



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

Aleksandras Chlebnikovas

**ŠEŠIAKANALIO CIKLONO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR
TOBULINIMAS**

**EXPERIMENTS RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SIX CHANNEL
CYCLONE**

Baigiamasis magistro darbas

Aplinkos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H17004

Aplinkos apsaugos inžinerijos specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

APLINKOS APSAUGOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Aleksandras Chlebnikovas

**ŠEŠIAKANALIO CIKLONO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR
TOBULINIMAS**

**EXPERIMENTS RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SIX CHANNEL
CYCLONE**

Baigiamasis magistro darbas

Aplinkos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H17004

Aplinkos apsaugos inžinerijos specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Aplinkos apsaugos katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Aplinkos inžinerijos** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Šešiakanalio ciklono eksperimentiniai tyrimai ir tobulinimas**

Autorius **Aleksandras Chlebnikovas**

Vadovas **prof. habil. dr. Pranas Baltrėnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas šešiakanalis ciklonas, skirtas atskirti iš oro (dujų) srauto smulkiadispersias kietąsias daleles. Vertinamos oro taršos kietosiomis dalelėmis problemos pasaulyje ir Lietuvoje bei jų poveikis aplinkai ir žmogui. Išnagrinėtos Kietųjų dalelių charakteristikos, koncentracijos nustatymo metodai bei emisijų mažinimo būdai, taikant oro valymo įrenginius. Pateikta pasaulio mokslininkų užpatentuočių sukurtų ciklono tipo oro valymo įrenginių įvairovė, jų konstrukciniai ypatumai bei veikimo principai. Atlikti eksperimentiniai tyrimai, nagrinėjant aerodinamines įrenginio charakteristikas bei nustatant šešiakanalio ciklono kietųjų dalelių atskirimo iš oro (dujų) srauto efektyvumo laipsnį. Įrenginio aerodinaminiai ir efektyvumo parametrai buvo nustatomi, kintant oro (dujų) srauto įtekėjimo greičiui, esant skirtingai vidinei įrenginio geometrijai, panaudojant skirtingos prigimtės kietąsias daleles. Atliktas nagrinėjamo įrenginio matematinis modeliavimas, gauti rezultatai yra palyginami su fizikinio modelio eksperimentinių tyrimų rezultatais. Išnagrinėjus atliktų fizikinio ir matematinio modelių eksperimentinių tyrimų rezultatus, įvertinus jų atitikimą, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, apžvalginė dalis, šešiakanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų eksperimentiniai tyrimai, šešiakanalio ciklono valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai, dvifazio oro srauto šešiakanaliame ciklono skaitinis modeliavimas, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 117 p. teksto be priedų, 68 iliustr., 2 lent., 110 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: šešiakanalis ciklonas, smulkiadispersės kietosios dalelės, oro srautas, aerodinaminės savybės, efektyvumas, cilindrinis korpusas, 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 Final work

Title **Experimental Research and Development of Six Channel Cyclone**

Author **Aleksandras Chlebnikovas**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Pranas Baltrėnas**

Thesis language:

Lithuanian

Annotation

In the final master work was analyzed the six channel cyclone. This device was intended for the separation of finely dispersed particles from airflow. The project analyzed the air and particulate matter pollution problems in Lithuania and in world and also them impact to environment and human. The review of particulate matter characteristics, concentration methods and technologies for reducing emissions through air cleaning devices. The world's scientists developed a variety of air cleaning cyclone devices was presented and patented, including their features design and operating principles. In this master work was described of cyclone research operations methodology, trial experiments, machinery and equipment. The third chapter presents the experimental results obtained of aerodynamic characteristics and determined the six channel's cyclone the final particulate matter catching efficiency. Experiments were determined by changing inflow velocity, using different inside geometry of cyclone and using different dust from the nature. The fourth section contains mathematical modeling of two-phase flow, during the cleaning process of cyclone. The results obtained during the simulation are compared with the experimental test results. In the end, was done final conclusions and recommendations, which was presented the all used literature.

Structure: introduction, overview, aerodynamic characteristics of the six canals cyclone, experimental studies of cleaning performance, mathematical modeling of two-phase flow, conclusions and suggestions, references.

Thesis consists of: 117 p. text without appendixes, 68 pictures, 2 tables, 110 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: six channel cyclone, finely dispersed particles, airflow, aerodynamic characteristics, efficiency, cylindrical casing, curvilinear half-rings.

Turinys

IVADAS	10
1. APLINKOS ORO TARŠA KIETOSIOMIS DALELĖMIS BEI VALYMO ĮRENGINIAI.....	13
1.1. Atmosferos antropogeninės taršos kietosiomis dalelėmis šaltiniai	13
1.2. Užterštumo kietosiomis dalelėmis problemų pasaulyje ir Lietuvoje analizė	17
1.3. Kietųjų dalelių taršos poveikis aplinkai ir žmogui	21
1.4. Kietųjų dalelių bendra charakteristika. Kietųjų dalelių dispersiškumas.....	26
1.5. Kietųjų dalelių koncentracijos nustatymo metodai	30
1.6. Ciklono tipo oro valymo įrenginiai ir jų taikymas	34
1.6.1. Oro valymo ciklono tipai ir jų taikymas.....	35
1.7. Oro srauto ciklonuose skaitinis modeliavimas	42
1.8. Pirmojo skyriaus išvados	45
2. ŠEŠIAKANALIO CIKLONO AERODINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	46
Įvadas.....	46
2.1. Ciklono aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodika.....	46
2.2. Aerodinaminių charakteristikų tyrimų duomenų analizė	55
2.3. Antrojo skyriaus išvados	62
3. ŠEŠIAKANALIO CIKLONO VALYMO EFEKTYVUMO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI..	63
Įvadas.....	63
3.1. Ciklono valymo efektyvumo nustatymo metodika.....	63
3.2. Ciklono valymo efektyvumo tyrimo duomenų analizė	70
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	78
4. DVIFAZIO ORO SRAUTO ŠEŠIAKANALIAME CIKLONE SKAITINIS MODELIAVIMAS	79
Įvadas.....	79
4.1. Dvifazio srauto skaitinio modeliavimo metodika.....	80
4.2. Dvifazio srauto skaitinio modeliavimo duomenų analizė	84
4.3. Ketvirtąjo skyriaus išvados	108
5. DARBO IŠVADOS.....	110
REKOMENDACIJOS	111
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	112
AUTORIAUS PUBLIKUOJAMŲ DARBŲ SĄRAŠAS.....	117

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Išmestų kietųjų dalelių kiekių 2005 - 2009 metais Lietuvos miestuose kitimo dinamika.....	19
1.2 lentelė. Didžiausių Europos Šalių - teršėjų, išmestų kietųjų dalelių kiekių 2004 -2008 metų, kitimo dinamika.....	20

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Tiesioginis kietųjų dalelių susiformavimas.....	14
1.2 pav. Netiesioginis kietųjų dalelių susiformavimas.....	14
1.3 pav. Automobilių priemonių skaičiaus kitimo dinamika.....	15
1.4 pav. Didžiausius kietųjų dalelių išmetimo kiekius, tonomis, per 2009 metus išskiriantys Lietuvos miestai.....	16
1.5 pav. Oro taršos ES šalyse narėse kitimo dinamika.....	18
1.6 pav. Kietųjų dalelių emisijų 2007 - 2009 metų kitimo dinamika atsižvelgiant į jų rūšis.....	21
1.7 pav. Atmosferoje galinčios egzistuoti kietosios dalelės.....	29
1.8 pav. Oro užterštumo nustatymo matavimo įrenginys.....	33
1.9 pav. Principinė ašinio ciklono schema.....	37
1.10 pav. Ašinio ciklono ir oro srauto judėjimo principinė schema.....	38
1.11 pav. Ciklonų tipų sugavimo efektyvumas.....	39
1.12 pav. Sukurto ašinio ciklono, vidaus degimo variklio dujų valymui, schema.....	39
1.13 pav. Ašinis ciklonas su keičiamu vidiniu išdėstymu.....	40
1.14 pav. Ašinio ciklono, atskiriančio dujas, skysčius ir kietąsias daleles, principinė schema.....	41
1.15 pav. Inercinis filtras – separatorius.....	41
2.1 pav. Ciklono eksperimentinio stendo schema.....	47
2.2 pav. Oro srauto greičio matavimas.....	48
2.3 pav. Oro dinaminio slėgio matavimas ciklono konstrukcijos viduje.....	49
2.4 pav. Ciklono vidinė konstrukcija.....	50
2.5 pav. Šešiakanalio ciklono konstrukcijos principinė schema.....	51
2.6 pav. Slėgio (dešinėje) ir ciklono efektyvumo nustatymo svoriniu metodu (kairėje) matavimuose panaudoti ortakių atvamzdžiai.....	53
2.7 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėsčius I padėtyje.....	56

2.8 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėsčius II padėtyje.....	56
2.9 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėsčius I padėtyje.....	57
2.10 pav. Greičių pasiskirstymas ciklono kanaluose, kintant oro srautui.....	58
2.11 pav. Oro tūrio debitų kitimas prieš ir už ciklono, priklausomai nuo ventiliatoriaus sukuriama srauto greičio.....	59
2.12 pav. Ciklono įrenginio aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo kreivalinijinių žiedų tipo, išdėstymo bei įtekėjimo greičio.....	61
3.1 pav. Kietųjų dalelių mėginių tipai panaudoti eksperimentiniuose tyrimuose.....	64
3.2 pav. Kietųjų dalelių smulkinimo malūnas.....	64
3.3 pav. Kietųjų dalelių sijojimo įrenginys.....	65
3.4 pav. Šešiakanalio ciklono vidinės konstrukcijos sandara.....	66
3.5 pav. AFA-VP-20 audinio filtras, panaudojamas oro koncentracijos nustatymui.....	68
3.6 pav. Fotoelektrinis aerozolių dalelių skaitiklis A3-5.....	69
3.7 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant stiklo kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai.....	71
3.8 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant techninės druskos kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai.....	72
3.9 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant molio kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai.....	72
3.10 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo stiklo kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio.....	75
3.11 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo techninės druskos kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio.....	76
3.12 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo molio kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio.....	77
4.1 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 µm stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	85
4.2 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	86

4.3 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ (A), 5 g/m ³ (B) ir 10 g/m ³ (C) koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	87
4.4 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 µm stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	88
4.5 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	89
4.6 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ (A), 5 g/m ³ (B) ir 10 g/m ³ (C) koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	89
4.7 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 µm stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	90
4.8 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	91
4.9 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	92
4.10 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 µm stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	92
4.11 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	93
4.12 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 µm stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	94
4.13 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	95
4.14 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 µm stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	96
4.15 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles.....	96
4.16 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 µm techninės druskos daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	97
4.17 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	98

4.18 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	99
4.19 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ (A), 5 g/m ³ (B) ir 10 g/m ³ (C) koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	100
4.20 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	100
4.21 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	101
4.22 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles.....	102
4.23 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 µm molio kietąsias daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui.....	103
4.24 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	103
4.25 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	104
4.26 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	105
4.27 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	106
4.28 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	107
4.29 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 µm dydžio 0,5 g/m ³ , 5 g/m ³ ir 10 g/m ³ koncentracijų molio kietąsias daleles.....	108

IVADAS

Problema

Aplinkos užterštumo problema tapo populiari jau nuo XX amžiaus vidurio, prasidėjus ypač sparčiam pramonės sektoriaus augimui. Aplinkos užterštumas yra žymiai didinamas žmogaus veiklos, todėl stengiamasi naudoti kuo racionalesnes technologijas, mažinti naudojamų žaliavų sudėtyje teršiančių medžiagų kiekį. Taip pat yra atsisakoma įprasto iškastinio riboto kuro panaudojimo, vietoje jo įdiegiamos įvairios energijos išgavimo sistemos, nukreiptos naudoti atsinaujinančius energetinius išteklius.

Visame pasaulyje, taip pat Lietuvoje, dažniausias teršalas yra kietosios dalelės ir dažniausiai jų leistini kiekiai yra viršijami. Kietųjų dalelių emisijos pastebimos visose gamybos sektoriuose, taip sukeliant atmosferos ir pačios gamybinės patalpos oro užterštumą. Dėl didelių dalelių koncentracijų ore kyla pavojus žmogaus sveikatai, darbingumui ir komfortui bei esančių įrenginių techninei būklei.

Lokali atmosferos tarša iš pramoninių ir kitos paskirties įmonių užima vieną iš svarbiausių bei gresiančių Žemės ekologijai šiuolaikinių problemų. Šilumos tinklų plėtimas bei transporto kuro pakeitimas ekologiškesnių bei perėjimas prie elektros variklių didina pramoninio sektoriaus įtaką bendroje atmosferos taršoje. Didžiausia teršiančių medžiagų dalis tenka kietosioms dalelėms, kurios susidaro įvairiuose technologiniuose procesuose bei deginant kietą kurą, kurie gali būti pernešami dideliais atstumais. Esant didelėms koncentracijoms Žemės paviršiuje gali sukelti lokalų bei globalų sąlygų pakeitimą ir pakenkti visai gyvajai gamtai. Todėl įvairių pramonės šakų progresas, siejamas su aplinkosaugos tikslais bei racionalaus gamtos išteklių panaudojimu, dažnai tarpusavyje susiję, kai kalbama apie užteršto oro srautų valymą.

Oro valymo problema reikšminga tuo, kad glaudžiai susijusi su sanitarinėmis higienos, ekologijos ir ekonomijos reikalavimais. Oro valymo etapas užima tarpinę kompleksinio darbų saugos uždavinio vietą. Tinkamai pritaikius oro valymo įrenginius darbo zonoje, galima pasiekti leistinų normatyvų reikšmių. Tačiau, nesant tinkamai oro valymo sistemai, visi teršalai teršdami patenka į atmosferos orą. Pramoninės gamybos sukeliama dulkėtume mažinimo etapas turi būti laikomas „a priori“, t.y. iš anksto numatytu, norint tinkamai palaikyti aplinkosauginę mūsų planetos būklę.

Darbo aktualumas

Aplinkosauginės būklės gerinimas svarbus tuo, kad vykstantis gamtos procesų sąlygų pakeitimas, esant žmogui, nepakenktų pačiam žmogui bei visai planetos gerovei. Nuo paties

planetos atsiradimo joje susiformavo tam tikros sąlygos bei vykstantys procesai. Žmogaus veikla padarė ir daro iki šiol didelę žalą visai Žemės ekologijai.

Ciklono tipo oro valymo įrenginių gamyba ir projektavimas yra labai išplėsta rytų Europoje – Rusijoje, Ukrainoje bei Azijoje – Kinijoje.

Ukrainos Kijevo Politechninis Institutas pirmaujantis Ukrainoje – viena iš žinomiausių ciklono oro valymo įrenginių kūrimo, projektavimo, eksperimentų atlikimo bei gamybos mokslo institucijų. Yra sukurtas išcentrinis kanalinis oro valymo įrenginys – ciklonas, kurio kūrėjai taip pat yra Ukrainos Nacionalinės Mokslo akademijos technikos mokslų kandidatai – Dmitriy Serebryanskiy ir Eudgen Novacovsky.

Lietuvos Vilniaus Gedimino technikos universitete Aplinkos apsaugos katedros mokslininkė Inga Jakštonienė, nagrinėjanti ciklono tipo oro valymo įrenginius, yra sukūrusi bei pateikusi patentinę paraišką daugiakanalio ciklono įrenginiui, kuris skirtas oro valymui nuo smulkiadispersių kietųjų dalelių.

Patentų bazėje, ypač pastaraisiais metais, sparčiai didėja naujų oro valymo nuo kietųjų dalelių išradimų skaičius. Daugelis įrenginių yra susiję su atliekų tvarkymo sistemos technologijomis. Negalima išskirti vienintelės šalies, kurioje kuriami įrenginiai, tačiau daugiausiai aptinkama Rusijos, JAV, Kinijos, Vokietijos šalių atstovų išradimų. Žinomiausi kūrėjai – Mark Krymsky (JAV, PA), Gianni Borinato (Italija, Vičenzos universitetas), Hans-Peter Kampfer (Vokietija, Ilerborn).

Šiuo metu taikomi oro valymo išcentriniai įrenginiai – ciklonai, nepasižymi itin dideliu valymo efektyvumu, ypač mažo dispersiškumo teršalų dalelėms. Sukurtas šešiakanalis ciklonas pritaikytas užteršto oro srauto arba dujų valymui nuo kietųjų dalelių, kurių skersmuo siekia vos 1 μm . Pasiekus tokio efektyvumo laipsnio, išvalyto oro srauto kietųjų dalelių koncentracijos bus ypač mažos.

Šiuo metu daugeliui pramonės įmonių išmetamųjų oro srautų valymas nuo teršalų emisijų yra vienas iš aktualiausių atmosferos oro apsaugos uždavinių. Prieš išleidžiant oro srautą į atmosferą, panaudojant oro valymo technologijas, išvengiama atmosferos oro užterštumo.

Darbo tikslas

Atlikti šešiakanalio ciklono eksperimentinius tyrimus, nustatant smulkiadispersių dalelių išvalymo efektyvumą.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti skirtingo dispersiškumo dalelių oro sraute valymo efektyvumą, atsižvelgiant į nustatytus oro srauto tekėjimo greičius bei žiedų padėtis.
2. Naudojant skirtingos prigimties kietąsias daleles, nustatyti ciklono valymo efektyvumą, reguliuojant oro srauto parametrus.
3. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais nustatyti kietųjų dalelių atskirimo efektyvumo ciklone priklausomybes nuo greičio, debito bei koncentracijos parametrų
4. Atlikti dvifazio srauto skaitinį modeliavimą.

Darbo naujumas

Šešiakanalio ciklono kompleksiniai eksperimentiniai tyrimai ir jame vykstančių procesų modeliavimas.

Darbo praktinė vertė

Modernizuotas ciklonas gali būti įrengiamas pramonės patalpose, reikalaujančiuose didelio valymo efektyvumo nuo teršalų kietųjų dalelių. Atsižvelgiant į ekonominius aspektus, šis įrenginys leis sutaupyti investicijas, kadangi yra nebrangus, lyginant su kitais oro valymo dideliu efektyvumu pasižyminčiais įrenginiais. Ciklono žiedų reguliavimo galimybė leidžia derinti įrenginį prie skirtingos kilmės dalelių, esant skirtingiems greičiams, parenkant efektyviausią atvejį.

1. Aplinkos oro tarša kietosiomis dalelėmis bei valymo įrenginiai

Oras – tai ne tik dujų mišinys, bet ir jame pakibusios kietos ir skystos dalelės, vadinamos aerozoliais. Iš įvairių taršos šaltinių į orą patekusių cheminių medžiagų emisijos išsisklaido, dalis jų transformuojasi į kitas medžiagas ar junginius ir oro masių pernešamos tolyn nuo šaltinio. Vykstant atmosferos valymosi procesams (išplaunant teršalus krituliams arba jiems sausai nusėdant), teršiančios medžiagos priklausomai nuo jų cheminių ir fizinių savybių bei meteorologinių sąlygų įvairiu greičiu, taigi ir įvairiu atstumu nuo taršos šaltinio (nuo keliasdešimties metrų iki tūkstančių kilometrų), nusėda sausumoje ar ant vandens paviršiaus.

Daugelis didžiausių pastarųjų dešimtmečių ekologinių problemų, pradedant lokaliniais "pramoninio smogo" ir baigiant regioniniais bei globaliniais "rūgščių lietų", "šiltnamio efekto" ir "ozono skylių" reiškinių, kilo dėl oro užterštumo.

Oro valymo įrenginių patentinė bazė vis didėja, išrandami nauji konstrukciniai įrenginiai, kurie sugeba valyti vis smulkesnes teršalų daleles, taip didinant bendrą išvalomo oro efektyvumą.

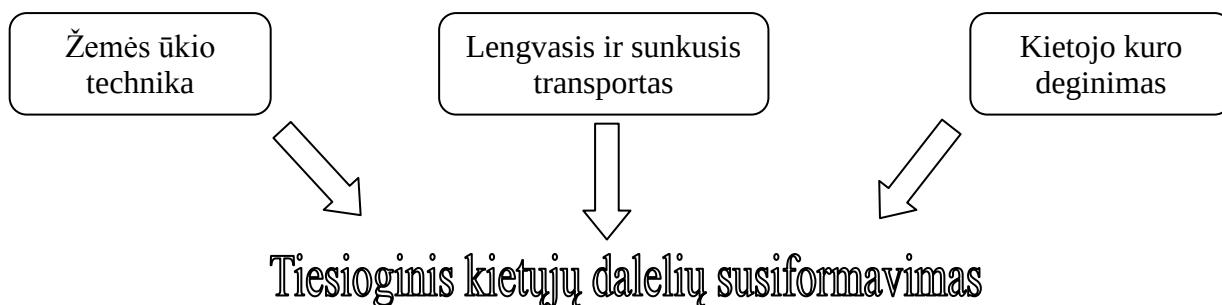
1.1. Atmosferos antropogeninės taršos kietosiomis dalelėmis šaltiniai

Oro užterštumas tampa sudėtinga bei didėjančia problema. Oras miestų gatvėse yra užterštas automobiliu išmetamomis dujomis bei teršalais, patenkančiais į atmosfera iš stacionariu šaltiniu. Tačiau atlikti tyrimai rodo, kad patalpų oras gali būti kur kas labiau užterštas nei lauko oras. Aplinkos oro kokybė turi įtakos gyventojų sergamumui: epidemiologiniais tyrimais nustatyta, kad aplinkos oro užterštumas didina sergamumą įvairiomis respiracinėmis infekcijomis, kitomis kvėpavimo sistemos, širdies ligomis. Kenksmingos aplinkos sąlygos kelia pavojų ne tik dabar gyvenantiems žmonėms, bet ir ateinančioms kartoms. Nuo oro kokybės visų pirma priklauso gyvenimo ir darbo sąlygos (Matuliauskaitė 2009).

Aplinkos oro teršalais laikomos medžiagos, kurioms patekus į atmosferą pakinta įprasta oro sudėtis (Denafas 2000). Pakitus oro sudėčiai atsiranda tokios problemos kaip aplinkos rūgštėjimas, ozono sluoksnio sumažėjimas, radionuklidų plitimas, klimato kaita, augmenijos degradacija, žalingas poveikis žmonėms, dažnai sukeliantis kvėpavimo ir kitokio pobūdžio ligas (Girgždys 2000).

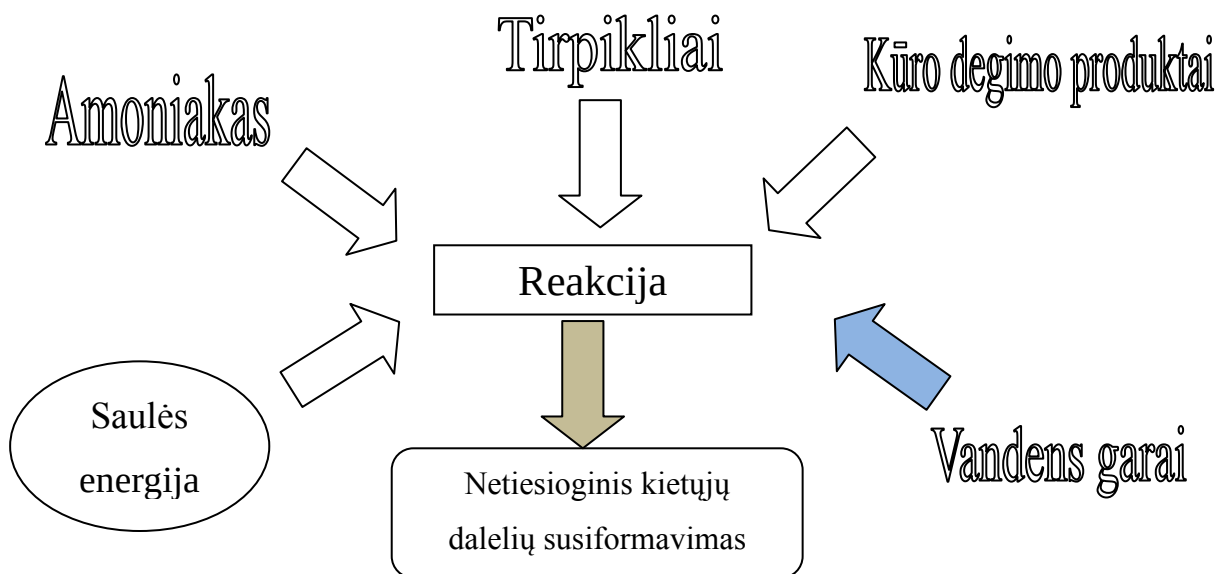
Teršalus išskiriantys šaltiniai ir procesai skirstomi į dvi grupes: gamtinius ir sąlygotus žmogaus veiklos – antropogeninius. Gamtiniams oro taršos procesams priklauso: ugnikalnių išsiveržimai, kuomet į atmosferą išmetami dideli kietų ir skystų medžiagų kiekiai; smėlio audros; miškų gaisrai; cheminiai procesai atmosferoje su žaibais; žiedadulkių išsiskyrimas žydint augalams (Denafas 2000).

Dalis kietųjų dalelių *tiesiogiai* išmetama į atmosferą (1.1 pav.). Jas išskiria tokie taršos šaltiniai kaip lengvieji automobiliai, sunkvežimiai, autobusai, pramonės įmonės, statyb vietės. Be to, jos susidaro dirbant žemės ūkio darbus, taip pat naudojantis žvyrkeliais, smulkinant akmenis ar deginant medieną (Morkūnienė 2006).



1.1 pav. Tiesioginis kietųjų dalelių susiformavimas

Kita dalis kietųjų dalelių susidaro cheminių reakcijų metu. Jos susiformuoja *netiesiogiai*, teršalams, tokiems kaip sieros dioksidas (SO_2), azoto oksidai (NO_x), lakieji organiniai junginiai (LOJ), susidariusiems degimo procesų metu (automobilių varikliuose, jėgainėse, kitų pramoninių procesų metu), reaguojant su saulės šviesa ir vandens garais (1.2 pav.) (Morkūnienė 2006).



1.2 pav. Netiesioginis kietųjų dalelių susiformavimas

Įprasta išskirti dvi svarbiausias antropogeninių taršos šaltinių rūšis - stacionarius ir mobilius. Stacionarių šaltinių tarpe didžiausią dalį teršalų (sieros dioksidą (SO_2), azoto oksidus (NO_x), anglies monoksidą (CO), lakiuosius organinius junginius, kietąsias daleles) išmeta pramonės ir energetikos įmonės. Didžiausia, beveik 90 % teršalų dalis susidaro degimo procesų metu: šiluminėse elektrinėse, pramoninėse ir namų ūkio katilinėse (Denafas 2000).

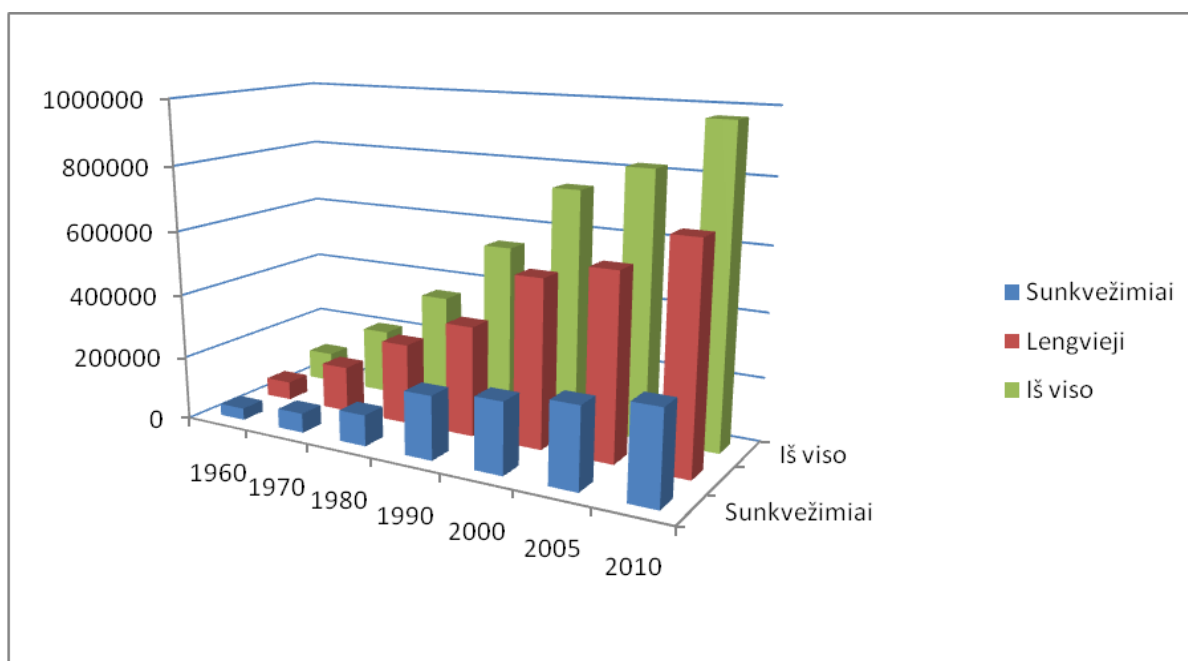
Pagrindiniai atmosferos taršos šaltiniai yra mobilieji (transporto priemonės) ir stacionarieji (pramonės įmonės ir energetikos objektai) taršos šaltiniai. Iš mobiliųjų taršos šaltinių (automobilių

transportas, aviacija, laivynas, geležinkeliai, statybos mašinos) į atmosferą patenka apie du trečdalius visų išmetalų, o automobilių transporto dalis iš jų sudaro net 96 % (Baltrėnas et al. 2008).

Daugėjant automobilių, atitinkamai labiau teršiama ir atmosfera. Palyginti su elektrinėmis ir pramonės įmonėmis, automobilių išmetamų kenksmingų medžiagų (ypač jei juose neįtaisyti neutralizatoriai) praktiškai neįmanoma sugaudyti, todėl visos jos patenka į atmosferą (Baltrėnas et al. 2008). Didžiausią dalis visų teršalų, išmetamų automobilių transportu tenka tokiems teršalams kaip CO, NO_x, švinas (Pb), benzenas.

Automobilių vidaus degimo variklių išmetamosiose dujose nustatoma daugiau nei du šimtai įvairių cheminių junginių, kurių dauguma kenkia žmogaus sveikatai ir visų gyvųjų organizmų vystymuisi, sukelia metalo koroziją, ardo statybines medžiagas ir t.t. (Baltrėnas et al. 2008).

Apie transporto sektoriaus išskiriamų teršalų kiekio padidėjimą galima spręsti pagal automobilių transporto skaičiaus augimą visame pasaulyje (1.3 pav.).



1.3 pav. Automobilių priemonių skaičiaus kitimo dinamika (Autostatistika 2010)

Teritorijos, kuriose pasklinda automobilių išmetamosiomis dujomis užterštas oras, taip pat kenksmingų medžiagų koncentracija prie gatvių priklauso nuo automobilių srauto intensyvumo, jo sudėties (lengvieji, vidutiniai, sunkieji automobiliai), variklių ir naudojamo kuro rūšies tipo, gatvės dangos būklės, aeracijos sąlygų, kurias lemia reljefas, aplinkinis apstatymas ir meteorologės sąlygos (Baltrėnas et al. 2008).

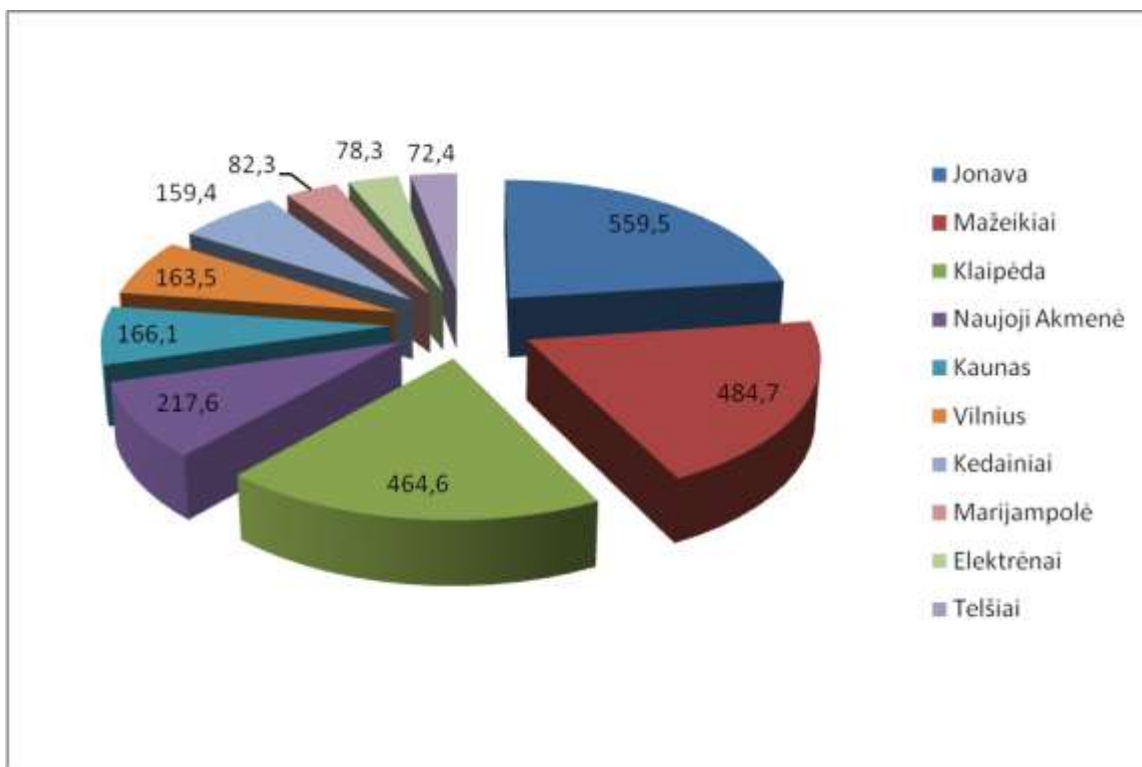
Kalbant apie teršalų neigiamą poveikį aplinkai, dažniau tenka išgirsti apie antropogeninės kilmės oro teršalus. Pastarieji pagal agregatinę būvį skirstomi į dvi grupes:

- kietosios dalelės ir aerozoliai;
- dujos.

Dalelės ir aerosoliai dažniausiai pastebimi plika akimi (dūmai, alyvos rūkas ir t.t). Tuo paprastai nepasižymi dujiniai teršalai, nebent pliūpsniais būtų išmetamos pvz., rudos azoto dioksido (NO_2) ar žalios chloro (Cl_2) dujos. Ypatingai oro teršalų grupei priklauso kvapiosios medžiagos, kurios juntamos jau žemiausių koncentracijų ribose (Denafas 2000).

Svarbu paminėti, kad dalis teršalų atnešama iš kitų šalių, tad Lietuvos oro taršos lygiai vienu ar kitu mastu priklauso nuo visos Europos taršos lygių, o oro priemaišų koncentracijų dydžiai – nuo konkrečios meteorologinės situacijos ir jos procesų. Kai oro masės Lietuvą pasiekia praėjusios Vokietiją ir Lenkiją, daugiausia iškrenta sieros. Iš Lietuvos didžioji dalis sieros kiekio išnešama į Rusiją. Taip yra todėl, kad pernašų iš vakarų pasikartojimo dažnis yra žymiai didesnis nei iš rytų. Oro pernašos iš šiaurės žymiai „švaresnis“. Nedažnos, bet labai užterštos oro masės ateina iš pietų (Morkūnienė 2006).

Atliekos ir kenksmingos medžiagos susidaro deginant įvairių rūšių kurą. Kai kurių stambių pasaulio šiluminių elektrinių deginamo kuro naudingumo koeficientas yra 0,4–0,42, vidurkis būtų 0,34–0,35. Jei atsižvengtume į tinkluose patiriamus energijos nuostolius vienai energijos rūšiai virstant kita, tai naudingumo koeficientas sumažėtų du ir daugiau kartų (Baltrėnas et al. 2008).



1.4 pav. Didžiausius kietųjų dalelių išmetimo kiekius, tonomis, per 2009 metus išskiriantys Lietuvos miestai

Daugiausia atmosfera teršiama deginant mazutą ir anglį. Pagrindiniai teršalai - sieros, anglies ir azoto oksidai, dalelės bei aerosoliai. Kol kas tik kai kurios stambios katilinės ir šiluminės elektrinės turi įrenginių teršiančioms medžiagoms sulaikyti. Daugiausia teršalų Lietuvoje į aplinką

išmetė Elektrėnų šiluminė elektrinė. Čia 1990 m. į aplinką išmesta 41 095 t teršalų, iš jų 520 t – kietųjų dalelių ir 40 577 t – dujų. Šiuo metu ši elektrinė dirba budinčiu režimu, t. y. dirba tik vienas blokas, todėl išmetalų daug kartų sumažėjo. Be to, šiame bloke yra sumontuotas elektrostatinis filtras, surenkantis kietąsias daleles (suodžius). Pagrindine elektros dalį gamina Ignalinos atominė elektrinė. Ypač daug žalos daro šimtai smulkių katilinių. Jas panaikinus ir centralizavus šilumos tiekimą, mažuose miesteliuose arba kaimuose įrengus nedidelio galingumo autonomines katilines, galinčias naudoti įvairų kurą (pvz., medieną), aplinkos taršą būtų galima gerokai sumažinti (1.4 pav.) (Baltrėnas et al. 2008).

Nors Lietuva turi palyginti nedaug vietinių energijos išteklių, tačiau šalies energetikai ir ekonomikai reikšminga tai, kad jų dalis bendrame suvartojamų pirminės energijos išteklių balanse išaugo ir dabartiniu metu sudaro apie 13 %. Daugiau nei pusė šio kiekio sudaro mediena ir kiti vietiniai atsinaujinantieji energijos ištekliai (Baltrėnas et al. 2008).

Naudojamame mazute yra apie 2,5 % sieros, todėl atmosfera teršiama didesniais sieros dioksido kiekiais. Sieros šalinimas iš mazuto gerokai sumažintų aplinkos taršą, bet tuomet energijos objektų kapitaliniai įdėjimai padidėtų 30 %, o pašalinus 0,5 % sieros kiekio, skystojo kuro kaina pakiltų 15 %. Anglies ir azoto oksidų išmetalus būtų galima sumažinti geriau reguliuojant katilinių kūrimo režimą (Baltrėnas et al. 2008).

Viena svarbiausių priemonių atmosferos taršai mažinti būtų ekologiškai švaresnio kuro – gamtinių dujų – vartojimas. Atominis kuras taip pat ekologiškai švaresnis ir atmosferą teršia nedaug, bet atominės elektrinės yra pavojingos eksploatacijos požiūriu. Be to, reikėtų plačiau naudoti kitus energijos išteklius: vandens, vėjo, Saulės, Žemės šilumos energiją. Atmosferos apsauga duoda didelį ekonominį efektą: teršalų valymo savikaina yra keleriopai mažesnė už teršalų daromą žalą (Baltrėnas et al. 2008).

1.2. Užterštumo kietosiomis dalelėmis problemų pasaulyje ir Lietuvoje analizė

Aplinkos oro užterštumo kietosiomis dalelėmis problema pasaulyje bei Lietuvoje laikui bėgant ne tik nepraranda savo aktualumo, bet ir tampa vis sunkesniu ekologijos problemos sprendimu. Bet koks sprendimas priimamas turint informacijos apie tam tikrą dalyką bazes, todėl, kalbant apie aplinkos oro taršos mažinimo problemos sprendimą bei atliekant jos analizę, svarbu paminėti aplinkos oro monitoringo vaidmenį šiame procese.

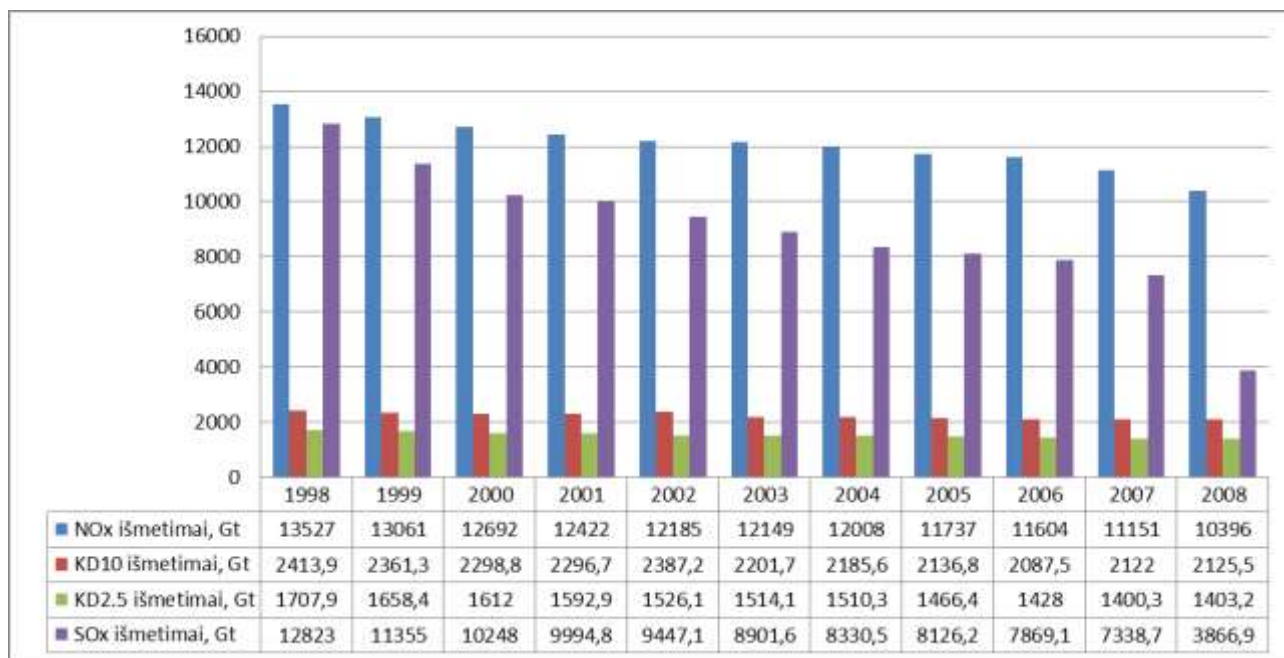
Aplinkos oro kokybės matavimai yra pagrindinis oro kokybės vertinimo metodas. Naudojant oro kokybės monitoringą gaunama svarbi informacija, reikalinga oro kokybės politikai parengti ir įgyvendinti bei oro kokybei valdyti. Oro kokybės tyrimų duomenys naudojami sveikatos apsaugai,

teritorijų ir ūkio plėtros planavimui, mokslo reikmėms, o taip pat ieškant optimalių būdų galimų ekologinių avarių ir katastrofų padariniams likviduoti (Aplinkos apsaugos 2004).

Oro tarša – daugelio Europos miestų problema. Vieni pagrindinių aplinkos oro taršos šaltinių Europoje, kaip ir visame pasaulyje, yra kelių transportas ir pramonės įmonės. Dideli teršalų kiekiai susidaro ir energijos bei šilumos gamybos metu, dirbant žemės ūkio darbus. Žymiai mažesni teršalų kiekiai susidaro iš namų ūkių (šildant gyvenamąsias patalpas) ir jūrų transporto.

Visoje Europoje stebimos pagrindinių aplinkos oro teršalų (taip vadinamų oro kokybės indikatorių) koncentracijų kitimo tendencijos.

Tarša sieros dioksidu (SO_2) ir kiek mažiau azoto oksidais (NO_x) yra žymiai sumažėjusi Vakarų Europoje (čia priklauso ES senbuvės, o taip pat tokios šalys kaip Islandija, Norvegija, Šveicarija, Lichtenšteinas). Nors oro kokybė taip pat gerėja ir Centrinės bei Rytų Europos (CRE) šalyse (priklauso naujosios ES narės, Turkija, Bulgarija, Rumunija, Albanija, Bosnija ir Hercegovina, Kroatija, Makedonija) bei Rytų Europos, Kaukazo ir Centrinės Azijos (REKCA) šalyse (priklauso Rusijos Federacija, Baltarusija, Moldova, Armėnija, Azerbaidžanas, Gruzija, Ukraina, Kazachstanas, Kirgistanas, Tadžikistanas, Turkmėnistanas, Uzbekistanas), ypač pastarosios susiduria su problemomis dėl SO_2 ir NO_x . Europos oro taršos įvertinimuose pažymima, kad dėl naudojamų skirtingų stebėjimų metodų negalima nuodugniai įvertinti REKCA šalių padėties (Europos aplinka 2010).



1.5 pav. Oro taršos ES šalyse narėse kitimo dinamika (Statistikos departamentas 2011)

Siekiant optimizuoti oro kokybės vertinimą ir valdymą, Lietuvos teritorijoje išskirtos trys zonos – Vilniaus ir Kauno aglomeracijos bei zona (likusi šalies teritorija be Vilniaus ir Kauno miestų) (Lietuvos Respublikos 2000).

Modernizuotą Lietuvos aplinkos monitoringo tinklą 2003 m. sudarė 13 nepertraukiamai veikiančių oro kokybės kontrolės stočių (tuo tarpu 1998 m., kai oro kokybės tyrimai buvo atliekami rankiniu būdu, tokių stočių buvo 23) (1.5 pav.).

Miestų ore matuojamos koncentracijos teršalų, kurių vertinimą reglamentuoja ES direktyvos ir Lietuvos teisės aktai: azoto dioksido (NO₂), sieros dioksido (SO₂), kietųjų dalelių, kurių skersmuo ne didesnis už 10 mikronų (KD₁₀), anglies monoksido (CO), ozono (O₃), benzeno, švino (Pb).

Didžiausi išmestų kietųjų dalelių kiekiai tenka miestams, kuriuose vyksta pramonės gamyba bei dideli miestai, kuriuose juda intensyvūs automobilių transporto srautai (1.1 lentelė).

Kalbant apie kietųjų dalelių monitoringą, reikia atkreipti dėmesį, kad kai kuriose Europos šalyse (pvz.: Lenkijoje) ir JAV, be kietųjų dalelių, kurių skersmuo ne didesnis už 10 mikronų (50 % tokių dalelių praeina pro joms pralaidžią 10 µm aerodinaminio skersmens angą), matuojama ir kietųjų dalelių, kurių skersmuo ne didesnis už 2,5 mikrono (KD_{2,5}), koncentracija (50 % tokių dalelių gali praeiti pro joms pralaidžia 2,5 µm aerodinaminio skersmens angą). Įdomumo dėlei galima būtų paminėti, jog žmogaus plauko storis yra 70 µm skersmens (Mecklenburg Country 2010).

1.1 lentelė. Išmestų kietųjų dalelių kiekių 2005–2009 metais Lietuvos miestuose kitimo dinamika (Statistikos departamentas 2011)

Miestas	Išmestas kietųjų dalelių kiekis, tonomis				
	Metai				
	2005	2006	2007	2008	2009
Alytus	34,4	108,7	83,8	83,1	68,7
Kaunas	308	234	288,4	244,5	166,1
Klaipėda	327	369,6	458,3	435,6	464,6
Panevėžys	92,9	65,4	44,7	52,7	50,9
Šiauliai	69,4	74	60,9	35,6	25,5
Utena	21,3	37,7	38,4	39,3	38,8
Vilnius	255,4	247,6	205,6	204,6	163,5

Kietosios dalelės – vienas iš svarbiausių oro kokybės indikatorių. Beveik visose ES senbuvėse kietųjų dalelių išsiskiria daugiau nei kitų teršalų. Daugiausia KD₁₀ 2008 m. išsiskyrė Prancūzijoje (452,02 Gt), mažiausiai – Liuksemburge (0,038 Gt). Kaip teigiama Europos aplinkos oro taršos įvertinimo ataskaitose, būtent šie teršalai kelia didžiausią realų pavojų sveikatai daugelyje miestų. Ir nors šių dalelių koncentracijos mažėja, didelei miestų gyventojų daliai tenka didesnės negu ES numatytos ribinės vertės. Kietųjų dalelių poveikis šiuo metu yra didžiausias Vakarų

Europos miestuose, o daugelis ES valstybių narių susiduria su problemomis, kad oro tarša atitiktų numatytus standartus (1.2 lentelė) (Europos aplinka 2010).

1.2 lentelė. Didžiausių Europos Šalių-teršėjų, išmestų kietųjų dalelių kiekių 2004–2008 metų, kitimo dinamika

Šalis	Metai				
	2004	2005	2006	2007	2008
	Kietųjų dalelių emisijos į atmosferos orą, Gt				
Prancūzija	517,022	492,936	473,929	459,418	452,022
Lenkija	279,712	289,157	285,484	268,705	263,388
Vokietija	216,799	211,173	211,291	207,044	203,045
Ispanija	174,025	173,174	171,058	174,904	159,608
Italija	176,785	165,144	161,850	162,540	155,881

Padėtis Centrinės Azijos ir Rusijos Šalyse taip pat kelia susirūpinimą: 1998 m. 30 % Rusijos miestų kietųjų dalelių kiekis viršijo Pasaulinės sveikatos organizacijos nustatytas ribas (Europos aplinka 2010).

