

## DAUGIAKANALIO SPIRALINIO CIKLONO ORO GREIČIŲ TYRIMAS

Justina Danilenkaitė<sup>1</sup>, Aleksandras Chlebnikovas<sup>2</sup>, Petras Vaitiekūnas<sup>3</sup>*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: <sup>1</sup>justinadanilenkaite@gmail.com; <sup>2</sup>aleksandras.chlebnikovas@vgtu.lt; <sup>3</sup>vaitiek@vgtu.lt*

**Santrauka.** Nagrinėjama dujų aerodinamikos daugiakanaliame spiraliniame ciklone eksperimentinio tyrimo ir skaitinio modeliavimo problema. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai ciklonų, kuriuose susidaro ypač sudėtingas sūkurinis srautas, tyrimai. Pateiktos nespūdziojo laminarinio ir turbulentinio srauto tekėjimo ciklono viduje diferencialinės trimatės pernašos lygtys. Jos skaitiškai spręstos baigtinių tūrių metodu taikant *RNG* (*Re* – *Normalisation Group*) *k*– $\epsilon$  turbulencijos modelį. Atliktas skaitinis oro srauto judėjimo ciklone modeliavimas. Ciklono aukštis 0,80 m, skersmuo 0,33 m, spiralinės-cilindrinės dalies aukštis 0,098 m, kūginės – 0,45 m, įtekėjimo angos matmenys (cilindrinės dalies šone) pagal brėžinius yra  $a \times b = 28 \times 95$  mm. Oro srauto judėjimo ciklone matematinį modelį sudaro Navjė ir Stokso (Reinoldso) trimačių diferencialinių lygčių sistema. Modeliavimo rezultatai, t. y. taikant *RNG* *k*– $\epsilon$  turbulencijos modelį (įtekėjimo greitis 5,1 m/s) gauti tangentinio greičio ciklone kitimo duomenys, nežymiai (su 7 % paklaida) skyrėsi nuo eksperimentinių rezultatų.

**Reikšminiai žodžiai:** spiralinis ciklonas, kietosios dalelės, skaitinis modeliavimas, turbulentiškumas, vienfazis srautas.

## Įvadas

Ciklonai naudojami įvairiems tikslams, tačiau daugiausia – tankiajai fazei atskirti, kai tekėjimas daugiafazis. Srauto įtekėjimas į cikloną pro įvairių formų įleidimo dalį gali būti ašinis arba tangentinis (Ingham, Ma 2002; Avci, Karagoz 2003). Tangentinis įtekėjimas plačiai taikomas, kai siekiama iš dujų srauto atskirti kietąsias daleles (Altmeyer *et al.* 2004; Kaya, Karagoz 2008).

Cikloniniai separatoriai veikia dėl išcentrinų jėgų. Fluido mišinys patenka į cikloną, sukasi, o išcentrinų jėgų veikiami tankioji mišinio fazė pradeda santykinai judėti radialine kryptimi, ir yra atskiriama nuo pagrindinio srauto. Šį klausimą analizuoti sudėtinga ne tik todėl, kad srautas trimatis, bet ir todėl, kad srautui įtakos turi ir daugelis kitų parametrų (Avci, Karagoz 2003).

Viena iš ciklono efektyvumo apskaičiavimo problemų yra srauto pobūdis. Apskritai srautas dideliuose ciklonuose esti turbulentinis, ir trinties nuostoliai bei jų įtaka yra reikšmingi. Mažuose ciklonuose kitaip – čia svarbesnės gali būti srauto ir eksploatacinės sąlygos, tokios, kaip greitis, temperatūra, slėgis, klampa ar ciklono skersmuo, nes, remiantis moksline literatūra (Blachman, Lippmann 1974; Saltzman, Hochstrasser 1983), šiuose ciklonuose srautas gali būti laminarinis, turbulentinis ar pereinamasis. Turbulentinis srautas pradžioje gali tapti laminariu. Kai srautas laminarinis, eksploataciniai parametrai turi didesnę įtaką ciklono efektyvumui nei kai turbulentinis. Ypač sunku numatyti

srauto mažuose ciklonuose režimo poveikį efektyvumui ir slėgio nuostoliams, palyginti su geometrinių parametrų įtaka (Avci, Karagoz 2003).

Skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD) kaip viena iš skysčių mechanikos kryptų yra potenciali priemonė srauto laukų charakteristikoms (Baltrėnas *et al.* 2008, 2008a), dalelių trajektorijoms, dujų teršalų koncentracijų kitimui (Vaitiekūnas, Banaityte 2007) ir slėgio kritimui ciklonų viduje prognozuoti (Gimbun *et al.* 2005).

Gerai suvokus dvifazio srauto ciklone proceso esmę pagerėtų įrenginio eksploatavimas. Ciklonų veikimo pobūdis yra sunkiai suvokiamas dėl to, kad, nepaisant tariamo daugiakanalio ciklono paprastumo, sudėtinga yra srautų dinamika. Jos ypatumai – sūkurinis judėjimas ir kai kuriais atvejais – kelios atgalinio srauto žiedinės zonos. Uždaro sūkurinio srauto teorijos iki šiol nepajėgė išskirti daugelio srauto laukų ypatumų. Problema, susijusi su išsamios srauto struktūros matematinio modeliavimu, apima glaudžiai susijusių netiesinių masės ir impulso tvermės dalinių diferencialinių lygčių sprendimą ir neturi analizinio sprendinio (Vaitiekūnas 1998). Be to, turbulencijos įvertinimas, grįstas izotropijos prielaida (pvz., turbulentinės klampos hipoteze), negali būti pritaikytas greitai besisukančių srautų atveju (Boysan *et al.* 1982; Bernardo *et al.* 2006). Panaši nuomonė išreikšta ir A. C. Hoffmann ir L. E. Stein darbe (Hoffmann, Stein 2002).

