

Skaitinis tekėjimo greičio ir sienelės temperatūros kitimo modeliavimas horizontaliame plokščiame kanale esant termogravitacijos jėgų poveikiui

Robertas Poškas²,

Andrius Gediminskas¹,

Renoldas Zujus¹

¹ Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos
problemų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas

² Kauno technologijos universitetas,
Mechanikos ir mechatronikos fakultetas,
Šilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
El. paštas: r.poskas@mail.lei.lt

Mišrios konvekcijos tyrimų kanaluose pereinamojo tekėjimo zonoje nėra daug, o čia vykstantys procesai nėra visiškai supraciuoti. Šiame straipsnyje pateikiamas mišrios konvekcijos skaitinis tyrimas horizontaliame plokščiame kanale, pereinamojo tekėjimo zonoje, leidžia iš dalies užpildyti šią spragą. Skaitinis stacionarus 2D oro tekėjimo modeliavimas atliktas ANSYS FLUENT programa naudojant pereinamojo tekėjimo kkl- ω , SST ir Re įtempimų- ω modelius. Tyrimo rezultatai rodo, kad analizuotuose Re ir Gr_q parametrų ribose horizontaliame plokščiame kanale nėra sukurinio tekėjimo. Skaitinio modeliavimo rezultatai buvo lyginami su tokiomis pačiomis sąlygomis atliktų eksperimentų rezultatais. Išsiaiškinta, kad veikiant didelei termogravitacijos jėgai geriausias eksperimentinių duomenų sutapimas gaunamas naudojant kkl- ω pereinamojo tekėjimo modelį.

Raktažodžiai: skaitinis modeliavimas, horizontalus plokščias kanalas, mišri konvekcija, pereinamojo tekėjimo zona

ĮVADAS

Mišrios konvekcijos tyrimai (natūralios ir priverstinės konvekcijų sąveika) įvairių skerspjūvių ir orientacijų kanaluose yra svarbūs branduolinės energijos technologijai, šilumokaičiams, elektroninėms aušinimo sistemoms, saulės energijos sistemoms ir t. t.

Tankio stratifikacija arba fluideo temperatūros pasiskirstymas pagal kanalo aukštį, lemiantis tekėjimo pusiausvyros sąlygas, kurios padeda arba priešinasi vertikalių skysčių poslinkių vystimuisi, turi nemažai įtakos šilumos mainams ir turbulentiniam judėjimui horizontaliuose kanaluose. Horizontaliuose kanaluose pasireiškia dviejų tipų tankio stratifikacija: stabili fluideo tankio stratifikacija (šiltesnė viršutinė sienelė), dėl kurios sumažėja vertikalus judėjimas (sumažėja turbulentinis impulso pernešimas ir greičio pulsacijos, greičio profilis supanašėja su laminariniu tekėjimo profiliu, va-

dinasi, taip pat sumažėja ir šilumos mainai) ir nestabili tankio stratifikacija (šiltesnė apatinė sienelė), kuri padeda arba sustiprina aukštyn nukreiptą tokiosios medžiagos judėjimą, dėl ko padidėja šilumos mainai konvekcija. Nestabili stratifikacija papildomai turbulizuoja srautą dėl termogravitacijos jėgų poveikio kylant lengvesnėms oro dalelėms į viršų. Dėl to suintensyvoja turbulentinis impulso ir šilumos pernešimas.

Turbulentinės mišrios konvekcijos srauto struktūros ir šilumos mainų tyrimai horizontaliame plokščiame kanale buvo atlikti [1]. Pasiūlyta šilumos mainų skaičiavimui apibendrinanti priklausomybė.

Lietuvos energetikos institute (LEI) buvo atlikti mišrios konvekcijos šilumos mainų eksperimentiniai tyrimai plokščiame kanale stabilios ir nestabilios oro tankio stratifikacijų atveju, plačiame charakteringų parametrų diapazone [2]. Palyginti su neutralia stratifikacija, stabilios stratifikacijos atveju stebimas šilumos atidavimo sumažėjimas. Pasiūlyta

apibendrinanti priklausomybė šilumos mainų skaičiavimui. Nestabilios tankio stratifikacijos atveju nustatyta, kad šilumos mainai dėl termogravitacijos jėgos įtakos kinta vienodai dvipusio ir vienpusio kaitinimo atveju, tačiau palyginti su neutralia stratifikacija, šilumos atidavimas yra daug didesnis.

Šilumos mainų tyrimų pereinamojo (iš laminario į turbulentinį) tekėjimo zonoje, kai veikia termogravitacijos jėgos (mišri konvekcija), atlikta dar mažiau.

Darbe [3] buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai, analizuojantys termogravitacijos jėgos įtaką ir įtekėjimo sąlygas pereinamojo tekėjimo zonoje visiškai susiformavusio oro tekėjimo srautui kaitinamame horizontaliame vamzdyje su vienodu sienelių šiluminiu srautu. Siekiant iširti įtekančio srauto sąlygų poveikį pereinamojo tekėjimo zoniui buvo naudojami du skirtingi greičio pulsacijų intensyvumai – 1,2 % ir 40 %. Nustatytas kritinis Reinoldso skaičius, kai buvo stebimos turbulentinės pulsacijos. Mažo įtekėjimo pulsacijų intensyvumo (1,2 %) atveju kritinis Reinoldso skaičius buvo 4 600, o didelio (40 %) įtekėjimo pulsacijų intensyvumo atveju – 2 100. Taip pat nustatyta, kad esant Reinoldso skaičiui mažesniau nei 1 900, tekėjimas yra visiškai stacionarus ir laminarinis esant abiem tekėjimo sąlygoms (1,2 ir 40 %). Nedideli temperatūros svyravimai atsiranda, kai Re yra apie 1 900, bet tik ties greičio maksimumu. Kai $Re = 2 230$, pereinamasis tekėjimas tampa chaotišku.

