
Šilumos atidavimo išilgai vertikalios plokščio kanalo turbulencinės mišrios konvekcijos atveju vienkryptėse tėkmėse skaitinis modeliavimas

**Renoldas Zujus,
Rimantas Makarevičius,
Povilas Poškas**

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Darbe pateikiami skaitiniai turbulencinio šilumos atidavimo kitimo išilgai vertikalios plokščio kanalo, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys sutampa (vienkryptės tėkmės), įvertinimo rezultatai. Tyrimai atlikti simetrinio abipusio kaitinimo ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$) atveju, esant įvairioms termogravitacijos parametro $Bo = Gr_q / (Re^{3,425} \cdot Pr^{0,8})$ reikšmėms – nuo priverstinio tekėjimo iki natūralios konvekcijos. Skaitiniam modeliavimui naudotas programų paketas PHOENICS, kuriuo galima spręsti judesio, energijos ir nepertraukiamumo lygčių sistemą. Lygčių sistemai uždaryti naudoti Chen–Kim ir Lam–Bremhorst mažų Reinoldso skaičių k - ϵ turbulencinio pernešimo modeliai. Gauti skaitinio šilumos mainų modeliavimo (dvimačiu atveju) rezultatai palyginti su Lietuvos energetikos institute atliktų eksperimentų duomenimis.

Parodyta, kad Chen–Kim turbulencinio pernešimo modelis geriau modeliuoja šilumos mainus trumpuose vertikaliuose kanaluose ($x/d_e < 20$) nedidelio termogravitacijos jėgų poveikio srityje, t. y. esant termogravitacijos parametro reikšmėms, mažesnėms už krizines reikšmes $Bo < Bo_{cr}$. Lam–Bremhorst turbulencinio pernešimo modeliu galima palyginti neblogai (15% tikslumu) modeliuoti šilumos mainus vertikaliuose kanaluose kvazistabilizacijos zonoje ($x/d_e > 30$) plačiame termogravitacijos jėgų poveikio diapazone.

Raktažodžiai: turbulencinė mišri konvekcija, skaitinis modeliavimas, vertikalus plokščias kanalas, vienkryptės tėkmės, šilumos atidavimas, palyginimas su eksperimentais

1. ĮVADAS

Lietuvos energetikos institute (LEI) yra atlikti išsamūs eksperimentiniai šilumos atidavimo ir turbulencinio pernešimo vertikaliuose vamzdžiuose ir plokščiuose kanaluose tyrimai mišrios konvekcijos atveju, kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys sutampa (vienkryptės tėkmės) [1–3]. Lygiagrečiai buvo vykdomi ir skaitiniai tyrimai (skaitinis modeliavimas). Kai kuriuos skaitinių tyrimų rezultatus ir palyginimus su eksperimentiniais duomenimis taip pat galima rasti [1, 3]. Platūs tyrimai mišrios konvekcijos srityje atlikti Mančesterio universitete [4, 5] bei Maskvos aukštųjų temperatūrų institute [6]. Mančesterio universitete tyrimai atlikti ne tik naudojant įprastus šilumos nešėjus – orą, vandenį, bet ir skystuosius metalus, taip pat tyrimai atlikti naudojant virškritinių parametrų CO_2 .

Šiuo metu literatūroje pasiūlyta daug įvairaus sudėtingumo turbulencinio pernešimo modelių, naudojamų skaitiniuose tyrimuose, tačiau iki šiol nėra pakankamai ištirta, kurie iš jų tinkamiausi arba priimtini mišrios konvekcijos atveju. Šiuo pažiūriu įdomūs [7, 8] darbai, kuriuose skaitinių tyrimų vertikaliuose vamzdžiuose rezultatai gauti naudojant įvairius turbulencinio pernešimo modelius, palyginti su LEI eksperimentinių tyrimų duomenimis [9].

Ankstesniame darbe [10] buvo aptarti skaitinio turbulencinio šilumos atidavimo modeliavimo rezultatai vienkryptėse tėkmėse vertikalios simetriškai kaitinamo plokščio kanalo kvazistabilizacijos zonoje. Šiame darbe pateikiami skaitinio turbulencinio šilumos atidavimo kitimo išilgai vertikalios simetriškai kaitinamo plokščio kanalo vienkryptėse tėkmėse modeliavimo rezultatai ir jų detalus palyginimas su LEI eksperimentiniais duomenimis.

2. TYRIMŲ OBJEKTAS IR METODIKA

Nagrinėjamas skaitinio modeliavimo objektas – vertikalus plokščias kanalas, kuris buvo naudojamas eksperimentuose [2]. Kanalo kaitinimas – simetrinis, šilumos išsiskyrimas išilgai kaitinamo ruožo pastovus ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$).

