

---

# Reinoldso įtempimų modeliavimas oro srautui aptekant kliūtį kvadratiname kanale

---

**Andrius Kavaliauskas,  
Petras Vaitiekūnas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Atsinaujinančių energijos šaltinių  
laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas*

Atliktas turbulencijos tyrimo oro srautui aptekant kūną skaitinis modeliavimas Dekarto koordinatinių sistemoje, naudojantis PHOENICS 3.2 programa. Darbe naudotos dvimatės Reinoldso lygtys su standartiniu  $k-\epsilon$ , LKE ir RSTM turbulencijos modeliais sprendžiamos žinomu baigtinių plotų metodu. Plačiau nagrinėtas RSTM modelis bei jo galimybės modeliuojant kūno aptekimo procesus. Gauti teoriniai rezultatai, palyginti su eksperimentiniais, skaičiuojant įvairiais modeliais, parodė neblogą sutapimą.

**Raktažodžiai:** skaitinis modeliavimas, Reinoldso įtempimai, turbulencijos, skaičiuojamoji srautų dinamika

---

## 1. ĮVADAS

Pateikiamas skaitinis kūno skersiniame oro sraute turbulencijos tyrimas. Tam panaudotas PHOENICS 3.2 programų paketas, kuriuo skaitiškai spęstos pernešimo procesų elipsinės lygtys [1]:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \Phi_i)}_{\text{Nestacionarumas}} + \underbrace{\text{div}(r_i \rho_i \vec{v}_i \Phi_i)}_{\text{Konvekcija}} - \underbrace{r_i \Gamma_{\Phi_i} \text{grad} \Phi_i}_{\text{Difuzija}} = \underbrace{r_i S_{\Phi_i}}_{\text{Šaltinis}}. \quad (1)$$

Darbe dvimatės Reinoldso lygtys, naudojant Reinoldso įtempimų – turbulencijos modelį RSTM (Reynolds-stress turbulence model) recirkuliaciniams srautams uždaruose kanaluose modeliuoti, sprendžiamos žinomu baigtinių plotų metodu. Skaitiniame modeliavime panaudotos Dekarto koordinatės. Pateikti skaitinio pavyzdžio oro srautui skersai aptekant kliūtį kvadratiname kanale rezultatai apskaičiuoti trimis turbulencijos modeliais LKE,  $k-\epsilon$ , ir RSTM, taip pat palyginti su eksperimentiniais. Skaičiuojant šiais modeliais, kiekviename iš jų sprendžiamos kelių lygčių sistemos, kurių skaičius priklauso nuo priklausomojo kintamojo  $\Phi$  naudojant modelius: LKE,  $\Phi$  įgyja  $I, u, v, k$  reikšmes;  $k-\epsilon$  –  $I, u, v, k, \epsilon$  ir RSTM –  $I, u, v, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}$ .

$k-\epsilon$  turbulencijos modelis remiasi izotropinio sukurių klampio koncepcija Reinoldso įtempimų išraiškoms. Esant sudėtingiems srautams su svorio jėgomis ar sudėtingais įtempimų laukais, ši prielaida per daug paprasta.

RSTM modelis ne tik leidžia aprašyti pernešimo ir skirtingų vystymų individualius Reinoldso įtem-

pimus, bet ir turi pranašumą – nariai, įvertinantys neizotropinius efektus, yra įtraukiami automatiškai į įtempimų pernešimo lygtis. Šios neizotropinės turbulencijos charakteristikos vaidina svarbų vaidmenį esant didelėms Archimedo jėgoms (significant buoyancy), srauto linijų kreivumui, srauto susukimui ar recirkuliacijai.

Modeliai, naudojantys turbulencijos įtempimų ir srautų pernešimo lygtis, dar vadinami antrų momentų uždarymu (second-moment closures). Šiuos modelius pasiūlė kelių grupių tyrinėtojai, kurių žymiausias yra Launderis ir kt. [2]. Antrų momentų inžinerinių skaičiavimų apžvalga atlikta [3–5] darbuose. Šių skaičiavimų rezultatai rodo RSTM modelio pranašumą, palyginti su sukurių-klampio modeliais, srautuose su gravitacinėmis jėgomis, susuktuose, recirkuliaciniuose, su srauto linijų iškreipimais.