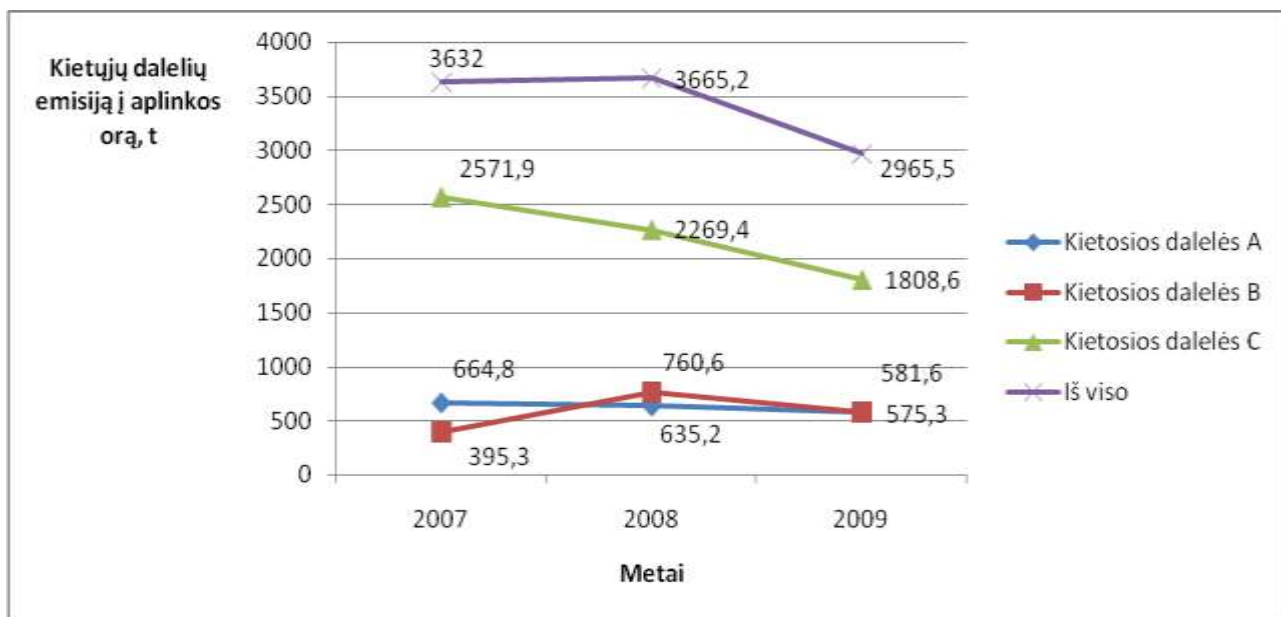
Panaši situacija išliko ir 2000 m., kai iš 253-jų miestų, kuriuose buvo tikrinama oro kokybė, 202-juose kenksmingų medžiagų koncentracijos viršijo normą (Окружающая среда 2010).

Europos aplinkos oro taršos įvertinimo ataskaitose taip pat teigiama, kad kietųjų dalelių normos labai dažnai viršijamos ir Centrinės Azijos miestuose. Numatoma, kad artimiausioje ateityje Centrinės Azijos kietųjų oro dalelių išmetimas gali padidėti dėl padidėjusio energijos sunaudojimo. Be to, miestų taršai didelę įtaką daro klimato sąlygos. Kietųjų dalelių paprastai viršijama sauso ir žemyninio klimato Europos Šalyse. Mažiau rūpesčių kelia drėgno, jūrinio klimato šalyse, kadangi krituliai - pats efektyviausias būdas dalelėms iš oro pašalinti (Europos aplinka 2010).

Nagrinėjant taršos į aplinką iš stacionarių taršos šaltinių išmetamų medžiagų struktūrą, išskiriamos tokios kietųjų dalelių rūšys:

- Kietosios dalelės A – tai kietosios dalelės, išsiskiriančios gaminant šiluminę ir elektros energiją (tai visų rūšių 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.

Kalbant apie teršalų išmetimus Lietuvoje, reikia pabrėžti, jog dėl ūkio nuosmukio ir efektyvesnio energijos išteklių panaudojimo teršalų išmetimas į aplinkos orą 1991–2000 m. sumažėjo beveik 3 kartus. Labiausiai (apie 5 kartus) per minėtą laikotarpį sumažėjo stacionarių šaltinių teršalų emisija. Dėl centralizuoto šildymo Lietuvoje miestų ore yra nedidelė sieros dioksido koncentracija, bet dėl pasenusių šilumos tiekimo sistemų ir daugumos anksčiau statytų namų prastų šiluminių savybių šiluminė energija naudojama labai neefektyviai, tad į orą vis tik išmetama palyginti daug teršalų (1.6 pav.).



1.6 pav. Kietųjų dalelių emisijų 2007–2009 metų kitimo dinamika atsižvelgiant į jų rūšis

Nors transporto priemonių žymiai padaugėjo, aplinką jos teršia 2 kartus mažiau. Uždraudus Lietuvoje naudoti benzina su švino priedais, švino koncentracija miestų ore ir prie automagistralių keleriopai sumažėjo, tačiau dėl pasenusių ir neefektyvių eismo reguliavimo sistemų, didėjančio automobilių skaičiaus miestuose, ypač jų centrinėse dalyse gana dažnai padidėja azoto dioksido ir dalelių (kietųjų dalelių) koncentracija.

1.3. Kietųjų dalelių taršos poveikis aplinkai ir žmogui

Šiuo metu pripažįstama, kad didžiausią poveikį sveikatai turi du teršalai – smulkios kietosios dalelės ir pažemio ozonas. Ilgalais ir maksimalus poveikis gali įvairiai kenkti sveikatai – nuo nedidelio kvėpavimo sistemos pakenkimo iki priešlaikinės mirties.

Kietosios dalelės – terminas, kuriuo apibūdinamos įvairios smulkios dalelės, esančios, pvz., automobilių išmetamose dujose ar buitinių krosnių dūmuose. Jos veikia plaučius ir gali pakenkti įvairaus amžiaus žmonėms, bet visų pirma turintiems širdies ir kvėpavimo takų problemų. Naujausiais Europos aplinkos agentūros (EAA) duomenimis, nuo 1997 m. smulkiųjų dalelių

koncentracijos, viršijančios ES ribas, nustatytas žmonių sveikatai apsaugoti, gali veikti iki 50 proc. Europos miestų gyventojų. Net 61 proc. miestų gyventojų gali būti veikiami ES tikslines vertes viršijančių ozono koncentracijų. Apskaičiuota, kad PM2.5 (smulkiosios kietosios dalelės) ore sutrumpino statistinę gyvenimo trukmę ES daugiau nei aštuoniais mėnesiais (EAA signalai 2010).

Kalbant apie poveikį žmonių sveikatai, reikia pažymėti, kad aplinkos ore esančios kietosios dalelės į žmogaus organizmą gali patekti per odą ar akių gleivinę, tačiau didžiausia jų dalis patenka per kvėpavimo sistemą. Virš 99 % kietųjų dalelių, patekusių į kvėpavimo sistemą, iškvepiama arba pašalinama kosint. Likusi dalis patenka į plaučių kapiliarus ir alveoles bei sukelia kvėpavimo sutrikimus (kvėpavimo takuose kietosios dalelės gali išbūti nuo dviejų savaitių iki vienerių metų).

Kuo mažesnis kietųjų dalelių skersmuo, tuo gilesniuose kvėpavimo takuose jos nusėda (Morkūnienė 2006):

- <2,5 μm – plaučiuose;
- 3-5 μm – plaučiuose ir tracheobronchialinėje srityje;
- 7-10 μm – tracheobronchialinėje srityje;
- >10 μm – nosiaryklės srityje.

Pagrindinės iš savybių, apibudinančios įvairių rūšių dalelių netoksinį veikimą žmogaus organizmui, išvardijamos – kietųjų dalelių forma, dispersiškumas bei jų mineraloginė sudėtis. Kietosios dalelės su aštriomis briaunomis gali sukelti akių, odos bei kvėpavimo takų traumas. Labai svarbi kietųjų dalelių savybė yra ta, kad jos sugeba absorbuoti aplinkos cheminius (sunkiuosius metalus, pesticidų aerozolius) bei biologinius teršalus, kuriuos perneša į kvėpavimo takus, iš kur jie gali būti absorbuoti į kraują ir audinius. Be to, kvėpuojant per burną, didėjant fiziniam aktyvumui, į plaučius kietųjų dalelių patenka 20–60 % daugiau (Morkūnienė 2006).

Ilgalaikis poveikis, kvėpuojant užterštų kietosiomis dalelėmis oru, pasireiškia kvėpavimo takų pažeidimais (viršutinių ir apatinių bronchų kataras, bronchitu, plaučių bronchinė astma, pneumonija ir kt.), žmogaus kūno sistemų bei organų normalaus funkcionavimo sutrikimais.

Be žmogaus kvėpavimo sistemos, kietosios dalelės veikia ir širdies ir kraujagyslių sistemą, sukeldamos įvairias širdies ligas. Be to, šiems teršalams patekus į plaučius, papildomas krūvis suteikiamas ir širdžiai, kadangi jai tenka kompensuoti deguonies stygių (Criteria Pollutant 2010).

Kai kurios absorbuotos ar įkvėptos kietosios dalelės gali pakenkti kepenis ir inkstus, nurytos – virškinimo sistemą. Be to, dalelės gali dirginti odą (užkemša prakaito liaukas, kas sąlygoja pūlinių procesų atsiradimą), akių gleivinę (sukelia konjunktyvitus, kerakonjunktyvitus) (Morkūnienė 2006).

Suodžiuose esantis benz(a)pirenas gali sukelti vėžį, kadangi yra kancerogenas. Taip pat nustatyta, jog kietosios dalelės gali sumažinti žmogaus organizmo atsparumą infekcijoms (Higienos norma... 2007).

Dažniausiai pasitaikančią bei pavojingiausią ligą laikoma pneumokoniozė, kuri sukelia, įkvėpiant užteršto oro, kurio sudėtyje randama laisvų SiO₂ junginių. Laisvieji silicio dioksido junginiai (smėlis, kvarcas) veikia ne tik lokaliai plaučių audinį, bet ir visą žmogaus organizmą, sukeldami funkcionalinius sutrikimus širdies ir kraujagyslių sistemoje, centrinėje nervų sistemoje ir kt. Silikozės ligos susergimas dažnai pasitaiko pas litavimo cechų darbuotojus (Защита работников 2010).

Siekiant sumažinti gamybinių patalpų užterštumą kietosiomis dalelėmis, kenksmingais garais bei dujomis ir jų poveikį žmogaus organizmui taikomos šios priemonės:

1. kenksmingų ir ypač nuodingų medžiagų pašalinimas iš gamybos, arba jų pakeitimas mažiau kenksmingesniais;
2. technologinio proceso racionalizavimas, visiškai išvengiantis dalelių, dujų, garų susidarymą;
3. maksimalus įrenginių, įrengimų, elevatorių, transporterių, šnekų ir t.t. sandarinimas;
4. gamybinių procesų mechanizavimas ir automatizavimas, išskyrus rankinių smulkinimo, sijojimo, fasavimo, pakrovimo ir kt. procesų operacijas;
5. esančių darbų su sausomis medžiagomis pakeitimas darbų su drėgnomis medžiagomis (drėgnas šlifavimas vietoj sausojo);
6. specialaus vietinio nusiurbimo vėdinimo sistemų taikymas vietose, kur susidaro dalelės, dujos ar garai.
7. procesų, kurių metu išsiskiria kietosios dalelės bei dujos, izoliavimas nuo kitų darbo vietų;
8. sisteminis kruopštus patalpų šlapias valymas arba valymas, panaudojant siurblij;
9. darbuotojams naudoti asmenines apsaugines priemones – specialią aprangą, respiratorius, gamybines dujokaukes, šalmus bei akinius;
10. sanitarinių ir buitinių patalpų įrengimas gamybiniuose pastatuose (dušai, praustuvės ir kt.)
11. profesionali darbuotojų atranka darbams, kurių metu numatoma oro tarša, pirminė bei periodinė darbuotojų apžiūra;
12. darbo laiko ir poilsio režimo nustatymas, sutrumpintos darbo dienos bei papildomų atostogų taikymas;
13. sanitarinis-techninis darbuotojų auklėjimas bei skatinimas, saugios darbo metodikos dėstymas.

Ekologinėje literatūroje pažymima, jog kietosios dalelės kenkia ne tik žmogui, bet ir gyvūnams, augalams bei ekosistemoms. Nustatyta, kad ant medingųjų augalų nusėdus kai kurioms dalelėms, stebimas bičių mirtingumo padidėjimas. Kietosios dalelės neigiamai veikia ir stambiuosius žvėris, pakenkdamos per kvėpavimo sistemą, o taip pat patekdamos su suvartotais dulkėtais augalais (Антропогенные воздействия 2010).

Kalbant apie kietųjų dalelių poveikį aplinkai, kreiptinas dėmesys į tai, kaip jos veikia statybines ir konstrukcines medžiagas (metalą, medieną), taip pat materialines ir kultūrines vertybes (akmens skulptūras, tapytus paviršius, elektronikos prietaisus, audinius). Dėl kietųjų dalelių nusėdimo ant šių medžiagų, jos apsineša purvu, pakeičia spalvą, dėl ko pakinta estetinis vaizdas (Morkūnienė 2006).

Šie teršalai aplinkos ore išsklaido ir absorbuoja šviesą. Dėl to sumažėja atstumas, kuriuo galima atskirti toli esančių daiktų spalvas, skaidrumą, kontrastą. Smarkiai užterštuose rajonuose, palyginti su sąlygiškai švariais, natūralus apšvietimas gali sumažinti 20–50 % (Particulate Matter 2010).

Labai akivaizdus kietųjų dalelių poveikis laukiniams ir kultūriniais *augalams* (medžiams, krūmams, pasėliams) yra nusėdimas ant lapų paviršių. Tai sutrikdo šviesos perdavimą augalui, dėl ko sumažėja fotosintezės proceso intensyvumas, o tai gali įtakoti šaknų srities aprūpinimą asimiliatais ir tuo pačiu mažų šaknelių susidarymą, taip sutrikdant maistinių medžiagų ir vandens apykaitą augalo organizme. Be to, kietųjų dalelių kaupimasis lapų paviršiuose mažina augalų atsparumą ligoms ir didina augalo jautrumą šalčiui (Particulate Matter 2010).

Dėl teršalų poveikio pakitusios biologinės augalų funkcijos augalams gali būti ne tik žalingos, bet ir naudingos, nes pvz. krituliuose ir dalelėse esantys azoto junginiai ir cheminiai elementai veikia kaip maitinimo medžiagos ir mikroelementai (Denafas 2000).

Europos Sąjungos agentūra pažymi, kad nors nuo 1997 m. svarbiausių oro teršalų kiekiai sumažėjo, jų koncentracijos ore, kuriuo kvėpuojame, išliko maždaug tokios pačios. Kol kas dar nežinome, kodėl koncentracijos aplinkos ore nesumažėjo, tačiau priežastis gali būti kelių veiksnių junginys: oro kokybę gali veikti dėl klimato kaitos pakilusi temperatūra; galbūt tarša atsklinda iš kitų žemynų arba, pavyzdžiui, dėl natūraliai medžių išskiriamų medžiagų, sąlygojančių ozono formavimąsi (EAA signalai 2010).

Taršos kietosiomis dalelėmis mažinimo normatyvai

Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius teisės aktus, teršalų kiekis aplinkos ore vertinamas pagal Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ir Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2007 m. birželio 11 d. įsakymą Nr. D1-329/V-469 „Dėl teršalų, kurių kiekis aplinkos ore

vertinamas pagal Europos Sąjungos kriterijus, sąrašo patvirtinimo ir ribinių aplinkos oro užterštumo verčių nustatymo" (Lietuvos Respublikos...2007).

Kietųjų dalelių (KD_{10} ir $KD_{2,5}$) ribinės vertės patvirtintos Tarybos direktyvoje 1999/30/EB „Dėl sieros dioksido, azoto dioksido, azoto oksidų, kietųjų dalelių ir švino ribinių verčių aplinkos ore" 1999 m. balandžio 22 d. (Tarybos direktyva... 1999) ir aplinkos ministro bei sveikatos apsaugos ministro 2001 m. gruodžio 11 d. įsakymu Nr. 591/640 „Dėl aplinkos oro užterštumo normų nustatymo" (Lietuvos Respublikos...2001).

Vadovaujantis ES direktyvų ir nacionalinių teisės aktų reikalavimais, KD_{10} koncentracijos vertinimui taikomos ribinės vertės:

- vidutinė metinė ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$);
- vidutinė 24 valandų ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), o 24 valandų (paros) vidurkio ribinė vertė neturi būti viršyta daugiau nei 35 dienas per kalendorinius metus.

Kietųjų dalelių KD_{10} metinė ribinė vertė, taikoma žmogaus sveikatos apsaugai, yra $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o iki 2010 m. reikia pasiekti $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ riba. Pasaulio sveikatos organizacija rekomenduoja $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ naudoti kaip orientacinę ribinę vertę metiniam KD_{10} vidurkiui vertinti.

Aplinkos oro užterštumo normose nustatytos tokios $KD_{2,5}$ koncentracijai vertinti taikomos ribinės vertės:

- vidutinė metinė ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$);
- vidutinė 24 valandų ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), o 24 valandų (paros) vidurkio ribinė vertė neturi būti viršyta daugiau nei 35 dienas per kalendorinius metus.

Oro kokybė gyvenamosiose patalpose

Nuo oro kokybės visų pirma priklauso gyvenimo ir darbo sąlygos. Svarbiausios sąlygos, lemiančios būsto kokybę bei garantuojančios ilgalaikę vertę, – gerai pasirinkta vieta ir neužteršta aplinka. Oras miestų gatvėse yra užterštas automobilių išmetamosiomis dujomis ir į atmosferą per kaminus patenkančiomis gamybos atliekomis bei kitais teršalais, tačiau pastarųjų metų tyrimai rodo, jog patalpų oras didžiuosiuose miestuose gali būti kur kas labiau užterštas nei oras lauke (The Inside Story...2009).

Kiti tyrimai rodo, jog didžiąją laiko dalį (apie 80–90 %) žmonės praleidžia patalpose (Myers, Maynard 2005). Taigi, patalpos teršalų poveikis Žmogaus sveikatai gali būti didesnis nei lauko oro taršos. Iš dalies patalpų oro tarša lemia naujos statybas reglamentuojančios normos,

skirtos energijai taupyti ir reikalaujančios izoliuoti patalpas nuo išorinės aplinkos. Laikantis šių normų yra statomi nauji namai ir atnaujinami seni, tačiau nesutvarkius ventiliacinės sistemos –šiuo požiūriu daug problemų sukelia senosios statybos pastatai - uždarų patalpų ore kaupiasi įvairūs teršalai, kenksmingos žmogaus sveikatai medžiagos. Taip pat daugeliui tenka susidurti su pasirinkimu tarp plastikinių ir medinių langu. Paplitus sandariems šiuolaikiniams langams, oro kaita gyvenamosiose patalpose labai sumažėjo. Orlaidės namuose yra būtinos, jei nėra jokios kitos ventiliacijos. Nuodingų junginių šaltiniu gali tapti ir statybai, apdailai ar baldams panaudotos medžiagos. Aplinkos oro kokybė neabejotinai turi įtakos gyventojų sergamumui. Epidemiologiniais tyrimais nustatyta, kad aplinkos oro tarša kietosiomis dalelėmis didina sergamumą įvairiomis respiracinėmis infekcijomis, kitomis kvėpavimo sistemos, Širdies ligomis (Matuliauskaitė 2009).

Svarbu nuolat stebėti aplinkos oro užterštumą, ieškoti būdų, kaip pagerinti oro kokybę, ir atsižvelgti į kitas rizikos sveikatai mažinimo priemones. Gyventojai turi būti mokomi mažinti oro taršą, o tai turėtų teigiamos įtakos jų sveikatai (Matuliauskaitė 2009).

1.4. Kietųjų dalelių bendra charakteristika. Kietųjų dalelių dispersiškumas

Kietosios dalelės – sveikatai žalingos dalelės, aptinkamos ore: tai kietosios dulkės, suodžiai, dūmai, skysčio lašeliai. Šios dalelės gali ilgai kyboti ore. Kai kurios jų yra gana didelės arba tamsios spalvos (kaip pvz.: dūmai ar suodžiai), jas galima pamatyti plika akimi. Kitos gi yra tokios smulkios, kad jas atskirti galima tik pasinaudojus elektroniniu mikroskopu (Morkūnienė 2006).

Kietųjų dalelių, kaip ir kitų teršalų, taršos Šaltiniai gali būti gamtiniai ir antropogeniniai. *Gamtinių* pavyzdžiai galėtų būti: dirvožemis, bakterijos ir virusai, grybeliai, pelėsiai, žiedadulkės, druskų dalelės, susidaranti garuojant jūros vandeniui. *Antropogeniniai* taršos šaltiniai: dūmai ar suodžiai, išskiriantys iš įmonių kaminų; purvas, susidarantis po automobilių ratais žvyrkeliuose; taip pat dulkės, susidaranti kasybos ar statybų metu; dūmai, išsiskiriantys deginant medieną; jų yra ir benzininių bei dyzelinių automobilių išmetamosiose dujose (Morkūnienė 2006).

Kietosios dalelės susidaro deginant kurą, jo mineralinė dalis virsta pelenais. Tas būdinga praktiškai kiekvieno kieto ir kai kurio skysto kuro rūšims. Pelenuose yra nemažai SiO_2 , šarminių ir žemės Šarminių metalų oksidų. Sunkiųjų metalų oksidų buvimas pelenuose (pvz. V_2O_5 mazuto ar orimulsijos atveju) labai padidina išmestų pelenų žalą aplinkai. Nesant gaudytuvo, išmetamas pelenų kiekis visuomet priklauso nuo mineralinės kuro dalies arba, kitaip tariant, nuo kuro peleningumo. Šiuo atveju dyzelinio kuro peleningumas siekia 0,025%, mazuto – iki 0,1 %, orimulsijos – 0,25 %, medienos – 0,6 %, durpių – 12 %, anglies – iki 40 %, skalūnų – iki 50 % (Denafas 2000).

Dalelių tankis

Kalbant apie dalelių tankį yra išskiriamas:

- tikrasis tankis;
- supiltų dalelių tankis;
- tariamasis tankis.

Kietos dalelės tikrasis tankis nustatomas kaip santykis dalelės masės su jos užimamu tūriu, neįvertinant porų ir tuštumų (Ветошкин 2005).

Tariamasis tankis nustatomas kaip santykis dalelės masės su jos užimamu tūriu, įskaitant poras, nelygumus ir tuštumas. Lygių monolitinių kietų dalelių tariamasis tankis sutampa su tikruoju. Žymus tariamojo tankio sumažėjimas palyginus su tikruoju stebimas dalelių, kurios linkusios koaguluoti. Palyginti tikslūs metodai įgalina nustatyti tik atskirai paimtos dalelės tariamo tankio reikšmę, todėl daugiausiai yra tinkami tik moksliniams aerozolių mechanikos tyrimams. Todėl, daugelį praktikoje sutinkamų atvejų stengiamasi ir galima apsieiti be eksperimentinio tariamo tankio nustatymo (Ветошкин 2005).

Supiltų dalelių tankis nustatomas kaip santykis šviežiai subyrėjusių (nesusigulėjusių) kietų dalelių masės su jų užimamu tūriu, įskaitant oro tarpus tarp dalelių. Šis dydis yra naudojamas nustatant tūrį, kurį užima dalelės sausų valymo įrengimų bunkeriuose. Didėjant dalelių vienaarūšiškumui pagal dydį, jų supiltų dalelių tankis mažėja, nes padidėja oro tarpų tūris. Susigulėjusių kietųjų dalelių supiltų dalelių tankis išauga 1,2–1,5 kartus (Ветошкин 2005).

Adhezinės kietųjų dalelių savybės

Adhezija - tai dalelių sukibimas su paviršiumi. Adhezinės dalelių savybės nusako jų polinkį sulipti. Padidintas sulipimas gali sąlygoti dalinį arba pilną užsikimšimą dulkėto oro valymo aparatų. Kuo mažesnis dalelių diametras, tuo lengviau jos prilimpa prie įrenginio paviršiaus. Kietosios dalelės, kurių 60–70% dalelių turi mažesnę negu 10 μm diametrą, elgiasi kaip limpančios, nors tos pačios dalelės, kurių diametras didesnis negu 10 μm, pasižymi geru birumu. Kietosios dalelės yra skirstomos į:

- nesu limpančias;
- mažai sulimpančias;
- vidutiniškai sulimpančias;
- gerai sulimpančias.

Su sulipimu glaudžiai susijusi kita kietųjų dalelių charakteristika – jų **birumas**. Kietųjų dalelių birumas įvertinamas pagal natūralaus kritimo kampą, kurį įgauna švaraus birumo būklės dalelės (Denafas 2000).

Kietųjų dalelių abrazyvumas charakterizuoja metalų išnešimo intensyvumą esant vienodiems dujų greičiams ir kietųjų dalelių koncentracijoms. Jis priklauso nuo dalelių kietumo, formos, tankio ir dydžių. Ši savybė naudojama parenkant filtravimo medžiagas, įrenginių korpusų storį ir medžiagą (Denafas 2000).

Kietųjų dalelių sudrėkimas vandeniui turi esminę reikšmę šlapių dalelių valymo įrengimų efektyvumui. Glotnios dalelės sudrėksta geriau, negu dalelės nelygiu paviršiumi. Didėjant dalelės jų bendras paviršius sumažėja, ko pasekoje pablogėja jų kontaktas su dujomis ir padidėja sudrėkimas. Pagal sudrėkimą visi kieti kūnai yra skirstomi į tris pagrindines grupes (Denafas 2000):

- hidrofilinės medžiagos, kurios lengvai sudrėksta vandeniui;
- hidrofobinės medžiagos, kurios blogai sudrėksta;
- absoliučiai hidrofobiniai kūnai.

Kietųjų dalelių sluoksnio specifinė elektrinė varža priklauso nuo atskirų dalelių savybių (paviršinio ir vidinio elektros laidumo, formos ir dalelių dydžių), o taip pat nuo sluoksnio struktūros ir dujinės tėkmės parametrų. Ji turi esminę reikšmę elektrofiltrų darbui. Priklausomai nuo specifinės varžos dydžio kietosios dalelės skirstomos į tris grupes (Denafas 2000):

- sluoksnio specifinė varža mažiau $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$;
- dalelių su sluoksnio specifine varža nuo 10^4 iki $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$;
- dalelių su sluoksnio specifine varža nuo 10^{10} iki $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$.

Elektrinis dalelių krūvis priklauso nuo jų susidarymo, cheminės sudėties, o taip pat nuo medžiagų savybių su kuriomis jos kontaktuoja. Ši savybė turi įtakos sproginimo pavojui ir dalelių adheziškumui. Įelektrintos dalelių natūralaus birumo kampas būna artimas nuliui, o praradus įelektrinimą – išauga iki 50°C , o atskirais atvejais – iki 90°C (Denafas 2000).

Kietųjų dalelių užsidegamumas ir sproginimui pavojingų mišinių su oru susidarymas. Dalelių sproginimo intensyvumas priklauso nuo cheminių savybių, nuo dalelių dydžių ir formos, jų koncentracijos ore, nuo drėgnumo ir dujų sudėties. Esant padidintai temperatūrai, užsiliepsnojimas kartais įvyksta savaime, o intensyvumas ir degimo trukmė gali būti įvairūs. Tankios kietosios dalelės masės dega lėtai, o purios, ypač smulkios dalelės, paprastai sudega greitai visame tūryje (Ватин и Стрелец, 2003).

Minimali, pakibusių ore dalelių, sproginimui pavojinga koncentracija – apie $20\text{--}500 \text{ g/m}^3$ oro, maksimali – apie $700\text{--}800 \text{ g/m}^3$. Kuo didesnis deguonies kiekis dujinėje aplinkoje, tuo didesnė

sprogimo tikimybė ir jėga; esant deguonies mažiau negu 16 % dalelių debesis nesprogsta (Ватин и Стрелец, 2003).

Žemutinė dalelių koncentracijos riba – mažiausias degios medžiagos kiekis, kuris ore sudaro sprogo mišinį (Ватин и Стрелец, 2003).

Kietųjų dalelių dispersiškumas

Kietųjų dalelių dydis yra pagrindinis parametras, nes daugumos dalelių gaudymo įrenginių pasirinkimas priklauso nuo šios charakteristikos (Ватин и Стрелец, 2003).

Koaguliacijos proceso metu pirminės kietosios dalelės susijungia į aglomeratus, t.y. padidėja. Dalelių dispersinę sudėtį galima nustatyti įvairių frakcijų pavidale pagal dalelių skaičių arba masę. Frakcija – masės dalys nustatytame dydžių intervale (Ватин и Стрелец, 2003).

Dalelių dispersinę sudėtį yra atvaizduojama lentelių ar grafikų pavidale, kur abscisės ašyje atidedamas dalelių diametras, o ordinatės - dalinė ar procentinė kiekvienos frakcijos sudėtis nuo bendros masės. Patogiausias yra grafinis dalelių dispersinės sudėties atvaizdavimas integralinių kreivių pavidalu. Daugumai gamybinių kietųjų dalelių tinka normalinis – logaritminis pasiskirstymas. Dalelėms su tokiu pasiskirstymu integralinės kreivės įgauna tiesių linijų pavidalą (Ватин и Стрелец, 2003).

Praktikoje dispersinės sistemos charakteristikai naudojamas medianinis dalelių diametras ir dispersija. Medianinis dalelių diametras – dalelių dydis, kuriam esant dalelių masė didesnė ir mažesnė už duotą diametrą sudaro po 50 % (Ватин и Стрелец, 2003).

Kartais dalelių dydis charakterizuojamas plevėnimo greičiu, kuris įvertina dalelių laisvo kritimo greitį nejudančiame ore (Ватин и Стрелец, 2003).

Galinčių egzistuoti atmosferoje kietųjų dalelių apibūdinimas ir pavyzdžiai pateikiami 1.7 pav.:

Apibūdinimas	Pavyzdžiai
Labai mažos 0,01 – 5 μm	Dažų pigmentai, tabako dūmai, dulkės, jūros druskų dalelės
Didesnės 5 – 100 μm	Cemento dulkės, vėjo nešiojamos dirvožemio dalelės, liejyklų dulkės, anglies dulkės
Skystojo būvio 5 – 10 μm	Rūkas, smogas, lietaus lašai
Biologinės kilmės 0,001 – 0,01 μm	Virusai, bakterijos, žiedadulkės, sporos
Susiformavusios cheminių reakcijų metu 0,001 – 100 μm	Sieros dioksidas atmosferoje virsta sieros rūgštimi, kuriai reaguojant su atmosferos vandeniu susiformuoja maži lašeliai (rūkas).

1.7 pav. Atmosferoje galinčios egzistuoti kietosios dalelės

Kaip pavyzdys, pateikiama dispersinė dalelių sudėtis taikant pagrindinius mechaninius apdirbimo būdus, plačiai naudojamoms plastmasėms:

- šlifavimas ir poliravimas charakterizuojamas smulkiomis dalelėmis – $\delta_{50} = 2 - 4 \mu\text{m}$;
- reaktoplastų ir termoplastų apdirbimas – stambiomis dalelėmis – $\delta_{50} = 30 - 50 \mu\text{m}$.

Dispersinė kietųjų dalelių sudėtis, susidarančių kitų technologinių procesų metu:

- liejiniai, granulės, nuolaužos – $\delta_{50} = 0,2 - 1 \text{ cm}$;
- fenoplastų tabletavimas – $\delta_{50} = 8 - 10 \mu\text{m}$;
- termoplastų atliekų perdirbimas – $\delta_{50} = 15 - 25 \mu\text{m}$.

Atmosferoje egzistuoja didelė įvairovė dalelių, vienas iš jų yra nagrinėjama šiame darbe. Jos gali būti ne tik įvairaus dydžio (galima aptikti dalelių, kurių skersmuo yra nuo 0,001 iki 100 μm), bet ir skirtingo agregatinio būvio (ne tik visiems įprasto kietojo: cemento dalelės, dirvožemio dalelės ir kt., bet ir skystojo: rūkas) (Ватин и Стрелец, 2003).

1.5. Kietųjų dalelių koncentracijos nustatymo metodai

Kietųjų dalelių arba aerozolių koncentracija – tai standartinėms sąlygoms perskaičiuota dujų arba oro tūrio vienetuose esančių dalelių masė arba skaičius. Ja remiantis nustatomos konkrečių mechaninių teršalų didžiausios leidžiamosios koncentracijos bei parenkami būdai ir priemonės orui valyti (Jakštonienė 2009).

Šių teršalų koncentracijai nustatyti taikomi įvairūs metodai. Perspektyviausi matavimo metodai yra tokie: optiniai, pjezoelektriniai, talpiniai, radioizotopiniai bei elektrostatiniai (kontaktiniai, indukciniai) (Jakštonienė 2009).

Yra išskiriami tiesioginiai ir netiesioginiai koncentracijos nustatymo metodai. Pirmuoju atveju, koncentracijos dydis surandamas be jokių papildomų matematinių skaičiavimų, iškart gaunant emisijos reikšmę, antruoju atveju – dalelių koncentracija nustatoma pagal žinomą priklausomybę tarp jos ir tiesiogiai išmatuoto kokio nors dydžio.

Populiariausias, nors labai imlus darbui ir labai netikslus – svorio (gravimetrinis) metodas. Matuojama labai paprastai: tam tikras tiriamo oro kiekis filtruojamas pro žinomos masės filtrą. Po to filtras su nusėdusiomis kietosiomis dalelėmis džiovinamas 105 °C temperatūroje, kol nusistovi jo masė. Žinant filtruoto oro tūrį ir kiek padidėjo filtro masė, lengvai apskaičiuojama dalelių (kietųjų dalelių) koncentracija (mg/m^3) ore. Kietosios dalelės filtruojamos specialiais popieriniais AFA arba audiniais filtrais. Be to, galima atlikti surinktų dalelių kokybinę ir kiekybinę cheminę arba fizikinę ir cheminę analizę.

Kietųjų dalelių koncentraciją apskaičiuojame šitaip:

$$C = \frac{g_2 - g_1}{Vt} \cdot 1000, \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}; \quad (1.1)$$

čia: g_2 – filtro svoris prieš bandymą, mg; g_1 – filtro svoris po bandymo, mg; V – aspiratoriaus siurbiamas oro tūris, per laiko vienetą, l/min; t – siurbimo laikas, min.

Filtruojamo oro tūris

$$V_f = V \cdot \tau. \quad (1.2)$$

V_f perskaičiuojame normaliosioms sąlygoms:

$$V_n = \frac{V_f 273 P_f}{P_n (273 + t)}; \quad (1.3)$$

čia: P_f – aplinkos slėgis; t – aplinkos temperatūra; P_n – slėgis normaliosiomis sąlygomis.

Kietųjų dalelių koncentracija normaliosiomis sąlygomis:

$$C = \frac{g_2 - g_1}{Vn} 1000, \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}. \quad (1.4)$$

Gautoji dalelių koncentracija palyginama su DLK.

Neturint specialių filtrų, galima naudotis dalelių filtravimo vamzdeliu (alonžu). Vamzdelis prikemšamas higroskopinės vatos (apie 0,5 g) arba stiklo vatos (apie 2 g) taip, kad jo sluoksnis būtų 3–4 cm storio. Baigus filtruoti, vamzdelis su vata išdžiovinamas termostate, ataušinamas eksikatoriuje kambario temperatūroje ir pasveriamas analizinėmis svarstyklėmis. Džiovinimo operacija kartojama tol, kol nusistovi filtro masė (Jakštonienė 2009).

Svorio metodą kietųjų dalelių koncentracijai nustatyti galima naudoti ir atvira ore (t.y. veikimo vietoje). Periodiniams matavimams naudotinas didelio tūrio paėmėjas. Šiuo prietaisu matuojama tada, kai reikia detalai išanalizuoti atskirų medžiagų, esančių dalelėse, kiekį. Siurbiamas oras (jo debitas turi būti apie 90 m³/h) praeina maždaug 257 mm skersmens stiklo pluošto filtrą, kuris sulaiko visas, didesnes nei 0,3 μm skersmens daleles. Paėmimas trunka 24 valandas. Be didelio tūrio paėmėjo, gali būti naudojami ir mažiau galingi prietaisai - mažo tūrio paėmėjai. Filtrų skersmuo juose yra 120 ar 50 mm, siurbiamo oro debitas 2,5–16 m³/h, bandinio paėmimo laikas iki 24 h. Kietųjų dalelių galima surinkti tiek, kad jų užtektų ne tik bendrai koncentracijai svorio metodu nustatyti, bet ir jų sudėčiai išanalizuoti (Jakštonienė 2009).

Pjezoelektrinis metodas paremtas tuo, kad pjezoelektrinės plokštelės dažnį veikia ant pjezoelemento nusėdusi dalelių masė. Kadangi naudojami jautrūs įtaisai, jais matuojamos labai mažos koncentracijos arba net skaičiuojamos atskiros kietosios dalelės (Jakštonienė 2009).

Talpinis metodas paremtas tuo, kad kondensatoriaus talpai įtakos turi tarp jo plokštelių esančio oro dulkėtumas. Apie dalelių (kietųjų dalelių) koncentraciją nustatoma iš kondensatoriaus talpos pokyčių. Matavimo tikslumas priklauso nuo dulkelių fizinių, cheminių savybių,

meteorologinių sąlygų. Šis metodas labiau tinkamas didelėms kietųjų dalelių koncentracijoms nustatyti (Jakštonienė 2009).

Optinis metodas paremtas šviesos srauto intensyvumo matavimu. Šviesos srautą, sklindantį dulkėta aplinka, dulkelės sugeria, išsklaido ir pan. Optinių metodų yra daug. Tai: fotometrinis, liuminescencinis, integralinio šviesos išsklaidymo, absorbcinis ir lazerinis metodai (Ватин и Стрелец 2003).

Fotometriniu metodu matuojamas dalelių (kietųjų dalelių) sluoksnio, nusodinto ant filtro arba skaidrios plokštelės, optinis tankis. Šis metodas analogiškas svorio metodui. Absorbcinis metodas paremtas dulkėta aplinka sklindančio šviesos srauto sugėrimu. Absorbuotas šviesos srautas tiesiog proporcingas kietųjų dalelių koncentracijai. Integralinio šviesos išsklaidymo metodu dalelių (kietųjų dalelių) koncentracija nustatoma pagal šviesos išskaidymo intensyvumą. Šiuo metodu galima išmatuoti ir vienodo, ir skirtingų dydžių dalelių koncentracijas. Liuminescencinis metodas taikomas atmosferos dulkėtumui nustatyti. Dalelės nusodinamos ant filtro ir nudažomos specialiu fluorescenuojančiu tirpalu. Po to tiriamas filtro fluorescencijos intensyvumas prieš nusodinant daleles (kietąsias daleles) ir po to. Filtro fluorescencijos intensyvumas tiesiogiai proporcingas kietųjų dalelių koncentracijai (Ватин и Стрелец 2003).

Radioizotopinis metodas paremtas tuo, kad daleles veikiant jonizuojančiąja spinduliuote (α arba β), jos prisijungia radioaktyviuosius izotopus. Nusodinus daleles ant specialaus filtro, jonizuojančiosios spinduliuotės intensyvumas sumažėja. Pagal tai ir nustatoma dalelių (kietųjų dalelių) koncentracija (Ватин и Стрелец 2003).

Vienu iš perspektyviausių metodų dalelių (kietųjų dalelių) koncentracijai nustatyti – elektrostatiniu (kontaktiniu) metodu matuojamos įsielektrinusios nuo įelektrintų dulkių matavimo kameros sienelės krūvis. Sienelės sukauptas krūvis tiesiog proporcingas dalelių (kietųjų dalelių) koncentracijai (Jakštonienė 2009).

Elektrostatinis (indukcinis) metodas paremtas kameroje esančio elektrodo įsielektrinimu (indukcija), kuris atsiranda judant kameroje įelektrintoms dalelėms. Išmatuotas dalelių suminis elektros krūvis yra proporcingas jų masei. Metodo privalumai – dulkių nereikia nusodinti, naudojami prietaisai yra nesudėtingi. Metodo trūkumai - gaunamos didelės paklaidos, nes dalelių elektros krūvis laikui bėgant kinta (Jakštonienė 2009).

Pasaulyje nuolat sukuriama nauji, tobulesnio veikimo įrenginiai, kuriais nustatoma tikslesnė kietųjų dalelių koncentracija oro sraute. Viena iš jų yra optinio-elektrinio veikimo koncentracijos nustatymo įrenginys. Jis yra užpatentuotas akademiko Koroliovo Samaros valstybinio aerokosminio universiteto mokslininkais Grišanovu V., Mordasovu V., Kriučkovu A.. Šis įrenginys plačiai taikomas Rytų Europoje bei Azijoje, nustatant išmetamų dujų užterštumą energetikos pramonės srityse ir sukeliama transporto srautais (Ватин и Стрелец 2003).

Kuriant šį prietaisą buvo siekiama pagrindinio tikslo – padidinti nustatomą optinį dūmų dujų tankį, o tuo pačiu ir koncentracijos nustatomą tikslumą, sumažinant profilaktinio aptarnavimo išlaidas. Didžiausias optinių koncentracijos įrenginių trūkumas yra didelės tyrimų paklaidos, dėl optinių elementų užsiteršimo limpančiomis kietosiomis dalelėmis. Sukurto įrenginio konstrukcija yra pakeista – atspindintis elementas yra įrengtas už apsauginio stiklo, tuščiaviduriame šviesolaidyje, o optinis paviršius, sąveikaujantis su dujine aplinka ir šviesos srautu, izoliuotas apsaugančių dujų srautu. Taip išvengiama išvardinto trūkumo ir suteikia ilgalaikį rezultatų patikimumą, išliekant stabiliai atspindžio koeficiento reikšmei (Патентная база 2010).

Svarbu paminėti ir modernias skaitmenines tiesiogines koncentracijos matavimų priemones, kurios nustato kietųjų dalelių kiekį tūryje bei kitus parametrus betarpiškai, rezultatus perkeldant į skaitmeninį vaizduoklį arba pajungus prie kompiuterio papildomai apdorojami. Tokie įrenginiai yra gaminami vienos iš perspektyviausių JAV korporacijų Fluke darbuotojais.

Matavimo įrenginys Fluke 983 (1.8 pav.) yra dalelių skaitiklis, kuris sugeba vienu metu, išmatuoti bei pateikti duomenis apie kietųjų dalelių koncentraciją tiriamajame ore šešiais kanalais (dalelių dydžiais), parodo esamos temperatūros bei santykinės oro drėgmės reikšmes.



1.8 pav. Oro užterštumo nustatymo matavimo įrenginys

Prietaisas yra lengvas, kompaktiškas bei ergonomiškas, jį naudojant užtenka vienos rankos panaudojimo. Matuojant nebūtina įrenginį laikyti tame pačiame lygyje, todėl galima tiksliai matuoti bet kurioje padėtyje. Akumuliatoriaus veikimo užtenka 8 valandų matavimams arba 5000 bandinių, kas leidžia pilnai ištirti užteršto oro kokybę. Įrenginys leidžia nustatyti kietųjų dalelių kiekį, kurių

dydis siekia net nuo 0,3 μm . Matavimus galima atlikti nustatytų intervalų dažnių, išsaugant iki 5000 skirtingų parametrų įrašų atmintyje (Fluke Electronics 2010).

Reorganizavus Lietuvos valstybinio aplinkos oro monitoringo tinklą, teršalų koncentracijos (ir kietųjų dalelių) pradėtos matuoti nenutrūkstamai automatiniais matavimo prietaisais, naudojant pamatinius ar juos atitinkančius metodus. Oro kokybės matavimus reglamentuojančiuose teisės aktuose kietųjų dalelių, kurių skersmuo ne didesnis kaip 10 μm (KD_{10}) koncentracijai matuoti, kaip pamatinis, nurodytas gravimetrinis metodas. Tačiau pažymima, jog leidžiama naudoti bet kurį kitą metodą, kurį taikant gaunami lygiaverčiai arba panašūs rezultatai, kaip ir taikant pamatinį metodą. Tokiu atveju gautiems rezultatams turi būti taikomas korekcijos koeficientas. Lietuvos oro monitoringo stotyse, kaip ir daugelyje Europos Šalių, KD_{10} koncentracijai matuoti naudojamas p spindulių absorbcijos metodas. Sukaupus didesnę duomenų kiekį ir atlikus palyginamuosius matavimus, nustatyta, kad naudojant šį metodą, KD_{10} koncentracijai turi būti taikomas korekcijos koeficientas, lygus 1,3 (Jakštonienė 2009).

1.6. Ciklono tipo oro valymo įrenginiai ir jų taikymas

Nagrinėjant oro-dujų mišinyje esančių teršalų nukenksminimą, suprantama, kaip aerozolių priemaišų atskilimo nuo dujų srauto procesą arba esančių teršalų pavertimas nekenksmingais. Principinis oro srauto išvalymo procesas susideda iš šių pagrindinių etapų (Ватин и Стрелец 2003):

- priemonių taikymas, išvengti išmetamų kietųjų dalelių pasiskirstymo tiesioginiu aerodinaminiu srautu iš šaltinio;
- užteršto oro srauto ardymas, kietųjų dalelių atskilimas bei oro srauto valymas;
- tolimesnis oro srauto išvalymas nuo teršalų dalelių, pradedant nuo ankstesnio etapo.

Oro srauto valymo procesas neatsiejamas be trijų elementų: dalelių sugavimas, oro srauto išvalymas nuo teršalų bei sugautų teršalų paskirstymas. Kiekvieną sistemos elementą įmanoma įgyvendinti skirtingais metodais: aerodinaminiu, hidrodinaminiu, elektromagnetiniu, šilumos, mechaniniu bei kitais, kurie skiriasi tarpusavyje nukreiptu išoriniu poveikiu. Kiekvienas metodas gali būti pritaikytas skirtingais būdais (laistymu, putomis, garais, rūku ir kt.), o būdas - įvairiomis techninėmis priemonėmis (Ватин и Стрелец 2003).

Dauguma sukurtų oro valymo įrenginių naudoja šiuos populiariausius dalelių sugavimo būdus (Ватин и Стрелец 2003):

- fiziniai būdai: mechaninis (aerodinaminis, hidrodinaminis, filtracinis), elektrinis, magnetinis, akustinis, optinis, jonizuojantis, terminis;
- cheminiai;

- fiziniai - cheminiai;
- biocheminiai;
- fiziniai - biocheminiai.

Kiekvienas iš išvardintų valymo būdų yra efektyviausias tam tikroje pritaikymo ir panaudojimo srityje. Visi būdai grindžiami (vienu arba keliais) sekančiais oro valymo procesais: nusėdimo, koaguliacijos, panaikinimo, nukenksminimo, sudegimo ir sugavimo (Ватин и Стрелец 2003).

Oro valymo įrenginių nuo aerozolių dalelių veikimo principas remiasi tam tikru fiziniu mechanizmu. Dalelių sugavimo agregatuose pritaikomi tokie aplinkos, t.y. oro srauto nuo pakibusių dalelių valymo būdai: sedimentacija gravitaciniame lauke, sedimentacijos procesai dėl inercijos jėgų poveikio, sedimentacija išcentriname lauke, filtravimas, sedimentacija elektriniame lauke, šlapiasis valymas ir kt. Išskiriamas taip pat ir separavimo būdas, kurio metu dulkėtas oras pasiskirstomas į sudedamąsias dalis gravitacine ar išcentrine jėga ir kt. (Ватин и Стрелец 2003).

Gravitacinė sedimentacija. Teršalų dalelės nusodinamos, veikiant traukos jėgoms, taip pasišalinant iš oro srauto. Šiam procesui būtina sukurti tam tikrą užteršto oro srauto judėjimo režimą įrenginyje, įvertinant teršalų dalelių dispersiškumą, jų tankį ir kt. (Ватин и Стрелец 2003).

Inercinė sedimentacija. Šis procesas paremtas aerozolių dalelių ir aplinkos, t.y. oro srauto, turinčių skirtingų tankių, o tuo pačių ir skirtingų inercinių jėgų, dėsnio. Dalelės judančios dėl inercijos, atsiskiria nuo dujinės aplinkos (Ватин и Стрелец 2003).

Sedimentacija dėl išcentrinių jėgų veikimo. Kreivalinijinis užteršto oro srauto judėjimas yra pagrindinis šio būdo aspektas. Dėl atsirandančių išcentrinių jėgų, teršalų dalelės atmetamos ir nukreipiamos į įrenginio periferiją bei nusodinamos (Ватин и Стрелец 2003).

Praeinančio oro srauto aerozolių dalelių sulėtinimas bei sustabdymas siauruose vingiuotuose filtruojančių medžiagų kanaluose ir porose vadinamas sukibimo efektu, kuris taip pat efektyviai padeda išvalyti srautą nuo jame esančių teršalų (Ватин и Стрелец 2003).

1.6.1. Oro valymo ciklono tipai ir jų taikymas

Vienu iš labiausiai paplitusių oro srauto valymo įrenginių nuo teršalų kietųjų dalelių tipų yra ciklonai (graik. kyklon – sukantis, sukuriuojantis). Įrenginių itin platus panaudojimas, pagrįstas ciklono konstrukcijos paprastumu, patikimumu eksploatacijos metu, bei nedidelėmis kapitalinėmis ir eksploatacinėmis išlaidomis (Ватин и Стрелец 2003).

