



DVIEJŲ LYGIŲ CILINDRINIO CIKLONO SU SKIRTINGU KANALŲ SKAIČIUMI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Egidijus BALIUKAS¹, Pranas BALTRĖNAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹e.baliukas@gmail.com; ²pbalt@vgtu.lt

Santrauka. Dviejų lygių daugiakanalis ciklonas skirtas kietosioms dalelėms iš oro srauto atskirti. Toks ciklonas sukurtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos laboratorijoje. Tyrimais siekiama nustatyti oro srauto pasiskirstymą daugiakanalio ciklono lygiuose ir kanaluose. Oro greičiams kanaluose nustatyti naudojamas daugiafunkcis matuoklis „Testo-400“ ir dinaminis Pito vamzdelis. Gauti rezultatai parodė, kad į ciklone įrengtus lygius patenka vienodas oro tūris, ir greičiai šių lygių kanaluose pasiskirsto vienodai. Didžiausias greitis užfiksuotas pirmajame kanale. Didžiausias yra tuo atveju, kai pusžiedžiai sudėti taip, jog 75 % oro srauto grįžtų į ankstesnį kanalą, o mažiausias tada, kai į ankstesnį kanalą grįžta 25 % oro srauto. Didžiausias išmatuotas aerodinaminis pasipriešinimas yra esant aštuoniems kanalams bei 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiui ir siekia 1660 Pa. Ištyrus ciklono su skirtingu kanalų skaičiumi efektyvumą nustatyta, kad geriausiai daleles iš oro atskiria šešiakanalis ciklonas, kuriame oro srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25. Granito dalelių iki 20 μm atskyrimo 92,1 %, o medienos dalelių – 91,1 %.

Reikšminiai žodžiai: daugiakanalis, efektyvumas, ciklonas, oro srautas, kietosios dalelės, oro valymas.

Įvadas

Ciklonai grindžiami išcentrinų jėgų veikimu, atskiriant daleles iš užteršto oro srauto. Pagrindiniai šių įrenginių privalumai – ekonomiškumas, gamybos paprastumas ir prisitaikymas prie įvairių darbo sąlygų. Ciklonas būtų pats geriausias užteršto oro valymo sprendinys, tačiau nedidelis dulkių sugaudymo efektyvumas neleidžia šio oro valymo metodo taikyti visur (Kępa 2013). Oro srauto reiškiniai ciklono viduje – sudėtingas ir kompleksiškas procesas, vykstantis visomis trimis kryptimis (Elsayed, Lacor 2011). Tai daro poveikį vis didėjančiam tyrimų skaičiui, siekiant išsiaiškinti įvairių geometrinių ir eksploatacinių parametų poveikį optimaliam ciklono veikimui (Elsayed, Lacor 2010).

Didžioji dalis ciklonų konstrukcijos tyrimų vyksta su įtekėjimo, ištekėjimo ir sūkurių sudarymo konstrukciniais elementais. You-hai *et al.* (2013) savo straipsnyje aprašė erdvinį dujinės fazės oro srauto judėjimo ciklone su skirtingais ištekėjimo vamzdžio skersmenimis modeliavimą. Rezultatai rodo, kad dujų srauto sukimosi intensyvumas, ašinio srauto tekėjimo šlyties charakteristikos ir reversiniai oro srautai yra susiję su ištekėjimo vamzdžio geometrijos kitimu. Kai išėjimo vamzdžio skersmuo mažėja, sumažėja

į apačią (bunkerio link) tekantis oro srautas, o oro srauto tangentiniai greičiai visame ciklone padidėja, todėl padidėja slėgio nuostoliai (You-hai *et al.* 2013).

Teoriniai ir eksperimentiniai ciklono tyrimai pradėti jau XIX a. Ciklono konstrukcija per daugelį metų mažai kuo pasikeitė, dėl to išlieka pagrindinis ciklono valymo įrenginių trūkumas – nepakankamas kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas siekia 10 μm dydžius ir mažiau, pašalinimas iš oro srauto (Pushnov, Berengarten 2011). Per šį laikotarpį buvo siūloma įvairių tipų ciklonų su daugiau ar mažiau panašių savybių. Ciklonas, kurį sudaro korpusas, išmetimo ir įėjimo vamzdžiai, paprastai pagaminamas, montuojamas ir eksploatuojamas, be to, yra universalus ir ekonomiškas (Serebryanskiy 2004; Gujung *et al.* 2008).

Siekiant pagerinti oro srautų valymą vykstant pramoniniams procesams, nuolatos tobulinami oro valymo įrenginiai. Paminėtini tokie įrenginiai, kaip ciklofiltrai, kurių konstrukcija grindžiama rankovinio filtro ir ciklono deriniu, naujos konstrukcijos daugiakanaliai ciklonai, ciklonai naudojant ultragarso bangas (Serebryanskiy 2004; John, Reischl 2012).

Įmonėse kietosios dalelės iš oro valomos viena ar ke- liomis valymo pakopomis, o pirmoji pakopa dažniausiai yra ciklonas. Kad nereikėtų dviejų pakopų, galima taikyti vienpakopį valymą, tačiau valymo įrenginys turi būti labai efektyvus. Tam gali būti naudojami įrenginiai su uždarytų kontūrų sistema.

Naujos kartos ciklonų pagrindas – viduje esan- tys pusžiedžiai, kurie sukuria uždarytų kontūrų sistemas (Baltrėnas *et al.* 2012). Atitekančios kietosios dale- lėmis užterštas dujų srautas filtruojamas pro kelis užterš- to oro, cirkuliuojančio uždaroje grandinėse, sluoksnius (Jakštonienė *et al.* 2011). Filtruojant srautą dalelės koa- guluojama tarpusavyje, todėl efektyviau nusodinamos bun- keryje. Naujos kartos ciklonai geba pašalinti labai smulkias daleles – net iki 10 μm skersmens (Burov *et al.* 2005).

