

DAUGIALYGIŲ DAUGIAKANALIŲ CIKLONŲ AERODINAMINIŲ PARAMETRŲ IR VALYMO EFEKTYVUMO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR PALYGINIMAS

Aleksandras CHLEBNIKOVAS¹, Pranas BALTRĖNAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹aleksandras.chlebnikovas@vgtu.lt; ²pbalt@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjami daugialygių daugiakanaliai ciklonai – naujos kartos oro valymo įrenginiai, galintys pašalinti iš užterštų oro srautų ypač smulkias kietąsias daleles nuo 2 mikronų dydžio bei pasiekti virš 95 % bendrą valymo efektyvumą. Daugiakanalių ciklonų darbas pagrįstas išcentrinėmis jėgomis bei papildomai atsirandančio filtracijos proceso veikimu. Daugialygio ciklono konstrukcija leidžia pasiekti didesnio valomo oro srauto debitą, esant tiems patiems įrenginio matmenims, taip sutaupant įrenginio darbui reikalingą plotą, gamybos bei eksploatacines išlaidas. Atliktuose tyrimuose nagrinėjamas oro srauto parametrų kitimas vieno, dviejų ir trijų lygių daugiakanaliame ciklone, kintant valomo oro debitui, esant tolygiam 50/50 periferinio/tranzitinio oro srauto santykiui. Pagal gautą oro srauto dinamiką, greičių pasiskirstymą daugiakanalio ciklono kanaluose, nustatytą pasipriešinimą bei valymo efektyvumą galima spręsti apie srauto turbulentiškumą, srautų judėjimą kanalų skerspjūviuose ir parinkti tinkamiausią pritaikymą. Valymo efektyvumo tyrimai atlikti panaudojant granito bei medienos pelenų ypač smulkias kietąsias daleles. Didžiausias valymo efektyvumas siekė 93,3 %, esant vidutinei kietųjų dalelių 4,5 g/m³ koncentracijai, kai aerodinaminis pasipriešinimas buvo lygus 1525 Pa.

Reikšminiai žodžiai: daugialygis ciklonas, greitis, aerodinaminis pasipriešinimas, valymo efektyvumas, kietosios dalelės.

Įvadas

Kietosios dalelės iš oro (dujų) srauto valomos su skirtingai veikiančiais valymo įrenginiais. Dalelių gaudytuvais atskiriamos technologinių procesų metu iš ištraukiamo oro srauto vėdinimo sistemose išsiskiriančios dalelės.

Lyginant su kitais valymo renginiais dažniausiai kietosios dalelės (KD) valomos iš oro srauto ciklonais. Ciklono įrenginių pagrindiniai privalumai yra nedidelė kaina, paprasta konstrukcija bei nesudėtinga eksploatacija. Dėl savitos konstrukcijos, kurioje nėra jokių judamųjų dalių bei filtruojančių paviršių, kuriuos reikėtų nuolat prižiūrėti, palyginti nedidelio aerodinaminio pasipriešinimo ir didelio efektyvumo ciklonai išliks konkurencingi šiuolaikinėje rinkoje dar ilgą laiką (Bernardo *et al.* 2006).

Pramonėje susidarantių kietosiomis dalelėmis užterštų dujų srautų valymo problemos sprendimas išlieka vienas iš pagrindinių aplinkos inžinerijos uždavinių. Dėl oro taršos blogėja aplinkos oro kokybė, susidaro nepalankios darbo sąlygos darbuotojams bei įrangai. Į žmogaus organizmą patekusios KD sukelia akių, odos bei kvėpavimo takų traumas, kraujagyslių bei širdies ligas, pasižymi kancerogeniniu poveikiu (Blumberga *et al.* 2012; Luca, Ioan 2012; Pushnov, Berengarten 2011).

Įprasto ciklono veikimas pagrįstas labai paplitusiu kietųjų dalelių atskyrimo principu, dėl oro srauto sukurtinio judėjimo įrenginio korpuso viduje atsirandant išcentrinėmis jėgomis. Minėtų ciklonų valymo efektyvumas siekia 75–85 %, o oras išvalomas nuo smulkių kietųjų dalelių, kurių dydis virš 20 mikronų skersmens. Tai nėra pakankama, siekiant įgyvendinti Direktyvos 2008/50/EB tikslus dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje (Baltrėnas *et al.* 2012; Hu *et al.* 2005; Vasile *et al.* 2012; Vaitiekūnas, Jakštonienė 2010; Zhao *et al.* 2006).

Pagrindinis ciklono veikimo trūkumas – nepakankamas dujų srauto nuo skirtingo dispersiškumo kietųjų dalelių, ypač mažesnių nei 10 μm skersmens, išvalymas. Todėl šie įrenginiai dažniausiai naudojami iš pradžių, valant sausas, nelipnias daleles iš oro srauto. Kai oro srauto greitis padidėja ir viršija 15 m/s, dėl atsirandančio pasiurbimo surinkimo bunkerio bei ciklono konsinės korpuso dalies sujungimo vietoje oro valymo efektyvumas taip pat mažėja. Dažnai įrenginiai pasižymi dideliu aerodinaminio pasipriešinimu, todėl veikimo metu didėja išlaidos energijai ir apribojamas įrenginio debitas (Avci, Karagoz 2003; Gujun *et al.* 2008; Mothes, Löffler 1988; Vaitiekūnas, Jakštonienė 2010).

Viena iš ciklono efektyvumo apskaičiavimo problemų yra srauto dinamikos parametrų poveikis. Dideliuose ciklonuose srautas yra turbulentinis, o trinties jėgų įtaka reikšminga. Mažuose ciklonuose svarbesnės gali būti srauto ir eksploatacinės sąlygos – greitis, temperatūra, slėgis, klampa ar ciklono skersmuo, – nes šiuose ciklonuose srautas gali būti laminarinis, turbulentinis arba pereinamasis. Laminariniame sraute eksploataciniai parametrai turi didesnės įtakos ciklono efektyvumui nei turbulentiniam (Bernardo *et al.* 2006; Hoffmann, Stein 2002; Kaya, Karagoz 2008; Raoufi *et al.* 2008).

