuos sūkurius įtakoja dėl pasipriešinimo atsiradusios turbulencijos jėgos.



4.4 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, esant 50/50 srauto pasiskirstymo santykiui bei 12 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui

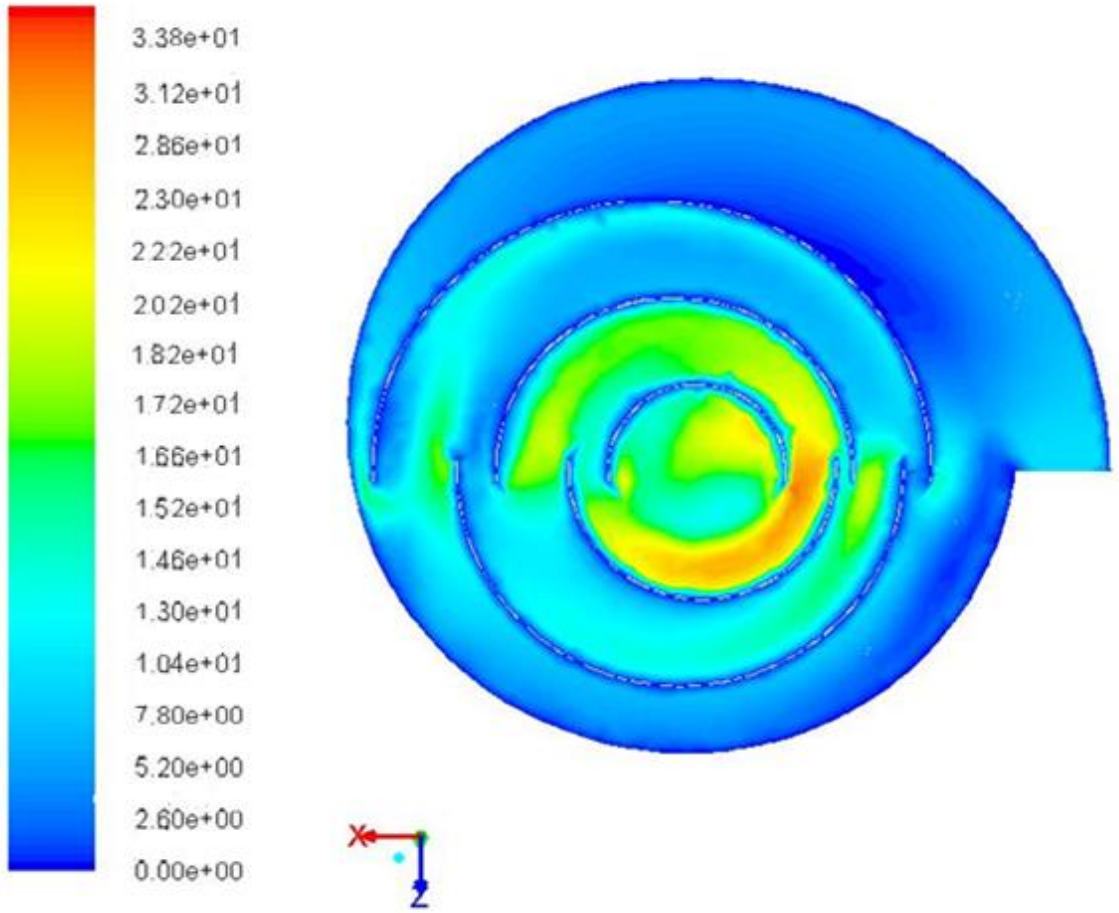
Slėgių pasiskirstymas, esant srauto pasiskirstymo santykiui 50/50 bei vidutiniam 12 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje, pavaizduotas 4.4 pav. Nagrinėjant slėgio pasiskirstymą ciklone, parametro kitimas vaizduojamas įrenginio vidinės spiralinės dalies pjūvyje. Galima matyti, kad didžiausia nustatyta vertė yra lygi 3620 Pa, kuri stebima I ir II ciklono kanaluose. Trečiame spiralinio ciklono kanale pasipriešinimas siekia 3500 Pa, ketvirtame – 3420 Pa – 3500 Pa. Mažesni slėgiai fiksuojami artėjant link įrenginio ašies, kur

maksimaliai yra pasiekiamas 2970 Pa pasipriešinimas. Pasipriešinimas čia sumažėja apie 20 % periferinės sienelės pasipriešinimo reikšmės atžvilgiu. Vidutinis slėgis, vyraujantis visame ciklono tūryje kinta 2970 Pa – 3620 Pa ribose.

Apžvelgus aerodinaminio pasipriešinimo duomenų atitikimą, gautų teorinių ir praktinių eksperimentinių tyrimų metu, nustatyta, kad praktinė (2980 Pa) ir teorinė (apie 3620 Pa) vertės atitinka 17,6 % tikslumu.

Tokiam rezultatui įtakos galėjo turėti praktinių tyrimų metu netolygus turbulentinio srauto judėjimas, galimos metodikos ir matavimo prietaisų paklaidos.

Tęsiant sudaryto matematinio modelio analizę, toliau nagrinėjama 75/25 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis bei vidutinis 12 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greitis. Matematinio modelio greičių pasiskirstymas ciklone pavaizduotas 4.5 paveiksle.