Tokiuose naujos kartos ciklonuose uždari cilindri- nės formos kontūrai yra skirtingo skersmens ir išsidėstę φ = π kampų, jie suformuoti dviejų skirtingo skersmens žiedų sienelių. Kiekviena pora gretimų kanalų sudaro vieną uždarą kontūrą. Tokių kanalų skaičius yra priklausomas nuo įrenginyje esančių žiedų skaičiaus (Serebryanskiy, Plashikin 2011; Burov *et al.* 2007).

Teorinis ciklonų su uždarytų kanalų sistema efekty- vumas gali būti apibūdinamas dulkių koncentracija C_k po valymo, kuri priklauso nuo dulkių koncentracijos C_H tie- kiamame ore bei nuo ciklone esančių kanalų n skaičiaus. Tai apibūdinama santykiu (Serebryanskiy 2011):

$$C_k = \frac{C_H}{1 + 2^{n-1}}. \quad (1)$$

čia C_k – dulkių koncentracija po valymo, g/m³; C_H – dul- kių koncentracija prieš valymą, g/m³; n – kanalų skaičius ciklone.

Tokių ciklonų veikimui labai svarbus sukuriamas ae- rodinaminis pasipriešinimas. Bendrajame pasipriešinime didžiausią įtaką turi kanalų aerodinaminį pasipriešinimą koeficientai, kitas veiksnys – sistemos pasipriešinimas. Bendrasis pasipriešinimo koeficientas išreiškiamas jų suma (Burov *et al.* 2011). Didėjant įrenginio matmenims turi būti didinamas ir valomas oro debitas, tačiau visų valymo įrenginių valymo efektyvumas mažėja didėjant jų mat- menims (Vaitiekūnas, Jakštonienė 2010). Tokiais atvejais naudojamas dviejų lygių daugiakanalis ciklonas. Šiame įrenginyje yra du kanalai, esantys lygiai vienas virš kito. Kiekviename lygyje yra toks pat kanalų skaičius, o pertvara, esanti tarp lygių, dalija atitekančią oro srautą į dvi lygias dalis (Serebryanskiy 2011).

Techniniais reikalavimais, kurie taikomi tiek ciklo- nam, tiek bet kuriam kitam oro valymo įrenginiui, siekiama kuo didesnio oro valymo efektyvumo sukuriant kuo mažesni

aerodinaminį pasipriešinimą. Didėjant aerodinaminiam pasi- priešinimui kartu didėja ir energijos kiekis, panaudotas dides- niam pratekančio oro srauto kiekiui pasiekti (Kaya, Karagoz 2008). Todėl tobulinant ciklono konstrukciją siekiama rasti geriausią variantą tarp aerodinaminio pasipriešinimo, kuris priklauso nuo oro srauto greičio, ir oro išvalymo efektyvumo.

Viena iš ciklono efektyvumo apskaičiavimo prob- lemų – srauto pobūdžio poveikis. Skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD) yra potenciali priemonė oro srauto cha- rakteristikoms (Baltrėnas *et al.* 2012), dalelių skriejimo trajektorijoms (Gimbun *et al.* 2005) ir slėgio kitimui cik- lono viduje prognozuoti.

Šio darbo tikslas – eksperimentiškai ištirti oro srauto greičių pasiskirstymą dviejų lygių cilindriname ciklone su skirtingu pusžiedžių skaičiumi, ištirti, kaip skirtingas vidinės konstrukcijos išdėstymas veikia aerodinaminį sistemos pasi- priešinimą ir skirtingų dalelių pašalinimo iš oro efektyvumą.

Metodika

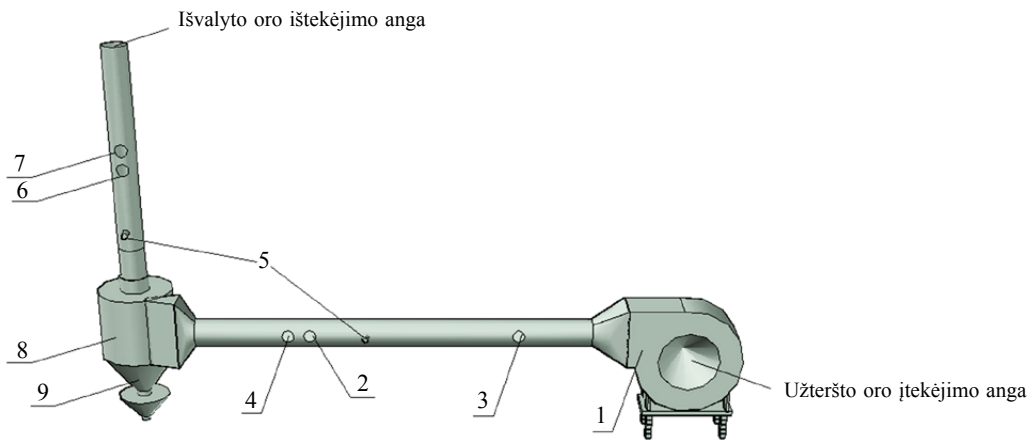
Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti su dviejų lygių cilin- driniu daugiakanaliu ciklonu, sukurtu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos technologijų la- boratorijoje. Šio dviejų lygių ciklono laboratorinio stendo schema pavaizduota 1 pav.

Sistemą sudaro išcentrinis ventiliatorius, kuriame sukuriamas reikiamas oro srautas, dviejų lygių daugiaka- nalis ciklonas bei įėjimo ir išėjimo ortakiai. Užterštas oras į valymo įrenginį teka įtekėjimo ortakiu, kurio skersmuo – 200 mm, tada daugiakanaliame ciklone kietosios dalelės atskiriamos iš oro ir nukrinta į dvigubą ciklono bunkerį. Išvalytas oras pašalinamas išėjimo ortakiu, kurio skers- muo – 160 mm.