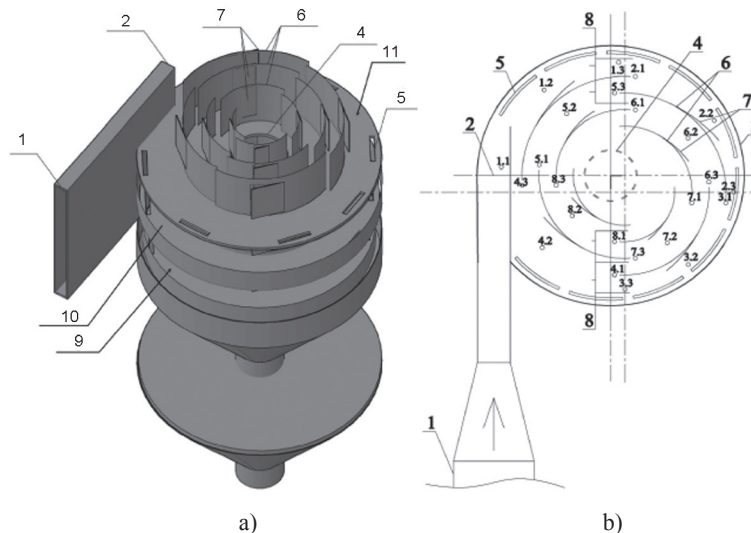
Tyrimuose nagrinėtas aerodinaminio pasipriešinimo kitimas, priklausantis nuo srauto dinamikos bei daugiakanalio ciklono vidinės konstrukcijos parametrų. Taikant daugiakanalį cikloną galima valyti orą esant padidėjusiai temperatūrai ir drėgmei. Daugiakanalių ciklonų oro filtracija vyksta dėl išcentrinė jėgų poveikio. Daugialygė ciklono konstrukcija leidžia pasiekti didesnį valomo oro srauto debitą, esant analogiškam įrenginio skersmeniui, taip sutaupant įrenginio darbui reikalingą plotą, gamybos bei eksploatacines išlaidas.

Tyrimų tikslas – ištirti oro srauto greičio kitimą skirtinguose cilindrinio korpuso lygiuose bei jų kanaluose, aerodinaminio pasipriešinimo parametro priklausomybes, ir nustatyti iki 20 μm dydžio ypač smulkiomis granito ir medienos pelenų KD užteršto oro srauto bendrąjį valymo efektyvumą.

Metodika

Naujos kartos oro valymo įrenginio eksperimentinis stendas įrengtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Aplinkos apsaugos institute. Daugiakanalio ciklono įrenginio vidinės konstrukcijos principinė schema pavaizduota 1 pav. Vieno, dviejų bei trijų lygių ciklonų separavimo kamerų konstrukcijos yra analogiškos, skiriasi tik lygių skaičius.

Dvifazis oro srautas liestinės kryptimi įteka pro įėjimo angą ir patenka į separavimo kamerą, į pirmąjį ciklono kanalą, turintį periferinę sienelę bei apribojamą pirmojo cilindrinio ketvirtziedžio. Srautas, ištekėjęs iš ankstesniojo kanalo, atsitrenkia į pusziedžio (ketvirtziedžio) sienelę ir pasidalija į du srautus – periferinį ir tranzitinį. Periferinio srauto dalis patenka į ankstesnį kanalą; taip vyksta užteršto srauto filtracija grįžtamu srautu. Tranzitinis srautas teka į kitą kanalą, vedantį prie įrenginio ašies ir ištekėjimo iš ciklono angos. Tokiu būdu tekėdamas, oro srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose bei yra filtruojamas ketvirtziedžių tarpuose. Veikiant išcentrinėms jėgoms, kurias sukuria sukūrinis srautas, ir filtracijos efektui srautų persiskyrimo zonoje, KD yra nusodinamos bei kaupiamos ciklono bunkeryje, patekdamos į jį pro segmentinius žiedinius plyšius. Išvalytas oras, praėjęs pro visus ciklono kanalus, išteka iš sistemos per oro srauto išėjimo angą. Pro cilindrinė pusziedžių/ketvirtziedžių tarpus pratekėjęs periferinis



1 pav. Trijų lygių daugiakanalio ciklono 3D vaizdas (a) ir principinė schema (b): 1 – užteršto srauto įtekėjimo kanalas, 1.1 – 8.3 – oro srauto greičio matavimo taškai, 2 – įtekėjimo anga, 3 – ciklono separavimo kamera, 4 – išvalyto srauto ištekėjimo anga, 5 – segmentiniai žiediniai plyšiai, 6 – cilindriniai ketvirtziedžiai su atlenktomis angų plokštelėmis, 7 – atlenktos ketvirtziedžių plokštelės, 8 – ciklono kanalai, 9 – I lygis, 10 – II lygis, 11 – III lygis

Fig. 1. Three-level multi-channel 3-D view (a) ir principal scheme (b): 1 – dusted airflow inlet, 1.1 – 8.3 – airflow velocity measurement points, 2 – inlet opening, 3 – cyclone separation chamber, 4 – cleaned airflow outlet, 5 – segment circular spacings, 6 – quarter cylindrical shells with folded opening slots, 7 – folded opening slots of quarter cylindrical shells, 8 – cyclone channels, 9 – 1st level, 10 – 2nd level, 11 – 3rd level

srautas sudaro oro srauto užuolaidas, taip pasireiškia papildomas efektas, kuris daro įtaką oro valymo efektyvumo padidėjimui. Esant konstrukcijai su cilindriniais ketvirtziedžiais, su atlenktomis angų plokštelėmis sudaryti uždari kontūrai turi dvigubai daugiau srautų persiskyrimo zonų, negu konstrukcijoje su cilindriniais pusziedžiais. O įrengti 5° kampo angų plokštelių atlenkimai suteikia galimybę kanalo viduryje iš dalies išvalytam srautui grįžti į ankstesnį kanalą, taip ilginant srauto filtracijos laiką. Naudojant cilindrinis ketvirtziedžius, kanalų skaičius ciklone yra dvigubai didesnis, lyginant su atveju, kai naudojami cilindriniai pusziedžiai.