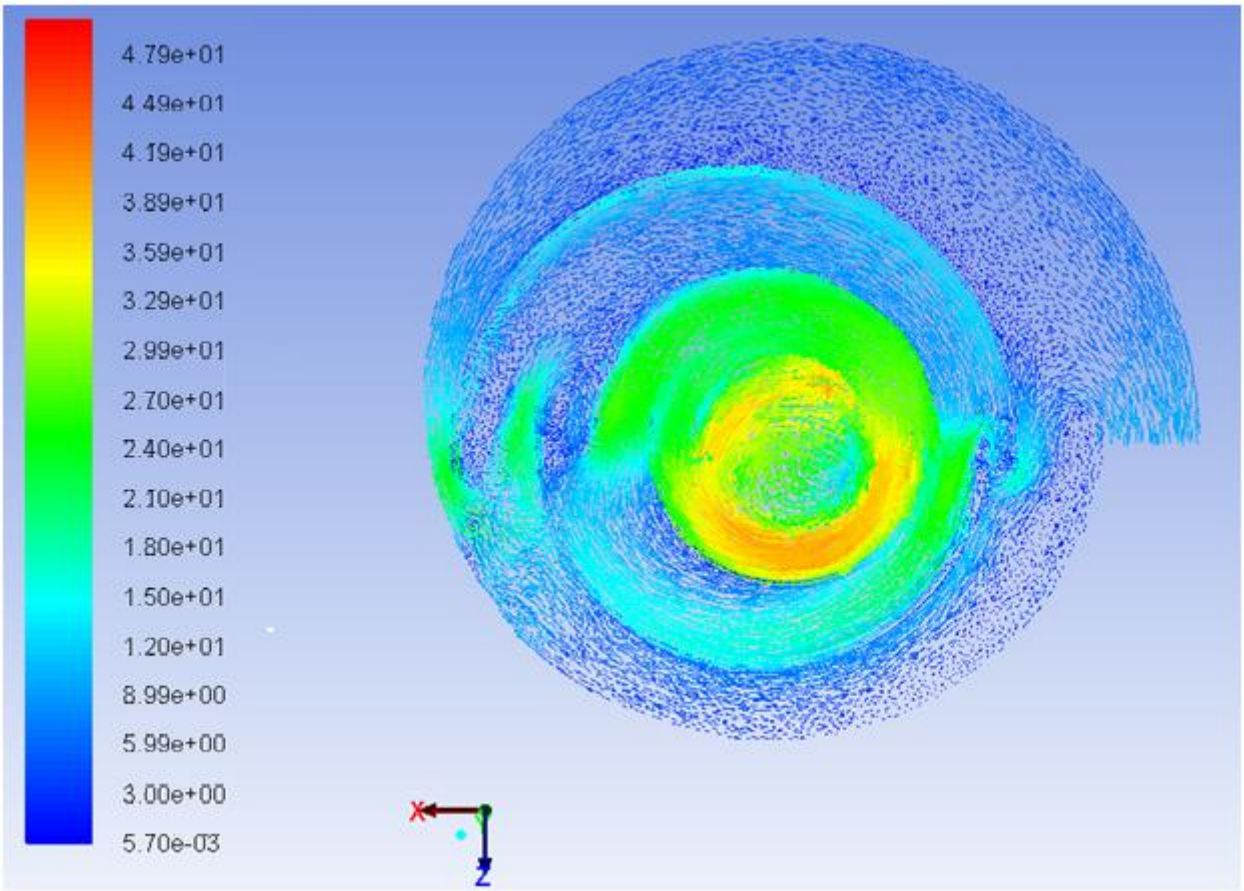
4.5 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 75/25, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui

Maksimalus greitis ciklono modelyje stebimas šeštojo kanalo pradžioje, toliau greitis šiek tiek sumažėja ir šeštojo kanalo pabaigoje bei penktajame kanale jo reikšmė siekia 23,0 m/s. Šiek

tiek mažesnis, siekiantis 13,0 m/s, greitis pasireiškia ketvirtajame kanale, ištekėjime į penktąjį kanalą greitis padidėja iki 20,2 m/s. Trečiajame kanale modelio srauto greitis siekia apie 13,0 m/s, tačiau kanalo tranzitiniame pasienyje greičiai nukrenta iki 7,8 m/s. Antrajame kanale stebima atvirkštinė situacija, čia didžiausias srauto greitis pasiskirsto kanalo tranzitiniame pasienyje – 10,4 m/s – 13,0 m/s, antrojo kanalo periferinėje dalyje srauto greitis tesiekia 5,2 m/s. Pirmojo kanalo pradžioje srauto greitis 13,0 m/s, toliau kanalo periferinėje dalyje greitis išsilaiko apie 10,4 m/s, tranzitinėje sumažėja iki 5,2 m/s.

Vykdant eksperimentinius tyrimus su fizikiniu modeliu, maksimalus greitis ciklone siekė 12,4 m/s, kuris išmatuotas II kanale. Lyginant su modeliavimo rezultatais, greičio vertė II kanale skiriasi 4,6 %, tai pagrindžia rezultatų patikimumą. Vertinant oro (dujų) srauto judėjimo greičių vidurkį (12,1 m/s) gautą eksperimentinių tyrimų metu su matematinio modelio pateiktais rezultatais (13,4 m/s), nustatyta, kad vertės skiriasi 9,7 %.

