

DUJŲ TURBULENCIJOS CIKLONE MODELIAVIMAS

Inga Jakštonienė¹, Petras Vaitiekūnas²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹inga.jakstoniene@vgtu.lt; ²vaitiek@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjama dujų aerodinamika Stairmando ciklone (kūginis grįžtamojo srauto (KGS) ciklonas – įrenginys kietosioms dalelėms atskirti iš oro srauto) spendžiant tangentinio srauto įtekėjimo skaitinio modeliavimo problemą. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai darbai ciklonuose, kuriuose susidaro ypač sudėtingas sukurinis srautas. Pateiktos trimatės pernašos diferencialinės lygtys nespūdžiam turbulentišiam srautui ciklono viduje, kurios skaitiškai išspręstos baigtinių tūrių metodu taikant standartinį $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modelius. Atliktas skaitinis oro srauto judėjimo modeliavimas Stairmando ciklone, kurio aukštis yra 0,75 m, skersmuo – 0,17 m, cilindrinės dalies aukštis – 0,29 m, kūginės – 0,39 m, įtekėjimo angos plotas – $0,085 \times 0,032 \text{ m}^2$. Oro srauto judėjimo ciklone matematinį modelį sudaro Navjė ir Stokso (Reinoldso) trimačių diferencialinių lygčių sistema. Modeliavimo rezultatai – tangentinio ir ašinio greičio profiliai ciklone taikant RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modelį, kai įtekėjimo greitis 4,64 ir 14,8 m/s, o debitas – atitinkamai 0,0112 ir 0,0388 m^3/s gerai sutapo su kitų autorių eksperimentiniais ir teoriniais rezultatais. Vidutinė santykinė paklaida – $\pm 7,5$ proc.

Reikšminiai žodžiai: ciklonas, kietosios dalelės, skaitinis modeliavimas, turbulencija, vienfazis srautas.

Įvadas

Sukurinio srauto tyrimas įdomus techniniu ir moksliniu požiūriu dėl poveikio pernešimo procesams, susijusiems su recirkuliacijos srauto lauku. Vienas iš smarkiai besisukančių srautų pritaikymo sričių yra ciklonai, kurie plačiai naudojami įvairiuose pramoniniuose procesuose.

Ciklonai naudojami įvairiems tikslams, tačiau dažniausiai – tankiajai fazei atskirti esant daugiafaziam tekėjimui. Srauto įėjimas į cikloną pro įvairių formų įleidimo dalį gali būti ašinis arba tangentinis (Ingham, Ma 2002; Avci, Karagoz 2003).

Tangentinis įtekėjimas plačiai taikomas dalelėms atskirti iš dujų srauto (Altmeyer *et al.* 2004; Kaya, Karagoz 2008).

Cikloniniai separatoriai dirba veikiami išcentrinų jėgų. Fluido mišinys patenka į cikloną, sukasi, o išcentrinų jėgų veikiami tankioji mišinio fazė pradeda santykinai judėti radialine kryptimi ir atskiriama nuo pagrindinio srauto. Šį klausimą analizuoti sudėtinga, kadangi, be trimačio pobūdžio, šiam srautui turi įtakos daugelis kitų parametrų (Avci, Karagoz 2003).

Viena iš ciklono efektyvumo apskaičiavimo problemų yra srauto pobūdžio poveikis. Apskritai, dideliuose ciklonuose srauto tipas yra turbulentinis, ir tariami trinties faktoriai bei rezultatai yra reikšmingi. Bet taip nėra mažuose ciklonuose, kur svarbesnės gali būti srauto ir eksploatacinės sąlygos – greitis, temperatūra, slėgis, klampa ar ciklono skersmuo, kadangi (Blachman, Lippman 1974; Saltzman, Hochstrasser 1983) šiuose ciklonuose srautas

gali būti laminarinis, turbulentinis arba pereinamasis. Srautas, kuris yra turbulentinis, pradžioje gali būti laminarinis. Laminariame sraute eksploataciniai parametrai turi didesnės įtakos ciklono efektyvumui nei turbulentiame. Mažuose ciklonuose ypač sunku numatyti srauto režimo poveikį efektyvumui ir slėgio nuostoliams, lyginant su geometrinų parametrų poveikiu (Avci, Karagoz 2003).

Skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD) yra potenciali priemonė srauto laukų charakteristikoms (Baltrėnas *et al.* 2008a; 2008b), dalelių trajektorijoms, dujiniam teršalams (Vaitiekūnas, Banaitytė 2007) ir slėgio kritimui ciklonų viduje prognozuoti (Gimbun *et al.* 2005).

Dvifazio srauto proceso ciklone suvokti esmę, galinčią pagerinti eksploataciją, sunku dėl to, kad nepaisant tariamo paprastumo, srautų dinamika sudėtinga, apimanti sukurinį judėjimą ir kai kuriais atvejais kelias atbulinio srauto žiedines zonas. Uždaro sukurinio srauto teorijose iki šiol nebuvo išskirti daugelio srauto laukų ypatumai. Problema, liečianti detalios srauto struktūros matematinį modeliavimą, apima glaudžiai susijusių masės ir impulso tvermės netiesinių dalinių diferencialinių lygčių sprendimą ir neturi analizinio sprendimo (Vaitiekūnas 1998). Be to, turbulencijos įvertinimas, pagrįstas izotropijos prielaida (pvz., turbulentinės klamos hipoteze), negali būti pritaikytas greitai besisukančių srautų atveju (Boysan *et al.* 1982; Bernardo *et al.* 2006). Panaši nuomonė išreikšta ir darbe (Hoffmann, Stein 2002).

Darbe (Meier, Mori 1999) pateiktos laiko atžvilgiu vidurkintos Navjė ir Stokso lygtys dujų fazei susietos su

anizotropiniu turbulencijos modelio ir k - ε modelio bei algebrinių įtempimų lygčių deriniu. Po šio novatoriško darbo dar keliose studijose buvo modeliuojama turbulencija siekiant geriau numatyti greitį ir slėgį modifikuojant turbulencijos modelius. Visose šiose studijose nagrinėjama ašinė simetrija, leidžianti taikyti dviejų dimensijų modelį, kuriame kietoji fazė beveik nesusiduria su dujų lauku.

Norint gauti dydžius Reinoldso įtempimų nariams (Bernardo *et al.* 2006) buvo taikomas turbulencijos modelis, žinomas kaip Reinoldso įtempimų modelis (RIM). Šis modelis pagrįstas pernešimo lygtimis visoms Reinoldso įtempimų tenzorius komponentėms ir disipacijos greičiui. RIM pateikiama anizotropinė turbulencija srautams, o pagal turbulentinės klamos hipotezę – izotropinė turbulencija. Pirmuoju atveju sprendžiamos Reinoldso įtempimų pernašos lygtys atskiroms įtempimų komponentėms.

Šio darbo tikslas – atlikti oro srauto skaitinį modeliavimą Stairmando ciklone taikant trimates pernašos lygtis esant standartiniam k - ε ir RNG k - ε turbulencijos modeliui.

Pagrindinės lygtys ir sprendimo metodas

Stebint turbulencinius srautus matyti, kad jie yra ypač sudėtingi. Tai rodo sudėtingesnės turbulencinio srauto lygtys (1) ir (2), kuriose figūruoja papildomi nariai, Reinoldso įtempimai. Kai modeliuojami šie nariai, bandoma paprastus sąryšius pateikti kaip galutinę lygčių formą, sprendžiamą skaitiniais metodais, tai yra paprastinant pilnąsias lygtis. Tai reiškia, kad supaprastinimas gali turėti daug reikšmės, kadangi sumažėja matematinio modelio, aprašančio srautą, tikslumas (Vaitiekūnas 1998). Pagal turbulentinės klamos hipotezę diferencialinės pernašos lygtys yra tokios (Petraitis, Vasarevičius 2001; Jakštonienė, Vaitiekūnas 2009):

$$\text{div}(\rho \vec{V} \Phi - \Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) = S_{\Phi}, \quad (1)$$