M. Meier ir M. Mori (Meier, Mori 1999) darbe pateiktos laiko atžvilgiu suvidurkintos dujų fazės Navjė ir Stokso lygtys, susietos su anizotropiniu turbulencijos modeliu, derinamu su  $k-\epsilon$  modeliu ir algebrinėmis įtempių lygtimis. Keliose studijose buvo modeliuojama turbulencija, siekta greitį ir slėgį geriau numatyti modifikuojant turbulencijos modelius. Visos šios studijos laikėsi ašinės simetrijos, leidžiančios taikyti dviejų dimensijų modelį, kuriame kietoji fazė dėl mažos įtekėjimo koncentracijos beveik nesusiduria su dujų lauku.

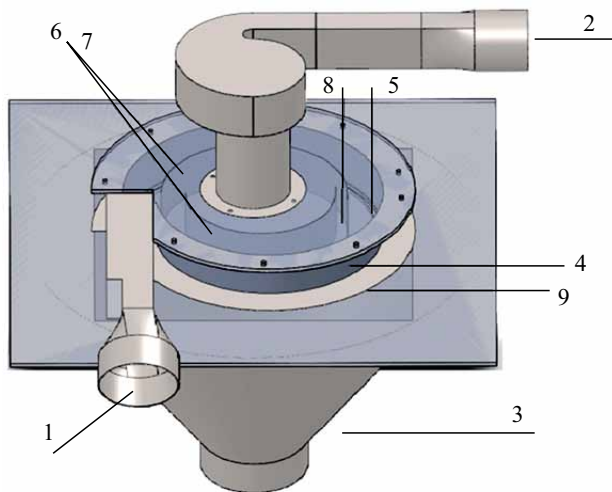
Pastaraisiais metais imta naudoti daugiakanalius ciklonus-filtrus (Vaitiekūnas, Jakštioniene 2010).

Šio darbo tikslas – atlikti skaitinį oro srauto daugiakanaliame spiraliniame ciklone modeliavimą taikant trimatės pernašos lygtis ir derinant su RNG (Re – Normalisation Group)  $k-\epsilon$  turbulencijos modeliu bei gautus rezultatus palyginti su atliktų eksperimentinių tyrimų duomenimis.

### Tyrimo metodika

Nagrinėjamas spiralinis daugiakanalis ciklonas. Jo bendras vaizdas pateiktas 1 paveiksle.

Eksperimentinis daugiakanalis spiralinis ciklonas įrengtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Aplinkos apsaugos technologijų laboratorijoje.



1 pav. Eksperimentinis spiralinis daugiakanalis ciklonas: kietosiomis dalelėmis užteršto oro srauto įtekėjimo (1) ir išvalyto oro srauto ištekėjimo (2) angos, kūginis bunkeris (3), spiralės formos separavimo kamera (4) su segmentiniais žiediniais plyšiais (5), kreiviniai kanalai (6) su skirtingo spindulio spiraliniais pusžiedžiais (7), tarpai tarp kreivinių kanalų (8), ciklono spiralinio korpuso dugnas (9)

Fig. 1. Experimental spiral multi-channel cyclone: contaminated solid particles in the air flow inlet (1) and purified air outlet (2), conical hopper (3), spiral-shaped separation chamber (4) with sectional ring slits (5), curved channels (6) cylindrical half-rings of different radius (7), spacing between curved channels (8), the well of the cyclone with spiral casing (9)

Vienfazio dujų (oro) srauto dinaminiai slėgiai nustatyti naudojant Pito ir Prandtlio dinaminį vamzdelį, prijungtą prie dinaminio priedėlio. Duomenims gauti bei dinaminiam slėgiui perskaičiuoti į srauto greitį naudotas daugiafunkcis matuoklis Testo-400.

Matavimai atlikti būdinguose separavimo kameros vidinės konstrukcijos taškuose: kanalo pradžioje, viduryje bei pabaigoje bei tarpiniuose – tarp kanalo pradžios ir vidurio, tarp vidurio ir pabaigos. Dinaminis vamzdelis taškuose įterptas ir nustatytas tiesiogiai pro specialias separavimo kameros dangčio plokštėje padarytas kiaurymės. Kad rezultatai būtų patikimesni, greičiai buvo nustatomi visame kiekvieno ciklono kanalo skerspjūvyje. Sudarytas 9 taškų tinklas (periferijos pasienio sluoksnyje, kiekvieno kanalo skerspjūvio viduryje ir prie vidinės kanalo sienelės).