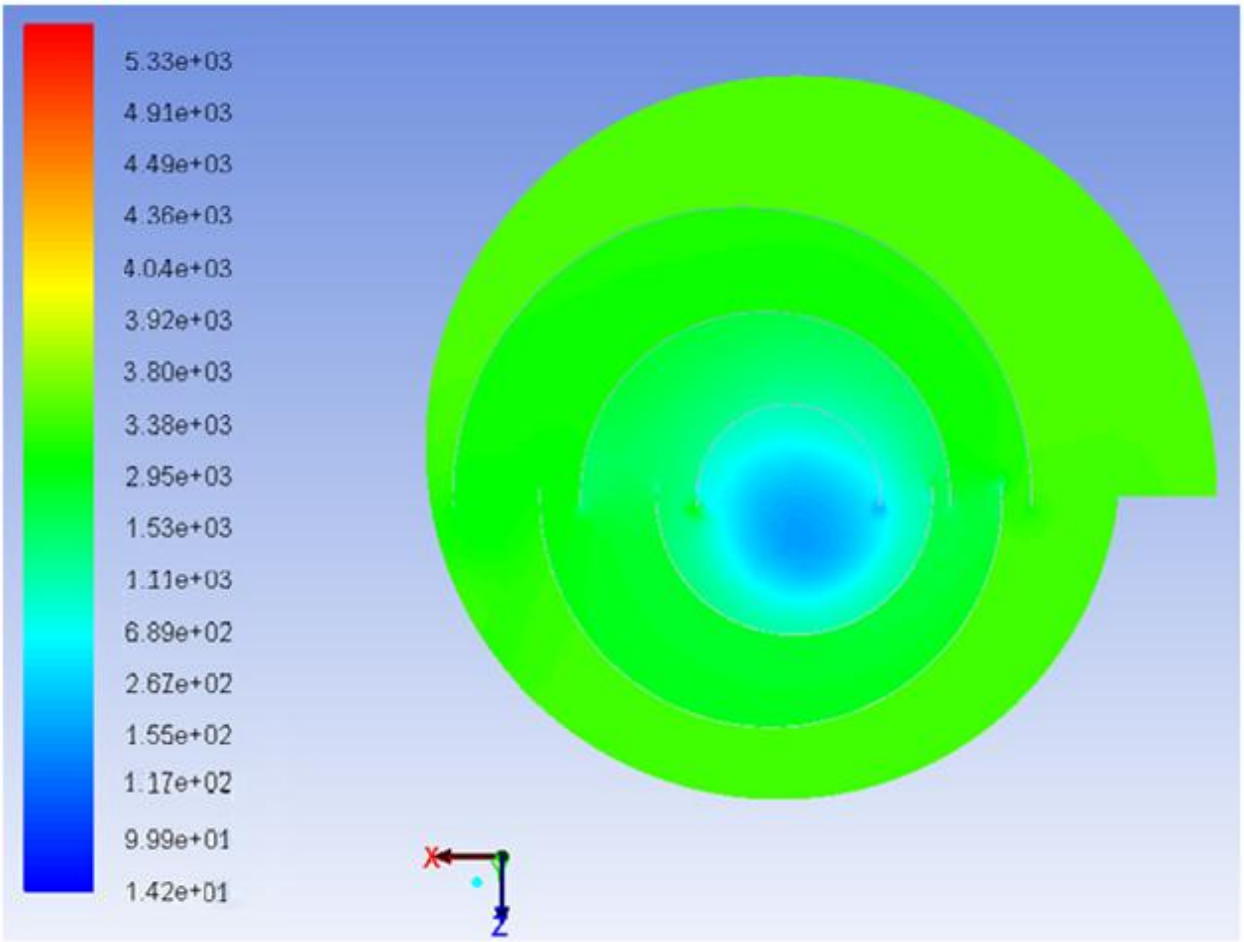
4.6 paveiksle pateikta nagrinėta oro fazė vektorine išraiška, kai pusžiedžių išdėstymas 75/25, o oro (dujų) srauto greičio vidutinė reikšmė 12 m/s.



4.6 pav. Vienfazio oro (dujų) srauto judėjimo greičio pasiskirstymas vektoriais šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, kai oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis 75/25, esant vidutiniam 12 m/s srauto judėjimo greičiui

Iš paveikslo matyti, kad kaip ir 50/50 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju vektoriai veikiami išcentrinių jėgų yra nukreipiami link periferinių kanalų sienelių, kanalų pabaigos ir pradžios sankirtose akivaizdžiai matyti, kad didžioji dalis oro (dujų) srauto keliauja į tranzitinius kanalus, susidaro sūkuriai, kuriuos įtakoja turbulencijos jėgos.

Slėgių pasiskirstymas, esant srauto pasiskirstymo santykiui 75/25 bei vidutiniam 12 m/s oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje, pavaizduotas 4.7 pav. Nagrinėjant slėgio pasiskirstymą ciklone, parametro kitimas, kaip ir 50/50 kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo atveju, vaizduojamas įrenginio vidinės spiralinės dalies pjūvyje. Galima matyti, kad didžiausia nustatyta vertė yra lygi 3800 Pa, kuri stebima pirmajame ciklono kanale. Trečiame spiralinio ciklono kanale pasipriešinimas siekia 3380 Pa, ketvirtajame – 2950 Pa. Mažesni slėgiai fiksuojami artėjant link įrenginio ašies. Vidutinis slėgis, vyraujantis visame ciklono tūryje kinta 689 Pa – 3800 ribose.



4.7 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui bei 12 m/s vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui

Apžvelgus aerodinaminio pasipriešinimo duomenų atitikimą, gautų teorinių ir praktinių eksperimentinių tyrimų metu, nustatyta, kad praktinė (3500 Pa) ir teorinė (apie 3800 Pa) vertės atitinka 7,9 % tikslumu.

Taikant matematinio modeliavimo programą, nustatytos aerodinaminių charakteristikų reikšmės yra artimos eksperimentinių tyrimų rezultatams, išlieka pastebimas priklausomybių nuo sistemos parametrų bei nustatomų dydžių kitimas. Sudarius matematinį modelį buvo nustatytos svarbios ciklono įrenginio savybės, tokios kaip greičio bei slėgio kitimas pasienio sluoksniuose, kurias realiuose eksperimentiniuose tyrimuose nustatyti būtų neįmanoma. Programiniu paketu ANSYS Fluent buvo nustatytos tapačios sąlygos, kurios buvo, atliekant tyrimus su fizikiniu modeliu, todėl galimos paklaidos arba modelio neatitikimo realioms sąlygoms yra minimizuotos.

