

## SKAIČIUOJAMOSIOS FLUIDŲ DINAMIKOS MODELIAVIMO TAIKYMAS KŪGINIAM GRĮŽTAMOJO SRAUTO CIKLONUI TIRTI

Inga Jakštonienė<sup>1</sup>, Petras Vaitiekūnas<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>ingajakstoniene@gmail.com; <sup>2</sup>vaitiek@ap.vgtu.lt

**Santrauka.** Nagrinėjama ciklonų, skirtų kietosioms dalelėms atskirti iš oro srauto, efektyvumo problema. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai darbai. Pateiktos trimatės pernašos diferencialinės lygtys su Reinoldso įtempių turbulencijos ir kitais modeliais. Atliktas skaitinis oro srauto judėjimo modeliavimas kūginiame grįžtamojo srauto (KGS) ciklone, kurio aukštis – 0,50 m, cilindrinės dalies aukštis – 0,29 m, kūginės – 0,133 m, skersmuo – 0,20 m. Modeliuojant aprašytas oro srauto judėjimas ciklone taikant Navjė ir Stokso trimačių diferencialinių lygčių sistemą, diskretizuotą baigtiniais tūriais. Modeliavimo rezultatai, kai įtekėjimo greitis – 4,64 m/s ir debitas – 0,28 m<sup>3</sup>/s, neblogai sutapo su kitų autorių vykdytų eksperimentų rezultatais. Gauta vidutinė santykinė paklaida – ±5 proc.

**Reikšminiai žodžiai:** ciklonas, kietosios dalelės, skaitinis modeliavimas, skaičiuojamoji fluidų dinamika, turbulencija.

### Įvadas

Ciklonai plačiai naudojami pramoniniuose procesuose kietosioms dalelėms atskirti iš oro srauto žemoje temperatūroje ir dūmų dalelėms atskirti deginant kietąjį kurą aukštoje temperatūroje (iki 300–500 °C). Jų konstrukcijose dujų kryptis yra dvejopa – tangentinė ir ašinė. Šie įrenginiai pasižymi paprasta konstrukcija, kompaktiškumu, jų eksploatavimo išlaidos nedidelės, nes viduje nėra judamųjų dalių ir jų nereikia labai prižiūrėti. Ciklonų trūkumai – didelis slėgio kritimas esant didesniems įtekėjimo greičiams ir su tuo susijusios energijos sąnaudos.

Hoekstra ir kt. (1999) teigia, kad skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD, angl. *Computational Fluid Dynamics*) programinės įrangos naudojimas skaitiniams dujų srauto lauko skaičiavimams yra bendresnis modeliavimo būdas, geriau aprašantis ciklono veikimą.

Tobulėjant kompiuteriams ir SFD metodams, taikant skaitinius sprendimus galima apskaičiuoti sudėtingus srauto laukus (Baltrėnas *et al.* 1997).

SFD metodika – padalinti nagrinėjamą sritį į daug kontrolinių tūrių ir pakeisti dalines diferencialines lygtis jų algebriniais ekvivalentais (Baltrėnas *et al.* 2008; Vaitiekūnas *et al.* 2004). Gaunama algebrinių lygčių aibė, kurią galima išspręsti taikant iteracinius metodus ir gauti kintamųjų – greičio komponentės ir slėgio – pasiskirstymą lauke, priklausantį nuo ribinių sąlygų, apibūdinančių konkretų uždavinį (Bernardo *et al.* 2006).

Boysan ir kt. (Boysan *et al.*) vieni pirmųjų 1982 m. atliko pramoninio ciklono srauto SFD skaičiavimus.

Dėl labai sudėtingų trijų dimensijų sukurtųjų srauto ciklono viduje supratimas apie ciklone vykstantį kietųjų dalelių atskyrimo iš dujų srauto procesą tebėra nepakankamas, nepaisant to, kad dujų ir kietųjų dalelių suspensijos srauto judėjimas ciklonuose jau seniai yra daugelio eksperimentinių, teorinių ir skaitinių tyrimų objektas (Zhou, Soo 1990; Hu *et al.* 2005; Gujun *et al.* 2008). Norint iširti srauto struktūrą eksperimentiniuose ciklonuose dažnai taikomi įvairūs matavimo metodai, tačiau šių metodų trūkumai trukdo susidaryti išsamų vaizdą apie srauto sudėtingumą (Nieuwland *et al.* 1996; Gujun *et al.* 2008).