Etileno glikolio vandens mišinių, tekančių horizontaliame žiediniame kanale, vietinių šilumos mainų charakteristikos buvo nustatytos [4] eksperimentuojant Reinoldso skaičių 1 500–27 000 diapazone. Buvo palaikomos vienodo šiluminio srauto ant sienelės kaitinimo sąlygos. Pastebėta, kad vietinio šilumos atidavimo koeficiento kitimas pagal kanalo ilgį pereinamojo tekėjimo ir turbulentinio tekėjimo atvejais yra labai neįprastas. Tekėjimas pasienio sluoksnyje pagal vamzdžio sienelę iš pradžių būna laminarinis, o po to pasidaro turbulentinis, kas lemia esminį $Nu = f(x/d)$ sumažėjimą. Didėjant Reinoldso skaičiui, šio sumažėjimo zona mažėja. Tačiau pereinamojo tekėjimo atveju šio sumažėjimo zona yra daug didesnė nei turbulentinio tekėjimo atveju.

Darbe [5] teigiama, kad Nu skaičius didėja pagal x/d dėl perėjimo iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį.

Vietinis šilumos pernešimas ($q_w = \text{const}$) šilumokaičiuose (išilgai 6 100 mm ilgio horizontalaus žiedinio kanalo) buvo analizuotas [6]. Reinoldso skaičius kito nuo 790 iki 49 940. Atliekant eksperimentus darbo agentas buvo arba distiliuotas vanduo, arba etileno glikolio ir distiliuoto vandens mišinys; tai lėmė Prandtlio skaičiaus diapazoną (apytiksliai nuo 4 iki 100). Atlikus analizę paaiškėjo, kad, jei tekėjimas tampa pereinamuoju (iš laminarinio į turbulentinį), sukurti normaliai veikiančią pramoninį šilumokaitį yra sudėtinga.

Darbe [7] buvo atlikta daug DNS modeliavimų horizontaliame kanale esant turbulentiniam ($Re = 4 349$ – $6 060$) tekėjimui bei stabiliai tankio stratifikacijai. Pastebėta, kad didėjant stratifikacijos laipsniui tekėjimas prie vienos sie-

nelės tampa laminariniu, tačiau prie kitos išlieka turbulentinis. Gautas Nu skaičiaus sumažėjimas stabilios stratifikacijos atveju. Be to, skaitinių tyrimų rezultatai sutapo su eksperimentiniais duomenimis.

Šiame straipsnyje pateikiami skaitinių tyrimų rezultatai horizontaliame plokščiame kanale esant mišriai konvekcijai pereinamojo tekėjimo zonoje, kai $Re_{in} = 3 700$ – $5 200$, o $Gr_{q_{in}}/Re_{in} = 9,9 \cdot 10^4$ – $4,3 \cdot 10^5$.

PAGRINDINĖS LYGTYS IR SKAITINIS METODAS

Atlikti dvimačiai (2D) mišrios konvekcijos skaitiniai tyrimai horizontaliame plokščiame kanale (kanalo aukštis 0,0408 m, ilgis – 6 m, hidrodinaminis nekaitinamas ilgis – 2,5 m, kaitinamas (kalorimetras) ilgis – 3,5 m) su dvipusiu simetrišku kaitinimu ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$) esant stacionariam oro tekėjimui. Modeliavimas atliktas naudojant Ansys Fluent programą tokia pačia kanale ir tokio pat sąlygomis, kaip ir eksperimentuose.

Ansys Fluent programa yra šiuolaikinė skaitinė taktųjų medžiagų dinamikos programa, naudojama modeliuoti taktųjų medžiagų judėjimą ir šilumos mainus sudėtingose dvimatėse arba trimatėse sistemose [8]. Programa naudojama spręsti pagrindines tekėjimo ir energijos lygtis. Tokiu atveju naudojamas kontrolinių tūrių metodas, paremtas analizuojamo objekto padalijimu į pavienius kontrolės tūrius naudojant skaičiavimo tinklėlį (kuris tuo pat metu apibūdina ir analizuojamo objekto (kanalo) geometriją).

Šilumos mainus ir tėkmės charakteristikas plokščiame kanale aprašo nepertraukiamumo (1), judesio (2, 3) ir energijos (4) diferencialinių lygčių sistema.

Tėkmės nepertraukiamumo lygtis:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Judesio lygtys greičio komponentėms (u_x, u_y):

$$\rho u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right); \quad (2)$$

$$\rho u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right) - \rho g. \quad (3)$$

Energijos lygtis:

$$\rho u_x \frac{\partial i}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial i}{\partial y} \right). \quad (4)$$

Šiuose tyrimuose buvo naudojami trys pereinamojo tekėjimo modeliai – kkl- ω , SST (Menter-Langtry modelis) ir Re įtempimų- ω .

kkl- ω pereinamojo tekėjimo modelio atveju [9] naudojamas trijų lygčių sukurinio-klampaus (eddy-viscosity) tipo modelis, kuris apima turbulentinės kinetinės energijos (k_T) pernešimo lygtis, laminarinės kinetinės energijos (k_L) ir savitojo disipacijos greičio (ω) lygtis.