Rezultatai yra pateikti gana išplėsta forma, siekiant kuo vaizdžiau parodyti nagrinėjamų aerodinaminių parametrų kitimą, pasikeičiant pradiniams oro valymo įrenginio sistemos parametrams: oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykiui bei vidutiniam oro (dujų) srauto judėjimo greičiui ciklono konstrukcijos viduje.

4.4. Eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas

Eksperimentinių tyrimu ir skaitinio modeliavimo rezultatu palyginimui buvo atlikti rezultatų patikimumo skaičiavimai. Gauti rezultatai pateikti 4.1 lentelėje.

Iš pateiktu duomenų 4.1 lentelės matyti, kad eksperimentiniai matavimai beveik visais atvejais sutampa su skaitinio modeliavimo rezultatais. Siekiant įvertinti jų atitikimą 4.1 lentelėje pateiktas paklaidų skaičiavimas. Eksperimentinių tyrimų metu gautos greičių reikšmės palyginamos su skaitiniais duomenimis ir apskaičiuojama neatitikimo paklaida. Vidutinis eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo rezultatų nesutapimas siekia ± 14,1 %.

4.1 lentelė. Oro (dujų) srauto judėjimo greičių skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Eil. Nr.		Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 50/50														
1.	Oro (dujų) srauto judėjimo greitis, m/s	1 taškas			2 taškas			3 taškas			4 taškas			5 taškas		
		Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %
	1 kanalas	10,6	9,6	-9,4	10,4	9,5	-8,7	10,7	8,9	-16,8	10,9	9,2	-15,6	11,1	9,3	-16,2
	2 kanalas	12,1	9,7	-19,8	11,9	9,9	-16,8	11,9	10,0	-15,9	11,8	11,2	-5,1	11,8	11,2	-5,1
	3 kanalas	12,0	11,2	-6,7	12,0	11,2	-6,7	12,4	9,7	-21,7	12,5	9,7	-22,4	12,2	9,7	-20,4
	4 kanalas	12,1	14,2	+17,3	12,1	12,5	+3,3	12,3	11,2	-8,9	12,5	11,2	-10,4	12,4	11,2	-9,7
	5 kanalas	12.9	15,5	+20,0	12,9	15,0	+16,3	12,0	14,5	+20,8	12,0	11,2	-6,7	11,9	10,0	-15,9
	6 kanalas	13,7	16,7	+21,2	13,7	16,5	+20,4	12,0	13,7	+14,2	12,5	12,5	0,0	13,4	11,2	-16,4
Eil. Nr.		Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 75/25														
		1 taškas			2 taškas			3 taškas			4 taškas			5 taškas		
2.	Oro (dujų) srauto judėjimo greitis, m/s	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %	Eksperi-mentinis	Skaitinis	Paklaida, %
	1 kanalas	12,3	13,0	-2,4	12,4	12,4	0,0	11,9	12,1	+1,7	11,7	10,4	-11,1	11,6	10,4	+7,9
	2 kanalas	12,4	14,1	+13,7	12,4	13,0	+4,8	12,3	13,0	+5,7	12,6	10,4	-17,5	12,5	10,4	-16,8
	3 kanalas	12,4	13,0	+4,8	12,3	13,2	+7,3	12,3	13,4	+8,9	12,2	13,1	+7,4	12,3	14,6	+18,7
	4 kanalas	12,2	14,6	+19,7	12,3	14,3	+16,3	11,7	13,9	+18,8	11,8	14,6	+23,7	12,9	16,6	+28,7
	5 kanalas	13,3	17,2	+29,3	14,1	16,6	+17,7	14,3	15,9	+11,2	14,5	15,7	+8,3	13,7	16,1	+17,5
	6 kanalas	13,4	16,6	+23,9	13,5	17,2	+27,4	14,7	18,0	+22,4	14,8	18,1	+22,3	14,9	18,1	+21,5

4.2 lentelėje pateikiamas pasipriešinimo skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.

4.2 lentelė. Aerodinaminio pasipriešinimo skaitinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Spiralinio šešių kanalų ciklono pasipriešinimas, Pa	Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 50/50	Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėtis 75/25
Eksperimentinis	2980 Pa	3500 Pa
Skaitinis	3620 Pa	3800 Pa
Paklaida	17,7 %	7,9 %

Iš pateiktu duomenų 4.2 lentelės matyti, kad eksperimentiniai pasipriešinimo visais atvejais sutampa su skaitinio modeliavimo rezultatais. Eksperimentinių tyrimų metu gautos greičių reikšmės palyginamos su skaitiniais duomenimis ir apskaičiuojama neatitikimo paklaida. Ši paklaida neviršija 20 %.

Remiantis modeliuojant gautais aerodinaminių procesų rezultatais, galima teigti, kad oro srauto judėjimo greičio tyrimų metu išmatuotos vertės paklaidų ribose atitiko modeliavimo metu nustatytus greičio dydžius.

4.5. Skyriaus išvados

1. Nagrinėjant vienfazį oro (dujų) srautą ciklono kanaluose, nustatytas maksimalus greitis lygus 16,7 m/s šeštajame ciklono kanale, esant 75/25 oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykiui. Kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 50/50 padėtimi stebimas maksimalus srauto greitis 18,1 m/s – taip pat šeštajame kanale. Iš gautų eksperimentinių tyrimų rezultatų ir iš skaitinio modeliavimo rezultatų galima daryti išvadą, kad oro (dujų) srauto judėjimo greitis didėja artėjant link įrenginio ašies ir šeštajame kanale pasiekia maksimumą, nepriklausomai nuo to, kaip išdėstomi kreivalinijiniai pusžiedžiai.

2. Remiantis skaitinio modelio greičio komponenčių pasiskirstymu vektoriais, galima teigti, kad kanalų pabaigos ir pradžios sankirtose pastebėta, kad didžioji dalis oro (dujų) srauto keliauja į tranzitinius kanalus, tuo tarpu į periferinius kanalus patenka tik nedidelė dalis bendro oro (dujų) srauto debito. Susidaro nedideli sūkuriai, kuriuos įtakoja turbulencijos jėgos.