Kaip nebūtų keista, tačiau tiksliai pirmojo paprasčiausiojo ciklono tipo oro valymo įrenginio sukūrimo data nėra žinoma, tačiau kai kurie moksliniai šaltiniai teigia, kad įrenginys, panašus į

cikloną buvo naudojamas carinėje Rusijoje karo artilerijos gamykloje, sukurtoje pramoninku Nikita Antufjevu (Ватин и Стрелец 2003).

Vokietijos mokslininko Matijaso Bonata 1982 metais paskelbtame straipsnyje „Ciklono tipo dujų valymo nuo kietųjų dalelių įrenginys" buvo pateikta tokia ciklono įrenginio sukūrimo istorija:

1886 metais amerikiečiui O.M. Merse, atstovaujančiam "Knickerboxer company", padavusiam paraišką tam, kad gautų dalelių gaudyklės patentą buvo skirtas pirmasis ciklono įrenginio autorinis liudijimas. Nors ciklono tipo įrenginiai, technologijų srityje, naudojami jau daugiau šimto metų, iki šios dienos nebuvo pilnai apskaičiuotas ir ištirtas oro srauto tekėjimo režimas šiose įrenginiuose. Kuriant ciklono įrenginį dalyvavo daugybė mokslininkų. Nedaugeliui žinoma, jog L. Prandtlis ne tik nagrinėjo pasienio sluoksnio teoriją, kurios išvados yra šiuolaikinės srauto mechanikos pagrindas, bet ir užsiiminėjo ciklono tipo įrenginiais. Taip MAN įmonė Niurberge 1901 metais padavė patento paraišką ciklono įrenginiui, kurį sukūrė L. Prandtlis. Darbas apie ciklonų apskaičiavimus ir parametrus, paskelbtas 1956 metais mokslininku V. Bartu iš Karlsruhe miestelio Vokietijoje suteikė galimybę suprasti aerodinaminių procesų, kurie nulemia išvalymo efektyvumą, ypatumus ciklonuose" (Ватин и Стрелец 2003).

Ciklono tipo oro srauto valymo įrenginiai plačiai taikomi sausam užterštų dujų, išmetamų esant tam tikriems technologiniams procesams valymui (nusausinimas, apdeginimas, aglomeracija, kuro deginimas ir t.t). Ciklono veikimo principas pagrįstas kietųjų dalelių atskilimu nuo dujų srauto, veikiant išcentrinėms jėgoms, kurios atsiranda dėl oro srauto sukurinio judėjimo įrenginio korpuso viduje (Ватин и Стрелец 2003).

Norint plačiau darbe aptarti ašinio ciklono tipo įrenginius, svarbu paminėti, kad dėl savo įvairovės ciklonai skirstomi pagal oro srovės kryptį į priešingų srovių ir tiesiasrovių, pagal formą – kūgio ($H_c < H_k$) ir cilindro ($H_c > H_k$) bei oro srauto kryptį pagal ir prieš laikrodžio rodyklę – dešinieji ir kairieji. H_c ir H_k - cilindrinės ir kūginės ciklono dalies aukščiai. Užterštas oras paduodamas į cikloną per padavimo atvamzdį, o išvalytas – pašalinamas per išmetimo vamzdį. Dažniausiai išskiriami aukšto efektyvumo ir aukšto našumo ciklono įrenginiai. Pirmojo tipo įrenginiai pasižymi didesniu efektyvumu, tačiau valymo procesas trunka ilgesnį laiko tarpą, atrojo tipo įrenginiai turi nedidelį hidraulinį pasipriešinimą, išsiskiria dideliu našumu, bet tuo pačiu ne taip efektyviai sugauna smulkesnes teršalų daleles.

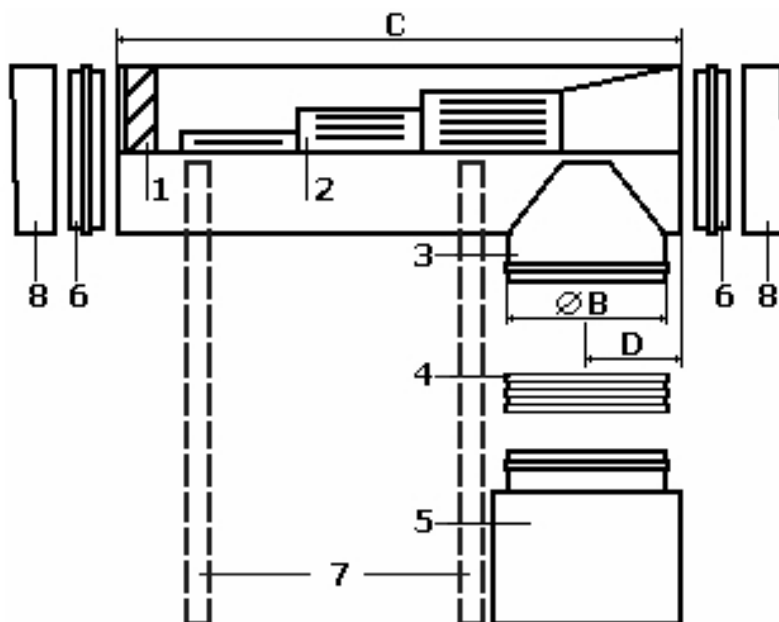
Ašinio ciklono tipo įrenginys tai mechaninis dalelių gaudytuvas, kuriame vyksta kietųjų dalelių separacija oro srovės tekėjimo kryptimi. Dažniausiai ašiniuose ciklonuose taikomas ašinis greitis siekia 12 m/s ir daugiau, oro srauto temperatūra neturi viršyti 110 °C. Svarbu paminėti, kad valomo oro sraute neturi būti sprogstančių medžiagų mišinių (Ватин и Стрелец 2003).

Oro srautas įėjime (A) į cikloną užsukamas specialia ašine sraige (1). Veikiant išcentrinėms jėgoms kietosios dalelės, pakibusios užteršto dujų sraute, atmetamos link įrenginio korpuso sienelių

antriniu dujų srautu, nukreiptu išilgai kūginės ciklono sienelės. Pagautos atmetos prie sienelių dalelės, nukreipiamos žemyn, taip pasišalindamos iš dujų srauto pro šoninį išėjimo atvamzdį (3) į dalelių sugavimo kamerą (5) (bunkerį), Žaliuzinės cilindrinės formos grotelės (2), išdėstytos ciklono korpuso viduje, atlieka papildomo oro srauto valymą, taip dar labiau padidindami įrenginio efektyvumą (Ватин и Стрелец 2003) (1.9 pav.).

Ciklono korpusas gaminamas iš lakštinio plieno, nudažomas aukštos kokybės milteliniais dažais, kurie apsaugo įrenginio korpusą nuo išorinio aplinkos poveikio. Gaminami įrenginiai būna horizontalaus bei vertikalaus išdėstymo, bunkeris sujungiamas atvamzdžiu nukreiptu vertikaliai žemyn.

Be antrinio srauto, atskiros dalelės, esančios prie sienelių, negalėtų patekti žemyn, nes išcentrinės jėgos sudedamoji, nukreipta aukštyn, yra didesnė negu laisvo kritimo pagreitis. Apie antrinio srauto reikšmingumą gali liudyti ir tai, kad kietosios dalelės pro išmetimo vamzdį išmetamos net įrengus ciklonus horizontalioje bei apverstoje padėtyse.



1.9 pav. Principinė ašinio ciklono schema: 1 – ašinė sraigė, 2 – žaliuzinės grotelės, 3 – šoninis išėjimo atvamzdis, 4 – lankstus ortakis, 5 – bunkeris, 6 – sklendės, 7 – montavimo atramos, 8 – įėjimo ir išėjimo ortakiai

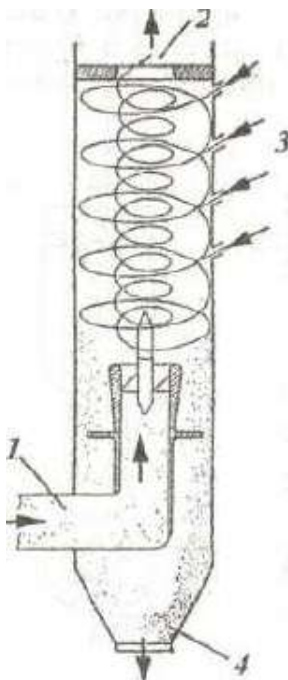
Teršalų dalelės, judant sukuriniame kreivlinijiniame dujų sraute yra veikiamos traukos, išcentrinės bei pasipriešinimo jėgų (Ватин и Стрелец 2003).

Valomo oro srauto padavimo būdas į cikloną taip pat išskiria dvi įrenginių grupes – su tangentiniu ir sraigtiniu padavimu. Esant tiems patiems įrenginių parametrams ciklonai su sraigtiniu padavimo būdu pasižymi didesniu valymo efektyvumu, negu tangentinio padavimo. Priklausomai nuo našumo, eksploatacijos sąlygų bei kitų reikalavimų ciklonai įrengiami po vieną (vidinis skersmuo siekia nuo 300 iki 1400 mm) arba yra grupuojami (Ватин и Стрелец 2003).

Ciklono veikimo principas grindžiamas išcentrinėmis jėgomis. Dujų srautas, užterštas kietosiomis dalelėmis, pučiamas į cilindrinę ciklono korpuso dalį, liestinės kryptimi esant pakankamai dideliame greičiu bei juda žemėjančios spiralės kryptimi. Veikiant išcentrinei jėgai, kuri atsiranda besisukant oro srautui, kietosios dalelės nukreipiamos prie ciklono sienelių (1.10 pav.).

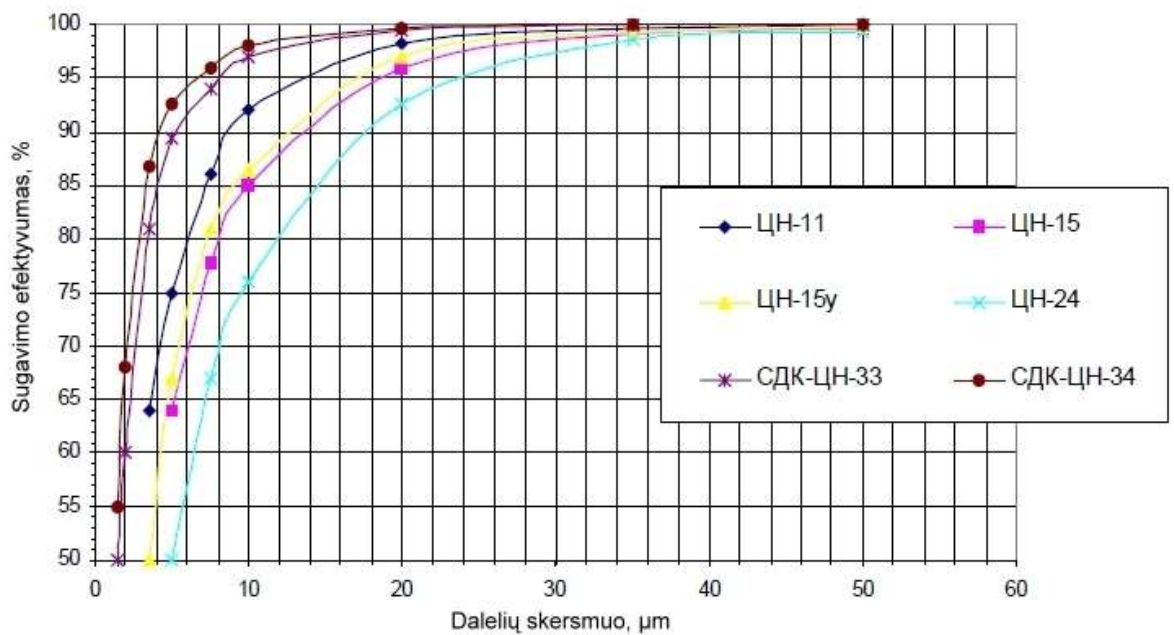
Kietosios dalelės atsiskiria nuo oro srauto bei krisdamos vertikaliai žemyn, veikiant traukos jėgoms, kaupiasi bunkeryje. Procesai, vykstantys ciklonuose, gana sudėtingi ir priklauso nuo daugelio faktorių. Todėl atliekant teorinius apskaičiavimus tenka taikomos prielaidos:

- kietosios dalelės, patenkančios su oro srautu į ciklono įrenginį, sferinės formos; ciklono įėjime kietosios dalelės tolygiai pasiskirsto visame skerspjūvyje;
- dalelės nusodinamos, pasiekusios ciklono sienelės (realiai dalis šių nusodintų dalelių bus atmesta nuo sienelių dėl dujų srauto turbulizacijos);
- nepaisoma ciklone esančių kietųjų dalelių koaguliacijos procesų.



1.10 pav. Ašinio ciklono ir oro srauto judėjimo principinė schema: 1 - užteršto oro srauto padavimo vamzdis, 2 - išvalyto oro srauto išmetimo vamzdis, 3 - antrinio dujų srauto įėjimo vamzdis, 4 - kietųjų dalelių kaupimo talpa (bunkeri)

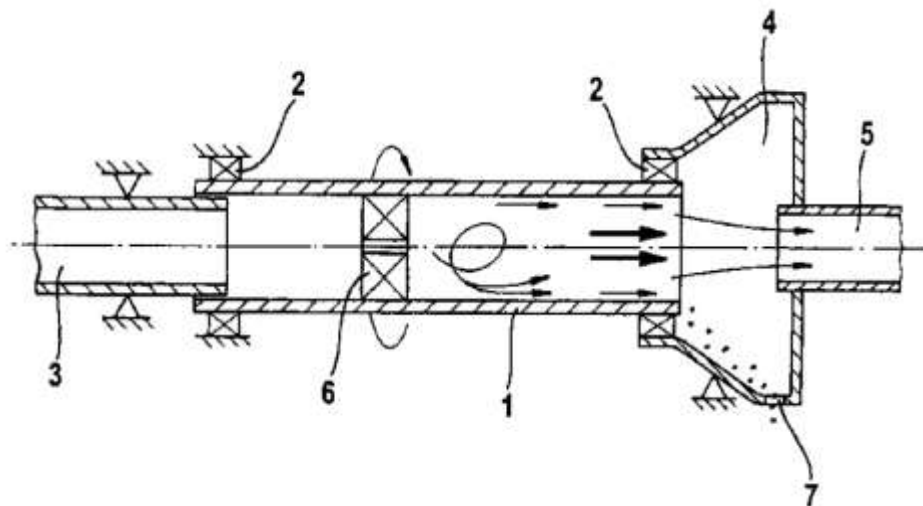
Dažniausiai naudojamų tipų ciklonai yra normalizuoti, t.y. bet kuris iš dydžių kiekvieno tipo, gali būti išreikštas, atsižvelgiant į ciklono skersmenį. Viena iš žymiausių mokslinių organizacijų pasaulyje НИИОГаз, esanti Maskvoje (Rusija), užsiima įvairių ciklono tipo oro valymo įrenginių projektavimu bei gamyba. Savo efektyvumu ir eksploatacijos savybėmis pasižymėjo ЦН ir ЦДК – ЦН tipų ciklonai, kurių efektyvumas siekia 95 % ir daugiau, esant 25 μm dalelėms (1.11 pav.).



1.11 pav. Ciklonų tipų sugavimo efektyvumas

Ukrainoje, Moldavijoje bei Slovakijoje srauto valymui nuo sausų, nepluoštinių nelimpančių dalelių, plačiai naudojami СИОТ tipo ciklonai.

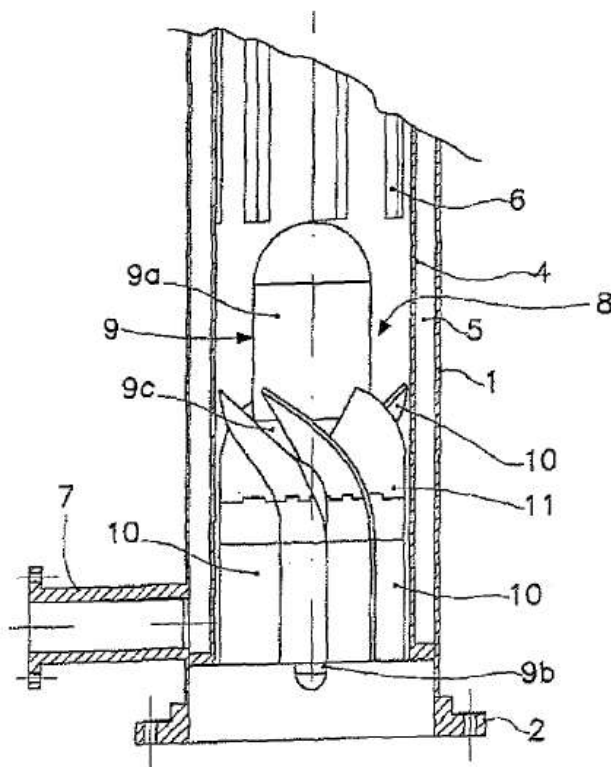
Naujausi sukurti ciklonai, pateikti patentinėje bazėje, skiriasi savo pritaikymu, efektyvumu, tačiau išlieka pagrindinis šių įrenginių veikimo skiriamasis bruožas – sūkurinis srautas.



1.12 pav. Sukurto ašinio ciklono, vidaus degimo variklio dujų valymui, schema

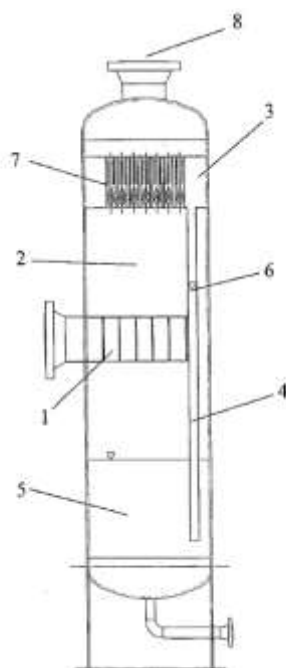
Ašinis ciklonas automobilio vidaus degimo varikliui buvo sukurtas 2005 metais Vokietijos Štutgarto mokslinio centro mokslininkais. Principinė tokio įrenginio konstrukcijos schema pateikiama 1.12 pav., kuriame vidaus degimo variklis pavaizduojamas vamzdžio formos. Vamzdžio (1) viduje, galinčio suktis, susikuria srautų sūkuriai. Šis ciklono tipas yra plačiai naudojamas kaip naftos garų separatorius (Beetz et al. 2005).

Ašinis ciklonas su keičiamu vidiniu išdėstymu dujų srauto teršalų mikrodalelių valymui, buvo sukurtas Bolonijos (Italija) mokslininkų grupe 2007 metais. Įrenginys susideda iš vamzdžio separatoriaus (1,4), kuriuo nukreipiamas dujų srautas į sukūrį sukeliantį elementą. Oro srautas veikiamas išcentrinio pagreičiu, pakankamai stipriu, kad nukreiptų teršalų daleles prie separatoriaus sienelių. Sukurinį judėjimą sukeliantis elementas (8) įrengtas įėjimo vamzdyje bei sujungtas su centriniu atraminiu korpuso elementu (9). Šis elementas kartu su paskirstymo vamzdžiu (1,4) turinčiu bendrą ašį su kampinėmis ašinėmis briaunomis (10) sukuria šį judėjimą. Briaunos susideda iš mažiausiai dviejų dalių, pirmos (10a), išdėstytos per elemento ašinę liniją, atsižvelgiant į vamzdžio ašį, o antros (10b), pakreiptos toliau nuo ašinės linijos. Polinkio kampas parenkamas toks, kad dujų valymo efektyvumo bei įrenginio našumo rodikliai būtų kuo optimaliausi (Andreussi et al. 2006) (1.13 pav.).

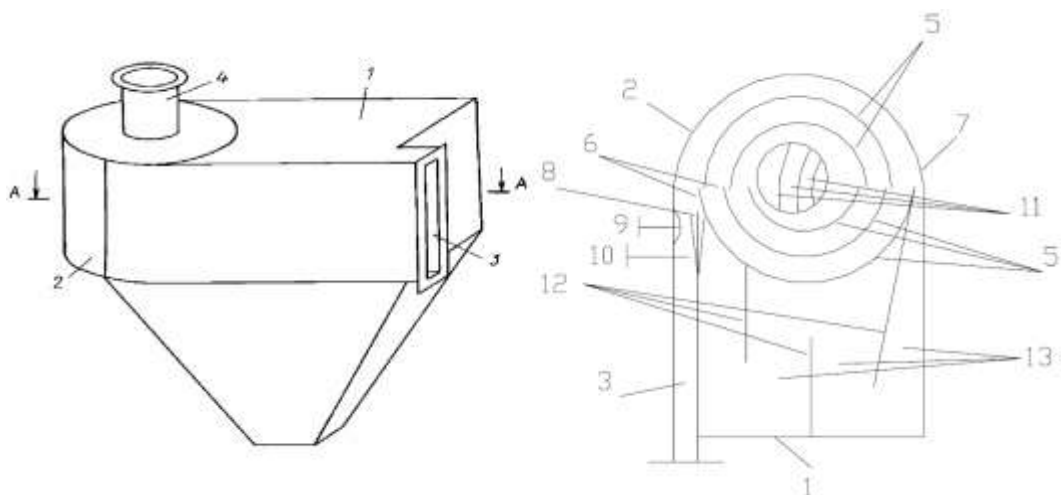


1.13 pav. Ašinis ciklonas su keičiamu vidiniu išdėstymu

Ašinis ciklonas, apsaugotas nuo aprasojimo, atskiriantis dujas, skysčius bei kietąsias daleles. Susideda iš įėjimo vamzdžio (8) bendram medžiagų srautui paduoti bei išmetimo vamzdžio (1) atitinkamai švarioms ir sausoms dujoms. Ciklonas susideda iš pagrindinio cilindrinio vamzdžio (7), kuris daromas skylėtas arba perforuotas tam, kad daliai skystų arba kietų medžiagų pasišalinti iš ciklono vamzdžio (4) į sandarią talpą, kuri perskirta įėjimo vamzdžio sklendėmis (6). Vidinis talpos paviršius pakreiptas nuo horizontalios plokštumos taip, kad kietosios dalelės nesikaupytų ant paviršiaus, o judėtų link drenažinių išėjimų. Šis įrenginys buvo sukurtas ir užpatentuotas Norvegijos Trondheim universiteto mokslininkais (Christiansen et al. 2005) (1.14 pav.).



1.14 pav. Ašinio ciklono, atskiriančio dujas, skysčius ir kietąsias daleles, principinė schema



1.15 pav. Inercinis filtras – separatorius

Aukšto efektyvumo inerciniame filtre – separatoriuje, sukurto prof. ПИГРЬ А. В. Tananaevu (patentas RU – 2080939) yra panaudojami įprastas ciklono išcentrinių jėgų valymo bei daugkartinės separacijos efektai. Separatorius sudarytas iš bunkerio – surinktuvo (1), spiralinio kanalo (2), susidedančio iš eilės kintamo spindulio pusžiedžių formos sekcijų (5), kurie yra išdėstyti atstumais, kurie lygus tarpžiedinių tarpų aukščiui (6), taip pat tangentinio įtekėjimo (3) ir išdėstyto ašyje ištekėjimo angų (4). Skerspjūvio reguliavimas atliekamas sklende (9), kuri įmontuota įeinančio spiralinio kanalo tarpų zonoje (8), kuri sujungia bunkerio ir spiralinio kanalo korpuso dalis. Šio tarpo plotis yra reguliuojamas. Filtro – separatoriaus išeinančiame spiraliniame kanale, įmontuotas deflektorius, kuriuo įmanoma dujų tekėjimą nukreipti skirtingomis kryptimis (11) (Тананаев 1995) (1.15 pav.).

1.7. Oro srauto ciklonuose skaitinis modeliavimas

Ciklonai plačiai naudojami pramoniniuose procesuose kietosioms dalelėms atskirti iš oro srauto žemoje temperatūroje ir dūmų dalelėms atskirti deginant kietąjį kurą aukštoje temperatūroje (iki 300–500 °C). Jų konstrukcijose dujų kryptis yra dvejopa – tangentinė ir ašinė. Šie įrenginiai pasižymi paprasta konstrukcija, kompaktiškumu, jų eksploatavimo išlaidos nedidelės, nes viduje nėra judamųjų dalių ir jų nereikia labai prižiūrėti. Ciklonu trukumai - didelis slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams ir su tuo susijusios energijos sąnaudos. Hoekstra ir kt. (1999) teigia, kad skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD, angl. Computational Fluid Dynamics) programinės įrangos naudojimas skaitiniams dujų srauto lauko skaičiavimams yra bendresnis modeliavimo būdas, geriau aprašantis ciklono veikimą (Jakštonienė 2009).

Aplinkos oro kokybei vertinti (tarša kietosiomis dalelėmis taip pat yra aplinkos oro kokybės indikatorius) gali būti taikomas bet koks metodas, leidžiantis matuoti, skaičiuoti arba prognozuoti oro užterštumo lygį (Jakštonienė 2009).

Oro užterštumo matavimai bei taršos šaltinių inventorizacija – patikimi būdai ir yra plačiai taikomi Lietuvoje, bet stacionarių ir mobilių taršos šaltinių išmetamų teršalų sklaida aplinkos ore priklauso nuo daugelio faktorių, tad, norint nustatyti tam tikroms sąlygoms būdingus sklaidos dėsningumus, labiau tinka skaitinio modeliavimo metodas, nes:

- modeliai padidina oro kokybės valdymo efektyvumą, nes jų pagalba, nustatant ribinių verčių viršijimą, gali būti įvertintas įvairių taršos šaltinių indėlis;
- oro kokybės modeliai padidina galimybę pavaizduoti erdvinį teršalų pasiskirstymą žemėlapyje, o tai suteikia galimybę sumažinti matavimo stočių skaičių, bet tuo pačiu atlikti išsamų oro kokybės vertinimą;
- modeliavimas užima svarbią vietą išankstiniame vertinime;
- modeliavimas suteikia galimybę vertinti atitikimą/neatitikimą ribinėms vertėms.

Norint nustatyti, ar išmetimai įtakos ribinių verčių viršijimą, būtina įvertinti teršalų pažemio koncentracijos pasiskirstymą tam tikru atstumu nuo taršos šaltinio. Šiam tikslui reikalingas dispersijos modelis – priemonė teršalų koncentracijai ore suskaičiuoti, turint informaciją apie išmetimus ir atmosferos būseną. Priklausomai nuo taršos šaltinio tipo (taškiniai šaltiniai – kaminai, linijiniai – išmetimai iš kelių transporto, ploto – grupė taškinių arba linijinių šaltinių, tūrio – ploto šaltiniai su vertikaliu aukščiu) ir vertinamos situacijos sudėtingumo dabar naudojami modeliai gali būti suskirstyti į tris pagrindines grupes (Aplinkos oro... 2010):

- Paprasti modeliai – tai nesudėtingi modeliai (grafikai, nomogramos), turintys iš anksto įvestas meteorologines sąlygas tam, kad modeliavimo procesas būtų paprastesnis. Šie

modeliai yra greitas ir pigus būdas pradinei informacijai apie oro užterštumo lygį gauti, bet vienu metu jie gali vertinti tik vieną taršos šaltinį.

- Vidutinio sudėtingumo modeliai – tai daugiausiai kompiuteriniai modeliai, naudojami asmeniniuose kompiuteriuose, kuriuose faktoriai, įtakojantys teršalų dispersiją, supaprastinti, bet ne taip, kaip paprastuose modeliuose. Vienas tokių yra *AEOLIUS* modelis, kuris skaičiuoja NO_x , CO, SO_2 , KD_{10} , benzeno, 1,3 – butadieno vienos valandos koncentracijas. Šiame modelyje naudojami valandiniai transporto srautų ir meteorologiniai duomenys, o emisijos faktorius nustato vartotojas.
- Sudėtingi modeliai – tai modeliai, reikalaujantys didelės kompiuterio atminties ir didelės apimties įvesties duomenų, o jų rezultatai daug tikslesni, nes emisijos ir meteorologiniai duomenys yra detalūs ir pakankamai tikslūs. Vienas tokių modelių, skaičiuojančių KD_{10} koncentracijas, yra *CAL3QHC*. Tai modelis, sukurtas JAV Aplinkos oro apsaugos agentūroje oro kokybei sudėtinguose transporto mazguose ir sankryžose, kur labai intensyvus eismas, vertinti. *CAL3QHC* taip pat įvertina automobilių eiles prie reguliuojamų sankryžų bei skaičiuoja vienos valandos CO ir KD_{10} koncentracijas.

Be šių paminėtų modelių, Europos šalyse transporto teršalų emisijai (KD , CO, NO_x , LOJ, SO_2 , sunkiųjų metalų ir kt.) apskaičiuoti naudojamas *COPERT* modelis (Copert 2010). Šiuo metu galima naudotis 2007 m. paruošta versija *COPERT IV*. Naudojantis šia programa, pagal statistinius duomenis apie šalies teritorijoje esančių transporto priemonių parką, eismo sąlygas bei kitus faktorius, sąlygojančius transporto priemonių teršalų išmetimą, galima apskaičiuoti teršalų emisijas šalies teritorijoje per tam tikrą laiko tarpą (dažniausiai per metus). Ši kompiuterinė programa yra patogi naudotis. Vertinant jos panaudojimo galimybes, vienas svarbiausių kriterijų yra šalyje sukauptų duomenų apie transporto priemonių parko charakteristikas kiekybė ir kokybė (Jakštonienė 2009).

Mūsų šalyje kietųjų dalelių sklaidos atmosferoje skaitiniam modeliavimui taikomos ir *VARSA* bei *PHOENICS* programos (Jakštonienė 2009).

Programų paketas *VARSA* skirtas kenksmingų priemaišų, esančių pramoniniuose šaltiniuose, teršaluose, išsisklaidymui nustatyti ir maksimaliems išmetimams skaičiuoti. Skaičiavimų rezultatai naudojami didžiausiems leidžiamiems išmetimams ir laikinai suderintiems išmetimams nustatyti ir atitinkamoms gamtos apsaugos priemonėms įgyvendinti (Criteria Pollutant 2010). Pagal *VARSA* dažniausiai rengiami dirbančių arba projektuojamųjų įmonių didžiausios leistinos taršos projektai. Tačiau šis programos teršalų sklaidos modelis, sukurtas pagal prieš du dešimtmečius parengtą rusišką metodiką, yra gana siauros panaudojimo srities (Petraitis ir Vasarevičius 2001).

Programų paketo *PHOENICS* pagalba galima modeliuoti pernašos procesus atmosferoje, hidrosferoje ir geosferoje (Vaitiekūnas 2004). Programoje naudojamas pernašos lygčių

diskretizavimo metodas yra baigtinių tūrių metodas, kadangi tiksliai analitiškai judėjimo lygčių išspręsti neįmanoma (Petraitis ir Vasarevičius 2001).

Taikant PHOENICS, sprendžiama elipsinių lygčių sistema, apimanti judesio kiekio pernešimą trimis kryptimis, koncentracijas ir nenutrūkstumą, Niutono klampos dėsnį, Furjė šilumos laidumo lygtį, Fiko difuzijos dėsnį (Petraitis ir Vasarevičius 2001).

Lyginant dviejų paskutinių paminėtų programų galimybes kietųjų dalelių sklaidai modeliuoti, akivaizdus PHOENICS pranašumas. Skirtingai nuo programos VARSA, pagal PHOENICS gaunami kietųjų dalelių sklaidos įvairiuose aukščiuose rodikliai bei nustatomas vertikalus teršalų pasiskirstymas. Esminis PHOENICS privalumas – galimybė rezultatus gauti pasirinktais laiko momentais. Be to, naudojant PHOENICS, nustatomos KD koncentracijos konkrečiu laiko momentu ir jos nėra didžiausios, o VARSA skaičiuoja galutinę didžiausiąją priežeminę teršalų koncentraciją kiekviename sklaidos tinklelio taške (Petraitis ir Vasarevičius 2001).

Tobulėjant kompiuteriams ir SFD metodams, taikant skaitinius sprendimus galima apskaičiuoti sudėtingus srauto laukus (Baltrėnas et al. 1997). SFD metodika – padalinti nagrinėjama sritį į daug kontrolinių tūrių ir pakeisti dalines diferencialines lygtis jų algebriniais ekvivalentais (Baltrėnas et al. 2008; Vaitiekūnas et al. 2004). Gaunama algebrinių lygčių aibė, kurią galima išspręsti taikant iteracinius metodus ir gauti kintamųjų – greičio komponentės ir slėgio – pasiskirstymą lauke, priklausantį nuo ribinių sąlygų, apibudinančių konkretų uždavinį (Bernardo et al. 2006).

Boysan ir kt. (Boysan et al.) vieni pirmųjų 1982 m. atliko pramoninio ciklono srauto SFD skaičiavimus. Dėl labai sudėtingų trijų dimensijų sūkurinių srautų ciklono viduje supratimas apie ciklone vykstantį kietųjų dalelių atskyrimo iš dujų srauto procesą tebėra nepakankamas, nepaisant to, kad dujų ir kietųjų dalelių suspensijos srauto judėjimas ciklonuose jau seniai yra daugelio eksperimentinių, teorinių ir skaitinių tyrimų objektas (Zhou, Soo 1990; Hu et al. 2005; Gujun et al. 2008). Norint ištirti srauto struktūrą eksperimentiniuose ciklonuose dažnai taikomi įvairūs matavimo metodai, tačiau šių metodų trūkumai trukdo susidaryti išsamų vaizdą apie srauto sudėtingumą (Nieuwland et al. 1996; Gujun et al. 2008). Dujų ir įvairaus dydžio kietųjų dalelių srautams modeliuoti naudojamos skirtingos modeliavimo programos. Reinoldso įtempiu turbulentinis (RIT) modelis pateikia tikslią sukūrimo srauto savybių, ašinio greičio, tangentinio greičio ir slėgio kritimo ciklono modelyje prognozę (Sommerfeld, Ho 2003; Gujun et al. 2008). Derksenas savo straipsnyje (2003) pristato Eulerio ir Lagranžo dvifazio srauto (dujų ir kietųjų dalelių) apibūdinimą. Eulerio dujų srauto apibūdinimu paremtas Lagranžo ir Eulerio srauto (LES) metodas. Kietųjų dalelių judėjimas imituotų dujų srauto laukų buvo modeliuojamas remiantis vieno pusio poveikio prielaida – dujų srautas veikia daleles, tačiau dalelės dujų srautui poveikio

neturi (Gujun et al. 2008). Derksen ir kt. (2006) vykdė trijų dimensijų (3D) nuo laiko priklausomą turbulentinio dujų srauto cikloniniame separatoriuje Eulerio ir Lagranžo modeliavimą, pagrįstą dvipusiu poveikiu. Dalelių poveikis dujoms modeliuojamas dalelių Šaltinio kameroje metodu (Gujun et al. 2008). Wang ir kt. (2006) dujų srautui Laplace ciklone modeliuoti taikė Reinoldso įtempiu modelį. Dalelių srautas modeliuojamas taikant tikimybinį Lagranžo modelį. Modeliuojant gautas atskyrimo efektyvumas ir dalelių trajektorijos palygintos su eksperimentiniais duomenimis. Nustatytas dalelių dydžio ir dujų greičio poveikis atskyrimo efektyvumui atitinka eksperimentų rezultatus (Gujun et al. 2008). Zhao ir kt. (2006) naudojo RIT modelį dujų srautui modeliuoti dviejų tipų ciklonuose: su standartiniu viengubu įleidimu ir spiraliniu dvigubu įleidimu. Dalelių judėjimui sekti ir dujų dalelių atskyrimo efektyvumui ciklonuose skaičiuoti taikomas Lagranžo metodas. Rezultatai rodo, kad SFD metodas gali veiksmingai atskleisti kietųjų dalelių ir dujų srauto atskyrimo ciklonuose su įvairios formos įleidimu mechanizmą (Gujun et al. 2008). Dujų dalelių srautą trijuose ciklonuose LES metodu modeliavo Shi ir Bayless (2007). Anizotropinei turbulencijai dujų fazėje pavaizduoti jie taikė RTT įtempiu modelį. Lyginimas su literatūroje pateikiamais eksperimentiniais duomenimis parodė, kad tangentinė starto ribinė būklė leidžia padaryti tikslesnes prognozes nei kitos ribinės būklės (Gujun et al. 2008).

1.8. Pirmojo skyriaus išvados

1. Tarp šalių, siekusių narystės Europos Sąjungoje, Lietuva buvo viena tų, kurioje pagrindinių oro teršalų (vadinamųjų oro kokybės indikatorių): sieros dioksido, azoto oksidų bei kietųjų dalelių KD_{10} per 1990–2000 metų laikotarpį sumažėjo labiausiai (apie 70 %).

2. Labiausiai užteršti miestai Lietuvoje: Klaipėda, Kaunas, Vilnius, Alytus, Panevėžys. Klaipėdos mieste 2009 metais išsiskyrė 464,6 t, Vilniuje – 163,5 t, o Panevėžyje – 50,9 t.

3. Kietosios dalelės veikia žmogaus organizmą išoriškai bei patekusios į organizmą, sukelia kvėpavimo sistemos, odos, akių, virškinamojo trakto bei širdies ir kraujagyslių ligas. Pasižymi kancerogeniniu poveikiu dėl suodžiuose esančio benz(a)pireno. Taip pat neigiamai veikia gyvūnų organizmams, augalams bei ekosistemoms.

4. Kietųjų dalelių koncentracijų nustatymas remiasi daugybės skirtingų metodų, kiekvienas iš jų skiriasi tikslumu, reikalinga matavimo įranga bei sudėtingumu. Pastaraisiais metais atrandama vis tobulesnių koncentracijos nustatymo metodų, kurie pritaikomi panaudojant skaitmenines informacines sistemas.

5. Kuriamų naujų išcentrinį valymo įrenginių patentinė bazė vis didėja, randami vis tobulesni techniniai sprendimai, kurie pritaikomi įvairiausiuose žmogaus veiklos srityse, mažinant oro užterštumą kietosiomis dalelėmis.

2. Šešiakanalio ciklono aerodinaminių charakteristikų eksperimentiniai tyrimai

Įvadas

Tiriamas šešiakanalis ciklonas yra patobulintas sukurto daugiakanalio ciklono eksperimentinis modelis. Daudiakanalis ciklonas, sukurtas VGTU doktorantės Ingos Jakštonienės, jos disertacijos objektas, pagal šį modelį paruošta patento paraiška Lietuvos patentų biurui. Nagrinėjamas šešiakanalis ciklonas yra patobulintas daugiakanalio ciklono prototipas su įkurtomis naujovėmis, kurios gerina veikimo parametrų efektyvumą. Eksperimentiniais tyrimais, naudojant skirtingos kilmės daleles, nustatinėjama daugiakanalio ciklono panaudojimo sritis.

Eksperimentiniams tyrimams naudojamas modernizuotas daugiakanalis ciklonas, kurio konstrukcijoje įrengtas penktas kreivalinijinis pusžiedis, kuris sudaro papildomą kanalą ciklono korpuso viduje. Tyrimuose panaudojami patobulinti kreivalinijiniai pusžiedžiai su langeliais, kurie praplečia ir išryškina įrenginio veikimo principo privalumus.

Šiais modernizacijos pakeitimais siekiama atlikti eksperimentinius tyrimus, nustatyti įrenginio veikimo parametrus ir efektyvumą bei įvertinti atliktų daugiakanalio ciklono konstrukcijos pakeitimų racionalumą. Eksperimentinių bandymų metu nustatomos aerodinaminės šio įrenginio charakteristikos, pastebimi galimi ypatumai, kurie gali būti ateityje keičiami, siekiant geriausio sistemos veikimo. Oro valymo įrenginio efektyvumo nustatymas – yra pagrindinis šio įrenginio pritaikymo rodiklis. Tyrimais norima pagrįsti šios konstrukcijos naujumą, naujos kartos įrenginio veiksmingumą, užterštame oro sraute esančių kietųjų dalelių koncentracijos mažinimo srityje.

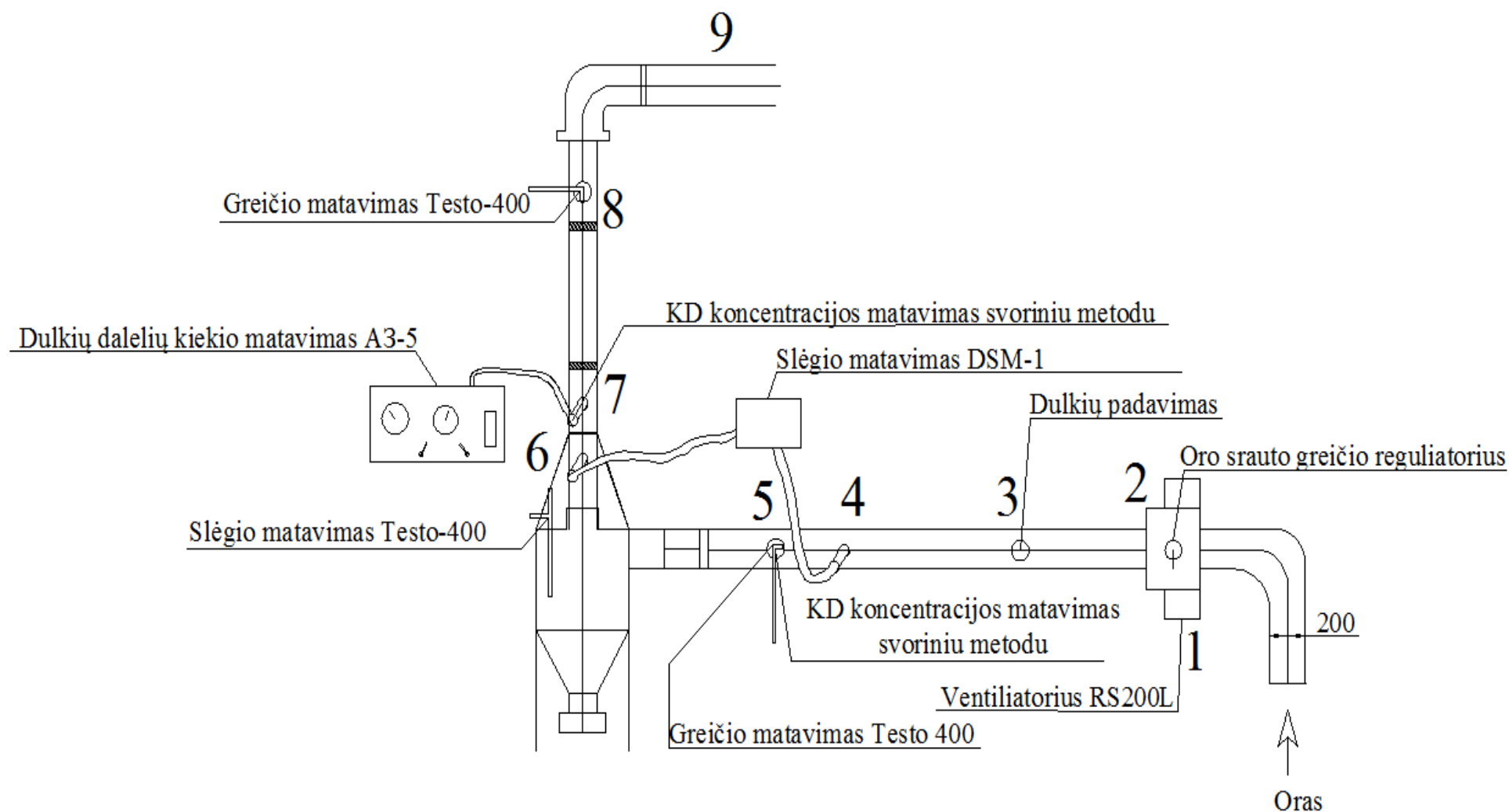
Skyriuje išsamiai pasakojama apie atliekamų tyrimų metodiką, naudojamas priemonės bei jų suderinimas su nagrinėjamu eksperimentiniu stendu. Pateikiami gauti rezultatai bei jų apibendrinimai.

2.1. Ciklono aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodika

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje, kurioje yra įrengtas patobulintas šešiakanalis ciklonas.

Ciklono eksperimentinio stendo schema pavaizduota 2.1 paveiksle.

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



2.1 pav. Ciklono eksperimentinio stendo schema

1 – ašinis ventiliatorius; 2 – ventiliatoriaus valdymo blokas; 3 – kiaurymė, įeinančio oro srauto ortakyje, kietųjų dalelių (KD) padavimui; 4, 6 – atvamzdžiai (išorinis skersmuo 9 mm, vidinis – 7 mm); 5, 8 – kiaurymė srauto greičio matavimui; 7 – atvamzdis, skirtas KD koncentracijų pagal dispersiškumą matavimams; 9 – išeinančio oro srauto ortakis

Aerodinaminių charakteristikų aprašymui atliekami ir ortakių sistemoje bei šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje eksperimentiniai tyrimai, nustatant dinامينius slėgius.

Dinaminį slėgį sudaro statinio bei atmosferinio slėgių aritmetinė suma. Statinis slėgis parodo ortakio tiesiosios atkarpos pasipriešinimo su pasipriešinimu oro srautui išeinant iš ortakio į atvirą aplinką skirtumo slėgio kritimą. Dinaminis slėgis didėja, didėjant oro srauto greičiui sistemoje bei parodo bendro slėgio dalį, kurį atsiranda dėl oro srauto judėjimo greičio ortakiuose.

Eksperimento metu naudojama įranga:

1. Daugiafunkcis matuoklis TESTO-400;
2. Diferencialinis slėgio matuoklis DSM-1;
3. Sparnelinis zondinis anemometras;
4. Guminės žarnelės, kurių vidinis skersmuo 6 mm, išorinis 8 mm;
5. Pito-Prandtlio vamzdelis.

Tyrimai buvo atliekami su vienfaziu oro srautu. Ciklono dangtyje buvo padarytos specialios kiaurymės, per kurias matavimo prietaisais buvo išmatuoti oro srauto greičiai ciklono įrenginio viduje.

Oro srautų greičių nustatymo parengimo procedūra eksperimentiniams tyrimams atlikti susideda iš: ventiliatoriaus pajungimo (1), reikiamo oro srauto greičio nustatymo, parenkant tinkamą valdymo bloko svirtelės (2) padėtį, matavimo priemonių prijungimo (4–7) (2.2 pav.).



2.2 pav. Oro srauto greičio matavimas

Eksperimento metu oras iš aplinkos patenka į ortakio sistemą. Oro srovė, sudaroma kanalinio ventiliatoriaus (1) (RS200L, galingumas 190W) veikimu. Įeinančio oro srauto ortakio, iki pat tangentinio oro srauto įėjimo į cikloną, skersmuo siekia 200 mm. Išeinančio iš įrenginio ortakio 160 mm skersmens.

Matuokliu TESTO-400 (temperatūros matavimo ribos: 20–70 °C, paklaida $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos: 1–30 m/s, paklaida $\pm 0,05$ m/s), panaudojant Pito-Prandtlio vamzdelį, sujungtą žarnelėmis su daugiafunkciniu matuokliu, išmatuojamas dinaminis dujų slėgis.



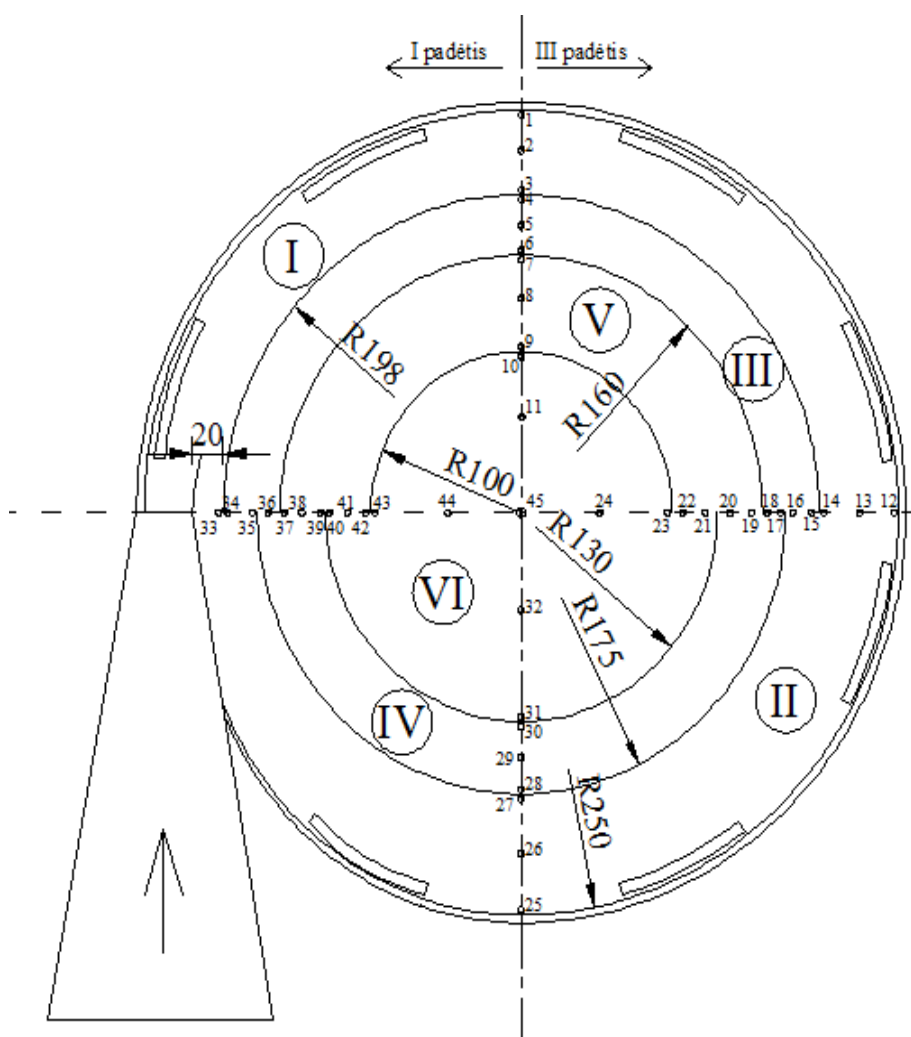
2.3 pav. Oro dinaminio slėgio matavimas ciklono konstrukcijos viduje

Matuojant dinaminį slėgį Pito-Prandtlio vamzdelis guminių žarnelėmis, kurių vidinis skersmuo lygus 6 mm, išorinis – 8 mm, buvo sujungiamas su matuokliu Testo-400. Šešiakanalio ciklono separavimo kameros dangtyje padarytos kiaurymės suteikė galimybę, įstatyti dinaminio slėgio matavimo vamzdelį, reikšmingiausiose vietose, pusšiedžių bei periferijos pasienio sluoksniuose 2 mm atstumu nuo kiekvieno kreivalinijinio pusšiedžio paviršiaus, pirmajame kanale, tarpe tarp pusšiedžių (atstumo viduryje). Išmatuotas ašinys įrenginio dinaminis slėgis, kuris patenka į šeštąjį kanalą. Dinaminiai slėgiai išmatuoti su įstatytais įprastais kreivalinijiniais pusšiedžiais bei su patobulintais išpjautais langeliais pusšiedžiuose. Oro slėgio matavimai ortakiuose, prieš įėjimą į

ciklono tangentinį įtekėjimą (4) bei už ciklono, atliekami prijungiant diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa), siekiant palaikyti nusistovėjusį oro srautą, greitis išmatuojamas matuokliu TESTO-400 su anemometru (2.3 pav.).