čia t – laikas; ρ – tankis; Φ – priklausomas kintamasis, kaip masės vieneto momentas, turbulencinio energija, jos disipacijos greitis; $\Phi = 1$ – tolydumo lygtis; \vec{V} – greičio vektorius; Γ – kintamojo Φ mainų koeficientas; S_{Φ} – srauto (šaltinio) narys kintamajam Φ . Mainų koeficientas esant turbulenciniam tekėjimui išreiškiamas taip:

$$\Gamma_{\Phi} = \rho (v_l + v_t), \quad (2)$$

čia v_l – molekulinis kinematinės klamos koeficientas, v_t – turbulentinės klamos koeficientas. Turbulentinė

klampa v_t skaičiuojama derinant turbulentinės kinetinės energijos k ir jos disipacijos greičio ε lygtis:

$$v_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Pernašos lygtys kintamiesiems k ir ε RNG k - ε modelyje, gautame iš Navjė ir Stokso lygčių, taikant grupių normalizacijos teoriją (Yakhot, Orszag 1986) užrašomos taip:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a_{\varepsilon} \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R. \quad (5)$$

Kaip ir standartinis k - ε modelis, šis modelis apima analizes išraiškas papildomai gaunant R narį (5) lygtyje. Modelio konstantos taikomos tokios: $C_{1\varepsilon} = 1,42$, $C_{2\varepsilon} = 1,68$ ir $C_{\mu} = 0,0845$, $Pr_{k,t} = Pr_{\varepsilon,t} = 0,7194$.

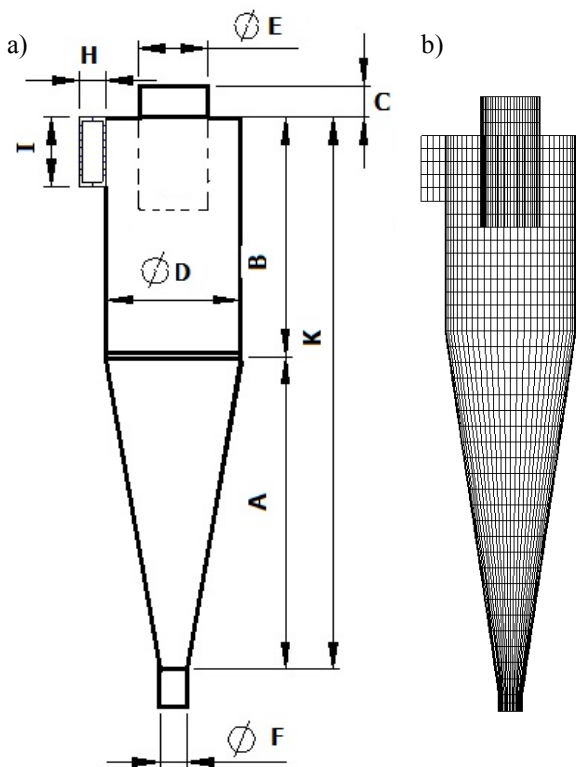
Aprašytosios lygtys sprendžiamos skaitiniu baigtinių tūrių metodu (Spalding 2002; Patankar 1980). Pagal baigtinių tūrių idėją, skaičiuojamoji sritis diskretizuojama į daug celių, diferencialinės lygtys integruojamos kiekvienai celei taikant divergencijos teoremą (Gauso ir Ostrogradskio teorema) gaunant diskretizuotas, t. y. algebrines lygtis, kurios sprendžiamos iteracijų būdu, šitaip gaunant priklausomųjų kintamųjų reikšmių laukus.

Modeliavimo rezultatai ir analizė

Cikloną sudaro trys pagrindinės dalys: įleidimo anga, atskyrimo kamera ir dulkių bunkeris. Modeliuojant taikomas Stairmando tipo didelio efektyvumo ciklonas (Kaya, Karagoz 2008). 1 pav., a pateiktas ciklono geometrinės konfigūracijos charakteristikos: ciklono bendras aukštis 0,75 m, cilindrinės dalies aukštis 0,29 m, kūginės dalies aukštis 0,39 m, skersmuo $2R = 0,17$ m.