Oro srauto greičio matavimo schema parodyta 2 pav. Užterštas oras atiteka įtekėjimo ortakiu ir ciklono difuzo- riuje padalijamas į dvi lygias dalis, kurios patenka į skir- tingus lygius. Atskirtos kietosios dalelės per segmentinius žiedinius plyšius patenka į dvigubą bunkerį, o išvalytas oras ištekėjimo ortakiu pašalinamas. Dulkės iš pirmojo bunkerio nukrinta į antrąjį ir jų apimtis labai sumažėja.

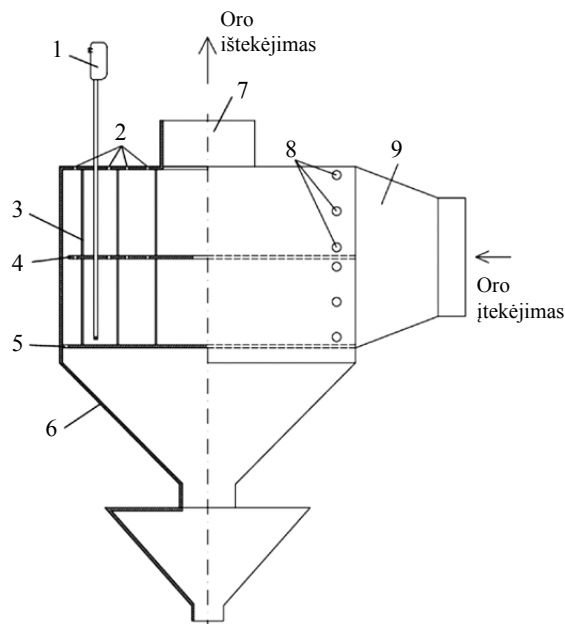
Ciklono dangtyje ir pertvaroje tarp lygių įrengtos specialios 8 mm kiaurymės, pro kurias su dinaminio Pito vamzdeliu buvo išmatuoti oro srauto pasipriešinimai abiem lygiais ir su daugiafunkciu matuokliu „Testo-400“ perskai- čiuoti į oro srauto greičius.

Visi matavimai atlikti keičiant ventiliatoriaus suku- riamą oro srauto debitą. Taip įvertinami oro srauto grei- čiai įrenginyje priklausomai nuo skirtingo ventiliatoriaus sukuriamo oro debito. Oro kiekiai keičiami ventiliatoriaus valdymo bloke.



1 pav. Dviejų lygių daugiakanalio ciklono eksperimentinis stendas: 1 – išcentrinis ventiliatorius; 2 – dalelių koncentracijos prieš valymą nustatymo vieta; 3 – dalelių suleidimo vieta; 4 – oro srauto greičio matavimo vieta įtekėjimo ortakyje su sparniniu anemometru; 5 – sistemos sukuriama pasipriešinimo matavimo antgaliai; 6 – dalelių koncentracijos po valymo nustatymo vieta; 7 – oro srauto greičio matavimo vieta ištekėjimo ortakyje su sparniniu anemometru; 8 – dviejų lygių ciklonas; 9 – dvigubas bunkeris

Fig. 1. An experimental bench of a multichannel cyclone: 1 – centrifugal ventilator; 2 – suction place of particle concentration before purification; 3 – place of particle inflow; 4 – measuring place of air flow rate in the air inlet duct applying a wing anemometer; 5 – measuring nozzles for resistance created by the system; 6 – suction place of particle concentration after purification; 7 – measuring place of air flow rate in the air outlet duct applying a wing anemometer; 8 – multi-level cyclone; 9 – double hopper



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

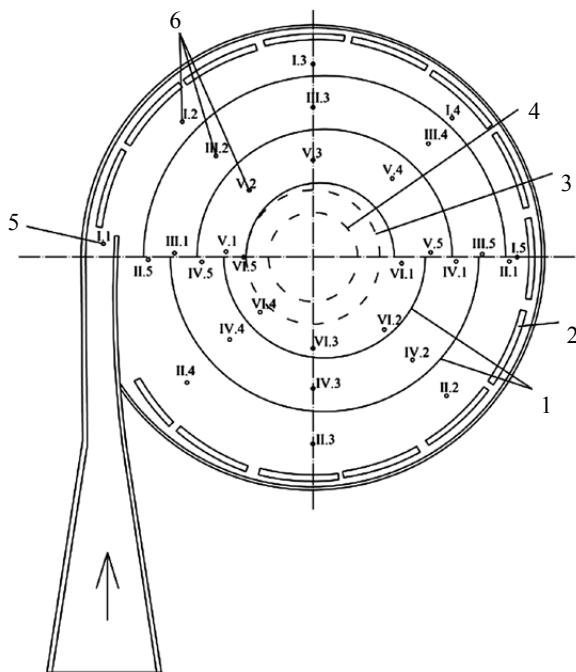
Fig. 2. Measuring scheme for airflow rate in the two-level cyclone: 1 – dynamic Pitot tube; spaces of 2 – 6 mm in diameter; 3 – half-rings of a different diameter; 4 – partition wall between levels; 5 – bottom of the cyclone with segmental ring spaces; 6 – double conic hopper; 7 – airflow outlet; 8 – places for measuring airflow rate in the tangential inlet of the cyclone; 9 – diffuser

Matavimai atlikti su keturių, šešių ir aštuonių kanalų ciklono trimis skirtingomis vidaus pusžiedžių konstrukcijomis (3 pav.). Konstrukcijų pagrindą sudaro 3, 5 arba 7 skirtingo skersmens pusžiedžiai, kurie sukuria skirtingo skersmens ir tūrio kanalus. Į kiekvieną kanalą patenkančias ir iš jo išeinantis oro srautas gali būti reguliuojamas. Reguluojama keičiant atstumus tarp skirtingo skersmens pusžiedžių ar ketvirtžiedžių. Pasirinktos trys skirtingos padėties: 1. Periferinio (grįžtamojo) oro srauto tūris lygus tranzitinio (į kitus kanalus tekančio) oro srauto tūriui (50/50 padėtis). 2. Periferinis oro srauto tūris 50 % didesnis už tranzitinį oro tūrį (75/25 padėtis). 3. Periferinis oro srauto tūris 50 % mažesnis už tranzitinį oro srauto tūrį (25/75 padėtis).