Modeliavimas atliktas tokiomis pačiomis sąlygomis, kaip ir eksperimento metu, t. y. esant tos pačios užtekančios oro tėkmės slėgiui, greičiui, temperatūros bei šilumos išsiskyrimui kaitinamoje dalyje. Šiame darbe modeliuotas atvejis, kai užtekanti oro tėkmė nukreipta aukštyn, t. y. kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys sutampa. Šilumos mainus ir fluideo tekėjimą tyrimo objekte (plokščiam kanale) aprašančios pagrindinės lygtys – dvimatės nepertraukiamumo, judesio ir energijos balanso lygtys buvo pateiktos ankstesniame darbe [10]. Toliau pateikiamos naudotų turbulencinių k - ε pernešimo modelių lygtys:

Turbulencinės kinetinės energijos k lygtis:

$$\rho u_x \frac{\partial k}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t \left[2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right] - \rho \varepsilon; \quad (1)$$

Turbulencinės kinetinės energijos disipacijos greičio ε lygtis:

$$\rho u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + c_{\varepsilon 1} f \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left[2 \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right] + S_\varepsilon - c_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}; \quad (2)$$

Turbulencinis klampis μ_t :

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Šiame, kaip ir ankstesniame [10], darbe naudoti Lam–Bremhorst [11] ir Chen–Kim [12] mažų Re

skaičių k - ε turbulencinio pernešimo modeliai. Šių modelių konstantų $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, $c_{\varepsilon 3}$, c_μ , σ_k , σ_ε bei Pr_t reikšmės pateiktos 1 lentelėje, o funkcijų f_μ , f , f_1 , f_2 bei nario S_ε išraiškos – 2 lentelėje. Nagrinėjamojo uždavinio pagrindinės ir turbulencinio pernešimo modelių (1) ir (2) lygtys spręstos baigtinių tūrių metodu, panaudojant programų paketą PHOENICS [13, 14]. Todėl vertikaliam plokščiam kanalui buvo parinktas skaičiavimo tinklelis $N_Y \times N_X = 85 \times 200$. Skaičiavimo tinklelio mazgų skaičius y ašies kryptimi N_Y nuo kanalo ašies link sienelės didėja pagal geometrinės progresijos dėsnį, o mazgų skaičius x ašies kryptimi N_X išilgai kanalo ašies nekinta. Pagrindinių ir turbulencinio pernešimo modelių lygčių iteracinio sprendimo metu fluideo (oro) fizikinių savybių skaitinės reikšmės įvertintos pagal vietinę temperatūrą ir slėgį.

1 lentelė. Turbulencinio pernešimo modelių konstantos ((1)–(3) lygtims)

Turbulencinio pernešimo modelis	Turbulencinio pernešimo modelio konstanta					
	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	c_μ	σ_k	σ_ε
CK	1,15	1,9	0,25	0,09	0,75	1,15
LB	1,44	1,92	0	0,09	1,0	1,314

2 lentelė. Turbulencinio pernešimo modelių funkcijos ((1)–(3) lygtims)

Turbulencinių pernešimo modelių funkcijų žymėjimas	Turbulencinio pernešimo modelių funkcijų išraiška	
f_μ	$[1 - \exp(-0,0165R_y)]^2 (1 + 20,5/R_T)$	
f_1	$1 + (0,05/f_\mu)^3$	
f	LB	f_1
	CK	1,0
f_2	LB	$1 - \exp(-R_T^2)$
	CK	1,0
S_ε	LB	0
	CK	$\rho f_1 c_{\varepsilon 3} \varepsilon^2 / k$

3. SKAITINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

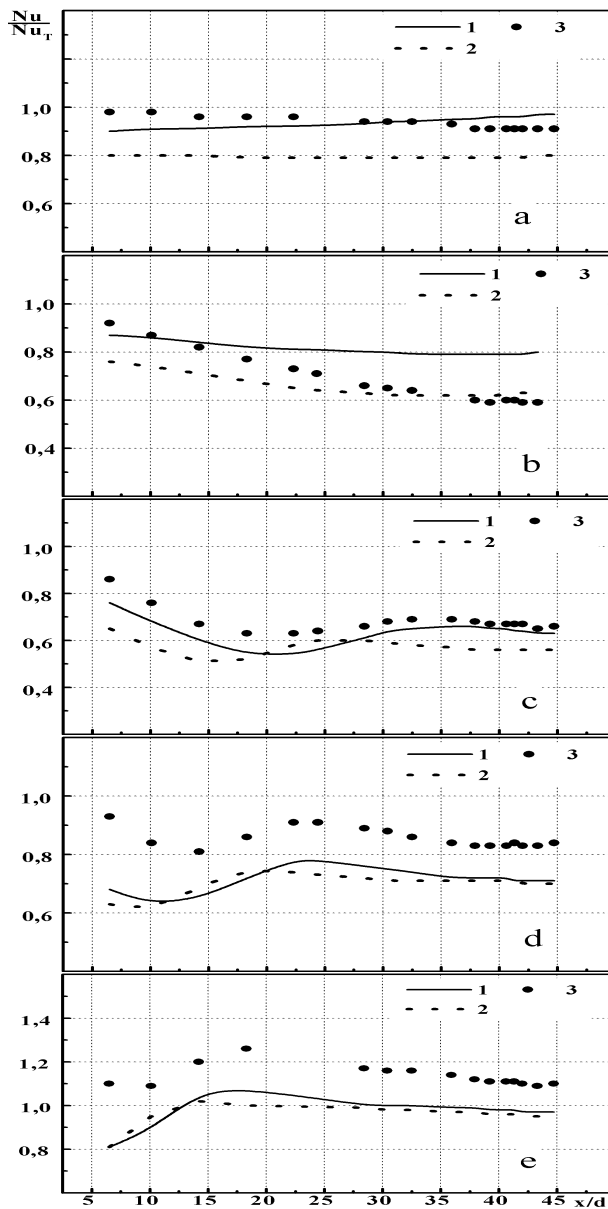
Kai tekėjimas turbulencinis, tai mišrios konvekcijos vienkrypčių tėkmių atveju (priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys sutampa) vertikaliame kanale šilumos atidavimo (Nu) kitimas yra savito pobūdžio. Šioje situacijoje, priešingai nei laminarinio tekėjimo atveju, didėjant termogravitacijos jėgų įtakai šilumos atidavimas (Nu) ima mažėti, palyginti su priverstinės konvekcijos šilumos atidavimu (Nu_p). Lemiamą vaidmenį dėl šilumos atidavimo (Nu) mažėjimo atžvilgiu (Nu_p) sudaro turbulencinės tėkmės struktū-

ros kitimas, didėjant termogravitacijos jėgų įtakai. Didėjant termogravitacijos jėgų įtakai iki tam tikro laipsnio turbulencinės tėkmės struktūroje pasireiškia turbulentiškumo silpimas (gesimas) – stebima tėkmės laminarizacija. Viršijus termogravitacijos jėgoms tam tikrą lygį, tėkmės struktūroje atsiranda papildoma turbulentiškumo generacija – tėkmės turbulizacija. Vykstant turbulizacijos procesui suintensyvėja šilumos mainai (šilumos atidavimas (Nu) didėja).

Santykinio šilumos atidavimo modeliavimo rezultatai išilgai kanalo naudojant abu turbulencinio pernešimo modelius bei jų palyginimas su eksperimentais parodytas 1 pav. Modeliavimo rezultatai palyginti su vertikaliame plokščiam kanale [2] eksperimentiškai nustatytu lokaliu santykinio šilumos atidavimu Nu/Nu_T (1 pav.), (Nu_T – šilumos atidavimas priverstinės konvekcijos atveju, kuris apskaičiuotas pagal priklausomybes [15], esant tam pačiam Re skaičiui, kaip ir mišrios konvekcijos atveju).

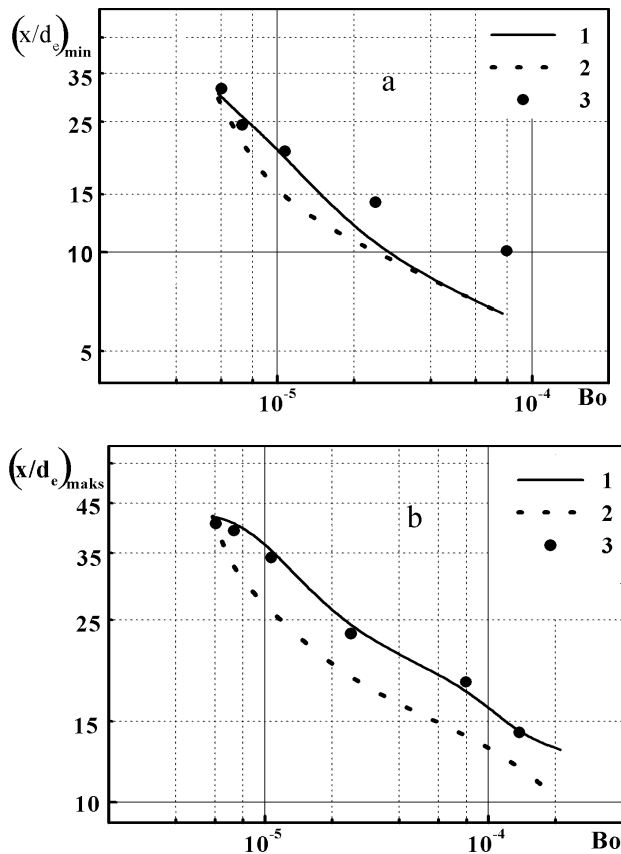
Kaip matyti (1 pav. (a)), paveikslė, esant mažam termogravitacijos jėgų poveikiui, CK modelio atveju gauti rezultatai neblogai sutampa su eksperimentiniais duomenimis, tačiau monotoninio šilumos atidavimo mažėjimo srityje (1 pav. (b)) tėkmės laminarizacijos lygis didėjant x/d_e didėja nepakankamai, nes skaičiavimuose gautos Nu reikšmės yra didesnės už eksperimentines.

