



## DAUGIAKANALIO CIKLONO PANAUDOJIMO DUJŲ SRAUTO DULKĖTUMUI MAŽINTI AGRESYVIOJE APLINKOJE TEORINIS VERTINIMAS

Aleksandras CHLEBNIKOVAS<sup>1</sup>, Pranas BALTRĖNAS<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>aleksandras.chlebnikovas@vgtu.lt; <sup>2</sup>pbalt@vgtu.lt*

**Santrauka.** Naujos kartos daugiakanalio ciklonais smulkiadisversės kietosios dalelės pašalinamos iš užterštų dujų. Naudojant šiuos įrenginius, yra atskiriamos ir nusodinamos kietosios dalelės, kurių minimalus skersmuo siekia 2 mikrometrus, taip gaunama iki 95 % valymo efektyvumo. Tokios konstrukcijos ciklonai dažniausiai yra naudojami įprastomis sąlygomis, esant padidintai temperatūrai ir nedideliam drėgnumui. Esant agresyvioms aplinkos sąlygoms, šie įrenginiai užsikemša, o jų regeneruoti negalima. Tolesniuose ciklono veikimo parametrų tyrimuose numatoma analizuoti, kaip, taikant konstruktyvius sprendimus, pritaikyti cikloną ir šalinti kietąsias daleles iš dujų esant agresyvioms aplinkos sąlygoms. Šioje teorinėje analizėje yra aprašomas dujų srauto charakteristikų bei kietąsias daleles veikiančių jėgų pokytis esant skirtingai agresyviai aplinkai. Tokios sąlygos buvo apibrėžtos, nustatant 50–200 °C dujų srauto temperatūros intervalą ir tiriant dujų-garų srautą, kurio drėgnis siekė 70–100 %. Įvertinta agresyvių aplinkos sąlygų įtaka, daroma dujų srauto dinamikos jėgoms – slėgio, pasipriešinimo ir išcentrinės. – ir kietųjų dalelių mechaninėms jėgoms – gravitacijos ir adhezijos. Visi vertinami parametrai palyginti su vertėmis normaliomis sąlygomis.

**Reikšminiai žodžiai:** daugiakanalis ciklonas, agresyvioms aplinkos sąlygoms, kietosios dalelės.

### Įvadas

Imta plačiai taikyti oro valymo įrenginius, kuriuose kietosios dalelės (toliau KD) nusodinamos veikiant išcentrinėms jėgoms. Vieni populiariausių yra ciklonai. Nors jie naudojami jau seniai, iki šiol nėra visiškai ištirti, o veikimo principas nėra išsamiai apibrėžtas. Ciklone vykstantys reiškiniai yra sudėtingi, o papildomi konstrukciniai sprendimai dar labiau apsunkina tyrimus. Ciklone veikia tiek išcentrinės, tiek gravitacinės jėgos, esant sudėtingam sukuriamam judėjimui (Altmeyer *et al.* 2004). Ciklonai dažniausiai parenkami pagal empirinius duomenis, todėl pramonėje naudojami įvairių konstrukcijų ciklonai (Hoffmann, Stein 2002; Hu *et al.* 2005; Raoufi *et al.* 2008).

Skirtingos rūšies dulkėtam srautui sausai valyti esant įprastoms sąlygoms seniai naudojami tradiciniai ciklonai, tačiau jie nėra itin efektyvūs valant dujas, ypač užterštas mažo dispersiškumo (iki 20 μm skersmens) teršalų KD (Wang *et al.* 2006). Jie veikia pagal dažną ciklono kietųjų dalelių atskyrimo principą (ciklonai CN, CKTI, C, NIIOGaz), valymo efektyvumas siekia 75–85 %, o iš oro pašalinamos KD, kurių skersmuo yra didesnis nei 20 mikronų (Kaya, Karagoz 2008). To nepakanka, siekiant įgyvendinti Direktyvos tikslus dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje (Direktyva 2008/50/EB) ir atitikti

Direktyvos dėl kietųjų dalelių ribines vertes aplinkos ore (Tarybos direktyva 1999/30/EB), atsižvelgiant į reglamentuojamą  $KD_{10}$  ir  $KD_{2,5}$  (kietosios dalelės, kurių skersmuo iki 10 μm ir 2,5 μm atitinkamai) teršalų frakcijų išmetamąsias koncentracijas.

Daugiakanalio ciklonai plačiai naudojami neagresyviomis aplinkos sąlygomis smulkiadisversėms nuo 1 μm dydžio KD sugaudyti (Avci, Karagoz 2003). Juose iš užteršto dulkėto srauto, kuris pereina pro ciklono kanalų sistemą, išvalomos teršalų dalelės ne tik veikiant išcentrinėms jėgoms, bet ir papildomai sulaukiant dalį KD susidariusiomis „dujų srauto užuolaidomis“ ir nukreipiant teršalus į segmentinius plyšius separavimo kameroje (Baltrėnas *et al.* 2012; Burov *et al.* 2007; Vaitiekūnas, Jakštonienė 2010).

Tradiciniai ir daugiakanalio ciklonai yra labiau pritaikyti valyti lipniąsias KD iš dujų srauto, tačiau esant ypatingoms sąlygoms – aukštam drėgnumui, padidintai temperatūrai ir veikiant tam tikriems dujų srauto cheminiais junginiais – ciklonai užsikemša ir valymo procesas sustoja. Jų atkurti praktiškai neįmanoma. Todėl reikia papildomai moksliskai įvertinti valymo įrenginių eksploatavimą tokiomis sąlygomis ir įdiegti konstrukcinius patobulinimus.

