

CIKLONŲ SU CILINDRINIU IR SPIRALINIU KORPUSAIS EKSPERIMENTINIŲ
TYRIMŲ ANALIZĖAleksandras Chlebnikovas¹, Pranas Baltrėnas²*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: ¹aleksandras.chlebnikovas@vgtu.lt; ²pbalt@vgtu.lt*

Santrauka. Nagrinėjami ir tarpusavyje lyginami oro srauto parametrai, jų kitimas ir valymo efektyvumas cilindriniam ir spiraliniame ciklone (įrenginiai skirti kietųjų dalelių iš oro srauto su tangentinio srauto įtekėjimu atskyrimui). Eksperimentinių tyrimų metu naudojami daugiakanaliai ciklonai, sukurti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedroje. Tyrimais buvo siekiama išanalizuoti ir palyginti kanalinių ciklonų oro srauto dinaminių slėgių pasiskirstymą įrenginių konstrukcijos viduje, nustatyti ir palyginti oro valymo efektyvumą, kintant oro fazės parametrams, panaudojant skirtingas kietąsias daleles. Ciklonų efektyvumai nustatyti svoriniu metodu, remiantis LAND 28-98/M-08 metodika. Pateikiami cilindrinio ir spiralinio korpusų ciklonų stiklo ir molio 20 μm kietųjų dalelių atskyrimo tyrimų rezultatai, esant įleidžiamai užteršto oro koncentracijai 500 mg/m³ – 15 g/m³, keičiant skirtingos geometrijos kreivalinijinius pusžiedžius. Nustatyta, kad efektyviausiai atskiriamos yra kietosios stiklo dalelės, esant 15 g/m³ pradinei koncentracijai, maksimalus efektyvumas nustatytas cilindriniam ciklone, jis siekia 87,3 %.

Reikšminiai žodžiai: ciklonas, spiralinis, cilindrinis, kietosios dalelės, efektyvumas.

Įvadas

Oro srauto valymas nuo kietųjų dalelių yra atliekamas panaudojant dujų valymo įrenginius. Dalelių gaudytuvai yra skirti technologinių procesų metu išsiskiriančių dalelių iš ištraukiamo oro srauto vėdinimo sistemose atskyrimui.

Dažniausiai sutinkama ciklono tipo konstrukcija, eksploatuojama pramonėje, ekonomiškai palankesnė, lyginant su kitomis technologijomis, tačiau naudojami įrenginiai ne visada geba pasiekti tinkamo dujų-oro srauto išvalymo laipsnio (Gujun *et al.* 2008; Altmeyer *et al.* 2004; Stairmand 1951).

Ciklonai – tarp užteršto oro srauto kietosiomis dalelėmis valymo įrenginių nepalyginami lyderiai. Kainos, paprastumo bei eksploatacijos klausimais ciklonų įrenginiai neturi sau lygių. Dėl savitos konstrukcijos, kurioje nėra jokių judamųjų dalių bei filtruojančių paviršių, reikalaujančių nuolatinio aptarnavimo, palyginamai nedidelio aerodinaminio pasipriešinimo ir didelio efektyvumo ciklonai išliks konkurencingi šiuolaikinėje rinkoje dar ilgą laiką (Avci, Karagoz 2003; Bernardo *et al.* 2006).

Ciklonų veikimas yra paremtas išcentrinėmis jėgų veikimu, kurios kinta priklausomai nuo judančio oro srauto charakteristikų. Oro srauto greitis, temperatūra ir slėgis turi įtakos oro srauto judėjimo pobūdžiui ir veikiančios aerodinaminės jėgos kitimui (Zhoue, Soo 1990; Zhao *et al.* 2006).

Aukšto efektyvumo ciklonai ir filtrai naudojami siekiant sumažinti pramonės dulketumą. Dviems svarbiau-

siems ciklono darbo parametrams – surinkimo efektyvumui ir slėgio kritimui – didelę įtaką turi įleidžiamųjų dalelių koncentracija (Hu *et al.* 2005; Vaitiekūnas, Jakštonienė 2010; Zhoue, Soo 1990; Clifford *et al.* 2007).

Pasaulio mokslininkai studijavo kietųjų dalelių koncentracijos ir srauto temperatūros, t. y. oro temperatūros nuo 300 K iki 2000 K, dujų įleidimo greičio nuo 3 iki 42 m/s ir kietųjų dalelių koncentracijos iki 235,2 g/m³ poveikį ciklono surinkimo efektyvumui ir nustatė, kad dalelių koncentracijos didėjimas surinkimo efektyvumą padidina ypač esant aukštai temperatūrai (Jakštonienė, Vaitiekūnas 2011; Hu *et al.* 2005).

Pagrindinis ciklono įrenginių veikimo trūkumas – nepakankamas dujų srauto nuo skirtingo dispersiškumo kietųjų dalelių, ypač mažesnių nei 10 μm skersmens, išvalymas. Todėl šie įrenginiai dažniausiai naudojami pirminiam oro nuo sausų, nelipnių dalelių valymui. Didėjant oro srauto greičiui virš 15 m/s, dėl atsirandančio pasiurbimo surinkimo bunkerio bei ciklono konusinės korpuso dalies sujungimo vietoje oro valymo efektyvumas taip pat mažėja. Dažnai įrenginiai pasižymi dideliu pasipriešinimu, o tai didina energijos išlaidas veikimo metu bei apriboja įrenginio našumą (Hu *et al.* 2005; Curtis *et al.* 2006; Kenny, Gussman 1995; Pushnov, Berengarten 2011).

Nagrinėjamieji ciklonai suprojektuoti įrengus tangentinį oro srauto įtekėjimą, panaudojant aerodinamines ciklo-

nų savybes, kurių našumai bei efektyvumai yra didesni nei įprastų ciklono įrenginių. Šie įrenginiai, kurių konstrukcija yra žymiai tobulesnė nei įprastų ciklonų įrenginių analogų, skirti sausų kietųjų dalelių iš dujų-oro srauto atskyrimui (Eaoufi *et al.* 2008; Bernardo *et al.* 2006; Jakštonienė *et al.* 2009; Jakštonienė *et al.* 2011).