Tyrimų metu nustatytas oro srauto greičio vieno, dviejų ir trijų lygių daugiakanalių ciklonų atskiruose kanaluose bei lygiuose kitimas, esant 1000 m³/h oro srauto debitui, išlaikant 16 m/s vidutinį oro srauto greitį ciklono kanaluose. Greičio kitimas kanaluose buvo nustatytas esant tolygiam 50/50 periferinio bei tranzitinio srautų santykio atvejui. Šis srautų santykis pagal ankstesnius tyrimus buvo pasirinktas kaip optimalus. Tiriant aerodinaminį pasipriešinimą bei valymo efektyvumą, buvo papildomai atlikti testai, esant vyraujančiam tranzitiniam srautui – 25/75, kuris kartu su 50/50 srautų pasiskirstymu yra vienas iš tinkamesnių.

Greičiams nustatyti buvo tiesiogiai matuojami dinaminiai slėgiai: Pito vamzdelis guminėmis žarnelėmis, kurių vidinis skersmuo lygus 6 mm, išorinis – 8 mm, buvo sujungiamas su Testo-400 matuokliu (temperatūros matavimo ribos: 20–70 °C, paklaida ±0,2 °C, greičio matavimo ribos: 1–30 m/s, paklaida ±0,05 m/s).

Kiekviename kanale buvo analogiškai parinkti taškai: tiesioje kanalo pradžioje ir 45° bei 90° kampais išsidėsčiusiose kanalo skerspjūviuose, kurie pavaizduoti 1b pav. Kiekviename kanale buvo parinkti trys taškai, kurie buvo išdėstyti nuo tiesios kanalo pradžios iki 90° kampu išsidėsčiusių kanalo skerspjūvių.

Pito vamzdelių skirtinguose aukščiuose (2 cm virš separavimo kameros dugno, kanalo aukščio viduryje bei 2 cm žemiau separavimo kameros dangčio) ciklono lygių kanaluose buvo išmatuotas oro srauto greitis. Aerodinaminis pasipriešinimas buvo išmatuotas diferenciniu slėgio matuokliu DSM-1 (matavimo ribos 0–20 000 kPa; paklaida ±5 Pa).

Kompresorius sujungiamas su padavimo purkštuku, kuriuo yra išsiurbiamos dulkių dalelės. Pastarosios pereina tiesiai į oro ciklono įėjimo ortakį, kurio skersmuo siekia 160 mm. Bandinių masės nustatymui naudotos svarstyklės (paklaida ±0,5 mg), sekundmačiu „Sekonda“ buvo fiksuojamas oro traukimo laikas (paklaida ±0,2 s).

Ciklonų valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami, remiantis LAND 28-98/M-08 metodika.

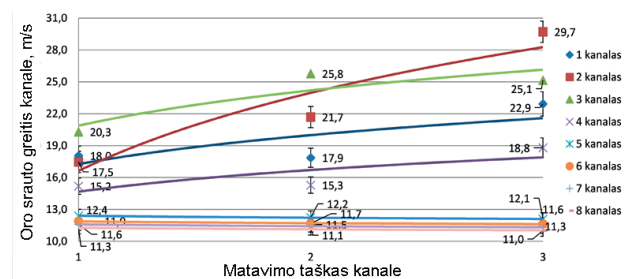
Eksperimentiniuose bandymuose tirta 0–20 μm dalelių frakcija. Likusi dalis yra pakartotinai siojama. Eksperimentinių tyrimų metu aplinkos temperatūra kito nuo 19,5 °C iki 22,5 °C, o santykinis drėgnis siekė 56 %.

Kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas buvo nustatinėjamas, kintant įleidžiamam pasirinktų kietųjų dalelių kiekiui. Granito (tankis 2900 kg/m³) bei medienos pelenu (tankis 850 kg/m³) kietųjų dalelių koncentracija užterštame ore kito nuo 500 mg/m³ iki 10 g/m³.

Rezultatai ir jų analizė

Daugialygio kanalinio ciklono tyrimuose pirmiausia nustatytas oro srauto greičių pasiskirstymas ciklono lygiuose ir kanaluose, išnagrinėtas greičių kitimas kanaluose, kai buvo 50/50 srautų pasiskirstymo santykis. Tyrimai atlikti su vieno, dviejų ir trijų lygių aštuonių kanalų ciklonais.

Analizuojant vieno lygio aštuonių kanalų ciklono vidinę ketvirtziedžių padėtį, esant 16 m/s vidutiniam greičiui ciklone, nustatyta, kad antro kanalo pabaigoje, trečiajame matavimo taške, užfiksuotas didžiausias oro srauto greitis. Antro kanalo pradžioje greitis buvo lygus 17,5 m/s. Judant link kanalo pabaigos, vertės padidėjo 1,7 karto ir siekė 29,7 m/s (2 pav.). Cilindrinio korpuso ciklone įrengti cilindriniai ketvirtziedžiai išdėstomi pagal jų spindulius, mažėjimo tvarka, bei atitraukiami, atsižvelgiant į įtekėjimo plotį. Dėl tokio išdėstymo antrasis ketvirtziedis yra labiau nei pirmasis ketvirtziedis pristumiamas prie ciklono sienelės, todėl antro kanalo pabaigoje kanalo skerspjūvis mažėja. Antro kanalo skerspjūvio plotas pradžioje yra apytiksliai 3 kartus didesnis nei pabaigoje. Panašiai greitis didėja ir pir-



2 pav. Vieno lygio cilindrinio aštuonių kanalų ciklono vidutinių oro srauto greičių kitimas ciklono kanaluose, panaudojant cilindrinis ketvirtziedžius su 5° kampu atlenktomis angų plokštelėmis, esant 50/50 srautų pasiskirstymų santykiui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose

Fig. 2. Variations in the average air flow velocities in the channels of the one-level cylindrical eight-channel cyclone applying quarter cylindrical shells with opening slots folded at an angle of 5° under flow distribution rates 50/50 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

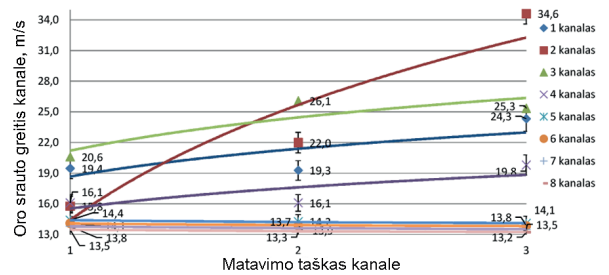
mame, trečiame bei ketvirtame kanaluose, kurie susiaurėja 1,3 karto. Pagal gautus rezultatus apskaičiuota, kad vieno lygio ciklono antro kanalo vidutinis oro srauto greitis yra 14,3 % didesnis nei pirmame kanale.

Ištyrus oro srauto greičius ketvirtame ir tolimesniuose kanaluose, galima daryti išvadą, kad greitis kiekviename kanale nuolat mažėja. Pokytis tarp ketvirto ir penkto kanalų greičio verčių lygus 3,8 m/s. Tarp penkto ir šešto kanalų vidutinio greičio skirtumas yra 0,7 m/s. Kituose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Pradedant nuo ketvirto kanalo, kurio plotis išlieka pastovus, vyrauja tolygus oro srauto judėjimas. Nagrinėjamos konstrukcijos ketvirtžiedžiai žymiai skiriasi tuo, kad išoriniuose kanaluose (nuo pirmo iki ketvirto) oro srauto greitis padidėjo iki 1 m/s, o vidiniuose kanaluose (nuo penkto iki aštunto) sumažėjo. Įrengtos angos su 5° kampu atlenktomis plokštelėmis papildomai gražina dalį oro srauto, todėl greitis išoriniuose kanaluose padidėja. Penktame – aštuntame kanaluose greitis mažėja (3–4 %) nuo kanalo pradžios link pabaigos. Labiausiai greitis sumažėja (4 %) penktame kanale. Tekėdamas kanalu, oro srautas nuolat susiduria su kanalo sienelėmis ir yra veikiamas trinties jėgos. Kuo ilgesnis yra oro srauto kelias kanale, tuo oro srautą labiau veikia trinties jėga. Dėl šios priežasties nustatyta, kad penktame kanale, kurio plotis yra vienodas ir toks pat, koks tolesniuose kanaluose, greitis mažėja labiau.

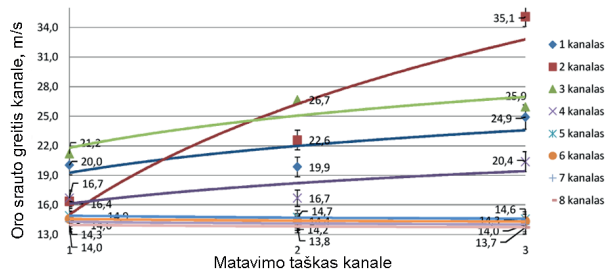
Lyginant tarpusavyje tyrimus, atliktus su skirtingų konstrukcijų naujos kartos daugiakanaliais ciklonais, dviejų lygių aštuonių kanalų ciklone buvo nustatyta analogiška vidinė ketvirtžiedžių padėtis taip, kad tranzitinis oro srautas būtų lygus periferiniam srautui (50/50 oro srautų pasiskirstymo santykis), o vidutinis greitis ciklone lygus 16 m/s. Tokiu būdu didžiausias oro srauto greitis nustatytas antrojo lygio antro kanalo paskutiniame matavimo taške (3 pav.).

Antrojo lygio antro kanalo pradžioje nustatytas greitis lygus 14,0 m/s. o pabaigoje jis padidėjo iki 15,8 m/s (3 pav., b). Didėjimo tendencija stebima ir pirmajame antro kanalo lygyje. Greitis didėja, nes antro kanalo pradžia 3 kartus platesnė už pabaigą, todėl oro srauto greitis padidėja apytiksliai 2,2 karto. Dėl savitos vidinės ciklono separavimo kameros konstrukcijos pirmojo lygio antrame kanale vidutinis oro srauto greitis buvo 17,3 % didesnis nei pirmame kanale. Skirtumas tarp pirmojo ir antrojo lygio ketvirto kanalo vidutinių greičių lygus 0,8 m/s, o penktojo kanalo – atitinkamai 0,5 m/s. Tolesniuose kanaluose mažėjimo tendencija išlieka panaši. Kadangi ketvirto ir tolesnių kanalų pločiai išlieka pastovūs, oras ima judėti tolydžiai.

Pirmojo bei antrojo lygio penktame – aštuntame kanaluose greitis mažėja nuo pradžios link pabaigos. Pokytis vidutiniškai lygus 3–5 %. Didžiausias greičio sumažėjimas



a)



b)

3 pav. Dviejų lygių cilindrinio aštuonių kanalų ciklono vidutinių oro srauto greičių kitimas ciklono kanaluose pirmajame (a) ir antrajame (b) lygiuose, panaudojant cilindrinis ketvirtžiedžius su 5° kampu atlenktomis angų plokštelėmis, kai yra 50/50 srautų pasiskirstymų santykis ir 16 m/s vidutinis oro srauto greitis ciklono kanaluose