Pagrindinės pernašos lygtys vektorine forma (1) lygties pavidalo, diskretizuotos taikant SFD baigtinių tūrių metodą. Ciklono modeliavimo sritis – trimatė erdvė cilindrinėje koordinačių sistemoje – suskirstyta į ląsteles x , y , z koordinačių ašių kryptimis (Bernardo *et al.* 2006; Jakštonienė, Vaitiekūnas 2009).

Ciklono tinklinė sritis bendruoju atveju sudaryta iš $x \times y \times z = 20 \times 15 \times 45 = 13\,500$ (1 pav., b) tūrinių ląstelių ir $x \times y \times z = 40 \times 20 \times 45 = 36\,000$. Diskretinių tūrinių ląstelių skaičiuojamos radialinės, tangentinės ir ašinės krypties greičio komponentės, slėgis, turbulencijos charakteristikos.



1 pav. Ciklonas: geometrija, įtekėjimo anga (cilindrinės dalies viršuje), dvi ištekėjimo angos – apačioje esantis vamzdis skirtas kietosioms dalelėms, viršuje – išvalytam orui išeiti, R – vamzdžio skersmuo (a); skaičiavimo tinklelio eskizas (b)

Fig. 1. Cyclone: a) geometry, inlet (at the top of cylinder); two outlets – at the bottom – for solid particles, and pipe with diameter R at the top – outlet of gas flow; b) sketch of computation grid

Ciklono matmenys (mm): $A = 390$, $B = 290$, $C = 50$, $\text{OD} = 170$, $\text{OE} = 85$, $\text{OF} = 32$, $H = 32$, $I = 85$, $K = 680$. Oro srauto greičiai ciklono įleidimo angoje yra 4,64 ir 14,8 m/s, o debitas – 0,0112 ir 0,0388 m³/s. Ištekėjimo ribinės sąlygos buvo taikomos išėjimo angose, kurių viena yra cilindrinės ciklono dalies išėjimo vamzdžio viršuje, antra – kūginės dalies apačioje, t. y. dalelių surinkimo angoje. Prie kietų sienelių greičiui buvo taikoma srauto prilipimo prie sienelių sąlyga, o veikimo būdą šalia sienelės apibrėžė standartinė ir nepusiausviros sienelės funkcijos (Spalding 2002).

Susidaręs laminarinis ir turbulentinis srautas ciklone esant tangentiniam įtekėjimui apskaičiuotas skaitiniu būdu taikant SFD metodiką ir du skirtingus turbulentinis modelius: standartinį $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulentinį modelį su nepusiausviros sienelės funkcijomis (Spalding 2002). Skaitiniai rezultatai buvo lyginami su (Kaya, Karagoz 2008) pateiktomis skaitinėmis (Bernardo *et al.* 2006) ir eksperimentinėmis (Cristea *et al.* 1996) vertėmis.

Sudėtingas sukurinis turbulentinis srautas ciklone kelia didelius reikalavimus SFD koduose naudojamiems

skaitiniams metodams ir turbulencijos modeliams, modeliuojant ciklono slėgio kritimą bei ašinį ir tangentinį greitį (Ingham, Ma 2002).

Literatūroje plačiai analizuojami ir aprašomi įvairaus sudėtingumo turbulentinio pernešimo modeliai, taikomi atliekant skaitinius tyrimus, tačiau nėra pakankamai ištirta, kurie iš jų yra tinkamiausi mišrios konvekcijos atveju.

Nors teorinių greičio profilių tendencija ir elgsena atitinka eksperimentinius duomenis, tačiau yra kai kurių neatitikimų, ypač centrinėje dalyje, lyginant su greičiais iš literatūros šaltinių. Kai šis sukurinis srautas stipriai veikiamas įtekėjimo srauto ir apibrėžiamas geometrinių sąlygų, kad ir sunku tiksliai nustatyti greičius tokia sudėtingame sraute, tačiau galima daryti išvadą, kad šie nesutapimai atsirado ne tik dėl turbulencijos modelių ir skaitinių metodų, bet ir dėl eksperimento ir matavimo paklaidų. Besisukantis apie centrinę ciklono ašį fluido srautas turbulencijos struktūroje generuoja griežtą anizotropiją, turinčią įtakos standartiniams $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modeliams, kurie duoda netikslių fluido srauto prognozę. Nors tiriant RNG $k-\epsilon$ modelį gaunami kiek geresni rezultatai lyginant su standartiniu $k-\epsilon$, dėl sukamojo faktoriaus negalima nustatyti rankinio tipo tangentinio greičio pasiskirstymo. Be to, esant standartiniams $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modeliams labiau nukrenta slėgis. Tačiau, geriausi slėgio kritimo modeliavimo rezultatai gaunami RIM modeliu (Kaya and Karagoz 2008).