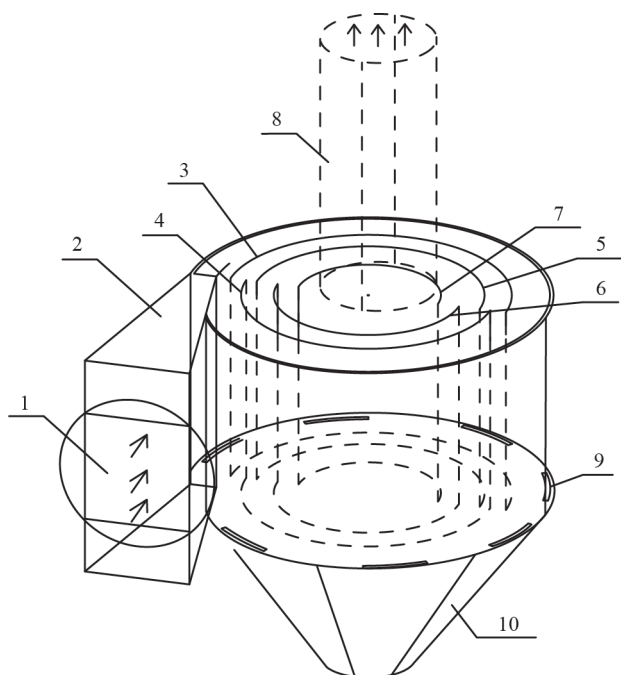
Šio darbo tikslas – nustatyti bei palyginti šešiakanalio ciklono su cilindrinio ir spiraliniu korpusais įrenginių veikimo parametrus, judant dvifaziam oro srautui, siekiant atskirti smulkiadispersę kietųjų dalelių fazę.

Metodika

Nagrinėjami oro valymo įrenginių eksperimentiniai standai įrengti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje.

Nagrinėjami daugiakanaliai ciklonai – naujos kartos įrenginiai su cilindrinio ir spiraliniu korpusais, galinčiais pašalinti labai smulkias kietąsias daleles nuo 2 mikronų dydžio bei pasiekti virš 98 % bendrą efektyvumą. Daugiakanalis ciklonas yra alternatyva elektrostatiniam filtrui. Oro valymas gali vykti esant padidėjusiai temperatūrai ir drėgmei.

Ciklono įrenginių principinė schema pavaizduota 1 paveiksle.



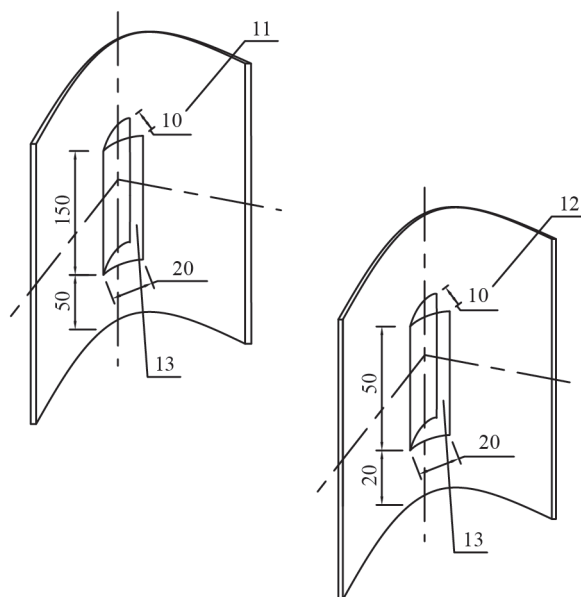
1 pav. Ciklono konstrukcijos principinė schema: 1 – oro srauto įėjimo anga; 2 – difuzorius; 3, 4, 5, 6, 7 – skirtingo spindulio kreivalinijiniai pusžiedžiai; 8 – oro srauto išėjimo anga; 9 – ciklono dugnas su segmentiniais žiediniais plyšiais; 10 – ciklono kūginis bunkeris; 11 – cilindrinio korpuso ciklono kreivalinijinis pusžiedis su išpjautu langeliu; 12 – spiralinio korpuso ciklono kreivalinijinis pusžiedis su išpjautu langeliu; 13 – langelis su keičiamu išlenkimo pločiu

Fig. 1. Schematic diagram of six-channel cyclone structure: 1 – airflow inlet; 2 – diffuser; 3, 4, 5, 6, 7 – curvilinear semi-rings of different radii; 8 – airflow outlet; 9 – bottom with segment circular spaces; 10 – conical hopper; 11 – curvilinear semi-ring with a cut window; 12 – window with a changeable area of curvature; 13 – window with adjustable curved width

Dvifazis oro srautas tangentiškai įteka pro įėjimo angą (1) ir patenka į separavimo kamerą, į pirmąjį ciklono kanalą, kuris yra ribojamas periferine sienele bei pirmuoju kreivalinijiniu pusžiedžiu. Tokiu būdu tekėdamas oro srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose bei filtruojasi per tarpus, esančius tarp pusžiedžių. Išcentrinė jėgų veikimu, sukurtu sūkurinio srauto, kietosios dalelės yra nusodinamos ant šešiakanalio ciklono dugno bei patekusios į segmentinius žiedinius plyšius (9) krenta bei kaupiasi ciklono bunkeryje (10). Išvalytas oras, praėjęs pro visus šešis ciklono kanalus, išteka iš sistemos per oro srauto išėjimo angą (8). Dulkėtas oras yra filtruojamas dėl kanalų tarpų aktyviojoje zonoje bei pačių kietųjų dalelių sąveikos, joms koaguluojant.