Dinaminių slėgių ciklono konstrukcijoje bei dujų greičių matavimų sistemos ortakiuose dydžiai, matuojami kiekvienas po tris kartus, taip išvengiama sisteminių klaidų bei sumažinama gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaida.

Palyginimui bei papildomai priklausomybei nustatyti pagal išmatuotus oro srauto greičius apskaičiuoti oro debito tūriai prieš įėjimą į ciklono tangentinį įtekėjimą bei už ciklono ortakiuose, panaudojant daugiafunkcį matuoklį TESTO-400. Diferencialiniu slėgio matuokliu pagal slėgio pokyčius, buvo stebimas oro srauto nusistovėjimas tiksliems greičio matavimams atlikti.



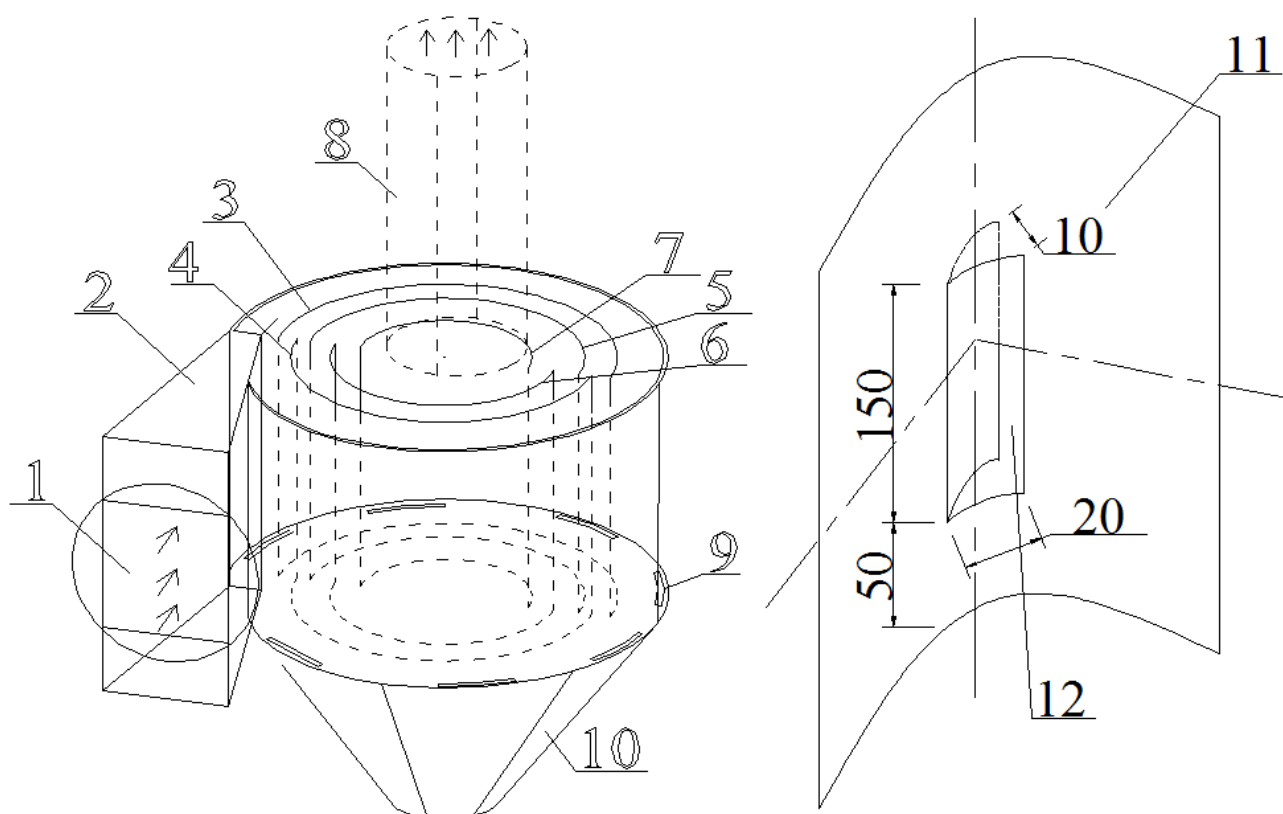
2.4 pav. Ciklono vidinė konstrukcija

I - VI – ciklono kanalai; R1 - R5 – kreivalinijiniai pusžiedžiai; 1 - 45 – dinaminių oro srauto slėgių matavimo taškai

Srauto greičio bei slėgių matavimams pirmuoju uždaviniu parenkama matavimo vieta bei jos paruošimas. Vieta kurioje bus atliekami matavimai turi būti tiesioje atkarpoje su nusistovėjusiu dujų

srautų. Ortakio atkarpoje per 5–6 skersmens dydžius iki matavimo vietos ir per 3–4 skersmenis už matavimo vietos neturi būti jokių srauto trikdžių: sklendžių, alkūnių, ventiliatorių ir pan.

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



2.5 pav. Šešiakanalio ciklono konstrukcijos principinė schema: 1 – oro srauto įėjimo anga; 2 – difuzorius; 3, 4, 5, 6, 7 – skirtingo spindulio kreivalinijiniai pusžiedžiai; 8 – oro srauto išėjimo anga; 9 – šešiakanalio ciklono dugnas su segmentiniais žiediniais plyšiais; 10 – šešiakanalio ciklono kūginis bunkeris; 11 – kreivalinijinis pusžiedis su išpjautu langeliu; 12 – langelis su keičiamu išlenkimo pločiu

Eksperimentiniai tyrimai atlikti ir panaudojant patobulintą kreivalinijinių pusžiedžių konstrukciją - langelio įrengimas pusžiedžio konstrukcijoje (2.5 pav.). Tokiu konstrukciniu sprendimu yra padidinamas užteršto oro srauto filtracijos laikas ciklono kanaluose. Langelis suteikia galimybę pakartotinai patekti oro srautui į ankstesnio kanalo dalį. Langelis yra išpjautas žemiau horizontalios pusžiedžio simetrijos linijos, tam, kad užtikrinti, būtent, kietųjų dalelių

patekimą į sienelę ribojantį kitą kanalą, tačiau neužverti kelio švariajam orui patekti kanalu toliau link oro ištekėjimo angos. Įmanoma langelio reguliavimo galimybė, keičiant išpjauto langelio išlenkimo plotį.

Dinaminių slėgių ir aerodinaminio pasipriešinimo eksperimentiniuose tyrimuose nagrinėjami atvejai su pirmaisiais trimis išoriniais pusžiedžiais, kuriuose įrengti langeliai, esant 2 cm langelio išlenkimo pločiui. Oro valymo efektyvumo tyrimai atlikti su patobulintais pusžiedžiais trim atvejais: įstačius patobulintą tik pirmąjį pusžiedį; esant įstatytiems dviems pirmiesiems pusžiedžiams; įstačius trimis pirmuosius patobulintus pusžiedžius. Visais atvejais vidinė šešiakanalio ciklono konstrukcija nebuvo keičiama su likusiais nepatobulintais ketvirtuoju ir penktuoju kreivalinijiniais pusžiedžiais.

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

Oro srautų greičiai sistemos ortakiuose buvo išmatuoti, naudojantis sparneliniu zondiniu anemometru, prijungtu prie daugiafunkcio matuoklio TESTO-400. Dinaminių slėgių ciklono konstrukcijoje bei dujų greičių matavimų sistemos ortakiuose dydžiai, matuojami kiekvienas po tris kartus, sumažinant gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaidą. Dinaminių slėgių ciklono konstrukcijoje bei aerodinaminio pasipriešinimo matavimų dydžiai, matuojami kiekvienas po tris kartus, taip išvengiama sisteminių klaidų bei sumažinama gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaidą. Visi slėgiai išmatuoti keičiant kanalinio ventiliatoriaus tiekiamo oro srauto debitą. Tiriamasis oro srautas keičiamas ventiliatoriaus valdymo bloko svirtele. Minimalus ventiliatoriaus apsukų skaičius atitinka I svirtelės padėtį, vidutinis – III padėtį, o maksimalus – V padėtį. Šešiakanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai atliekami, reguliuojant kreivalinijinių pusžiedžių kanalų tarpus, buvo parinktos trys padėtys. Taikant šį reguliavimo būdą, siekiama nustatyti tinkamiausią pusžiedžių išdėstymą, norint pasiekti optimalias įrenginio aerodinamines savybes bei oro valymo efektyvumą. Eksperimentiniai aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai buvo atlikti panaudojant minėtų dviejų tipų kreivalinijinius pusžiedžius – įprastus ir su išpjautais langeliais.

Reguliuojant pusžiedžių padėtis, jie buvo išdėstomi 10 mm poslinkiu į kairę pusę – esant I padėčiai ir 10 mm poslinkiu į dešinę – esant III padėčiai, nuo pateiktos 2.4 paveiksle II pusžiedžių padėties. Regulavimo metu buvo perstatomi antrasis pusžiedis, turintis 175 mm spindulį, trečiasis ir ketvirtasis, kurių spinduliai atitinkamai 160 mm ir 130 mm.

Dinaminių slėgių nustatymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje, pradėdamas nuo to, kad oras iš aplinkos paduodamas į ortakį sistemą. Oro srovė, sudaroma kanalinio ventiliatoriaus (1) (RS200L, galingumas 190W) veikimu. Matuokliu TESTO-400 (temperatūros matavimo ribos: 20–70 °C, paklaida $\pm 0,2$ °C, greičio matavimo ribos: 0 - 10 m/s, paklaida $\pm 0,2$ m/s), panaudojant Pito-Prandtlio vamzdelį išmatuojamas dinaminis dujų slėgis, įstatant vamzdelį į padarytas įrenginio dangtyje kiaurymes. Slėgis išmatuojamas kiekvieno žiedo bei periferijos pasienio sluoksniuose, tarpuose tarp žiedų (atstumo viduryje) ir ciklono ašyje.

Sistemos slėgių matavimų metodika

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

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



2.6 pav. Slėgio (dešinėje) ir ciklono efektyvumo nustatymo svoriniu metodu (kairėje) matavimuose panaudoti ortakio atvamzdžiai

Slėgių matavimui eksperimentiniuose tyrimuose panaudojamas daugiafunkcinis matuoklis Testo-400, prie jo prijungiamos guminės žarnelės 6 mm vidinio ir 8 mm išorinio skersmens. Eksperimentinio stendo konstrukcijoje ortakiuose įmontuoti specialūs atvamzdžiai, kurių vidinis skersmuo siekia 7 mm, išorinis – 10 mm, prie kurių prijungiamos žarnelės slėgio matavimams (2.6 pav.).

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

Dujų srauto greičio nustatymas Pito-Prandtliaus vamzdeliu

Dujų srauto greitis ciklono kanaluose buvo nustatomas periferijoje, kiekvieno kanalo skerspjūvio viduryje, 2 mm atstumu nuo kiekvieno kreivalinijinio žiedo paviršiaus bei įrenginio ašyje. Visi slėgiai išmatuoti keičiant kanalinio ventiliatoriaus pučiamo oro srauto debitą, taip nustatant srautų greičių kitimą, priklausomai nuo paduodamo oro kiekio. Pučiamas oro srautas keičiamas ventiliatoriaus valdymo bloko svirtelėmis. Minimalus ventiliatoriaus apsukų skaičius atitinka I svirtelės padėtį, maksimalus – V padėtį.

Metodas skirtas dujų srauto 4 m/s ir didesniai greičiui matuoti ortakiuose. Ši sąlyga yra nepilnai tenkinama, kalbant apie dujų srauto greičio matavimą ortakiuose, panaudojant Pito-Prandtliaus vamzdelį, tačiau dėl pakankamai mažo ortakio skerspjūvio, priimama, kad srautas išlieka laminarinis. Dujų srauto greičio ir tūrio debito matavimo ortakyje didžiausia paklaida neturi viršyti $\pm 10\%$ (LAND 1998).

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

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

čia: P_d – dinaminis dujų slėgis matavimo taške, mmH₂O;

g – laisvo kritimo pagreitis ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);

g_t – dujų tankis matavimo sąlygomis, kg/m³ (LAND 1998).

Dujų tankis g_t , kg/m³, matavimo sąlygomis apskaičiuojamas pagal formulę:

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

čia: g_0 – dujų tankis, perskaičiuotas normaliosiomis sąlygomis (0 °C, 760 mmHg), kg/m³;

P – atmosferos slėgis, mmHg; t – dujų temperatūra ortakyje, °C;

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

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

$$1 \text{ mmHg}=133 \text{ Pa};$$

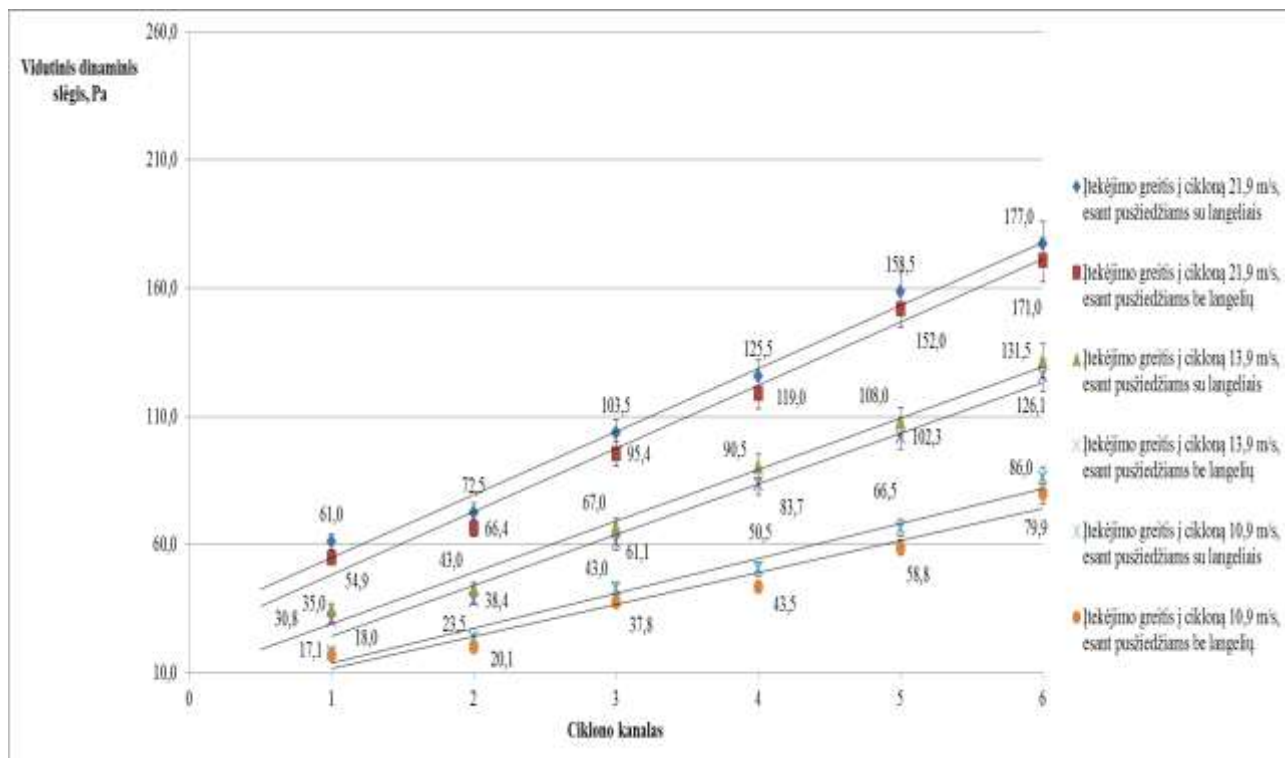
$$1\text{mmH}_2\text{O}=9,81 \text{ Pa}.$$

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

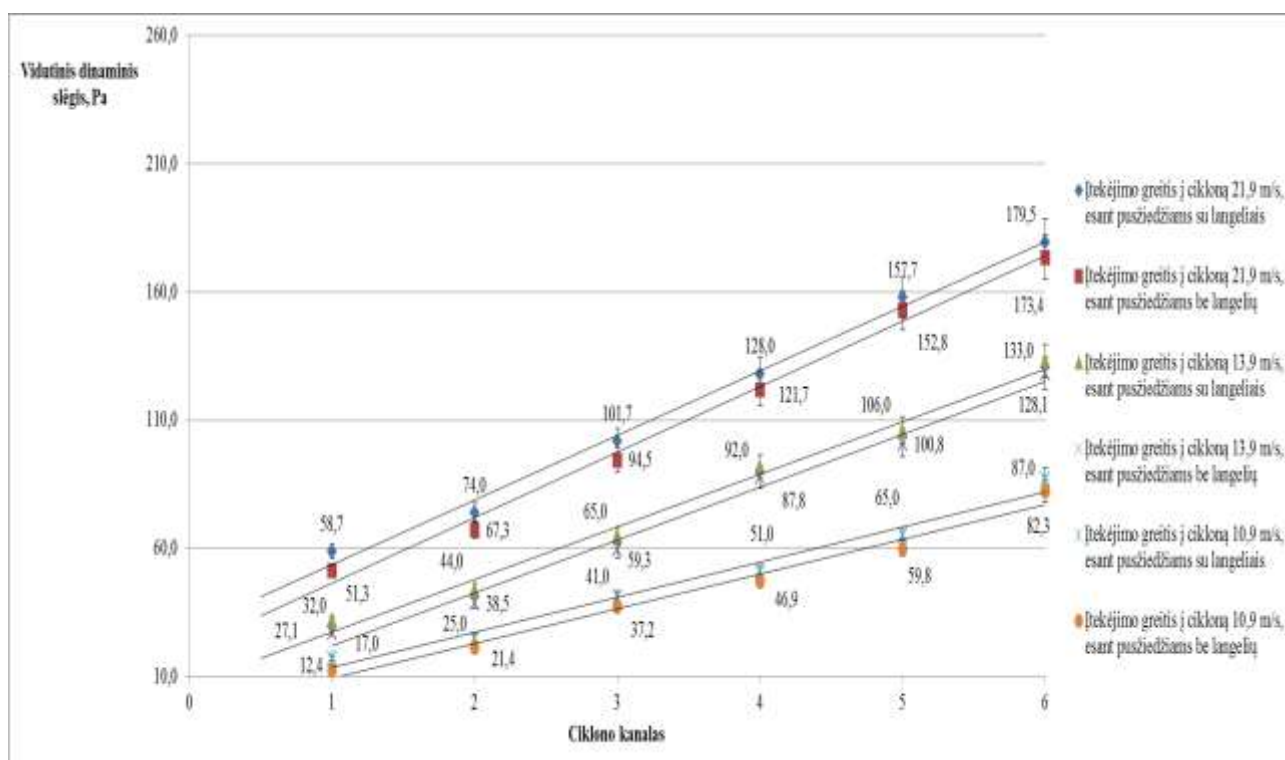
2.2. Aerodinaminių charakteristikų tyrimų duomenų analizė

Dinaminiai slėgiai buvo matuojami taškuose, nurodytuose 2.4 pav., kiekviename kanale, kreivalinijinių pusžiedžių pasienių sluoksniuose bei kanalų tarpuose tarp pusžiedžių (atstumo viduryje). Visi duomenys sugrupuoti pagal kanalus, į kuriuos patenka apskaičiuotos vidutinės dinaminių slėgių reikšmės. Kadangi greitis tiesiogiai proporcingas dinaminiam slėgiui – didžiausios pastarųjų reikšmės gautos esant maksimaliam įtekėjimo greičiui į cikloną, kuris lygus 21,9 m/s. Maksimali dinaminio slėgio reikšmė išmatuota esant III pusžiedžių padėčiai šeštame ciklono kanale, kuri lygi 180,3 Pa, gauta esant įstatytiems trims išoriniams pusžiedžiams su išpjautais langeliais, panaudojus įprastus pusžiedžius be langelių, vertė sumažėjo 6,1 Pa. Tuo tarpu, esant I ir II padėtimis gautos reikšmės yra atitinkamai 177 Pa ir 179,5 Pa, esant patobulintiems, ir 171 Pa ir 173,4 Pa – nepatobulintiems pusžiedžiams. Todėl galima teigti, jog išdėsčius patobulintus pusžiedžius III padėtyje šeštojo kanalo greitis (ašinis) yra gaunamas didžiausias.

Pagal gautus rezultatus pastebima, kad oro srautui pereinant iš vieno ciklono kanalo į kitą vidutinis dinaminis slėgis pakinta vidutiniškai 1,15–1,45 karto, o taip atsitinka dėl kanalo skerspjūvio sumažėjimo, tuo pačiu padidėja dinaminis slėgis bei greitis. Didesniu nei anksčiau minėta skirtumu pakinta slėgiai orui pereinant iš antrojo kanalo į trečiąjį, santykis esant minimaliam oro srautui siekia net 1,88 karto – pusžiedžiai be langelių, 1,83 karto – su langeliais. (I pusžiedžių padėtis). Esant II ir III padėtimis, šis santykis yra mažesnis, vidurkis lygus 1,3 karto. Taip atsitinka dėl mažesnio santykio artimųjų pusžiedžių spindulių nei kitose kanaluose, įtekėjimas iš antrojo kanalo į trečiąjį vyksta tarpo skerspjūvyje tarp I pusžiedžio, kurio spindulys siekia 198 mm bei II pusžiedžio ir kurio spindulys – 175 mm.



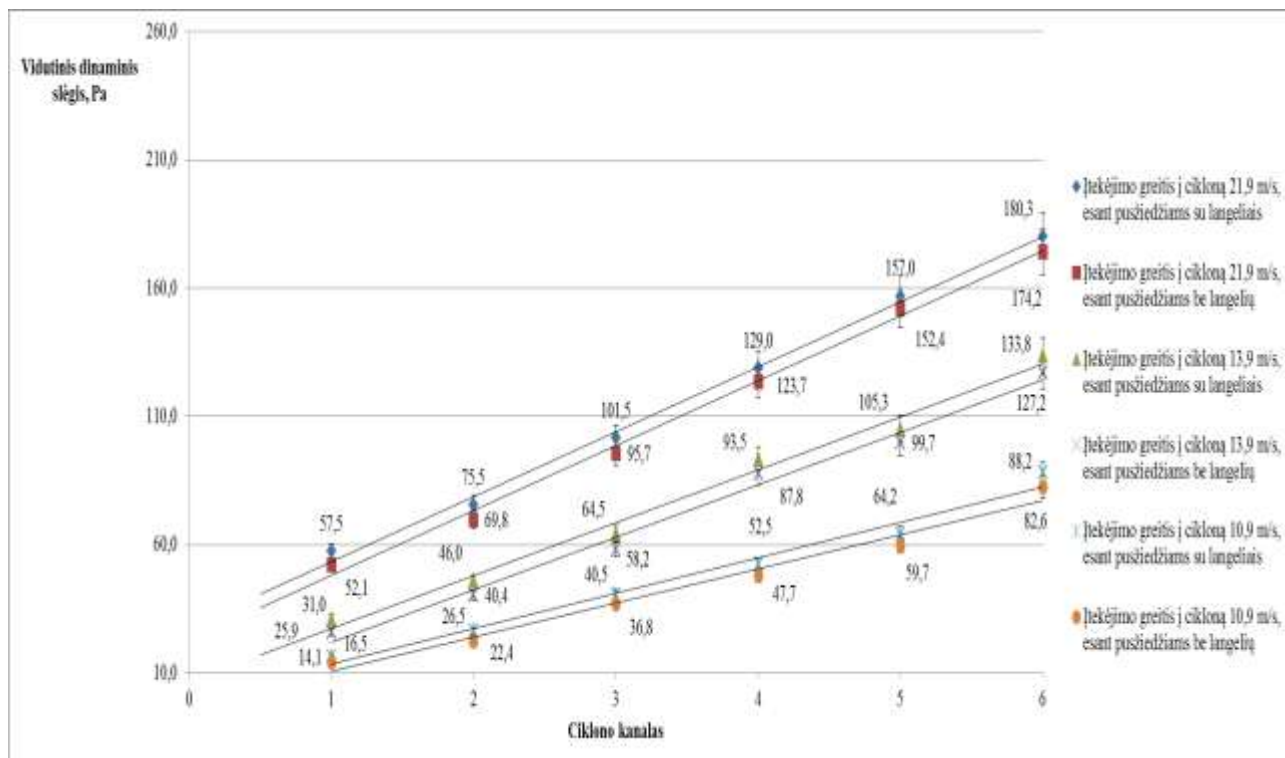
2.7 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėscius I padėtyje



2.8 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėscius II padėtyje

Mažiausias išmatuotas bei apskaičiuotas vidutinis dinaminis slėgis užfiksuotas pirmajame kanale, esant mažiausiam įtekėjimo greičiui – 10,9 m/s, esant II nepatobulintų pusžiedžių padėčiai, kuris lygus 12,4 Pa. Panaudojant pusžiedžius su langeliais, minimalus dinaminis slėgis lygus

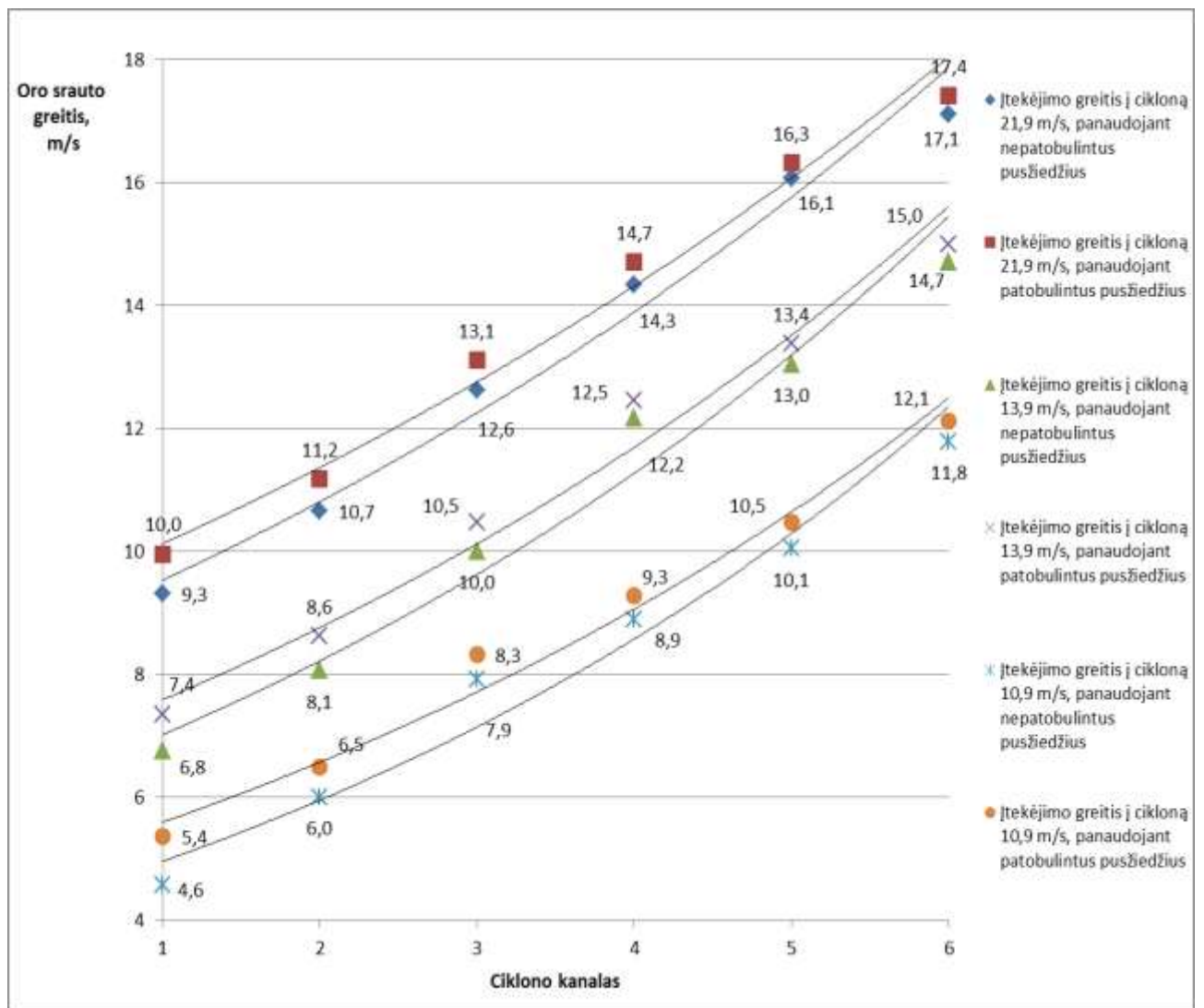
16,5 Pa, gautas pirmajame kanale, esant III pusžiedžių padėčiai 10,9 m/s įtekėjimo greičiui. Esant vidutiniam bei maksimaliam įtekėjimo greičiui, vidutiniai dinaminiai slėgiai tarp visų trijų nagrinėjamų padėčių lygus 73,5 Pa ir 110,4 Pa, esant nepatobulintiems pusžiedžiams, įstačius patobulintus – yra atitinkamai 79 Pa ir 116,6 Pa.



2.9 pav. Vidutinių dinaminių slėgių ciklono kanaluose kitimas, priklausomai nuo įtekėjimo greičio į cikloną, panaudojant patobulintus ir nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, išdėstčius I padėtyje

Analizuojami rezultatai parodo, kad keičiant pusžiedžių išdėstymą, o tuo pačiu, tarpus tarp jų, pakinta skerspjūvio dydis, pro kurį filtruojasi užterštas oras, taip padidėja dinaminis oro slėgis. Pateiktuose 2.7 pav., 2.8 pav., 2.9 pav. galima matyti, kad dinaminiai slėgiai pasiskirsto gana tolygiai ir tiesiškai didėja tekant nuo įtekėjimo į cikloną (patenkant į pirmąjį kanalą) link ciklono ašies (šeštojo ciklono kanalo) ir išeinančio oro angos.

Matavimo taškai išdėstyti tokių būdu, kad būtų galima pastebėti pokyčius po kiekvieno žiedo bei nustatyti maksimalius kanalų greičius. Optimalus oro (dujų) srauto tekėjimo režimas pastebėtas, esant II pusžiedžių padėčiai. Pateikiamas, apskaičiuotų pagal dinaminis slėgius, greičių pasiskirstymas, srautui praeinant pro ciklono kanalus, esant įstatytiems nepatobulintiems bei patobulintiems (su langelių) pusžiedžiams.



2.10 pav. Greičių pasiskirstymas ciklono kanaluose, kintant oro srautui

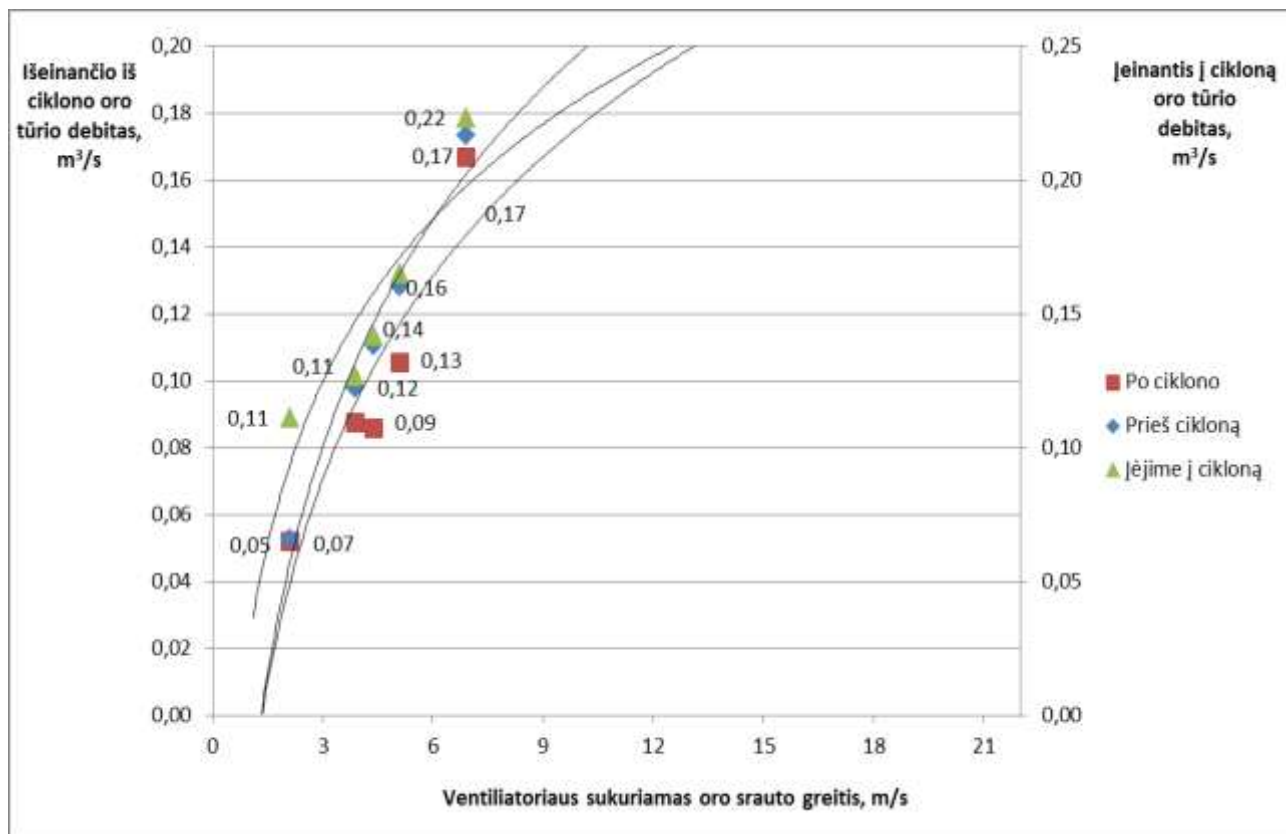
Greičiai apskaičiuoti pagal išmatuotus dinaminių slėgių rezultatus. Maksimalus oro srautas į cikloną paduodamas, paleidžiant kanalinį ventiliatorių (1) nominaliu galingumu. Esant V svirtelės padėčiai maksimalus pasiektas ciklono konstrukcijos viduje apskaičiuotas greitis, yra ašinis įrenginio greitis, kuris siekia 19,1 m/s.

Tame pačiame taške (45 matavimo taške), greitis, esant vidutiniam oro srautui, t.y. III ventiliatoriaus svirtelės padėčiai, mažesnis beveik 5 %, o esant I svirtelės padėčiai – daugiau nei 1,5 karto, ir siekia 11,5 m/s. Apskaičiuoti oro srauto greičiai ciklono konstrukcijos viduje pasiskirstę arti tiesiškai didėjančios priklausomybės. Nagrinėjant vidutinius greičius, pasiskirsčiusius ciklono kanaluose (2.10 pav.), esant maksimaliam oro srautui – V svirtelės padėčiai, yra 1,5 karto didesni negu esant vidutiniam oro srautui, ir beveik 2 kartus didesnis už greitį, esant minimaliam oro srautui.

Apskaičiuotas vidutinis oro srauto greitis ciklono kanaluose, esant V svirtelės padėčiai, kuris lygus 12,9 m/s. Esant III svirteliui greitis siekia 10,1 m/s, o I – 7,6 m/s.

Artėjant link ciklono ašies, greitis didėja. Padidėjimo netolygumas pasireiškia dėl netolygių, nuosekliai išdėstytų, kreivalinijinių žiedų spindulių skirtumų. Šių netolygumų įtaka mažėja, mažėjant oro srauto kiekiui. Prie periferinės sienelės esančiame matavimo taške apskaičiuoti oro srauto greičiai yra minimalūs. Šiam reiškiniui turi įtakos ciklono tangentinio įėjimo deflektoriaus padėtis bei jo matmenys. Dėl oro nukreipimo link ašies prarandama dalis oro srauto, o tuo pačiu mažėja ir oro srauto greitis.

Tiriant ciklono konstrukcijos aerodinamines savybes, atlikti eksperimentiniai ortakių sistemų matavimai taškuose, esančiuose prieš ir už valymo įrenginio, priklausomai nuo ventiliatoriaus svirtelės padėties, t.y., keičiant oro srautą. Pateiktame 2.11 pav., galime matyti skirtumus tarp pratekamų tūrio debitų oro srauto įeinančiame ir išeinančiame ortakiuose bei įtekėjime į cikloną, kintant ventiliatoriaus sukuriama oro srauto greičiui.



2.11 pav. Oro tūrio debitų kitimas prieš ir už ciklono, priklausomai nuo ventiliatoriaus sukuriama srauto greičio

Greičiai už ir prieš įrenginį buvo išmatuoti daugiafunkčiu matuokliu TESTO-400, prijungiant sparnelinį anemometrą. Pagal diferencialinio slėgio matuoklio parodymus, o būtent

slėgio šuolius, buvo sprendžiama apie oro srauto tolygumą. Matavimo taškai parinkti, vadovaujantis LAND 27–98/M–07 "Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas".

Gautų greičių bei tūrio debitų ortakiuose reikšmių prieš ir už įrenginio skirtumai yra nežymūs. Maksimalus apskaičiuotas tūrio debitas prieš cikloną yra lygus $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$, o tai atitinka $6,9 \text{ m/s}$ oro greitį. Už ciklono išmatuotas oro srauto greitis siekia $8,3 \text{ m/s}$, ir tai sudaro $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ tūrio debitą. Pirmiausia juos sąlygoja skirtingų ortakių skersmenų, o tuo pačiu ir skerspjūvių išmatavimai, taip sukeldami skirtingą oro srauto judėjimą ortakiuose. Be to, praeinant pro ciklono eksperimentinio stendo elementus, įrengtus kanalus, sujungimus, o ypač dėl ventiliatoriaus turbulentinio srauto sukūrimo, dalis oro srauto gali būti neužfiksuota matavimo priemonėmis. Didžiausias skirtumas tarp tūrio debitų pastebėtas esant II ir III ventiliatoriaus svirtelių padėtimis, prieš cikloną debitai yra lygus $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ ir $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$, o už ciklono – $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ ir $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. Įtakos turi ir ištraukimo sistemos, sujungtos su nagrinėjama ciklono įrenginio sistema, ventiliatorius, kuriuo sukuriamą nedidelę oro trauką, o tai gali padidinti būtent išeinančiojo oro srauto greitį bei tūrio debitą ortakyje. Remiantis gautais duomenimis, įmanoma apskaičiuoti maksimalų oro kiekį, kurį galima išvalyti, panaudojant nagrinėjamo šešiakanalio ciklono eksperimentinį stendą – įrenginio našumą, kuris lygus $612 \text{ m}^3/\text{h}$.

Eksperimentiniai, oro srauto greičių pasiskirstymo duomenys, patvirtina literatūroje aprašomas bei bandymais įrodytas įrenginio konstrukcijos aerodinamines savybes, kurie leidžia nustatyti galimus konstrukcijos ypatumus, defektus bei tobulinti sukurtus įrenginius (Ватин и Стрелец 2003).

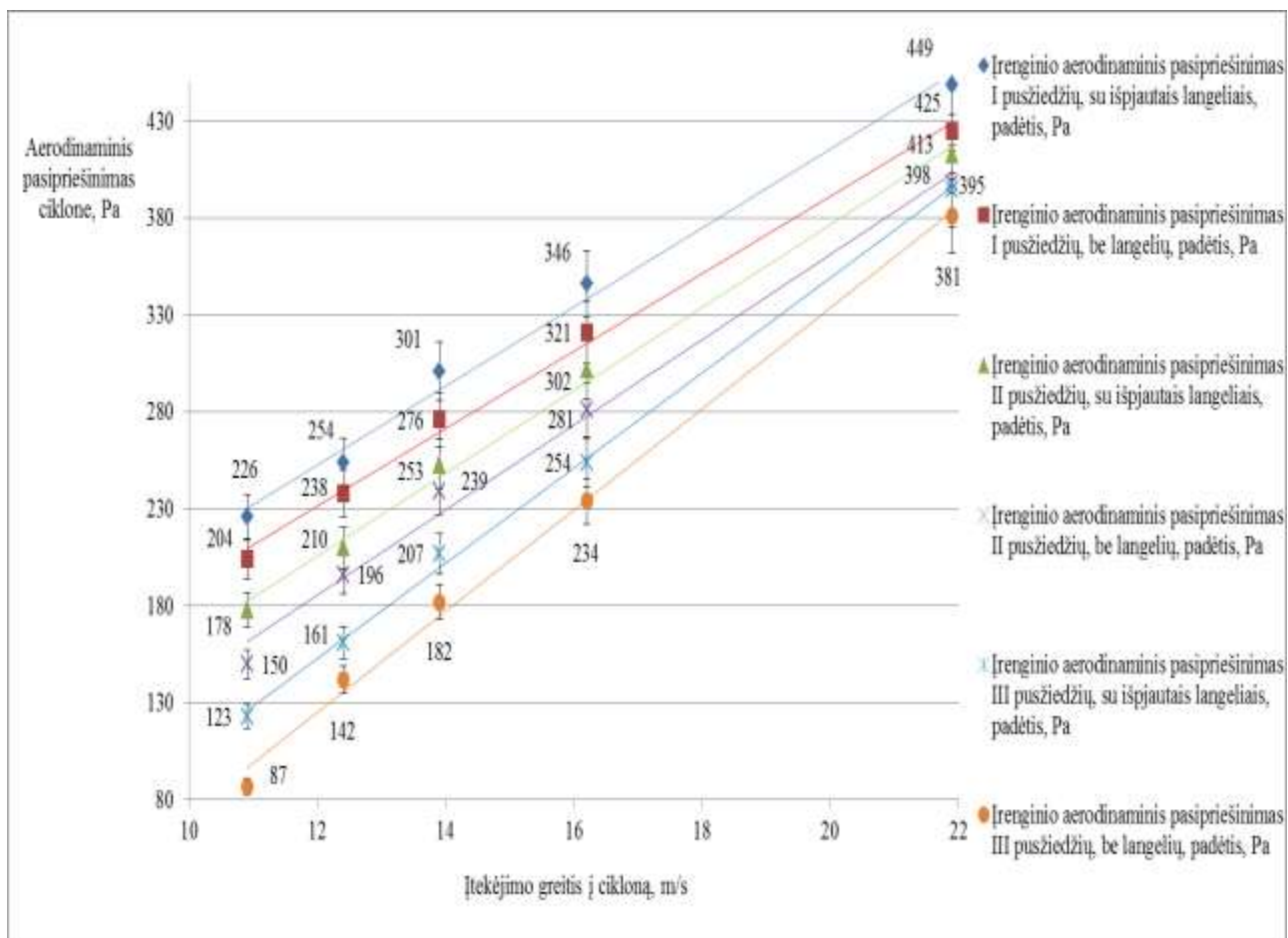
Slėgių matavimų rezultatų analizė

Keičiant pusžiedžių padėtis, priklausomai nuo krypties, keičiasi ir aerodinaminis pasipriešinimas. Didžiausias pasipriešinimas yra gautas prie I pusžiedžių padėties, t.y., kai jie yra pastumiami 10 mm nuo II padėties link tangentinio įtekėjimo deflektoriaus (2.4 pav.). Tuo metu susidaro aerodinaminis pasipriešinimas: naudojant patobulintus pusžiedžius – 449 Pa ; naudojant nepatobulintus – 425 Pa . Tolstant nuo įtekėjimo deflektoriaus sienelės, į dešinę, esant II padėčiai, susidaro maksimalus aerodinaminis pasipriešinimas – 413 Pa (su langeliais) ir 398 Pa (be langelių), o esant III padėčiai – 395 Pa (su langeliais) ir 381 Pa (be langelių) (2.12 pav.).

Ciklono pasipriešinimu turi būti remiamasi apskaičiuojant oro cirkuliacijos srautus. Tipinio ciklono pasipriešinimas gana didelis ($392 - 833 \text{ Pa}$) ir tuo pačiu patiriamos didelės energijos sąnaudos oro valymo metu.

Seniai naudojamų ciklonų oro valymo įrenginių aerodinaminio pasipriešinimo rodiklis, tokio kaip IQH-15400 mm skersmens bei 1062 m³/h našumo, sudaro 570 Pa. Plačiai naudojamo išcentrinio filtro IΦ 2–6–06, kurio našumas siekia 603 m³/h, pasipriešinimas siekia net 703 Pa. Atsižvelgiant į pateiktus duomenis, galima sakyti, jog nagrinėjamo šešiakanalio ciklono vidinėje konstrukcijoje nesusidaro ypatingų kliūčių, orui pratekant pro kreivalinijinių pusžiedžių kanalus, o tai pasako apie mažus patiriamus energijos nuostolius.

Ciklono pasipriešinimas susidaro dėl srauto nuslopinimo, išcentrinės jėgos susidarymui, dėl sienelių trinties bei vidinės fluidų srautų trinties. Pagal reikšmingumą pirmieji minėti nuostoliai yra svarbiausi, todėl atliekant apskaičiavimus, dažniausiai tik tai jos įtaka yra paisoma.



2.12 pav. Ciklono įrenginio aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo kreivalinijinių žiedų tipo, išdėstymo bei įtekėjimo greičio

Oro valymo įrenginių našumas bei efektyvumas, atsižvelgiant į ekonominius rodiklius priklauso nuo įrenginio pasipriešinimo, pratekant oro srautui pro jo konstrukciją. Nustatomų aerodinaminių parametrų rezultatai parodo, įrenginio racionalumą, o taip pat, padeda nustatyti ar yra pakankamas sukuriamas srautas, efektyviam įrenginio darbui, t.y. oro valymui nuo kietųjų

dalelių. Slėgio nustatymu norima pastebėti netobulumus oro padavimo sistemoje arba įrenginio atskirose elementuose.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Didžiausi dinaminiai slėgiai išmatuoti šeštame kanale, esant maksimaliam 21,9 m/s įtekėjimo greičiui į cikloną, ir yra lygūs 177 Pa, 179,5 Pa ir 180,3 Pa, nustačius atitinkamai I, II bei III kreivalinijinių pusžiedžių padėtis. Mažiausias vidutinis dinaminis slėgis nustatytas pirmajame kanale, esant III pusžiedžių padėčiai, ir yra lygus 16,5 Pa. Dinaminį slėgį įtakoja įtekėjimo į cikloną greičio bei kanalų skerspločių kitimas.

2. Gautas maksimalus oro srauto greitis, šeštame kanale įrenginio ašyje, lygus 19,1 m/s. Esant maksimaliam įtekėjimo greičiui VI kanale apskaičiuotas maksimalus greitis lygus 17,4 m/s, yra didesnis 15,2 %, lyginant su paduodamu vidutiniu įtekėjimo greičiu, ir lygus 15 m/s bei daugiau kaip 1,4 karto didesnis už srauto greitį, esant minimaliam įtekėjimo greičiui – 12,1 m/s.

3. Maksimalus aerodinaminis pasipriešinimas yra nustatytas, esant I pusžiedžių padėčiai, ir esant maksimaliam įtekėjimo greičiui – 21,9 m/s, pasipriešinimas siekia 449 Pa. Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas lemia aerodinaminio pasipriešinimo vertę, pastaroji didėja, artėjant link įtekėjimo deflektoriaus sienelės. Vidutinis nagrinėjamų atveju pasipriešinimas lygus 260,9 Pa.

3. Šešiakanalio ciklono valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai

Ivadas

Oro valymo įrenginių efektyvumo, tai yra gebėjimo pašalinti kietąsias daleles iš oro srauto, tyrimas yra pagrindinės įrenginio charakteristikos nustatymas.

Atliekant efektyvumo nustatymo eksperimentinius tyrimus, svarbu parinkti tinkamus naudojamų kietųjų dalelių mėginius, juos apdoroti, norint pasiekti tinkamų savybių ir sugrupuoti į kategorijas, kurios bus naudojamos skirtingiems efektyvumo nustatymo etapams.