Visas RSTM modelio uždarymas turi 6 Reinoldso įtempimų lygtis, 3 turbulencijos srautų skaliarinių savybių pernešimo lygtis (pvz., energijos) ir 1 turbulencijos energijos disipacijos pernešimo lygtį. Šių sudėtingų lygčių sprendimas kartu su vidutinio srauto pernešimo lygtimis nėra trivialus uždavinys ir skaičiavimo požiūriu gana brangus. Yra papildomų skaičiavimo nepatogumų, atsirandančių naudojant RSTM modelį stabilizuojant sukurių-klampio lauko efektus, kurių realiai nėra vidutinio srauto pernešimo lygtyse. Tačiau, nepaisant to, kad RSTM modelis gali duoti realistiškesnę ir griežtesnę sudėtingų inžinerinių srautų priartėjimą, jis gali būti per brangus kompiuterinės atminties dydžio ir skaičiavimo laiko trimačių srautų modeliavimo požiūriu.

Skaičiavimuose galimos tam tikros RSTM modelio modifikacijos. Paprasčiausias yra vadinamasis slėgio įtempimų (pressure-strain) modelis, pasiūlytas Launderio [4], vadinamasis Gamybos izotropikacijos modelis (Isotropication-of- Production model) – IPM. Sudėtingesnis yra Kvaziizotropinis modelis (Quasi-Isotropic model) slėgio įtempimams – QIM, duodantis geresnį priartėjimą kai kurių srautų uždaviniuose. Abu modeliai naudoja sienelės-koregavimo narius slėgio įtempimams rasti, kaip aprašyta [6] darbe.

Susuktų srautų modeliavimo rezultatai, gaunami QIP ir IPM modeliais, nėra visai patenkinami, ir didelė pažanga pasiekama pritaikant Younis [7] pasiūlymą, dar vadinamą IPY modeliu, duodantį alternatyvią modelio konstantų eilę.

Remiantis Launderio grupės [3–5] ir [8] darbais, buvo sudarytas SSG (Speziale, Sarkar and Gatski) modelis [12]. Jo pranašumas yra tai, kad nereikalauja sienelės-koregavimo (wall-correction) narių.

**RSTM modelio lygtys.** Momento lygtys, esant aktyvintam Reinoldso įtempimų modeliui, yra tokios formos:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(U_i \rho U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial(\rho \overline{u_j u_i})}{\partial x_j} + B_i; \quad (2)$$

čia  $B_i$  – svorio jėgos,  $\overline{u_j u_i}$  – Reinoldso įtempimai ir klampį turintys nariai nežymūs, palyginti su turbulentinio pernešimo nariais. Fiziniu požiūriu, Reinoldso įtempimai, padauginti iš tankio, išreiškia momento pernešimą dėl turbulentiųjų fluktuacijų judėjimo. Taigi,  $\rho \overline{u_j u_i}$  yra  $x_i$  – momento pernešimas  $x_j$  kryptimi; jis veikia kaip srauto įtempimas ir vadinamas turbulentiū arba Reinoldso įtempimu. Reinoldso įtempimai gaunami sprendžiant tokias pernešimo lygtis:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_k \overline{u_i u_j})}{\partial x_k} = \text{Diff}(\overline{u_i u_j}) + \rho(P_{ij} + R_{ij} - E_{ij}); \quad (3)$$

Diff  $(\overline{u_i u_j})$  išreiškia difuzinį pernešimą ir jis modeliuojamas naudojant supaprastintą Daly–Harlow [9, 10] modelio formą:

$$\text{Diff}(\overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \rho C_s \overline{u_k u_k} \frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_k} \right); \quad (4)$$

čia  $C_s$  – empirinė konstanta,  $k$  – kinetinė turbulentinė energija ir  $\varepsilon$  – kinetinės energijos disipacija.

Įtempimų generavimo narys  $P_{ij}$  (3) lygtyje nereikalauja aproksimacijos ir apibrėžiamas kaip

$$P_{ij} = \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}; \quad (5)$$

$E_{ij}$  išreiškia dydžio  $\overline{u_i u_j}$  klampų naikinimą (viscous destruction) ir modeliuojamas, atsižvelgus į lokalią izotropiją:

$$E_{ij} = 2\varepsilon \frac{d_{ij}}{3}; \quad (6)$$

čia  $d_{ij}$  – Kronekerio delta. Galiausiai disipacinis narys lygus nuliui šlyties įtempimams (shear stresses); normaliniams įtempimams tas pats energijos kiekis disipuoja pagal kiekvieną  $k$  komponentę.