Dinaminių slėgių aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai buvo atliekami su vienfaziu oro srautu. Ciklonų oro valymo efektyvumas buvo nustatomas, įleidžiant tinkamai iki 20 μm apdorotas kietąsias stiklo bei molio daleles. Dinaminiai oro srauto slėgiai išmatuoti, naudojant Pito-Prandtlio dinaminį vamzdelį, prijungtą prie daugiafunkcio Testo-400 matuoklio atitinkamuose ciklono konstrukcijos vidaus kanaluose.

Matuojant dinaminį slėgį Pito-Prandtlio vamzdelis guminėmis žarnelėmis, kurių vidinis skersmuo lygus 6 mm, išorinis – 8 mm, buvo sujungiamas su Testo-400 matuokliu. Ciklonų separavimo kamerų dangčiuose padarytos kiaury-



mės suteikė galimybę įstatyti dinaminio slėgio matavimo vamzdelį reikšmingiausiose vietose: pusžiedžių bei periferijos pasienio sluoksniuose 2 mm atstumu nuo kiekvieno kreivalinijinio pusžiedžio paviršiaus, pirmajame kanale, tarpe tarp pusžiedžių (atstumo viduryje). Išmatuotas ašinis įrenginio dinaminis slėgis, kuris patenka į šeštąjį kanalą.

Šešiakanalių ciklonų aerodinaminiai pasipriešinimai parodo, koks slėgis yra prarandamas, pratekant oro srautui per daugiakanalius ciklonus. Aerodinaminis pasipriešinimas buvo išmatuotas panaudojant diferencialinį slėgio matuoklį DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa). Guminėmis žarnelėmis buvo sujungti matavimo prietaisai 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 buvo registruojami diferencialinio slėgio matuoklio rodmenys.

Dinaminių slėgių bei aerodinaminio pasipriešinimo matavimų dydžiai matuojami po tris kartus – taip išvengiama sisteminių klaidų bei sumažinama gauto trijų bandymų rezultatų vidurkio paklaida.

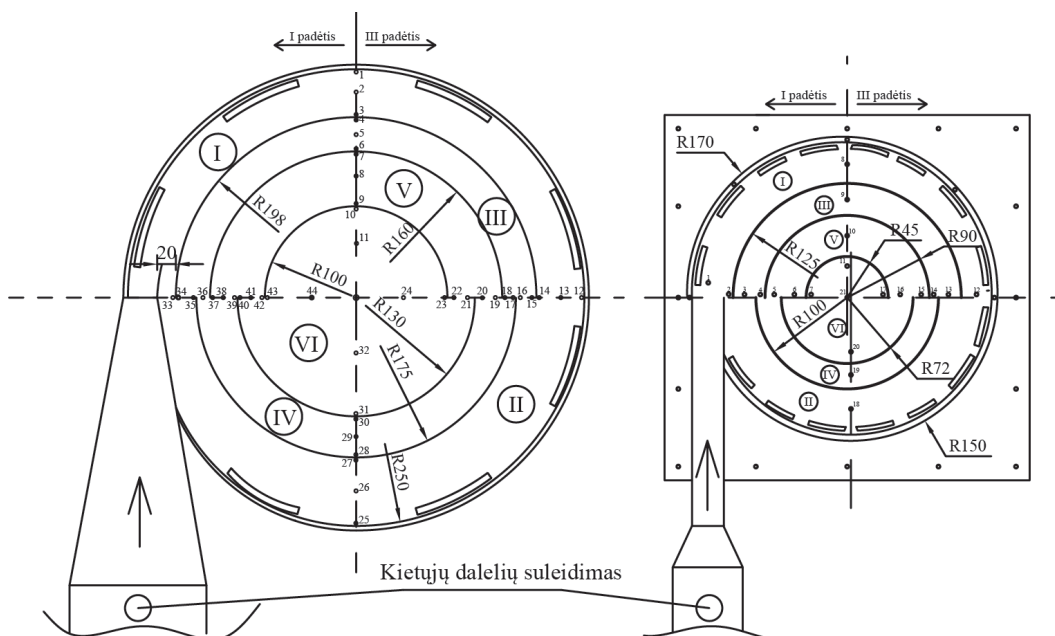
Cilindriniam ciklonui yra parenkamas maksimalus srautas, kuriam esant įtekėjimo greitis lygus 21,9 m/s. Spiraliniam ciklone įrengtas ašinis ventilatorius, kurio pučiamo oro srauto reguliavimas nėra numatytas, todėl parenkamas nominalus našumas, kuriam esant sukuriama 17,8 m/s įtekėjimo greitis.

Reguliuojant kreivalinijinių pusžiedžių kanalų tarpus, atliekami dinaminių slėgių ir aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai – buvo parinktos trys padėties. Taikant šį reguliavimo būdą, siekiama nustatyti tinkamiausią pusžiedžių išdėstymą, norint pasiekti optimalias įrenginio aerodinamines savybes bei oro valymo efektyvumą.

Reguliuojant pusžiedžių padėtis, jie buvo išdėstomi su 10 mm poslinkiu į kairę pusę – esant I padėčiai ir su 10 mm poslinkiu į dešinę – esant III padėčiai nuo pateiktos 2 paveiksle II pusžiedžių padėties. Reguliavimo metu buvo perstatomi: antrasis pusžiedis – 175 mm spindulio cilindrinio korpuso ciklone ir 100 mm – spiralinio korpuso ciklone; trečiasis – atitinkamai 160 mm ir 90 mm ir ketvirtasis – 130 mm ir 72 mm.

Šešiakanalių ciklono, skirto užterštam oro srautui valyti, efektyvumo nustatymo eksperimentiniams tyrimams pasirinktos kietosios dalelės, kurios susidaro pramonėje.