Eksperimentinių tyrimų metu naudota įranga:

- daugiafunkcis matuoklis Testo-400 (temperatūros matavimo ribos 20–70 °C, paklaida  $\pm 0,2$  °C; greičio matavimo ribos 1–30 m/s, paklaida  $\pm 0,05$  m/s);
- Pito ir Prandtlio vamzdelis, paklaida  $\pm 2,2$  %;
- dinaminis priedėlis.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti taikant tolygųjį (50 % ir 50 %) paskirstymą tarp tranzitinio ir periferinio srautų ciklono kanalų srautų dalijimosi zonoje. Grįžtamasis bei judantis į tolimesnį kanalą ciklono ašies link oro srauto tūris buvo perpus mažesnis už srauto, tekančio kanalu prieš srautą persiskyrimą, tūrį.

Greičių kitimas atitinkamuose kiekvieno iš šešių ciklono kanalų taškuose pateikiamas 1 lentelėje (pagal 4 pav.). Apskaičiuota bei pateikiama suvidurkintoji kiekvieno iš kanalų greičio vertė, kuri apibūdina aritmetinį visuose tam tikro kanalo taškuose nustatytų greičių vidurkį.

1 lentelė. Oro srauto greičiai daugiakanaliame spiraliniame ciklone, nustatyti eksperimentiškai

Table 1. Experimental study on air flow rates in the multi-channel spiral cyclone

Ciklono kanalas	Matavimo taškai šešiakanalio spiralinio ciklono kanaluose					Oro srauto greičio vidurkis, m/s
	1	2	3	4	5	
1	4,1	4,3	4,5	4,5	5,2	4,52
2	5	4,8	4,8	4,4	4,4	4,68
3	4,4	4,4	4,3	3,9	3,9	4,18
4	4,2	4,4	4,6	4,7	4,7	4,52
5	4,7	4,8	4,8	5	5,1	4,88
6	5,1	5,1	5,2	5,2	5,3	5,18

Stebint turbulentinius srautus matyti, kad jie ypač sudėtingi. Tad ir turbulentinio srauto lygtys, kaip, pavyzdžiui, (1) ir (2), sudėtingesnės. Jose yra papildomųjų narių, Reinoldso įtempių. Modeliuodami šiuos narius bandomė pateikti paprastus sąryšius kaip galutinę lygčių formą.

Sprendžiama skaitiniais metodais, paprastinamos pilnosios lygtys. Tai reiškia, kad supaprastinimas gali būti toks platus, jog sumažinamas matematinio modelio, aprašančio srautą, tikslumas (Vaitiekūnas 1998). Remiantis turbulentinės klamos hipoteze, diferencialinės pernašos lygtys yra tokios (Petraitis, Vasarevičius 2001; Jakštonienė, Vaitiekūnas 2009):

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right), \\ & \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right), \\ & \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right), \quad (1) \\ & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2) \end{aligned}$$

čia  $p$  – slėgis, N/m<sup>2</sup>, Pa;  $\mu$  – dinaminio klampio koeficientas, N·s/m<sup>2</sup>;  $\rho$  – tankis, kg/m<sup>3</sup>,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – masės jėgų vektorius projekcijos į koordinačių ašis.

Išsprendus visas tris (1) tipo lygtis gaunami devyni turbulentiniai įtempiai, vadinami Reinoldso įtempiais, kurie sudaro įtempių tenzorių. Esant jų simetriškumo sąlygai (Vaitiekūnas 1998), išreiškiami taip:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \equiv -\rho \begin{vmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Laikoma, kad Reinoldso įtempių išraiška panaši į momento lygčių klampiųjų įtempių išraišką. Tris (1) lygtis, remiantis turbulentinės klamos hipoteze, galima rašyti taip:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial z} \right], \\ & \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial v}{\partial z} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ & \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial w}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial w}{\partial z} \right], \quad (4) \end{aligned}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

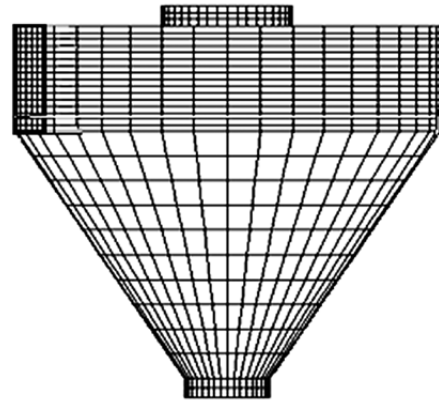
Kintamųjų  $k$  ir  $\varepsilon$  pernašos lygtys RNG  $k$ - $\varepsilon$  modelyje, gautame išsprendus Navjė ir Stokso lygtis, remiantis grupių normalizavimo teorija (Yakhot, Orszag 1986), rašomos taip:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R, \quad (7)$$

čia  $\mu_T$  – turbulentinės klamos koeficientas,  $k$  – kinetinė turbulencijos energija,  $k = (1/3) (u'^2 + v'^2 + w'^2)1/2$ ,  $\varepsilon$  – turbulentinės kinetinės energijos disipacijos greitis. (4) ir (5) lygtis reikia papildyti antrosios eilės RNG  $k$ - $\varepsilon$  turbulencijos modelio lygtimis (6) ir (7); matematinį modelį sudaro penkių diferencialinių lygčių sistema.