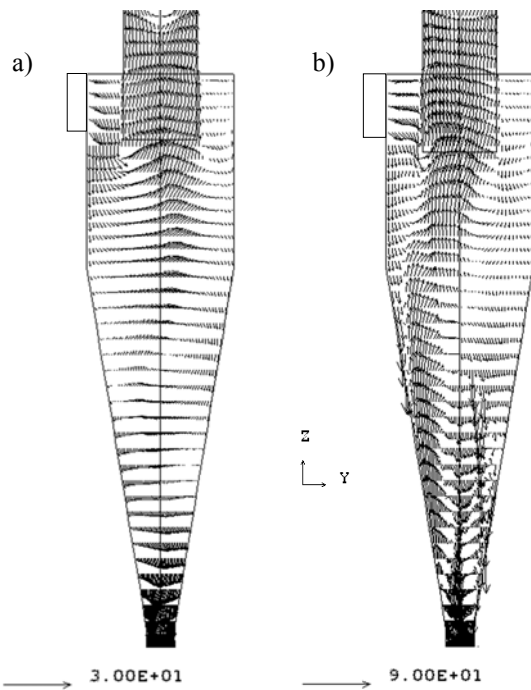
Greičio vektorių laukai vertikaloje ciklono plokštumoje, kai įtekėjimo greičiai 4,64 ir 14,8 m/s, pateikti 2 pav., a, b. Juose matyti asimetriškas laukų išsidėstymas dėl tangentinio įtekėjimo viršutinėje ciklono dalyje.

2 pav., b pateiktas greičių laukas, kuris skiriasi nuo 2 pav., a pateikto lauko, ypač kūginėje ciklono dalyje; jo vektorių lauko mastelis yra tris kartus didesnis už 2 pav., a mastelį. Esant skirtingiems įtekėjimo greičiams gaunamas kompleksinis srauto laukas, kuriame srauto greitis didėja artėjant link kūgio viršūnės dėl pagreičio ir spiralės formos vidinio sukuriu. Vidinio sukuriu esant vektorių nukreiptiems vertikaliai aukštyn (2 pav., b), ašis nesutampa su geometrine ciklono ašimi. Kūginėje dalyje yra du sukuriai: be minėto sukuriu centrinėje ciklono dalyje, priešingoje geometrinės ciklono ašies pusėje esantis kompensacinis srautas juda žemyn.

Ciklone susidaro dideli slėgio gradientai bei dviejų sukurių srauto struktūra, ypač aiškiai išreikštas grįžtamasis kūginės cilindro dalies srautas, einantis aukštyn ištekėjimo angos link (2 pav., b). Visa tai reikalauja efektyvaus slėgio skaičiavimo algoritmo. 2 pav., a ir b greičių

vektoriai skiriasi net tris kartus, t. y. beveik atitinka abiejų atvejų tangentinio įtekėjimo greičių santykį. Nepaisant šių plokštuminių vektorių laukų, didžiausi yra tangentiniai greičiai visuose vertikalios koordinatės skerspjūviuose, pvz.: 3 pav., kuriame parodytas tangentinis greičio profilis nuo ciklono centro iki šoninės sienelės. Maksimalaus greičio reikšmės profiliuose pagal aukštį z nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus yra pateiktos 1 lentelėje.

Esant įtekėjimo greičiui 14,8 m/s, maksimalus tangentinis greitis u profiliuose (žr. 3 pav.) yra 28–30 m/s. Panašūs rezultatai yra gauti kitų autorių: eksperimentiniai (Patterson, Munz 1996) ir skaitiniai (Bernardo *et al.* 2006).