Ciklonų efektyvumo nustatymo eksperimentiniams tyrimams dalelių padavimui į įeinančio oro srauto ortakį buvo panaudojamas aukšto slėgio kompresorius, kuriuo sudaromas oro slėgis siekia 6 barus. Kompresorius sujungiamas su tiekimo purkštuku, kuriuo yra įsiurbiamos dulkių dalelės, tiesiogiai tiekiant jas į įeinantį oro ciklono ortakį, kurio skersmuo siekia 200 mm (cilindrinis korpusas) ir 160 mm (spiralinis korpusas), tokiu būdu sudarydamas išsklaidytąjį dvifazį oro srautą. Tyrimams naudojami: stikliniai indeliai, į kuriuos sudedami bandiniai, svarstyklės bandinių



2 pav. Ciklonų vidinės konstrukcijos: I–VI – ciklono kanalai; R1–R5 – kreivalinijiniai pusžiedžiai; 1–44 (cilindrinis korpusas (iš kairės)) ir 1–21 (spiralinis korpusas (iš dešinės)) – dinaminių oro srauto slėgių matavimo taškai

Fig. 2. Internal structures of cyclones (semi-ring position II): I–VI – channels of the cyclone; R1–R5 – curvilinear semi-rings; 1 – 44 – cylindrical shell (from the left) and 1 – 21 (spiral shell (from the right)) – measurement points of dynamic airflow pressure

svoriui nustatyti (paklaida ±; sekundmatis *Sekonda* – buvo fiksuojamas oro traukimo laikas (paklaida ±0,2 s).

Ciklonų valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami, remiantis „LAND 28-98/M-08 Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos nustatymas. Svorinis metodas“ metodika. Bandinių sijojimui yra panaudojami 20, 50, 100, 500 μm akučių dydžio sietai. Eksperimentiniams bandymams panaudojami tik 0–20 μm dalelių dydžio dalelių dalis. Likusioji dalis yra pakartotinai sijojama. Eksperimentinių tyrimų metu aplinkos temperatūra kito nuo 20,1 °C iki 22,2 °C, o santykinė drėgmė siekė 52 %.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti ir panaudojant patobulintą kreivalinijinių pusžiedžių konstrukciją – langelio įrengimas pusžiedžio konstrukcijoje (2 pav.). Tokiu konstrukciniu sprendimu padidinamas užteršto oro srauto filtracijos ciklono kanaluose laikas.

Langelis suteikia galimybę oro srautui pakartotinai patekti į ankstesniojo kanalo dalį. Langelis yra išpjautas žemiau horizontalios pusžiedžio simetrijos linijos tam, kad užtikrintų būtent kietųjų dalelių patekimą į sienelę ribojantį kitą kanalą, tačiau neužtvirtų kelio švariajam orui patekti kanalu toliau link oro ištekėjimo angos. Įmanoma langelio reguliavimo galimybė, keičiant išpjauto langelio išlenkimo plotį. Eksperimentuose buvo tiriamas atvejis su pirmaisiais trimis išoriniais pusžiedžiais, kuriuose įrengti langeliai, esant 2 cm langelio išlenkimo pločiui, išliekant vidinei šešiakanalio ciklono konstrukcijai su likusiais nepatobulintais kreivalinijiniais pusžiedžiais.

Kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas buvo nustatomas, kintant įleidžiamam pasirinktų kietųjų dalelių kiekiui. Kietųjų dalelių koncentracijos užterštame ore kito nuo 500 mg/m³ iki 10 g/m³.

Kietųjų dalelių masės koncentracija ore apskaičiuojama pagal (1) formulę (LAND 26-98/M-06...Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos nustatymas. Svorinis metodas):

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0}, \quad (1)$$

čia: C – dulkių koncentracija, mg/m³; m₁ – filtro be kietųjų dalelių masė, mg; m₂ – filtro su kietosiomis dalelėmis masė, mg; V₀ – per filtrą prasiurbto oro tūris, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis, m³.

Kadangi tyrimai buvo atlikti su skirtingos prigimties stiklo ir molio dulkėmis, atlikus tyrimus su pirmojo tipo mėginiais, visa sistema (žarnelės, ciklono konstrukcija) yra išvaloma, prapučiant ją didelio greičio srautu.

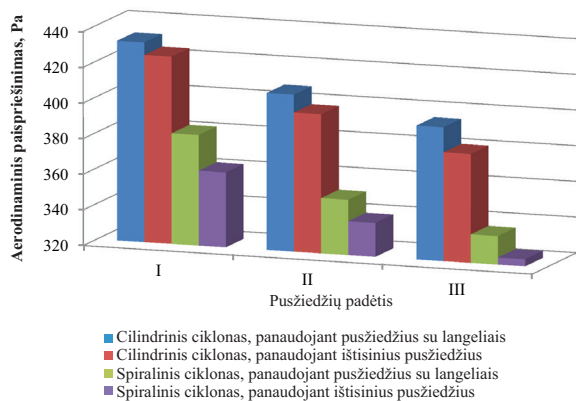
Rezultatai ir jų analizė

Atlikus eksperimentinius aerodinaminių charakteristikų tyrimus, nustatyti vidutiniai dinaminiai slėgiai ciklonų kanaluose, esant tokiems įtekėjimo į ciklonus greičiams: cilindrinį – 21,9 m/s ir 17,8 m/s – spiralinį. Rezultatai pateikiami 1 lentelėje.