Šešiakanalio ciklono oro valymo įrenginys ypatingas tuo, kad sugeba valyti oro srautą nuo smulkiadispersių dalelių. Nagrinėjamieji mėginiai yra apdoroti tokiu būdu, kad yra sudaryti iš dalelių, kurių skersmuo siekia iki 50 μm ir iki 20 μm . Kietųjų dalelių granulimetrinės sudėties tyrimų rezultatai gauti panaudojant lazerinio pluošto granulimetrą. Remiantis fotoelektriniu metodu, gauti duomenis panaudojami kietųjų dalelių koncentracijų apskaičiavimui, tiriant smulkiadispersių dalelių srauto valymo efektyvumą, kurių dydžiai yra 1 μm , 1,5 μm , 2 μm , 4 μm .

Oro valymo efektyvumo tyrimuose kietųjų dalelių koncentracijos nustatomas svoriniu ir fotoelektriniu metodais. Fotoelektriniu metodu yra nustatomos kietųjų dalelių koncentracijos oro sraute pagal dalelių dispersiškumą, tuo pačiu ir išvalymo efektyvumas. Svoriniu metodu yra nustatoma bendra kietųjų dalelių koncentracija oro sraute bei bendras ciklono valymo efektyvumas. Lietuvos aplinkos apsaugos normatyviniame dokumente (LAND 28–98/M–08) yra remiamasi tik svoriniu koncentracijos nustatymo metodu, todėl jis priimamas kaip pagrindinis. Šie metodai skiriasi koncentracijų nustatymo tikslumu, svorinis metodas iš šių pasirinktų yra tikslesnis bei jo taikymo galimybės yra plataus pasirinkimo.

3.1. Ciklono valymo efektyvumo nustatymo metodika

Ciklono efektyvumo nustatymas yra pamatinis eksperimentinių tyrimų uždavinys, kuris lemia oro valymo įrenginio pritaikymą, veikimo pagrįstumą, bei jo efektyvumą. Efektyvumo nustatymui yra parinktas vienas iš labiausiai taikomų koncentracijos nustatymo metodų – svorio metodas. Taip pat yra panaudojami matavimo įrenginiai paremti fotoelektriniais A3–5, metodais.

Svorio metodas yra pasirinktas kaip pagrindinis, nes yra skirtas dalelių (kietųjų dalelių) koncentracijai nustatyti į atmosferą išmetamosiose dujose. Metodas, palyginamai su kitais metodais koncentracijoms nustatyti, yra gana tikslus, santykinė paklaida neviršija $\pm 25\%$.



Stiklo miltų kietosios dalelės (SiO_2)

Molio kietosios dalelės ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Techninės druskos miltai (NaCl)

3.1 pav. Kietųjų dalelių mėginių tipai panaudoti eksperimentiniuose tyrimuose

Patobulinto šešiakanalio ciklono, skirto užteršto oro srauto valymui, efektyvumo nustatymo eksperimentiniams tyrimams, pasirinktos kietosios dalelės, kurios susidaro pramoninėje gamyboje, atliekant technologinius procesus. Pasirinktos dalelės yra gana skirtingos prigimtys, tai padaryta, siekiant nustatyti geriausią nagrinėjamo oro valymo įrenginio pritaikymą, tam tikroje pramonės šakoje, atsižvelgiant į pasirinktų kietųjų dalelių fizines savybes: tankiu, birumu ir dispersiškumu – stiklo (SiO_2), fizinis tankis (2670 kg/m^3); molis, fizinis tankis (1630 kg/m^3); techninės druskos (2210 kg/m^3) (3.1 pav.).



3.2 pav. Kietųjų dalelių smulkinimo malūnas

Bandinių paruošimas kiekvienam kietųjų dalelių koncentracijos matavimui, nepriklausomai nuo matavimo įrenginių ir nustatymo būdo yra identiškas. Prieš atliekant bandymus, parinktų stiklo miltų kietųjų dalelių, molio dalelių bei techninės druskos miltų bandiniai yra džiovinami laboratorinėje elektros krosnyje 100 °C temperatūroje iki pastovaus svorio, drėgmės pašalinimui. Kietosios dalelės yra susmulkinamos panaudojant Retsch RM200 malūną (3.2 pav.).



3.3 pav. Kietųjų dalelių sijojimo įrenginys

Antrosios dalelių klasifikavimo operacijos metu išdžiovintos dalelės sijoamos per 4 sietų kompleksą, panaudojant vibracinį įreginį – bandinių kratytuvą. Bandymams yra panaudojami 20, 50, 100, 500 µm akučių dydžio sietai. Eksperimentiniams bandymams panaudojamos tik 0–20 ir 0–50 µm dalelių dydžio dalelių mėginių dalys. Likusios dalys yra pakartotinai sijojama (3.3 pav.).

Kietųjų dalelių pūtimas, esant skirtingiems koncentracijos nustatymo būdams, yra vienodas, kadangi kietųjų dalelių pūtimas atliekamas nepriklausomoje nuo taikomų metodų eksperimentinio stendo dalyje. Pirmiausiai dalelės pučiamos į sistemos ortakį už ventiliatoriaus srovės (3) kryptimi, pasinaudojant purkštuku, prijungtą prie kompresoriaus, sudarančio 6 bar slėgio suspausto oro srovę. Dalelės, patekusios į ortakį, yra veikiamos oro srovės, sudaromos dėl kanalinio ventiliatoriaus (1)

(RS200L, galingumas 190W) veikimo. Svarbu paminėti, jog, prieš paleidžiant kietųjų dalelių bandinius, valdymo bloke nustatoma reikiama svirtelės padėtis. Svirtelė reguliuoja kanalinio ventiliatoriaus panaudojamą galią, tuo pačiu didinamas oro srauto tūrio debitas ortakyje (3.4 pav.).

Dėl susidarančio sūkurinio srauto, kietosios dalelės juda neapibrėžtu judėjimu, dėl to gali atsirasti papildomų matavimo paklaidų. Srauto išlyginimui ortakyje už šešiakanalio ciklono yra įmontuotos dvi srautą nukreipiančios grotelės.



3.4 pav. Šešiakanalio ciklono vidinės konstrukcijos sandara

Kietųjų dalelių koncentracijos matavimas svoriniu 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/m³ (vienkartinė); 0,007–0,69 mg/m³ (paros); 0,04–4,2 mg/m³ (paros, esant automatiniam cikliškam bandinio paėmimui po 30 min 12 kartų per parą); 0,17–16,7 mg/m³ (paros, esant rankiniam cikliškam bandinio paėmimui po 30 min 3 kartus per parą), kai lyginamosios oro sąnaudos 5 dm³/(min×cm²) (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/m³, 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 – $\pm 6\%$ (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.

Filtru 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 rotametą);
- oro, prasiurbto per skaitiklį arba rotametą, temperatūra;
- atmosferos slėgis bandinio paėmimo metu.

Po to laboratorijoje nustatoma filtro dulkių masė.

Nustatymo sąlygos

Sveriant filtrus privaloma laikytis šių sąlygų:

- oro temperatūra $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$,
- atmosferos slėgis $(84,0\text{--}106,7)$ kPa arba $(630\text{--}800)$ 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 eksikatorį su kalio chloridu arba 30–50 min į $40\text{--}50^\circ\text{C}$ 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.



3.5 pav. AFA–VP–20 audinio filtras, panaudojamas oro koncentracijos nustatymui

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 (3.5 pav.), prasiurbiant per juos tam tikrą oro tūrį. Antrąją žarnelę 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.

Kietųjų dalelių masės koncentracija ore apskaičiuojama pagal formulę:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0}; \quad (3.1)$$

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 ($t = 0^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273\text{K}$) ir $p_0 = 760\text{ mm Hg}$ stulpelio (101,3 kPa)) perskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_0 = \frac{T_0 p}{p_0 (273 + t)} u(t_2 - t_1) = K \frac{pV}{273 + t}; \quad (3.2)$$

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, $^{\circ}\text{C}$;
 $(t_2 - t_1)$ – 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 – $K = 0,358$).

Skirtingo dispersiškumo kietųjų dalelių sugavimo efektyvumo nustatymas fotoelektriniu metodu

Fotoelektrinis aerozolių dalelių skaitiklis A3-5 skirtas dalelių kiekio nustatymui užterštame sraute (3.6 pav.). Prijungiant įrenginį ir išeinančio oro srauto ortakį guminėmis žarnelėmis, skaitikliu yra fiksuojamas pratekantis kietųjų dalelių kiekis.



3.6 pav. Fotoelektrinis aerozolių dalelių skaitiklis A3-5

Atsižvelgiant į paduodamas koncentracijas bei nustatant dalelių skaičių oro tūryje, apskaičiuojamas ciklono oro valymo efektyvumas. Skaitiklis yra sugraduotas nustatyti kietųjų dalelių kiekį, priklausomai nuo nustatomo dalelių dispersiškumo. Įrenginys yra reguliuojamas pagal diapazonus, kurie yra keičiami, priklausomai nuo dalelių kiekio oro tūryje, atitinka daugiklio reikšmę prie kietųjų dalelių koncentracijos. Nustatant kietųjų dalelių skaičių, registruojamų skaitikliu įeinančiame bei išeinančiame iš ciklono įrenginio ortakiuose, galima spręsti apie oro valymo efektyvumą, nuo tam tikro skersmens kietųjų dalelių.

Nustatant kietųjų dalelių ciklono atskirimo efektyvumą buvo tiriamos pasirinktos trys mėginių grupės - stiklo, techninės druskos ir molio kietosios dalelės. Efektyvumas buvo tiriamas, kintant aerodinaminiams parametrams bei keičiant vidinę ciklono geometriją - įstatant įprastus pusžiedžius ir patobulintus pusžiedžius su langeliais.

3.2. Ciklono valymo efektyvumo tyrimo duomenų analizė

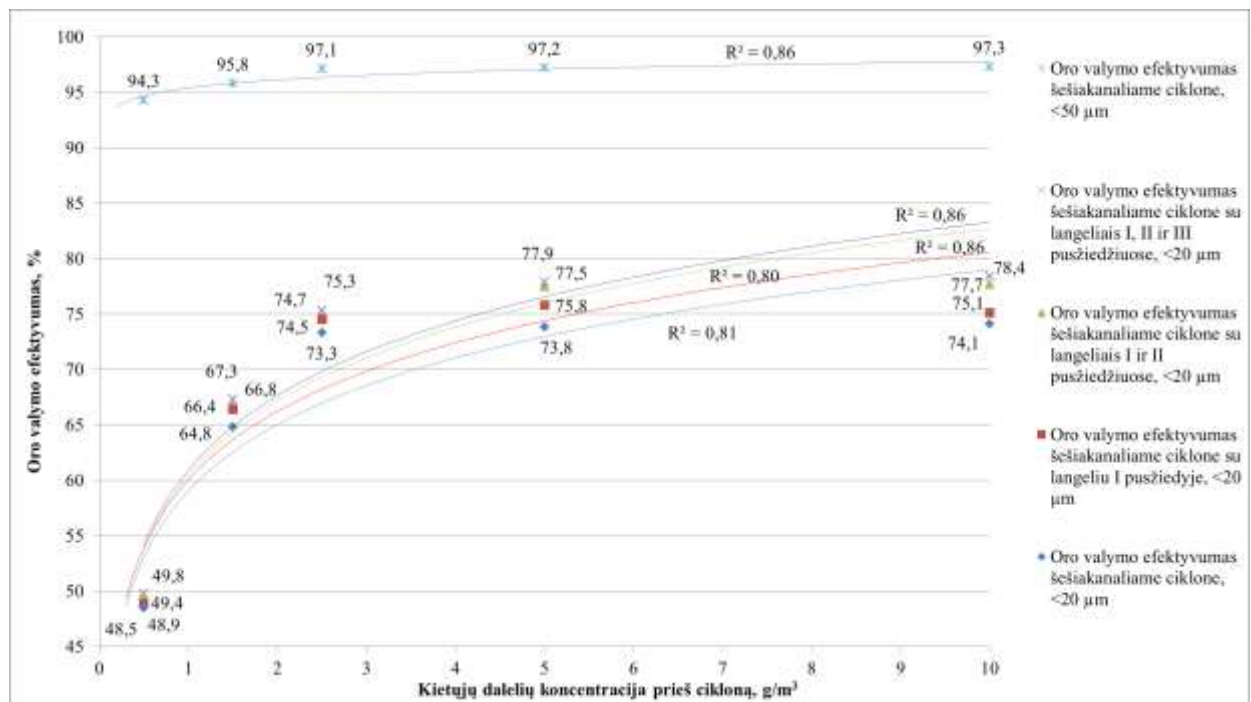
Nustatymas svoriniu metodu

Tyrimų metu buvo nagrinėjamas šešiakanalio ciklono, užteršto kietosiomis dalelėmis, oro srauto išvalymo efektyvumas. Tiriamųjų stiklo, techninės druskos ir molio kietųjų dalelių koncentracijos buvo nustatomos svoriniu metodu. Eksperimentinių tyrimų metu kietųjų dalelių koncentracijos prieš valymą buvo keičiamos nuo 500 mg/m^3 iki 10 g/m^3 . Tyrimais buvo siekiama nustatyti skirtingos prigimties kietųjų dalelių atskirimo laipsnį bei patobulinto šešiakanalio ciklono optimalų pritaikymą gamyboje.

Koncentracijų bei efektyvumo nustatymui buvo pasirinktas maksimalus įtekėjimo greitis, kuris lygus $21,9 \text{ m/s}$. Valymo efektyvumų tyrimai buvo atlikti esant optimaliai – II kreivalinijinių pusžiedžių padėčiai. Nagrinėjami šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumai, esant skirtingam dalelių dispersiškumui (iki $50 \mu\text{m}$ ir iki $20 \mu\text{m}$) bei skirtingai vidinei įrenginio geometrijai (panaudojant kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais).

Gautus tyrimų rezultatus, naudojant stiklo, techninės druskos ir molio kietąsias daleles, yra įmanoma ir leidžiama lyginti, kadangi dalelių mėginiai yra paruošti pagal vienodą metodiką, o jų panaudojimas eksperimentiniuose tyrimuose buvo identiškas.

Išmatavus stiklo kietųjų dalelių koncentracijas, prieš ir po valymo oro srauto ortakiuose, apskaičiuotas didžiausias išvalymo efektyvumas siekė – $97,3 \%$, esant 10 g/m^3 iki $50 \mu\text{m}$ kietųjų dalelių koncentracijai, naudojant nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius. Mažiausias efektyvumas, gautas, esant tos pačios frakcijos, 500 mg/m^3 koncentracijai, dalelėms, ir yra lygus $94,3 \%$. Ciklono oro valymo efektyvumas, pakitus dalelių dispersiškumui iki $20 \mu\text{m}$, sumažėja vidutiniškai $1,5$ karto. Tiriant efektyvumą, esant įprastai vidinei geometrijai, maksimalus išvalymo laipsnis taip pat gautas, esant didžiausiai įleidžiamai koncentracijai – 10 g/m^3 ir siekia $74,1 \%$. Minimalus efektyvumas – $48,5$, nustatytas esant pradinei 500 mg/m^3 koncentracijai (3.7 pav.). Tyrimų metų buvo atliekami tyrimai, panaudojant kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais. Patobulinimas suteikė galimybę užterštam oro srautui grįžti į ankstesnį kanalą, kad papildoma dalis kietųjų dalelių galėtų nusėsti bei patekti į bunkerį pro segmentinius žiedinius plyšius (2.5 pav.).



3.7 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant stiklo kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai

Oro valymo efektyvumas buvo nustatytas, esant langeliui pirmame pusšiedyje, pirmose dviejuose (I ir II) pusšiedžiuose ir pirmuose trijuose (I, II ir III) pusšiedžiuose. Tiriant šešiakanalio ciklono išvalymo laipsnį, esant patobulintai vidinei geometrijai buvo įleidžiamos smulkiadispersios iki 20 μm kietosios dalelės. Maksimalus stiklo kietųjų dalelių atskirimo efektyvumas buvo gautas, įstačius visus tris išorinius pusšiedžius su langeliais, esant didžiausiai suleidžiamai koncentracijai - 10 g/m³, kuris siekia 78,4 %. Galima pastebėti, kad mažinant patobulintų žiedų skaičių (langeliai pirmame ir antrame bei tik pirmame pusšiedžiuose) bei mažinant įleidžiamų stiklo kietųjų dalelių koncentraciją, valymo efektyvumas mažėja (3.7 pav.).

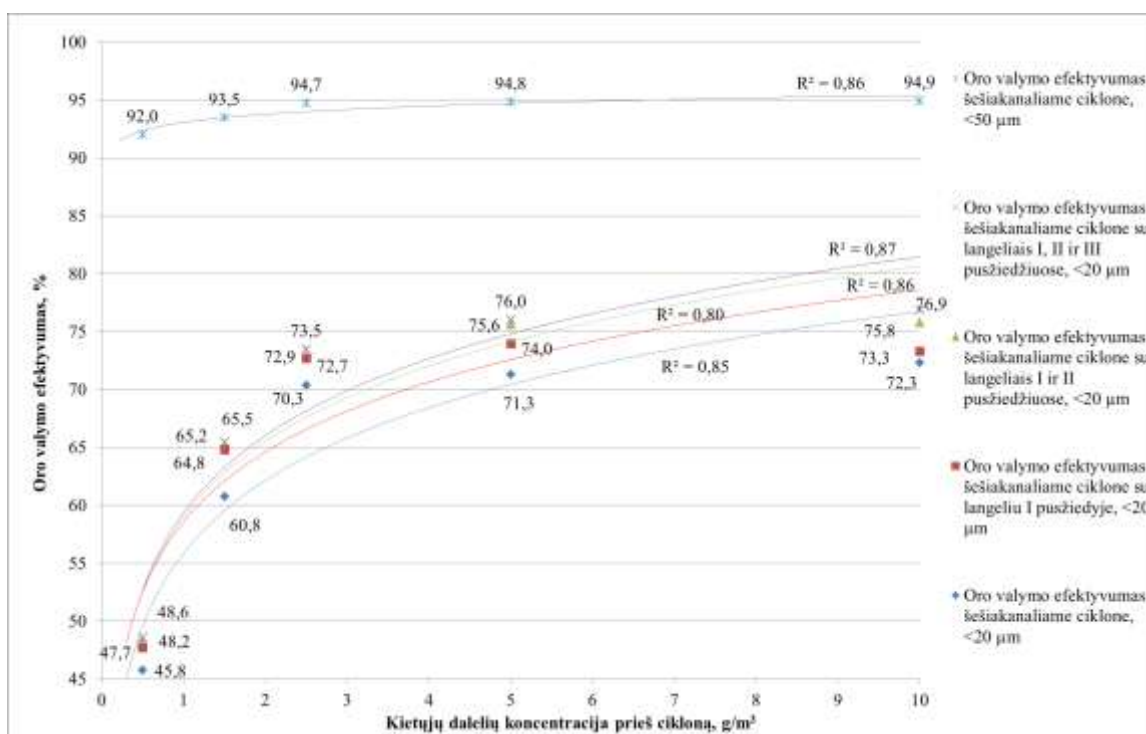
Mažiausias išvalymas, naudojant patobulintos geometrijos pusšiedžius, buvo gautas esant 500 mg/m³ įleidžiamai koncentracijai, įstačius tik pirmąjį (išorinį) pusšiedį su langeliu, jis yra lygus 48,9 %.

Tyrėjai Mothes ir kiti (1988), atlikę eksperimentinius tyrimus su įprastos konstrukcijos ciklonais apie dalelių koncentracijos įtaką dujų srautui ir dalelių atskyrimui, nustatė, jog esant didelei dalelių koncentracijai sumažėja išcentrinė jėga ciklono viduje (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2011).

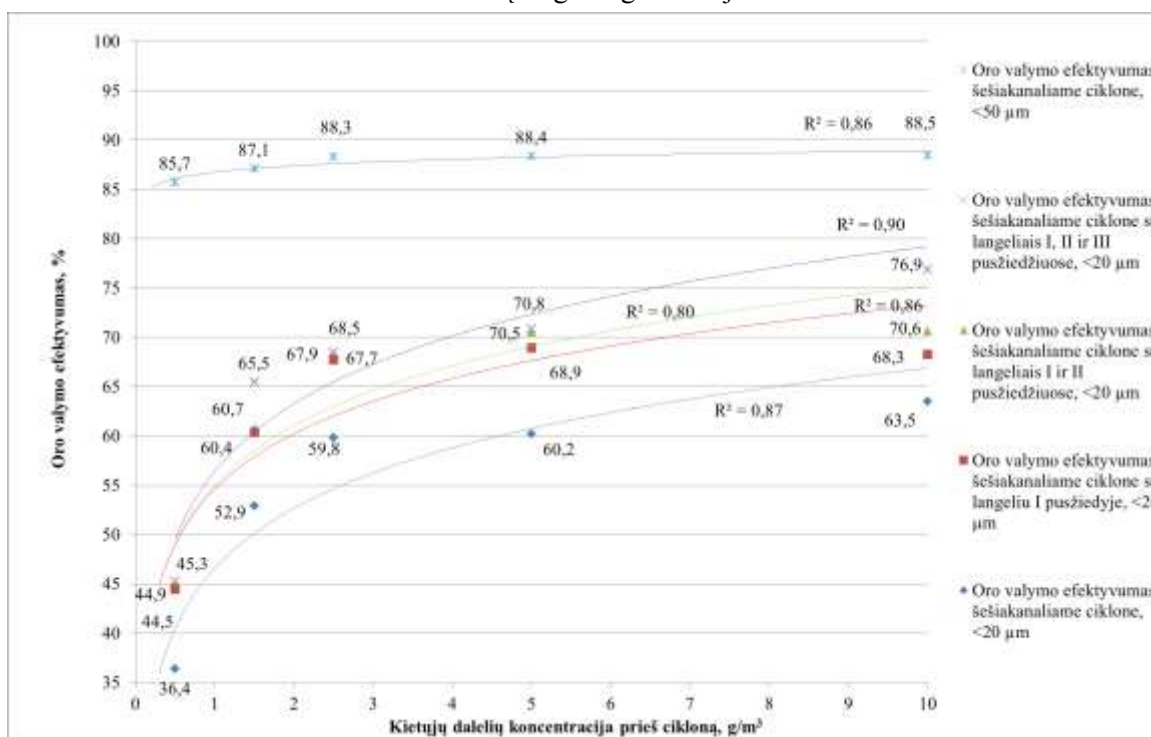
Mothes ir jo kolegų (1988) atlikti efektyvumo tyrimai parodė, kad ciklono darbas esant didelei koncentracijai pagerėjo dėl dalelių aglomeracijos (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2011).

Lyginant techninės druskos gautus eksperimentinių tyrimų duomenis, didžiausias išvalymo efektyvumas pasiektas kietosioms dalelėms iki 50 μm dydžio, esant taipogi didžiausiai įleidžiamai

koncentracijai (10 g/m^3), yra mažesnis už stiklo dalelių sugavimo efektyvumą ir lygus 94,9 % (3.8 pav.).



3.8 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant techninės druskos kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai



3.9 pav. Šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumas, kintant molio kietųjų dalelių dydžiui bei vidinei įrenginio geometrijai

Analizuojant smulkiadispersių kietųjų dalelių iki $20 \mu\text{m}$ dydžio sugavimo laipsnį, pastebima, kad techninės druskos dalelės yra sugaudoamos ne taip efektyviai, lyginant su stiklo dalelėmis. Vidutiniškai valymo efektyvumas tarp šių dalelių tipų skiriasi beveik 3 %. Maksimalus oro valymas

neįstačius pusžiedžių su langeliais siekia 72,3 %, t.y. 2,5 % mažiau negu stiklo dalelių. Oro valymo efektyvumo priklausomybių nuo koncentracijos tendencija išlieka ta pati, išvalymo laipsnis didėja, didėjant koncentracijai.

Panaudojant patobulintus kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais, gauti valymo efektyvumai nežymiai skiriasi tarpusavyje su nagrinėtais efektyvumais, tiriant stiklo kietąsias daleles, tačiau yra mažesni. Galima pastebėti, kad įstatyti patobulinti pusžiedžiai didina oro valymo efektyvumą, ir jų skaičiui didėjant, įstačius visus tris pusžiedžius, maksimalus išvalymo laipsnis siekia 76,9 %, tačiau efektyvumas yra mažesnis 1,5 %, negu jau nagrinėtu stiklo kietųjų dalelių atveju.

Pasirinktos trečiosios – molio kietosios dalelės dažnai pasitaiko tarp naudojamų žaliavų pramoninėje gamyboje. Gamybos linijose, naudojančiuose šios prigimtios daleles, yra apsunkinamas įrangos bei ortakių sistemos palaikymas tinkamose techninėse būklėse dėl padidinto dalelių lipnumo, galimo prilipimo prie sienelių. Kita vertus, koaguliacijos procesai vyksta dar sparčiau, o tai didina išvalymo efektyvumą.

Įleidžiant į eksperimentinio įrenginio sistemą molio kietąsias daleles, nepanaudojant patobulintų kreivalinijinių pusžiedžių, gautas bendras valymo efektyvumas iki 50 μm dalelėms siekia 88,5 %. Efektyvumas, palyginti su stiklo ir techninės druskos kietosiomis dalelėmis, sumažėjo atitinkamai 9,9 % ir 7,1 %. Buvo nustatomas bendras valymo efektyvumas smulkiadispersėms dalelėms, kurių skersmuo yra iki 20 μm . Maksimali efektyvumo vertė buvo gauta, įstačius I, II ir III patobulintus, su išpjautu langeliu, kreivalinijinius pusžiedžius, esant didžiausiai pasirinktai įleidžiamai koncentracijai 10 g/m^3 , ir siekė 76,9 %. Mažinant įleidžiamos koncentracijos vertę, efektyvumas gana staigiai mažėja, ir esant 500 mg/m^3 koncentracijai siekia 45,3 %. Tuo pačiu stiklo dalelėms šis rodiklis nustatytas 49,8 %, o techninės druskos – 48,6 %. Patobulintų pusžiedžių veiksmingumu galima įsitikinti pagal tai, jog mažinant jų skaičių, pakeičiant juos įprastais pusžiedžiais, efektyvumas mažėja. Maksimalus efektyvumas su įstatytais I ir II patobulintais pusžiedžiais siekia 70,6 %, o tik su I patobulintu pusžiedžiu – 68,3 %. Šie rodikliai buvo pasiekti esant didžiausiai iš pasirinktų įleidžiamų koncentracijų – 10 g/m^3 . Tiriant šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumą nuo smulkiadispersių kietųjų dalelių, iki 20 μm dydžio, įstačius tik nepatobulintus pusžiedžius, maksimalus efektyvumas molio kietosioms dalelėms siekia 63,5 %, o mažiausiais sugavimas iš visų tirtų yra gautas, esant 500 mg/m^3 įleidžiamai koncentracijai, kuris lygus 36,4 (3.9 pav.).

Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje daro įtaką aerodinaminėms sistemos savybėms – dinaminiams slėgiams, o tuo pačiu ir greičiams bei sistemos aerodinaminiam pasipriešinimui. Mažėjant tarpams tarp pusžiedžių ir periferinės sienelės, didėja

veikiančios dinaminės jėgos, o tai sukelia kitų parametų kitimą. Pakitę dinaminiai slėgiai daro įtaką dulkių dalelių sugavimo efektyvumui, kai dalelės yra išnešamos išsisiniu srautu pro dugne esančius segmentinius žiedinius plyšius į bunkerį. Dinaminių slėgių pasiskirstymas patvirtina literatūroje aprašomas bei bandymais įrodytas įrenginio konstrukcijos aerodinamines savybes, kurios leidžia nustatyti galimus konstrukcijos ypatumus, defektus bei tobulinti sukurtus įrenginius (Ватин и Стрелец 2003; Jakštonienė 2009).

Nagrinėjant ištirtų kietųjų dalelių sugavimo efektyvumą, galima spręsti, kad techninės druskos dulkių dalelėmis užterštas oro srautas nėra taip efektyviai valomas nagrinėtu oro valymo įrenginiu, to priežastis galėtų būti nagrinėjamųjų dalelių savybių, tokių kaip tankis, forma, aglomeracijos procesų laipsnis, savitumas.

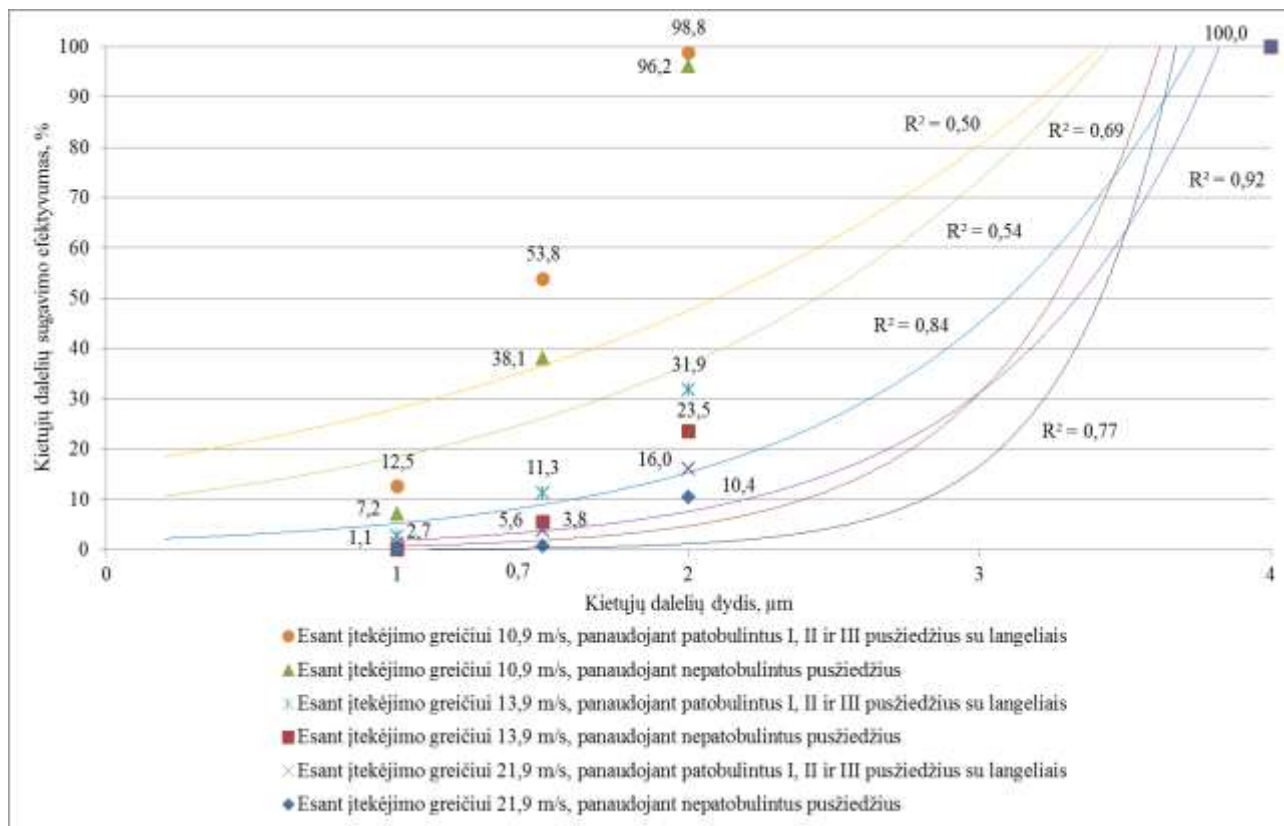
Didinant įleidžiamos dalelių koncentracijos lygį, oro valymo efektyvumas didėja, o taip atsitinka dėl didėjančių išcentrinų jėgų veikimo. Šešiakanalio ciklono konstrukcija ypatinga tuo, kad oro srautui tekant kanalais, susidaro dinaminis dujų-dulkių sluoksnis kreivalinijinių pusžiedžių tarpuose. Užterštam oro srautui, filtruojantis pro šį sluoksnį, yra sulaikoma dalis kietųjų dalelių, o tuo pačiu didinamas išvalymo efektyvumas.

Nustatymas fotoelektriniu metodu

Kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas nagrinėtas bendruoju atveju bei pagal skirtingo dispersiškumo daleles. Pasinaudojus fotoelektrinis aerolių dalelių skaitikliu A3–5, nustatytas pasirinktų skirtingos prigimties kietųjų dalelių atskirimo efektyvumas.

Efektyvumai yra nustatomi esant pasirinktai II pusžiedžių padėčiai, kuri atsižvelgiant į dinaminių slėgių, greičių bei pasipriešinimo rodiklius yra optimaliausia iš visų nagrinėtų trijų padėčių. Efektyvumo pagal dispersiškumą rodikliams nustatyti, įleidžiamos koncentracijos vertė nėra vertinama, o tik apskaičiuojama įleidžiamų mėginių įleidimo sparta, g/min. Kadangi yra nustatomos momentinės dalelių skaičiaus reikšmės, todėl dulkių dalelės yra leidžiamos ištisu srautu visą eksperimentinio tyrimo atlikimo laiką. Įvertinamos efektyvumo kitimo priklausomybės nuo įtekėjimo greičio į cikloną. Pasirinktas maksimalus įtekėjimo greitis, kuris lygus 21,9 m/s, vidutinis – 13,9 m/s ir minimalus – 10,9 m/s, suvienodinant sąlygas kitų nagrinėtų eksperimentinių tyrimų. Nagrinėjamas kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas, kurių dydis svyruoja nuo 1 iki 4 μm . Žemiau šio diapazono ribų, dalelėms mažiau už 1 μm , dalelių skaitiklis nesugeba užregistruoti tikslaus dalelių skaičiaus, paklaida viršija nustatomas vertes. Virš šio diapazono ribų, dalelėms didesnėms už 4 μm , dalelių skaitiklis svyruoja apie 0 vertės padalą, kas sako apie kietųjų dalelių nebuvimą, tas

pasikartoja iki pat skaitiklio nustatymo ribos 10 μm , todėl nuspręsta nagrinėti sugavimo efektyvumą tik minėtame intervale.

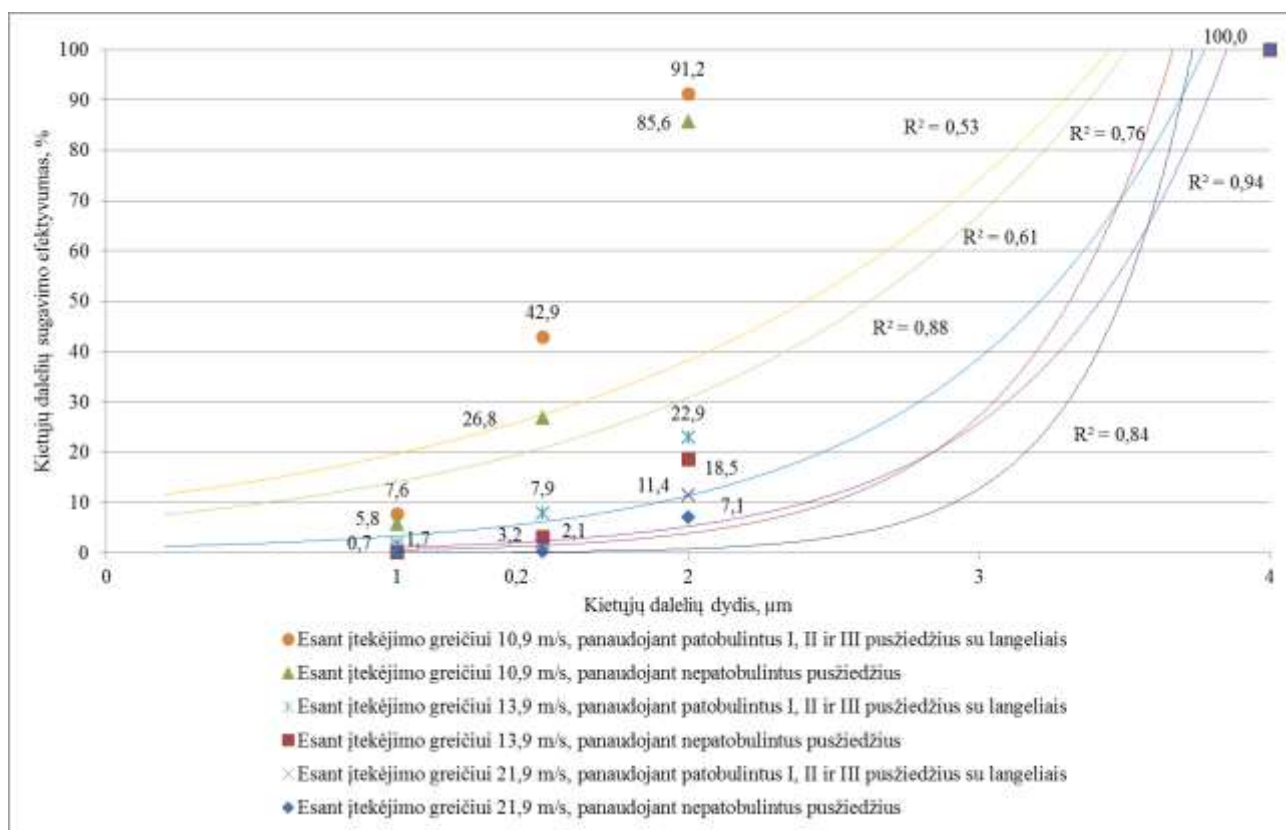


3.10 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo stiklo kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio

Stiklo kietosios dalelės, kaip ir bendrojo efektyvumo atveju, yra tinkamiausios nagrinėjamam šešiakanaliui ciklonui. Nustačius 4 μm dydžio dalelių registravimą kietųjų dalelių skaitiklyje, išeinančio oro sraute dalelių skaičius svyruoja apie skaitiklio nulinės vertės padalą, todėl galima teigti, kad šio dispersiškumo dalelių kiekis yra labai mažas, o tuo pačiu ir koncentracija yra labai maža, dalelės sugaunos labai efektyviai, efektyvumas siekia 100 %. Ši vertė yra nustatyta visais atvejais, naudojant patobulintus bei įprastus ciklono kreivalinijinius pusžiedžius. Priklausomybės parodo, kad efektyviausiai, net 98,8 % efektyvumu vyksta kietųjų dalelių sugavimas, esant įtekėjimo greičiui 10,9 m/s, panaudojant I, II ir III pusžiedžius su langeliais, nagrinėjant 2 μm dydžio dalelėms. Tuo tarpu, nagrinėjant 4 μm dalelių sugavimo efektyvumą, galima matyti, kad efektyvumas pasiekiamas visais atvejais 100 %, tačiau ši vertė greičiausiai pagal laiką, yra pasiekama, panaudojant visus tris pusžiedžius su langeliais. Efektyviausias sugavimas vyksta prie mažiausio greičio, tačiau nuo 3 μm dalelių dydžio, daug sparčiau didėja sugavimas prie

maksimalaus įtekėjimo greičio, kuris lygus 21,9 m/s, ir net pralenkia efektyvumo rodiklius, esant vidutiniam 13,9 m/s greičiui (3.10 pav.).

Analizuojant smulkiaisiais 1 µm ir 1,5 µm dalelių sugavimą, galima priėti prie išvadų, kad visi atvejai artėja link vienodų reikšmių, tačiau efektyviausiai yra sugaudoamos dalelės, esant mažiausiam greičiui. 1,5 µm dalelių sugavimas, esant 10,9 m/s greičiui, panaudojant patobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, siekia 53,8 %, o 1 µm dalelėms – 12,5 %.

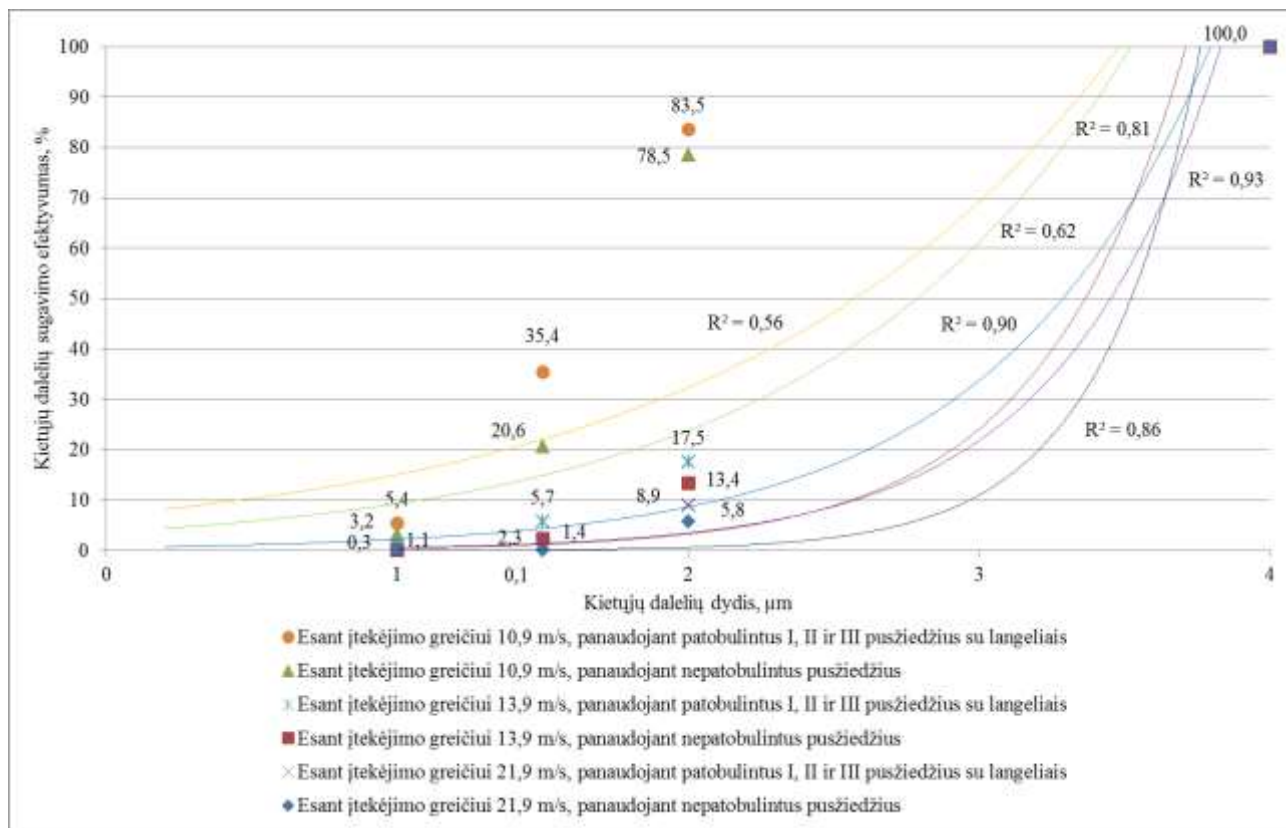


3.11 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo techninės druskos kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio

Techninės druskos kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas yra vertinamas identišškai su visomis kitomis dalelėmis. Esant 4 µm dalelėms efektyvumas pasiekiamas 100 % visais nagrinėjamais atvejais. Kaip ir stiklo dalelių, efektyviausiai šešiakanalis ciklonas veikia, esant įtekėjimo greičiui 10,9 m/s, panaudojant I, II ir III pusžiedžius su langeliais, nagrinėjant 2 µm dydžio daleles, pasiekiamas 91,2 % sugavimas. Esant 4 µm dalelėms, sugavimo efektyvumas, pasiekiamas visais atvejais 100 %, tačiau šį vertę greičiausiai yra pasiekama, vėl gi atvejų, su minimaliuoju greičių ir patobulintais pusžiedžiais. Kitaip, negu nagrinėjant stiklo daleles, analizuojant techninės druskos daleles, esant 3 µm dalelių dydžiui, susilygina efektyvumas esant didžiausiam greičiui, panaudojant patobulintus pusžiedžius, bei vidutiniams greičiui, įstačius

įprastus pusžiedžius. O pasiekus 4 μm dalelių dydį, sugavimo efektyvumas, esant maksimaliam greičiui, kuris lygus 21,9 m/s yra gautas didesnis, negu esant vidutiniam – 13,9 m/s (3.11 pav.).

Pačioms smulkiausioms 1 μm ir 1,5 μm dalelėms sugavimo efektyvumo vertės beveik susilygina, net ir keičiantis įtekėjimo greičiams bei pusžiedžių geometrijai



3.12 pav. Įrenginio oro valymo efektyvumas nuo molio kietųjų dalelių, priklausomai nuo dalelių dispersiškumo bei skirtingo paduodamo oro srauto greičio

Molio kietosios dalelės yra gana smulkios pagal savo prigimtį, todėl ir sugavimo efektyvumas yra ne toks aukštas, kaip ir gauto bendrojo efektyvumo vertės. Tačiau išlieka virš 4 μm dydžio dalelių registravimo tendencija, kai efektyvumas siekia 100 % ir dalelės nėra aptinkamos išeinančio oro sraute. Aukščiausia oro valymo efektyvumo vertė siekia 83,5 % efektyvumu, taipogi esant įtekėjimo greičiui 10,9 m/s, panaudojant I, II ir III pusžiedžius su langeliais, nagrinėjant 2 μm dydžio dalelėms. Naudojant kreivalinijinius pusžiedžius be langelių, maksimalus efektyvumas, esant 2 μm dalelėms, buvo pasiektas lygus 78,5 %. Maksimalaus nagrinėto 4 μm dydžio kietųjų dalelių efektyvumas išlieka pastovus, ir lygus 100 %. Efektyviausias sugavimas vyksta esant mažiausiam greičiui, kuris lygus 10,9 m/s, o esant apie 3,5 μm dalelių dydžiui sugavimo efektyvumas esant vidutiniam ir didžiausiam greičiams beveik susilygina. Kaip galima matyti iš 3.12 pav., artėjant link 4 μm dydžio dalelių reikšmės, esant maksimaliam įtekėjimo greičiui – 21,9

m/s, kai yra naudojami abiejų tipų kreivalinijiniai pusžiedžiai, yra gautas didesnis sugavimo efektyvumas, nei atliekant bandymus esant vidutiniam įtekėjimo greičiui (3.12 pav.).

1 μm ir 1,5 μm dydžio dalelių sugavimas, išlieka panašus į techninės druskos dalelių atvejį, efektyviausiai yra sugaunamos dalelės, esant mažiausiam greičiui. 1,5 μm dalelių sugavimas, esant 10,9 m/s greičiui, panaudojant patobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, siekia 35,4 %, o 1 μm dalelėms – 5,4 %.

Ciklono oro valymo įrenginys taikomas užteršto kietosiomis dalelėmis oro srauto valymui, todėl teršalų dalelių sugavimo laipsnis yra neabejotinai pagrindinis ir svarbiausias iš visų nagrinėjamų veikimo rodiklių. Atlikus eksperimentinius ciklono efektyvumo tyrimus, išanalizavus gautus rezultatus, galima teigti, kad patobulintas šešiakanalis ciklonas yra tinkamas naudoti efektyviam užteršto kietosiomis dalelėmis oro (dujų) srautui. Aukštas valymo efektyvumas užtikrina tinkamas higienines sąlygas panaudojimui gamyboje, išvengiant neleistinų taršos emisijų. Užterštas oro srautas valomas nuo smulkiadispersių kietųjų dalelių, todėl įmanoma taikyti ir precizinio oro kokybės lygio reikalaujančioms patalpoms, darbo vietoms bei gamybos linijoms, tam užtikrinant darbuotojų sveikatą, darbingumą bei atmosferos oro kokybę.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Didžiausias oro valymo efektyvumas, naudojant nepatobulintus kreivalinijinius pusžiedžius, yra pasiektas įleidžiant stiklo kietąsias daleles, esant iki 50 μm dydžio, kuris lygus 97,3 %. Smulkiadispersių kietųjų dalelių iki 20 μm dydžio sugavimo laipsnis siekia 74,1 %. Efektyviausias valymo įrenginio darbas nustatytas esant 10 g/m³ koncentracijai bei maksimaliam oro srauto įtekėjimo greičiui, kuris lygus 21,9 m/s.

2. Didžiausias eksperimentinių tyrimų metu nustatytas oro valymo efektyvumas, valant smulkiadisperses stiklo kietąsias daleles iki 20 μm dydžio, siekia 78,4 %, yra gautas įstačius patobulintus pirmuosius tris išorinius kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais, esant 10 g/m³ koncentracijai ir 21,9 m/s įtekėjimo greičiui. Efektyvumo padidėjimui daro įtaką konstrukcinis sprendimas – išpjautas langelis, kuris suteikia papildomo filtracijos laiko pailginimą.

3. Maksimalus kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas, atsižvelgiant į dulkių dalelių dispersiškumą yra gautas, įleidžiant stiklo kietąsias daleles, kurių dydis yra 2 μm dydžio, esant minimaliam 10,9 m/s įtekėjimo greičiui ir yra lygus 98,8 %.

4. Eksperimentiniuose tyrimuose nagrinėjamų stiklo, techninės druskos ir molio 4 μm dydžio kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas siekia 100 %. Esant parinktiems aerodinaminiais parametrams, fotoelektriniu aerosolių dalelių skaitikliu nėra aptikta teršalų dalelių išeinančio oro sraute.