Plačiausiai naudojamuose tradiciniuose bei daugiakanalioose ciklonuose KD valymo iš dujų tolydumą lemia

kietųjų dalelių sąveika su ribojančiais srautus paviršiais. Taip pat daro įtaką besiformuojantys KD nuosėdų sluoksniai ant paviršių, kurie pakeičia srautų judėjimą ir neigiamai veikia dalelių nusėdimo mechanizmą, todėl KD sugaudymo efektyvumas mažėja (Bernardo *et al.* 2006; Yoshida *et al.* 2005; Mothes, Löffler 1988; Sobolev *et al.* 2011).

Drėgno dujų srauto judėjimo metu ciklono kanaluose formuojasi KD nuosėdų sluoksniai. Šiuo atveju analizuojamas tamprus teršalų dalelių atšokimas ir adhezija su paviršiumi, šių dviejų veiksnių jėgų dydžiai, šios jėgos palyginamos tarpusavyje. Šių jėgų santykis yra tiesiogiai proporcingas dalelių skersmens trečiajam laipsniui. Taigi smulkiosioms dalelėms sąveikaujant su paviršiumi reikšmingos yra adhezijos ir autohezijos jėgos. Tyrimais yra nustatyta, kad net stačiakampiam kanale KD intensyviai nusėda ant paviršiaus. Mažosiomis dalelėmis yra laikomos tokios, kurios yra nešamos kartu su srautu dėl turbulentinių fliktuacijų (Sobolev *et al.* 2011; Winfield *et al.* 2013).

Pirmajame KD nuosėdų formavimosi etape iš smulkių dalelių susidaro monosluoksniai, išlyginantys paviršių. Ant jų pradeda tekėti laminarinio pobūdžio dujų srautas, pasižymintis nedideliu disperguojančiu poveikiu nuosėdoms. Nuosėdoms kaupiantis į šį sluoksnį jį sutankindamos gali įsiterpti stambesnės dalelės (Sobolev *et al.* 2011).

Į ciklono separavimo kamerą įtekant užterštam dujų srautui, smulkiųjų dalelių aglomeratai konstrukcijos išlinkimuose patenka ant sienelių ir prilimpa prie jų. Šiuo atveju, priklausomai nuo šių aglomeratų masės ir jų koordinatų išdėstymo ciklono įtekėjimo skerspjūvyje, prilipimas bus netolygus, ir ant paviršiaus susidarys nelygumai.

Yra žinoma, kad valymo įrenginio matmenims didėjant, mažėja jo valymo efektyvumas, tačiau didelių matmenų ciklonai pasižymi galimybe nusodinti ir smulkiasias daleles, nes arti paviršių veikia papildomos inercijos jėgos, atsirandančios dalelių turbulentinės pernašos metu, esant dideliems dalelių pulsacinių greičių gradientams, nukreiptiems link paviršiaus (Gordon, Peisahov 1977). Dideliuose ciklonuose dėl mažesnių išcentrinų pagreičių arti ribojančių srautus paviršių aglomeratų, kuriuos sudaro smulkiosios dalelės, prilipimas yra mažiau tikėtinas (Gong, Wang 2004; Sobolev *et al.* 2011).

Plečiantis gamybos ir technologijų įvairovei, atsiranda naujų procesų, kuriems vykstant susidaro ypatingos aplinkos sąlygos. Tokių procesų metu agresyvios aplinkos sąlygos sudaro kliūčių įrenginiams atlikti valymo funkcijas. Šiuolaikiniai valymo įrenginiai nėra tinkami eksploatuoti tokiomis sąlygomis. Šioms problemoms spręsti reikia specialiųjų įrenginių (Luca, Ioan 2012; Pushnov, Berengarten 2011).

KD ir dujų savybės gali keistis, kai kietosios dalelės išsiskiria. Labai sudėtinga įvertinti kietųjų dalelių

sugaudymo efektyvumą ciklonuose dėl įvairių tam įtaką darančių veiksnių gausos, todėl būtina sumažinti įtaką darančių veiksnių skaičių darant tam tikras prielaidas (Gujun *et al.* 2008; Zhao *et al.* 2006).

Tyrimų tikslas – teoriškai įvertinti daugiakanalio ciklono darbo parametrų kitimą esant agresyvioms aplinkos sąlygoms, remiantis charakteristikų sąryšiais (teorinėmis matematinėmis išraiškomis), tokiu būdu nustatyti ir palyginti dujų srauto aerodinaminių parametrų bei KD veikiančių jėgų ir atskyrimo efektyvumo pokyčius esant agresyvioms aplinkos sąlygoms, kai dujų srauto drėgnis kito nuo 0 iki 100 %, temperatūra nuo 0 iki 200 °C.

## Metodika

Tiriamas naujos kartos oro valymo įrenginio eksperimentinis standas įrengtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Aplinkos apsaugos institute. Daugiakanalio ciklono principinės schemos pavaizduotos 1 pav.