3. Slėgio pasiskirstymui įtaką daro oro (dujų) srauto pasiskirstymo santykis. Esant 50/50 pasiskirstymo santykiui, eksperimentinių tyrimų metu gautas 2980 Pa slėgis, skaitinio metodo vertė – 3620 Pa (paklaida 17,7 %). Esant 75/25 srauto pasiskirstymo santykiui eksperimentinis maksimalus slėgis yra lygūs 3500 Pa, skaitinis - 3800 Pa (paklaida 7,9 %).

4. Lyginant nagrinėjamus fizikinį ir matematinį modelį, maksimalus gautų rezultatų vidutinis neatitikimas neviršija 20,0 %, todėl išmatuotus bei apskaičiuotus eksperimentinių ir teorinių tyrimų duomenis galima laikyti patikimais.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Ciklonai įgavo platų panaudojimą šalinant kietąsias daleles procesuose, vykstančiuose pramonės bei energetikos objektuose. Šiuo metu yra daugybė skirtingų ciklonų modelių, pasižyminčiu itin aukštu valymo efektyvumu. Nagrinėjamo naujos kartos spiralinio daugiakanalio ciklono naujų technologijų kūrimo mastas sparčiai didėja, gerinant jų veikimo charakteristikas. Pritaikant tobulesnius techninius sprendimus, yra sumažinamas oro užterštumas kietosiomis dalelėmis.

2. Nustatyta, kad kuo didesnis oro (dujų) srautas yra nukreipiamas į periferinį kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“ periferiniame kanale, papildomai filtruojanti užterštą orą nuo itin smulkių ($x<20$ μm) kietųjų dalelių, tuo pačiu dėl padidėjusių pasipriešinimo jėgų greitis pradeda nežymiai mažėti. Nukreipiant 50 % oro (dujų) srauto į periferinį kanalą, vidutinis greitis sumažėja 4,1 % lyginant su atveju, kai į periferinį kanalą patenka 25 % oro (dujų) srauto. Nukreipus 75 % oro (dujų) srauto į periferinį kanalą, greitis sumažėja 4,2 % lyginant su atveju, kai į periferinį kanalą patenka 25 % oro (dujų) srauto ir 0,1 % lyginant su atveju, kai į prieš tai esantį kanalą patenka 50 % oro (dujų) srauto.

3. Atlikus daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu aerodinaminio pasipriešinimo tyrimus, kai oro srauto pasiskirstymo santykis skirtingas bei skirtingas kanalų skaičius (keturi, šeši ir aštuoni), nustatyta, kad didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra sukuriamas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto judėjimui ciklono kanaluose, nepriklausomai nuo kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties, t.y. nepriklausomai nuo oro (dujų) srautų pasiskirstymo santykio. Maksimalus ciklono įrenginio pasipriešinimas užfiksuotas, esant aštuonių kanalų spiraliniam ciklonui prie kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymo padėties 75/25 ir siekė 4400 (± 5 %) Pa. Taip pat nustatyta, kad mažėjant oro (dujų) srauto vidutiniam judėjimo greičiui ciklono kanaluose, pasipriešinimas taip pat sumažėja. Minimalus daugiakanalio ciklono su spiraliniu korpusu pasipriešinimas užfiksuotas, esant keturių kanalų spiraliniam ciklonui, kai pusžiedžiai išdėstyti 25/75 padėtimi prie oro (dujų) srauto judėjimo greičio 8 m/s ir siekė 1540 (± 5 %) Pa.

4. Eksperimentinių tyrimų metu taip pat nustatyta, kad oro (dujų) srautas efektyviausiai yra valomas nuo kietųjų granito dalelių, medienos kietosios dalelės valomos 2,2 % prasčiau negu granito, o medienos pelenų kietosios dalelės pašalinamos 3,8 % prasčiausiai negu granito ir 1,6 % negu medienos kietosios dalelės.

5. Remiantis skaitinio modeliavimo metu gautais rezultatais galima teigti, kad maksimalus gautų rezultatų vidutinis neatitikimas neviršija 20,0 %, todėl išmatuotus bei apskaičiuotus eksperimentinių ir teorinių tyrimų duomenis galima laikyti patikimais.

REKOMENDACIJOS

1. Vertinant eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus, prieita išvados, kad aerodinaminių charakteristikų ir oro (dujų) valymo efektyvumo atžvilgiu tinkamiausia yra šešių kanalų spiralinio ciklono konstrukcija, kai kreivalinijiniai pusžiedžiai išdėstomi 75/25 padėtimi bei palaikomas oro (dujų) srauto vidutinis judėjimo greitis ciklono kanaluose 12 m/s. Nustatyta, kad kuo didesnis oro (dujų) srautas yra nukreipiamas į periferinį kanalą, tuo didesnė susidaro oro (dujų) srauto „užuolaida“ periferiniame kanale, papildomai filtruojanti užterštą orą nuo itin smulkių ($x<20$ μm) kietųjų dalelių. Todėl rekomenduojama būtent minėta spiralinio daugiakanalio ciklono konstrukcija.

2. Remiantis tyrimų rezultatais, kurie parodė, kad geriausiai šalinamos kietosios dalelės, kurių tankis didelis, tikslingiausia būtų montuoti spiralinį daugiakanalį cikloną pramonės srityse, kur šalinamos didesnio tankio kietosios dalelės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

AGA. ANSYS DesignSpace. 2014. [interaktyvus]. Žiūrėta 2014 m. gegužės 15 d. Prieiga per internetą: < http://www.aga-cad.lt/produktai/gamybai/ansys-designspace/207>.

All biz. 2012. [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 22 d. Prieiga per internetą: < http://www.in.all.biz/twin-cyclones-g183986>.