Kiekviename matavimo taške atliekami trys matavimai, kad būtų išvengta sisteminių paklaidų, ir kad vidurkio paklaida būtų kuo mažesnė.

Su sparniniu anemometru ir matuokliu „Testo-400“ išmatuoti greičiai ortakiuose prieš ir už ciklono. Dėl patobulintos ciklono konstrukcijos su anemometru oro srauto greitį įmanoma pamatuoti tik įėjimo ir išėjimo ortakiuose. Pagal šiuos išmatuotus greičius galima tiksliau nusakyti oro srauto tolydumą ir tikslų į cikloną patenkančių oro kiekį. Ortakio matavimai atlikti pagal Lietuvos normatyvą LAND 27-98/M-07 „Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas“ (Lietuvos... 1998).

Dinaminis Pito vamzdelis, kurio ilgis – 1000 mm, tinkamas oro greičiui matuoti, kai jo dydis kinta tarp 1 ir 30 m/s. Matuojant dujų oro srauto greitį ir debitą, gautų matavimų paklaida neturi viršyti 10 %.



3 pav. Oro srauto greičių matavimo taškų išdėstymo schema: 1 – skirtingo skersmens pusžiedžiai; 2 – segmentiniai plyšiai; 3 – oro srauto išėjimo iš antrojo lygio anga; 4 – oro srauto išėjimo iš pirmojo lygio anga; 5 – oro srauto greičio matavimo taškas įtekėjimo angoje; 6 – oro srauto greičio matavimo taškai ciklono kanaluose

Fig. 3. Distribution scheme for the measuring points of airflow rate: 1 – half-rings of a different diameter; 2 – segmental spaces; 3 – airflow outlet from the second level; 4 – airflow outlet from the first level; 5 – measuring point of air inlet rate; 6 – measuring point of air flow rate in the channels of the cyclone

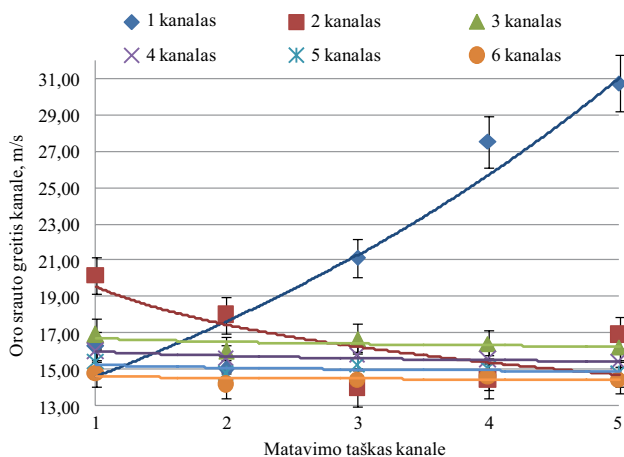
Oro, užteršto kietosiomis dalelėmis, valymo efektyvumas apskaičiuojamas išmatavus dulkių koncentracijas ore prieš naujos kartos cikloną ir už ciklono. Greičių ir slėgio matavimai atliekami su stendu, kuris pateiktas 1 pav.

Sistemos pasipriešinimui matuoti eksperimentinio stendo ortakiuose įmontuoti specialūs atvamzdžiai, kurių vidinis skersmuo siekia 7 mm, išorinis – 10 mm. Prie jų prijungiamos žarnelės slėgiui matuoti su diferencialiniu slėgio matuokliu DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ± 5 Pa).

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

Rezultatai ir jų analizė

Oro srauto greitis matuojamas lygiuose, kaip parodyta 2 pav. Kadangi ciklono lygių tūriai yra tokie patys, o pertvara tarp lygių padalija cikloną į lygias dalis, tai greičiai ly-



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

Fig. 4. Airflow rate distribution in the second-level channels of the six-channel cyclone under airflow distribution ratio 50/50 and the average airflow rate of 16 m/s in the channel

giuose yra vienodi arba skiriasi keliomis dešimtosiomis m/s dalimis. Greičiai kanaluose matuoti taškuose, pateiktuose 3 pav.

Šešiakanalis ciklonas, kuriame oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 yra vienas iš optimalių, atsižvelgiant tiek į aerodinaminis parametrus, tiek į oro išvalymo efektyvumą. Kai ciklone vidutinis oro greitis yra 16 m/s, didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio 1-ojo kanalo paskutiniame matavimo taške. Antrojo lygio 1-ojo kanalo pradžioje greitis yra 16,2 m/s ir pabaigoje pakyla 14,5 m/s (4 pav.). Didėjimo tendencija 1-ajame kanale stebima ir pirmajame lygyje. Greitis didėja, nes 1-asis kanalas pradžioje yra 2,2 karto platesnis nei pabaigoje ir, išlaikant vienodą pratekantį oro srauto tūrį, oro srauto greitis padidėja 1,9 karto.

Mažinant vidutinį oro greitį ciklone iki 12 m/s, 8 m/s sumažėja ventiliatoriaus stumiamoji galia, todėl 1-ajame kanale oro srauto greitis didėja ne taip staigiai. Esant 12 m/s vidutiniam oro srauto greičiui, didėjimas nuo kanalo pradžios iki pabaigos siekia 1,7 karto, o esant 8 m/s – 1,6 karto.