Dinaminiai slėgiai buvo matuojami taškuose, nurodytuose 2 pav., kiekviename kanale, tarpe tarp kreivalinijinių pusžiedžių (atstumo viduryje). Visi duomenys sugrupuoti pagal kanalus, į kuriuos patenka, apskaičiuotos vidutinės dinaminių slėgių reikšmės. Galima matyti, kad didesni dinaminiai slėgiai nustatyti cilindriniam ciklone. Cilindrinio ciklono tūris yra daugiau kaip 7,3 karto didesnis už spiralinį cikloną, tačiau įrengtas ventiliatorius, nustatytas maksimaliu galingumu, sukuria didesnę oro srautą. Maksimaliu dinaminio slėgio reikšmė išmatuota esant III pusžiedžių padėčiai šeštame cilindrinio ciklono kanale, kuri lygi 180,3 Pa. Tuo tarpu spiraliniame ciklone maksimali reikšmė gauta esant I pusžiedžių padėčiai šeštame ciklono kanale, kuri lygi 177,5 Pa. Esant kitoms pusžiedžių padėtimis, gautos reikšmės buvo nustatytos taip pat šeštame kanale: cilindriniam ciklone – 177,0 Pa ir 179,5 Pa (I-oji ir II-oji padėty) ir spiraliniame ciklone – 176,8 Pa ir 175,1 Pa.

1 lentelė. Dinaminių slėgių kitimas cilindriniam ir spiraliniame ciklonuose, priklausomai nuo pusžiedžių padėties ir geometrijos
Table 1. Changes in dynamic pressure in the cyclones of cylindrical and spiral shells depending on the positions and geometry of curvilinear semi-rings

Vidutiniai dinaminiai slėgiai, esant I, II ir III pusžiedžių padėtimis, Pa	I kanalas	II kanalas	III kanalas	IV kanalas	V kanalas	VI kanalas	Ašinis
Cilindrinis ciklonas, esant ištisiniams pusžiedžiams	60,1	71,5	101,9	125,1	157,8	176,8	224,4
	57,7	72,8	100,2	127,5	157,1	179,2	222,6
	55,9	74,5	100,8	128,8	156,8	180,1	220,5
Cilindrinis ciklonas, esant pusžiedžiams su langeliais	61,0	72,5	103,5	125,5	158,5	177,0	225,1
	58,7	74,0	101,7	128,0	157,7	179,5	223,6
	57,5	75,5	101,5	129,0	157,0	180,3	221,8
Spiralinis ciklonas, esant ištisiniams pusžiedžiams	57,7	62,2	66,3	78,8	99,8	177,3	187,0
	57,1	60,8	67,5	78,0	101,0	176,5	183,8
	56,1	59,6	68,6	77,2	103,2	175,0	181,3
Spiralinis ciklonas, esant pusžiedžiams su langeliais	58,4	62,8	67,1	79,2	100,1	177,5	187,5
	57,6	61,6	68,2	78,5	101,4	176,8	184,5
	56,8	60,3	69,3	77,8	103,5	175,1	182,3



3 pav. Ciklonų įrenginių aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo kreivalinijinių žiedų tipo ir išdėstymo

Fig. 3. The dependence of aerodynamic resistance of cyclones on the types and positions of curvilinear semi-rings

Maksimalūs dinaminiai slėgiai ciklonų konstrukcijų viduje nustatyti įrenginių ašyse šeštuose kanaluose. Didžiausios reikšmės nustatytos cilindriniam ciklone, kurių maksimalus dydis siekia 225,1 Pa. Spiraliniame ciklone ši vertė siekia tik 187,5 Pa.

Pagal gautus rezultatus pastebima, kad oro srautui pereinant iš vieno ciklono kanalo į kitą vidutinis dinaminis slėgis pakinta vidutiniškai 1,05–1,45 karto, taip atsitinka dėl kanalo skerspjūvio sumažėjimo, tuo pačiu padidėja dinaminis slėgis bei greitis.

Sūkurinio srauto judėjimui įtakos turi kintamo spindulio spiralinio ciklono konstrukcija. Dėl šios konstrukcijos ypatybių pastebimas dinaminis slėgių skirtumas, keičiant kreivalinijinių pusžiedžių padėtis. Dinaminiai slėgiai spiraliniame ciklone pirmajame ir lyginiuose kanaluose (II, II, VI) yra didžiausi, esant I pusžiedžių padėčiai, o nelyginiuose (III, V) – esant III padėčiai. Tuo tarpu cilindriniam ciklone dinaminiai slėgiai gauti didžiausi, esant III padėčiai lyginiuose kanaluose, ir atvirkščiai, esant I padėčiai – nelyginiuose.

Išmatuoti aerodinaminiai valymo įrenginių pasipriešinimai, priklausomai nuo vidinio pusžiedžių išdėstymo (3 pav.), esant nominaliu galingumu įjungtiems ventiliatoriams. Pagal gautus eksperimentinių bandymų rezultatus galima spręsti, kad įrenginiai sukuria mažą pasipriešinimą, maksimalus slėgis, esant įtekėjimo greičiui į cilindrinį cikloną – 21,9 m/s, siekia tik 432 Pa, spiralinio ciklono – 382 Pa, esant įtekėjimui 17,8 m/s. Keičiant pusžiedžių padėtis, priklausomai nuo krypties keičiasi ir aerodinaminis pasipriešinimas. Didžiausias cilindrinio ciklono pasipriešinimas yra gautas esant I pusžiedžių padėčiai, t. y., kai jie yra pastumiami 10 mm nuo II padėties link tangentinio įtekėjimo deflektoriaus (2 pav.).

Tolstant nuo įtekėjimo deflektoriaus sienelės į dešinę, esant II padėčiai, susidaro maksimalus aerodinaminis pasiprie-

šinimas – 408 Pa, o esant III padėčiai mažiausias – 395 Pa. Tokia pat priklausomybė kinta ir spiralinio ciklono pasipriešinimas. Išdėsčius pusžiedžius II padėtyje, didžiausias pasipriešinimas siekia 351 Pa, o III padėtyje – 336 Pa. Pasipriešinimui turi įtakos ir įrengti kreivalinijiniuose pusžiedžiuose langeliai, kurie padidina šią reikšmę vidutiniškai 4 %. Tačiau dėl šios pusžiedžių geometrijos pakeitimų yra padidinamas filtracijos efektas, o tuo pačiu įrenginio valymo efektyvumas.

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 (Jakštonienė, Vaitiekūnas 2009).