Vykstant tėkmės turbulizacijai (1 pav. (c–e)) lokalinio šilumos atidavimo mažėjimą esant tam tikrai x/d_e reikšmei pakeičia didėjimas – atsiranda lokalinis santykinio šilumos atidavimo minimumas ($Nu/Nu_T)_{min}$ ir maksimumas ($Nu/Nu_T)_{maks}$. Matyti (1 pav. (c–e)), kad didėjant termogravitacijos parametro Bo reikšmėms lokalinio šilumos atidavimo minimumas ($Nu/Nu_T)_{min}$ ir maksimumas ($Nu/Nu_T)_{maks}$ artėja prie kanalo pradžios, detaliau šis procesas atsispindi 2 ir 3 paveiksluose. Kvazistabilizacijos zonoje prasidėjus tėkmės turbulizacijai, CK modeliu gauti šilumos atidavimo rezultatai (1 pav. (c)) pakankamai tiksliai atkartoja šilumos mainus visoje tirtoje x/d_e srityje. Esant didesniam termogravitacijos jėgų poveikiui, turbulizuota tėkmė užima vis didesnę kanalo dalį (1 pav. (d)) ir ima vyrėti natūrali konvekcija (1 pav. (e)). CK modelio atveju apskaičiuotas lokalinio šilumos atidavimo išilgai kanalo kitimo pobūdis yra artimas eksperimentinių duomenų kitimo pobūdžiui (1 pav. (d, e)), nes lokaliųjų maksimumų padėtys gana tiksliai, o lokaliųjų minimumų apytiksliai atitinka eksperimentines reikšmes (2 pav.). Deja, apskaičiuotos šilumos atidavimo reikšmės (1 pav. (d, e)) visoje x/d_e srityje išlieka mažesnės nei eksperimentinių duomenų, nes yra gautas per didelis laminarizacijos lygis kanalo pradžioje. Tai matyti iš per mažų lokalinio santykinio šilumos atidavimo ($Nu/Nu_T)_{min, CK}$ minimumo (3 pav.) ir jo padėties ($(x/d_e)_{min, CK}$ (2 pav.) reikšmių, kai termogravitacijos parametras Bo didesnis už $2 \cdot 10^{-5}$ reikšmes.



1 pav. Santykinio šilumos atidavimo plokščiam vertikaliame kanale priklausomybė nuo x/d_e vienkryptėse tėkmėse: 1 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant CK modelį; 2 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant LB modelį; 3 – LEI eksperimentų duomenys [2], esant oro slėgiui $p = 0,4$ MPa; a – $Bo = 1,9 \cdot 10^{-6}$, b – $4,2 \cdot 10^{-6}$, c – $1,1 \cdot 10^{-5}$, d – $2,4 \cdot 10^{-5}$, e – $7,9 \cdot 10^{-5}$

LB modelis esant mažai termogravitacijos jėgų įtakai šiek tiek per daug laminarizuoja tėkmę 1 pav. (a) visoje x/d_e srityje, o esant didesnėms termogravitacijos parametro Bo reikšmėms (monotoninio šilumos atidavimo mažėjimo srityje) – 1 pav. (b) srityje, kurioje $x/d_e < 20$. LB modelio atveju 1 pav. (c) dėl per didelio laminarizacijos lygio esant mažiems x/d_e tėkmė nesugeba turbulizuotis iki eksperimentinio lygio likusioje kanalo dalyje. Toliau didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui, kai pradeda vyrėti natūrali konvekcija 1 pav. (d, e), ši tendencija taip pat