**Pradinės ir kraštinės sąlygos.** Pagal fizikinį modelį (1 pav.) sudarytas ciklono skaitinis modelis, jo diskretinimo tinklelis, dalijantis cilindrinę erdvę baigtinių tūrių elementais, pateiktas 2 paveiksle. Numatytos visų penkių kiekvieno elemento kintamųjų pradinės reikšmės.



2 pav. Spiralinio daugiakanalio ciklono greičių skaičiavimo tinklelis (pagal 1 pav.). Įtekėjimo angos matmenys (cilindrinės dalies šone)  $a \times b = 28 \times 95$  mm. Dvi ištekėjimo angos – į apačią kietosioms dalelėms, vamzdis viršuje – išvalytam orui išeiti, (skersmuo  $R = 0,0364$  m)

Fig. 2. A sketch of a computing grid of the coiled multi-channel cyclone: inlet (at the top of the cylinder, inlet area  $a \times b = 28 \times 95$  mm); two outlets at the bottom for solid particles and a pipe of  $R = 0,0364$  m in diameter

(4) ir (5) lygčių kraštines sąlygas apibrėžia: įtekėjimo (visų penkių kintamųjų), ištekėjimo (nulinė slėgio reikšmė), oro srauto prilipimo prie kietų sienelių (ciklono vidinių kanalų, kuriuos iš abiejų pusių riboja pusšiedžiai:  $u = v = w = 0$ ) greičiai.

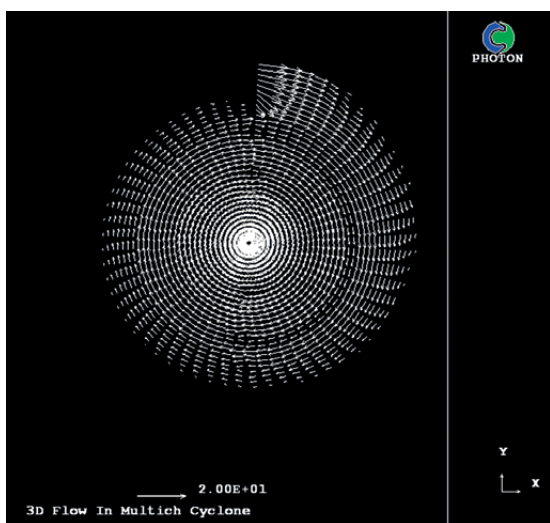
2 pav. pateikta ciklono, modeliuojamo trimatėje erdvėje cilindrinėje koordinatinių sistemoje, sritis suskirstyta į lašteles  $x, y, z$  koordinatinių ašių kryptimis (Bernardo *et al.* 2006). Ciklono tinklinė sritis bendroju atveju sudaryta iš  $x \times y \times z = 60 \times 36 \times 24 = 51\,840$  tūrinių laštelių. Tai kontrolinės greičio laštelės, kuriose skaičiuojamos radialinės, tangentinės ir ašinės krypties greičio komponentės, slėgis, tūrinės fazių dalys, turbulencijos charakteristikos.

Kaip ir standartinis  $k-\varepsilon$  modelis šis modelis apima analizines išraiškas, papildomai gaunamas  $R$  narys (7) lygtyje. Modelio konstantos:  $C_{1\varepsilon} = 1,42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,68$  ir  $C_{\mu} = 0,0845$ ,  $Pr_{k,t} = Pr_{\varepsilon,t} = 0,7194$ .

Aprašytosios lygtys sprendžiamos skaitiniu baigtinių tūrių metodu (Spalding 2002; Patankar 1980). Pagal baigtinių tūrių teoriją skaičiuojamoji sritis diskretinama į tam tikrą skaičių celių, diferencialinės lygtys pritaikomos kiekvienai sudarytai celei pagal divergencijos teoremą (Gauso ir Ostrogradskio teorema). Gaunamos diskretintos, t. y. algebrinės, lygtys. Jos sprendžiamos iteracijų būdu, gaunami priklausomųjų kintamųjų reikšmių laukai.

Greičio vektorių laukas vertikaloje ciklono plokštumoje, kai įtekėjimo greitis 5,1 m/s, pateiktas 3 paveiksle.

Iš 3 pav. matyti asimetriškas vektorinio lauko išsidėstymas dėl tangentinio srauto įtekėjimo viršutinėje ciklono dalyje.



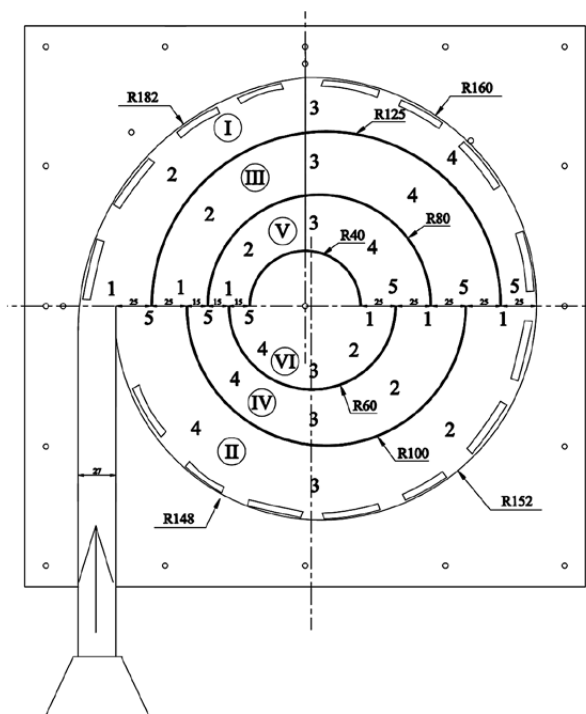
3 pav. Greičio vektorių laukas vertikaloje ciklono skerspjūvio plokštumoje, kai įtekėjimo greitis 5,1 m/s; vektorių mastelis 20,0 m/s