Tyrimų metu buvo nagrinėjami šešiakanalių cilindrinio ir spiralinio ciklonų oro srauto, užteršto kietosiomis dalelėmis, valymo efektyvumai. Tiriamų kietųjų stiklo ir molio dalelių koncentracijos buvo nustatomos svoriniu metodu. Eksperimentinių tyrimų metu kietųjų dalelių koncentracijos prieš valymą buvo keičiamos nuo 500 mg/m³ iki 15 g/m³. Tyrimais buvo siekiama nustatyti kietųjų dalelių atskyrimo laipsnį skirtingos koncentracijos užterštame oro sraute bei palyginti patobulintų šešiakanalių ciklonų veikimo efektyvumą.

Koncentracijų bei efektyvumo nustatymui maksimalus įtekėjimo greitis cilindriniam ciklone siekė 21,9 m/s, spiraliniame – 17,8 m/s. Valymo efektyvumo tyrimai buvo atlikti esant optimaliai – II kreivalinijinių pusžiedžių padėčiai. Nagrinėjami šešiakanalio ciklono oro valymo efektyvumai, esant smulkiadispersėms dalelėms (iki 20 μm) bei skirtingai vidinei įrenginio geometrijai (panaudojant ištisinius pusžiedžius ir kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais).

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 (1 pav.).

Išmatavus kietųjų stiklo dalelių koncentracijas prieš ir po valymo oro srauto ortakiuose, apskaičiuotas didžiausias išvalymo efektyvumas spiraliniame ciklone siekė 87,3 %, esant 15 g/m³ kietųjų dalelių koncentracijai, panaudojant patobulintus pusžiedžius su langeliais. Esant toms pačioms sąlygoms cilindrinio ciklono efektyvumas lygus 78,4 %. Kintant įleidžiamai kietųjų dalelių koncentracijai, santykis tarp skirtingų korpusų ciklonų išlieka gana vienodas. Spiralinio ciklono išvalymo laipsnis vidutiniškai yra 11,3 % didesnis už cilindrinį cikloną.

Mažiausias efektyvumas gautas, esant 500 mg/m³ koncentracijai, stiklo dalelėms ir yra lygus 48,5 % vei-

kiant cilindriniam ciklonui ir 53,1% – spiraliniam. Tiriant efektyvumą, esant įprastai vidinei geometrijai, panaudojant ištisinius kreivalinijinius pusžiedžius, maksimalus išvalymo laipsnis taip pat gautas, esant didžiausiai įleidžiamai koncentracijai – 15 g/m^3 , ir siekia 81,7% – spiraliniam bei 74,1% – cilindriniam ciklonui. Minimalus efektyvumas – 48,5% (spiralinio) ir 53,1% (cilindrinio), nustatytas esant pradinei 500 mg/m^3 koncentracijai (4 pav.).

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

Mažiausias efektyvumas gautas, esant 500 mg/m^3 koncentracijai, stiklo dalelėms ir yra lygus 48,5% veikiant cilindriniam ciklonui ir 53,1% – spiraliniam. Tiriant efektyvumą, esant įprastai vidinei geometrijai, panaudojant ištisinius kreivalinijinius pusžiedžius, maksimalus išvalymo laipsnis taip pat gautas, esant didžiausiai įleidžiamai koncentracijai – 15 g/m^3 , ir siekia 81,7% – spiraliniam bei 74,1% – cilindriniam ciklonui. Minimalus efektyvumas – 48,5% (spiralinio) ir 53,1% (cilindrinio) nustatytas esant pradinei 500 mg/m^3 koncentracijai (4 pav.).

Lyginant molio kietųjų dalelių gautus eksperimentinių tyrimų duomenis, didžiausias išvalymo efektyvumas pasiektas, esant taip pat didžiausiai įleidžiamai koncentracijai (15 g/m^3), yra mažesnis už stiklo dalelių sugavimo efektyvumą: cilindriniam ciklone, panaudojant ištisinius pusžiedžius siekia 64,5%, o panaudojant pusžiedžius su langeliais – 69,3%, gauti efektyvumai atitinkamai 1,16 ir 1,13 karto mažesni, negu naudojant stiklo daleles. Spiraliniame ciklone, panaudojant ištisinius pusžiedžius, efektyvumų skirtumas tarp ciklonų siekia 20%, pasiekus 68,1% valymo efektyvumą, o panaudojant pusžiedžius su langeliais – 18%, esant 74,1% efektyvumui (5 pav.).

Analizuojant smulkiadispersių kietųjų dalelių sugavimo laipsnį, pastebima, kad abiejuose ciklonuose molio dalelės yra sugaudoamos ne taip efektyviai, lyginant su stiklo dalelėmis, tačiau skirtingų dalelių tipų atskyrimo laipsnis yra tolygesnis cilindriniam ciklonui negu spiraliniame.

Nagrinėjant skirtingų korpusų ciklonus bei vidinės geometrijos atvejus, valymo efektyvumo vidurkis, įleidžiant stiklo ir molio daleles, skiriasi 1,17 karto.

Maksimalus oro valymo efektyvumas nuo molio kietųjų dalelių, naudojant ištisinius pusžiedžius cilindriniam ciklone, lygus 64,5%, t. y. 9,6% mažiau negu stiklo dalelių, spiraliniame ciklone ši reikšmė lygi atitinkamai 68,1% ir 13,6%. Oro valymo efektyvumo priklausomybių nuo koncentracijos tendencija išlieka ta pati, išvalymo laipsnis didėja, didėjant koncentracijai.