SST pereinamojo tekėjimo modelis [10] remiasi k- ω SST modelio lygtimis [11], kurios sprendžiamos kartu su turbulentinės kaitos (γ) ir užduoto perėjimo kriterijaus (transition onset criteria) lygtimis, priklausomai nuo Reynolds skaičiaus, apsprendžiamo pagal impulso netekimo storį.

Re įtempimų- ω pereinamojo tekėjimo modelis yra Re įtempimų pernešimo modelis, kuris remiasi k- ω lygtimis [12] ir trimis Re įtempimų lygtimis, kurios pagrįstos LRR modeliu (Launder, Reece ir Rodi modelis [13]).

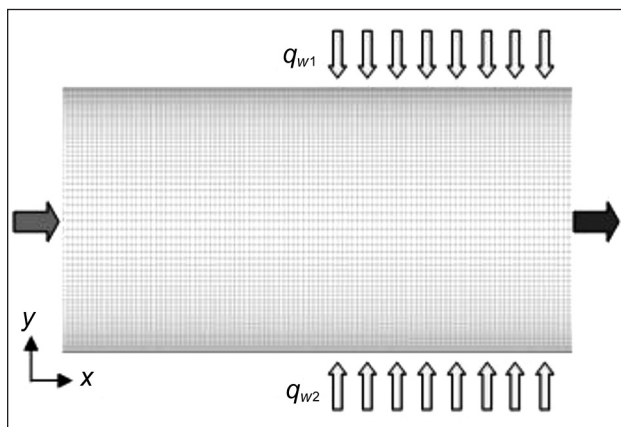
Pagrindinės tėkmės lygtys sprendžiamos esant tokioms ribinėms sąlygoms:

- Įtekėjime į eksperimentinį ruožą ($x_{in} = 0$): oro išilginis greitis (u_x) yra lygus įtekėjimo greičiui (u_{in}), skersinis greitis (u_y) yra lygus 0. Oro entalpija (i) įtekėjime į eksperimentinio ruožo kalorimetrinę dalį ($x = 0$) yra lygi įtekėjimo entalpijai (i_{in}).
- Ant kanalo vienos ($y = 0$) ir kitos ($y = h$) sienelių išilginis (u_x) ir skersinis (u_y) greičiai yra lygūs 0. Šilumos srauto tankis ant sienelių (kalorimetrinėje dalyje)

$$q_w \approx \text{const.}$$

Šiame darbe, remiantis tinklelio jautrumo analize [14], buvo naudojamas $N_y \times N_x = 80 \times 7500$ tinklelis (1 pav.). Pirmasis naudoto tinklelio mazgas (arba „nodas“) buvo netoli sienelės ($y^+ \leq 0,2$). Ne mažiau 10 mazgų buvo klampiam pasluksnyje ($0 < y^+ < 5$) ir ne mažiau 15 mazgų – buferiniame sluksnyje ($5 < y^+ < 30$).

Skaitinis modeliavimas atliktas esant skirtingiems oro slėgiams ($p = 0,2$ ir $0,4$ MPa) prie įvairių Re ir Gr skaičių (1 lentelė).



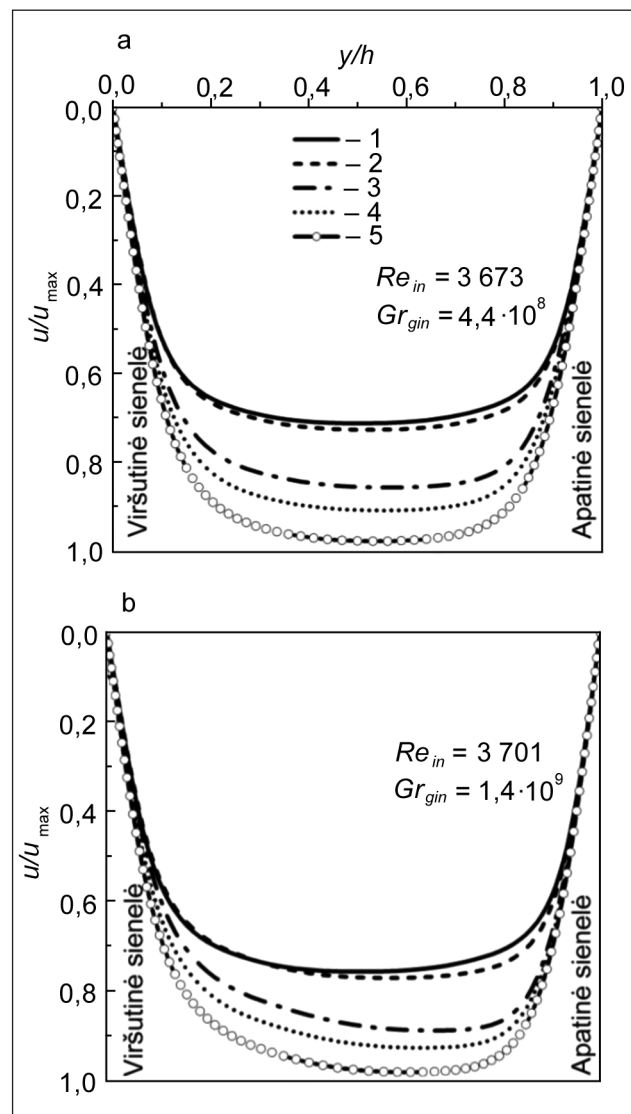
1 pav. Modeliavimo sritis ir dalinis tinklelio vaizdas