Fig. 3. Mid-plane velocity vectors under the inlet velocity of 5,1 m/s and the scale of velocity vectors making 20,0 m/s

## Modeliavimo rezultatų analizė

Eksperimentiniais tyrimais nustatytų srauto šešiakanaliam ciklone greičių (4 pav.) vertės nuo 3,9 m/s iki 5,3 m/s. Bendras visuose kanaluose nustatytų greičių verčių vidurkis 4,7 m/s. Srauto, įtekančio į pirmąjį kanalą, greitis yra beveik 12 % mažesnis nei visų ciklono kanalų vidutinis. Srautas, judantis kreiviniu kanalu, siekia 5,2 m/s greitį.

Ties I kanalo pradžia (1 taškas) greitis yra mažiausias – 4,1 m/s, ties viduriu ir artėjant kanalo pabaigos link (3, 4 taškai) – 4,5 m/s. Srauto stabdymą kanalo pradžioje galima sieti su pasipriešinimo jėgų, atsirandančių iškart po įtekėjimo iš įeinančio srauto ortakio į ciklono separavimo kamerą bei pirmąjį ciklono kanalą, padidėjimu. Srauto greičio padidėjimui I kanalo viduryje (3 taškas), tarpiniame taške (4 taškas) ir pabaigoje (5 taškas) daugiausia įtakos turi kanalo skerspjūvių kitimas. Jis dėl daugiakanalio ciklono separavimo kameros spiralinės formos korpuso ypatumų yra tolygiai mažėjantis. Kaip matyti 3 pav., I kanalo plotis, atstumas tarp periferijos sienelės ir pirmojo pusšiedžio, tolygiai mažėja, ir už įrenginio ašinės linijos jo vertė yra 1,6 karto mažesnė nei pradinė. Antrojo kanalo greičiai pasiskirstę pagal kitą priklausomybę. Didžiausios vertės nustatytos kanalo pradžioje (1 taškas) – 5 m/s, artėjant kanalo vidurio link (2, 3 taškai) vertės yra vienodos ir siekia 4,8 m/s.



4 pav. Ciklono cilindrinės dalies vaizdas iš viršaus, penki matavimo taškai kiekviename iš šešių kanalų

Fig. 4. The image of the cylinder part of the cyclone from the top; 5 measurement points in each of the six channels

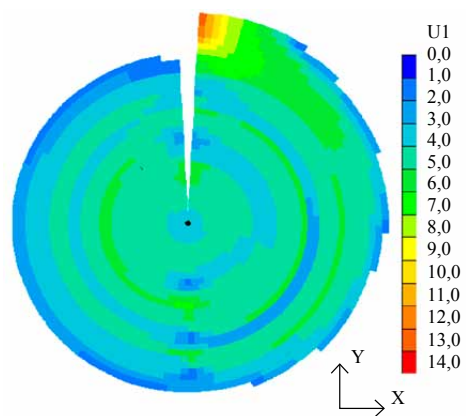
Mažiausi greičiai – 4,4 m/s vyrauja kanalo pabaigoje (4, 5 taškai). Trečiajame kanale galima išskirti dvi zonas, kuriose greičių vertės labai artimos, t. y. 1–3 taškai, kuriuose greičiai yra 4,3–4,4 m/s. Į antrąją zoną patenka 4 ir 5 taškai – 3,9 m/s. Srauto stabdymo ir silpnėjimo bei greičių padidėjimo reiškiniai fiksuojami IV, V ir VI kanaluose. Ketvirtojo kanalo pradžioje (1 taškas) nustatytas minimalus greitis – 4,2 m/s, artėjant kanalo vidurio link (2 taškas) greitis padidėja iki 4,4 m/s. Greičiai kanalo viduryje bei artėjant pabaigos link (3–5 taškai) svyruoja 4,6–4,7 m/s. Greičių kitimui IV–VI kanaluose įtakos turi ir, palyginti su I–III kanalų, maži skerspjūviai. Tokio dydžio kanalų geometrijos kitimas turi žymiai didesnę įtaką aerodinaminių parametru, tokių kaip greitis, kitimui. I ir III kanaluose tokių pokyčių nepastebima. Galima prielaida, jog srautas nusilpsta praėjęs daugiau nei pusę kanalo ilgio bei nebegali įveikti sukuriamo pasipriešinimo, taip atsiranda greičio nuostoliai. Šia prielaida galima vadovautis dėl to, kad abiem atvejais ties II ir III kanalų greitis pradeda reikšmingai mažėti tik nuo trečiojo matavimo taško. Galima teigti, kad, palyginti su kitų kanalų pokyčiais, II kanalo skerspjūvis yra mažesnis tik už I kanalo skerspjūvį, tačiau pločių sumažėjimas, kintant spiralinės formos korpusui, yra mažesnis nei 1,1 karto. Dėl to, atsižvelgiant į skerspjūvių sumažėjimą, greičių padidėjimas nėra reikšmingas. Penktajame kanale artimi greičiai yra 1–3 taškuose (4,7–4,8 m/s), pabaigos link (4 taškas) padidėja iki 5 m/s. Maksimalus penktojo kanalo srauto greitis – 5,1 m/s nustatytas kanalo pabaigoje (5 taškas). Didžiausios greičių vertės – 5,1–5,3 m/s, nagrinėjant viso ciklono kanalus, nustatytos šeštajame kanale. Pabrėžtina, kad maksimalus greitis šeštajame kanale (taip pat ir visame ciklone) siekia 5,3 m/s. Ši vertė nustatyta šeštojo kanalo pabaigoje (5 taškas) ir yra beveik 1,13 karto didesnė už visų kanaluose nustatytų greičių vidurkį.