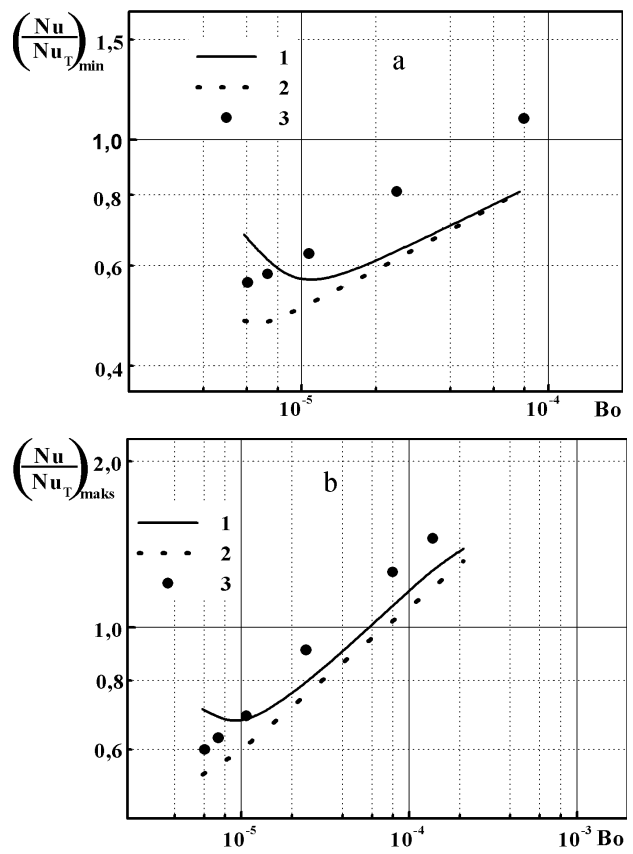


2 pav. Lokalinio šilumos atidavimo minimumo (a) ir maksimumo (b) taškų padėties priklausomybė nuo parametro Bo vienkryptėse tėkmėse. 1 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant CK modelį; 2 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant LB modelį; 3 – LEI eksperimentų duomenys [2], esant oro slėgiui $p = 0,4$ MPa

išlieka. LB modeliu gautas lokalinio šilumos atidavimo kitimo pobūdis išilgai kanalo vykstant turbulizacijos procesui 1 pav. (c–e) šiek tiek skiriasi nuo eksperimentinių duomenų. Tai rodo ir 2 pav. (a, b) lokaliųjų maksimumų–minimumų poslinkis mažesnių x/d_e reikšmių link.

Svarbios apibendrintos informacijos galima gauti, analizuojant termogravitacijos jėgų poveikį šilumos mainams fiksuotoje kanalo vietoje ($x/d_e = \text{const}$) tolydžiai kintant termogravitacijos parametru plačiam jo kitimo intervale.

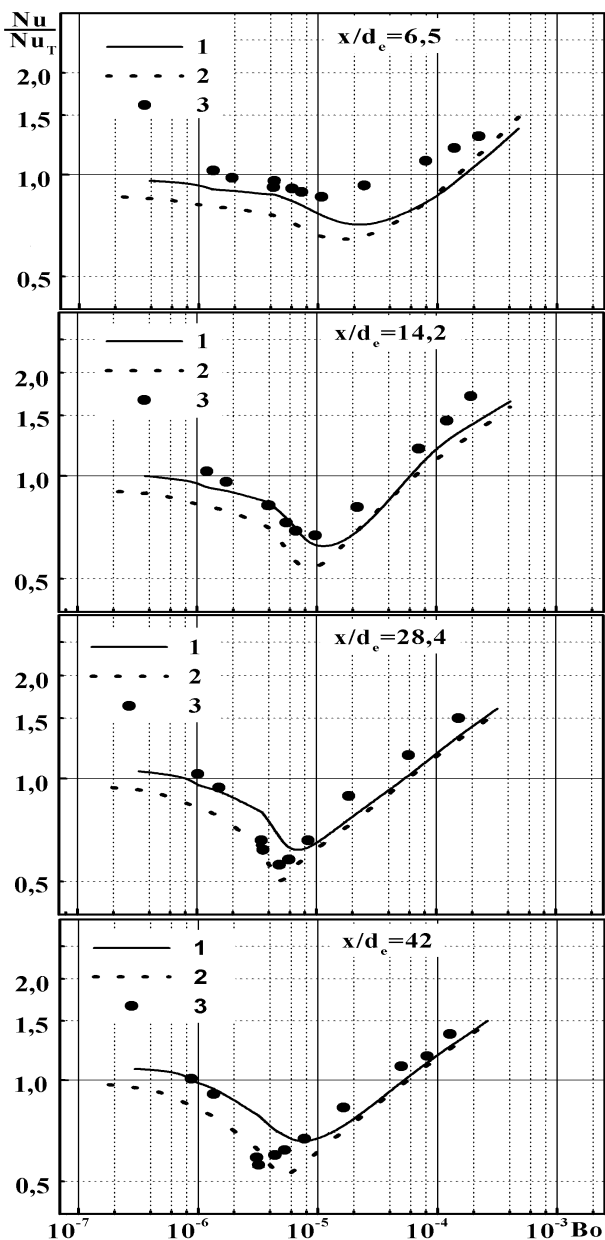
4 paveiksle matyti, kad tėkmės laminarizacija (fiksuotai x/d_e reikšmei) maksimali esant tam tikrai parametro Bo krizinei reikšmei $Bo_{cr \text{ exp}}$, nes tuomet santykinis šilumos atidavimas yra minimalus $(Nu/Nu_T)_{cr}$. Skaitinio modeliavimo santykinio šilumos atidavimo (Nu/Nu_T) rezultatai priklausomai nuo termogravitacijos parametro Bo naudojant CK ir LB turbulencinio pernešimo modelius taip pat pateikti 4 pav. Iš šių skaitinio modeliavimo rezultatų akivaizdu, kad santykinio šilumos atidavimo kitimo pobūdis abiejų turbulencinio pernešimo modelių atveju kokybiškai