1 lentelė. Analizuoti atvejai

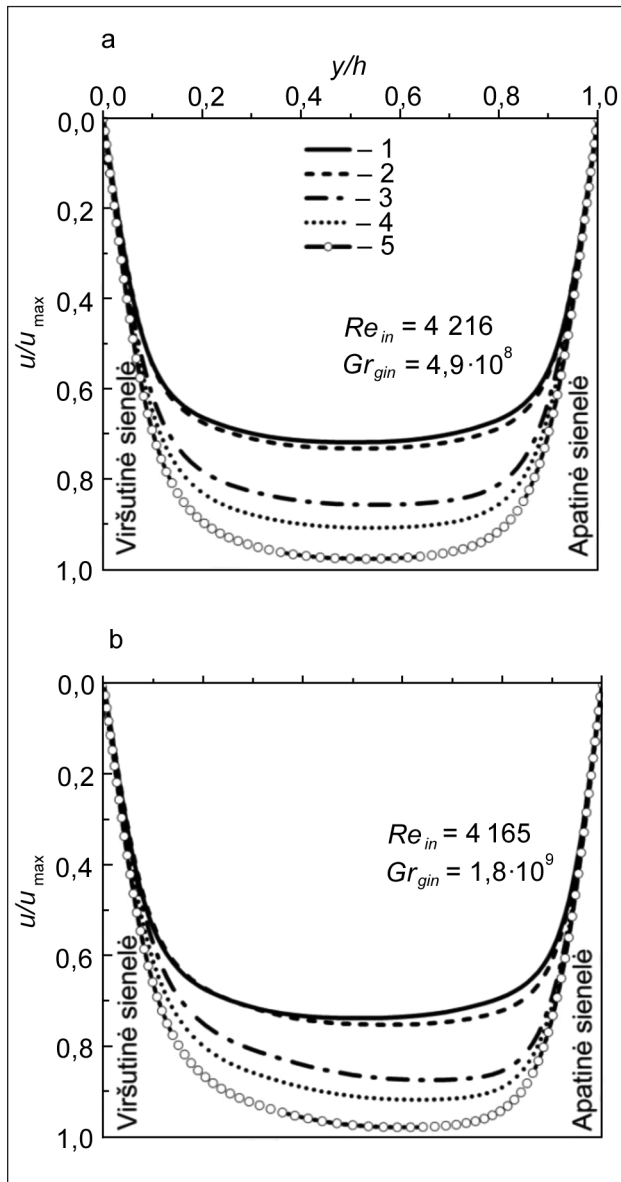
Nr.	Re_{in}	Gr_{gin}	p , MPa
1.	3 673	$4,4 \cdot 10^8$	0,2
2.	4 216	$4,9 \cdot 10^8$	0,2
3.	5 316	$5,3 \cdot 10^8$	0,2
4.	3 701	$1,4 \cdot 10^9$	0,4
5.	4 165	$1,8 \cdot 10^9$	0,4
6.	5 212	$1,6 \cdot 10^9$	0,4

REZULTATŲ APTARIMAS

Analizuojant oro tekėjimą (greičių profilius) kanale kkl- ω modelio rezultatams buvo pasirinktos trys skirtingos Re grupės. Kiekvienoje grupėje buvo lyginami panašūs Re , kurių Gr skirtingas, ir tuo pagrindu buvo analizuojama termogravitacijos jėgų įtaka. 2 pav. pateikti du režimai,



2 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai $Re_{in} \approx 3700$. a) $Gr_{gin}/Re_{in} = 1,2 \cdot 10^5$; b) $Gr_{gin}/Re_{in} = 3,8 \cdot 10^5$; 1 - $x/d_e = 1,9$; 2 - $x/d_e = 3,9$; 3 - $x/d_e = 22,3$; 4 - $x/d_e = 30,4$; 5 - $x/d_e = 42$