Slėgio įtempimų (pressure-strain) narys  $R_{ij}$  veikia perskirstydamas normalinių įtempimų energijos kiekį ir mažindamas šlyties įtempimus. Šis narys, sąlygojantis izotropiškesnį turbulentiškumą, modeliuojamas kaip dviejų dedamųjų suma (contributions):

$$R_{ij} = R_{ij1} + R_{ij2}; \quad (7)$$

čia pirmas dėmuo yra netiesinė turbulentiškumo dalis, o antras – vidutinio įtempimo (mean-strain) dalis.  $R_{ij}$  modeliuojamas naudojant IP sistemos uždarymą [2]:

$$R_{ij1} = -C_1 \left( \overline{u_i u_j} - 2 \frac{d_{ij}}{3} \right) \frac{e}{k}; \quad (8)$$

$$R_{ij2} = -C_2 \left( P_{ij} - d_{ij} \frac{P_{kk}}{3} \right); \quad (9)$$

čia  $C_1$  ir  $C_2$  – empirinės konstantos.  $R_{ij}$  išreikšti IPY modelis taip pat turi (8) ir (9) išraiškas tik su kitomis  $C_1$  ir  $C_2$  konstantų reikšmėmis.

QI modelis [2] naudoja (8) ir  $R_{ij2}$  išraiškai:

$$R_{ij2} = A_{\text{lfa}} \left( P_{ij} - d_{ij} \frac{P_{kk}}{3} \right) - B_{\text{eta}} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) k - G_{\text{ama}} \left( D_{ij} - d_{ij} \frac{P_{kk}}{3} \right); \quad (10)$$

$$D_{ij} = - \left( \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right); \quad (11)$$

$$A_{\text{lfa}} = \frac{C_2 + 8}{11}, \quad B_{\text{eta}} = \frac{8C_2 - 2}{11}, \quad G_{\text{ama}} = \frac{30C_2 - 2}{55}. \quad (12)$$

SSG modelis leidžia apskaičiuoti pilnų slėgio įtempimų (complete pressure-strain) narius:

$$R_{ij} = -(C_1 \varepsilon + C_{1s} P_{kk}) b_{ij} + C_2 \varepsilon \left( b_{ik} b_{ij} - b_{mn} \frac{d_{ij}}{3} \right) + \left[ C_3 - C_{3c} (b_{mn} b_{mn})^{0.5} \right] k S_{ij} + C_4 k \left( b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - 2 b_{mn} S_{mn} \frac{d_{ij}}{3} \right) + C_5 k (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}); \quad (13)$$

čia  $b_{ij}$ ,  $S_{ij}$  ir  $W_{ij}$  – atitinkamai Reinoldso įtempimų neizotropija, įtempimo vidutinis dydis ir vidutinis sukūringumo tenzorius:

$$b_{ij} = 0,5 u_i \frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{d_{ij}}{3}; \quad S_{ij} = 0,5 \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right); \quad W_{ij} = 0,5 \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (14)$$

Šis modelis duoda Reinoldso įtempimų kvadratai ir nereikalauja jokių sienelės atspindžio (wall-reflection) narių.

**Sienelės atspindžio nariai.** *IP*, *IPY* ir *QI* slėgio įtempimų modeliai neleidžia sienelės atspindėtoms slėgio pulsacijoms veikti įtempimų perskirstymą. Priesieneliniam turbulentumui šis efektas reiškia normalinių sienelės greičio pulsacijų lygiui per didelį gesinimą, tuo tarpu lygiagrečios vidutiniam srautui reliatyviai didina laisvos šlyties srautą. Šis efektas, vadinamas sienelės atspindžio (wall-reflection) efektu, įvertinamas pridendant sienelės koregavimo narius slėgio įtempimų modelyje [11]:

$$R_{ij1w} = C_{1w} \left( \overline{u_i u_m n_k n_m} d_{ij} - 1,5 \overline{u_k u_i n_k n_j} - 1,5 \overline{u_k u_j n_k n_i} \right) f \frac{\varepsilon}{k}; \quad (15)$$

$$R_{ij2w} = C_{2w} \left( R_{km2} n_k n_m d_{ij} - 1,5 R_{ij2} n_k n_j - 1,5 R_{kj2} n_k n_i \right) f; \quad (16)$$