Atliktas dujų srauto tangentinio greičio skaitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas, kai ašinė padėtis atitinkamai yra  $z = 0,05$  m nuo ciklono viršaus. Rezultatai, gauti taikant RNG turbulencijos modelį, atitiko eksperimentinių tyrimų duomenis (5, 6 pav., 2 lentelė).

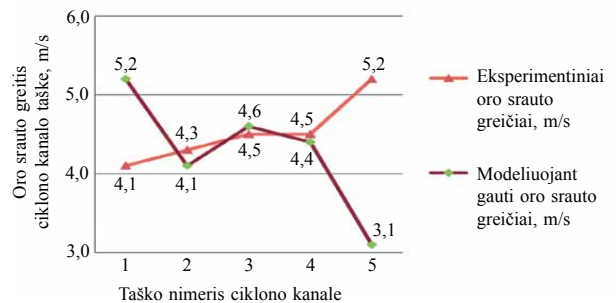
Didžiausias greitis yra ( $z = 0,05$  m), kai  $x = 0$ , o  $U_1 = 4,1$  m/s. Ciklono IV kanale greitis sumažėja iki 4 m/s, o prie ašies tėra tik 1 m/s. Taip esti todėl, kad išvalytas oras  $z$  ašimi išeina į viršų.

2 lentelėje pateiktas maksimalus tangentinis greitis  $U = 5,3$  m/s profiliuose pagal  $z = 0,1$  m atstumą nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus.

Iš 2 lentelės ir 4 pav. akivaizdu, kad I kanale vidutinis oro srauto greitis yra apie 4,1–4,3 m/s, nuo eksperimentinių I kanalo tyrimų rodiklių skiriasi tik 0,24 vieneto. 6 pav. pateikti modeliuojant ir eksperimentinių tyrimų metu gauti oro srauto I kanale greičiai.



5 pav. Modeliuojamo vienfazio srauto greitis spiraliniame ciklone, kai atstumas nuo cilindrinės dalies viršaus  $z = 0,05$  m  
Fig. 5. Single-phase flow rate in the multi-channel cyclone under the distance from the top of the cylindrical part  $z = 0.05$  m



6 pav. Eksperimento metu ir skaitinio modeliavimo būdu gauti tangentiniai dujų srauto I kanale greičiai

Fig. 6. Experimental studies and numerical simulations of obtaining gas flow shear velocities in the first channel of the cyclone

2 lentelė. Eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo metodais gauti tangentinių greičių rezultatai

Table 2. Experimental research and numerical simulation methods for obtaining the results of tangential velocities

Šešiakanalis spiralinis ciklonas							Vidurkis	Absoliučioji paklaida, vnt.
Tangentiniai greičiai, m/s: eksperimentinių tyrimų rezultatai (eksp. t.), skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatai (skait. m.)	1	2	3	4	5			
1 kanalas eksp. t.	4,1	4,3	4,5	4,5	5,2	4,5	0,24	
1 kanalas skait. m.	5,2	4,1	4,6	4,4	3,1	4,3		
2 kanalas eksp. t.	5,0	4,8	4,8	4,4	4,4	4,7	0,04	
2 kanalas skait. m.	5,1	4,6	4,7	4,6	4,2	4,6		
3 kanalas eksp. t.	4,4	4,4	4,3	3,9	3,9	4,2	-0,28	
3 kanalas skait. m.	4,3	4,7	4,9	4,3	4,1	4,5		
4 kanalas eksp. t.	4,2	4,4	4,6	4,7	4,7	4,5	-0,12	
4 kanalas skait. m.	4,5	4,6	4,8	4,8	4,5	4,6		
5 kanalas eksp. t.	4,7	4,8	4,8	5,0	5,1	4,9	0,16	
5 kanalas skait. m.	4,1	4,6	4,9	5,1	4,9	4,7		
6 kanalas eksp. t.	5,1	5,1	5,2	5,2	5,3	5,2	0,42	
6 kanalas skait. m.	4,7	4,5	4,7	4,9	5,0	4,8		
Suma							0,077	



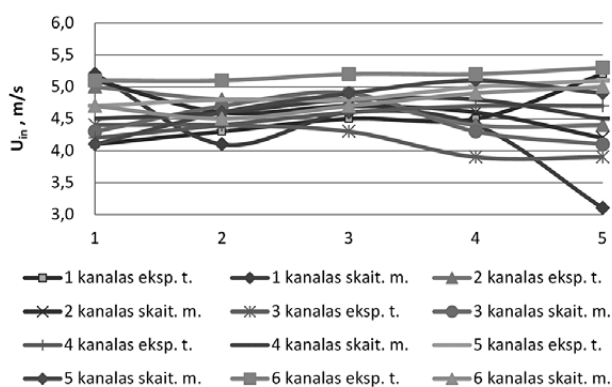
Iš 6 pav. pateikto modeliujant ir eksperimentiniu būdu gauto oro srauto I kanale greičių grafiko matyti, kad eksperimentinių oro srauto greičių kreivė kertasi ir susipina su modeliujant gautų greičių kreive.