Visų lygių 1-ajame kanale antrajame matavimo taške pastebimas greičio kritimas. Pirmajame lygyje greitis sumažėja 8 %, antrajame – 8 %. Galima padaryti išvadą, kad oro srauto greitis krinta dėl periferinio oro srauto įtakos. Periferinis oro srautas, grįždamas į ankstesnįjį kanalą, susikerta su atitekančiu oro srautu ir vyksta filtracija. Filtruojantys oro srautai stabdo vienas kitą ir dėl to greitis mažėja. Trečiajame matavimo taške oro srauto greitis vėl pakyla dėl kanalo tūrio sumažėjimo bei oro srauto turbulentiškumo sumažėjimo, o kanalo pabaigoje pasiekia maksimalią 30,7 m/s reikšmę trečiajame lygyje.

Pirmojo lygio 2-ojo kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 24,6 % mažesnis nei 1-ajame kanale. Cilindrinio korpuso ciklone įrengti cilindriniai pusžiedžiai išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka, dėl tokio išdėstymo antrojo kanalo tūris yra pats didžiausias ir jame greitis krinta. 2-ame matavimo taške greitis sumažėja 2,4 m/s, o 3-iaame taške nukrinta iki minimalios 14,0 m/s reikšmės. 4-ame taške greitis pradeda didėti dėl kanalo pločio mažėjimo ir pabaigoje pasiekia 16,9 m/s. 2-ojo kanalo pradžioje greitis yra 19 % didesnis nei pabaigoje, nes iš 1-ojo kanalo atiteka 30,7 m/s oro srautas ir 2-ojo kanalo pradžioje vidutinis greitis padidėja.

Pradedant 3-uoju kanalu, greitis kiekviename kanale tolygiai mažėja. Pokytis tarp pirmojo lygio 3-iojo ir 4-ojo kanalų vidutinio greičio nustatytas 0,8 m/s, o antrajame lygyje – 0,9 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Nuo 3-iojo kanalo plotis kiekviename kanale išlieka pastovus, todėl teka toks pat oro srautas, kurį veikia tik aerodinaminis pasipriešinimas. Greitis mažėja dėl dinaminio pasipriešinimo poveikio.

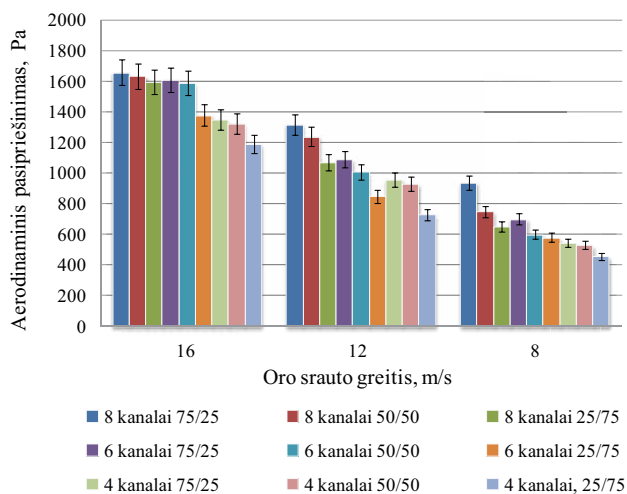
Tarp lygių vidutiniai greičiai kanaluose yra skirtingi. Vidutinis antrojo lygio kanalų greitis yra 0,7 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,8 m/s). Oro srauto greitis antrajame lygyje didesnis, nes oras iš pirmojo lygio, prieš ištekėdamas iš ciklono, turi pereiti abu ciklono lygius jungiančią angą.

Keičiant oro tūrių pasiskirstymo santykius keičiasi 1-ojo ir 2-ojo kanalų plotis. Kitų kanalų plotis išlieka toks pat esant visoms padėtimis. Dėl kanalo pločio kitimo keičiasi ir oro srauto greičiai, nes tas pats oro tūris turi pereiti siauresnę arba platesnę kanalo vietą.

Kai oro srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, pirmasis pusžiedis paslenkamas į dešinę. Dėl to pirmojo kanalo pradžioje plotis padidėja, o pabaigoje atitinkamai sumažėja. Skirtumas tarp kanalo pradžios ir pabaigos pločio yra 5,5 karto. Tačiau oro greitis dėl susidariusio pasipriešinimo padidėja tik 2,3 karto.

Nustačius pusžiedžius taip, kad oro srautai pasiskirstytų 25/75 santykiu, pirmojo kanalo plotis tampa beveik tolygus visu ilgiu. Esant šiai padėčiai pirmojo kanalo pabaigos plotis 1,1 karto mažesnis nei pradžia, dėl to oro greitis šio kanalo pabaigoje yra apie 1,1 karto didesnis.

Pusžiedžius perkėlus į anksčiau minėtas padėtis, kinta ne tik kanalų pločiai, bet ir oro srautų pasiskirstymas. 50 % padidinus grįžtamąjį oro srautą (75/25 oro srautų pasiskirstymo santykis) didesnė oro dalis patenka į 1-ąjį bei 2-ąjį kanalus, todėl šiuose kanaluose oro greitis padidėja apie 25–30 %, o kituose kanaluose atitinkamai sumažėja. Pakeitus oro srautų pasiskirstymo santykį į 25/75, vyksta atvirkščias procesas ir oro srauto greitis apie 25–30 % padidėja 3–6 kanaluose.



5 pav. Dviejų lygių cilindrinio daugiakanalio ciklono, panaudojus pusžiedžius, aerodinaminio pasipriešinimo priklausomybė nuo vidutinių oro srauto greičių kanaluose, esant skirtingam oro srautų pasiskirstymo santykiui

Fig 5. The dependence of the aerodynamic resistance of the two-level cylindrical multichannel cyclone with half-rings on the average air flow rates in the channels under a different air flow distribution ratio

Keturkanaliame ir aštuonkanaliame ciklone vidutiniai oro srauto greičiai pasiskirsto panašiai kaip ir šešių kanalų ciklone. Pirmame kanale greitis didėja nuo pradžios iki kanalo pabaigos. Keturkanaliame ciklone šio didėjimo mastas yra apie 10 % mažesnis nei šešiakanaliame.