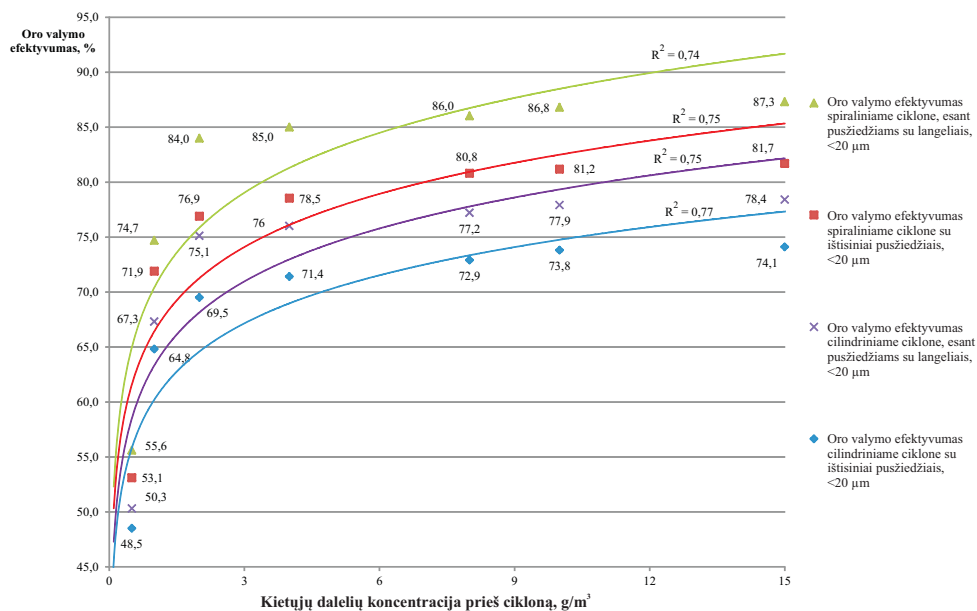
Panaudojant patobulintus kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais, gauti valymo efektyvumai tiriant stiklo ir molio kietąsias daleles abiejų konstrukcijų ciklonuose skiriasi 1,07 karto. Šių pusžiedžių konstrukcija labiausiai padidino valymo efektyvumus, panaudojant juos cilindriniam ciklone, atskiriant molio daleles.

Nagrinėjant ištirtų kietųjų dalelių sugavimo efektyvumą, galima spręsti, kad molio dalelėmis užterštas oro srautas nėra taip efektyviai valomas nagrinėtuju oro valymo įrenginiu, o to priežastis galėtų būti nagrinėjamųjų dalelių savybių, tokių kaip tankis, forma, aglomeracijos procesų laipsnis, savitumas. 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, Vaitiekūnas 2011; Mothes and Löffler 1988). Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas šešiakanalio ciklono konstrukcijos viduje veikia sistemos aerodinamines savybes – dinaminį slėgį, o tuo pačiu ir greitį bei aerodinaminį sistemos pasipriešinimą. Mažėjant tarpams tarp pusžiedžių ir periferinės sienelės, didėja veikiančios dinaminės jėgos, o tai sukelia kitų parametrų kitimą. Pakitę dinaminiai slėgiai veikia dulkių dalelių sugavimo efektyvumą, kai dalelės į bunkerį yra išnešamos ištisiniu srautu pro dugne esančius segmentinius žiedinius plyšius. Dinaminį slėgių pasiskirstymas patvirtina literatūroje aprašytas bei bandymais įrodytas aerodinamines įrenginio konstrukcijos savybes, kurios leidžia nustatyti galimus konstrukcijos ypatumus, defektus bei tobulinti sukurtus įrenginius.

Didinant įleidžiamos dalelių koncentracijos lygį, oro valymo efektyvumas didėja, o tai 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.

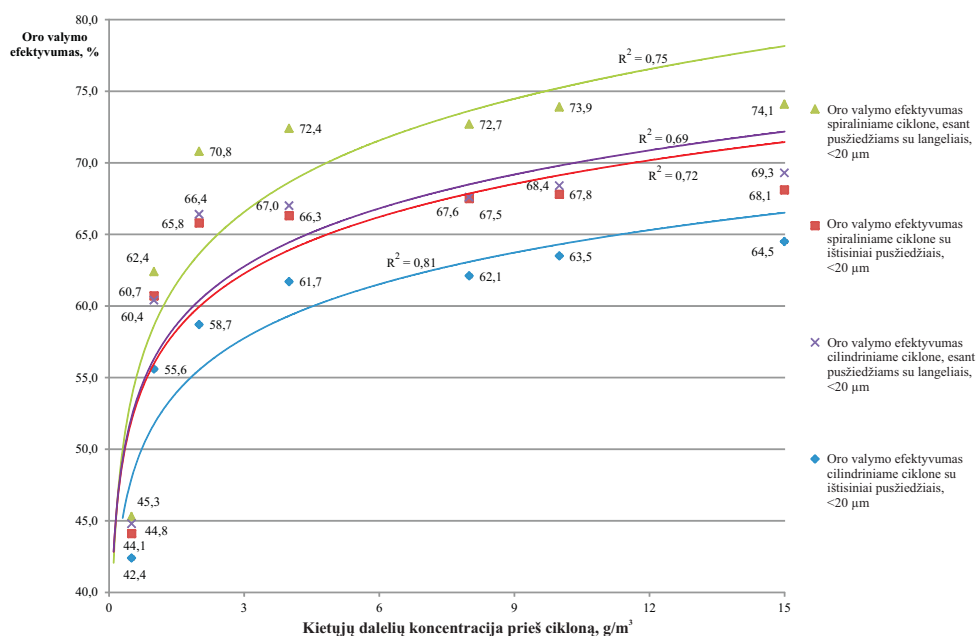
Išvados

1. Atlikus eksperimentinius ciklonų dinaminį slėgių tyrimus, nustatyta didžiausia vertė, išmatuota cilindrinio ciklono šeštame kanale, lygi 180,3 Pa. Spiraliniame ciklone reikšmė yra lygi 177,5 Pa.
2. Nustatytas spiralinio ciklono didžiausias pasipriešinimas siekia 382 Pa, cilindrinio korpuso ciklonui – 432 Pa. Kreivalinijinių pusžiedžių išdėstymas ir geometrija lemia aerodinaminio pasipriešinimo vertę, pastaroji didėja, artėjant link įtekėjimo deflektoriaus sienelės, esant I padėčiai, bei panaudojant kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais.