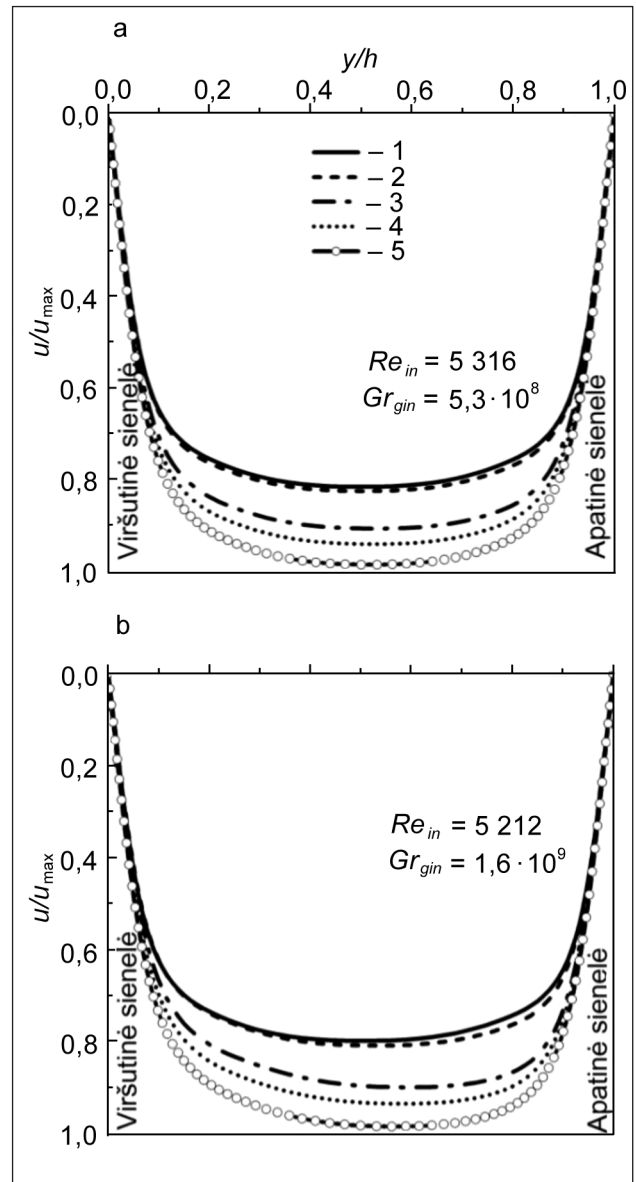


3 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai $Re_{in} \approx 4\,200$. a) $Gr_{gin}/Re_{in} = 1,2 \cdot 10^5$; b) $Gr_{gin}/Re_{in} = 4,3 \cdot 10^5$; $1 - x/d_e = 1,9$; $2 - x/d_e = 3,9$; $3 - x/d_e = 22,3$; $4 - x/d_e = 30,4$; $5 - x/d_e = 42$

kurių Re skaičiai panašūs – 3 673 ir 3 701, o Gr skaičiai skiriasi. 2a pav. (mažesni Gr) ir 2b pav. (didesni Gr) matoma greičio profilių asimetrija (2a pav. asimetrija gana nedidelė), kuri didėja artėjant prie stabilizuoto šilumos atidavimo zonos ($x/d_e = 42$). Didesnis greitis stebimas prie nestabilios stratifikacijos veikiamos kaitinamo kanalo apatinės sienelės.

Kai Re didesni, 4 216 ir 4 165 (3 pav.), greičio profiliai panašūs kaip ir ankstesniu atveju, t. y. jie simetriški tik pačioje kaitinamo kanalo pradžioje ($x/d_e = 1,9$). Asimetriškumas didėja kartu su x/d_e ir stabilizuoto šilumos atidavimo zonoje ($x/d_e = 42$) yra didžiausias.

Kai Re didžiausi, 5 316 ir 5 212 (4 pav.), greičio profilių asimetriškumas ne toks ryškus, palyginti su mažesniais Re .

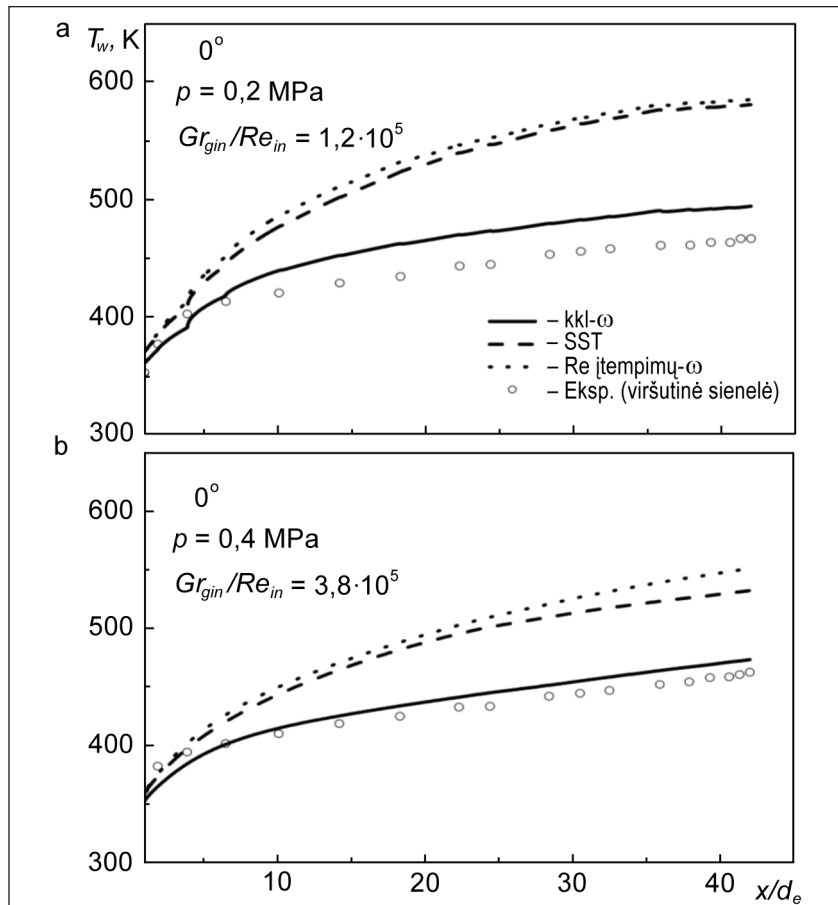


4 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai $Re_{in} \approx 5\,200$. a) $Gr_{gin}/Re_{in} = 9,9 \cdot 10^4$; b) $Gr_{gin}/Re_{in} = 3,1 \cdot 10^5$; $1 - x/d_e = 1,9$; $2 - x/d_e = 3,9$; $3 - x/d_e = 22,3$; $4 - x/d_e = 30,4$; $5 - x/d_e = 42$