Kai oro srautų pasiskirstymo santykis kanalų įtekėjimo angose yra 25/75, didžiausias išmatuotas sistemos sukuriamas aerodinaminis pasipriešinimas yra esant 8 kanalams ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklone (5 pav.).

Aštuonkanalio ciklono sukuriamas pasipriešinimas yra didžiausias, esant visiems vidutiniams greičiams ciklone ir visiems oro srautų pasiskirstymo santykiams. Aštuonkanaliame ciklone kanalų plotis yra 1,5 karto mažesnis nei šešių kanalų bei 2 kartus mažesnis nei keturių kanalų, dėl to oro srautui sunkiau tekėti, ir aerodinaminis pasipriešinimas didėja. Kai vidutinis oro srauto greitis ciklone yra 16 m/s, tai skirtumas tarp aštuonkanalio ir šešiakanalio ciklonų sukuriamo pasipriešinimo yra 16 %. Kai greitis sumažinamas iki 12 m/s, skirtumas padidėja iki 25 %, o kai iki 8 m/s – 12 %.

Mažiausias skirtumas yra esant 16 m/s vidutiniam greičiui ciklone tarp šešiakanalio ciklono su 50/50 ir 75/25 oro srautų pasiskirstymo santykiais, skirtumas sudaro 20 Pa. Kai vidutinis greitis yra 12 m/s, skirtumas išauga iki 70 Pa, o esant 8 m/s vidutiniam greičiui ciklone šis skirtumas sudaro 100 Pa. Galima daryti išvadą, kad skirtumas tarp aerodinaminio pasipriešinimo mažėja didėjant vidutiniam oro srauto greičiui ciklone.

Daugiakanalio dviejų lygių ciklono kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas – nuo 0 iki 20 µm, šalinimo iš oro efektyvumas, esant skirtingiems oro srauto pasiskirstymo santykiams (25/75, 50/50, 75/25) ir skirtingiems vidutiniams oro srauto greičiams ciklone (8 m/s, 12 m/s, 16m/s), pateiktas 1–3 lentelėse.

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

Minėtais teršalais užterštas srautas yra valomas daugiau nei 1,15 karto efektyviau nei medienos pelenų kietosiomis dalelėmis. Granito ir medienos kietosiomis dalelėmis užterštam srautui valyti tinkamiausi dideli greičiai ciklono kanaluose (16 m/s), o medienos pelenų ir stiklo – vidutiniai ir dideli, tačiau jų įtaka yra mažiau svarbi oro valymo efektyvumo vertėms.

Didžiausios efektyvumo vertės, esant 25/75 oro srautų pasiskirstymui, gautos esant dideliems greičiams, kurie lygūs 16 m/s, o nagrinėtas keturkanalio ciklono atvejis yra tinkamiausias medienos ir granito kietosiomis dalelėms atskirti. Medienos dalelės iš užteršto oro srauto atskiriamos 83,5 % efektyvumu, o granito 0,7 % mažiau – 82,8 %. Medienos dalelės yra kelis kartus lengvesnės nei granito, tačiau dėl savo organinių savybių geriau koaguliuoja ir nusodinamos efektyviau.

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

Kai oro srautų pasiskirstymo santykį atitinkanti padėtis yra 25/75, geriausiai iš oro srauto pasišalina granito kietosios dalelės, blogiausiai – medienos pelenų (2 lentelė). Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumo sudaro 3–7 %, ir šis skirtumas didėja didinant vidutinį oro srauto greitį kanaluose. Esant minimaliam 8 m/s greičiui, didžiausias efektyvumas yra valant medienos kietosiomis dalelėmis užterštą orą. Jis sie-

kia 76,5 %. Esant vidutiniam greičiui didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito kietąsias daleles, taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Granito dalelės iš oro srauto išskiriamos geriausiai, nes jų tankis yra didžiausias iš visų tyrinėtų dalelių. Medienos dalelės, nors ir mažiausio tankio, išskiriamos taip pat labai gerai, nes jų organinė sandara leidžia joms lengviau sukibti tarpusavyje.

1 lentelė. Keturkanalio dviejų lygių ciklono oro išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo vidutinių oro srauto greičių ir srauto pasiskirstymo santykių

Table 1. The dependence of air purification efficiency of the two-level four-channel cyclone on the average air flow rates and air flow distribution ratios

Oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75			
Oro srauto greitis	8 m/s	12 m/s	16 m/s
Granitas iki 20 µm skersmens	72,1 %	73,9 %	82,8 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	69,0 %	70,3 %	68,7 %
Mediena iki 20 µm skersmens	73,6 %	74,5 %	83,5 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50			
Granitas iki 20 µm skersmens	77,5 %	79,4 %	81,7 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	67,2 %	64,7 %	69,5 %
Mediena iki 20 µm skersmens	78,4 %	80,1 %	83,7 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25			
Granitas nuo 0 µm iki 20 µm skersmens	77,1 %	80,3 %	82,6 %
Medienos pelenai nuo 0 µm iki 20 µm skersmens	66,9 %	66,2 %	70,3 %
Mediena nuo 0 µm iki 20 µm skersmens	76,1 %	81,0 %	83,5 %

2 lentelė. Šešiakanalio dviejų lygių ciklono oro išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo vidutinių oro srauto greičių ir srauto pasiskirstymo santykių

Table 2. The dependence of air purification efficiency of the two-level six-channel cyclone on the average air flow rates and air flow distribution ratios

Oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75			
Oro srauto greitis	8 m/s	12 m/s	16 m/s
Granitas iki 20 µm skersmens	72,7 %	80,7 %	88,5 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	70,1 %	75,8 %	79,3 %
Mediena iki 20 µm skersmens	76,5 %	78,6 %	84,3 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50			
Granitas iki 20 µm skersmens	76,8 %	81,2 %	91,5 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	71,8 %	75,5 %	81,3 %
Mediena iki 20 µm skersmens	78,2 %	81,8 %	88,3 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25			
Granitas iki 20 µm skersmens	76,9 %	83,6 %	92,1 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	72,3 %	76,0 %	82,1 %
Mediena iki 20 µm skersmens	76,7 %	79,8 %	91,1 %

Šešiakanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo cilindriniai pusžiedžiai išdėstyti 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykių atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalina granito kietąsias daleles, blogiausiai – medienos pelenų. Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumo siekia 2–11 % ir šis skirtumas didėja didinant vidutinį oro srauto greitį kanaluose. Esant minimaliam 8 m/s greičiui, didžiausias efektyvumas yra valant granito kietosiomis dalelėmis užterštą orą ir siekia 78,2 %.

Esant 12 m/s vidutiniam greičiui, didžiausias efektyvumas yra atskiriant granito kietąsias daleles, taip pat ir esant 16 m/s vidutiniam greičiui. Mažiausias bendrasis efektyvumas išmatuotas valant medienos pelenais užterštą orą ir siekia 71,8 % esant mažiausiam greičiui.

Granito kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas – nuo 0 µm iki 20 µm skersmens, mažiausias atskyrimo iš oro srauto efektyvumas, esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykiui, nustatytas esant 8 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose ir siekia 76,9 %. Didėjant vidutiniam oro srauto greičiui matoma, kad efektyvumas didėja (2 lentelė). Padidinus oro srauto greitį iki 12 m/s, efektyvumas padidėja 6,3 %, o kai greitis yra 16 m/s, efektyvumas pasiekia maksimalią 92,1 % reikšmę.

Aštuonkanaliame ciklone, kuriame oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75, granito kietųjų dalelių, kurių dispersiškumas – nuo 0 µm iki 20 µm skersmens, didžiausias atskyrimo iš oro srauto efektyvumas nustatytas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ir siekia 88,7 %. Didėjant vidutiniam oro srauto greičiui ciklone matoma efektyvumo didėjimo tendencija (3 lentelė). Padidinus oro srauto greitį nuo 8 m/s iki 12 m/s, efektyvumas padidėja 4,9 %, o kai greitis ciklono kanaluose pakinta nuo 8 m/s iki 16 m/s, efektyvumo skirtumas sudaro 15,3 %.

Aštuonkanalis dviejų lygių ciklonas, kai jo pusžiedžiai išdėstyti 50/50 oro srautų pasiskirstymo santykių atitinkančia padėtimi, geriausiai iš oro srauto pašalinamos granito kietosios dalelės, blogiausiai – medienos pelenų (3 lentelė). Skirtumas tarp granito ir medienos pelenų kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumo siekia 5–8 % ir šis skirtumas didėja didinant vidutinį oro srauto greitį kanaluose.

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

3 lentelė. Aštuonkanalio dviejų lygių ciklono oro išvalymo efektyvumo priklausomybė nuo vidutinių oro srauto greičių ir srauto pasiskirstymo santykių

Table 3. The dependence of air purification efficiency of the two-level eight-channel cyclone on the average air flow rates and air flow distribution ratios

Oro srautų pasiskirstymo santykis 25/75			
Oro srauto greitis	8 m/s	12 m/s	16 m/s
Granitas iki 20 µm skersmens	73,4 %	78,3 %	88,7 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	72,8 %	76,1 %	79,5 %
Mediena iki 20 µm skersmens	74,5 %	76,8 %	88,1 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50			
Granitas iki 20 µm skersmens	75,3 %	83,5 %	90,8 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	71,9 %	76,4 %	81,4 %
Mediena iki 20 µm skersmens	76,3 %	77,9 %	89,0 %
Oro srautų pasiskirstymo santykis 75/25			
Granitas iki 20 µm skersmens	78,2 %	84,2 %	91,0 %
Medienos pelenai iki 20 µm skersmens	76,4 %	79,6 %	84,6 %
Mediena iki 20 µm skersmens	79,8 %	81,0 %	90,1 %

Išvados

1. Didžiausias greitis dviejų lygių ciklono viduje yra, kai kanalų išdėstymo padėtis – 75/25. Šešiakanalio ciklono, kai oro tūrių pasiskirstymo santykis 75/25, 1-ojo kanalo pabaigoje greitis siekia 31,6 m/s. Kai padėtis yra 50/50, greitis tame pačiame taške yra 29,7 m/s, o kai 25/75 – 21,9 m/s. Taip yra todėl, kad, didinant periferinį srautą, pirmasis ciklono pusžiedis atitraukiamas į dešinę ir viso kanalo pradžios bei pabaigos santykis tampa lygus 5,5 karto. Kai oro srautų pasiskirstymo santykis 50/50 šis santykis yra 2,2 karto, o kai santykis 25/75 – 1,1 karto.
2. Didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas nustatytas esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui, esant aštuoniems kanalams ir 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams, esant vyraujančiam periferiniam srautui, nustatyta vertė siekia 1660 Pa. Aštuonkanalio ciklono sukuriamas pasipriešinimas yra didžiausias esant visiems vidutiniams greičiams ciklone, nes aštuonkanaliame ciklone kanalų plotis yra du kartus mažesnis nei keturių kanalų, dėl to oro srautui sunkiau tekėti ir aerodinaminis pasipriešinimas didėja.
3. Valant granito kietosiomis dalelėmis užterštą orą, ciklono kanaluose yra optimalus vidutinis 16 m/s oro srauto greitis. Šešiakanaliame ciklone esant nustatytiems 50/50 ir 75/25 srautų pasiskirstymo santykiams, efektyviausiai valomas smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis užterštas srautas ir pasiekiamas didžiausias efektyvumas – atitinkamai 91,5 % ir 92,1 %.