Dujų ir įvairaus dydžio kietųjų dalelių srautams modeliuoti naudojamos skirtingos modeliavimo programos.

Reinoldso įtempių turbulencinis (RIT) modelis pateikia tikslų sukurtinį srauto savybių, ašinio greičio, tangentinio greičio ir slėgio kritimo ciklono modelyje prognozę (Sommerfeld, Ho 2003; Gujun *et al.* 2008).

Derksen savo straipsnyje (2003) pristato Eulerio-Lagranžo dvifazio srauto (dujų ir kietųjų dalelių) apibūdinimą. Eulerio dujų srauto apibūdinimu paremtas Lagranžo-Eulerio srauto (LES) metodas. Kietųjų dalelių judėjimas imituotu dujų srauto lauku buvo modeliuojamas remiantis vienpusio poveikio prielaida – dujų srautas veikia daleles, tačiau dalelės dujų srautui poveikio neturi (Gujun *et al.* 2008).

Derksen ir kt. (2006) vykdė trijų dimensijų (3D) nuo laiko priklausomą turbulencinio dujų srauto cikloniniame separatoriuje Eulerio-Lagranžo modeliavimą, pagrįstą

dvipusiu poveikiu. Dalelių poveikis dujoms modeliuojamas dalelių šaltinio kameroje metodu (Gujun *et al.* 2008).

Wang ir kt. (2006) dujų srautui Lapple ciklone modeliuoti taikė Reinoldso įtempių modelį. Dalelių srautas modeliuojamas taikant tikimybinį Lagranžo modelį. Modeliuojant gautas atskyrimo efektyvumas ir dalelių trajektorijos palygintos su eksperimentiniais duomenimis. Nustatytas dalelių dydžio ir dujų greičio poveikis atskyrimo efektyvumui atitinka eksperimentų rezultatus (Gujun *et al.* 2008).

Zhao ir kt. (2006) naudojo RIT modelį dujų srautui modeliuoti dviejų tipų ciklonuose: su standartiniu viengubu įleidimu ir spiraliniu dvigubu įleidimu. Dalelių judėjimui sekti ir dujų dalelių atskyrimo efektyvumui ciklonuose skaičiuoti taikomas Lagranžo metodas. Rezultatai rodo, kad SFD metodas gali veiksmingai atskleisti kietųjų dalelių ir dujų srauto atskyrimo ciklonuose su įvairios formos įleidimu mechanizmą (Gujun *et al.* 2008).

Dujų dalelių srautą trijuose ciklonuose LES metodu modeliavo Shi ir Bayless (2007). Anizotropinei turbulencijai dujų fazėje pavaizduoti jie taikė RIT įtempių modelį. Lyginimas su literatūroje pateikiamais eksperimentiniais duomenimis parodė, kad tangentinė starto ribinė būklė leidžia padaryti tikslesnes prognozes nei kitos ribinės būklės (Gujun *et al.* 2008).

Šio darbo tikslas – išanalizuoti skaitinio modeliavimo turbulencijos modelius, taikomus dujų ir kietųjų dalelių srauto judėjimui ciklone aprašyti ir atlikti oro srauto skaitinį modeliavimą ciklone naudojant trimates Navjė ir Stokso lygtis.

## Skaitinio modeliavimo metodas

*Turbulentinis modeliavimas.* Norint atlikti oro srauto turbulencijos tyrimą, galima naudoti trimates Reinoldso lygtis su standartiniu  $k-\varepsilon$ , LES ir RIT modeliais, taikant baigtinių tūrių metodą. Skaitiškai sprendžiamos pernešimo procesų elipsinės trimatės lygtys yra tokios formos (Vaitiekūnas *et al.* 2004):

$$\underbrace{\text{div}(r_i \rho_i \vec{v}_i \Phi_i)}_{\text{Konvekcija}} - \underbrace{r_i \Gamma_{\Phi_i} \text{grad} \Phi_i}_{\text{Difuzija}} = \underbrace{r_i S_{\Phi_i}}_{\text{Šaltinis}}, \quad (1)$$