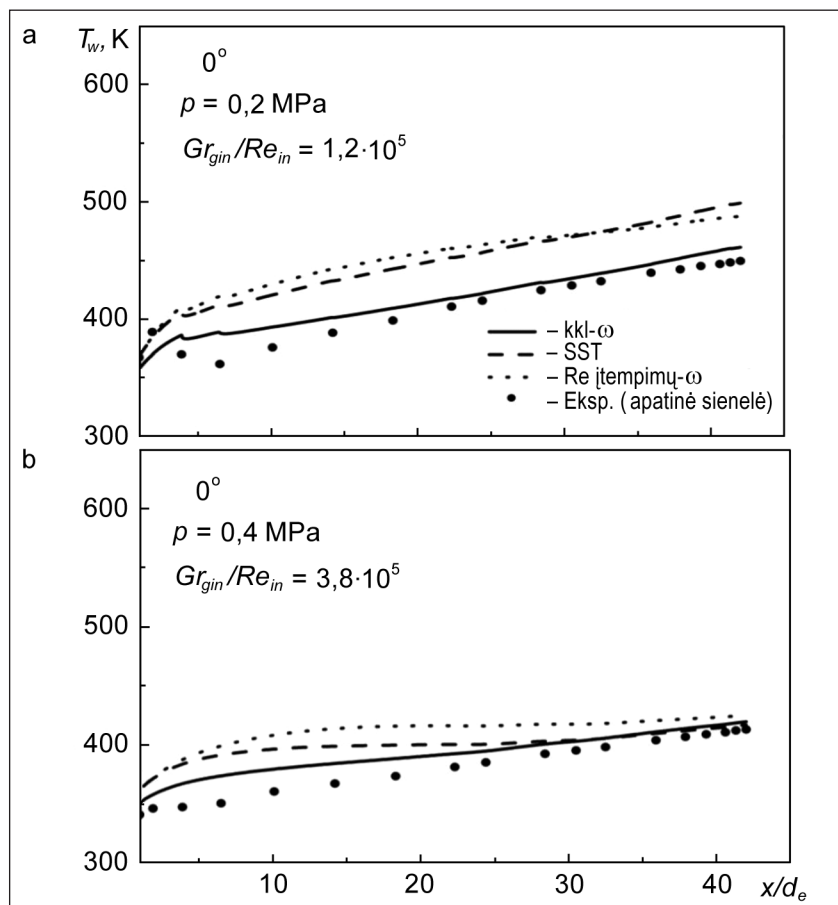
Taigi, greičio profilių analizė įvairiuose kanalų skerspjūviuose naudojant kkl- ω turbulentinį pernešimo modelį parodė, kad didesnėje kaitinamos atkarpos dalyje prie visų analizuotų Re skaičių (kai Gr yra didesni, stebimas didesnis asimetriškumas) greičio profiliai yra asimetriški. Tačiau nepastebėta neigiamų greičio profilio verčių, kas galėtų reikšti, kad kanale yra sukurių.

Sienelės temperatūros kitimo pagal kanalo ilgį modeliavimo rezultatų ir eksperimentinių duomenų sulyginimas mažiausių Re atveju pateiktas 5 ir 6 pav. Tiek viršutinės (5a, b pav.), tiek apatinės (6a, b pav.) sienelių atveju gautas gana geras duomenų sutapimas su kkl- ω turbulentinio pernešimo modelio rezultatais, išskyrus stabilios tankio stratifikacijos atvejį (kaitinama viršutinė sienelė) esant

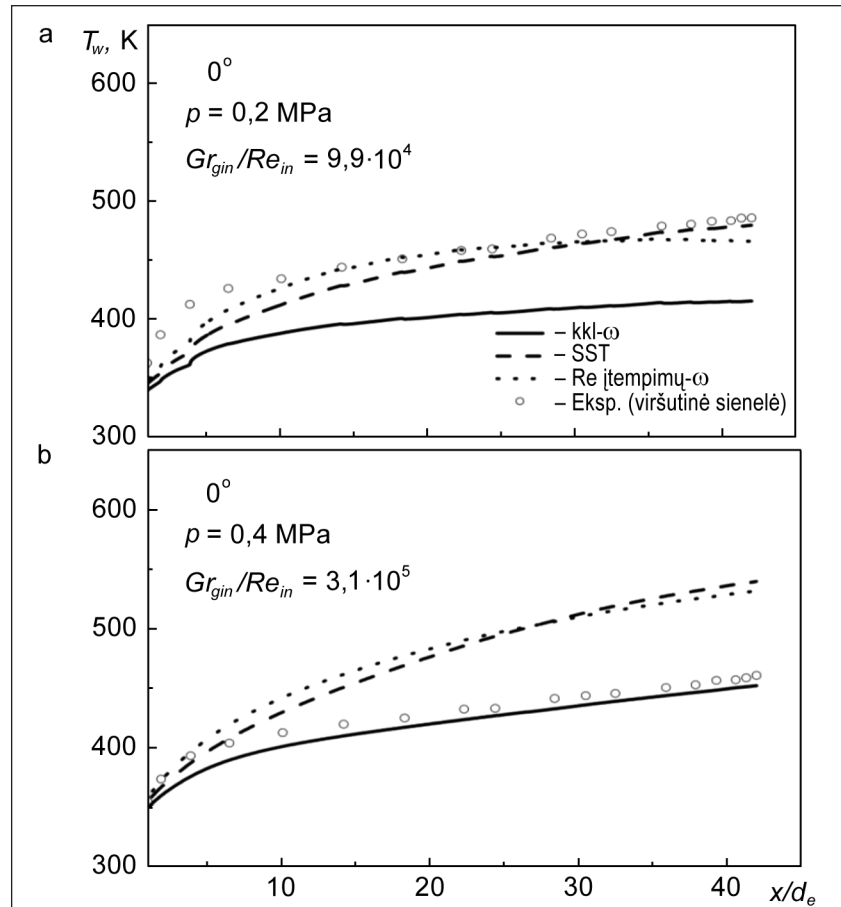
5 pav. Viršutinės sienelės temperatūros kitimo priklausomybė nuo x/d_e naudojant įvairius pereinamojo tekėjimo modelius, kai $Re_{in} \approx 3\,700$. LEI eksperimentiniai duomenys [2]