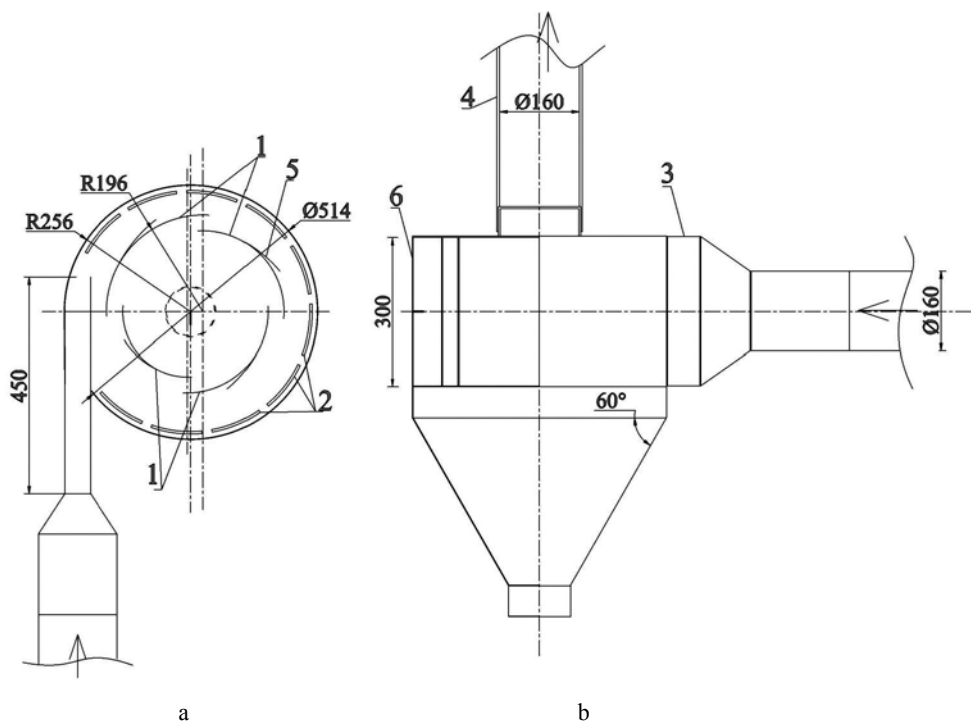
Dvifazis oro srautas tangentiškai įteka pro įėjimo angą ir patenka į separavimo kamerą, į pirmąjį ciklono kanalą, kuris yra ribojamas periferinės sienelės bei pirmojo kreivinio ketvirtziedžio. Srautas, ištekėdamas iš ankstesniojo kanalo, susidūręs su pusziedžio (ketvirtziedžio) sienele (briauna), pasidalija į du srautus – periferinį ir tranzitinį. Periferinio srauto dalis patenka į ankstesnį kanalą, taip vyksta užteršto srauto filtracija grįžtamuju srautu, o tranzitinis srautas – į paskesnį kanalą link įrenginio ašies, kad ištekėtų iš ciklono. Tokiu būdu tekėdamas oro srautas pasiskirsto skirtingo kreivumo kanaluose bei filtruojasi per tarpus, esančius tarp ketvirtziedžių.

Veikiant išcentrinėms jėgoms, kurias sukuria sūkurinis srautas, ir filtracijos efekto, atsiradusio srautų persiskyrimo zonoje, KD yra nusodinamos bei kaupiamos ciklono bunkeryje, patekdamos į jį pro segmentinius žiedinius plyšius.

Išvalytas oras, perėjęs pro visus ciklono kanalus, išteka iš sistemos per oro srauto išėjimo angą. Dulkėtas oras yra filtruojamas kanalų tarpų aktyviojoje zonoje bei valosi koaguliuojant KD.

*Drėgmės įtaka dujų srauto parametrų.* Drėgme yra vadinamas vandens garų kiekis, esantis dujinėje fazėje.

Tokio vandens garų dujų srauto dalinis slėgis nėra didesnis už įsotintų garų slėgį esant tam tikroms dujų srauto sąlygoms. Dujų sraute atsirandantys vandens garai sumažina dujų tankį, nes vandens molinė masė yra mažesnė (18 g/mol), lyginant su sauso dujų srauto moline mase (29 g/mol). Drėgnas dujų-garų srautas gali būti laikomas idealiųjų dujų mišiniu, kurio kiekvieno iš komponentų tankis yra atitinkamas, kad būtų pasiektas reikiamas mišinio tankis. Taip yra įmanoma nustatyti tankio vertę, esant



1 pav. Daugiakanalio ciklono vaizdas iš viršaus (a) ir profilis (b): 1 – kreiviniai ketvirtžiedžiai su angų plokštelių atlenkimais, 2 – segmentiniai žiediniai plyšiai, 3 – įtekėjimo anga, 4 – išvalyto srauto ištekėjimo ortakis, 5 – ketvirtžiedžių atlenktos plokštelės, 6 – ciklono separavimo kamera

Fig. 1. Multi-channel topview (a) and sideview (b): 1 – curvilinear quarter-rings with folded opening slots, 2 – segment circular spacings, 3 – inlet opening, 4 – cleaned airflow outlet, 5 – folded opening slots of quarter-rings, 6 – cyclone separation chamber

mažiau nei 0,2 % paklaidai, kai temperatūra kinta nuo –10 iki +50 °C. Buvo teoriškai įvertinti atvejai, kai temperatūra kito nuo 0 iki 200 °C, o drėgnis atitinkamai nuo 0 iki 70 %. Laikoma, kad dujų srauto temperatūra atvirkščiai proporcinga jo drėgniui. Drėgno dujų srauto tankio sąryšis su agresyvos aplinkos sąlygų parametrais aprašomas tokia formule:

$$\rho_{d.d.s.} = \frac{P_{s.d.}}{R_{s.d.} \cdot T} + \frac{P_{v.g.}}{R_{v.g.} \cdot T}, \quad (1)$$

čia  $\rho_{d.d.s.}$  – drėgno dujų srauto tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $p_{s.d.}$  – sauso dujų srauto dalinis slėgis, Pa;  $R_{s.d.}$  – sauso dujų srauto pastovioji, kuri lygi 287,058,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  – temperatūra, K;  $p_{v.g.}$  – vandens garų slėgis, Pa;  $R_{v.g.}$  – vandens garų pastovioji, kuri lygi 461,495,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

Vandens garų slėgis taip pat gali būti apskaičiuotas pagal santykinį drėgnį:

$$p_{v.g.} = \phi \cdot p_{is.g.}, \quad (2)$$

čia  $p_v$  – vandens garų slėgis;  $\phi$  – santykinis drėgnis;  $p_{is.g.}$  – įsotintų garų dalinis slėgis, kuris gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_{is.g.} = 6.1078 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot t}{234,175 + t}}, \quad (3)$$

čia:  $p_{is.g.}$  – vandens garų slėgis, kPa,  $t$  – vandens garų tem-

peratūra, °C.