Aplinkos oro kokybės vertinimo vadovas. 2006. [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 lapkričio 21 d. Prieiga per internetą: < http://gamta.lt/files/Aplinkos_oro_kokybes_vertinimo_vadovas.pdf>.

Aplinkos apsaugos agentūra. 2013. Oro kokybė aglomeracijose ir zonose 2012 m. [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. lapkričio 25 d. Prieiga per internetą: <http://aaa.am.lt>. Vilnius: p. 47.

Aplinkos apsaugos agentūra. 2013. Trumpai apie aplinkos oro kokybę 2012 metais. [interaktyvus]. Žiūrėta: 2013 m. gruodžio 2 d. Prieiga per internetą: <http://oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=4d0240c9-2641-46a2-8807-dcc8b813415d>.

Aplinkos kontrolei naudojami būdai. 2012. [interaktyvus]. Žiūrėta: 2012 gruodžio 15 d. Prieiga per internetą: < http://www.patariu.lt/studijos/2009/01/aplinkos-kontrolei-naudojami-budai/>.

Балан, С.А.; Буров, А.А.; Буров, А.И. 2000. Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутым контуром, *Труды Одесского политехнического университета* 2(11): 56-59.

Baltrėnas P., Butkus D., Oškinis V., Vasarevičius S., Zigmontienė A. 2008. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika, p. 67, 107, 110, 111.

Baltrėnas P.; Bakas A.; Vasarevičius S.; Masilevičius R. 2000. *Oro valymo įrenginiu katalogas*. Vilnius: Technika, p. 19, 21, 30, 383.

Baltrėnas, P.; Pranckevičius, M.; Lietuvninkas, A. 2011. Invstigation and evaluation of carbon dioxide emissions from soil in Neris regional park. *Journal of environmental engineering and landscape management.* 19(2): 115-122.

Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I.; Konoverskytė, S. 2012. Study of gas-solid flow in a multichannel cyclone, *Journal of environmental engineering and landscape management.* 20(2): 129-137.

Baltrėnas, P.; Vasarevičius, S.; Masilevičius, R.; Petraitis, E. 2003. *Atmosferos apsauga šiluminėje energetikoje.* Vilnius: Technika, p. 30.

Baltrėnas, P.; Zagorskis, A. 2010. Investigation into the air treatment efficiency of biofilters of different structures. *Journal of environmental engineering and landscape management.* 18(1): 23-31.

Bazienė, K.; Vasarevičius, S.; Siddiqui, A. A. 2012. Clogging test of landfill leachate drainage using different fillers. *Journal of environmental engineering and landscape management.* 20(4): 301-306.

Bernardo, S.; Mori, M.; Peres, A. P.; Dionisio, R. P.2006. 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.

Bendrasis programavimo dokumentas 2012. Mechaninė tarša. [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 1 d. Prieiga per internetą: <http://www.asu.lt/nm/l-projektas/-Aplinkos_tarsa/8.htm>.

Bokštuva 2012. Pirminio valymo įrenginys „Soby“ [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 28 d. Prieiga per internetą: <http://www.bokstuva.lt/lt/grudu-sandeliavimo-iranga/valomosios/pirminio-valymo-soby-danija>.

Braz, J. 2004. A new role for reduction in pressure drop in cyclones using computational fluid dynamics techniques. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 21(1): 10-14.

Буров, А.А.; Карамушко, А.В.; Гамолич, В.Я. 2012. Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов “Сиот” и многоканальных пылеуловителей “Буран”, *Праці Одеського політехнічного університету* 1(38): 271-275.

Буров, О.О. 2010. Очищення повітря від пилу в циклонах і буранах, *Аграрний вісник причорноморя* Вип. (55).

Chlebnikovas, A.; Baltrėnas, P. 2012. Ciklonų su cilindriniu ir spiraliniu korpusais eksperimentinių tyrimų analizė. „*Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika 4(5): p. 479–486.

Хмелев, В.Н.; Шалунов, А.В.; Шалунова К.В. 2009. Усовершенствованная конструкция циклона для очистки промышленных газов от дисперсных примесей. *Ползуновский вестник* № 3.

Daukšas J. 2004. *Aplinkos apsaugos technologijos.* Šiauliai: Šiaulių universiteto leidykla, p. 40, 43, 44.

Denafas G. 2001. *Atmosferos apsauga. Aplinkos oro tarša ir kontrolė.* Kaunas: Technologija, p. 24.

Denafas G. 2001. *Atmosferos apsauga*. *Atmosferos taršos mažinimas*. Kaunas: Technologija, p. 3.

Deska. 2013. Analitinės svarstyklės [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. sausio 20 d. Prieiga per internetą: <http://www.deska.lt/Prekiu-katalogas/Elektronines-svarstykles/Laboratorines-analitines>.

Ekofiltras. 2012. Dulkių nusiurbimo įrenginiai [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 15 d. Prieiga per internetą: <http://www.ekofiltras.lt/index.php?module=editable&action>.

EKOLOGenergy. 2013. Циклофильтр [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. sausio 15 d. Prieiga per internetą: <http://ecologenergy.com/Tsciklofil-tr.html>.

Ekologija. 2014. Kietosios dalelės – mažos, bet labai pavojingos [interaktyvus]. Žiūrėta 2014 m. sausio 15 d. Prieiga per internetą: <http://www.ekologija.lt/ekorasciai/kietosios_daleles_mazos_bet_labai_pavojingos>.

Gerybaitė, V.; Zagorskis, A. 2013. Užteršto oro filtracijai naudojamų neaustinių medžiagų aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. *“Mokslas – Lietuvos ateitis”. Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius: Technika 1(4): p. 27–33.

Gujun W., Gougang S., Xiaohu X., Mingxian S. 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *China University of Petroleum*, 94 p.