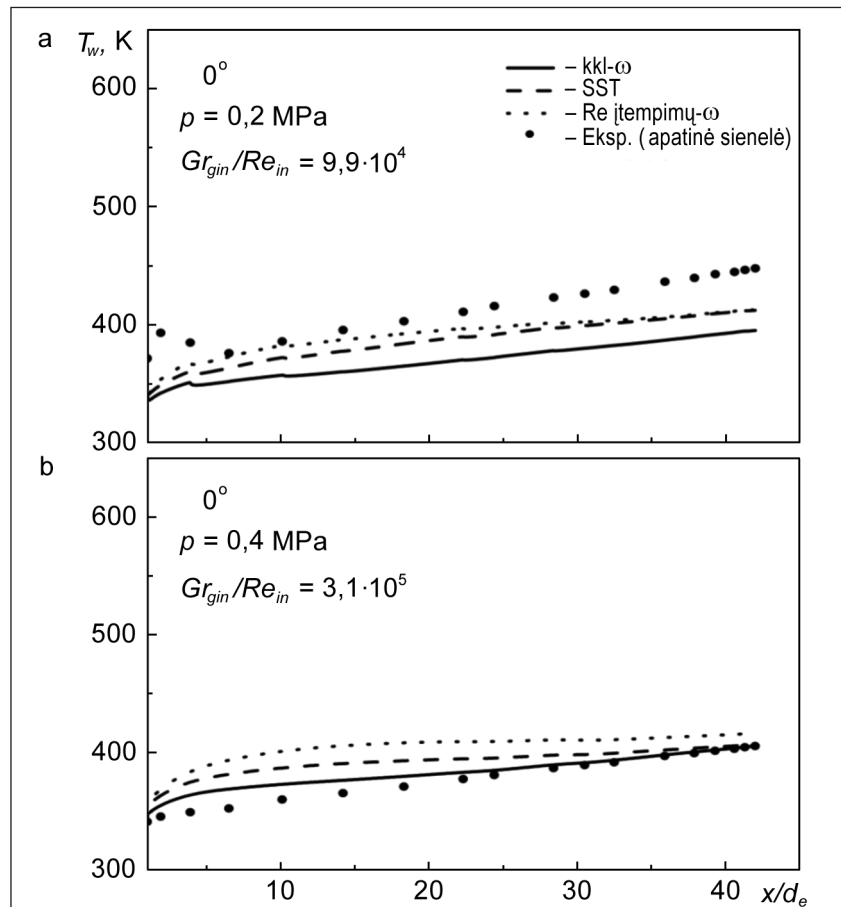
6 pav. Apatinės sienelės temperatūros kitimo priklausomybė nuo x/d_e naudojant įvairius pereinamojo tekėjimo modelius, kai $Re_{in} \approx 3\,700$. LEI eksperimentiniai duomenys [2]



7 pav. Viršutinės sienelės temperatūros kitimo priklausomybė nuo x/d_e naudojant įvairius pereinamojo tekėjimo modelius, kai $Re_m \approx 5\,200$. LEI eksperimentiniai duomenys [2]



8 pav. Apatinės sienelės temperatūros kitimo priklausomybė nuo x/d_e naudojant įvairius pereinamojo tekėjimo modelius, kai $Re_m \approx 5\,200$. LEI eksperimentiniai duomenys [2]



mažesniai Gr , tačiau ir šiuo atveju nuokrypis nuo eksperimentinių duomenų nėra didesnis nei 10 %. Su kitais modeliais gauti prastesni rezultatai.

Prie didžiausio Re ($\approx 5\ 200$) tiek stabilios, tiek nestabilios tankio stratifikacijos atvejais, kkl- ω modelis išlieka geriausias (7b pav., 8b pav.), kai $Gr_{qin}/Re_{in} = 3,1 \cdot 10^5$. Tačiau situacija pasikeičia, kai $Gr_{qin}/Re_{in} = 9,9 \cdot 10^4$ (7a pav. ir 8a pav.) ir pradeda vyrėti priverstinė konvekcija. Tada stabilios ir nestabilios tankio stratifikacijos atvejais geriausias sutapimas su eksperimentiniais duomenimis gaunamas naudojant Re įtempimų- ω ir SST modelius.

IŠVADOS

Atlikus skaitinius mišrios konvekcijos tyrimus pereinamojo tekėjimo zonoje horizontaliame plokščiame kanale, galima daryti tokias išvadas:

1. Tekėjimo analizė įvairiuose kanalo skerspjūviuose naudojant kkl- ω turbulencinio pernešimo modelį parodė, kad didesnėje kaitinamos atkarpos dalyje greičio profiliai yra asimetriški, tačiau kanale sukūriai nesusidaro.

2. Esant didelei termogravitacijos jėgų įtakai, geriausias skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų sutapimas gaunamas, kai naudojamas kkl- ω pereinamojo tekėjimo modelis.

3. Mažesnio termogravitacijos jėgos poveikio ($Gr_{qin}/Re_{in} = 9,9 \cdot 10^4$) atveju, kai priverstinė konvekcija yra vyraujanti, geriausias sutapimas su eksperimentiniais duomenimis gaunamas, kai naudojami Re įtempimų- ω ir SST modeliai.