Keičiantis aplinkai, pasikeičia ir veikiančios dalelės jėgos judančiame dujų sraute.

Dujų ir dalelių srautui judant ciklono kanalais atsiranda daleles veikianči slėgio jėga (pasipriešinimo jėga), kuriai veikiant dalelė juda horizontaliame sraute.

Slėgio jėgą į dalelę dujų sraute galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$F_{sl.} = c S \rho \frac{u^2}{2}, \quad (4)$$

čia  $c$  – dalelės pasipriešinimo koeficientas;  $\rho$  – dujų srauto tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $S$  – judančios dalelės skerspjūvio plotas,  $\text{m}^2$ ;  $u$  – vidutinis dujų srauto greitis, m/s.

Slėgio jėgos pokytis dėl agresyvos aplinkos sąlygų parametru buvo vertinamas analogiškais atvejais, kaip ir dujų srauto tankis.

Dujų srauto sudaromos jėgos veikimo į dalelę dydis yra proporcingas dujų srauto greičio antrajam laipsniui, t. y.  $F \sim \bar{U}^2$ , todėl, mažėjant dujų srauto greičiui ciklone, jėga sumažėja kvadratu. Dėl šios priežasties dalelių nutraukimas nuo paviršiaus tolstant nuo ciklono įtekėjimo angos reikšmingai mažėja ir esant 10–15 mm atstumui praktiškai išnyksta.

Matyti dalelę veikianči išcentrinė jėga, kuri veikia būdingą dalelę jai judant ciklono kanale aplink įrenginio

ašį. Šios jėgos dydis priklauso nuo judančios dalelės inercijos, nes jos judėjimo kryptis daugiakanaliame ciklone nuolat keičiasi. Šios jėgos dydis yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$F_c = \frac{4}{3} \pi \rho_d r_d^3 V_t^2, \quad (5)$$

čia  $\rho_d$  – dalelės tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $r_d$  – dalelės spindulys, m;  $V_t$  – dujų srauto greitis, m/s;  $r$  – ciklono kanalo spindulys, m.

Dujų srautas, judantis daugiakanaliame ciklone, yra turbulentinio pobūdžio, todėl pasipriešinimo jėgos lygtis yra:

$$F_p = 0,173d^2(u-v)^2\rho, \quad (6)$$

čia  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas;  $u$  – dujų srauto greitis ciklone, m/s;  $v$  – dalelės greitis ciklone, m/s.

Panaudodami dinaminės ir kinematinės klampos koeficientų sąryšį  $\mu = \nu\rho$ , pasipriešinimo jėgos lygtį turbulentiniam dujų srauto tekėjimui galime užrašyti taip:

$$F_p = 0,173d(u-v)\text{Re}\mu. \quad (7)$$

Dalelei judant ciklono kanalu, ją veikia ne tik dujų srauto išcentrinės jėgos, bet ir pačios turinčios masę dalelės gravitacijos jėgos. Ši jėga pakeičia dalelių judėjimo trajektoriją, dėl to jos gali būti išskirtos iš dujų srauto ir nusodintos ciklono bunkeryje. Vertinant buvo taikoma standartinė nagrinėjama kūnų veikiančios svorio jėgos išraiška:

$$F_{gr.} = 4 \frac{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3}{3} \cdot \rho_d \cdot g. \quad (8)$$

Laikoma, kad dalelės tankis yra lygus  $1000 \text{ kg/m}^3$ , dalelė yra sferinė. Buvo vertinta 1, 2,5, 5, 10 ir 20  $\mu\text{m}$  dydžio daleles veikianči gravitacijos jėga.

Adhezijos reiškiniai atsiranda dalelei tiesiogiai susilietus su paviršiumi ir yra jų molekulinio tarpusavio veikimo rezultatas. Adhezijos jėga priklauso nuo kontakto paviršiaus ploto, nes molekulinė sąveika proporcinga kontakto plotui.

Smulkiadispersių prikibusių KD atitraukimas nuo paviršiaus veikiant dujų srautui vyksta keliais etapais. Iš pradžių yra atitraukiamos viršutinės stambesnės dalelės, o vėliau smulkesnės, kai jas įveikia sluoksnio adhezijos jėga. Viršutinių dalelių nutraukimas galimas, kai  $F_{adh} > F_{autoh}$ . Dalelių nutraukimas veikiant autohezijos jėgoms vadinamas erozija. Kai  $F_{adh} < F_{autoh}$ , sluoksnis nutraukiamas nuo pat paviršiaus. Šiuo atveju yra nugalimos adhezijos jėgos, šis procesas vadinamas denudacija.

Darant prielaidą, kad elektrinių ir kapiliarinių jėgų, tikrosios dalelių formos ir kitų veiksnių nepaisoma, adhezijos jėga yra išreiškiama priklausomybe:

$$F_{adh.} = \frac{h\omega}{16\pi z_0^2} d = \frac{h\omega}{8\pi z_0^2} r, \quad (8)$$

čia  $h\omega$  – Livščio ir Planko konstanta, J;  $z_0$  – tarpas tarp dalelės ir plokštumos paviršiaus, kuriam esant adhezijos jėgos yra didžiausios;  $r$  – dalelės spindulys, m.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad, esant tarpui  $4 \cdot 10^{-10}$  m, adhezijos jėga maksimali ir yra lygi:

$$F_{adh.} = 2,4 \cdot 10^{-7} r. \quad (9)$$

Adhezijos jėgos mažėja proporcingai tarpo tarp paviršių kvadratui. Todėl smulkiosios dalelės turi didesnę tarpo tarp paviršių plotą, lyginant su stambiomis dalelėmis, ir jų adhezijos jėga yra didesnė negu stambiųjų dalelių. Dėl šios priežasties stambiosioms dalelėms nutraukti nuo paviršiaus reikalinga mažesnė jėga, nei nutraukiant smulkiadisperses daleles. Taigi stambesnės dalelės yra nutraukiamos nuo paviršiaus lengviau ir esant mažesniems dujų srauto greičiams.