čia:  $r_i$  –  $i$  fazės tūrinė dalis,  $\text{m}^3$ ;  $\rho_i$  –  $i$  fazės tankis,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\Phi_i$  –  $i$  fazės priklausomas kintamasis ( $\Phi = 1$  – tolydumo lygtis);  $u, v, w$  – impulso komponentės  $x, y$  ir  $z$  koordinatinių kryptimis,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $H$  – entalpija;  $\vec{v}_i$  –  $i$  fazės greičio vektorius;  $\Gamma_{\Phi}$  – kintamojo  $\Phi$  difuzijos koeficientas;  $S_{\Phi}$  –  $\Phi$  kintamojo srauto narys.

(1) lygčių sistemą sudaro Navjė ir Stokso bei energijos pirmajai ir antrajai fazėms, sprendžiamos baigtinių tūrių metodu, lygtys.

Skaičiuojant tokiais turbulencijos modeliais, kaip  $k-\varepsilon$ , LES ir RIT, kiekviename jų sprendžiamos kelių lygčių sistemos, kurių skaičius skirtinguose modeliuose priklauso nuo kintamojo  $\Phi$  taip: LES modelyje  $\Phi$  įgyja  $1, u, v, w, k$  reikšmes;  $k-\varepsilon$  modelyje –  $1, u, v, w, k, \varepsilon$ ; RIT –  $1, u, v, w, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{u'v'w'}$ .

$k-\varepsilon$  turbulencijos modelis remiasi izotropinio sūkurinių klampio koncepcija Reinoldso įtempių išraiškomis. Esant sudėtingiems srautams su svorio jėgomis ar sudėtingais įtempių laukais, ši prielaida per daug paprasta.

RIT modelis ne tik leidžia aprašyti pernešimą ir skirtingus individualius Reinoldso įtempius, bet ir turi pranašumą – nariai, įvertinantys anizotropinius efektus, automatiškai įtraukiami į įtempių pernešimo lygtis. Šios anizotropinės turbulencijos charakteristikos, esant didelėms Archimedo jėgoms, yra svarbios (angl. *significant buoyancy*) srauto linijų kreivumui, srauto susukimui ar recirkuliacijai.

Visas RIT modelis turi 7 Reinoldso įtempių lygtis, 3 pernašos lygtis ir 1 tolydumo lygtį (Kavaliauskas, Vaitiekūnas 2001).

Naudojant RIT modelį be momentų bei tolydumo lygčių, Reinoldso įtempių pernašos lygtys yra tokio pavidalo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

čia:  $D_{ij}$  – įtempių sklidimas;  $P_{ij}$  – įtempių būvis;  $\Pi_{ij}$  – slėgio įtempis;  $\varepsilon_{ij}$  – disipacija (išsklaidymas).

Skaičiuojant Reinoldso įtempius svarbiausias yra slėgio ir įtempio  $\Pi_{ij}$  baigtinis modelis.

Matematinio modelio lygtys spęstos skaitiniu baigtinių tūrių metodu (Vaitiekūnas *et al.* 2004).

*Laminarinis modeliavimas.* Nagrinėjama atveju modeliuojamas laminarinis oro srautas ciklone naudojant Navjė ir Stokso diferencialinių lygčių sistemą. Apibendrinta jų išraiška vektorine forma esant vienfaziam srautui tokia:

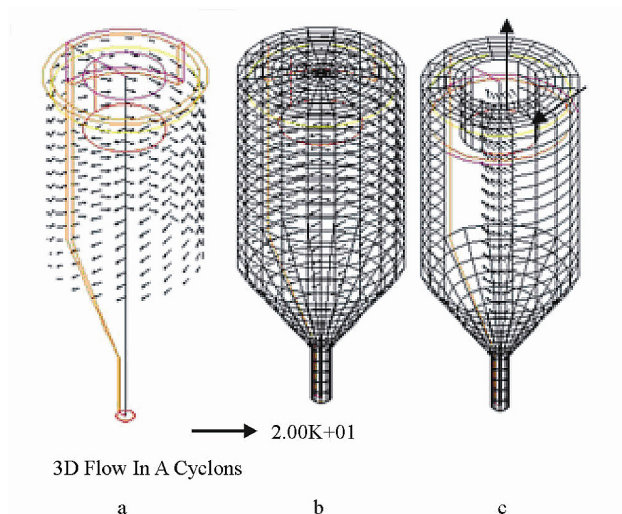
$$\text{div}(\rho \vec{w} \Phi - \Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) = S_{\Phi}, \quad (3)$$

čia:  $\rho$  – tankis,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\Phi$  – priklausomas kintamasis ( $\Phi = 1, u, v, \vec{w}$ );  $\vec{w}$  – greičio vektorius,  $\text{m}/\text{s}$ .