Grafike matyti, kad pirmame taške modeliujant gauti oro srauto greičiai 1,1 vieneto skiriasi nuo eksperimentiniu būdu gautų greičių. 2–4 taškuose lyginamieji greičiai artimi vienas kitam, 5 taške eksperimentinių tyrimų metu gautas greitis 2,1 vnt. yra didesnis už gautąjį modeliujant. Kadangi lyginamieji greičiai trijuose taškuose iš esmės sutampa, o kituose dviejuose skiriasi nežymiai, galima daryti išvadą, kad skaitinio modeliavimo būdu apskaičiuoti oro srauto I kanale greičiai atitinka eksperimentinius.

2 lentelėje pateikiami eksperimentinių tyrimų metu ir atliekant skaitinį modeliavimą gauti oro srauto greičių penkiuose šešių kanalų matavimo taškuose rezultatai, apskaičiuota vidurkiai ir paklaida.

2 lentelės duomenys (eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo metodais gauti tangentinį greičių rezultatai) grafiškai atvaizduoti 7 pav. Pateikiamos dujų srautų šešiuose daugiakanalio spiralinio ciklono kanaluose greičių kreivės.

Iš 7 pav. matyti, kad eksperimentinių tyrimų metu gauti dujų srauto tangentinį greičių rezultatai gali būti tapatinami su skaitinio modeliavimo rezultatais, nes tarp šių reikšmių yra tik 7,7 % paklaida.



7 pav. Eksperimentiškai ir skaitinio modeliavimo būdu gauti tangentiniai dujų srautų šešiuose daugiakanalio spiralinio ciklono kanaluose (5 taškai) greičiai

Fig. 7. Experimental studies and numerical simulations of obtaining gas flow tangential velocities in six channels of the multi-channel spiral cyclone (5 points)

Kadangi ciklone vykstantį aerodinaminį procesą labai veikia įtekančio srauto ir geometrinės sąlygos, ir tokiame sudėtingame sraute sunku tiksliai išmatuoti greičius, F. Kaya ir I. Karagoz darbo (Kaya, Karagoz 2008) išvadoje teigiama, kad šie nesutapimai atsiranda ne tik dėl turbu-

lentinio modelio ir skaitinių metodų paklaidų, bet ir dėl eksperimentinių bei matavimo paklaidų. Greitai besisukantis skysčio srautas lemia žymią anizotropiją turbulentinėje struktūroje, ir dėl to standartinių  $k-\epsilon$  ir  $RNG k-\epsilon$  turbulentinių modelių skysčių srautų duomenys netikslūs. Lyginant du izotropinius modelius,  $RNG k-\epsilon$  modelio rezultatai šiek tiek geresni negu standartinio  $k-\epsilon$  modelio esant srauto sukimuisi ir priešpriešiniams srautams. Standartinis  $k-\epsilon$  modelis labiau tinka kietųjų kūnų sukimuisi modeliuoti nei numatomiems mišriesiems sukuriams gauti ir neatspindi realaus ašinio greičio pasiskirstymo (Kaya, Karagoz 2008).

S. Bernardo su bendraautorais darbe (Bernardo *et al.* 2006) atlikti skaitinių ir eksperimentinių dujų tangentinio greičio palyginimai, kai ašinė padėtis yra atitinkamai  $z = 0,05$  m ir  $0,07$  m nuo ciklono viršaus. Rezultatai, gauti taikant  $RNG$  turbulencijos modelį, atitiko kitų tyrėjų duomenis, todėl laikoma, kad skaitinio modeliavimo būdu gauti tangentiniai oro srauto greičiai atitinka eksperimentinius oro srauto greičių rodiklius.

## Išvados

1. Modeliuojamas tangentinis dujų greičių  $0,05$  m aukštyje nuo ciklono viršaus profilis, didžiausias oro srauto greitis –  $5,2$  m/s nustatytas pirmajame kanale.
2. Lyginant šešiakanalio ciklono tangentinį greičių kanaluose modeliavimo rezultatus su eksperimentiniais, matyti nežymus skirtumas tarp jų. Maksimalios trečiojo –  $28$  % bei šeštojo –  $42$  % ciklono kanalų greičių paklaidų vertės.
3. Tai, kad eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų rodiklių skirtumų vidutinė absoliučioji paklaida  $7,7$  %, pagrindžia  $RNG k-\epsilon$  turbulencijos modelių pritaikomumą aerodinaminiam procesams, fluidų tekėjimui daugiakanaliame spiraliniame ciklone aprašyti, kai įtekėjimo greitis tangentinis bei judėjimas sukurinis.