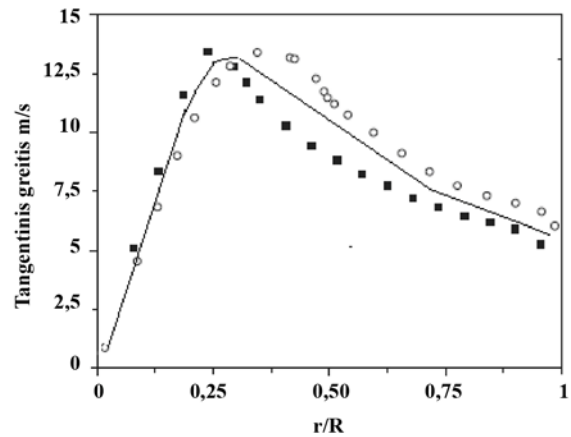
2 pav. Greičio vektorių laukas ciklono skerspjūvio vertikalioje plokštumoje, kai: įtekėjimo greitis 4,64 m/s; vektorių mastelis 30,0 m/s (a); įtekėjimo greitis 14,8 m/s; vektorių mastelis 90,0 m/s (b)

Fig. 2. Mid-plane velocity vectors: inlet velocity 4,64 m/s; the scale of velocity vectors – 30,0 m/s (a); inlet velocity 14,8 m/s, the scale of velocity vectors – 90,0 m/s (b)

1 lentelė. Maksimalus tangentinis greitis U , m/s (žr. 3 pav.) profiliuose, priklausomai nuo atstumo nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus z , m. Įtekėjimo greitis yra 4,64 m/s

Table 1. Maximal tangential velocity U , m/s (see Fig. 3) in profiles depending of distance z (m) below the cylindrical cyclone body top. Inlet velocity – 4,64 m/s

z , m	0,1	0,12	0,26	0,33
u , m/s	12,0	15,50	14,50	12,62



3 pav. Tangentinio greičio profilių palyginimas (ašinė padėtis yra skerspjūvyje 0,33 m nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus, įtekėjimo greitis 4,64 m/s): juodi taškai – eksperimentiniai (Cristea *et al.* 1996) duomenys, balti rutuliukai – skaitiniai (Bernardo *et al.* 2006) rezultatai, kreivė – šio darbo modeliavimo rezultatai. R – ciklono cilindrinės dalies spindulys, r – radialinis atstumas, m; ciklono centre $r = 0$, sienelėje $r = R$

Fig. 3. Tangential velocity profiles (axial position at a distance of 0,33 m below the cylindrical cyclone body top): black points – experimental (Cristea *et al.* 1996), white circle – numerical (Bernardo *et al.* 2006), curve – predicted numerical results. R – radius of cylindrical cyclone body, r – radial distance m; $r = 0$ on centre, $r = R$ on the wall of the cyclone

Įtekėjimo greičio į cikloną padidėjimas nuo 4,64 iki 14,8 m/s apie 2 kartus padidina tangentinį greitį ir išcentrines jėgas ciklono viduje, tačiau padidėję slėgio perkryčiai, trintis į sienelės ir turbulencija srauto struktūrą padaro labai sudėtingą (2 pav., b). Kadangi ciklone vykstanti aerodinaminė procesą smarkiai veikia įtekančio srauto ir geometrinės sąlygos ir tokia sudėtingame sraute sunku tiksliai išmatuoti greičius, darbo (Kaya, Karagoz 2008) išvadoje teigiama, kad šie nesutapimai atsiranda ne tik dėl turbulencijos modelio ir skaitinių metodų, bet ir dėl eksperimentinių bei matavimo paklaidų. Greitai besisukantis skysčio srautas sukuria stiprią anizotropiją turbulentinėje struktūroje ir dėl to iš standartinio $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modelių gaunami netikslūs duomenys apie skysčių srautus. Palyginus du izotropinius modelius, iš RNG $k-\epsilon$ modelio gaunami šiek tiek geresni rezultatai negu standartinio $k-\epsilon$ modelio esant srauto sukimuisi ir priešpriešiniams srautams (Kaya, Karagoz 2008).