Iš šios lygties galima gauti uždaviniui spręsti reikiamą lygtį arba lygčių sistemą. Lygčių sistemą (3) sudaro Navjė ir Stokso bei tolydumo lygtys, sprendžiamos baigtinių tūrių metodu su ribinėmis sąlygomis (Vaitiekūnas *et al.* 2004; Baltrėnas *et al.* 2008).

### Modeliavimo rezultatai

Sprendžiamas trimatis uždavinys Dekarto koordinatėse su  $x$ ,  $y$  ir  $z$  ašimis. Naudota KGS ciklono konstrukcija buvo tokia, kaip Bernardo ir kt. (2006) darbe pateiktas trijų modelių antrasis variantas. Ciklono geometrinės konfigūracijos charakteristika: ciklono korpuso skersmuo – 0,20 m; ciklono bendrasis aukštis – 0,50 m; apatinės angos kietosioms dalelėms iškristi skersmuo – 0,023 m; cilindrinės dalies aukštis – 0,29 m; kūginės dalies aukštis – 0,133 m; viršutinio oro srauto išėjimo vamzdžio skersmuo – 0,10 m. Tai mažo našumo modelis, jo skersmens ir cilindrinės dalies ilgių santykis – 0,69. Ciklono skaičiavimo tinkleliai buvo sudaryti naudojant cilindrinės koordinatas. Tinklinė sritis bendroju atveju sudaryta iš  $x \cdot y \cdot z = 20 \cdot 10 \cdot 28 = 5600$  tūrinių ląstelių.



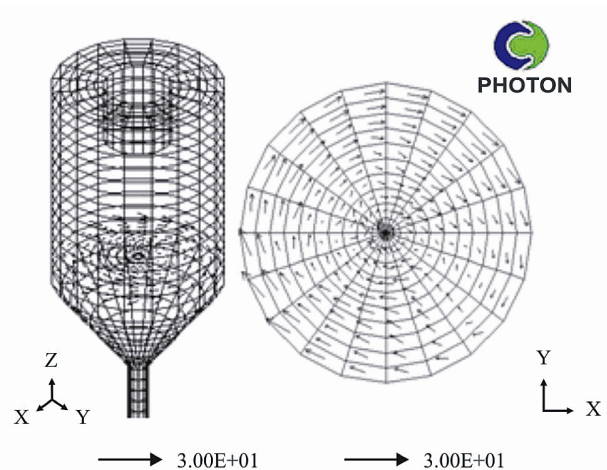
**1 pav.** Oro srauto greičiai prie šoninių sienelių (a), skaičiavimo tinklelis (b) ir srauto ištekėjimas per ciklono viršų (c). Įtekėjimo į cikloną greitis – 4,64 m/s, debitas – 0,28 m<sup>3</sup>/s. Greičių vektorių ilgio mastelis – 20 m/s

**Fig. 1.** The velocity of the air flow along the lateral walls (a), calculation grid (b), and outflow through the cyclone lid (c). Inlet velocity – 4.64 m/s and fluid flow rate – 0.28 m<sup>3</sup>/s. The length scale of velocity vectors – 20 m/s

Šios konstrukcijos ciklonuose oro srautai yra gana sudėtingi. Eksperimentinių (Cristea *et al.* 1996) ir gautų

skaitiniais metodais (Bernardo *et al.* 2006; Derksen 2003; Gujun *et al.* 2008) rezultatų analizė parodė, kad tangentinio greičio komponentių srautas prie ciklono sienelės radialine kryptimi slenka žemyn, o centrine dalimi kykla į viršų.