čia  $C_{1w}$  ir  $C_{2w}$  – empirinės konstantos,  $n_k$  – vienietinis vektorius, normalinis sienelės,  $f$  – sienelės slopinimo (wall-damping) funkcija, kuri yra tokia:

$$f = \frac{C_w L}{X_n}; \quad (17)$$

čia  $X_n$  – atstumas nuo sienelės pagal normalę;  $C_w = (X_n/L)$  tinklo taškas prie sienelės;  $L$  – turbulento ilgio skalė:

$$L = \frac{C_D k^{1.5}}{\varepsilon}; \quad (18)$$

čia  $C_D$  – empirinė konstanta.  $C_w$  reikšmė parenkama taip, kad  $f$  yra vienetas esant priesieneliniam turbulentumui.

**Disipacijos dydžio lygtis.** Turbulentinės energijos disipacijos dydis skaičiuojamas iš tokios lygties:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon U_i)}{\partial x_i} = \text{Diff}(\varepsilon) + \rho (0,5 C_{1e} P_{kk} - C_{2e} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}; \quad (19)$$

čia  $\text{Diff}(\varepsilon)$  reiškia difuzinį pernešimą, modeliuojama taip:

$$\text{Diff}(\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( C_\varepsilon \rho \overline{u_k u_k} \left( \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right); \quad (20)$$

$C_\varepsilon$ ,  $C_{1e}$  ir  $C_{2e}$  – empirinės konstantos.

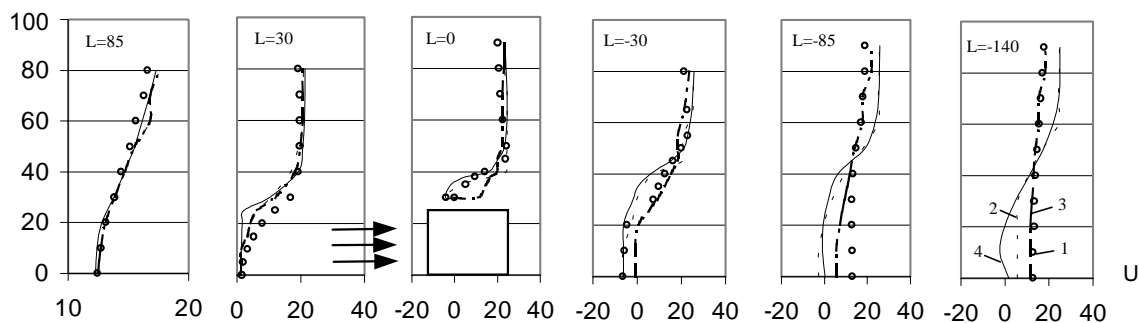
**Empirinės konstantos.** RSTM modelio empirinės konstantos priklausomai nuo naudojamo slėgio įtempimų modelio pateiktos lentelėje.

Lentelė. Empirinės konstantos				
	IPM	IPY	QIM	SSG
$C_{EP}$	0,18	0,15	0,15	0,183
$C_{1E}$	1,45	1,40	1,44	1,44
$C_{2E}$	1,90	1,80	1,90	1,83
$C_s$	0,22	0,22	0,21	0,21
$C_1$	1,80	3,00	1,50	3,40
$C_2$	0,60	0,30	0,40	4,20
$C_{1w}$	0,50	0,75	0,50	–
$C_{2w}$	0,30	0,50	0,06	–
$C_{1s}$	–	–	–	1,80
$C_3$	–	–	–	0,80
$C_{3s}$	–	–	–	1,30
$C_4$	–	–	–	1,25
$C_5$	–	–	–	0,40

Empirinė konstanta  $C_D = (C_\mu C_D)^{0.75}$ , čia  $C_\mu C_D = 0,065$ .