3 pav. Santykinio šilumos atidavimo lokalinio minimumo ir maksimumo taškuose priklausomybė nuo parametro Bo vienkryptėse tėkmėse. 1 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant CK modelį; 2 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant LB modelį; 3 – LEI eksperimentų duomenys [2], esant oro slėgiui $p = 0,4$ MPa

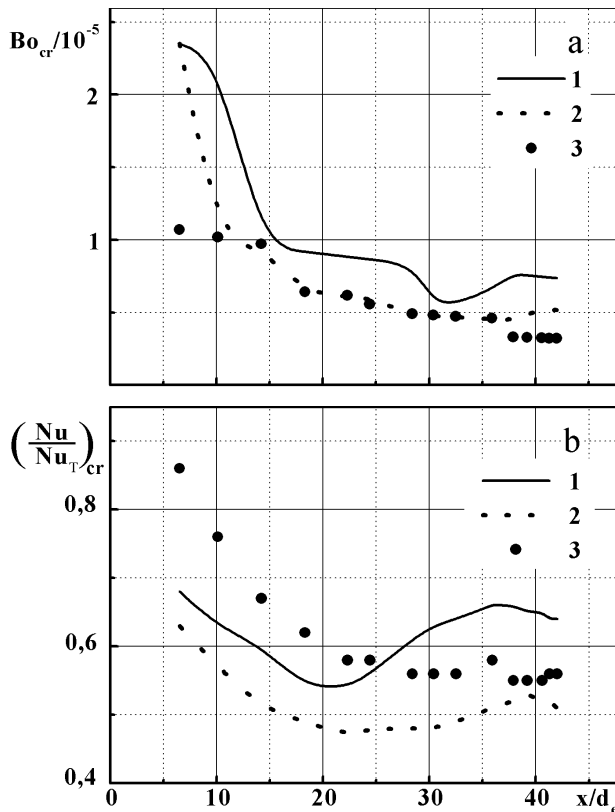
atspindi tėkmės laminarizacijos ir turbulizacijos procesus.

CK modelio atveju (4 pav., 1 kreivė) esant nedidelėms x/d_e reikšmėms ($x/d_e < 20$) laminarizacijos procesas prasideda per anksti ($(Nu/Nu_T)_{CK}$ mažesnis nei $(Nu/Nu_T)_{exp}$) ir vyksta per lėtai, nes krizinės parametro $Bo_{cr \text{ CK}}$ reikšmės didesnės už eksperimentines $Bo_{cr \text{ exp}}$. Detaliau tai matyti 5 paveiksle, kuriame kreivė, gauta naudojant CK turbulencinio pernešimo modelį visame x/d_e kitimo diapazone, yra aukščiau eksperimentinių taškų. Dėl to naudojant CK modelį (4 pav.) gautas per didelis maksimalus laminarizacijos lygis. Detaliau tai matyti 5 pav. (b), kuriame $(Nu/Nu_T)_{cr \text{ CK}}$ mažesnis nei eksperimentinis $(Nu/Nu_T)_{cr \text{ exp}}$ ir šilumos atidavimas turbulizacijos srityje nepasiekia eksperimentinių duomenų lygio (4 pav., kai $x/d_e < 20$). Didėsių x/d_e reikšmių srityje ($x/d_e > 20$) 4 paveiksle tėkmės laminarizacijos proceso pradžia atitinka eksperimentinius duomenis, tačiau tėkmės laminarizacija vyksta per lėtai, nes krizinės parametro $Bo_{cr \text{ CK}}$ reikšmės šiek tiek didesnės už eksperimentines $Bo_{cr \text{ exp}}$, ir nepakankamai intensy-



4 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro $Bo = Gr / (Re^{3,425} \cdot Pr^{0,8})$ esant įvairioms x/d_e reikšmėms. 1 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant CK modelį; 2 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant LB modelį; 3 – LEI eksperimentų duomenys [2], esant oro slėgiui $p = 0,4$ MPa

viai, nes šilumos atidavimas didesnis už eksperimentinį Nu/Nu_T minimumą. Šitai aiškiai parodo 4 ir 5 pav. duomenys. Šilumos mainų atsistatymo srityje šilumos atidavimo atsistatymas CK modelio atveju lėtesnis, nei rodo eksperimentai. Detali analizė parodė, kad nedidelių x/d_e reikšmių srityje ($x/d_e < 20$) CK modelis šilumos mainus gali modeliuoti 15% tikslumu, kai termogravitacijos jėgų poveikis sukelia tėkmės laminarizaciją (termogravitacijos parametro reikšmės nėra didesnės už krizines reikšmes $Bo_{cr exp}$), o šilumos mainų atsistatymo srityje ($Bo > Bo_{cr exp}$)