4. Dvifazio oro srauto šešiakanaliame ciklone skaitinis modeliavimas

Ivadas

Vienas iš pagrindinių skaičiuojamosios fluidų dinamikos, toliau – SFD, programinių paketų, skirtų srauto uždaviniams modeliuoti yra Phoenix CFD. Jis naudojamas nuo 1981 m. ir yra sukurtas CHAM Ltd. of Wimbledon. Tai yra SFD programinės įrangos paketas, kuris taiko baigtinių tūrių metodą pernašos procesų lygtims spręsti naudojant sureguliuotą (staggered) tinklą, kurio topologija reguliari. Kadangi jis buvo vienas iš pirmųjų naudojamų paketų, jis gali būti naudojamas labai plačiai fizikinių uždavinių įvairovei modeliuoti.

Šio darbo modeliavimo uždaviniams išspręsti yra pasinaudojama Phoenix programinių paketu, sudarant matematinį modelį, remiantis baigtinių tūrių metodu. Sudarius nagrinėjamo ciklono geometriją, įvedus atitinkamus parametrus, norima gauti dvifazio oro srauto parametrų kitimą įrenginio konstrukcijoje bei palyginti juos su fizikinio modelio eksperimentinių tyrimų rezultatais.

Dujų ir įvairaus dydžio kietųjų dalelių srautams modeliuoti naudojamos skirtingos modeliavimo programos.

Reinoldso įtempių turbulentinis (RIT) modelis pateikia tikslią sūkurinio srauto savybių, ašinio greičio, tangentinio greičio ir slėgio kritimo ciklono modelyje prognozę (Sommerfeld 2003; Gujun et al. 2008).

Derksen savo straipsnyje (2003) pristato Eulerio ir Lagranžo dvifazio srauto (dujų ir kietųjų dalelių) apibūdinimą. Eulerio dujų srauto apibūdinimu paremtas Lagranžo ir Eulerio srauto (LES) metodas. Kietųjų dalelių judėjimas imituotu dujų srauto lauku buvo modeliuojamas remiantis vienpusio poveikio prielaida – dujų srautas veikia daleles, tačiau dalelės dujų srautui poveikio neturi (Gujun et al. 2008).

Derksen ir kt. (2006) vykdė trijų dimensijų (3D) nuo laiko priklausomą turbulentinio dujų srauto cikloniniame separatoriuje Eulerio ir Lagranžo modeliavimą, pagrįstą dvipusiu poveikiu. Dalelių poveikis dujoms modeliuojamas dalelių šaltinio kameroje metodu (Gujun et al. 2008).

Wang ir kt. (2006) dujų srautui Laple ciklone modeliuoti taikė Reinoldso įtempių modelį. Dalelių srautas modeliuojamas taikant tikimybinį Lagranžo modelį. Modeliuojant gautas atskyrimo efektyvumas ir dalelių trajektorijos palygintos su eksperimentiniais duomenimis. Nustatytas dalelių dydžio ir dujų greičio poveikis atskyrimo efektyvumui atitinka eksperimentų rezultatus (Gujun et al. 2008).

Zhao ir kt. (2006) naudojo RIT modelį dujų srautui modeliuoti dviejų tipų ciklonuose: su standartiniu viengubu įleidimu ir spiraliniu dvigubu įleidimu. Dalelių judėjimui sekti ir dujų dalelių atskyrimo efektyvumui ciklonuose skaičiuoti taikomas Lagranžo metodas. Rezultatai rodo, kad SFD

metodas gali veiksmingai atskleisti kietųjų dalelių ir dujų srauto atskyrimo ciklonuose su įvairios formos įleidimu mechanizmą (Gujun et al. 2008).

Parametrų kitimas matematiniam modelyje, apskaičiuojamas programa, esant vienodoms sąlygoms su fizikinio modeliu: nagrinėjamos trijų skirtingų prigimčių kietosios dalelės – stiklo, techninės druskos bei molio; įvertinami penki įtekėjimo į cikloną greičiai, kurie yra 21,9 m/s, 16,2 m/s, 13,9 m/s, 12,4 m/s, 10,9 m/s; panaudojant skirtingo dispersiškumo daleles – iki 50 μm ir iki 20 μm .

Pagal sudaryto modelio greičio, slėgio bei dalelių tūrinės dalies šešiakanalio ciklono renginyje parametrų kitimą galima nustatyti charakteringas vietas, kurios įtakoja efektyviam valymo įrenginio veikimui. Įmanoma nustatyti galimas eksperimentinių tyrimų paklaidas, lyginant jas su teoriniu matematiniu modeliu.

Šio darbo tikslas – išanalizuoti skaitinio modeliavimo turbulencijos modelius, taikomus dujų ir kietųjų dalelių srauto judėjimui ciklone aprašyti ir atlikti oro srauto skaitinį modeliavimą ciklone naudojant trimates Navjė ir Stokso lygtis.

4.1. Dvifazio srauto skaitinio modeliavimo metodika

Oro srauto, užteršto kietosiomis dalelėmis, matematinio modelio sudarymas, suteikia galimybę be papildomų fizikinių eksperimentinių tyrimų nustatyti rezultatus, kintant nagrinėjamo šešiakanalio ciklono sistemos veikimo parametrus, įrenginio konstrukcijos matmenų bei geometrijos dydžiams, nagrinėjant skirtingos prigimtės kietųjų dalelių trajektoriją, atskyrimo efektyvumą, priklausomai nuo dalelių fizinių savybių.

SFD metodika – padalinti nagrinėjamą sritį į daug kontrolinių tūrių ir pakeisti dalines diferencialines lygtis jų algebriniais ekvivalentais (Baltrėnas et al. 2008; Vaitiekūnas et al. 2004). 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).

Hoekstra ir kt. (1999) teigia, kad (SFD, angl. Computational Fluid Dynamics) programinės įrangos naudojimas skaitiniams dujų srauto lauko skaičiavimams yra bendresnis modeliavimo būdas, geriau aprašantis ciklono veikimą.

Tobulėjant kompiuteriams ir SFD metodams, taikant skaitinius sprendimus galima apskaičiuoti sudėtingus srauto laukus (Baltrėnas et al. 1997).

Atliekant skaitinį modeliavimą, įvertinant oro srauto turbulentiškumą, programos pakete naudojamos trimatės Reinoldso lygtys su standartiniu $k-\varepsilon$, LES ir RIT modeliais, taikant baigtinių tūrių metodą. Skaitiškai sprendžiamos pernešimo procesų elipsinės trimatės lygtys turi tokią formą (Vaitiekūnas *et al.* 2004):

$$\underbrace{\text{div}(r_i \rho_i \vec{v}_i \Phi_i)}_{\text{Konvekcija}} - \underbrace{r_i \Gamma_{\Phi_i} \mathbf{grad} \Phi_i}_{\text{Difuzija}} = \underbrace{r_i S_{\Phi_i}}_{\text{Šaltinis}}, \quad (4.1)$$

čia: r_i – i fazės tūrinė dalis, m^3 ;

ρ_i – i fazės tankis, kg/m^3 ;

Φ_i – i fazės priklausomas kintamasis ($\Phi = 1$ – tolydumo lygtis);

u, v, w – impulso komponentės x, y ir z koordinačių kryptimis, m/s ;

H – entalpija;

$\vec{v}_i$ – i fazės greičio vektorius;

Γ_{Φ} – kintamojo Φ difuzijos koeficientas;

S_{Φ} – Φ kintamojo srauto narys.

(4.1) lygčių sistemą sudaro Navjė ir Stokso bei energijos pirmajai ir antrajai fazėms, sprendžiamos baigtinių tūrių metodu, lygtys.

Skaičiuojant tokiais turbulentiškumo modeliais, kaip $k-\varepsilon$, LES ir RIT, kiekviename jų sprendžiamos kelių lygčių sistemos, kurių skaičius skirtinguose modeliuose priklauso nuo kintamojo Φ taip: LES modelyje Φ įgyja 1, u, v, w, k reikšmes; $k-\varepsilon$ modelyje – 1, u, v, w, k, ε ; RIT – 1, $u, v, w, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{u'v'w'}$.

$k-\varepsilon$ turbulentiškumo modelis remiasi izotropinio sūkurių klampio koncepcija Reinoldso įtempių išraiškoms. Esant sudėtingiems srautams su svorio jėgomis ar sudėtingais įtempių laukais, ši prielaida per daug paprasta.

RIT modelis ne tik leidžia aprašyti pernešimą ir skirtingus individualius Reinoldso įtempius, bet ir turi pranašumą – nariai, įvertinantys anizotropinius efektus, automatiškai įtraukiami į įtempių pernešimo lygtis. Šios anizotropinės turbulentumo charakteristikos esant didelėms Archimedo jėgoms vaidina svarbų vaidmenį (angl. *significant buoyancy*) srauto linijų kreivumui, srauto susukimui ar recirkuliacijai.

Visas RIT modelis turi 7 Reinoldso įtempių lygtis, 3 pernašos lygtis ir 1 tolydumo lygtį (Kavaliauskas ir Vaitiekūnas 2001).

Naudojant RIT modelį be momentų bei tolydumo lygčių, Reinoldso įtempių pernašos lygtys turi tokį pavidalą:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho U_k u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij}, \quad (4.2)$$

čia: D_{ij} – įtempių sklidimas;

P_{ij} – įtempių būvis;

Π_{ij} – slėgio įtempis;

ε_{ij} – disipacija (išsklaidymas).

Skaiciuojant Reinoldso įtempius svarbiausias yra slėgio ir įtempio Π_{ij} baigtinis modelis.

Kaip ir aerodinaminių charakteristikų bei valymo efektyvumo eksperimentiniuose tyrimuose, skaitinis modeliavimas atliekamas nagrinėjant šešiakanalio ciklono konstrukciją. Modelyje yra panaudojami tik nepatobulinti kreivalinijiniai kanalus sudarantys pusžiedžiai. Oro srauto, sukuriama ašinio ventiliatoriaus, skirtingo įtekėjimo greičio parametras modelyje įvertinamas, įvedant įtekėjimo greičius oro srauto įtekėjimo celėje, kurie yra 21,9 m/s - atitinka maksimalų srautą arba V ventiliatoriaus svirtelės padėtį, 13,9 m/s - III padėtis, 10,9 m/s - I padėtis. Kiti greičiai, atitinkantys II ir IV padėtis nėra nagrinėjami.

Dvifazio srauto greičių pasiskirstymo šešiakanaliame ciklone nustatymas

Oro srauto greičių nustatyme panaudojami įtekėjimo greičių parametrų variacijos. Pokyčiai dėl pasikeitusių greičių įtekėjime nagrinėjami penkiuose skirtinguose ciklono aukščiuose, t.y. 10 mm nuo cilindrinės dalies dugno (I pjūvis), 80 mm - II pjūvis, 150 mm (III pjūvis), atitinkantis ciklono cilindrinės dalies aukščio vidurį, 220 mm - IV pjūvis ir 300 mm (V pjūvis), į kurį patenka tik išėjimo angos skerspjūvis.

Kiekvienu atveju yra pateikiami dviejų fazių greičiai U1 (dujų (oro) srauto) ir U2 (kietųjų dalelių). Pagal esančią spektro liniuotę įmanoma nustatyti vyraujančius greičius tam tikrame ciklono kanale bei cilindrinės dalies aukštyje.

Oro srauto greičių modeliavimas atliekamas esant anksčiau minėtiems įtekėjimo greičiams, esant skirtingos prigimties dalelėms (stiklo, techninės druskos ir molio) bei jų dispersiškumui (iki 50 μm ir iki 20 μm dydžiams). Dėl labai nedidelio Dvifazio srauto greičio skirtumo, esant skirtingoms kietųjų dalelių koncentracijoms, apsiribota antrosios fazės greičio (U2) modeliavimu esant tik vidutinei 5 g/m³ koncentracijai.

Dvifazio srauto slėgio pasiskirstymo šešiakanaliame ciklone nustatymas

Antrojo aerodinaminio parametro nustatymui yra panaudojama tokia pat metodika, kaip ir srauto greičių nustatyme, tačiau šiuo atveju yra apsiribojama tik vienos fazės - dujų (oro) slėgių ciklone. Taipogi pasiskirstymas yra nagrinėjamas penkiuose pjūviuose, esant trims skirtingiems įtekėjimo greičiams. Kaip ir srauto greičio modeliavime, slėgio pokyčiai nagrinėjami tik esant vienintelei vidutinei 5 g/m^3 kietųjų dalelių koncentracijai dėl ypač mažos antrosios fazės koncentracijos įtakos dujų (oro) slėgio pasiskirstymui ciklone. Atliekant matematinio modelio sudarymą, buvo pastebėta, kad slėgių pasiskirstymas išlieka vienodas, nagrinėjant skirtingo antrosios fazės dalelių dispersiškumo atvejus, t.y. panaudojant iki $50 \text{ }\mu\text{m}$ ir iki $20 \text{ }\mu\text{m}$ kietąsias daleles. Todėl apsiribota dinaminių slėgių pasiskirstymo nustatymu modelyje, esant tik iki $50 \text{ }\mu\text{m}$ dalelėms, tačiau išlieka įtekėjimo greičių priklausomybė, kuri yra vertinama sudarant matematinį modelį.

Dvifazio srauto atskirimo efektyvumo šešiakanaliame ciklone nustatymas

Šešiakanalio ciklono efektyvumo nustatymui, modelyje yra įvertinamas oro srauto bei kietųjų dalelių tarpusavio santykis - dalelių turinė dalis bei jos pokytis. Taip yra sudaromas skirtingo užterštumo srautas, jo judėjimas ciklono konstrukcijos pjūviuose bei santykinė dalis, atitinkamuose įrenginio taškuose, kuri atitinka nagrinėjamų kietųjų dalelių koncentraciją. Nagrinėjami atvejai, kai oro/kietųjų dalelių santykis yra $1:0.0005$, $1:0.005$, $1:0.01$, tai atitinka $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 kietųjų dalelių koncentracijas. Atlikus modeliavimo uždavinį, esant skirtingiems parametrų variantams, dvimatėje erdvėje pateikiamos antrosios fazės tūrinių dalių vidutinės vertės, kurios nustatytos ciklono cilindrinės dalies aukščio viduryje.

Oro valymo efektyvumo eksperimentinių tyrimų skyriuje buvo nagrinėtos kietosios dalelės, kurių dispersiškumas siekė iki $50 \text{ }\mu\text{m}$ ir iki $20 \text{ }\mu\text{m}$ dydžius. Šių smulkiadispersių kietųjų dalelių dydžiai yra nagrinėjami ir šiame modelyje, norint palyginti eksperimentinių tyrimų bei matematinio modelio gautus rezultatus bei galimas paklaidas. Programiniame pakete yra galimybė įvesti nagrinėjamos antros fazės – kietųjų dalelių parametrus, tarp kurių svarbiausias yra tankis. Todėl tiriant stiklo, techninės druskos ir molio kietąsias daleles, yra įvedami atitinkami dalelių tankiai, kurie lygus 2670 kg/m^3 , 2210 kg/m^3 ir 1630 kg/m^3 atitinkamai.

Sudarytu modeliu yra nustatomas bendras minimalus oro valymo efektyvumas, atsižvelgiant į dviejų fazių santykius, esant vienodiems aerodinaminiams parametrus. Tuo pačiu įmanoma nustatyti, kuriuose taškuose oro/kietųjų dalelių santykis yra didžiausias, t.y. kietųjų dalelių

koncentracija yra mažesnė, arba atvirkščiai. Matematinio modelio atskirimo efektyvumai, nustatyti esant visiems trimis skirtingiems įtekėjimo greičiams, kurie yra 10,9 m/s, 13,9 m/s ir 21,9 m/s. Rezultatų palyginimui pasirinktas tik vienas maksimalus greitis, kuris yra 21,9 m/s, kuriam esant valymo efektyvumas yra palyginamas su fizikiniu modeliu gautomis vertėmis.

Oro valymo efektyvumas modelyje apskaičiuojamas kaip įprastas valymo efektyvumo rodiklis, tačiau koncentracijos po valymo reikšmė yra pakeičiama didžiausia antrosios fazės (R2) vertė, nustatyta atlikus modelio skaičiavimą, kuri prilyginama maksimaliai galimai kietųjų dalelių koncentracijai ciklono išeinančiame sraute:

$$\eta = \frac{V_{dal,1} - V_{dal,1} \cdot V_{dal,2}}{V_{dal,1}} \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

čia: η – ciklono valymo efektyvumas, %;

$V_{dal,1}$ – dalelių tūrinė dalis prieš valymą, kietųjų dalelių koncentracija prieš valymo įrenginį;

$V_{dal,2}$ – maksimali nustatyta dalelių tūrinė dalis ciklone, minimali kietųjų dalelių koncentracija po valymo įrenginio.

Tokiu būdu yra užtikrinama, kad valymo efektyvumas bus ne mažesnis nei apskaičiuota reikšmė, įvertinus minėtą koncentraciją.

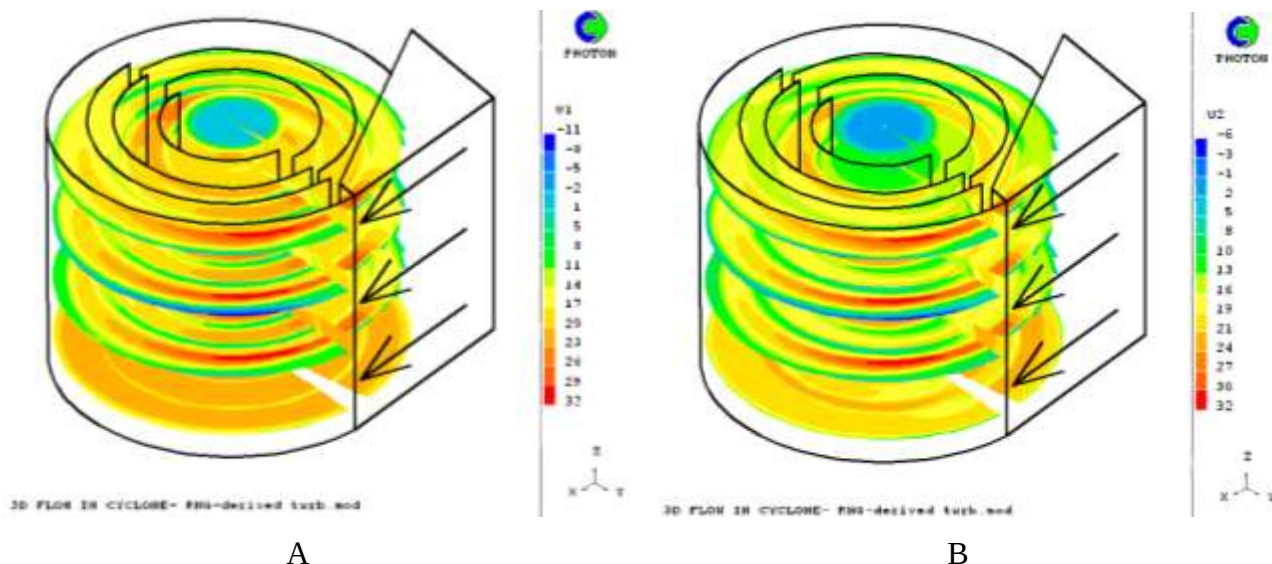
Keičiant anksčiau minėtus parametrus yra pateikiami gauto matematinio modelio rezultatai trimatėje bei dvimatėje erdvėje, skirtinguose pjūviuose. Nagrinėjami pjūviai, esantis tik ciklono korpuso dalyje, atmetant fluideo tekėjimą bunkeryje bei ties oro srauto išėjimo anga. Atliekant matematinio modeliavimo rezultatų analizę pastebėta, kad greičio bei slėgio pasiskirstymui nedaro įtakos pasirinktų tyrimams kietųjų dalelių dispersiškumas. Todėl apsiribota rezultatų pateikimu tik tais atvejais, kai pastebima įtaka, nuo skirtingų parametrų pokyčio. Gauti matematinio modelio oro srauto pirmosios fazės greičio bei atskirimo efektyvumo rezultatai yra palyginami su fizikinio modelio eksperimentiniais tyrimais, stebima, ar duomenis yra patikimi abiem atvejais ir nesiskiria daugiau kaip 20 %.

4.2 Dvifazio srauto skaitinio modeliavimo duomenų analizė

Sudaryto matematinio modelio pagalba darbe buvo siekiama nustatyti oro srauto judėjimų parametrų kitimą įvairiuose šešiakanalio ciklono modelio pjūviuose, kintant veikimo parametrų vertėms bei dvifazio srauto kiekvienos fazės trajektorijų kitimą, dalelių atskirimo efektyvumą.

Modeliavimo uždavinys spręstas kintant: oro srauto įtekėjimo greičiui pro tangentinį įėjimą; kietųjų dalelių, naudojamų oro valymo efektyvumo nustatymui, tankiui bei dispersiškumui; pasirenkant oro ir jame esančių kietųjų dalelių tūrinių dalių tarpusavio santykį dvifaziame fluide.

Nagrinėjant dvifazį oro srautą, panaudojant pirmąsias – stiklo kietąsias daleles, kai įtekėjimo greitis ties įėjimo anga siekia 21,9 m/s, abiejų fazių greičio kitimas įrenginio pjūviuose pavaizduotas 4.1 pav.



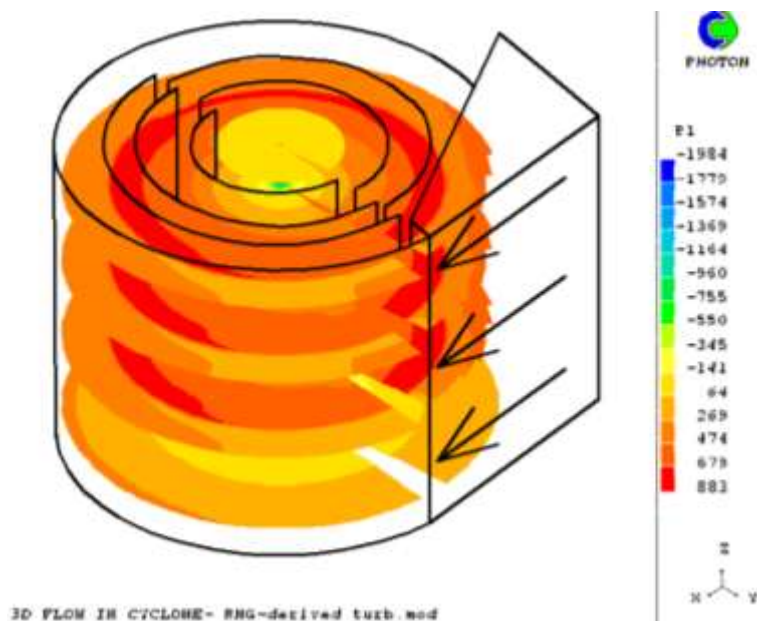
4.1 pav. Dvifazio srauto greičio komponentių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 μm stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Nagrinėjami dviejų fazių greičiai U_1 (pirmosios) (A) - oro fazės ir U_2 (antrosios) (B) - kietųjų dalelių fazės, sutampantys su cilindrinės koordinatės ašies kryptimi X, kuri atitinka išilginį srauto judėjimą. Oro srauto fazės (4.1 pav. A) maksimali greičio vertė siekia 32 m/s, kuri išryškėja pirmojo kanalo viduryje bei penktajame kanale, artėjant link įrenginio ašies. Didžiausi greičiai yra pasiekiami 80 mm aukštyje nuo cilindrinės dalies dugno, t.y. II pjūvyje bei III pjūvyje, kuris išsidėstęs ciklono cilindrinės dalies aukščio viduryje. Minimalūs greičiai pasiskirsto III pjūvyje ties periferine sienele bei V pjūvyje oro išėjimo angoje, yra lygios -11 m/s, t.y. priešingos dvifazio srauto judėjimo krypties, kas atsitinka dėl srauto turbulizacijos didėjimo. Kietųjų dalelių fazės (4.1 pav. B) greičiai yra mažesni, ypač tai pastebima I ir IV pjūviuose. Ties cilindrinės dalies dugnu dalelių greitis siekia 16-19 m/s, t.y. beveik 25 % mažiau už dujų fazės greitį. IV pjūvyje galima stebėti, kad dalelių kaupimasis įrenginio ašyje, veikiant sukurtiniam jėgom, sumažina fazės greitį, ir maksimalus siekia tik 13 m/s.

Tyrimuose, nagrinėjant fizikinį modelį, gautas maksimalus greitis siekė 19,1 m/s, išmatuotas šeštame kanale įrenginio ašyje, teorinio modelio atveju ši vertė yra lygi 23 m/s. Paklaida tarp

modelių duomenų nesiekia 17 %, kas leidžia sakyti, kad gauti rezultatai tyrimų ir modeliavimo būdais yra patikimi.

Slėgių pasiskirstymas, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui į cikloną, pavaizduotas 4.2 pav. Nagrinėjant slėgio pasiskirstymą ciklone, parametro kitimas vaizduojamas įrenginio vidinės cilindrinės dalies pjūviuose. Galima matyti, kad didžiausia nustatyta vertė yra lygi 883 Pa, kuri stebima tik II ir III kanaluose ciklono II - IV pjūviuose. Mažesni už atmosferinį slėgiai fiksuojami tik įrenginio ašyje, kur maksimaliai yra pasiekiamas 1983 Pa vakuuminis slėgis. Vidutinis slėgis, vyraujantis visame ciklono tūryje kinta 64 Pa - 269 Pa ribose.

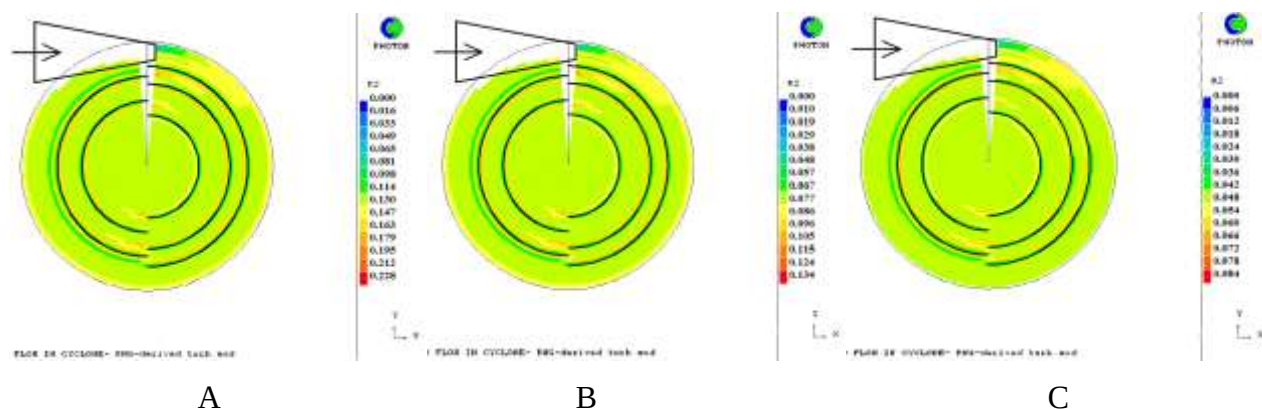


4.2 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Slėgis ciklono ašyje yra beveik 50 % mažesnis už slėgį prie periferinės sienelės, kurie lygus 269 Pa ir 474 Pa atitinkamai. Neigiamas slėgis mažesnis už atmosferinį yra nustatytas I ir V pjūviuose, to priežastimi galėtų būti didelio turbulentiškumo srautai. Šiuose pjūviuose užfiksuotas didžiausias neigiamas -141 Pa slėgis. Slėgiai siekiantis beveik 2000 Pa vakuuminį slėgį, pasireiškia tik įrenginio ašyje ir pasiskirsto per visą nagrinėjamo ciklono aukštį. Apžvelgus duomenų atitikimą, gautų teorinių ir praktinių eksperimentinių tyrimų metu, tikslinga vertinti slėgius, nustatytus tik ciklono kanalų viduryje, kur ir buvo matuota, atliekant eksperimentinius bandymus. Slėgiai ciklono kanaluose matematiname modelyje kinta 64 Pa - 474 Pa intervale, o pasienio sluoksniuose pakyla iki 679 Pa. Tuo tarpu atliekant tyrimus su fizikiniu modeliu dinaminiai slėgiai kito nuo 12,4 Pa iki 180,3 Pa. Tokiam pasiskirstymui galėjo turėti įtakos, praktinių tyrimų metu, dinaminio Pito-Prandtlis vamzdelio įstatymo padėtis srovės ir ciklono konstrukcijos atžvilgiu, netolygaus

turbulentinio srauto judėjimas, galima metodikos ir matavimo prietaisų paklaidos, todėl slėgio pasiskirstymo tarp fizikinio ir matematinio modelių rezultatai nėra vertinami.

Nustatant ciklono įrenginio valymo efektyvumą nuo stiklo kietųjų dalelių, kurių dydis siekia iki 50 μm buvo remiamasi kietųjų dalelių bei oro tūrinių dalių santykiu įrenginyje. Antrosios fazės tūrinių dalių pasiskirstymai pateikti 4.3 pav. Maksimali kietųjų dalelių tūrinė dalis, įleidžiant 0,5 g/m^3 kietųjų dalelių koncentracija yra lygi 0,114 bei gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 77,2 %. Didinant kietųjų dalelių koncentracija kietųjų dalelių tūrinė dalis didėja, siekia 0,67 ir 0,84, esant 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijoms, apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami 86,6 % ir 91,6 % atitinkamai.



4.3 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m^3 (A), 5 g/m^3 (B) ir 10 g/m^3 (C) koncentracijų stiklo kietąsias daleles

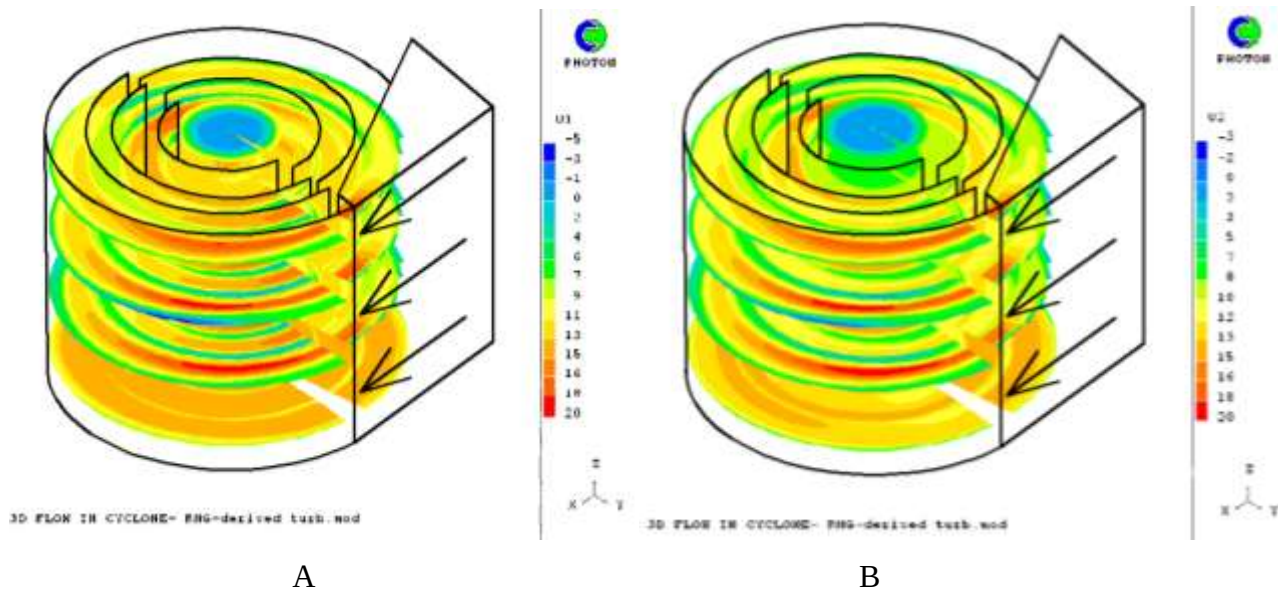
Lyginant su rezultatais, gautais eksperimentinių tyrimų metu, kai gautų efektyvumų reikšmės kinta nuo 94,3 % iki 97,3 %, maksimali paklaida nesiekia 20 %. Esant mažiausiai įleidžiamai koncentracijai - 0,5 g/m^3 , paklaidą sudaro 18,2 %, ji nėra maža, tačiau nesiekia ribinių 20 %. Mažiausia paklaida gaunama esant 10 g/m^3 koncentracijai, ir siekia tik 5,8 %, o esant 5 g/m^3 koncentracijai paklaida - 10,9 %. Todėl galima teigti, kad fizikiniu ir matematiniu modeliu pagalba gauti rezultatai yra patikimi.

Parenkant stiklo iki 50 μm daleles, esant vidutiniam iš pasirinktųjų įtekėjimo greičių, kuris lygus 13,9 m/s, greičių pokyčiai ciklono kanaluose pavaizduoti 4.4 pav..

Sumažinus įtekėjimo greičio parametą daugiau kaip 1,5 karto nuo maksimalios įtekėjimo greičio, maksimali vertė gauta modelyje siekia 20 m/s, tenkanti kaip U1 - pirmosios fazės greičiui, taip ir antrosios fazės greičiui U2. Išryškėja greičio sumažėjimas judant vidiniuose kanaluose pirmajai fazei (nuo 3 iki 6 kanalo), kas pastebima II ir III pjūvyje (4.4 pav. A).

Pasiskirstymo tendencija išlieka tokia pati, minimalūs greičiai pasiskirsto išorinės periferinės sienelės bei kreivalinijinių pusžiedžių pasienių sluoksniuose, minimali vertė yra 0 m/s, tai yra fluidas yra nejudantis. Pirmosios fazės ašinis greitis V pjūvyje pasiekia mažiausia modelyje

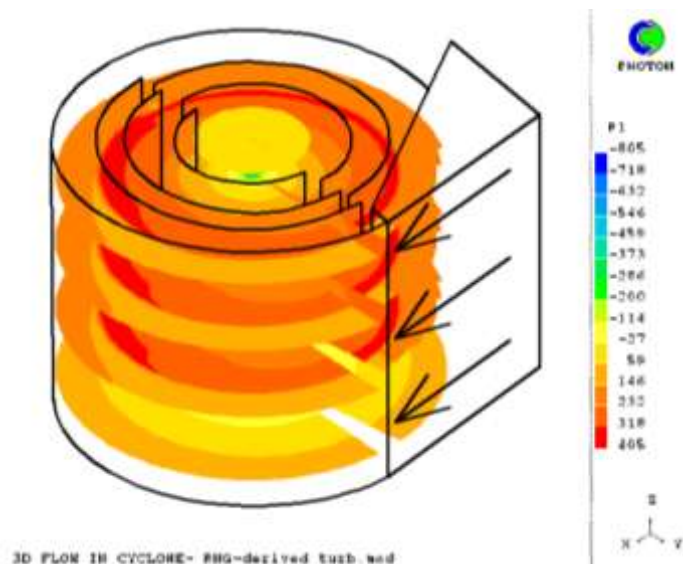
užfiksuotą greičio vertę, kuri siekia 5 m/s. Abiejų fazių didžiausi greičiai U1 ir U2 pasiskirstę pirmojo kanalo viduryje, kur yra lygus 20 m/s. Taip pat dideli pirmosios fazės greičiai stebimi įtekėjime į III kanalą, bei abiejų fazių atveju VI kanale ties pusžiedžio pabaiga, artėjant link įrenginio ašies. Antrosios fazės greičio sumažėjimą, kaip ir 21,9 m/s įtekėjimo greičio atvejų, galima stebėti IV pjūvyje, čia greičiai svyruoja tarp 5-8 m/s.



4.4 pav. Dvifazio srauto greičio komponentių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 μm stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Praktiniuose tyrimuose, esant šioms sąlygoms, maksimalus greitis siekė 14,7 m/s, išmatuotas VI kanale, tuo tarpu modelyje apskaičiuotas Phoenix programiniame pakete reikšmės siekia 20 m/s. Skirtumas tarp teorinio ir praktinio greičio nustatymo būdų sudaro 26 %, taip nėra pasiekiamas reikiamas patikimumas. Tačiau darant prielaidą, jog maksimalus greitis pavaizduotas 4.4 pav. užfiksuotas I kanale, iškart po įtekėjimo, į jį galima būtų neatsižvelgti. Tokiu atveju maksimalus greitis matematiname modelyje siektų 18 m/s, o paklaida sudarytų 18 %, kas tenkina patikimumo sąlygas.

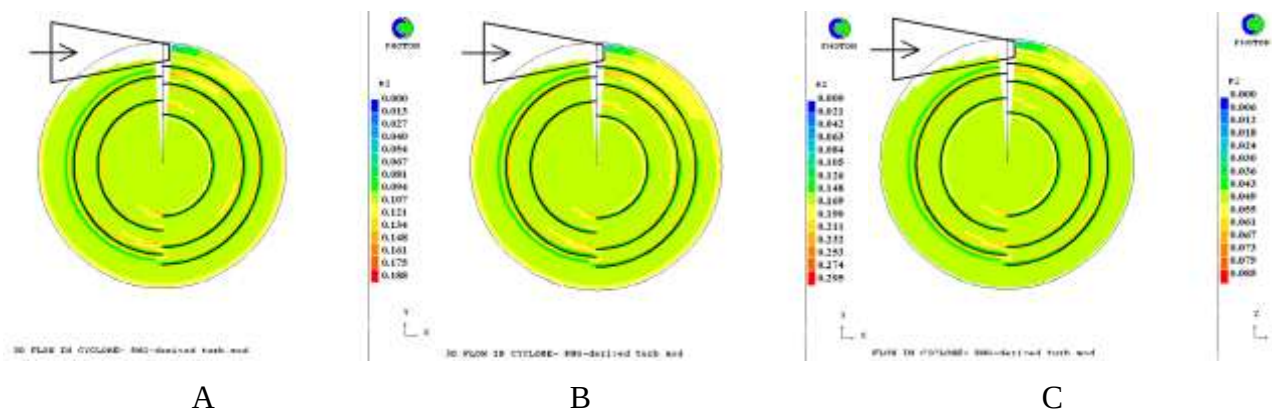
Esant įtekėjimo greičiui 13,9 m/s, panaudojant stiklo daleles, maksimalus slėgis ciklone yra lygus 405 Pa. Didžiausia slėgio vertė taipogi yra registruojama II-V pjūviuose II ir III kanaluose. Neigiami, mažesni už atmosferinį, slėgiai fiksuojami tik įrenginio ašyje, kur didžiausia vertė siekia 805 Pa. Visame ciklono tūryje vidutiniai slėgiai kinta nuo 59 Pa iki 318 Pa. V pjūvyje, išsidėsčiusiame prie oro srauto išėjimo angos, slėgis yra lygus 59 Pa (4.5 pav.).



4.5 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Atliekant tyrimus su fizikiniu modeliu dinaminiai slėgiai kito nuo 25,9 Pa iki 127,2 Pa. Kaip ir atveju esant įtekėjimo greičiui 21,9 m/s, slėgių pasiskirstymui galėjo turėti įtakos, praktinių tyrimų metu, dinaminio Pito-Prandtlis vamzdelio įstatymo padėtis srovės ir ciklono konstrukcijos atžvilgiu, netolygaus turbulentinio srauto judėjimas, galima metodikos ir matavimo prietaisų paklaidos, todėl slėgio pasiskirstymo tarp fizikinio ir matematinio modelių rezultatai nėra vertinami.

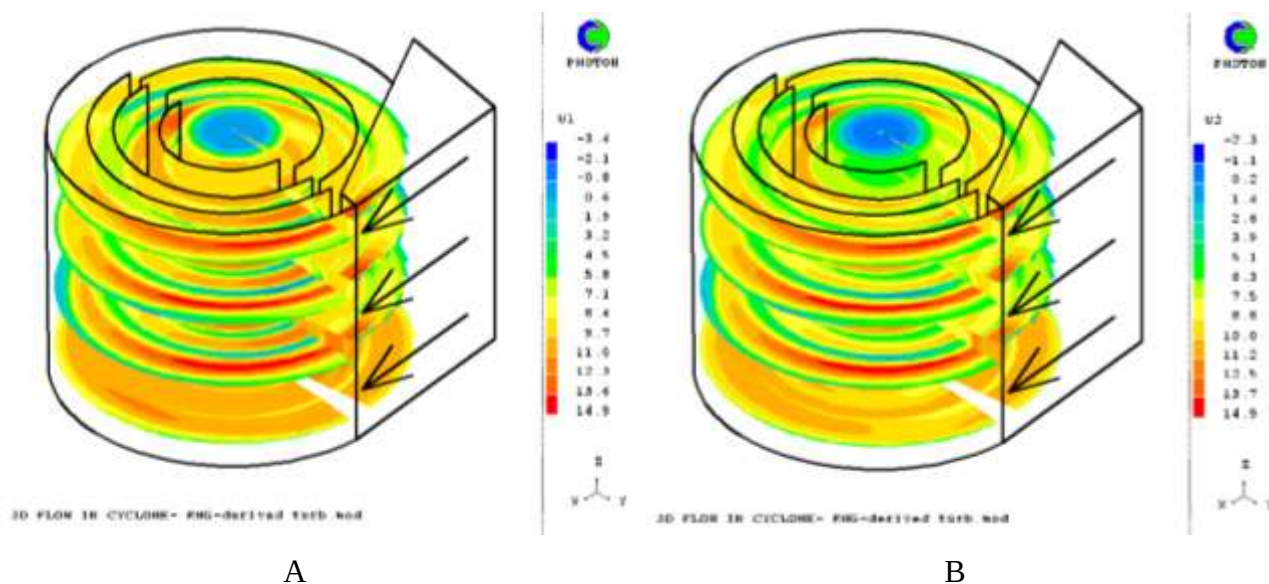
Dvifazio srauto valymo efektyvumą apibūdinantys antrosios fazės iki 50 μm tūrinių dalelių pokyčiai ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, pateikti 4.6 pav.



4.6 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m³ (A), 5 g/m³ (B) ir 10 g/m³ (C) koncentracijų stiklo kietąsias daleles

Maksimali kietųjų dalelių tūrinė dalis, įleidžiant 0,5 g/m³ kietųjų dalelių koncentracija, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui yra lygi 0,094 bei gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 81,2 %. Didinant kietųjų dalelių koncentracija iki 5 g/m³ ir 10 g/m³ kietųjų dalelių tūrinė dalis siekia 0,590 ir 0,850, o apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami 70,5 % ir 91,5 % atitinkamai.

Pasirenkant mažiausią iš nagrinėjamų įtekėjimo greičių, kuris lygus 10,9 m/s bei įleidžiant smulkiadispersias stiklo kietąsias daleles iki 50 μm , dviejų fazių greičių pasiskirstymai pavaizduoti 4.7 pav..



4.7 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 μm stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

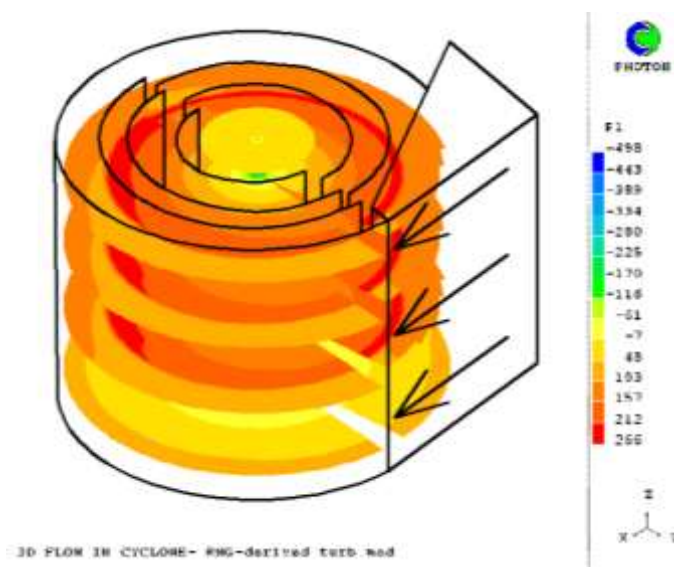
Esant mažiausiam pasirinktam įtekėjimo greičiui, maksimali vertė gauta modelyje siekia 14,9 m/s, kuri išryškėja abiejų fazių greičių pjūviuose. Analizuojant pirmąjį pjūvį, esanti 10 mm atstumu nuo ciklono cilindrinės dalies dugno, galima stebėti skirtumą tarp U1 ir U2 greičių pasiskirstymo. Pirmoji fazė - dujų (oro) srautas įgyja akivaizdžiai didesnius greičius, negu antroji fazė. Taip pat kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas, labiau įtakoja kietųjų dalelių, negu pirmosios fazės judėjimui. Tai galima matyti pagal vyraujančių greičių reikšmių pokyčius, pusžiedžių ir periferinės sienelės pasienio sluoksniuose, ko negalima taip ryškiai matyti U1 greičių pasiskirstyme (A).

Esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, maksimalios greičių reikšmės ciklono konstrukcijoje tiek pakito, lyginant su atvejais, kai įtekėjimo greičiai buvo 13,9 m/s ir 21,9 m/s. Šiuo atveju didžiausios pirmosios ir antrosios fazės reikšmės stebimos I ir V kanaluose, ciklono II, III ir IV pjūviuose, kuriose greitis siekia 14,9 m/s. Stebint antrosios fazės greičius, galima sakyti, kad praeinant I kanalą, antrosios fazės srautas praranda gana didelę kinetinę energiją, įveikiant pasipriešinimo jėgas, ir tolimesniuose kanaluose srautas juda arti vidutinių greičių, kurie yra 6,3 m/s - 8,8 m/s. Tuo tarpu pirmosios fazės srautas juda gana dideliu 8,4 m/s - 12,3 m/s, o arti pasienių sluoksnių sumažėja iki 5,8 m/s greičio.

Vykdam eksperimentinius tyrimus, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, maksimalus greitis ciklone siekė 11,8 m/s, kuris išmatuotas VI kanale. Lyginant su modeliavimo rezultatais greičio

vertė skiriasi 21 %. Pagal atlikto modeliavimo rezultatus, įvertinus šeštajame kanale nustatytą greitį, kuris lygus 11,0 m/s, galima teigti, kad tarp fizikinio ir matematinio modelių sudaroma paklaida 7,3 % (lyginant 11,8 m/s ir 11,0 m/s greičius) tenkina patikimumo sąlygas.

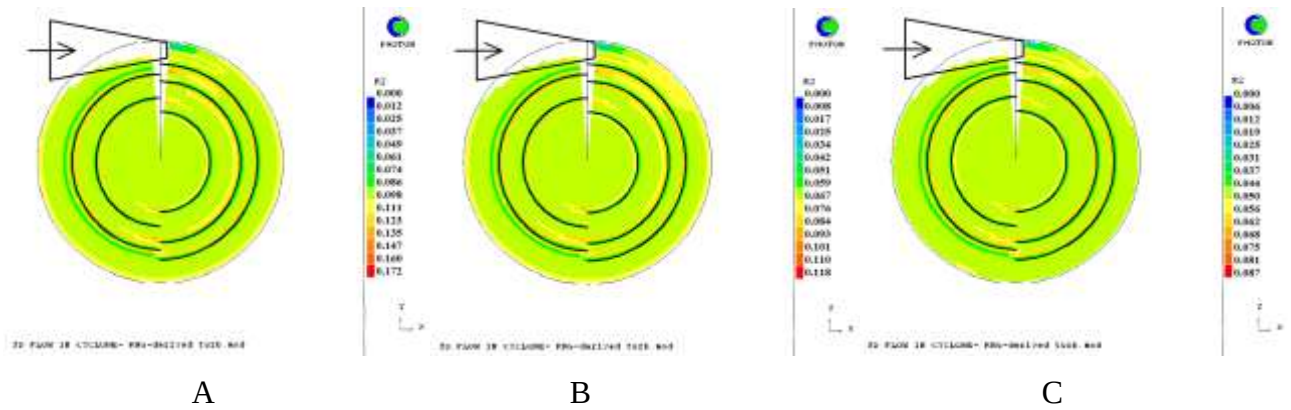
Esant maksimaliam ir nagrinėjamų 10,9 m/s įtekėjimo greičiui į cikloną, maksimalus susidarantis slėgis ciklone yra lygus 266 Pa. Slėgių pasiskirstyme pavaizduotame 4.8 pav. galima matyti, kad didžiausi slėgiai nustatomi II ir III kanaluose 80 - 220 mm ciklono cilindrinės dalies aukštyje. Neigiami, mažesni už atmosferinį, slėgiai fiksuojami visuose pjūviuose įrenginio ašyje, kur reikšmės pasiekia didžiausią reikšmę, kuri lygi 498 Pa. Taip pat mažes vertes galima matyti I pjūvio III - V kanaluose ir išeinančio oro srauto angoje, kur reikšmės yra 61 - 7 Pa.



4.8 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Antrosios fazės tūrinių dalių pasiskirstymai pateikti 4.9 pav. Maksimali kietųjų dalelių tūrinė dalis, įleidžiant $0,5 \text{ g/m}^3$ kietųjų dalelių koncentracija yra lygi 0,086 bei gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 82,8 %.