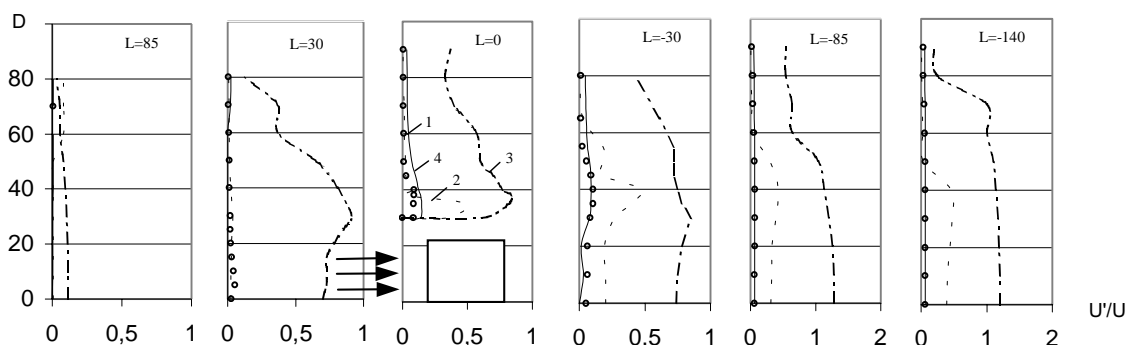
## 2. SKAIČIAVIMO REZULTATAI IR ANALIZĖ

Analitiniai vidutinio greičio profiliai (1 pav.) rodo blogesnę skaičiavimo rezultatų, gautų naudojant RSTM modelį, sutapimą su eksperimentiniais, negu  $k$ - $\varepsilon$  ir LKE modelių atveju. Naudojant  $k$ - $\varepsilon$  modelį gaunamas geresnis sutapimas prieš aptekamą kūną ir ant srautui lygiagrečių kūno plokštumų, pėdsake rezultatai blogi. Skaitiniai vidutinio greičio profiliai prieš prizmę, naudojant šiuos tris turbulento modelius, tarpusavyje mažai skiriasi. Recirkuliacinis burbulas ant šoninės prizmės sienos modeliuojamas tik tada, kai naudojamas mažų  $Re$   $k$ - $\varepsilon$  modelis. Pėdsake gauti teoriniai rezultatai, geriau sutampantys su eksperimentiniais naudojant LKE modelį. LKE modelis, naudojamas visose kūno aptekėjimo srityse, turi



1 pav. Vidutinių srauto greičių profiliai kanale aptekant kūną. 1 – eksperimentiniai [13], 2, 3, 4 – skaičiuoti naudojant modelius  $k-\epsilon$ , LKE ir RSTM.

( $L - x$  kryptis, teigiami atstumai mm prieš prizmę iki jos centro, neigiami – už prizmės;  $D$  – atstumai  $y$  kryptimi nuo prizmės centro)



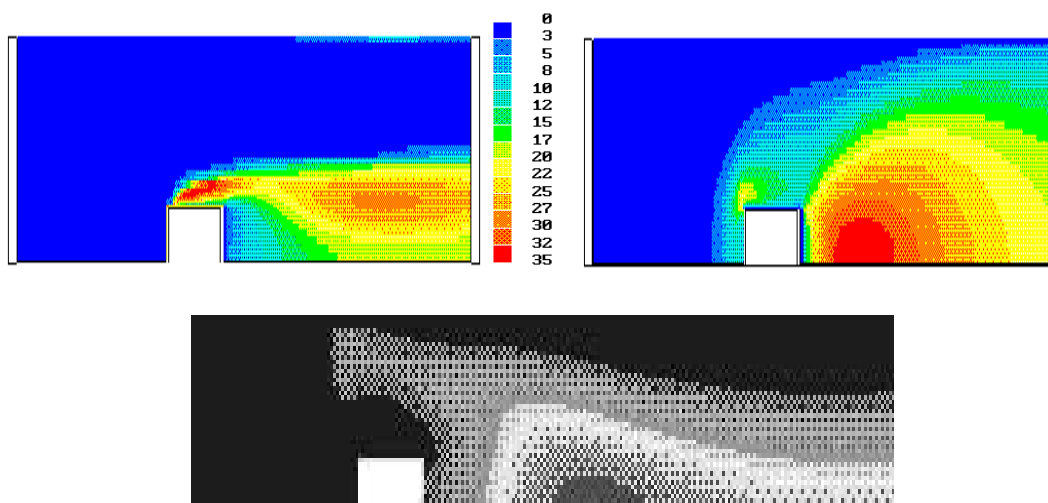
2 pav. Srauto turbulencijos profiliai kanale aptekant kūną. 1 – eksperimentiniai [13], 2, 3, 4 – skaičiuoti naudojant modelius  $k-\epsilon$ , LKE ir RSTM (kiti pažymėjimai 1 pav.)