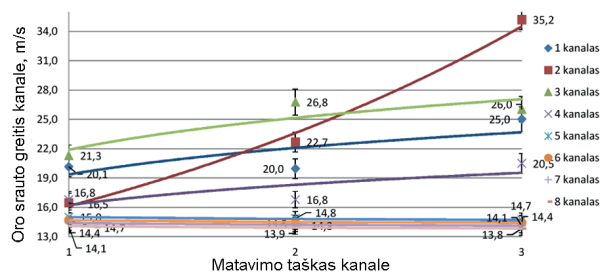
Fig. 3. Variations in the average air flow velocities at the 1st (a) and 2nd (b) level in the channels of the two-level cylindrical eight-channel cyclone applying quarter cylindrical shells with opening slots folded at an angle of 5° under flow distribution rates 50/50 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

nustatytas penktame kanale – 4,9 %. Vertinant pirmojo ir antrojo lygių vidutinius greičius, galima daryti išvadą, kad vidutinis antrojo lygio kanalų greitis buvo 0,6 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,7 m/s). Didžiausias skirtumas nustatytas tarp abiejų lygių nustatytų oro greičio verčių, jis siekė 0,7 m/s. Galima daryti prielaidą, kad tokiam rezultatui turėjo įtakos papildomas oro srautas, atitekantis iš pirmojo lygio. Kaip ir esant vieno lygio daugiakanaliame ciklonui, ketvirtžiedžiuose įrengtos angos, kurių plokštelės atlenktos 5° kampu, nukreipia didesnę oro srauto debitą iš vidinių (tolesnių) kanalų į išorinius (ankstesnius) – pirmą – ketvirtą kanalą. Dėl šios priežasties padidėja oro srauto greitis išoriniuose kanaluose, o tolesniuose kanaluose greitis sumažėja apie 7 %.

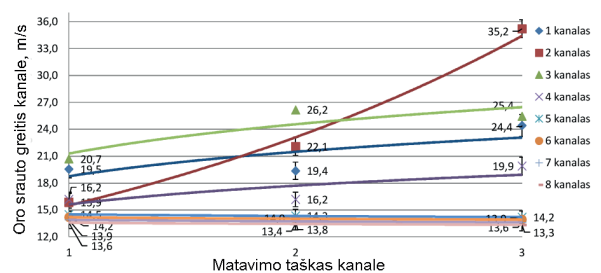
Trijų lygių konstrukcijos daugiakanaliame ciklone didžiausias nustatytas oro srauto greitis buvo užfiksuotas trečiojo lygio antro kanalo paskutiniame matavimo taške. Pastarojo kanalo pradžioje greitis buvo lygus 15,6 m/s, o pabaigoje pakilo iki 34,9 m/s (4 pav., c). Greitėjimo tendencija stebima ir pirmajame bei antrajame pirmo kanalo lygiuose. Tiek vieno, tiek dviejų lygių ciklonuose greitis

didėja dėl kanalų skerspjūvių plotų pokyčių. Pirmojo lygio antro kanalo vidutinis oro srauto greitis buvo 17,3 % didesnis nei pirmame kanale. Vieno ir dviejų lygių ciklonuose oro greičio pokytis vidiniuose kanaluose pirmajame lygyje skyrėsi nežymiai.

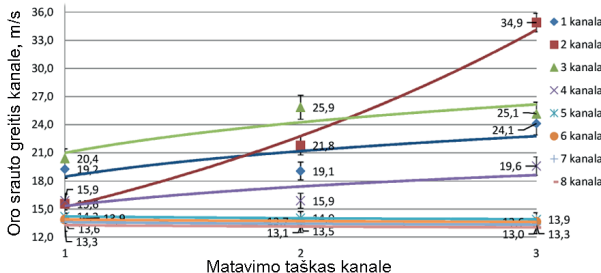
Visuose trijuose lygiuose skirtumas tarp ketvirto ir penkto kanalų vidutinio greičio apytikriai lygus 0,8 m/s. Vertinant visų trijų lygių vidinių kanalų oro greičius (penktame – aštuntame kanaluose), galima matyti, kad greitis nuo kanalo pradžios link pabaigos mažėja tolygiai, o vertės vidutiniškai sumažėja 4–6 %. Labiausiai greitis sumažėja penktame kanale (5,9 %).



a)



b)



c)

4 pav. Trijų lygių cilindrinio aštuonių kanalų ciklono vidutinių oro srauto greičių kitimas ciklono kanaluose: pirmajame (a), antrajame (b) ir trečiajame (c) lygiuose, panaudojant cilindrinis ketvirtžiedžius su 5° kampu atlenktomis angų plokštelėmis, kai ciklono kanaluose srautai pasiskirsto 50/50 santykiu, o vidutinis oro srauto greitis lygus 16 m/s

Fig. 4. Variations in the average air flow velocities at the 1st (a) ant 2nd (b) and 3rd (c) level in the channels of the two-level cylindrical eight-channel cyclone applying quarter cylindrical shells with opening slots folded at an angle of 5° under flow distribution rates 50/50 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

Trijų lygių ciklone vidutiniai greičiai kanaluose skiriasi nežymiai. Vidutinis antro lygio kanalų greitis yra 0,3 m/s didesnis už pirmojo lygio vidutinį greitį (15,5 m/s), o skirtumas tarp trečiojo ir antrojo lygių vidutinio greičio yra 0,5 m/s (4 pav.).

Didžiausias skirtumas yra tarp pirmojo bei trečiojo lygių aštuntame kanale, jis siekia 1,1 m/s. Trečiajame lygyje nustatytos oro srauto greičio vertės yra didžiausios. Kai yra trys lygiai, antrojo lygio srautą papildoma srautas, atitekęs iš pirmojo lygio, o trečiojo lygio – atitekęs iš antrojo ir trečiojo lygių srautas. Tiriant vidinę ciklono konstrukciją su cilindriniais ketvirtžiedžiais, kurių angų plokštelės atlenktos 5° kampu, nustatyta, kad oro srauto greitis pradiniuose kanaluose padidėjo vidutiniškai 7 %, o tolesniuose kanaluose greitis sumažėjo.