Darbe (Bernardas *et al.* 2006) palyginti skaitinių ir eksperimentinių dujų tangentinio greičio profiliai, kai ašinė padėtis yra 0,12 m ir 0,33 m nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus. Šie rezultatai, gauti taikant RNG turbulencijos modelį, taip pat parodė atitikimą su kitų tyrėjų duomenimis (3 pav.).

Slėgio kritimas skaičiuojant aerodinaminius procesus ciklone (įtekėjimo greitis yra 4,64 m/s.) atrodo taip: įrenginio dalyje skerspjūvyje 0,33 m nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus slėgis yra teigiamas 200–300 Pa (nukrypimas nuo atmosferinio slėgio), skerspjūvyje 0,26 m slėgio skirtumai darosi didesni – 1,6–330 Pa; skerspjūvyje 0,12 m – (192–350) Pa – atsiranda neigiamas slėgis centrinėje dalyje apie vertikalią z ašį, o esant srautui ciklono skerspjūvyje 0,1 m nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus, – (132–400) Pa. Neigiamas slėgis yra centrinėje ciklono dalyje, kurioje susiformavęs srautas turi vertikalią kryptį aukštyn ištekėjimo vamzdžio link (žr. 2 pav., a).

Panašus slėgio pasiskirstymas yra ir tuo atveju, kai įtekėjimo greitis yra 14,8 m/s, tik slėgio skirtumai yra apie tris kartus didesni. Be to, kylančio aukštyn srauto vidurinėje ciklono dalyje ašis nesutampa su geometrine ciklono ašimi, bet periodiškai nukrypsta nuo centro į šonus (2 pav., b) kylantis srautas yra į kairę pusę nuo centrinės ciklono ašies) ir tik priartėjęs prie ištekėjimo vamzdžio stabilizuojasi ir grįžta į centrinę dalį. Šioje ciklono dalyje slėgis yra neigiamas. Skerspjūvyje 0,1 m nuo ciklono cilindrinės dalies viršaus slėgis prie sienelių siekia iki 1000 Pa, o centre – –250 Pa. Čia pagal slėgio ženklą srautas turi atitinkamas kryptis: kai slėgis teigiamas, tai srautas nukreiptas žemyn ir, priešingai, kai neigiamas, – aukštyn.

Lyginant gautus modeliavimo greičius ir darbo (Kaya, Karagoz 2008) skaitinius ašinio ir tangentinio greičio laukus, pastebėta, kad vertikalioje plokštumoje ašinio greičio profilių forma labai keičiasi ir skirtumai tarp skaitinių sprendinių darosi pastebimi, nes srautas sukasi žemyn kūginės dalies viršūnės link.

Modeliavimo rezultatai (tangentinio greičio profiliai), palyginti su kitų autorių eksperimentiniais ir teoriniais rezultatais, rodė tam tikrą sutapimą, vidutinė santykinė paklaida sudarė apie 7,5 %.

Darbe (Kaya, Karagoz 2008) palyginti du izotropiniai turbulencijos modeliai, t. y. standartinis $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencinis bei anizotropinis Reinoldso įtempimų modelis (RIM), taikant baigtinių elementų metodą. Šiame darbe kitu diskretizacijos metodu – baigtinių tūrių metodu buvo gauti panašūs skaitiniai įvairių greičių (tangentinio, radialinio, ašinio) ciklone rezultatai taikant pirmuosius du turbulencijos modelius, t. y. standartinį $k-\epsilon$ ir RNG $k-\epsilon$ turbulencijos modelius. Nors šiuo metu turbulencija modeliuojama artutiniu būdu, taikant įvairias aproksimacijas, pusiausviras ir nepusiausviras sienelės funkcijas. Kai modeliai pagrįsti turbulencinės klamos hipoteze, geresnius rezultatus duoda RNG turbulencijos modelis, tačiau geriausią rezultatą skaičiuojant ciklonus

duoda anizotropinis turbulencijos modelis – RIM. Skaitinių tyrimų rezultatai parodė, kad SFD sėkmę lemia tikslus srauto turbulencinio judėjimo apibūdinimas.