Adhezijos jėgos buvo įvertintos 1, 2,5, 5, 10 ir 20  $\mu\text{m}$  dydžio dalelėms, darant prielaidą, kad visais atvejais adhezijos jėga yra maksimali.

## Rezultatai ir jų analizė

Agresyvos aplinkos sąlygos neigiamai veikia daugiakanalio ciklono darbą, pasikeičia ciklono aerodinaminiai, fiziniai ir valymo efektyvumo parametrai. Esant šioms pokyčiams, dujų srautas įsotinamas drėgme bei padidėja KD sulipimas, atsiranda adhezijos jėgų, veikiančių vidinius ciklono elementus, ir autohezijos jėgų, veikiančių KD tarpusavyje, pokyčių. Dėl šių veiksnių susidaro dujų ir garų aplinka, daugiakanalio ciklono sistema užsikemša, įrenginys toliau negali būti eksploatuojamas.

Norint nustatyti drėgno ir temperatūros įtaką dujų srauto tankiui, pagal (1), (2) ir (3) formules yra apskaičiuojami skirtingi agresyvos aplinkos atvejai, kintant būdingiesiems parametrams. Rezultatai pateikti 2 pav. ir 1 lentelėje.

Esant padidintai dujų temperatūrai ( $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ir drėgniui 95 %, sausų dujų srauto tankis sumažėja apytiksliai 1,18 karto, o drėgno dujų srauto – 1,1. Esant tokiai aplinkai, rasos taškas yra pasiekiamas esant  $49 \text{ }^\circ\text{C}$ , todėl galima teigti, kad dujų srautas yra prisotintas vandens garų, o auštant srautui ant šaltesnių paviršių vyksta intensyvi kondensacija.

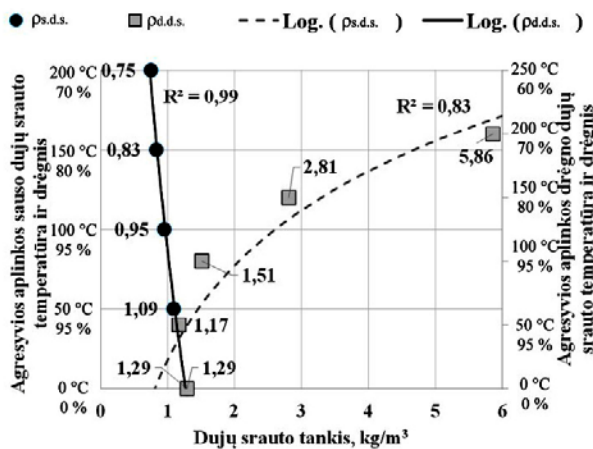
Įšildant srautą iki  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ir  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , galima matyti skirtingą tendenciją tarp drėgno ir sauso dujų srauto tankių. Sauso dujų srauto tankio vertės proporcingai mažėja kylant temperatūrai ir esant  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  vertei, skirtumas lyginant su normaliomis sąlygomis yra 35,6 %. Tačiau drėgno dujų srauto tankis esant  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ir  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  temperatūrai yra atitinkamai didesnis 1,17 ir 2,18 karto.

1 lentelė. Dujų srauto parametrai priklausomai nuo agresyvios aplinkos charakteristikų

Table 1. The gas flow parameters depending on the aggressive environment characteristics

Dimensija	$\mu_{d.s.}$	$v_{d.d.s.}$	Rasos taškas
	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mm}^2/\text{s}$	$^{\circ}\text{C}$
Esant normalioms sąlygoms	17,17	13,28	–
$t = 50^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 95\%$	19,26	16,44	49,0
$t = 100^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 95\%$	21,25	14,11	98,6
$t = 150^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 80\%$	23,16	8,25	142,0
$t = 200^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 70\%$	24,99	4,26	184,0

Kinematinės klamos koeficiento vertė iš pateiktų 1 lentelėje rezultatų yra apskaičiuota esant  $50^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Esant temperatūrai aukštesnei kaip  $100^{\circ}\text{C}$ , šio parametro vertės pradeda mažėti ir yra mažesnės 1,17 ir 1,99 karto esant atitinkamai  $100^{\circ}\text{C}$  ir  $150^{\circ}\text{C}$  temperatūrai, lyginant su maksimalia verte.



2 pav. Sauso ( $\rho_{s.d.s.}$ ) ir drėgno ( $\rho_{d.d.s.}$ ) dujų srauto tankio priklausomybė nuo agresyvios aplinkos temperatūros ir drėgnio

Fig. 2. Dependence of dry ( $\rho_{s.d.s.}$ ) and wet ( $\rho_{d.d.s.}$ ) gas flow density on the aggressive environmental temperature and humidity

Atlikus skaičiavimus esant parinktai didžiausiai dujų srauto temperatūrai, kuri lygi  $200^{\circ}\text{C}$ , ir drėgniui 70 %, gautas 1,72 karto mažesnis sauso dujų srauto tankis ir 4,54 karto didesnis drėgno dujų srauto tankis lyginant su normaliomis sąlygomis. Dinaminės ir kinematinės klamos koeficientas atitinkamai yra 1,46 karto didesnis ir 3,12 karto mažesnis lyginant su vertėmis, gautomis esant normalioms sąlygomis.