Skirtingų konstrukcijų vieno, dviejų ir trijų lygių aštuonių kanalų ciklono aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų rezultatai pateikti 5 pav. Esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose, nustatyta, kad esant vienodam 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui, didžiausia aerodinaminio pasipriešinimo vertė siekė 1525 Pa. Ji nustatyta tiriant trijų lygių cikloną. Ciklono konstrukcijoje mažėjant lygių skaičiui, aerodinaminis pasipriešinimas įprastai mažėja. Lyginant trijų ir dviejų lygių konstrukcijų ciklonų aerodinaminio pasipriešinimo parametrus, nustatyta, kad vertė sumažėjo 6,9 % ir buvo lygi 1420 Pa. Tačiau, lyginant dviejų ir vieno lygio ciklonus, verčių sumažėjimas nebuvo toks reikšmingas, skirtumas tarp pastarųjų sudarė 3,5 %.

Atliktų tyrimų rezultatai parodo, kad mažinant periferinio oro srauto dalį – srautą judantį į ankstesnį kanalą – aerodinaminio pasipriešinimo vertė sumažėja. Vieno lygio daugiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas lygus 1330 Pa, t. y. 2,9 % mažiau, nei esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui. Augant daugiakanalių ciklonų lygių skaičiui, šis skirtumas didėja.



5 pav. Vieno, dviejų ir trijų lygių aštuonių kanalų ciklono aerodinaminis pasipriešinimas, panaudojant cilindrinis ketvirtžiedžius su 5° kampu atlenktomis angų plokštelėmis, esant 25/75 ir 50/50 srautų pasiskirstymų santykiui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose

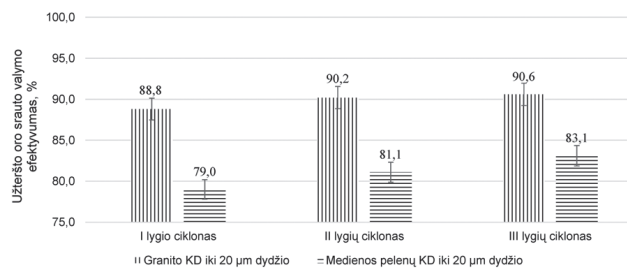
Fig. 5. The aerodynamic resistance of the one-, two- and three-level eight-channel cyclone applying quarter cylindrical shells with opening slots folded at an angle of 5° under flow distribution rates 25/75 and 50/50 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

Dviejų lygių ciklone esant minėtam srautų pasiskirstymui skirtumas tarp gautų verčių lygus 4,9 %, o trijų lygių ciklone – 6,9 %. Remiantis gautais rezultatais, galima daryti prielaidą, kad, kai yra 25/75 srautų pasiskirstymo santykis, aerodinaminio pasipriešinimo vertės mažiau priklauso nuo daugiakanalio ciklono lygių skaičiaus. Tokią priklausomybę galima paaiškinti aerodinaminio pasipriešinimo pokyčiais vieno ir trijų lygių ciklonuose. Esant 25/75 pasiskirstymui, šis skirtumas siekė 1,07 karto, o esant 50/50 pasiskirstymui – 1,11 karto. Tuo remiantis galima teigti, kad esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui, susidaro papildomų slėgio nuostolių, kurie didina aerodinaminį ciklono pasipriešinimą. Tačiau, iš kitos pusės, esant didesnei periferinio srauto daliai, įtekantis srautas intensyviau filtruojamas periferiniu srautu, todėl ypač smulkiadispersių kietųjų dalelių atskyrimo efektyvumas didėja. Galima teigti, kad esant vieno lygio aštuonių kanalų ciklono konstrukcijai, panaudojant ketvirtziedžius su 5° kampu atlenktomis angų plokštelėmis, aerodinaminio pasipriešinimo vertės yra mažiausios iš visų nagrinėtų konstrukcijų. Galima daryti išvadą, kad esant tokiai konstrukcijai oro srautas juda su mažesniu pasipriešinimu, todėl nesudaro papildomų nuostolių aspiracinei valymo įrenginio sistemai. Taip pat galima teigti, kad ketvirtziedžiuose esančios angos suteikia galimybę oro srautui judėti mažesnio pasipriešinimo trajektorija, grįžtant į ankstesnį kanalą, todėl aerodinaminis daugiakanalio ciklono pasipriešinimas sumažėja.

Daugialygių daugiakanalių ciklonų valymo efektyvumas buvo tirtas panaudojant granito ir medienos pelenų ypač smulkias KD, kurių dydis siekė iki 20 μm. Pateikti eksperimentinių tyrimų rezultatai, nagrinėjant vieno, dviejų ir trijų lygių ciklonus, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose (6 pav.).

Didžiausias užteršto oro srauto valymo efektyvumas siekė 90,6 %, panaudojant granito KD, valant srautą trijų lygių aštuonių kanalų ciklone. Lyginant vertes, gautas tiriant vieno ir dviejų lygių ciklonus, galima daryti išvadą, kad dviejų ir trijų lygių ciklonų efektyvumas yra apytikriai vienodas, vertės pakinta paklaidų ribose. Vieno lygio daugiakanalio ciklono efektyvumas mažiausias iš visų nagrinėtų, o vertė siekė 88,8 %, t. y. 1,4 % mažiau nei dviejų lygių ir 1,8 % mažiau nei trijų lygių ciklone.

Analizuojant gautus valymo efektyvumo rezultatus, panaudojant medienos pelenų KD, galima prieiti prie išvados, kad tendencijos išlieka panašios, kaip ir panaudojant granito KD. Didžiausias efektyvumas buvo gautas esant trijų lygių daugiakanalio ciklono konstrukcijai, kuris lygus 83,1 %. Būtina paminėti, kad, lyginant atvejus su vieno ir dviejų lygių ciklonais, aptinkamas žymus efektyvumo



6 pav. Vieno, dviejų ir trijų lygių ciklono oro srauto, užteršto granito KD bei medienos pelenų KD, bendras valymo efektyvumas, esant 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui atvejui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose

Fig. 6. The overall cleaning efficiency of dusted airflow on granite and wood ash PM of the one-, two- and three-level cyclone under flow distribution rates 25/75 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

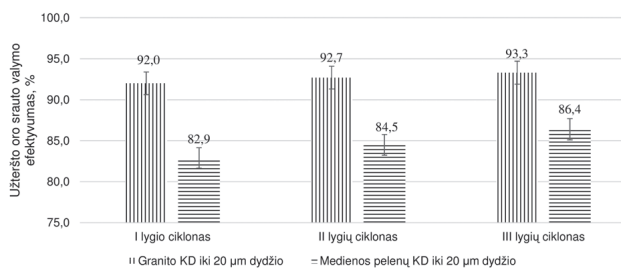
verčių mažėjimas, ko nebuvo pastebėta nagrinėjant granito KD.