vieną trūkumą – jis išeliminuoja atitrūkstantį burbulą, susiformuojantį nuo prizmės priekinės paviršiaus briaunos.

2 pav. parodyti turbulencijos kinetinės energijos eksperimentiniai bei skaičiavimo rezultatai, gauti  $k-\epsilon$ , LKE ir RSTM modeliais. Pastebima, kad LKE mode-

liu gautas turbulencijos lygis, negu turbulencijos, gautas  $k-\epsilon$  ir RSTM modeliais. Kinetinės energijos kitimas apie kūno paviršius (3 pav.) skaičiuojant  $k-\epsilon$ , LKE ir RSTM modeliais yra skirtingas.

Visais trimis skaičiavimo atvejais  $k_{\max}$  pasiekiamas kūno pėdsake:  $a$  atveju – ant simetrijos ašies,  $b$



3 pav. Kinetinės srauto energijos pasiskirstymas apie kūno paviršius.  $a - k-\epsilon$  modelis,  $b - LKE$  modelis,  $c - RSTM$  modelis

atveju –  $\frac{1}{2}$  prizmės aukščio,  $c$  atveju – 1,5 prizmės aukščio. Visais skaičiavimo atvejais  $k$  mažėja artėjant srautui prie kanalo sienelės, nes išaugusi trintis duoda didelį srauto greičio gradientą, o tai turi įtaką turbulencijos sumažėjimui. Skaitiniai turbulencijos rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais, kai naudotas RSTM modelis, o teoriniai vidutinių charakteristikų rezultatai – naudojant LKE modelį [14].

Iš mūsų atliktų ankstesnių skaičiavimo rezultatų buvo matyti, kad atitrūkstamiems tekėjimams ant lygiagrečių srautui plokštumų tinkamesnis mažų  $Re$   $k$ - $\epsilon$  modelio variantas, kurio dėka modeliuojami realistiškesni teoriniai profiliai, tačiau pėdsake gaunamas per žemas turbulencijos lygis. Taigi galima padaryti išvadą, kad turbulencijos skaičiavimams recirkuliacinių aptekėjimų atveju reikėtų naudoti mažų  $Re$   $k$ - $\epsilon$  modelio variantą ir LKE modelio kombinaciją, arba naudoti RSTM modelį.

### 3. IŠVADOS

1. Turbulencijos skaičiavimo rezultatai, naudojant tris turbulencijos modelius, parodė, kad skaitiniai rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais, kai naudoti  $k$ - $\epsilon$  ir RSTM modeliai, o teoriniai rezultatai, gauti naudojant LKE modelį, beveik visur, išskyrus artėjimą prie kanalo sienos, padidėję.

2. Skaitiniai vidutinio greičio profiliai prieš prizmę, naudojant tris turbulencijos modelius, tarpusavyje mažai skiriasi. Recirkuliacinis burbulas ant šoninės prizmės sienos modeliuojamas tik tada, kai naudojamas  $k$ - $\epsilon$  modelis. Pėdsake teoriniai rezultatai, geriau sutampantys su eksperimentiniais, gauti naudojant LKE modelį.

3. Skaitinio modeliavimo būdu gautų rezultatų analizė ir palyginimas su eksperimentiniais parodė priimtina sutapimą ir kartu naudoto matematinio modelio tinkamumą sudėtingų recirkuliacinių turbulencijos tekėjimų vidutiniams parametrų skaičiuoti, tuo tarpu nestacionarių tekėjimų srityje šio modelio galimybės yra ribotos, o tai skatina toliau tobulinti matematinį modelį.

Gauta  
2001 07 26

### Literatūra

1. Vaitiekūnas P., Markevičius A., Petkevičienė E. Study of a turbulent transverse flow of air over a square prism // The PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics & its applications. 1999. Vol. 12, N 1. P. 042–048.