Išvados

1. Aerodinaminių procesų, vykstančių skaičiuojant ciklonus, esant ašiniam srauto sukimuisi, iš dviejų $k-\epsilon$ turbulencijos modelių geriau tinka RNG modelis. Standartinis $k-\epsilon$ modelis labiau tinka kietų kūnų sukimuisi modeliuoti negu numatomiems mišriems sukimams ir taip pat labai veikia ašinio greičio pasiskirstymą.
2. Įtekančio greičio į cikloną padidėjimas nuo 4,64 iki 14,8 m/s apie 2 kartus padidina tangentinį greitį, apie 3 kartus padidėja slėgio skirtumai, trintis į sienelės ir turbulencija – visa tai aerodinaminį procesą daro gero kai sudėtingesnį.
3. Palyginus baigtinių elementų ir baigtinių tūrių metodais gautus tangentinio ir ašinio greičių profilius matyti, kad gauti rezultatai rodo gerą abiejų metodų sutapimą esant analogiškiems ciklonų srautų modeliavimo uždaviniams.
4. Modeliavimo rezultatus (tangentinio greičių profilių) palyginus su eksperimentiniais ir teoriniais kitų autorių rezultatais sutapimas buvo priimtinas, vidutinė santykinė paklaida sudarė apie 7,5 %.

Moksliniai tyrimai atlikti dalyvaujant COST programos MP0806 „Particle in turbulence“ veikloje.

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. doi: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. doi:10.1016/S0255-2701(03)00079-5
- Baltrėnas, P.; Morkūnienė, J.; Vaitiekūnas, P. 2008 a. 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.; Vaitiekūnas, P.; Vasarevičius, S.; Saad Jordaneh. 2008 b. Dispersion modelling of solid particles from vehicle exhaust into the atmosphere, *Ekologija* 54(2): 117–123. doi:10.2478/V10055-008-0019-8
- 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. doi: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. doi:10.1080/0002889748507040
- 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 *3rd International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*. Crete. Greece.
- 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. doi: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. doi:10.1080/02786820490449548
- Hoffmann, A. C.; Stein, L. E. 2002. *Gas Cyclone and Swirl Tubes-Principles, Design and Operation*. Springer-Verlag, Berlin.
- Ingham, D. B.; Ma, I. 2002. Predicting the performance of air cyclones, *Int. J. Energy Res* 26: 633–652. doi: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. doi: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. doi: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. doi:10.1021/es00113a011
- Spalding, D. B. 2002. *PHOENICS 3.5 VR CFD CODES*. Available from Internet: <http://cham.co.uk/>.
- Vaitiekūnas, P. 1998. *Konvekcinių pernešimo skaitinis modeliavimas*. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas. 264 p.
- 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. doi:10.1007/BF01061452

ANALYSIS OF THE NUMERICAL MODELLING OF TURBULENCE IN THE CONICAL REVERSE-FLOW CYCLONE

I. Jakštonienė, P. Vaitiekūnas

Abstract

The paper describes the numerical modelling of the swirling fluid flow in the Stairmand cyclone (conical reverse-flow – CRF) with tangential inlet (equipment for separating solid particles from the gaseous fluid flow). A review of experimental and theoretical papers is conducted introducing three-dimensional differential equations for transfer processes.

The numerical modelling of the Stairmand cyclone the height of which is 0.75 m, diameter – 0.17 m, the height of a cylindrical part – 0.290 m, a conical part – 0.39 m and an inlet area is 0,085×0,032 m is presented. When governing three-dimensional fluid flow, transfer equations Navje-Stokes and Reynolds are solved using the finite volume method in a body-fitted co-ordinate system using standard $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ model of turbulence. Modelling is realised for inlet velocity 4.64, 9.0 and 14.8 m/s (flow rate was 0.0112, 0.0245 and 0.0388 m³/s). The results obtained from the numerical tests have demonstrated that the RNG $k-\epsilon$ model of turbulence yields a reasonably good prediction for highly swirling flows in cyclones: the presented numerical results (tangential and radial velocity profiles) are compared with numerical and experimental data obtained by other authors. The mean relative error of $\pm 7,5\%$ is found.

Keywords: cyclone, solid particles, numerical modelling, turbulence, one-phase flow.