Dulkėtam dujų srautui judant ciklono kanalais, jame esančias daleles veikia srautas, sudarytas išcentrinio ventiliatoriaus pratekanti srauto debitui. Apskaičiavus

slėgio jėgos pokytį esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklone skirtingomis agresyviomis sąlygomis, rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Esant normalioms sąlygoms slėgio jėga yra lygi 1,07 mN. Atlikus fizikinių dujų srauto parametrų pakeitimus dėl temperatūros ir drėgnio, nustatyta, kad įkaitusio iki  $50^{\circ}\text{C}$  ir 95 % drėgnio srauto veikianti dalelė jėga sumažėja 4,7 %.

2 lentelė. Slėgio jėgos į dalelę kitimas esant agresyvios aplinkos pokyčiams

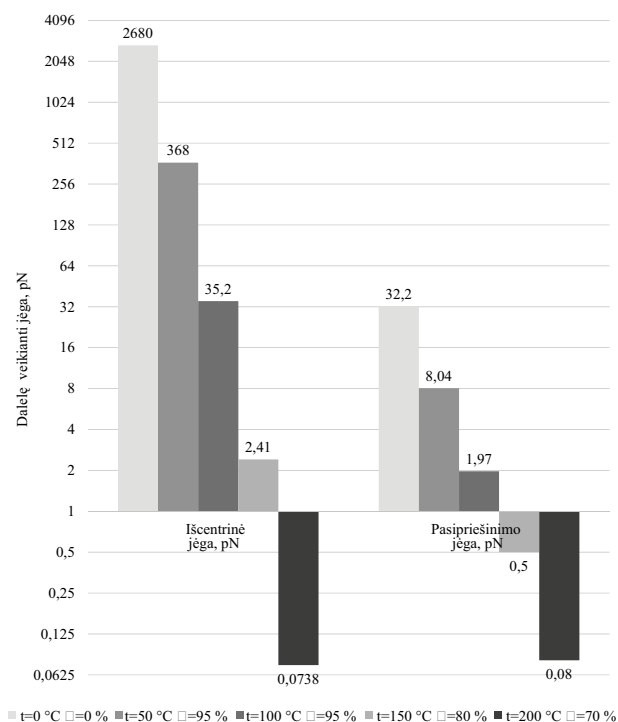
Table 2. Alteration of pressure forces into the particle in case of changes in aggressive environment

Dujų srauto charakteristika (temperatūra, drėgnis)	Slėgio jėga, mN
Esant normalioms sąlygoms	1,07
$t = 50^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 95\%$	1,02
$t = 100^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 95\%$	1,16
$t = 150^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 80\%$	1,58
$t = 200^{\circ}\text{C}$ , $\phi = 70\%$	2,37

Kaip galima matyti 2 lentelėje, aukštesnės nei  $50^{\circ}\text{C}$  temperatūros dujų srautas veikia dalelę didesne jėga, kuri itin didėja iki pat  $200^{\circ}\text{C}$ . Didžiausias pokytis pastebėtas esant  $150^{\circ}\text{C}$  ir  $200^{\circ}\text{C}$  temperatūrai, kai slėgio jėga atitinkamai padidėja 1,48 ir 2,21 karto, lyginant su normaliomis sąlygomis. Galima daryti prielaidą, kad akivaizdus slėgio jėgos didėjimas įvyksta dėl drėgno dujų srauto tankio padidėjimo esant aukštai temperatūrai. Slėgio jėga yra tiesiog proporcinga greičio kvadratui, tačiau pastarojo pokytis nėra toks reikšmingas kaip dujų srauto tankis. Galima teigti, kad esant agresyviai aplinkai dalelė bus lengviau nešama dujų srauto, tai gali turėti įtakos papildomam dalelių išnešimui iš ciklono. Iš kitos pusės, tokia aplinka esant dujų srauto veikiamai dalelė gali būti lengviau nukreipta į segmentinius plyšius ir nusodinta ciklono bunkeryje, o tai padidintų valymo efektyvumą.

Esant aplinkos sąlygų pokyčiui nuo normalių pagal (5) formulę yra apskaičiuotas išcentrinės jėgos dydis.

Remiantis pateiktomis (6) ir (7) formulėmis gali būti vertinamas pasipriešinimo jėgos dydžio pasikeitimas. Daugiakanalio ciklono kanaluose dujų srauto Reinoldso skaičius yra didesnis nei 2300, todėl srautas yra turbulentinio pobūdžio. Todėl taikant (7) formulę yra vertinamas apskaičiuotos pasipriešinimo jėgos pokytis skirtingais agresyvios aplinkos atvejais. Laikoma, kad dalelė yra apvali, dalelės skersmuo  $20\ \mu\text{m}$ , o vidutinis dujų srauto greitis ciklone – 12 m/s. Apskaičiuoti rezultatai pateikti 3 pav.