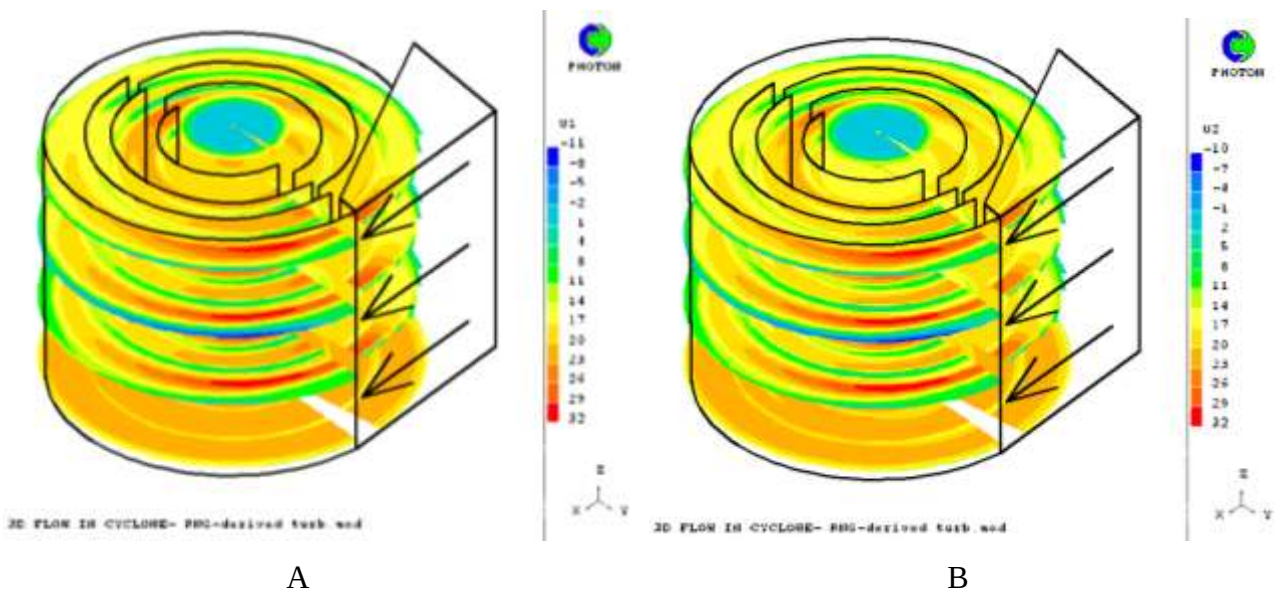
Didinant kietųjų dalelių koncentracija kietųjų dalelių tūrinė dalis didėja, siekia 0,59 ir 0,85, esant 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijoms, apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami 88,2 % ir 91,5 % atitinkamai.



4.9 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles

Sekančiame modeliavimo etape yra nagrinėjamos smulkiadispersias stiklo kietosios dalelės, kurių dispersiškumas siekia iki 20 μm dydžio. Šiuo modeliavimu siekiama nustatyti aerodinaminių charakteristikų ir atskirimo efektyvumų skirtumus dalelėms iki 20 μm ir iki 50 μm , lyginant matematinio ir fizikinio modelio gautus rezultatus.

Nagrinėjant dvifazį oro srautą, kuriame antrąją fazę sudaro stiklo kietosios dalelės iki 20 μm dydžio, kaip ir anksčiau, pasirenkamas įtekėjimo greitis į cikloną, kuris pirmuoju atveju lygus 21,9 m/s. Greičio dedamųjų U1 ir U2 kitimas ciklono pjūviuose pavaizduotas 4.10 pav.



4.10 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 μm stiklo daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

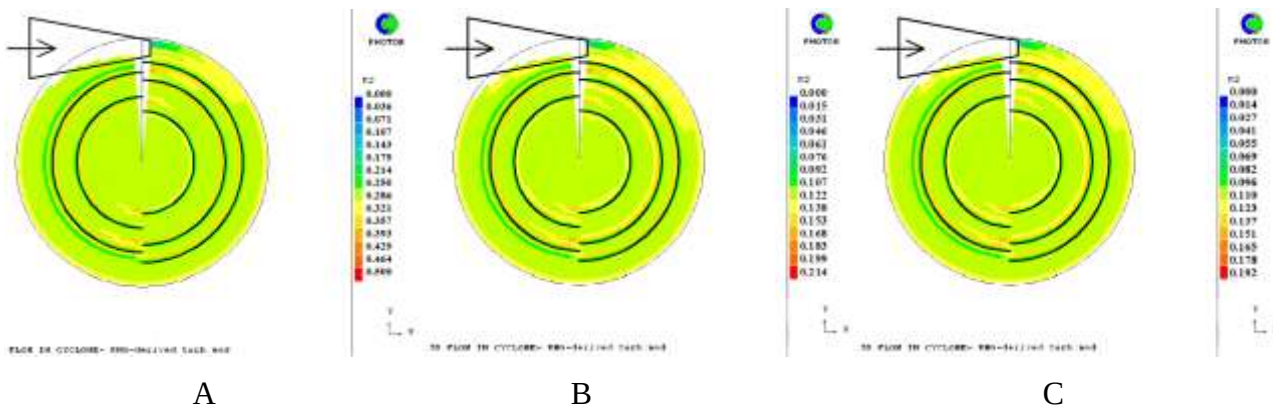
Esant maksimaliam iš nagrinėjamų įtekėjimo greičiui į cikloną, didžiausios greičių vertės pasiekiamos, kaip ir tuo atveju, kai naudojamos stiklo dalelės iki 50 μm , t.y. 32 m/s. Galima stebėti ypač antrosios fazės U2 greičių padidėjimą I ciklono pjūvyje, ties cilindrinės dalies dugno, kur

greičiai siekia iki 23 m/s. Tai pasako, kad 20 μm ir mažesnio skersmens dalelės yra pagaunamos srovės efektyviau už iki 50 μm daleles dėl mažesnės masės, ir veikiant sukurtinėms jėgoms yra nukreipiamos arčiau periferinės sienelės, o veikiant svorio jėgoms nukrenta į cilindrinės dalies apatinę dalį. Nejudančio fluido srautas, kai greitis lygus 0, pastebimas tik III pjūvyje ties oro srauto įtekėjimu. Neigiamos greičių reikšmės yra fiksuojamos tik V pjūvyje - oro srauto išėjimo angoje. Pirmosios fazės U1 greičių padidėjimas iki 24 - 29 m/s stebimas kiekvieno ciklono kanalo pradžioje, kreivalinijinio pusžiedžio pasienio zonoje. Tuo tarpu antrosios fazės greičiai pasiskirsto gana tolygiai, siekia vidutinės 17 m/s greičio vertės, o ties įtekėjimais į kanalus, priešingai, sumažėja iki 11 m/s.

Atlikus eksperimentinius tyrimus, esant 21,9 m/s greičiui, maksimalus greitis siekė 14,7 m/s, kuris buvo nustatytas VI kanale. Matematinio modelio nustatytos reikšmės ciklone siekia 32 m/s greitį, tačiau VI kanale yra 17 m/s, o ašyje - 20 m/s greičiai. Todėl paklaidą sudaro 13 %, kas tenkina patikimumo sąlygas.

Slėgio pasiskirstymas, panaudojant iki 20 μm stiklo kietąsias daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui nesiskiria nuo jau nagrinėto atvejo, kai buvo panaudojamos iki 50 μm dalelės, esant tam pačiam įtekėjimo greičiui, dėl ko šis atvejis nėra analizuojamas.

Stiklo dalelių tūrinių dalių pasiskirstymai pateikti 4.11 pav. Esant įleidžiamai 0,5 g/m^3 dalelių koncentracijai, didžiausia R2 vertė lygi 0,090, o gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 50,0 %. Esant kietųjų dalelių koncentracijoms 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 , apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami atitinkamai 75,7 % ir 80,4 %.

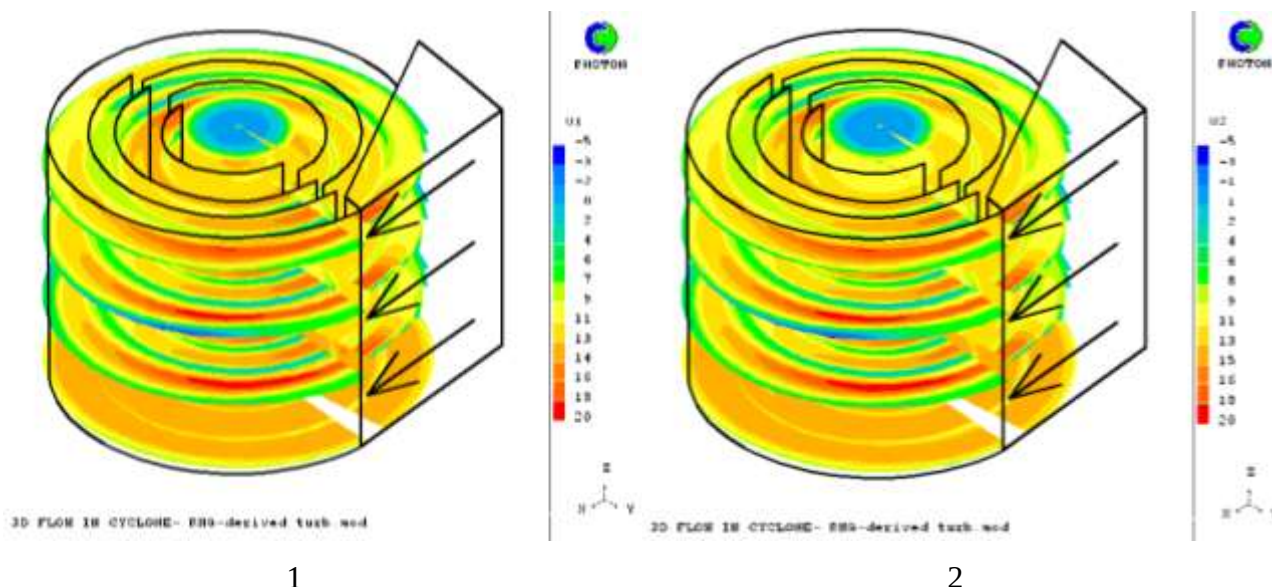


4.11 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μm dydžio 0,5 g/m^3 , 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų stiklo kietąsias daleles

Eksperimentinių tyrimų metu atliktų stiklo kietųjų dalelių atskirimo efektyvumų reikšmės buvo 48,5 %, 73,8 % ir 74,1 %, įleidžiant 0,5 g/m^3 , 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 dalelių koncentracijas atitinkamai. Apskaičiavus metodų duomenų atitikimą, vidutinę paklaidą sudaro tik 4,5 %. Mažiausia paklaida yra gaunama, esant 0,5 g/m^3 koncentracijai, kai rezultatų santykis skiriasi tik 3

%. Gautus rezultatus galima laikyti patikimais, atsižvelgiant į fizikinio ir matematinio modelių nustatytus dalelių atskirimo efektyvumus.

Tęsiant sudaryto matematinio modelio analizę, panaudojant smulkiadispersias stiklo kietąsias daleles, pasirenkamas vidutinis įtekėjimo greitis, kuris lygus 13,9 m/s, o greičių pasiskirstymas ciklone pavaizduojamas 4.12 pav.



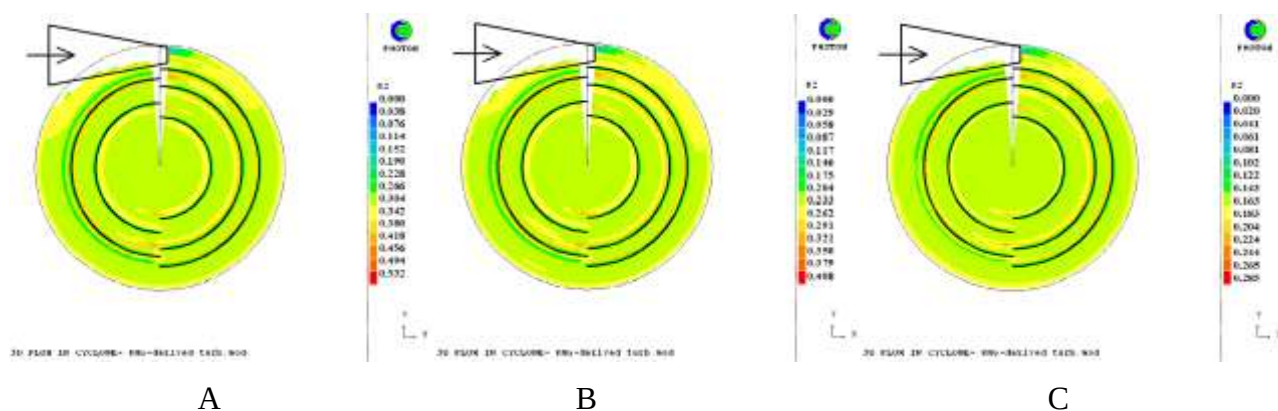
4.12 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 μm stiklo daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Įtekant vidutiniam ir nagrinėjamų greičiui, maksimalus greitis ciklone stebimas I kanalo pradžioje II ir III pjūviuose, kur reikšmė siekia 20 m/s. Šiek tiek mažesnis, siekiantis 18 m/s, greitis pasireiškia V kanalo ištekmėje į VI kanalą. Abiejų fazių srautų greičių pasiskirstymai yra beveik vienodi, išskyrus nedidelį U1 (4.12 pav. 1) greičio padidėjimą VI kanale įrenginio ašyje, kur greitis pasiekia 14 m/s greitį, kai tuo metu U2 yra lygus 11 m/s. Abiejų fazių greičiai, įtekant į kanalą pasiekia didesnes reikšmes, teka apytikriai vidutiniais nustatytais greičiais, o ištekėjimuose iš kanalų, vėl stebimas greičio padidėjimas. Pasienių sluoksniuose greičiai nukrenta iki gana mažų 4 - 8 m/s greičių.

Vykdamas eksperimentinius tyrimus su fizikiniu modeliu, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, maksimalus greitis ciklone siekė 14,7 m/s, kuris išmatuotas VI kanale. Lyginant su modeliavimo rezultatais, greičio vertė VI kanale skiriasi 18 %, tai pagrindžia rezultatų patikimumą. Tačiau paminėtina prielaida, kad neįvertinamas I kanalo greitis, dėl didelės įtekamojo srauto įtakos, kur greičio vertė siekia 20 m/s, tuo atveju paklaidą sudarytų 26 %.

Slėgio pasiskirstymas nėra nagrinėjamas dėl visiško rezultatų sutapimo, su atveju, kai panaudojamos iki 50 μm stiklo kietosios dalelės, esant tam pačiam įtekėjimo greičiui.

Stiklo dalelių tūrinių dalių pasiskirstymai, esant vidutiniam ir nagrinėjamam įleidžiamam 13,9 m/s greičiui, pateikti 4.13 pav. Esant įleidžiamai $0,5 \text{ g/m}^3$ dalelių koncentracijai, didžiausia antrosios fazės dalis ciklone yra lygi 0,532, valymo efektyvumas tuo atveju siekia 46,8 %. Didinant koncentracijas iki 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 , efektyvumai yra 59,2 % ir 71,5 % atitinkamai.

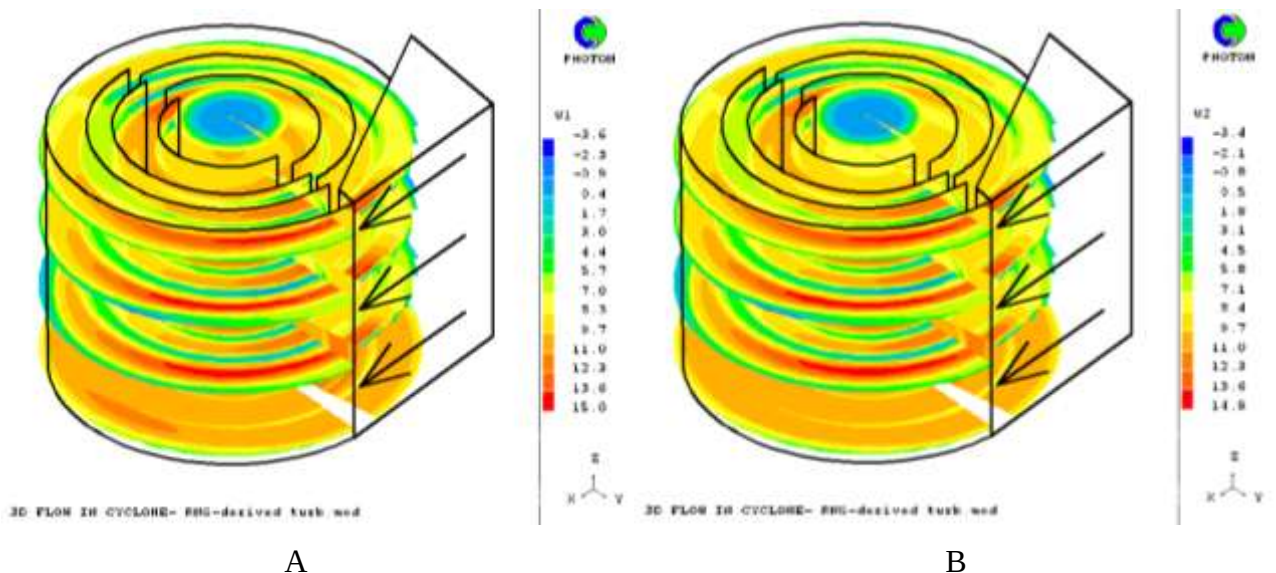


4.13 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki $20 \mu\text{m}$ dydžio $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų stiklo kietąsias daleles

Iš 4.13 pav. galima matyti, kad esant mažesnei koncentracijai, dalelių dalis ciklono II kanalo pabaigoje akivaizdžiai skiriasi, dalelės kaupiasi išilgai periferinės sienelės, ko visiškai nepastebima esant 10 g/m^3 įleidžiamai koncentracijai. Tuo pačiu galima stebėti ir kietųjų dalelių nuskrėjimą į sekantį kanalą nuo esančio kanalo kreivalinijinio pusžiedžio sienelės. Dėl to susidaro dalelių takas, kuris ilgėja tuo labiau, kuo didesnė pradinė koncentracija, tačiau šiuo atveju tęsiasi ilgiausiai, įleidžiant 5 g/m^3 koncentracijos srautą. Šis efektas geriausiai pasireiškia oro srautui aptekant III pusžiedį ir srautui patenkant į IV kanalą.

Modeliuojant dvifazį oro srautą, panaudojant stiklo kietąsias daleles iki $20 \mu\text{m}$, nagrinėjant mažiausią iš pasirinktų įtekėjimų greičių, kai reikšmė siekia 10,9 m/s, dviejų fazių srauto greičių kitimas ciklone yra pavaizduotas 4.14 pav..

Oro (dujų) fazės (4.14 pav. A) srauto maksimali greičio vertė siekia 15 m/s, kuri kaip ir daugelyje atveju pasireiškia pirmojo kanalo pradžioje II, III ir IV pjūviuose. Mažesnė vienu žingsniu vertė, kuri yra 13,6 m/s nustatoma ir V kanale, prieš pat įtekėjimą į VI kanalą. Visame ciklono cilindrinės dalies tūryje vyraujantis vidutiniai greičiai, kurių vertės svyruoja tarp 7,0 - 9,7 m/s. Minimalus greičiai stebimi pasienio sluoksniuose, kai greičiai krenta iki 0,4 m/s. Antrosios fazės greičiai U2 (4.14 pav. B) yra šiek tiek mažesni, maksimalus greitis yra beveik vienodas ir yra lygus 14,9 m/s.

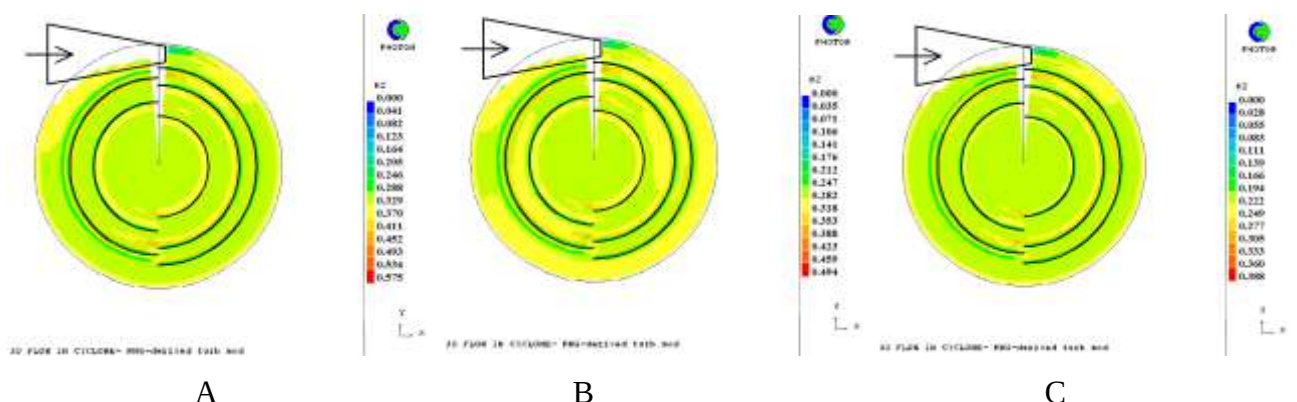


4.14 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 20 μm stiklo daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Kaip ir jau nagrinėtais atvejais, galima pastebėti U2 greičio tolygumą įrenginio ašyje VI kanale, kur dalelės nepagreitėja taip pat, kaip ir oro srautas, o išlieka gana pastovus, greičiai šioje dalyje siekia 9,7 m/s. Lyginant su eksperimentinių tyrimų duomenimis, kai buvo pasiektas maksimalus greitis VI kanale 11,8 m/s, paklaidą sudaro 13,2 %, kas yra 20 % patikimumo ribose.

Slėgio pasiskirstymas nėra nagrinėjamas dėl visiško rezultatų sutapimo, su atveju, kai panaudojamos iki 50 μm stiklo kietosios dalelės, esant tam pačiam įtekėjimo greičiui.

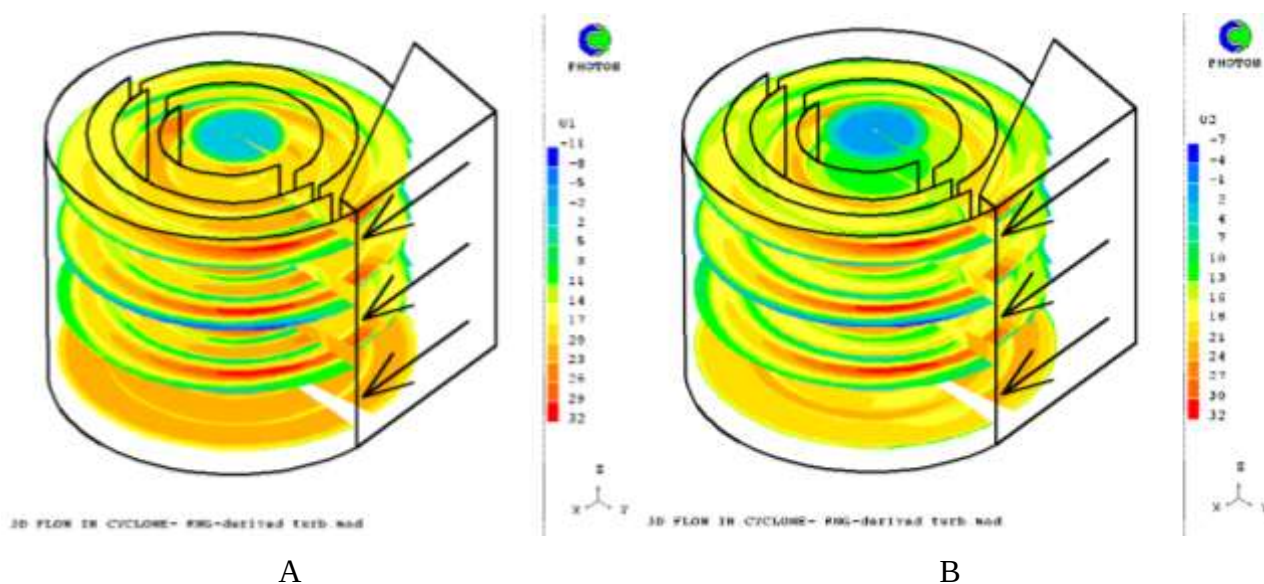
Nagrinėjant paskutinį atvejį, panaudojant iki 20 μm stiklo kietąsias daleles, esant minimaliam iš pasirinktųjų 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, sudaromas antrosios fazės pasiskirstymas bei nustatytos tūrinės dalys ciklono kanaluose pateiktame 4.15 pav.



4.15 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų stiklo kietąsias daleles

Antrosios fazės tūrinių dalių pokyčiai akivaizdžiai yra matomi pateiktame 4.15 pav. B atveju, kai dalelės užpildžiusios daugiau nei pusę kiekvieno kanalo, juda tolygia trajektorija, tuo metu jų turinė dalis siekia 0,318. Sumažėjusios turinės dalies pokytis matomas tik pasienio sluoksnyje prie II žiedo II kanale, kur vertės siekia 0,246 - 0,288, tai pasireiškia, esant visais trimis pasirinktų įleidimų koncentracijų atvejais. Esant įleidžiamai $0,5 \text{ g/m}^3$ dalelių koncentracijai, didžiausia R2 vertė ciklone yra lygi 0,575, valymo efektyvumas tuo atveju siekia 42,5 %. Įleidžiant didesnes koncentracijas, kurios yra 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 , efektyvumai siekia 50,6 % ir 61,2 % atitinkamai.

Dvifazio oro srauto sudaryto matematinio modelio analizė tęsiama, panaudojant antrąsias pasirinktas techninės druskos kietąsias daleles. Nagrinėjamas pirmasis atvejis, kai įtekėjimo greitis ties įėjimo anga siekia maksimalios $21,9 \text{ m/s}$ reikšmės, pavaizduotas 4.16 pav..

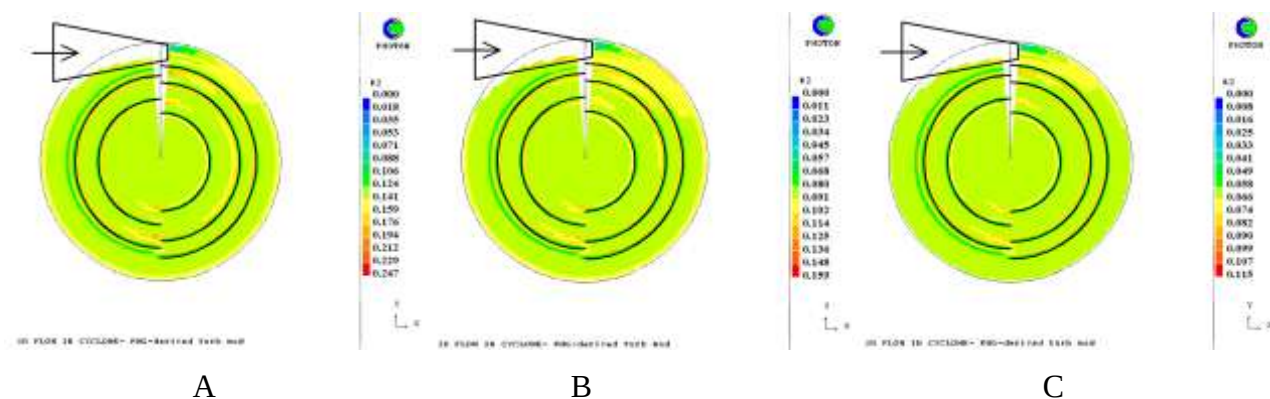


4.16 pav. Dvifazio srauto greičio komponentų pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki $50 \mu\text{m}$ techninės druskos daleles, esant $21,9 \text{ m/s}$ įtekėjimo į cikloną greičiui

Oro srauto bei dalelių fazės (4.16 pav.) maksimalios greičio vertės siekia 32 m/s . Analizuojant jau atliktų stiklo kietųjų dalelių matematinio modelio greičio pasiskirstymo atvejį, galima teigti, kad kietųjų dalelių prigimtis beveik arba visiškai neįtakoja greičių pasiskirstymui ciklono kanaluose. Abiejų fazių greičių pasiskirstymai esant stiklo ir techninės druskos dalelėms yra identiški. Tolimesnėje gautų matematinio modelio rezultatų analizėje bus apsiribota rezultatų pateikimu tik tais atvejais, kai stebimas pokytis, keičiantis įvairiems parametrams.

Atlikus slėgių pasiskirstymo analizę nagrinėjamame modelyje, pastebėta, kad šio parametro kitimui, taipogi nedaro įtakos skirtingų kietųjų dalelių parinkimas, todėl nusprendžiama šio rodiklio kitimo išsamiai nevertinti.

Ciklono įrenginio valymo efektyvumo rodiklį apsprendžia kietųjų dalelių ir oro tūrinių dalių santykis įrenginio kanaluose. Nagrinėjamų techninės druskos iki 50 μm dydžio tūrinių dalių pasiskirstymai, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, pateikti 4.17 pav.



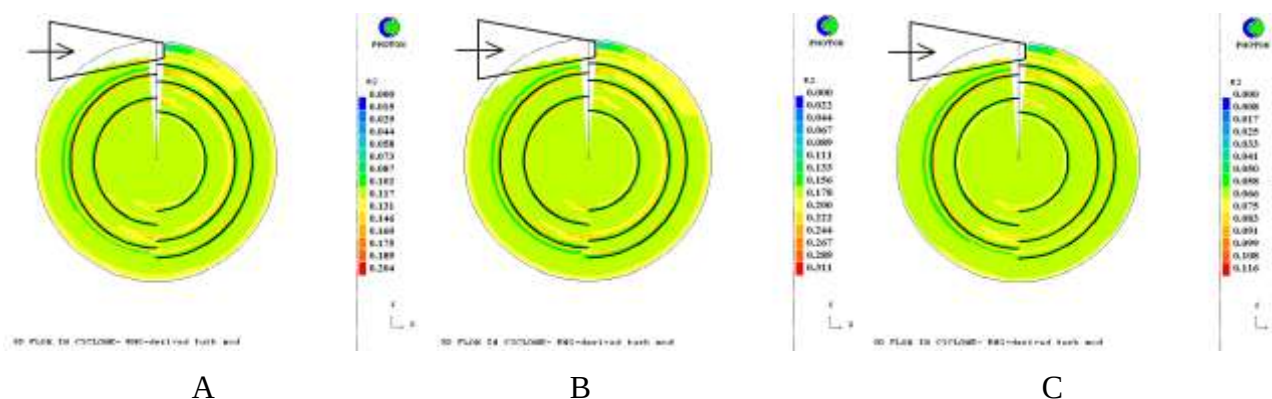
4.17 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Antrosios fazės techninės druskos dalelių tūrinių dalių pasiskirstyme, įleidžiant 0,5 g/m³ koncentraciją (4.17 pav. A), maksimali vertė siekia 0,247, tai atitinka 75,3 % ciklono valymo minimalų efektyvumą. Esant didesnėms 5 g/m³ ir 10 g/m³ įleidžiamoms koncentracijoms, pasiekiami 84,1 % ir 88,5 % atitinkantys efektyvumai. Pateiktame 4.17 pav. galima matyti, kad esant mažiausiai pasirinktai koncentracijai, techninės druskos dalelės I kanalo pradžioje pasiskirsto trumpesnėje atkarpoje, negu esant 5 g/m³ koncentracijai. Tačiau padidinus dalelių koncentraciją iki 10 g/m³, minėtas ruožas tampa dar trumpesnis. Tai pasako, kad esant vidutinei koncentracijai kietosios dalelės išsibarsto tolygiau, negu kitais atvejais. Pastebėta, ypač V kanale III kreivalinijiniame pusžiedyje, vidiniame pasienio sluoksnyje dalelių nusėdimas ant paviršiaus tuo ilgesnis, kuo yra mažesnė koncentracija. Galima matyti, kad esant 0,5 g/m³ koncentracijai šis ilgis yra didžiausias, o esant 10 g/m³ jis vos pastebimas.

Eksperimentinių tyrimų metu atliktų techninės druskos kietųjų dalelių atskirimo efektyvumų vertės buvo 92,0 %, 94,8 % ir 94,9 %, esant 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ dalelių koncentracijoms atitinkamai. Maksimali paklaida tarp matematinio ir fizikinio modelių efektyvumų rezultatų siekia 18,2 %, kuri gauta nagrinėjant mažiausios įleidžiamos koncentracijos oro srautą. Esant 5 g/m³ koncentracijai paklaidą sudaro 11,2 %, o esant 10 g/m³ - tik 6,7 %. Pagal nustatytus neatitikimus galima laikyti, kad gauti rezultatai neviršija leistinų 20 % ir yra patikimi.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 13,9 m/s, abiejų fazių greičių ir slėgio pasiskirstymai matematiniame modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 50 μm dydžio (4.4 pav. ir 4.5 pav.), todėl rezultatų analizė nėra kartojama.

Panaudojant iki 50 μm techninės druskos kietąsias daleles, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinės dalis ciklone R2 pateikiamos 4.18 pav.



4.18 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Esant įleidžiamai 0,5 g/m³ dalelių koncentracijai, didžiausia dalelių tūrinės dalies vertė siekia 0,204, apskaičiuotas dalelių atskirimo efektyvumas tuo atveju lygus 79,6 %. Iš 4.18 pav. galima matyti, kad dalelės užpildo gana didelę I kanalo dalį, už įtekėjimo į cikloną. Šioje ciklono dalyje dalelių tūrinė dalis siekia vidutines reikšmes 0,131 - 0,146. Didinant koncentracijas iki 5 g/m³ ir 10 g/m³, efektyvumai siekia 68,9 % ir 88,4 % atitinkamai.

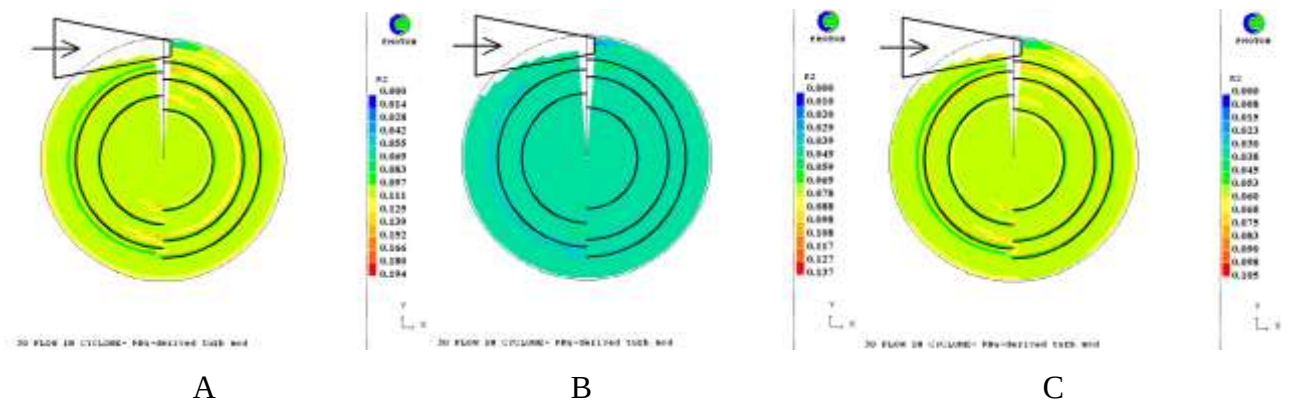
Kaip jau nagrinėtuose antrosios fazės pasiskirstymuose, galima matyti dalelių srauto pernešimą nuo pusšiedžio vidinės sienelės link sekančio kanalo, ką galima ryškiausiai matyti V kanale prie III pusšiedžio. Šiuo atveju, ilgiausia trajektorija yra gaunama esant mažiausiai koncentracijai, o jai mažėjant dalelių srautas susitelkia prie pat įtekėjimo į kanalą. Taip pat galima matyti, kad dalelės iš V kanalo dėl veikiančių išcentrinių jėgų labiausiai patenka ne į sekantį VI kanalą, bet į IV, kur pakartotinai vyksta filtracijos ir nusėdimo dėl svorio jėgų efektai.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 10,9 m/s, abiejų fazių greičių ir slėgio pasiskirstymai matematiniam modelyje, panaudojant techninės druskos kietąsias daleles, nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 50 μm dydžio (4.7 pav. ir 4.8 pav.). Todėl gautų rezultatų analizė nėra atliekama.

Panaudojant iki 50 μm techninės druskos kietąsias daleles, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinių dalių vertės (R2) ciklone pateikiamos 4.19 pav..

Esant mažiausiai iš pasirinktųjų įleidžiamų dalelių koncentracijų, didžiausia dalelių tūrinės dalies vertė siekia 0,194, apskaičiuotas dalelių atskirimo efektyvumas tuo atveju lygus 80,6 %. Esant didesnėms 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijoms, efektyvumai siekia 86,3 % ir 89,5 % atitinkamai. Iš 4.19 pav. galima akivaizdžiai matyti, kad B atveju, kai įleidžiama 5 g/m³ koncentracija, dalelių tūrinių dalių vertės ciklono kanaluose yra mažesnės nei kitais dviem atvejais,

jų reikšmės svyruoja 0,039-0,069 ribose. Tuo tarpu kitų dviejų atvejų vidutinė dalelių tūrinių dalių vertės siekia 0,111 ir 0,060, esant $0,5 \text{ g/m}^3$ ir 10 g/m^3 įleidžiamoms koncentracijoms.

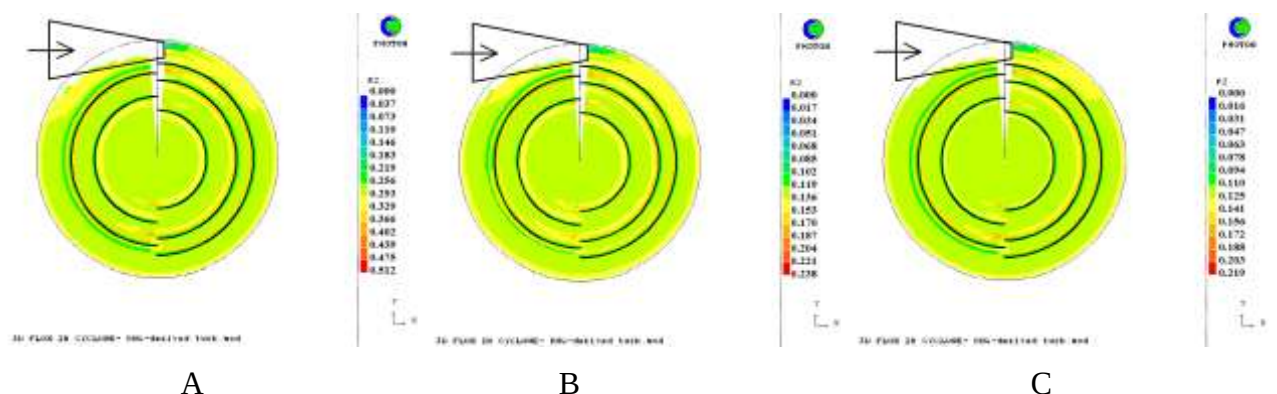


4.19 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant $10,9 \text{ m/s}$ įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki $50 \mu\text{m}$ dydžio $0,5 \text{ g/m}^3$ (A), 5 g/m^3 (B) ir 10 g/m^3 (C) koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Sekanti matematinio modelio analizė tęsiama, nagrinėjant smulkiadispersias techninės druskos kietąsias daleles iki $20 \mu\text{m}$ dydžio. Atlikimo metodika yra vienoda kaip ir atliekant modeliavimą, naudojant daleles iki $50 \mu\text{m}$.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną $21,9 \text{ m/s}$, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiname modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki $20 \mu\text{m}$ dydžio (4.10 pav.), todėl rezultatų analizė nėra kartojama.

Techninės druskos dalelių fazės R2 tūrinių dalių kitimas ciklono konstrukcijoje yra pavaizduotas 4.20 pav. Esant įleidžiamai $0,5 \text{ g/m}^3$ dalelių koncentracijai, didžiausia antrosios fazės R2 vertė siekia 0,512, o apskaičiuotas minimalus valymo efektyvumas yra lygus 48,8 %. Didinant koncentracijas iki 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 , apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami 76,2 % ir 78,1 % atitinkamai.

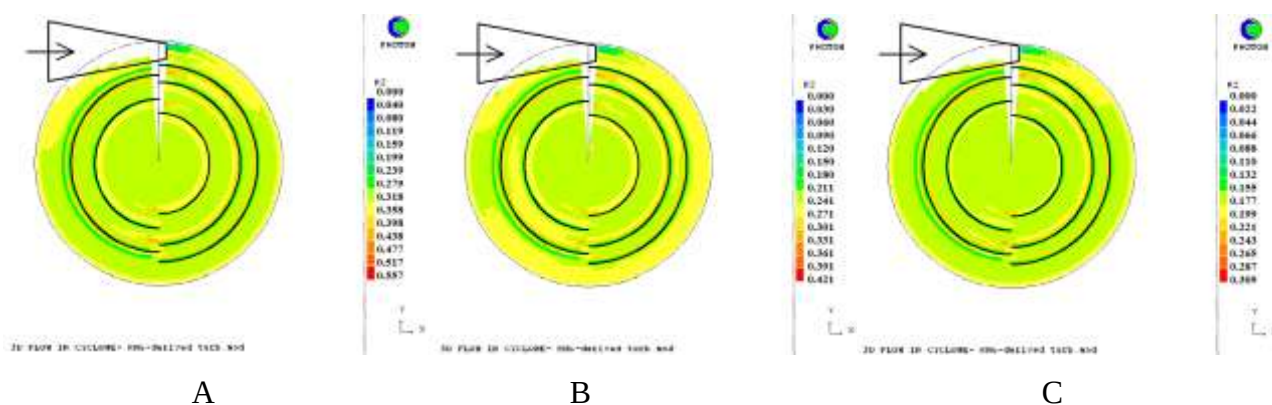


4.20 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant $21,9 \text{ m/s}$ įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki $20 \mu\text{m}$ dydžio $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Eksperimentinių tyrimų metu atliktų techninės druskos kietųjų dalelių atskirimo efektyvumų reikšmės buvo 45,8 %, 71,3 % ir 72,3 %, įleidžiant $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 dalelių koncentracijas atitinkamai. Pagal pateiktus efektyvumų rezultatus, vidutinė paklaidą tarp matematinio ir fizikinio modelių yra lygi tik 6,7 %. Mažiausia paklaida yra gaunama, esant mažiausiai iš pasirinktų koncentracijai $0,5 \text{ g/m}^3$ - 6,2 %. Galima teigti, kad rezultatų patikimumas yra pakankamas.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 13,9 m/s, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiname modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki $20 \mu\text{m}$ dydžio (4.12 pav.), todėl rezultatų analizė nekartojama.

Techninės druskos dalelių fazės R2 tūrinių dalių kitimas ciklono konstrukcijoje, esant vidutiniam iš pasirinktų įleidžiamam 13,9 m/s greičiui, yra pateikiamas 4.21 pav..

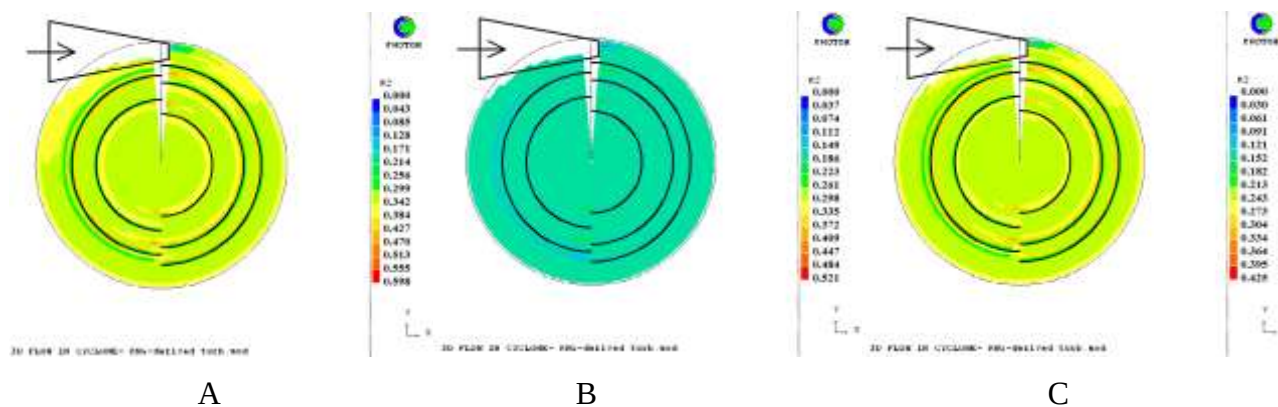


4.21 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki $20 \mu\text{m}$ dydžio $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Pateiktuose 4.21 pav. pasiskirstymuose galima matyti jau pasikartojusi atvejį, naudojant iki $20 \mu\text{m}$ stiklo kietąsias daleles, tačiau esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui. Šiuo atveju maksimali antrosios fazės tūrinės dalies vertė, esant $0,5 \text{ g/m}^3$ siekia 0,557, tai atitinka 44,3 % išvalymo efektyvumą. Šiuo atveju, lyginant su tuo, kai buvo naudojamos stiklo dalelės, dalelių tūrinė dalis I kanale padidėjo, pailgėjo jų išilginis pasiskirstymas, dėl ko ir galėjo sumažėti tūrinė dalis ruože, kuri buvo lygi 0,358. Antrosios fazės srautas intensyviausiai juda periferine sienele bei kreivalininių pusžiedžių pasienių sluoksniais, pereinant iš pirmojo kanalo į sekančius. Maksimalios dalelių tūrinių dalių koncentracijos pastebimos visais trim atvejais, reikšmės kinta 0,361-0,391 intervale.

Esant mažiausiam iš pasirinktųjų įtekėjimo greičiui į cikloną 10,9 m/s, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiname modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki $20 \mu\text{m}$ dydžio (4.14 pav.), todėl rezultatų analizė nekartojama.

Nagrinėjant paskutinį atvejį, atliekant matematinio modeliavimo analizę, panaudojant iki 20 μ techninės druskos daleles, pateikiamas antrosios fazės R2 pasiskirstymas bei nustatytos tūrinės dalys ciklono kanaluose pateiktas 4.22 pav., esant minimaliam iš pasirinktųjų 10,9 m/s įtekėjimo greičiui.

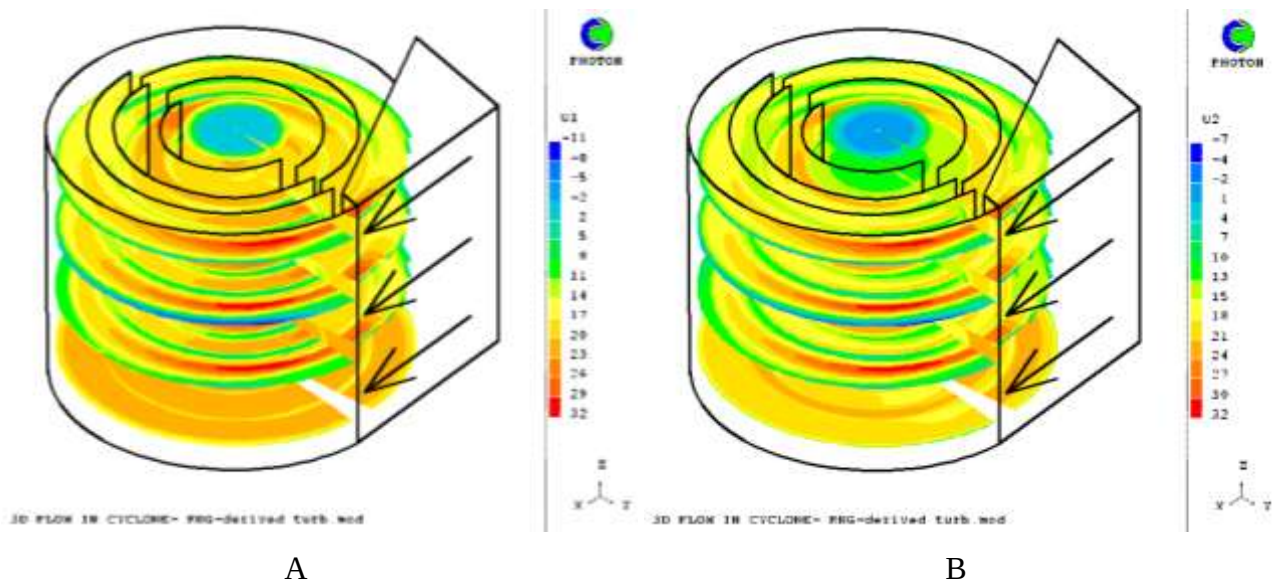


4.22 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μ m dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų techninės druskos kietąsias daleles

Dalelių tūrinių dalių pokyčiai yra gana skirtingi visais A, B ir C atvejais. Akivaizdžiai skiriasi iš visų atvejų B vaizdas. Esant 5 g/m³ įleidžiamai koncentracijai, visame ciklono tūryje dalelių tūrinių dalių vertė yra mažesnė už vidutinę ir yra lygi 0,149-0,186 verčių intervale. Lyginant A ir C atvejus, esant mažesnei koncentracijai (A atvejis), dalelių srautas labiau užsilaiko II kanalo pabaigoje, o vertės R2 siekia 0,384. Didžiausias išvalymo efektyvumas gautas esant didžiausiai įleidžiamai iš pasirinktųjų koncentracijai, kuri lygi 10 g/m³, ir yra lygus 57,5 %. Esant įleidžiamai 0,5 g/m³ ir 5 g/m³ koncentracijoms, apskaičiuoti efektyvumai lygus 40,2 % ir 47,9 % atitinkamai.

Dvifazio oro srauto sudaryto matematinio modelio analizė užbaigiama, panaudojant trečiąsias iš pasirinktųjų - molio kietąsias daleles. Nagrinėjimas pradamas analizuojant oro (dujų) srauto ir kietųjų dalelių fazių greičių pasiskirstymą, esant iki 50 μ m dalelėms bei maksimaliam 21,9 m/s įtekėjimo greičiui į cikloną, kuris pavaizduotas 4.23 pav..