Dviejų lygių ciklone medienos pelenų atskyrimas iš oro srauto siekė 81,1 %, t. y. buvo 2 % mažesnis nei trijų lygių ciklone. Lyginant vieno ir trijų lygių ciklonų efektyvumą, iš pateiktų rezultatų (6 pav.) matyti, kad skirtumas tarp verčių lygus 4,1 %. Įvertinus minėtas priklausomybes, galima daryti prielaidą, kad efektyvumas, panaudojant medienos pelenų KD, kurioms būdingas mažas savasis svoris ir adhezija, auga didėjant lygių skaičiui daugiakanalio ciklono konstrukcijoje. Didinant ciklono lygių skaičių, yra nustatomas optimalus oro srauto greitis kanaluose, o filtracijos procesas suintensyvėja pakartotinai nusodinus užterštame sraute esančias KD. Iš oro ypač smulkios KD, kurių dydis siekia nuo 1 iki 10 μm, valomos efektyviau esant daugiakanalio ciklono konstrukcijai su cilindriniais ketvirtziedžiais, ir žymiai efektyviau, lyginant šią įrenginių efektyvumą su tradiciniais ciklonais, kurių veikimas pagrįstas tik išcentrinį jėgų veikimu. Tokių KD masė nėra didelė, ir dalelės nepakankamai efektyviai nukreipiamos prie išorinės sienelės bei nusodinamos.

Lyginant granito ir medienos pelenų KD atskyrimo iš oro efektyvumą daugialygiuose ciklonuose, galima teigti, kad vidutinis santykis siekė 1,11 karto. Didžiausias skirtumas pastebėtas ištyrus efektyvumą vieno ir dviejų lygių ciklonų, mažiausias – trijų lygių ciklono.

Bendrojo valymo efektyvumo, parinkus tolygaus 50/50 srautų pasiskirstymo santykį, ir apskaičiuotų užteršto granito bei medienos pelenų oro srauto valymo efektyvumo kitimas pateiktas 7 pav. Pagal tyrimų rezultatus matyti, kad didžiausias pasiektas valymo efektyvumas gautas, tiriant granito KD trijų lygių ciklone. Esant vidutinei 4,5 g/m³ koncentracijai, vertė buvo lygi 93,3 %.

Vieno ir dviejų lygių ciklonuose granito KD valymo efektyvumas yra mažesnis ir atitinkamai lygus 92,0 %



7 pav. Vieno, dviejų ir trijų lygių ciklono oro srauto, užteršto granito KD bei medienos pelenų KD, bendras valymo efektyvumas, esant 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose

Fig. 7. The overall cleaning efficiency of dusted airflow on granite and wood ash PM of the one-, two- and three- level cyclone under flow distribution rates 50/50 and the established average velocity of 16 m/s in the cyclone

ir 92,7 %. Tokiu atveju granito KD užterštas srautas trijų lygių ciklone yra valomas 1,3 % ir 0,6 % efektyviau, nei atitinkamai vieno ir dviejų lygių ciklonuose. Analizuojant vieno, dviejų ir trijų lygių ciklonų valymo efektyvumo tyrimų rezultatus, darytina išvada, kad, ciklono konstrukcijoje įrengus papildomų lygių elementus, skirtumas tarp ypač smulkiomis dalelėmis užteršto srauto valymo efektyvumo verčių didėja.

Analizuojant efektyvumą užteršto srauto valymo nuo ypač smulkių medienos pelenų KD, kurios yra iki 20 µm dydžio, atrasta, kad didžiausia vertė nustatyta trijų lygių aštuonių kanalų ciklone, ji buvo lygi 86,4 %. Esant vieno ir dviejų lygių ciklonams, vertės yra atitinkamai mažesnės: 3,5 % ir 1,9 %. Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad daugialyge aštuonių kanalų ciklono konstrukciją taikyti yra efektyvu, ypač atskiriant mažo tankio ypač smulkias (iki 20 µm) teršalų daleles. Medienos pelenų KD, esančių užterštame sraute, atskyrimo efektyvumas didėja iki 4 %, didelio tankio, pavyzdžiui, granito KD – iki 2 %.

Valymo efektyvumo kitimo tendencijos išlieka panašios, valant granito kietąsias daleles, tačiau gautų verčių pokyčiai yra didesni. Todėl galima teigti, kad esant mažesnio tankio KD užterštam oro srautui, daugiakanalio ciklono aerodinaminiai parametrai turi mažiau įtakos. Galima manyti, kad veikiančios išcentrinės jėgos yra pakankamos nedidelį savąjį svorį turinčioms dalelėms nukreipti prie periferinės sienelės bei nusodinti, o vykstanti filtracija gerina bendrą valymo efektyvumą: nusėda ir ypač smulkios teršalų dalelės.

Lyginant skirtingus srautų pasiskirstymo santykius, galima prieiti prie išvados, kad tolygaus 50/50 srautų pasiskirstymo santykio atveju gautas efektyvumas yra didesnis. Vidutinis skirtumas tarp minėtų atvejų verčių lygus 3,6 %. Todėl galima teigti, kad esant vyraujančiam tranzitiniam srautui (25/75 srautų pasiskirstymo santykis) dėl mažes-

nio filtravimo ties ištekėjimu iš kiekvieno ciklono kanalo, bei aerodinaminių parametų pokyčio – oro srauto greičio ir aerodinaminio pasipriešinimo, užteršto srauto valymo efektyvumas mažėja. Todėl rekomenduojama naudoti tolygų oro srautų pasiskirstymo santykį.