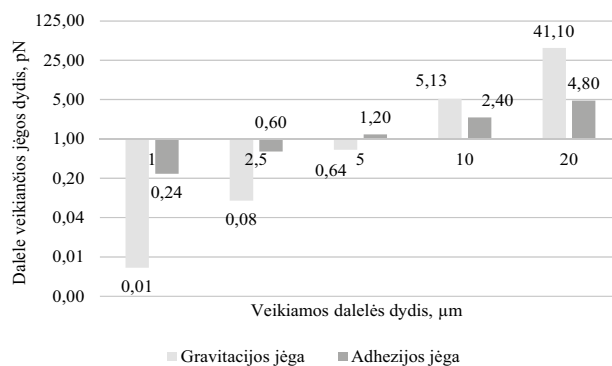
3 pav. Dalelę veikiančių pasipriešinimo ir išcentrinės jėgos pokytis logaritminėje skalėje, esant skirtingai agresyviai aplinkai

Fig. 3. Particle active resistance and centrifugal force variation-expected logarithmic scale at different aggressive environments

Dalelę veikianči išcentrinė jėga esant normalioms sąlygoms yra 83,2 karto didesnė nei pasipriešinimo. Tai galima sieti su daugiakanalio ciklono veikimo principo ypatumu, t. y. dalelių nusodinimu, kai jos, veikiamos sukurinio judėjimo, yra išnešamos į periferiją ir dėl svorio jėgų nusodinamos ciklono apatinėje dalyje – bunkeryje. Tačiau, nagrinėjant skirtingus agresyvios aplinkos atvejus, galima matyti, kad kylant temperatūrai skirtumas tarp šių jėgų mažėja, esant 50 °C temperatūrai – 45,77 karto. Tendencija pastebima ir toliau, esant 100 °C ir 150 °C – skirtumas yra 17,87 ir 4,79 karto atitinkamai. Vertinant jėgų skirtumą esant didžiausiai iš pasirinktų temperatūrų – 200 °C, pasipriešinimo jėga lygi 0,08 pN, o išcentrinė – 0,074 pN. Todėl galima teigti, kad aplinkos sąlygos turi didelę įtaką šioms jėgoms, o esant aukštoms temperatūros šios jėgos tampa apylygės.

Vertinant adhezijos jėgą, pagal (9) formulę buvo apskaičiuotas didžiausias šios jėgos dydis, t. y. kai tarpas tarp dalelės ir plokštumos paviršiaus yra lygus  $4 \cdot 10^{-10}$  m. Gauti gravitacijos ir adhezijos jėgų skaičiavimo rezultatai pateikti 4 pav.

Kaip galima matyti 3 pav., skirtumas tarp 1–20 μm dydžio daleles veikiančių jėgų yra reikšmingas, ir jėgų dydis didėja proporcingai dalelių dydžiui.



4 pav. Skirtingo dydžio daleles veikiančių gravitacijos ir adhezijos jėgos pokytis, esant skirtingoms agresyvios aplinkos sąlygoms

Fig. 4. Particles of different sizes operating in gravity and adhesion strength variation at different aggressive environments

Mažiausią iš pasirinktųjų 1 μm dydžio dalelę veikia 0,01 pN dydžio gravitacijos jėga, o adhezijos jėga yra 24 kartus didesnė. Vertinant daleles, kurių dydis 2,5 ir 5 μm, skirtumas tarp šių jėgų mažėja ir lygus 7,5 ir 1,88 karto atitinkamai.

Svarbu paminėti reikšmingą pokytį tarp šių jėgų esant 10 μm ir 20 μm dydžio dalelėms. Šias daleles veikia stipresnė gravitacijos negu adhezijos jėgos. Skirtumas tarp jėgų esant 10 μm dalelei yra 2,14, o esant 20 μm – 8,56 karto. Atsižvelgiant į tai, galima prieiti prie išvados, kad dalelės, kurių dydis mažiau nei 5 μm, yra labiau linkusios kauptis ant daugiakanalio ciklono vidinių elementų, nes adhezijos jėga visiškai persveria gravitacijos jėgą. Ir atvirkščiai, didesnės nei 5 μm dalelės bus lengvai atitraukiamos nuo paviršių net veikiant tik gravitacijos jėgoms. Gravitacijos ir adhezijos jėgos vertinamos tarpusavyje, kad būtų palygintas jų dydis, nes be daugiakanalio ciklono daleles veikia ir kitos pagal dydį reikšmingos jėgos.

Adhezijos, autoadhezijos bei kitų mechaninių jėgų pokyčiai yra svarbūs vertinant daugiakanalio ciklono darbą esant agresyvioms sąlygoms. Ypač tokiomis sąlygomis, kai yra aukštas drėgnis ir temperatūra. Tuo atveju kietosios dalelės susikaupia ciklone ir užkemša sistemą, dėl ko toliau dujų srauto valyti negalima. Tai vertinant, būtina taikyti konstruktyvius sprendimus, ypač norint nukreipti smulkiąsias daleles nuo pagrindinių kaupimosi zonų, išvengti jų adhezijos su vidiniais paviršiais, prailginti ciklono veikimo trukmę esant agresyvioms aplinkos sąlygoms.

Vertinant fizikinius dujų srauto parametrus, esant skirtingoms agresyvioms aplinkos sąlygoms, buvo pastebėti reikšmingi pokyčiai 50–200 °C temperatūros intervale drėgmės įsotintoje aplinkoje. Didžiausi pokyčiai pastebėti esant 150 °C ir 200 °C temperatūroms, vertinant dujų srauto

tankio ir klamos parametrus. Įvertinus dalelę veikiančių jėgų pokyčius pastebėta, kad agresyvios sąlygos daro didelę įtaką visoms dalelę veikiančioms jėgoms, o ypač – pasipriešinimo ir išcentrinei. Stipriausia iš nagrinėtų dalelę veikiančių jėgų gali būti laikoma slėgio jėga.