4 pav. Cilindrinio ir spiralinio ciklonų oro valymo efektyvumas, kintant stiklo kietųjų dalelių koncentracijai bei vidinei įrenginio geometrijai

Fig. 4. Air cleaning efficiency of six-channel cyclones of cylindrical and spiral shells depending on the concentration of solid glass particles and the internal geometry of the device



5 pav. Cilindrinio ir spiralinio ciklonų oro valymo efektyvumas, kintant molio kietųjų dalelių koncentracijai bei vidinei įrenginio geometrijai

Fig. 5. Air cleaning efficiency of six-channel cyclones of cylindrical and spiral shells depending on the concentration of clay particles and the internal geometry of the device

3. Oro valymo efektyvumo tyrimams buvo panaudotos tik iki 20 μm dydžio kietosios stiklo ir molio dalelės, kurias atskirti iš oro srauto tipinės konstrukcijos ciklonai negali. Naudojant kietąsias stiklo daleles, pasiektas maksimalus valymo efektyvumas spiralinio korpuso ciklone

lygus 87,3 %, esant 15 g/m³ įleidžiamai koncentracijai, panaudojus kreivalinį pusžiedžius su langeliais. Cilindrinio korpuso ciklone efektyvumas yra vidutiniškai 11,3 % mažesnis ir maksimalus yra lygus 78,4 %.

4. Kietųjų molio dalelių atskyrimo iš oro srauto efektyvumo didžiausia vertė siekia 74,1 %, ji yra nustatyta, naudojant spiralinio korpuso cikloną, įstačius kreivalinijinius pusžiedžius su langeliais, esant 15 g/m³ koncentracijai. Cilindrinio korpuso ciklone didžiausias efektyvumas siekia 69,3 %, t. y. vidutiniškai yra 13 % mažesnis.

Literatūra

- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00079-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00079-5)
- Avcı, A.; Karagoz, I. 2003. Effect of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, *Journal of Aerosol Science* 34: 937–955. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00054-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00054-5)
- Bernardo, S.; Mori, M.; Peres, A. P.; Dionisio, R. P. 2006. 3-D Computational fluid Dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles, *Powder Technology* 162(2006): 190–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2005.11.007>
- Clifford, S. M.; Zhang, J.; Sigsgaard, T.; Jantunen, M.; Lioy, 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. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.8987>
- Curtis, L.; Rea, W.; Smith-Willis, P.; Fenyves, E.; Pan, Y. 2006. Adverse health effects of outdoor air pollutants, *Environment International* 32: 815–830. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.012>
- 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.
- Hu, L. Y.; Zhou, L. X.; Zhang, J.; Shi, M. X. 2005. Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator, *AIChE Journal* 51(3): 740–749. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.10354>
- Jakštonienė, I.; Konoverskytė, S.; Vaitiekūnas, P. 2009. Aerodinamių 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.; Serebryanskyy, D.; Vaitiekūnas, P. 2011. Experimental research on the work of centrifugal filter when eliminating solid particles from clinker cooling system, in *The 8th International Conference „Environmental Engineering“: selected papers*, May 19–20, 2011. Vilnius, Lithuania, Vol. 1. Vilnius: Technika, 134–138. ISBN 978-9955-28-263-1.
- Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2011. Daugiakanalio ciklono efektyvumo tyrimai, iš *14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2011 m. balandžio 14 d., pranešimų medžiaga. Aplinkos apsaugos inžinerija*. ISBN 978-9955-28-956-2. Vilnius: Technika, 18–22.
- Kenny, L. C.; Gussman, R. A. 1995. Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol pre-separators, *Journal of Aerosol Science* 26: S777–S778. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)97296-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0021-8502(95)97296-Q)
- Mothes, H.; Löffler, F. 1988. Prediction of particle removal in cyclone separators, *International Chemical Engineering* (28): 51–55.
- 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. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2011.583390>
- Raoufi, A.; Shams, M.; Kanani, H. 2008. CFD analysis of flow field in square cyclones, *Powder Technology*, 1–9.
- Stairmand, C. J. 1951. Design and performance of cyclone separator, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 29: 356–373.
- 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. <http://dx.doi.org/10.3846/jeelm.2010.37>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1205/cherd06040>
- Zhou, L. X.; Soo, S. L. 1990. Gas solid flow and collection of solids in a cyclone separator, *Powder Technology* 63(1): 45–53. [http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910\(90\)80006-K](http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910(90)80006-K)

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON CYCLONES WITH CYLINDRICAL AND SPIRAL SHELLS

A. Chlebnikovas, P. Baltrėnas

Abstract

The conducted investigation is aimed at providing information on air flow parameters in the cylindrical and spiral shell (devices are designed for separating solid particles from air flow having tangent flow inlet). Experimental research has employed multi-cyclones created by the Department of Environmental Protection at Vilnius Gediminas Technical University. The study is focused on investigating and comparing the distribution of the dynamic pressure of the airflow in six-channel cyclones inside the structures of devices. The paper establishes and estimates the efficiency of air cleaning changing air phase parameters using different particulate matters. The efficiency of the cyclone has been defined applying the weighted method based on LAND 28-98/M-08 methodology. The article presents the results of experimental research on the air cleaning efficiency of cylindrical and spiral shells using 20 μm glass and clay particulate matter under the initial concentration that may vary from 500 mg/m³ to 15 g/m³ using semi-rings with windows at different positions. The obtained results has shown that the maximum efficiency of the cylindrical shell increases up to 87,3 % while the initial concentration of glass makes 15 g/m³.

Keywords: cyclone, spiral, cylindrical, solid particles, efficiency.