1 ir 2 pav. pateikti modeliavimo rezultatai, iš kurių matyti, kaip oro srautas įteka pro viršutinę įrenginio korpuso žiedinę dalį tarp ciklono korpuso ir vidinio vamzdžio (1 pav., a) ir išteka pro viršutinę ciklono dalį vidiniu vamzdžiu (1 pav., c). Geriausias sutapimas su kitų autorių rezultatais gautas tada, kai debitas buvo 0,28 m<sup>3</sup>/s. Greičio vektoriai tangentine kryptimi nukreipti žemyn dėl naujai įtenkančio oro srauto, gaunamas sukurytis apie centrinę ciklono ašį, slenkantis žemyn prie šoninių sienų (1 pav., a), o centrine ciklono dalimi srautas juda aukštyn (1 pav., c) ir išteka lauk.

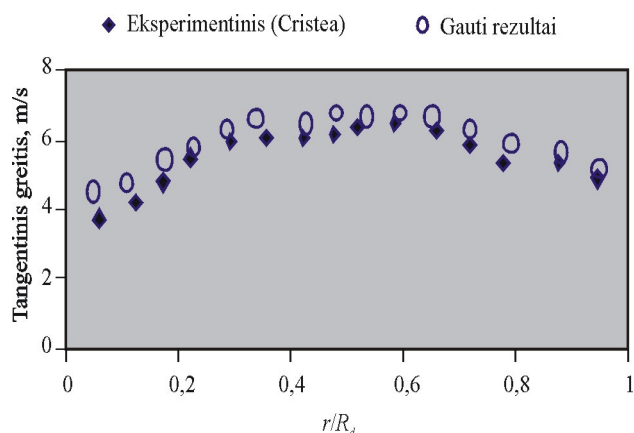


**2 pav.** Oro srauto sukimasis apie vertikaliąją ašį. Greičių vektorių mastelis – 30 m/s

**Fig. 2.** Fluid flow swirling around the vertical axis. The scale of velocity vectors – 30m/s

Darbe atliktas skaitinis modeliavimas oro srautų ciklone turint tikslią palyginti rezultatus su kitų autorių duomenimis.

3 pav. apskaičiuotos dujų tangentinio greičio reikšmės radialine kryptimi palygintos su išmatuotomis (Cristea *et al.* 1996) skerspjūvyje 0,175 m nuo ciklono viršaus. Rezultatai, gauti taikant vienfazį skaitinį modelį, parodė priimtina atitiktį su eksperimento (Cristea *et al.* 1996) rezultatais, vidutinė santykinė tangentinio greičio komponentių nuokrypa sudarė  $\pm 5$  proc. Modeliuota, siekiant parodyti srautų tekėjimo greičius ciklono viduje.



**3 pav.** Apskaičiuoto tangentinio greičio lyginimas su eksperimentu (Cristea *et al.* 1996), kai įtekėjimo greitis – 4,64 m/s, debitas – 0,28 m<sup>3</sup>/s.  $R_d$  – ciklono spindulys,  $r$  – radialinis atstumas,  $r = 0$  – ciklono centras,  $r/R_d = 1$  – šoninė siena

**Fig. 3.** A comparison of calculated and experimental (Cristea *et al.* 1996) tangential velocity when inlet velocity – 4.64 m/s and fluid flow rate – 0.28 m<sup>3</sup>/s.  $R_d$  – cyclone radius,  $r$  – radial distance,  $r = 0$  – cyclone pivot,  $r/R_d = 1$  – lateral wall of cyclone

## Išvados

1. Atlikta darbų apie srautų tekėjimo ciklone matematinis modelius analizė parodė, kad sprendžiamų perrašos lygčių skaičius gali padidėti nuo keturių (laminarinis modelis) iki 6 ar 11 esant turbulentiniam modeliui, o skaičiuojant dvifazius srautus lygčių skaičius padvigubėja iki 12 ar 22.

2. Remiantis turimais eksperimentiniais ir skaitiniais tyrimų rezultatais atliktas srauto tekėjimo kūginiame grįžtamojo srauto ciklone modeliavimas. Gautas sukuri- nis besisukantis apie centrinę ciklono ašį oro srautas, kai oro įtekėjimo greitis – 4,64 m/s, debitas – 0,28 m<sup>3</sup>/s. Skerspjūvyje 0,175 m nuo ciklono viršaus tangentinio greičio skaičiavimo rezultatai  $\pm 5$  proc. tikslumu (vidutinė santykinė paklaida) sutapo su kituose darbuose teikiamais eksperimentų rezultatais.