Hu, L. Y.; Zhou, L. X.; Zhang, J; Shi, M. X. 2005. Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator, *AIChE Journal* 51(3): 740–749.

Jakštonienė I., Vaitiekūnas P. 2009. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo taikymas ciklono tyrime.*"Mokslas – Lietuvos ateitis". Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius: Technika 1(4): p. 51–55.

Jakštonienė I., Vaitiekūnas P. 2011. Daugiakanalio ciklono efektyvumo tyrimai.*"Mokslas – Lietuvos ateitis". Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius: Technika 1(4): p. 18-22.

Jakštonienė, I.; Serebryanskyy, D.; Vaitiekūnas, P. 2011. Experimental research on the work of centrifugal filter when eliminating solid particles from clinker cooling system, *The 8th International Conference „Environmental Engineering":* selected papers, May 19–20, 2011. Vilnius: Technika, 134-138.

John, W.; Reischl, G. 2012. A Cyclone for Size-Selective Sampling of Ambient Air, *Journal of the Air Pollution Control Association*. 30(8): 872-876.

Карамушко, А.В., Гамолич, В.Я., Буров, А.А. 2012. Сравнительная оценка результатов промишленных испытаний циклонов "Сиот" и многоканальных пылеуловителей "Буран". *Праці Одеського політехнічного університету*, 2012. Вип. 1(38).

Kavaliauskas, A., Vaitiekūnas, P. 2001. Modelling of Reynolds stresses in overflowing air stresam in a square channel. *Energetika (3):* 38-43.

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

Konoverskytė, S., Vaitiekūnas, P. 2010. Kietųjų dalelių judėjimo C-30 ciklone tyrimai ir analizė. „*Mokslas – Lietuvos ateitis". Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika 1(4): p. 19-24.

LAND 28-98/M-08. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamosiose dujose nustatymas. Svorio metodas. Valstybės žinios 83 – 2072.

Leipus, L., Butkus, D. 2010. Kietųjų dalelių koncentracijos ore žvyrkelių ir asfaltuotų kelių pakelėse tyrimas. „*Mokslas – Lietuvos ateitis". Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika 1(4): p. 194-199.

Lekšaitis, J., Zagorskis, A. 2011. Plokštelinio biofiltro efektyvumo valant toluenu užterštą orą tyrimai. „*Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika 1(4): p. 23-28.

Liden, G.; Gudmundsson, A. 1997. Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design. *Journal Aerosol Sci.* 28(5):853.

Ma, H.; Ingham, D. B.; Wen, X. 2000. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones. *Elsevier Science* 31(9): 1097-1119.

Matuliauskaitė, A. 2009. Oro tarša kietosiomis dalelėmis, jos įtaka gyvenimo kokybei ir tašos mažinimo patalpose priemonės. „*Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika 1(5): p. 114–117.

Mediresta 2012. Masės nusodintuvai [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 28 d. Prieiga per internetą: <http://www.mediresta.lt/veiklos-sritys/metalo-gaminiai/>.

Meier, M.; Mori, M. 1999. Anisotropic behavior of the Reynolds stress in gas – solid flows in cyclones. *Powder Technology* 101(1999): 108-119.

Misevičius, A.; Baltrėnas, P. 2011. Experimental investigation of biogas production using biodegradable municipal waste, *Journal of environmental engineering and landscape management.* 19(2): 167-177.

Morsi, S.A. ; Alexander, A. J. 1972. An investigation of particle trajectories in twophase flow systems. *Journal of fluid mechanics* 55(2): 193-208.

Morkūnienė J., Baltrėnas P. 2006. Žirmūnų ir Žvėryno rajonų kietųjų dalelių koncentracijos ore nustatymo lyginamieji tyrimai. *„Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, p. 194–199.

Ogawa, A. 2011. Theory of the Cut-Size, The Fractional Collection Efficiency, and the Vortex Breakdown in the Axial Flow Hydro-Cyclone, *Particulate Science and Technology*. 50(3): 257-299.

Pagrindiniai atmosferos teršalai. [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. vasario 18 d. Prieiga per internetą: <http://193.219.38.28/Apie_tersalus.html>.

Particles in the Atmosphere. [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 2 d. Prieiga per internetą: <http://lis.sarnia.com/MonoA4.htm>.

Petraitis, E. 2010. Skaitinis modeliavimas aplinkos apsaugoje. Vilnius: Technika, p. 10, 60, 78, 79.

Patterson, P. A.; Munz, R. J. 1996. Gas and particle flow patterns in cyclones at room elevated temperatures. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 74: 213-221.

Petraitis, E., Vasarevičius, S. 2001. Kietųjų dalelių sklaidos atmosferoje skaitinis modeliavimas taikant „Varsa“ ir „Phoenics“ programas. Juornal of Environmental Engineering and Landscape Management 9(1): 23-28.

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

Petrauskas L., Idzelis R. L. 2005. Klaipėdos miesto taršos kietosiomis dalelėmis analizė. *„Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Aplinkos apsaugos inžinerija.* Vilnius: Technika, p. 121–128.

Промышленные вентиляторы 2012. Циклон ЦП-2 [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 23 d. Prieiga per internetą: <http://www.ventilator.kiev.ua/production/cikloni/ciklooni/Cp-2.html>.

PromPortal. 2012. Циклон ЦН-15 Харьков [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 22 d. Prieiga per internetą: < http://promportal.su/goods_409807.htm>.

Sakalauskas, L., Dapkūnaitė, V. 2012. *Informacinės technologijos inžinerijoje.* Paskaitų konspektas. Vilnius, p. 7 – 8.

Серебрянский, Д. А. 2004. Повышение эффективности газоочистки теплових энергетических устоновок. Одесский национальный политехнический университет,

Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. Одесса. 149 с.