4. Medienos dalelėmis (mažo tankio) užteršto oro srauto didžiausias valymo efektyvumas pasiekiamas šešiakanaliame ciklone, esant 16 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose. Smulkiadispersėmis dalelėmis iki 20 µm dydžio užterštas oro srautas valomas efektyviausiai esant 75/25 srautų pasiskirstymo santykių atvejui, pasiekiant 91,1 %. Medienos dalelės, nors ir mažiausio tankio, yra valomos efektyviai, nes jų organinės savybės leidžia joms geriau koaguluoti ir dėl to greičiau nusėsti į bunkerį.
5. Užterštame oro sraute medienos pelenai atskiriami efektyviausiai, kai oro srauto greitis ciklono kanaluose yra 16 m/s. 0–20 µm dydžio kietosiomis dalelėmis užterštas srautas efektyviausiai valomas aštuonkanaliame ciklone, kai srautų pasiskirstymo santykis yra 75/25, išvalymo laipsnis sudaro 84,6 %. Mažo tankio pelenai nesulimpa tarpusavyje taip kaip medienos dalelės, todėl plevena oro sraute. Dėl to pelenų dalelės lengviau išeina ir aštuonkanaliame ciklone, nes orui sunkiau pereiti, valymo efektyvumas pasiekiamas geresnis nei šešiakanaliame ciklone.

Literatūra

- Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I.; Konoverskytė, S. 2012. Study of gas-solid flow in a multichannel cyclone, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(2): 129–137. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2011.645825>
- Burov, A. A.; Burov, A. I.; Gamolich, V. Ya. 2007. Kontinualnaya model' zapylennogo krivolinyenogo techeniya gaza, *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta* 1(27): 235–237. Odessa.
- Burov, A. A.; Burov, A. I.; Silin, A. V.; Tsabiyev, O. N. 2005. Tsentrobezhnaya ochistka promyshlennykh vybrosov v atmosfere, *Yekologiya dovkillya ta bezpeka zhittediyalnosti* 6: 44–51.
- Burov, A. A.; Burov, A. I.; Karamushko, A. V. 2011. Povitryana techiya u krivolinyynomu kanali, *Yekologiya dovkillya ta bezpeka zhittediyalnosti* 12: 174–177.
- Elsayed, K.; Lacor, C. 2011. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Appl Mathematical Modelling* 35(4): 1952–1968. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>
- Elsayed, K.; Lacor, C. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations, *Chemical Engineering Science* 65(22): 6048–6058. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.042>
- Gimbin, 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, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 44: 7–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.03.005>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.019>
- You-hai, J.; Yu-chun, Z.; Zhen-bo, W. 2013. Simulation and experiment of gas-solid flow field in short-contact cyclone reactors, *Chemical Engineering Research and Design* 91: 1768–1776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2013.03.015>
- Jakštonienė, I.; Serebryansky, 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, 19–20 May 2011, Vilnius, Lithuania, vol. 1.* Vilnius: Technika, 134–138. ISBN 978-9955-28-263-1.
- John, W.; Reischl, G. 2012. A cyclone for size-selective sampling of ambient air, *Journal of the Air Pollution Control Association* 30: 872–876. <http://dx.doi.org/10.1080/00022470.1980.10465122>
- Kaya, F.; Karagoz, I. 2008. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science* 94(10): 1273–1278.
- Keça, A. 2013. The efficiency improvement of a large-diameter cyclone – The CFD calculations, *Separation and Purification Technology* 118: 105–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.040>
- Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos įsakymas Nr. 69 1998 m. balandžio 30 d. *Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas.* 42 p.
- 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>
- Serebryanskiy, D. A. 2004. *Povysheniye effektivnosti gazoochistki teplovykh energeticheskikh ustanovok: dissertatsiya.* Odesskiy natsionalnyy politekhnicheskyy universitet, Odessa. 155 p.
- Serebryanskiy, D. A. 2011. *Vysokoeffektivnyy tsentro bezhnyy filtr dlya ochistki gazov.* Kiyev: Institut tekhnicheskoy teplofiziki Natsionalnoy akademii nauk Ukrainy. 8 p.
- Serebryanskiy, D. A.; Plashikhin, S. V. 2011. *Stendovi viprobuvannya vidtsentrovogo filtra i tsiklofiltra pri ulovlyuvanni zoli tverdopalivnogo kotla.* Kiyev: Naukovi visti Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini, 89–94.
- Vaitiekūnas, P.; Jakštonienė, I. 2010. Analysis of numerical modelling 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/jeel.2010.37>

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO THE TWO-LEVEL CYLINDRICAL CYCLONE WITH A DIFFERENT NUMBER OF CHANNELS

E. Baliukas, P. Baltrėnas

Abstract

The multichannel two-level cyclone has been designed for separating solid particles from airflow and built at the Laboratory of Environmental Protection Technologies of Vilnius Gediminas Technical University. The conducted research is aimed at determining air flow distribution at two levels and channels of the multichannel cyclone. The multifunctional meter Testo-400 and the dynamic Pitot tube have been used for measuring air flow rates in the channels. The obtained results show that the equal volume of air gets into two levels installed inside the cyclone, and rates are distributed equally in the channels of these levels. The maximum air flow rate is recorded in the first channel and occurs when half-rings are set in such positions so that 75% of air flow returns to the previous channel. The biggest aerodynamic resistance is 1660 Pa and has been recorded in the cyclone having eight channels under air flow distribution ratio 75/25. The highest air purification efficiency has been observed in the two-level six-channel cyclone under air flow distribution ratio 75/25. The effectiveness of separating granite particles is 92.1% and that of wood particles – 91.1 when the particles are up to 20 μm in diameter.

Keywords: multichannel, cyclone, airflow, solid particles, air purification.