## Literatūra

Baltrėnas, P.; Morkūnienė, J.; Vaitiekūnas, P. 2008. Numerical simulation of solid particle dispersion in the air of Vilnius City, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(1): 15–22. doi:10.3846/1648-6897.2008.16.15-22

Baltrėnas, P.; Špakauskas, V.; Vaitiekūnas, P. 1997. Sunkiųjų kalibruotųjų aerozolių dispersijos skaitinis modeliavimas, *Aplinkos inžinerija* 2(8): 4–12.

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(3): 190–200.

doi:10.1016/j.powtec.2005.11.007

Boysan, F.; Ayers, W. H.; Swithenbank, J. A. 1982. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design, *Institution of Chemical Engineers* 60: 222–230.

Cristea, E. D.; Malfa, E.; Coghe, A. 1996. 3-D numerical simulation and measurement of strongly swirling heavy dust-laden flow inside a cyclone separator, in *3<sup>rd</sup> International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*. Crete. Greece.

Derksen, J. J. 2003. Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone, *AIChE Journal* 49: 1359–1371. doi:10.1002/aic.690490603

Derksen, J. J.; Sundaresan, S.; Van Den Akker, H.E.A. 2006. Simulation of mass loading effects in gas–solid cyclone separators, *Powder Technology* 163: 59–68. doi:10.1016/j.powtec.2006.01.006

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. doi:10.1016/j.powtec.2007.11.019

Hoekstra, A. J.; Derksen, J. J.; Van Den Akker, H. E. A. 1999. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, *Chemical Engineering Science* 54: 2055–2065. doi:10.1016/S0009-2509(98)00373-X

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. doi:10.1002/aic.10354

Kavaliauskas, A.; Vaitiekūnas, P. 2001. Reinoldso įtempimų modeliavimas oro srautui aptekant kliūtį kvadratiniam kanale, *Energetika* (3): 38–43.

Nieuwland, J. J.; Meijer, R.; Kuipers, J. A. M.; van Swaaij, W. P. M. 1996. Measurements of solids concentration and axial solids velocity in gas-solid two-phase flows, *Powder Technology* 87: 127–139. doi:10.1016/0032-5910(95)03081-6

Shi, L. M.; Bayless, D. J. 2007. Comparison of boundary conditions for predicting the collection efficiency of cyclones, *Powder Technology* 173: 29–37. doi:10.1016/j.powtec.2006.11.022

Sommerfeld, M.; Ho, C. H. 2003. Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology* 131: 1–6. doi:10.1016/S0032-5910(02)00293-0

Vaitiekūnas, P.; Katinas, V.; Markevičius, A. 2004. Simulation of conductive-convective heat transfer in a natural basin, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 12(2): 58–62.

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. doi:10.1016/j.apm.2006.03.011

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. doi:10.1205/cherd06040

Zhou, L. X.; Soo, S. L. 1990. Gas solid flow and collection of solids in a cyclone separator, *Powder Technology* 63(1): 45–53. doi:10.1016/0032-5910(90)80006-K

## APPLYING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELLING FOR INVESTIGATING CONICAL REVERSE-FLOW CYCLONE

I. Jakštonienė, P. Vaitiekūnas

### Summary

The problem of the efficiency of cyclones, devices for separating heavy particles from their carrying fluid, is examined. A review of experimental and theoretical papers is conducted introducing three dimensional differential equations for transfer processes and the Reynolds stress model of turbulence.

The paper describes the numerical modelling of the swirling fluid flow in the conical reverse-flow cyclone the height of which is 0.50 m and diameter – 0.20 m. The governing fluid flow equations are solved using the finite volume method in a body-fitted coordinate system. A reasonable agreement between the presented results of numerical calculations (inlet velocity - 4.64 m/s and fluid flow rate - 0.28 m<sup>3</sup>/s) and experimental and numerical data obtained by other authors is found (mean relative error did not exceed  $\pm 5\%$ ).

**Keywords:** cyclone, solid particles, numerical modelling, computational fluid dynamics, turbulence.