Žymėjimai

b – kanalo plotis m;
 c_p – savitoji šiluma J/(kg · K);
 d_e^j – kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_e = 2(h \cdot b) / (h + b)$, m;
 g – laisvojo kritimo pagreitis m/s²;
 h – kanalo aukštis m;
 i – entalpija J/kg;
 y^+ – nedimensinis atstumas;
 q – šilumos srauto tankis W/m²;
 p – slėgis MPa;
 T – temperatūra K;
 u – vidutinis masinis tėkmės greitis m/s;
 x – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė) m.

Graikiški žymėjimai

α – šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$, W/(m² · K);
 β – temperatūrinis plėtimosi koeficientas 1/K;

λ – šilumos laidumo koeficientas W/(m · K);
 μ – dinaminės klampos koeficientas Pa · s;
 ν – kinematinės klampos koeficientas m²/s;
 ρ – tankis kg/m³.

Nedimensiniai parametrai

Pr – Prandtlio skaičius $Pr = \mu c_p / \lambda$;
 Gr_q – Grashofio skaičius $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / (\nu^2 \cdot \lambda)$;
 Nu – Nuselto skaičius $Nu = \alpha d_e / \lambda$;
 Re – Reinoldso skaičius $Re = u d_e / \nu$.

Indeksai

1 – pirma sienutė;
 2 – antra sienutė;
 in – įtekėjimas;
 t – turbulentinis;
 w – ant sienelės;
 f – vidutinis masinis.

Gauta 2013 04 02
 Priimta 2013 05 08

Literatūra

1. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. *Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции*. Москва: Наука, 1986. 192 с.
2. Vilemas J., Poškas P., Adomaitis J. E. Turbulent heat transfer in a flat channel with stable and unstable stratification in the flow. *Nuclear Engineering and Design*. 1994. Vol. 149. P. 261–268.
3. Koizumi H. Laminar-turbulent transition behavior of fully developed air flow in a heated horizontal tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 45(5). P. 937–949.
4. Tam L. M., Ghajar A. J. The unusual behavior of local heat transfer coefficient in a circular tube with a bell-mouth inlet. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1998. Vol. 16(3). P. 187–194.
5. Ligrani P. M., Hedlund C. R. Transition to turbulence in curved and straight channels with heat transfer at high dean numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol. 41(12). P. 1739–1748.
6. Ghajar A. J., Tam L., Tam S. C. A new correlation in the transition region for horizontal pipe with a re-entrant inlet-using artificial neural network. *Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference, 2003, published on CD-ROM*.
7. Iida O., Kasagi N., Nagano Y. Direct numerical simulation of turbulent channel flow under stable density stratification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. P. 1693–1703.

8. ANSYS-FLUENT Inc. *FLUENT 12.0 User Documentation*. 2009.
9. Walters D. K., Cokljat D. A three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-averaged Navier-stokes simulations of transitional flows. *Journal of Fluids Engineering*. 2008. Vol. 130.
10. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S. A correlation based transition model using local variables. Part 1. Model formulation. *Journal of Turbomachinery*. 2004. Vol. 128(3). P. 413–422.
11. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32(8). P. 1598–1605.
12. Wilcox D. C. *Turbulence Modelling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries, Inc., 1998.
13. Launder B. E., Reece G. J., Rodi W. Progress in the development of a Reynolds-Stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*. 1975. Vol. 68(3). P. 537–566.
14. Sirvydas A., Poskas R. Numerical investigations of opposing mixed convection heat transfer in vertical flat channel. 1. Laminar mixed convection and transition to vortex flow in case of symmetrical heating. *Heat Transfer Research*. 2010. Vol. 41(5). P. 509–520.

Robertas Poškas, Andrius Gediminskas, Renoldas Zujus

NUMERICAL MODELLING OF FLOW VELOCITY AND WALL TEMPERATURE VARIATION IN A HORIZONTAL FLAT CHANNEL UNDER EFFECT OF BUOYANCY

Summary

Investigations of mixed convection in channels in a transition region are rather limited therefore in this paper we present the numerical study of mixed convection in the horizontal flat channel in the transition region. Numerical 2D steady state simulations in air flow have been performed by Ansys Fluent code using transition $kkl-\omega$, SST and Re stress- ω models. The performed analysis shows that there are no vortexes in the horizontal flat channel in the analyzed Re and Gr_q region. The results of numerical modelling have been compared with the results of experiments performed at the same conditions. It was revealed that under significant effect of buoyancy the best correlation with experimental data was obtained when the $kkl-\omega$ transition model is used.

Key words: numerical simulation, horizontal flat channel, mixed convection, transition region

Робертас Пошкас, Андрюс Гедиминскас, Ренолдас Зуюс

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ

Резюме

Довольно мало исследований смешанной конвекции проведено в зоне ламинарно-турбулентного переходного течения, поэтому в настоящей работе приводятся данные численного исследования в горизонтальном плоском канале в зоне переходного течения при смешанной конвекции. Двухмерное моделирование выполнено при использовании программы Ansys Fluent используя разные модели переходного течения ($kkl-\omega$, SST и Re напряжений- ω). Анализ данных позволяет утверждать, что у стенок горизонтального канала по его длине нет вихревого течения. В настоящей работе также приводится сравнение численных и экспериментальных данных развития температур стенки по длине канала. Было получено, что при сильном влиянии термогравитационных сил данные полученные при использовании $kkl-\omega$ модели переходного течения хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование, горизонтальный плоский канал, смешанная конвекция, переходная зона течения