## Literatūra

- Acvi, A.; Karagoz, I. 2003. Effects 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)
- Altmeyer, S.; Mathieu, V.; Jullemier, S.; Contal, P.; Midoux, N.; Rode, S.; Leclers, J. P. 2004. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software, *Chem. Eng. Prog* 43: 511–522. [http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00079-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00079-5)
- Baltrėnas, P.; Morkūnienė, J.; Vaitiekūnas, P. 2008a. Numerical simulation of solid particle dispersion in the air of Vilnius City, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(1): 15–22. <http://dx.doi.org/10.3846/1648-6897.2008.16.15-22>

- Baltrėnas, P.; Vaitiekūnas, P.; Vasarevičius, S.; Saad Jordaneh. 2008b. Dispersion modelling of solid particles from vehicle exhaust into the atmosphere, *Ekologija* 54(2): 117–123. <http://dx.doi.org/10.2478/V10055-008-0019-8>
- Bernardo, S.; Mori, M.; Peres, A. P.; Dioni'sio, 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>
- Blachman, W.; Lippmann, M. 1974. Performance characteristics of the multicyclone aerosol sampler, *American Industrial Hygiene Association Journal* 35: 311–326. <http://dx.doi.org/10.1080/0002889748507040>
- Boysan, F.; Ayers, W. H.; Swithenbank, J. A. 1982. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design, *Institution of Chemical Engineers* 60: 222–230.
- Gimbun, J.; Chuah, T. G.; Fakhru'l-Razi, A.; Choong, T. S. Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study, *Chem. Eng. Prog.* 44: 7–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccep.2004.03.005>
- Gong, A. L.; Wang, L. Z. 2004. Numerical study of gas phase flow in cyclones with the repds, *Aero Technol* 38: 506–512. <http://dx.doi.org/10.1080/02786820490449548>
- Hoffmann, A. C.; Stein, L. E. 2002. *Gas Cyclone and Swirl Tubes-Principles, Design and Operation*. Springer-Verlag, Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-07377-3>
- Ingham, D. B.; Ma, I. 2002. Predicting the performance of air cyclones, *Int. J. Energy Res* 26: 633–652. <http://dx.doi.org/10.1002/er.808>
- Jakštonienė, I.; Vaitiekūnas, P. 2009. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo taikymas ciklono tyrime, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 1(4): 51–55.
- Kaya, F.; Karagoz, I. 2008. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science* 94(10): 1273–1278.
- Meier, M.; Mori, M. 1999. Anisotropic behavior of the Reynolds stress in gas and gas-solid flows in cyclones, *Powder Technology* 101: 108–119. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(98\)00162-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00162-4)
- Patankar, S. V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere (McGraw-Hill), New York. 176 p.
- Patterson, P. A.; Munz, R. J. 1996. Gas and particle flow patterns at room and elevated temperatures, *Canadian Journal of Chemical Engineering* 74: 213–221. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.5450740206>
- Petraitis, E.; Vasarevičius, S. 2001. Kietųjų dalelių sklaidos atmosferoje skaitinis modeliavimas taikant „Varsa“ ir „Phoenics“ programas, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 9(1): 23–28
- Saltzman, B. E.; Hochstrasser, J. M. 1983. Design and performance of miniature cyclones for respirable aerosol sampling, *Environmental Science and Technology* 17: 418–424. <http://dx.doi.org/10.1021/es00113a011>
- Spalding, D. B. 2002. *PHOENICS 3.5 VR CFD CODES* [online]. Available from Internet: <http://cham.co.uk/>
- Vaitiekūnas, P. 1998. *Konvekcinio pernešimo skaitinis modeliavimas*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas. 264 p.
- 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>
- Vaitiekūnas, P.; Banaitytė, R. 2007. Modeling of motor transport exhaust dispersijon, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15(1): 39–46.
- Yakhot, V.; Orszag, S. A. 1986. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *J. Sci. Comput* 1: 1–51. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01061452>

## MATHEMATICAL MODEL OF THE MULTI-CHANNEL SPIRAL CYCLONE

J. Danilenkaitė, A. Chlebnikovas, P. Vaitiekūnas

### Abstract

The article deals with a problem of experimental investigation and numerical simulation of gas aerodynamics of a multi-channel spiral cyclone with a tangential inlet. The paper presents an overview of experimental and theoretical works on the cyclones having a particularly complex turbulent flow and focuses on three-dimensional transport differential equations for a non-compressible laminar and turbulent flow inside the cyclone. The equations have been solved applying the numerical finite volume method using the RNG (Re-Normalisation Group)  $k-\varepsilon$  turbulence model. The numerical simulation of the flow cyclone has been carried out. The height of the cyclone is 0.80 m with 0.33 m in diameter, the height of the spiral-cylindrical part – 0.098 meters and that of the cone – 0.45 m. Inlet dimensions (cylindrical part on the side), in accordance with drawings makes  $a \times b = 28 \times 95$  mm. The mathematical model for the air traffic movement cyclone has accounted for Navier-Stokes (Reynolds) three-dimensional differential equations. The simulation results have been obtained with reference to the cyclone of tangential velocity profiles using RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model. The inlet velocity of 5.1 m/s slightly differs from experimental results, thus making an error of 7%.

**Keywords:** spiral cyclone, solids, numerical modelling, turbulence, single-phase flow.