2. Launder B. E., Reece G. J., Rodi W. Progress in the development of a Reynolds stress turbulence closure // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 68. P. 537.
3. Launder B. E. Second-moment closure: present and future? // Int. J. Heat Fluid Flow. 1989. Vol. 10, No. 4. P. 282.
4. Launder B. E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows // Int. J. Num. Methods in Fluids. 1989. Vol. 9. P. 963.
5. Leschziner M. A. Modelling engineering flows with Reynolds stress turbulence closure // J. Wind Engng & Industrial Aerodynamics. 1990. Vol. 35. P. 21.
6. Gibson M. M., Launder B. E. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer // J. Fluid Mech. 1978. Vol. 86. P. 491.
7. Gibson M. M., Younis B. A. Calculation of swirling jet with a Reynolds stress closure // Physics Fluids. 1986. Vol. 29. P. 38.
8. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flow. Comp. Math. // Appl. Mech. & Engng. 1974. Vol. 3. P. 259.
9. Daley B. J., Harlow F. H. Transport equations of turbulence // Phys. Fluids. 1970. Vol. 13. P. 2634.
10. Malin M. R., Younis B. A. Calculation of turbulent buoyant plumes with a Reynolds stress and heat flux transport closure // Int. J. Heat Mass Transfer. 1990. Vol. 33, No. 10. P. 2247.
11. Rodi W. Turbulence models and their application in hydraulics – A state of the art review // IAHR Book Publication. Delft, The Netherlands, 1980.
12. Speziale C. G., Sarkar S., Gatski T. B. Modelling of pressure-strain correlation of turbulence; an invariant dynamical systems approach // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 227. P. 245.
13. Katinas V., Markevičius A., Vaitiekūnas P., Kulvietis S. Sūkurių procesų charakteristikų tyrimas universalių debito matuoklių kūrime. Lietuvos energetikos institutas. Kaunas, 1994. 134 p.
14. Spalding D. B. PHOENICS 3.2 VR // CHAM Ltd. London, 1999.

Andrius Kavaliauskas, Petras Vaitiekūnas

### MODELLING OF REYNOLDS STRESSES IN OVERFLOWING AIR STREAM IN A SQUARE CHANNEL

S u m m a r y

A method of the computation of turbulent recirculating flows on a cartesian coordinate system using the PHOENICS 3.2 package is presented. Computations are performed using a set of two-dimensional Reynolds equations with standard  $k$ - $\epsilon$ , LKE and RSTM models of turbulence. Theoretical results of air cross flow over body in a square channel are compared with experimental data and show a reasonable coincidence: using the  $k$ - $\epsilon$  model and RSTM, theoretical results of mean velocity are better up to back side of the prism, and using the LKE model they are better in the wake; RSTM gives a better prediction for the turbulence.

**Key words:** numerical simulation, Reynolds stresses, turbulence, computational fluid dynamics

Андрюс Каваляускас, Пятрас Вайтекунас

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ  
РЕЙНОЛЬДСА ПРИ ОБТЕКАНИИ  
ПРЕПЯТСТВИЯ ПОТОКОМ ВОЗДУХА В  
КВАДРАТНОМ КАНАЛЕ**

**Резюме**

В работе было выполнено математическое моделирование турбулентности потока воздуха при обтекании препятствия в квадратном канале.

При численном моделировании использован пакет программ PHOENICS 3.2. Двухмерные уравнения Рейнольдса со стандартной  $k$ - $\epsilon$ , LKE и RSTM моделями турбулентности решены известным методом конечных

объемов, использованы Декартовы координаты. Особенно широко проанализирована модель RSTM, в которой непосредственно рассчитываются не только напряжения Рейнольдса, но и члены неизотропности турбулентности. Сравнение численных результатов с соответствующими экспериментальными данными показало удовлетворительное их совпадение. Данная анализируемая модель наиболее подходит для вычисления средних параметров в сложных рециркуляционных турбулентных потоках, в то время как для нестационарных потоков возможности этой модели условно ограничены и требуют дальнейшего усовершенствования.

**Ключевые слова:** численное моделирование, напряжения Рейнольдса, неизотропность, турбулентность