Išvados

1. Didžiausias oro srauto greitis daugialygiuose aštuonių kanalų ciklonuose buvo nustatytas antrame kanale. Maksimali vertė siekė 35,2 m/s, nustatyta antrajame ir trečiajame lygiuose trijų lygių ciklone. Dviejų lygių ciklone vertė buvo 35,1 m/s, o vieno lygio – 1,2 karto mažesnė ir siekė 29,7 m/s. Lyginant oro srauto greičius daugiakanalio ciklono lygiuose pastebima, kad vertės trečiajame lygyje didesnės 10 % ir 15 % nei antrajame ir pirmajame lygiuose atitinkamai. Todėl prieinama prie išvados, kad oro srauto dalis iš ankstesnių ciklono lygių papildo kiekvieno tolesnio lygio srautą.
2. Maksimalus aerodinaminis pasipriešinimas yra nustatytas, esant tolygiam 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui ir 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose. Trijų lygių ciklono aerodinaminis pasipriešinimas siekė 1525 Pa. Dviejų lygių ciklono pasipriešinimas yra vidutiniškai 1,06, o vieno lygio 1,09 karto mažesnis nei trijų lygių ciklono. Esant vyraujančiam tranzitiniam srautui ir 25/75 srautų pasiskirstymo santykiui, aerodinaminis pasipriešinimas mažėja apie 5 % dėl pakitusių turbulentių srautų tekėjimo trajektorijų. Taip išvengiama papildomų energijos nuostolių.
3. Trijų lygių aštuonių kanalų ciklono oro valymo efektyvumas didžiausias (93,3%), esant 16 m/s vidutiniam oro srauto greičiui ciklono kanaluose ir tolygaus 50/50 srautų pasiskirstymo santykiui, panaudojant ypač smulkias iki 20 µm dydžio granito KD. Panaudojant vieno ir dviejų lygių aštuonių kanalų ciklono konstrukcijas, efektyvumas mažėja iki 3 %. Panaudojant medienos pelenų KD, gautas didžiausias efektyvumas siekė 82,9 %, 84,5 % ir 86,4 %, atitinkamai panaudojant vieno, dviejų ir trijų lygių aštuonių kanalų ciklonus.
4. Vertinant skirtingus atvejus – 25/75 ir 50/50, gauta, kad tolygaus srautų pasiskirstymo santykio 50/50 atveju gautas efektyvumas yra didesnis, vidutinis skirtumas tarp minėtų atvejų verčių lygus 3,6 %. Todėl galima teigti, kad, esant vyraujančiam tranzitiniam srautui (25/75 srautų pasiskirstymo santykis) dėl mažesnio filtravimo ties ištekėjimu iš kiekvieno ciklono kanalo, bei pokyčio aerodinaminių parametų – oro srauto greičio ir aerodinaminio pasipriešinimo – užteršto srauto valymo efektyvumas mažėja.

Literatūra

- 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)
- Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Jakštoņiene, 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>
- 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: 190–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2005.11.007>
- Blumberga, D.; Vigants, E.; Veidenbergs, I.; Vigants, G.; Vitolins, V. 2012. Eco-intensity analysis for a chip-fuelled boiler house, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(4): 249–255. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2012.695737>
- 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>
- Hoffmann, A. C.; Stein, L. E. 2002. *Gas cyclone and swirl tubes-principles, Design and Operation*. Berlin: Springer-Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-07377-3>
- 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>
- Kaya, F.; Karagoz, I. 2008. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science* 94(10): 1273–1278.
- LAND 27-98/M-08. 1998. Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamose dujose nustatymas. Svorio metodas, *Valstybės žinios*, Nr. 47-1298.
- Luca, F. A.; Ioan, C. A. M. 2012. Air quality management in Iasi city, *Environmental Engineering and Management Journal* 11(2): 377–383.
- Mothes, H.; Loffler, 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.
- Vaitiekūnas, P.; Jakštoņienė, 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>
- Vasile, A.; Caldararu, M.; Hornoiu, C.; Bratan, V.; Ionescu, N. I.; Yuzhakova, T.; Redey, A. 2012. Elimination of gas pollutants using SnO₂-CeO₂ catalysts, *Environmental Engineering and Management Journal* 11(2): 481–486.
- 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, *Chemical Engineering Research and Design* 84: 1158–1165. <http://dx.doi.org/10.1205/cherd06040>

EXPERIMENTAL RESEARCHES AND COMPARISON ON AERODYNAMIC PARAMETERS AND CLEANING EFFICIENCY OF MULTI-LEVEL MULTI-CHANNEL CYCLONE

A. Chlebnikovas, P. Baltrėnas

Summary

Multi-level multi-channel cyclone – the lately designed air cleaning device that can remove ultra-fine 20 μm particulate matter (PM) from dusted air and reach over 95% of the overall cleaning efficiency. Multi-channel cyclone technology is based on centrifugal forces and has the resulting additional filtering process operation. Multi-level structure of cyclone allows to achieve higher air flow cleaning capacity at the same dimensions of the device, thus saving installation space required for the job, production and operating costs. Studies have examined the air flow parameters change in one-, two- and three-levels multichannel cyclone. These constructions differ according to the productivity of cleaned air under the constant peripheral and transitional (50/50 case) air flow relations. Accordance with the results of air flow dynamics – velocity distribution of multi-channel cyclone, aerodynamic resistance and efficiency can be judged on the flow turbulence, the flow channel cross-section and select the most appropriate application. Cleaning efficiency studies were carried out using fine granite and wood ashes PM. The maximum cleaning efficiency was 93.3%, at an average of 4.5 g/m³, the aerodynamic resistance was equal to 1525 Pa.

Keywords: multi-level cyclone, velocity, aerodynamic resistance, cleaning efficiency, particulate matter.