## Išvados

1. Agresyvios aplinkos sąlygos – aukšta temperatūra vandens garų prisotintame sraute – turi reikšmingą įtaką dujų charakteristikoms. Sauso dujų srauto tankis ir kinematinės klamos koeficientas proporcingai mažėja, o drėgno dujų srauto tankis ir dinaminės klamos koeficientas didėja. Esant 200 °C temperatūros ir 70 % drėgnio aplinkai, drėgno dujų srauto tankis padidėja 4,5 karto, o kinematinės klamos koeficientas – 3,1 karto, lyginant su normaliomis sąlygomis.
2. Įvertinus daugiakanaliame ciklone veikiančias jėgas į esančias dujų sraute daleles, nustatyta, kad viena iš didžiausių yra slėgio jėga. Esant normalioms sąlygoms ši jėga lygi 1,07 mN, o esant 200 °C temperatūrai ir 70 % drėgniui, šis dydis padidėja apytiksliai 55 %, ir lygus 2,37 mN. Didžiausias pokytis pastebėtas esant 150 °C ir didesnės temperatūros bei 70–80 % drėgnio agresyviai aplinkai.
3. Apvalios formos dalelė, judėdama daugiakanaliame ciklone, kai vidutinis srauto greitis yra lygus 12 m/s, normaliomis sąlygomis yra veikiamas 2,68 nN išcentrine jėga ir 83,2 kartus mažesne – 32,2 pN pasipriešinimo jėga. Didėjant aplinkos agresyvumui, šios jėgos reikšmingai mažėja, be to, mažėja ir skirtumas tarp jų dydžių verčių.
4. Daugiakanalio ciklono sistema užsikemša kietosiomis dalelėmis daugiausia dėl adhezijos jėgų, o kietosios dalelės nusėda dėl gravitacijos jėgos. Kai smulkiųjų dalelių skersmuo mažesnis nei 5 μm, jas veikia didesnė adhezijos negu gravitacijos jėga. Skirtumas tarp jėgų esant 1 ir 2 μm dalelėms yra 24 ir 7,5 karto, o 5 ir 10 μm dydžio daleles veikia jėgos, tarp kurių skirtumas lygus 1,8–2,1 karto. Didžiausia 41,1 pN gravitacijos jėga yra veikiamos 20 μm dalelės, tuo atveju apskaičiuota adhezijos jėga sudaro tik 11,68 % nuo gravitacijos jėgos ir lygi 4,8 pN.

## Literatūra

Altmeyer, S.; Mathieu, V.; Jullemier, S.; Contal, P.; Midoux, N.; Rode, S.; Leclercq, J.-P. 2004. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software, *Chemical Engineering and Processing* 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)

- Avci, A.; Karagoz, I. 2003. Effect of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Journal of Aerosol Science* 34: 937–955. [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.; 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>
- 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>
- Burov, A. A.; Burov, I.; Gamolich, V. J. 2007. Continuum model curved dusty gas flow [Kontinual'naja model' zapylenogo krivolinejnogo techenija gaza], *Work of Odessa Politechnical University* 1(27): 235–237 (in Russian).
- Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2008/50/EB. Dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje, *Europos sąjungos oficialusis leidinys* L152: 1–44.
- Gong, A. L.; Wang, L. Z. 2004. Numerical study of gas phase flow in cyclones with reeds, *Aerosol Science and Technology* 28: 506–512. <http://dx.doi.org/10.1080/02786820490449548>
- Gordon, G. M.; Peisahov, I. L. 1977. *Dust removal and purification of gases in non-ferrous metallurgy* [Pyleulavlivanie i ochistka gazov v cvetnoj metallurgii], Moscow: Metallurgija. 455 p (in Russian).
- 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 cyclones 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>
- Yoshida, H.; Fukui, O.; Fukui, K. 2005. The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones, *Powder Technology* 149: 139–147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2004.10.005>
- Kaya, F.; Karagoz, I. 2008. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science* 94(10): 1273–1278.
- 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.; 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.

- Sobolev, A. A.; Melnikov, P. A.; Tyutyunik, A. O. 2011. Particle movement into the air stream [Dvizhenie chastic v vozdušnom potoke], *Masinstroenie, Vektor Nauki TGU* 3(17): 82–86 (in Russian).
- Tarybos direktyva 1999/30/EB. Dėl sieros dioksido, azoto dioksido, azoto oksidų, kietųjų dalelių ir švino ribinių verčių aplinkos ore, *Europos sąjungos oficialusis leidinys* 15(4): 164–183.
- 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>
- Wang, B.; Xu, D. L.; Chu, K. W.; Yu, A. B. 2006. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator, *Applied Mathematical Modelling* 30: 1326–1342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.011>
- Winfield, D.; Cross, M.; Croft, N.; Paddison, D.; Craig, I. 2013. Performance comparison of a single and triple tangential inlet gas separation cyclone: a CFD study, *Powder Technology* 235: 520–531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.026>
- 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>

## THEORETICAL VALUATION OF MULTI-CHANNEL CYCLONE TO REDUCE GAS FLOW DUSTINESS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

A. Chlebnikovas, P. Baltrėnas

### Abstract

Contaminated gas cleaning from finely divided solids is carried out using a new generation of multi-channel design cyclones. The application of these devices are separated and precipitated particles with a minimum diameter up to 2 micrometers, reaching up to 95% cleaning efficiency. Cyclones of such constructions are usually used under usual conditions at elevated temperature and low humidity. Under aggressive conditions, these devices can be clogged, and their recovery is not possible. Further studies are research into the application of constructive solutions to adapt the cyclone gas cleaning of the particulate matter under aggressive conditions. This theoretical evaluation has described the characteristics change of gas flow and particulate matters at different aggressive environment. Such conditions were loudly describe the gas-flow high-temperature range of 50–200 °C and gas-vapor stream, the humidity reaches 70–100%. Estimated aggressive conditions on the gas flow dynamics forces – pressure, resistance and centrifugal, and particulate mechanical – gravitational and adhesion strength. All parameters are evaluated in comparison with the values under normal conditions.

**Keywords:** multi-channel cyclone, aggressive environment, particulate matter.