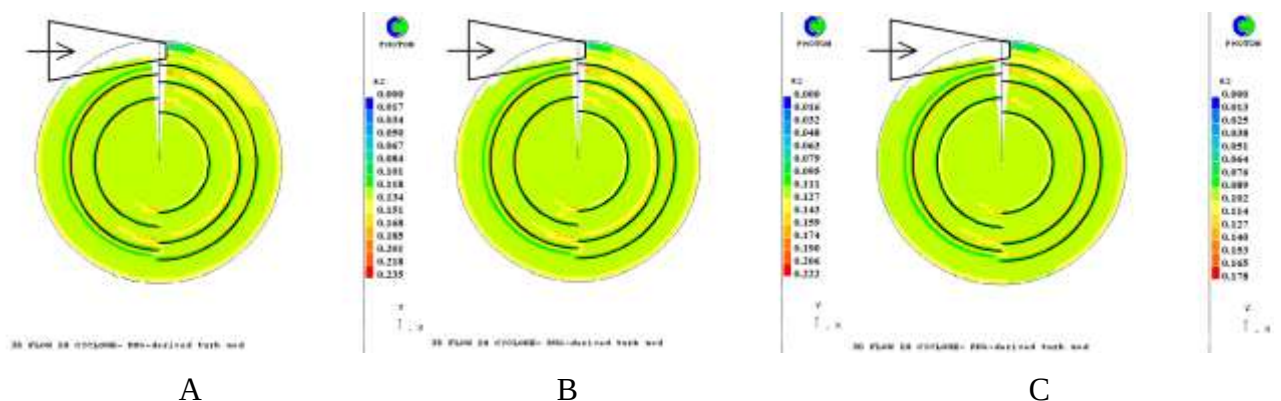
Pastebėta, kad sudarytame matematiname modelyje, panaudojant trejas skirtingos prigimtės kietąsias daleles, maksimalus nustatytas abiejų fazių U1 ir U2 greičiai ciklono kanaluose buvo lygus 32 m/s. Galima teigti, kad pasirinktų dalelių skirtingo tankio bei savybių savitumas, neįtakoja greičių pasiskirstymui ir jis išlieka gana vienodas visuose ciklono pjūviuose (aukščiuose). Pastebima, kad šiuo, kaip ir atveju, kai buvo naudojamos techninės druskos kietosios dalelės, maksimalus neigiamas antrosios fazės greitis U2, kuris nustatytas įrenginio ašyje bei I kanalo periferinės sienelės pasienio sluoksnyje, yra lygus 7 m/s.



4.23 pav. Dvifazio srauto greičio komponentių pasiskirstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijoje, naudojant iki 50 μm molio kietąsias daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui

Slėgio pasiskirstymo ciklono konstrukcijoje analizė, kaip ir atveju, kai buvo naudojamos techninės druskos kietosios dalelės, nėra aptariama. Pastebėta, kad šio parametro kitimui, taipogi nedaro įtakos skirtingų kietųjų dalelių parinkimas, todėl nusprendžiama šio rodiklio kitimo išsamiai nevertinti.

Kietųjų dalelių ir oro tūrinių dalių santykį, įvertinanti antrosios fazės vertė R2 bei dalelių pasiskirstymas ciklone, nagrinėjant iki 50 μm dydžio daleles, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, pavaizduota 4.24 pav..



4.24 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų molio kietąsias daleles

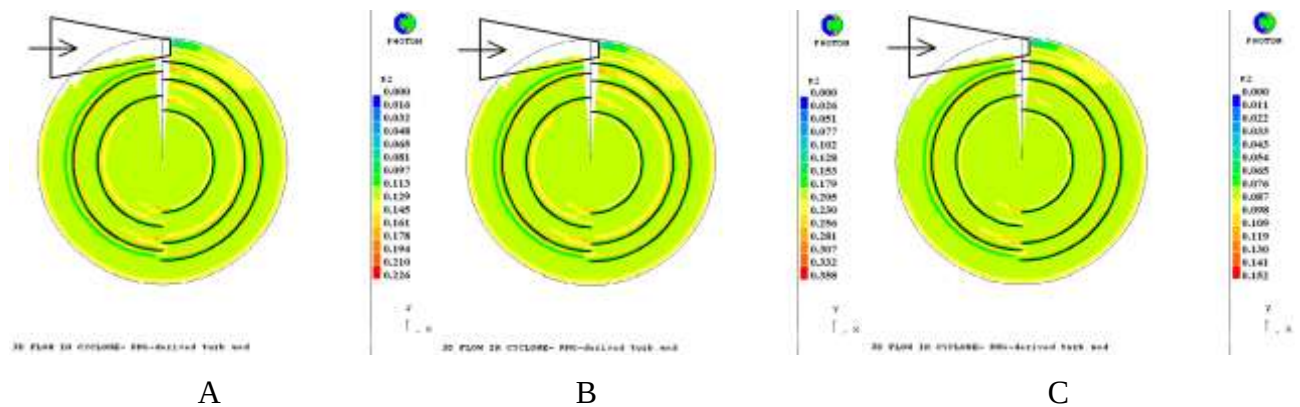
Antrosios fazės molio dalelių tūrinių dalių pasiskirstyme, įleidžiant mažiausią iš pasirinktų 0,5 g/m³ koncentraciją (4.24 pav. A), maksimali vertė siekia 0,235, tai atitinka 76,5 % ciklono valymo minimalų efektyvumą. Esant didesnėms iš pasirinktų koncentracijų, kurios lygios 5 g/m³ ir

10 g/m³ įleidžiamoms koncentracijoms, pasiekiami 77,8 % ir 82,2 % atitinkantys efektyvumai. Pateiktame 4.24 pav. galima matyti, kad esant 5 g/m³ koncentracijai (4.24 pav. B), III kanale susitelkia didesnis nei kitais atvejais dalelių kiekis, o I kanale dalelių trajektorijos ruožas yra ilgiausias. Tendencija išlieka tokia, kad visais atvejais fiksuojamos didžiausios dalelių tūrinių dalių vertės vietose ties ištekėjimais iš kanalų. Šiose vietose R2 vertės siekia apytiksliai 90 % dydžio maksimalios nustatytos ciklono kanaluose nagrinėjamu atveju vertės.

Eksperimentinių tyrimų metu atliktų molio kietųjų dalelių atskirimo efektyvumų vertės buvo 85,7 %, 88,4 % ir 88,5 %, esant 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ dalelių koncentracijoms atitinkamai. Tokiu būdu, maksimali paklaida tarp nagrinėjamų fizikinio ir matematinio modelių efektyvumų rezultatų siekia 12 %, kuri gauta esant vidutinei 5 g/m³ įleidžiamai koncentracijai. Nustatyti dydžiai atitinka tikslumo reikalavimus, todėl juos galima laikyti patikimais.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 13,9 m/s, abiejų fazių greičių ir slėgio pasiskirstymai matematiname modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 50 µm dydžio (4.4 pav. ir 4.5 pav.), todėl kaip ir tuo atveju, kai buvo naudojamos techninės druskos kietosios dalelės, analizė nėra atliekama.

Esant vidutiniam iš pasirinktųjų įtekėjimo greičių, kuris lygus 13,9 m/s, nagrinėjamas antrosios fazės dalelių tūrinės dalis ir jų pasiskirstymas ciklono kanaluose, kurie yra pateikiami 4.25 pav.



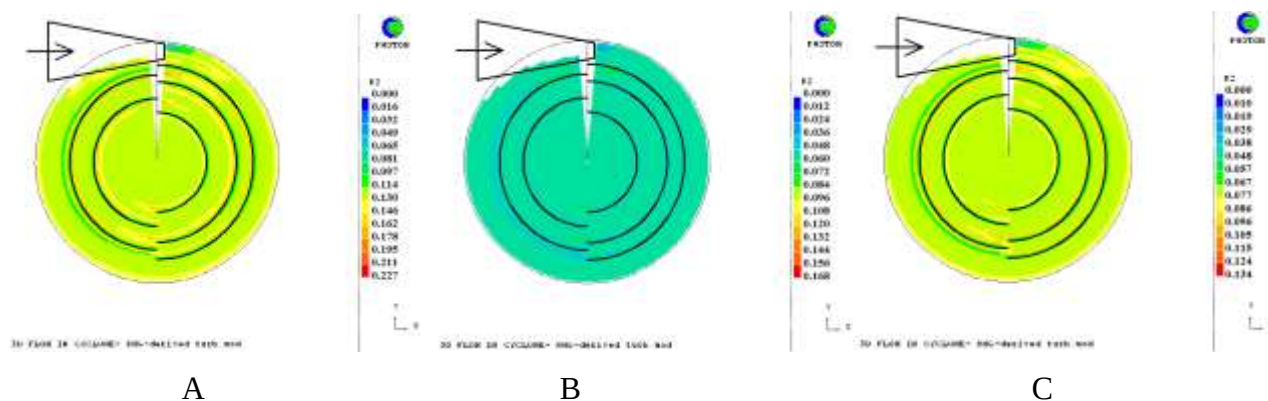
4.25 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 µm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų molio kietąsias daleles

Įleidžiant dvifazį oro srautą, kurio dalelių koncentracija siekia 0,5 g/m³, didžiausia nustatyta dalelių tūrinės dalies vertė siekia 0,226, apskaičiuotas šiuo atveju efektyvumas siekia 77,4 %. Galima matyti, kad panaudojant molio kietąsias daleles, lyginant atvejus, kai panaudojamos kitos kietosios dalelės, ties vidiniu IV pusžiedžio sienelės pasienio sluoksniu, dalelės kaupiasi intensyviau, o antrosios fazės tūrinės dalies vertė toje vietoje siekia apytikriai vidutinį nustatytą tuo atveju lygį, kuris lygus 0,145. Didinant įleidžiamas koncentracijas iki 5 g/m³ ir 10 g/m³,

efektyvumai siekia 64,2 % ir 84,8 %. Kaip galima matyti iš efektyvumo lygių, tendencija išlieka tokia pati, kad efektyvumas esant 5 g/m^3 mažėja, didinant įleidžiamos koncentracijos dydį, o esant 10 g/m^3 vėl didėja ir pasiekia maksimalų iš nagrinėjamų efektyvumo lygį. Dalelių intensyvesnį kaupimąsi, lyginant su atvejais, naudojant kitas kietąsias daleles, galima stebėti ir esant 10 g/m^3 , I kanalo ruože, išilgai periferinės sienelės. Šioje zonoje vertės taip pat siekia vidutinės nustatytas vertes, kurios yra lygios 0,075.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną $10,9 \text{ m/s}$, abiejų fazių greičių ir slėgio pasiskirstymai matematiniame modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki $50 \mu\text{m}$ dydžio (4.7 pav. ir 4.8 pav.), todėl kaip ir tuo atveju, kai buvo naudojamos techninės druskos kietosios dalelės, analizė nėra atliekama.

Kietųjų dalelių iki $50 \mu\text{m}$ dydžio tūrinių dalių bei jų pasiskirstymo ciklono kanaluose nagrinėjimas užbaigiamas, esant mažiausiam iš pasirinktųjų $10,9 \text{ m/s}$ įtekėjimo greičiui, kuris pavaizduojamas 4.26 pav.



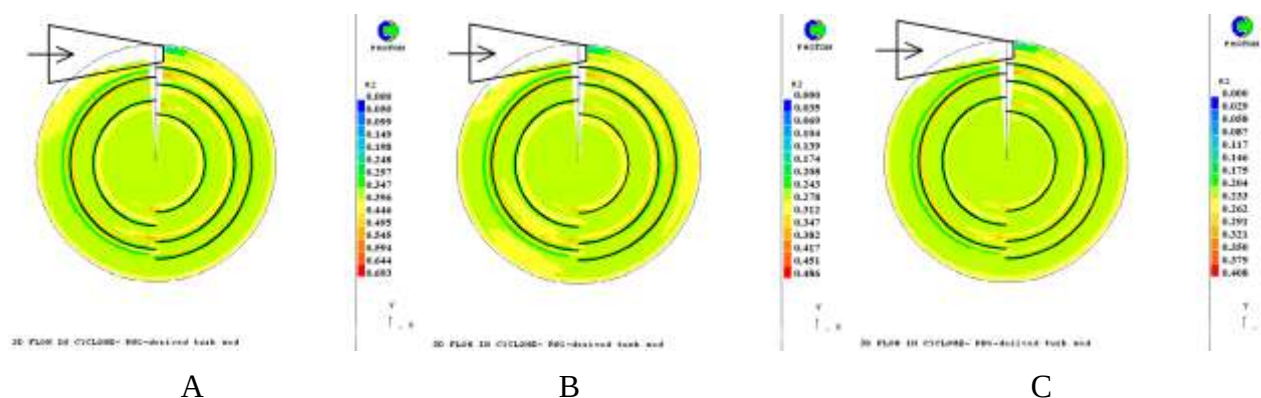
4.26 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir dalelių tūrinė dalis ciklone, esant $10,9 \text{ m/s}$ įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki $50 \mu\text{m}$ dydžio $0,5 \text{ g/m}^3$, 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų molio kietąsias daleles

Įleidžiant mažiausią iš pasirinktųjų $0,5 \text{ g/m}^3$ koncentraciją, didžiausia nustatyta dalelių tūrinės dalies vertė siekia 0,227, šiuo atveju molio dalelių atskirimo efektyvumas lygus 77,3 %. Pasiskirstymas yra labai panašus į gautus rezultatus, esant įtekėjimo greičiui $13,9 \text{ m/s}$, panaudojant tokio pat tipo daleles, tik dalelės ne taip intensyviai kaupiasi I kanale, iškart po įtekėjimo į cikloną. Esant 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 įleidžiamoms molio dalelių koncentracijoms, efektyvumai siekia 83,2 % ir 86,6 %. Kaip jau įprasta, nagrinėjant B atvejį, kai įleidžiama 5 g/m^3 koncentracija, beveik visame ciklono tūryje vyrauja mažesnė už vidutinę dalelių tūrinės dalies vertė, kuri šiuo atveju yra 0,060. Ši vertė kinta tik arti pasienių sluoksnių, ypač, ką galima pastebėti 4.26 pav. (B atvejis), išoriniame II kreivalinijinio pusšiedžio pasienio sluoksnyje, kur yra pasiekiamos 0,024-0,036 vertės.

Matematinio modelio analizė užbaigiama, nagrinėjant smulkiadispersias molio kietąsias daleles iki 20 μm dydžio. Atlikimo metodika išlieka tokia pati kaip ir naudojant daleles iki 50 μm .

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 21,9 m/s, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiniame modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 20 μm dydžio (4.10 pav.), todėl rezultatų analizė nėra kartojama.

Molio kietųjų dalelių tūrinių dalių pasiskirstymai pateikti 4.27 pav.. Esant įleidžiamai 0,5 g/m^3 dalelių koncentracijai, didžiausia R2 vertė lygi 0,693, o gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 30,7 %. Esant kietųjų dalelių koncentracijoms 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 , apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami atitinkamai 51,4 % ir 59,2 %.

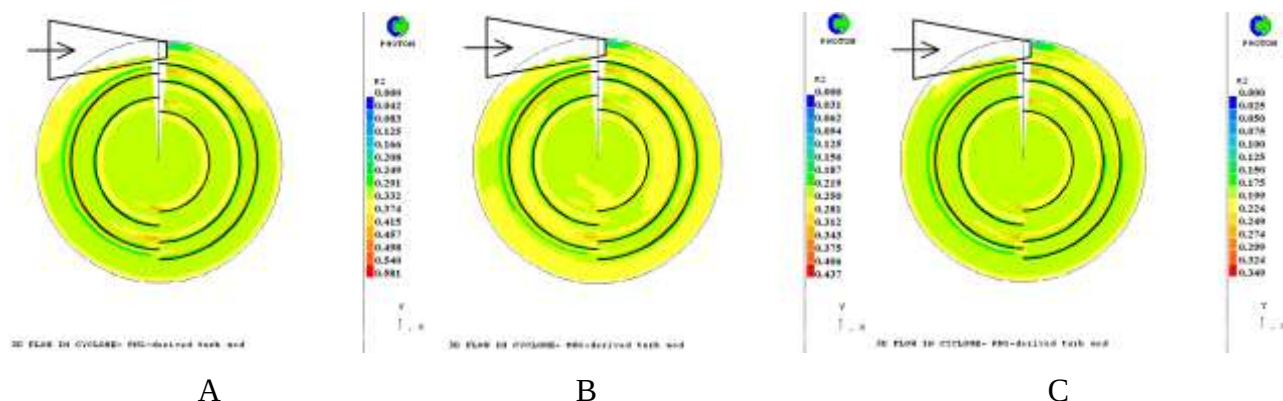


4.27 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μm dydžio 0,5 g/m^3 , 5 g/m^3 ir 10 g/m^3 koncentracijų molio kietąsias daleles

Nesunku pastebėti, kad ciklono kanaluose didesnių dalelių tūrinių dalių reikšmės, lyginant su maksimaliomis, yra pasiekiamos esant 5 g/m^3 . Dalelių tūrinių dalių padidėjimas, ypač B atveju, pasireiškia kanalų perėjimuose, šis efektas ryškiausiai yra pastebimas dvifaziam srautui ištekančiam iš III į IV kanalą. Tokiu būdu, gana didelės dalelių tūrinės dalies, apytikriai 0,278-0,312 verčių, antrosios fazės srauto trajektorija nusitęsia iki beveik IV kanalo vidurio. Esant visais pasirinktais atvejais, dalelių tūrinių dalių padidėjimai, pastebimi III, IV, V ir VI kanalų pradžiose, kur pasiekiamos iki 90 % nuo maksimalių dydžių reikšmės. Svarbu paminėti, II kreivalinijinio pusžiedžio išoriniame pasienio sluoksnyje žymiai mažesnę dalelių tūrinę dalį, kuri vidutiniškai sudaro 75 % nuo vidutinės nustatytos vertės.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 13,9 m/s, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiniame modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 20 μm dydžio (4.12 pav.), todėl rezultatų analizė nėra kartojama.

Nagrinėjant atvejį, panaudojant iki 20 μm molio kietąsias daleles, esant vidutiniam iš pasirinktųjų 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, sudaromas antrosios fazės pasiskirstymas bei nustatytos tūrinės dalys ciklono kanaluose, kurie pateikti 4.28 pav..



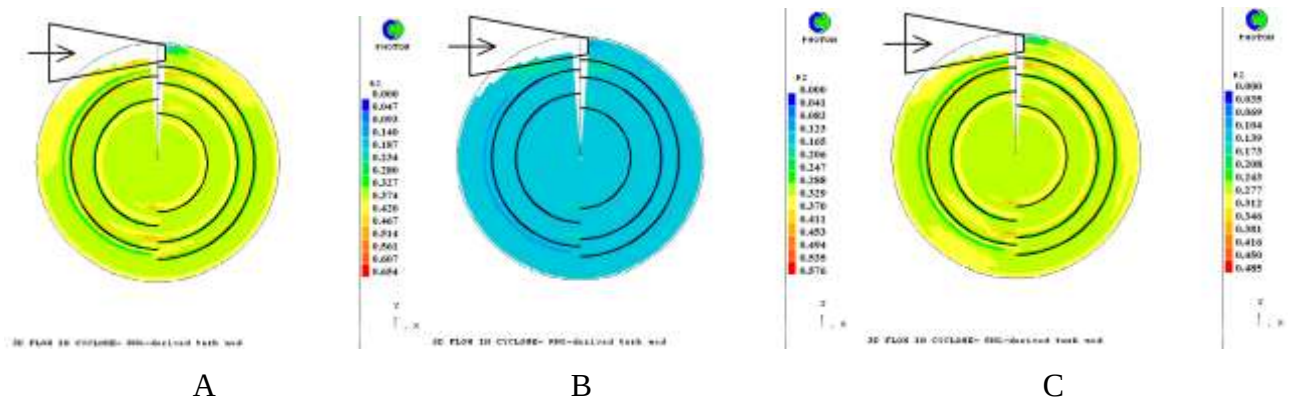
4.28 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 13,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų molio kietąsias daleles

Kaip jau nagrinėtu atveju, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, didesnės dalelių tūrinių dalių reikšmės, lyginant su maksimaliomis, yra pasiekiamos esant 5 g/m³. Tačiau šiuo atveju galima sakyti, kad ruožai, kuriuose neišryškėja dalelių tūrinių dalių padidėjimai, išsidėsto II kanalo viduryje bei III, IV ir V kanalų pabaigose. Šiuose ruožuose yra išlikusios vidutinės dalelių tūrinių dalių vertės, kurios kinta 0,219-0,250 ribose. Esant įleidžiamai 0,5 g/m³ dalelių koncentracijai, didžiausia R2 vertė lygi 0,581, o gaunamas minimalus valymo efektyvumas lygus 41,9 %. Esant kietųjų dalelių koncentracijoms 5 g/m³ ir 10 g/m³, apskaičiuoti minimalūs efektyvumai gaunami atitinkamai 56,3 % ir 65,1 %. Mažų dydžių dalelių tūrinių dalių verčių zona, II kanale prie išorinio II kreivlinio pusšiedžio pasienio sluoksnio, išlieka visais trijų įleidžiamų koncentracijų atvejais.

Esant įtekėjimo greičiui į cikloną 10,9 m/s, abiejų fazių greičių pasiskirstymai matematiniame modelyje nesiskiria nuo jau nagrinėto, naudojant stiklo kietąsias daleles iki 20 μm dydžio (4.14 pav.), todėl rezultatų analizė nėra kartojama.

Užbaigiant matematinio modeliavimo gautų rezultatų analizę, nagrinėjamas paskutinis atvejis, esant minimaliam iš visų pasirinktųjų 10,9 m/s įtekėjimo greitis, panaudojant iki 20 μm molio kietąsias daleles. Antrosios fazės pasiskirstymas bei nustatytos tūrinės dalys ciklono kanaluose pateikiamos 4.29 pav..

Įleidžiant mažiausią iš pasirinktųjų 0,5 g/m³ koncentraciją, didžiausia nustatyta dalelių tūrinės dalies vertė siekia 0,654, šiuo atveju molio dalelių atskirimo efektyvumas lygus 34,6 %. Šiuo atveju, galima matyti, kad dalelės pasiskirsto daugiausiai I, III kanalų pradžiose bei II kanalo pabaigoje, padidėjimą galima stebėti ir srautų persiskirimo vietose, pereinant iš vieno kanalo į kitą.



4.29 pav. Antrosios fazės pasiskirstymas ir tūrinė dalis ciklone, esant 10,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 20 μm dydžio 0,5 g/m³, 5 g/m³ ir 10 g/m³ koncentracijų molio kietąsias daleles

Esant 5 g/m³ ir 10 g/m³ įleidžiamoms molio dalelių koncentracijoms, efektyvumai siekia 42,4 % ir 51,5 %. Kaip ir jau buvo stebėta nagrinėtuose atvejuose, esant įleidžiamai 5 g/m³ koncentracijai (B atvejis), beveik visame ciklono tūryje vyrauja mažesnė už vidutinę antrosios fazės tūrinės dalies vertę, kuri šiuo atveju yra 0,165. Išoriniame II kreivalinijinio pusžiedžio pasienio sluoksnyje yra pasiekiamos didesnės reikšmės, tačiau vertės kinta 0,082–0,247 ribose.

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 Phoenix SFD buvo nustatytos tapačios sąlygos, kurios buvo, atliekant tyrimus su fizikiniu modeliu, todėl galimos paklaidos arba modelio neatitikimo realioms sąlygoms yra minimizuotos.

Kietųjų dalelių atskirimo efektyvumo iš oro (dujų) srauto rezultatai yra artimi gautiems eksperimentinių tyrimų metu. Antrosios fazės pasiskirstymuose detalizuotas filtracijos efektas, vykstantis kanalų perėjimo zonose, bei šiuose taškuose esančių dalelių fazės tūrinių dalių kitimas.

Rezultatai yra pateikti gana išplėsta forma, siekiant kuo vaizdžiau parodyti nagrinėjamų aerodinaminių bei valymo efektyvumo parametrų kitimą, pasikeičiant pradinėms oro valymo įrenginio sistemos parametrams: įtekėjimo greičiui, skirtingos prigimties dalelių dispersiškumui ir koncentracijai.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Nagrinėjant dvifazį oro srautą ciklono kanaluose, nustatytas maksimalus greitis lygus 32 m/s, esant 21,9 m/s įtekėjimo į cikloną greičiui. Greičio kitimas yra nepriklausomas nuo dalelių prigimties bei dispersiškumo, kadangi rezultatai buvo gauti, panaudojant visų trijų rūšių kietąsias

daleles, be to, abiejų fazių maksimalūs greičiai yra vienodi, tačiau skiriasi jų pasiskirstymas ciklono konstrukcijos viduje.

2. Slėgio pasiskirstymui daro įtaka tik įtekėjimo greičio parametras, esant didžiausiam iš pasirinktųjų 21,9 m/s greičiui, II ir IV kanaluose nustatytas maksimalus 883 Pa slėgis, vidutinė slėgio vertė kinta 64 Pa – 269 Pa ribose. Esant 13,9 m/s ir 10,9 m/s įtekėjimo greičiams maksimalūs slėgiai yra atitinkamai lygūs 405 Pa ir 266 Pa.

3. Nustatant šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumą, buvo remiamasi antrosios fazės tūrinėmis dalimis, pagal kurias buvo apskaičiuojamas kietųjų dalelių atskirimo efektyvumo laipsnis ciklone. Nagrinėjant stiklo kietąsias daleles apskaičiuotas didžiausias atskirimo efektyvumas lygus 91,6 %. Ši vertė gauta esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant iki 50 μm dalelių 10 g/m^3 koncentracijos antrosios fazės srautą, tuo atveju įleidžiant iki 20 μm daleles efektyvumas siekia 80,4 %. Šiuo atveju, valymo laipsnis mažėja, mažėjant įtekėjimo greičiui į cikloną, įleidžiamos koncentracijos dydžiui bei dalelių dispersiškumui.

4. Panaudojant techninės druskos kietąsias daleles, pasiektas didžiausias 89,5 % efektyvumas, nustatytas esant dvifazio srauto, užteršto iki 50 μm dalelėmis 10 g/m^3 koncentracijos, 10,9 m/s įtekėjimo greičiui. Tuo atveju, kai įtekėjimo greitis siekia 21,9 m/s, apskaičiuotas valymo efektyvumas lygus 88,5 %. Nagrinėjant smulkiadisverses daleles iki 20 μm dydžio, valymo efektyvumas lygus 78,1 % ir yra didžiausias, esant 21,9 m/s įtekėjimui bei 10 g/m^3 koncentracijai.

5. Molio kietųjų dalelių iki 50 μm dydžio atskirimo efektyvumas didėja, mažinant įtekėjimo greitį į cikloną bei didinant dalelių dispersiškumą. Maksimalus apskaičiuotas efektyvumas siekia 86,6 %, esant 10,9 m/s įtekėjimui bei 10 g/m^3 koncentracijai. Nagrinėjant smulkiadisverses kietąsias daleles iki 20 μm dydžio, atskirimas efektyviausiai vyksta esant 10 g/m^3 koncentracijai ir 13,9 m/s įtekėjimo greičiui.

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

5. Darbo išvados

1. Kietosios dalelės įeina į grupę pagrindinių oro teršalų, išmetamų vykdančią pramoninę, ūkinę veiklą. Teršalų emisijos veikia žmogaus organizmo kvėpavimo, odos, akių, virškinamojo trakto, širdies ir kraujagyslių sistemas, sukeliant ligas bei pasižymi kancerogeniniu poveikiu. Neigiamai veikia gyvūnų organizmams, augalams bei ekosistemoms.

2. Nagrinėjamo išcentrinio oro valymo įrenginio – ciklono, naujų technologijų kūrimo mastas sparčiai didėja, gerinant jų veikimo charakteristikas. Pritaikant tobulesnius techninius sprendimus, yra sumažinamas oro užterštumas kietosiomis dalelėmis įvairiausiuose žmogaus veiklos srityse.

3. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nagrinėjant aerodinaminių charakteristikų parametą – dinaminių slėgių pasiskirstymą ciklono kanaluose, nustatyta didžiausia slėgio vertė, kuri išmatuota esant III kreivalinijinių pusžiedžių padėčiai, o įtekėjimo greitis į cikloną siekė 21,9 m/s, yra lygi 180,3 Pa.

4. Vienas iš pagrindinių aerodinaminių charakteristikų parametrų, darantis įtaką išcentrinį jėgų veikimui – maksimalus greitis ciklone, nustatytas VI kanale, kuris lygus 17,4 m/s, tuo metu, įrenginio ašyje greitis – 19,1 m/s. Didžiausios reikšmės nustatytos esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, esant 13,9 m/s įtekėjimui, dydžiai sumažėja vidutiniškai 15,2 %, o esant 10,9 m/s – 40 % nuo nustatytos maksimalios vertės.

5. Maksimalių energijos nuostolių reikalaujantis atvejis, kuriuo metu nustatytas didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas yra nustatytas esant I pusžiedžių padėčiai bei 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, kurio vertė siekė 449 Pa. Visų nagrinėtų atvejų vidutinis įrenginio pasipriešinimas siekė 260,9 Pa.

6. Pagrindinio ciklono veikimo efektyvumo parametras – kietųjų dalelių atskirimo iš oro (dujų) srauto efektyvumas, buvo nagrinėtas panaudojant skirtingos prigimties ir dispersiškumo kietąsias daleles, kintant aerodinaminiam parametrams. Maksimalus oro (dujų) srauto valymo efektyvumas buvo pasiektas, panaudojant stiklo kietąsias daleles iki 50 μm dydžio, kuris lygus 97,3 %, o iki 20 μm dalelėms siekė 74,1 %.

7. Didžiausias visų eksperimentinių tyrimų efektyvumas buvo pasiektas, esant įstatytiems trimis išoriniams patobulintiems kreivalinijiniams pusžiedžiams su langeliais, esant 21,9 m/s įtekėjimo greičiui, įleidžiant 10 g/m^3 koncentracijos 50 μm stiklo kietąsias daleles, kuris siekė 78,4 %.

8. Taikant matematinio modeliavimo programą, buvo nustatytos įrenginio charakteristikų reikšmės, kurios buvo vidutiniškai 12 % didesnės, lyginant su fizikinio modelio eksperimentinių tyrimų rezultatais.

Rekomendacijos

1. Siūloma diegti šešiakanalį cikloną oro (dujų) srauto valymui nuo smulkiadispersių kietųjų dalelių, kurių dydis siekia iki 20 μm , iki 50 μm bei didesnių frakcijų. Efektyviam dalelių atskirimui greitis ciklono kanaluose turi siekti 15 m/s, tokiu būdu įrenginio našumas bus virš 600 m^3/h . Esant ciklonui su pakeista vidine geometrija, panaudojant pusžiedžius su langeliais, pasiekiamas didžiausias valymo efektyvumas, kuris lygus 78,4 %, panaudojant iki 20 μm daleles bei virš 97 % – iki 50 μm . Racionaliausia iš nagrinėtų yra II pusžiedžių padėtis, kuriai esant pasiekiamas ne tik maksimalus valymo efektyvumas, bet ir patiriami mažiausi energijos nuostoliai, kai ciklono pasipriešinimas siekia tik 413 Pa.

Literatūros sąrašas

- Altmeyer S.; Mathieu V.; Jullemier S.; Contal P.; Midoux N.; Rode S.; Leclers J.P. 2004. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software, *Chem. Eng. Prog.* 43: 511–522.
- Andreussi, P.; Ciandri, P.; Ansiati, A. 2006 05 10. Axial flow cyclone with variable internal arrangement for abating liquid or solid particulate from a gas stream. Patent WO2007/129276A2.
- Aplinkos apsaugos agentūra [interaktyvus]. [žiūrėta 2010 m. gruodžio 1 d.] Prieiga per internetą: <www.aaa.lt>.
- Aplinkos ministerija [interaktyvus]. [žiūrėta 2010 m. gruodžio 10 d.] Prieiga per internetą: <www.am.lt>.
- Avci, A.; Karagoz, I. 2003. Effect of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, *Journal of Aerosol Science* 34: 937–955.
- Baltrėnas, P et al. 2008. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika. 564 p.
- Baltrėnas, P.; Morkūnienė, J.; Vaitiekūnas, P. 2008. Mathematical simulation of solid particle dispersion in the air of Vilnius city, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(1): 15–22.
- Baltrėnas, P.; Ščupakas, D. 2007. *Technogenezė ir visuomenės sveikata*. Vilnius: Technika. 327 p.
- Baltrėnas, P.; Špakauskas, V.; Vaitiekūnas, P. 1997. Sunkiųjų kalibruotųjų aerozolių dispersijos skaitinis modeliavimas, *Aplinkos inžinerija* 2(8): 4–12.
- Baltrėnas, P.; Bakas, A.; Vasarevičius, S.; Masilevičius, R. 2000. *Oro valymo įrenginių katalogas*. Vilnius: Technika.
- Baltrėnas, P.; Butkus, D.; Oškinis, V.; Vasarevičius S.; Zigmontienė A. 2007. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika.
- Beetz, K.; Enderich, A.; Sauter, H.; Schellhase, T.; Stehlig, J. 2005 09 08. Axialzyklon als Ölnebelabscheider eines Kraftfahrzeugs - Verbrennungsmotors. Patent DE 10 2005 042 725 A1.
- Bernardo, S.; Mori, M.; Peres A. P.; Dionisio, R. P. 2006. 3–D computational fluid dynamics for gas and gas-particles flows in a cyclone with different inlet section angles, *Powder Technology* 162(3): 190–200.
- Boysan, F.; Ayers, W. H.; Swithenbank, J. A. 1982. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design, *Institution of Chemical Engineers* 60: 222–230.
- Bradulienė, J.; Vasarevičius, S. 2010. Žvyrkelių dulketumo mažinimo tirpalu "SAFECOTE" ir jo mišiniu su CaCl₂ eksperimentiniai tyrimai, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(2): 141–153.
- Christiansen, B.; Sveberg, K.; Hjelkrem; Kvamsdal. 2005 01 06. Axial demisting cyclone. Patent US 2005/0000200 A1
- Clifford, S. M.; Zhang, J.; Sigsgaard, T.; Jantunen, M.; Liroy, P. J.; Samson, R.; Karol, M. H. 2007. Current state of the Science: health effects and indoor environmental Quality, *Environmental Health Perspectives* 115: 958–964.
- Cristea, E. D.; Malfa, E.; Coghe, A. 1996. 3–D numerical simulation and measurement of strongly swirling heavy dustladen flow inside a cyclone separator, in 3rd International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements. Crete, Greece.
- Criteria Pollutant: Particulate Matter [interaktyvus]. [žiūrėta 2010-10-15]. Prieiga per internetą: <www.easybreathers.org>.
- Curtis, L.; Rea, W.; Smith-Willis, P.; Fenyves, E.; Pan, Y. 2006. Adverse health effects of outdoor air pollutants, *Environment International* 32: 815–830.
- Čyras, P et al. 2003. *Civilinė sauga*. Vilnius: Technika. 156 p.
- Daukšas, J. 2004. *Aplinkos apsaugos technologijos*. Šiauliai: Šiaulių universiteto leidykla. 167 p.

- Derksen, J. J. 2003. Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone, *AIChE Journal* 49: 1359–1371.
- Dirgo, J., Leith, D. (1985b). Performance of theoretically optimized cyclones. *Filtration and Separation*, 22, 119–125.
- EAA signalai. Svarbiausios Europos aplinkos problemos [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010-11-14]. Prieiga per internetą: <www.eea.europa.eu>.
- Europos aplinka: trečiasis įvertinimas [interaktyvus]. 2003. Prieiga per internetą: <www.reports.lt.eea.eu.int>.
- Fluke Electronics [online]. [Cited 12 december 2010]. Available from internet: <www.fluke.com>.
- Gajauskaitė, R et al. 1988. *Gamtos apsauga*. Vilnius: Mintis. 248 p.
- Gimbun, J.; Chuah, T. G.; Fakhru'l-Razi, A.; Choong, T. S. Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study, *Chem. Eng. Prog.* 44: 7–12.
- Gong, A. L.; Wang, L. Z. 2004. Numerical study of gas phase flow in cyclones with the repds, *Aero Technology* 38: 506–512.
- Gražulevičienė, R. 2002. *Žmogaus ekologija*. Kaunas: Vytauto Didžiojo universiteto leidykla. 191 p.
- Gujun, W.; Guogang, S.; Xiaohu, X.; Mingxian, S. 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator, *Powder Technology* (183): 94–104.
- Hoffmann, A. C.; Stein, L. E. 2002. Gas Cyclone and Swirl Tubes-Principles, *Design and Operation*. Springer-Verlag, Berlin.
- Hu L.Y.; Zhou L.X.; Zhang, J; Shi M.X. Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator, *AIChE Journal* 51 (3) (2005) 740–749.
- Ingham, D. B.; Ma, L. 2002. Predicting the performance of air cyclones, *Int. J. Energy Res.* 26: 633–652.
- Jakštonienė, I.; Konoverskytė, S.; Vaitiekūnas, P. 2009. Aerodinaminių procesų modeliavimas kūginiame grįžtamojo srauto ciklone, *Išvalgos* 2(3): 141–149.
- Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2009. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo taikymas ciklono tyrime. *Mokslas - Lietuvos ateitis* 1(4): 51–55.
- Jakštonienė, I.; Serebryansky, 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, Lithuania, Vol. 1. Vilnius: Technika, 2011. ISBN 978-9955-28-263-1. p. 134–138.
- Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2009. Dujų turbulencijos ciklone modeliavimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(5): 17–22.
- Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2011. Daugiakanalio ciklono efektyvumo tyrimai. Iš: keturioliktosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos “Mokslas – Lietuvos ateitis”, įvykusios Vilniuje 2011 m. balandžio 14 d., pranešimų medžiaga. ISBN 978-9955-28-956-2. *Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika, 2011, p. 18–22.
- Juodis, E. 1998. *Vėdinimas*. Vilnius: Enciklopedija. 351 p.
- Kaulakys, J. 1999. *Fizinė technologinė aplinkos tarša. Triukšmas ir vibracija*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 100 p.
- Kavaliauskas, A.; Vaitiekūnas, P. 2001. Modelling of Reynolds stresses in overflowing air stream 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.
- Kenny, L. C.; Gussman, R. A. 1995. Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol preseparators. *Journal of Aerosol Science*, 26, 777–778.
- Klibavičius, A. 1998. *Transporto neigiamo poveikio aplinkai vertinimas*. Mokomoji knygelė. Vilnius: Technika. 40 p.
- Konoverskytė, S.; Vaitiekūnas, P. 2010. Kietųjų dalelių judėjimo C-30 ciklone tyrimas ir analizė. *Aplinkos apsaugos inžinerija*: 19–24.

- Lagutkin et al. Development of new ceramic packing for absorption devices with a larger specific surface. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Vol XVIII, No 1, 2010, p. 38–44.
- LAND 28–98/M–08. 1998. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamosiose dujose nustatymas. Svorio metodas. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos įsakymu Nr.69.
- Lapple, C. E. 1951. Processes use many collector types. *Chemical Engineering*, 58, 144–151.
- Liden, G.; Gudmundsson, A. 1997. Semi-empirical modelling to generalise the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design, *J. Aerosol Sci.* 28(5): 853.
- Lietuvos Respublikos statistikos departamentas [interaktyvus]. [žiūrėta 2010 m. gruodžio 1 d.] Prieiga per internetą: <www.stat.gov.lt>.
- Ma, H.; Ingham, D. B.; Wen, X. 2000. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones, *Elsevier Science*, Great Britain 31(9): 1097–1119.
- Mecklenburg County Particulate Matter [online]. [Cited 24 november 2010]. Available from internet <www.charmeck.org> .
- Meier, M.; Mori, M. 1999. Anisotropic behavior of the Reynolds stress in gas and gas – solid flows in cyclones, *Powder Technology* 101(1999): 108–119.
- Merle, J. 2010 07 06. Appareil de séparation cyclonaire à écoulement axial. Patente O 210 910 A2.
- Moore, M. E., McFarland, A. R. 1993. Performance modeling of single-inlet aerosol sampling cyclones. *Environmental Science and Technology*, 27, 1842–1848.
- Morsi, S. A.; Alexander, A. J. 1972. An investigation of particle trajectories in twophase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics* 55 (2):193–208.
- Myers, I.; Maynard, R. L. 2005. Polluted air-outdoors and indoors, *Occupational medicine* 55: 432–438.
- Nieuwland, J. J.; Meijer, R.; Kuipers, J. A. M.; van Swaaij, W. P. M. 1996. Measurements of solids concentration and axial solids velocity in gas-solid two-phase flows, *Powder Technology* 87: 127–139. doi:10.1016/0032-5910(95)03081-6
- Oškinis, V. 1996. *Dirvožemio ir biotos apsauga*. Vilnius: Technika. 53 p.
- Particulate Matter [interaktyvus]. 2009. U. S. Environmental Protection Agency [žiūrėta 2010 m. gruodžio 2 d.]. Prieiga per internetą: <www.epa.gov/particles>.
- Patankar, S. V. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *Hemisphere* (McGraw-Hill), New York, 176.
- 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.
- Petkuvienė, J.; Paliulis, D. 2009. Experimental research of road maintenance salts and molasses ("Safecote") corrosive impact on metals, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 17(4): 236–243.
- Petraitis, E.; Vasarevičius, S. 2001. Numerical modelling of solid particle dispersion in the atmosphere using the programs "VARSA" and "PHOENICS", *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 9(1): 23–28.
- Pushnov, A.; Berengarten, M. 2011. Ecological aspects of industrial cooling towers exploitation and its influence to environment, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 19(2): 158–166.
- Raoufi, A.; Shams, M.; Kanani, H. 2008. CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*: 1–9.
- Samet, J. M.; Zeger, S. L.; Dominici, F.; Curriero, F.; Coursac, I.; Dockery, D. W.; Schwartz, J.; Zanobetti A. 2000. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II orbidity and mortality from air pollution in the United States. *Research Report of the Health Effect Institute*. 94(2): 5–79.

- Schwartz, J.; Dockery, D. W.; Neas, L. M.; 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of Air & Waste Management Association*. 46: 927–939.
- Slack, M.D.; Prasad, R.O.; Bakker, A.; Boysan, F. 2000. Advances in cyclone modeling using unstructured grids, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 78A 1098.
- Sommerfeld, M.; Ho, C. H. 2003. Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology* 131: 1–6.
- Špakauskas, V.; Vasarevičius, S. 1999. *Gamtonauda*. Mokomoji knyga. Vilnius; Technika. 158 p.
- Spalding, D. B. 2002. PHOENICS 3.5 VR CFD codes. Available from Internet: <<http://cham.co.uk/>>.
- Stairmand, C. J. 1951. Design and performance of cyclone separator, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 29: 356–373.
- STR 2.09.02:2005. Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas, *Valstybės žinios* 75–2729.
- Strauss, N. 1966. *Industrial Gas Cleaning*. Pergamon Press, New York. 56–63.
- Striška, V. 2001. *Aplinkosaugos įrenginiai ir sistemos*. Vilnius: Technika. 255 p.
- Švenčianas, P. 1994. *Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje*. Kaunas: Technologija.
- The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality [online]. 2009. U. S. Environmental Protection Agency. Indoor Air Quality. Publications [Cited 2 december 2010]. Available from internet: <www.epa.gov>.
- Vaiškūnaitė, R. 2005. Aplinkos oro užterštumo iš mobiliųjų taršos šaltinių vertinimo metodika. Metodikos nurodymai kursiniams projektams ir baigiamiesiems darbams. Vilnius: Technika. 52 p.
- Vaitiekūnas, P. 1998. Numerical modelling of convective transfer. Kaunas: *Lithuanian energy institute*. 261 p.
- Vaitiekūnas, P. 2008. Koncentracijos, šilumos ir masės (triukšmo) pernašos procesų modeliavimo programos. Duomenų bankas. Vilnius, VGTU. 34 p.
- Vaitiekūnas, P.; Banaitytė, R. 2007. Modeling of motor transport exhaust dispersoin. *Journal of enviromental engineering and landscape management*. 15(1): 39–46. Prieiga per internetą: http://www.jeel.vgtu.lt/upload/environ_zurn/1-39-46-jeelm-2007-baltr.pdf. ISSN 1648-6897.
- Vaitiekūnas, P.; 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.
- Vaitiekūnas, P.; Katinas, V.; Markevičius, A. Simulation of conductive-convective heat transfer n a natural basin. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Vol XII, No 2, 2004, p. 58–62.
- Valstybinis aplinkos oro monitoringas. Aplinkos apsaugos agentūra[interaktyvus], [žiūrėta 2010 m. rugsėjo 17 d.].
- Wang, B.; Xu, D. L.; Chu, K. W.; Yu, A. B. 2006. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator, *Applied Mathematical Modelling* 30: 1326–1342.
- Wood C.J. 1990. A performance model for coal-washing dense medium cyclones, *Ph.D thesis*, University of Queensland, Australia.
- Yakhot, V.; Orszag, S. A. 1986. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *Journal Sci. Comput.* 1: 1–51.
- Youngmin, J.; Chi, T.; Madhumita, B. Ray. 1999. Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones, *Powder Technology* 113(2000): 97–108.
- Zannetti, P. Numerical simulation modelling of air pollution: an overview, in *Air Pollution, Computational Mechanics Publications*, Southampton, 3–14, (1993).
- Zhao, B.; Su, Y.; Zhang ,J. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration, *Trans IChemE. PA, Chemical Engineering Research and Design* 84: 1158–1165.
- Zhou, L. X.; Soo, S. L. 1990 Gas solid flow and collection of solids in a cyclone separator, *Powder Technology* 63(1): 45–53.

- Аладьев, В.З; Богдвичюс, М. А. 1999. Решение физико-технических и математических задач с пакетом Maple V. Вильнюс. Техника. 686 с.
- Асламова В.С.; Асламов А.А; Жабей А.А.2007. Способ определения эффективности пылеулавливания циклонов. Патент РУ 2 358 810.
- Балтренас, П, Каулакис, Ю. 1994. Technosferos dulkėtumo kontrolės metodai ir įrenginiai [Методы и приборы контроля запыленности техносферы]. Вильнюс: Техника, 207 стр.
- Ватин, Н. И.; Стрелец, К. И. 2003. Oro valymas ciklono tipo įrenginiais [Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон]. Санкт – Петербург. 65 стр.
- Ветошкин, А. Г. 2005. Dulkių sugavimo procesai ir įrenginiai [Процессы и аппараты пылеочистки]. Учебное пособие. Пензенский Государственный университет. Пенза. 210 стр.
- Гришанов, В. Н.; Мордасов В. И.; Гришанов А. В.; Крючков А. Н. 1997. Optinio elektrinio veikimo įrenginys, užterštų dujų kietųjų dalelių koncentracijoms matuoti [Оптикоэлектронное устройство для измерения концентрации твердых частиц в дымовых газах].
- Кочетов О.С.; Голубева М.В. 2007. Цыклон - фильтр. Патент RU 2 338 601 C1.
- Окружающая среда России. Воздух. Prieiga per internetą: <www.eco.priroda.ru>.
- Русанов, А.А. 1983.Справочник по пыли и золоулавливанию. Энергоатомиздат.312 с.
- Серебрянский, Д. А. 2009. Центробежный фильтр пылеулавливания. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. Номер 6.
- Серебрянский, Д. А.; Новаковский Е. В. 2009. Очистка газов от пыли в центробежных фильтрах. *Промышленная теплотехника*. Киев Номер 2–С. 55–61 стр.
- Серебрянский, Д. А.; Приемов, С. И. 2007. Центробежный фильтр. Патент UA 78157.
- Тананаев, А.В. 1995. Инерционный фильтр-сепаратор. Патент РФ 2080939 от 26.01.
- Федоров, Б. С.; Чекалов, Л. В. и др. 2002. *Экотехника*. Экологический консорциум „РОСГАЗООЧИСТКА“. Режим доступа: <http://kondore.newmail.ru/Kniga_20.05.2002>.
- Федоров, Б.С.; Чекалов, Л.В. и др. *Экотехника*. Экологический консорциум "РОСГАЗООЧИСТКА". Prieiga per internetą: <http://kondore.newmail.ru/Kniga_20.05.2002>.
- Штокман, Е.А. Очистка воздуха. М.: издательство АСВ, 1998. 320 с.

AUTORIAUS PUBLIKUOJAMŲ DARBŲ SĄRAŠAS

Autoriaus publikacijų sąrašas

Prof. habil. dr. Baltrėnas, P.; Chlebnikovas, A. 2011. Oro srauto greičių pasiskirstymo šešiakanaliame ciklone eksperimentiniai tyrimai.

Prof. habil. dr. Baltrėnas, P.; Chlebnikovas, A. 2012. Ciklonų su cilindrinio ir spiralinio korpusais eksperimentinių tyrimų analizė. Straipsnis recenzuojamas.

Prof. habil. dr. Baltrėnas, P.; Prof. habil. dr. Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I.; Chlebnikovas, A. 2012. Experimental researches of air flow dynamics parameters using a six channel cyclone, *Global NEST Journal*. ISSN 1790–7632. IF=0,565. Straipsnis recenzuojamas.

Dalyvavimas konferencijose

14-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“. 2011 m. balandžio 14 d., Vilnius

15-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“. 2012 m. balandžio 12 d., Vilnius