5 pav. Krizinių – termogravitacijos parametro Bo_{cr} (a) ir šilumos atidavimo $(Nu/Nu_T)_{cr}$ (b) kitimas pagal plokščio kanalo ilgį. 1 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant CK modelį; 2 – skaitinių tyrimų rezultatai, naudojant LB modelį; 3 – LEI eksperimentų duomenys [2], esant oro slėgiui $p = 0,4$ MPa

CK modeliu galima atlikti tik kokybinį šilumos mainų įvertinimą 25% tikslumu. Didesnių x/d_e reikšmių srityje (kvazistabilizacijos zonoje $x/d_e > 30$) CK modeliu galima ne mažesniu kaip 15% tikslumu sumodeliuoti šilumos atidavimą tik toje srityje, kurioje vyrauja natūrali konvekcija.

Iš skaičiavimo rezultatų naudojant LB turbulencinio pernešimo modelį matyti (4 pav., 2 kreivė), kad per anksti gaunama tėkmės laminarizacija, nes esant mažoms parametro reikšmėms ($Bo \approx 10^{-6}$) santykinis šilumos atidavimas $(Nu/Nu_T)_{LB}$ yra mažesnis nei priverstinės konvekcijos atveju. Taip pat 4 paveiksle matyti, kad LB modelis pervertina maksimalų laminarizacijos lygį, išskyrus kvazistabilizacijos zoną ($x/d_e > 30$). Tai detalai matyti 5 pav. (b): kol $x/d_e < 30$, minimalus šilumos atidavimas $(Nu/Nu_T)_{cr LB}$ yra mažesnis nei eksperimentinis santykinis šilumos atidavimas $(Nu/Nu_T)_{cr exp}$. Tačiau LB modelis pakankamai tiksliai modeliuoja šilumos mainų minimumo padėtį, t. y. maksimalų laminarizacijos laipsnį ($Bo_{cr LB}$ reikšmės artimos eksperimentinėms $Bo_{cr exp}$ 5 pav. (a)). Detali analizė parodė, kad LB modeliu, kai $x/d_e < 20$, galima atlikti tik kokybinį šilumos mainų įvertinimą 25% tikslumu, tačiau didesnių x/d_e reikšmių srityje (kvazista-

bilizacijos zonoje, kai $x/d_e > 30$) LB modeliu galima modeliuoti šilumos atidavimą ne mažesniu negu 15% tikslumu visame tirtame termogravitacijos jėgų kitemo intervale, net ir labiausiai sumažėjus šilumos mainams $Bo_{cr\ exp}$ srityje.

4. IŠVADOS

Atlikus termogravitacijos jėgų poveikio šilumos atidavimui vienkryptėse tėkmėse vertikaliame plokščiaame kanale su simetriniu kaitinimu skaitinius (dvi mačiu atveju) tyrimus, naudojant Chen–Kim ir Lam–Bremhorst turbulencinio pernešimo modelius, galima padaryti išvadas:

1. Chen–Kim turbulencinio pernešimo modeliu galima palyginti neblogai (15% tikslumu) modeliuoti šilumos mainus trumpuose vertikaliuose kanaluose ($x/d_e < 20$) nedidelio termogravitacijos jėgų poveikio srityje, t. y. kol termogravitacijos jėga laminarizuoja tėkmę ir termogravitacijos parametro Bo reikšmės yra mažesnės už krizines reikšmes $Bo_{cr\ exp}$.

2. Lam–Bremhorst turbulencinio pernešimo modeliu galima palyginti neblogai (15% tikslumu) modeliuoti šilumos mainus vertikaliuose kanaluose kvazistabilizacijos zonoje ($x/d_e > 30$) plačiame (apimančiame šilumos mainų mažėjimą ir atsistatymą) termogravitacijos jėgų poveikio diapazone.