Серебрянский, Д. А.; Плашихин С. В. 2012. Український патент Нр. 71979 „Циклофільтр“. Державна служба ітелектуалноі власності України „Опис до патенту на корисну модель“ 2012 г. Нр. 15, видача патенту 10.08.2012.

Стрелец, К.И.; Тананаев, А.В. 2004. Эффективность инерционных фильтров-сепараторов, *Материалы 3-й международной научно-практической конференции "Экономика, экология и общество России в 21-м столетии". - СПб.: СПбГТУ*

Striška V. 2001. *Aplinkosaugos įrenginiai ir sistemos*. Vilnius: Technika, p. 11, 39, 40.

Шалунов А.В. 2008. Ползуновский вестник. 2008. – №1-2. – С.66-75.

Technologijos.lt. 2014. Oro tarša [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. gruodžio 22 d. Prieiga per internetą: <http://www.technologijos.lt/n/mokslas/gamta_ir_biologija/S-17971/straipsnis/Oro-tarsa:-pramones-gigantai-uzleidzia-vieta-transportui?l=2&p=1>.

The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality [interaktyvus]. 2009. U. S. Environmental Protection Agency. Indoor Air Quality. Žiūrėta 2012 m. lapkričio 28 d. Prieiga per internetą: <http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidest.html>.

Tonetti Filtri Italiano. 2012. Multi Module Cyclone Separator [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 22 d. Prieiga per internetą: < http://www.tonettifiltri.com/Cyclone.html>.

Уквентсистемы 2012. Циклон СИОТ [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 28 d. Prieiga per internetą: <http://www.ukrvent.com/siot-4.html>.

УкрЭнерго-Альянс 2012. Циклон ЛИОТ [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 28 d. Prieiga per internetą: < http://v-z.com.ua/product/ciklon-liot-ulavlenvanie-zernovoj-pyli/>.

Универсал прибор. 2013. Анализатор дымовых газов testo 325 M/XL [interaktyvus]. Žiūrėta 2013 m. sausio 20 d. Prieiga per internet: <http://www.pribor.ru/npf/k_ob/gazoanalizatory/>.

Vaitiekūnas, P., Špakauskas, V. 2003. *Šilumos ir masės pernašos procesų aplinkoje modeliavimo principai.* Vilnius: Tachnika, p. 10.

Vaitiekūnas, P. 2007. *Šilumos mainų matematinis modeliavimas.* Vilnius: Technika, p. 3, 210, 246 - 250.

Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I. 2010. Analysis of numerical modeling of turbulence in a conical reverse-flow cyclone. *Journal of environmental engineering and landscape management.* 18(4): 321-328.

Vaiškūnaitė, R. 2011. Mathematical modelling of biofilter effectiveness in pH regimes. *8th International Conference "Environmental Engineering"*. Vol. 1: 408-415.

Valstybinės visuomenės sveikatos priežiūros tarnybos prie Sveikatos apsaugos ministerijos vykdomas 2007 – 2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksmų programos 4 prioriteto „Administracinių gebėjimų stiprinimas ir viešojo administravimo efektyvumo didinimas“ įgyvendinimo priemonės VP1-4.3-VRM-02-V „Viešųjų politikų reformų skatinimas“ projektas „Gyvenamosios aplinkos sveikatos rizikos veiksnių valdymo tobulinimas“ veiklos ataskaita *„Oro taršos rizikos sveikatai vertinimas“*. 2012. Vilnius, p. 9, 10.

Vasarevičius, S. 2011. Investigation and evaluation of H2S emissions from a municipal landfill. *Journal of environmental engineering and landscape management.* 19(1): 12-20.

Zagorskis, A., Spiečiūtė, R. 2011. Lašelinio biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. *„Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, p. 3(5) 64-69.

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

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

Зенит 2012. Циклон ЦП-2 [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 23 d. Prieiga per internetą: < http://www.zenit-sib.ru/cp2.htm>.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Platova, D., Baltrėnas, P. 2012. Oro srauto parametrų kitimo spiraliniame ciklone eksperimentiniai tyrimai. *„Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, p. 91–96.

Baltrėnas, P.; Platova, D. 2014. Daugiakanalio spiralinio oro valymo įrenginio su kreivalinijiniais kanalais aerodinaminiai tyrimai (Aerodynamic analysis of the multichannel air cleaning equipment with curvilinear channels). Pateikta: *„Environmental Technology Journal“*. England.

Baltrėnas, P.; Platova, D. 2014. Daugiakanalio spiralinio oro valymo įrenginio su kreivalinijiniais kanalais kietųjų dalelių atskirimo eksperimentiniai tyrimai (Experimental research of solid particles separation using multi-channel spiral air cleaning device with curvilinear channels). Pateikta: „Journal of Environmental Sciences“. China.

Platova, D., Baltrėnas, P. 2014. 300 m^3/h našumo spiralinio daugiakanalio ciklono valymo efektyvumo tyrimas, šalinant x < 20 µm kietąsias daleles. *„Mokslas – Lietuvos ateitis“. Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika.

KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

Platova, D., Baltrėnas, P. 2012. 16 - oji jaunųjų mokslininkų konferencija *„Mokslas – Lietuvos ateitis“*. 2013 m. balandžio 11 d. Vilnius.

Platova, D., Baltrėnas, P. 2014. 17 - oji jaunųjų mokslininkų konferencija *„Mokslas – Lietuvos ateitis“*. 2014 m. balandžio 10 d. Vilnius.

Bazienė, K., Vasarevičius, S., Platova, D. *“International Conference on Environment and Renewable Energy”*. 2014 m. gegužės 7–8 d. Paryžius.

Baltrėnas, P., Platova, D., Venslovas, A. 9-oji tarptautinė konferencija *„Aplinkos inžinerija“*. 2014 m. gegužės 22–23 d. Vilnius.

PRIEDAI