Pažymėjimai

- c_p – savitoji šiluma J/(kg · K)
- d_e – kanalo ekvivalentus skersmuo
- g – laisvojo kritimo pagreitis m/s²
- y – skersinė koordinatė m
- k – turbulencinė kinetinė energija $k = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) / 2$ m²/s²
- p – slėgis Pa
- q – šilumos srauto tankis W/m²
- T – temperatūra K
- u – tėkmės greitis m/s
- u'_x, u'_y, u'_z – greičio pulsacinės komponentės m/s
- x – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė) m
- α – šilumos atidavimo koeficientas, $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$, W/(m² · K)
- β – tūrinio plėtimosi koeficientas 1/K
- ε – turbulencinės kinetinės energijos disipacijos greitis m²/s³
- λ – šilumos laidumo koeficientas W/(m · K)
- μ – dinaminio klampio koeficientas Pa · s
- ν – kinematinio klampio koeficientas m²/s
- ρ – tankis kg/m³

Nedimensiniai parametrai

Bo – termogravitacijos parametras, $Bo = Gr_q / (Re^{3,425} Pr^{0,8})$

Gr_q – Grashofo kriterijus pagal šilumos srautą, $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / \nu^2 \cdot \lambda$

Nu – Nuselto kriterijus, $Nu = \alpha d_e / \lambda$

Pr – Prandtlio kriterijus, $Pr = \mu c_p / \lambda$

Re – Reinoldso kriterijus, $Re = u_f d_e / \nu$

R_y – turbulencinis Reinoldso skaičius, $R_y = k^{1/2} y_w / \nu$

R_T – turbulencinis Reinoldso skaičius, $R_T = k^2 / \nu \varepsilon$

Kiti pažymėjimai

CK – Chen–Kim turbulencinio pernešimo modelis

LB – Lam–Bremhorst turbulencinio pernešimo modelis

Indeksai

- cr – krizinis
- exp – eksperimentinis
- f – vidutinis masinis
- y – skersinė dedamoji
- T – priverstinė turbulencinė konvekcija
- t – turbulencinis
- w – ant sienelės
- x – išilginė dedamoji

Gauta
2002 11 12

Literatūra

1. Вилемас Ю., Пошкас П. Теплоотдача в газоохлаждаемых каналах при воздействии термогравитационных и центробежных сил. Вильнюс, 1992. С. 240.
2. Poškas P., Adomaitis J. E., Vilemas J., Bartkus G. Development of turbulent heat transfer over the length of vertical flat channel under a strong influence of Buoyancy // Proc. of the 10th Int. Heat Transfer Conf. 1994. Vol. 5. P. 555–560.
3. Vilemas J., Poškas P. Effect of body forces on turbulent heat transfer in channels. Kaunas–New York, 1999. P. 195.
4. Jackson J. D., Cotton M. A., Axell B. P. Studies of mixed convection in vertical tubes. Review // Int. J. Heat Fluid Flow. 1988. Vol. 10. N 1. P. 2–15.
5. Jackson J. D., Li J., An P. The influence of thermal boundary conditions on mixed convection heat transfer in vertical tubes // Progress in Engineering Heat Transfer. Proc. of the Third Baltic Heat Transfer Conference. Gdansk, Poland. 1999. P. 193–207.
6. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва: Наука, 1986. С. 192.
7. Jackson J. D., Mikielewicz D. P., Poškas P. Comparative study of turbulence models against some recent experimental data on buoyancy-influenced heat transfer for ascending flow of air in a tube // Eurotherm Meeting No. 32 on Heat Transfer in Single Phase Flows. Oxford University, 1993. P. 130–132.
8. Jackson J. D., Mikielewicz D. P. Computational studies of buoyancy-influenced flow of air in a vertical

- pipe // Proc. of the Third International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements. Heraklion-Crete, Greece, 1996. P. 349–358.
9. Vilemas J. V., Poskas P. S. and Kaupas V. E. Local heat transfer in a vertical gas-cooled tube with turbulent mixed convection and different heat fluxes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1992. Vol. 35. No. 10. P. 2421–2428.
 10. Makarevičius R., Zujus R., Poškas P. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiam kanale turbulencinės mišrios konvekcijos atveju vienkryptuose srautuose skaitinis modeliavimas // Energetika. 2001. Nr. 1. P. 85–90.
 11. Lam C. K. G., Bremhorst K. A. Modified form of the k-ε model for predicting wall turbulence // J. of Fluids Eng. 1981. Vol. 103. P. 456–460.
 12. Chen Y. S., Kim S.W. Computation of turbulent flows using an extended k-(epsilon) turbulence closure model // DC:NASA CR-179204. 1987.
 13. Rosten H. I., Spalding D. B. Shareware PHOENICS Beginner's Guide. London, CHAM TR100, CHAM Ltd., 1987.
 14. Rosten H. I., Spalding D. B. The PHOENICS Reference Manual. London, CHAM TR200, CHAM Ltd., 1989.
 15. Вилемас Ю., Чесна Б., Сурвила В. Теплоотдача в газоохлаждаемых кольцевых каналах. Вильнюс, 1977. С. 256.

Renoldas Zujus, Rimantas Makarevičius, Povilas Poškas

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER ALONG VERTICAL FLAT CHANNEL FOR AIDING FLOWS

S u m m a r y

Numerical two-dimensional simulation of variation of heat transfer along a two-side symmetrically heated ($q_{w_1} = q_{w_2} = \text{const}$) vertical flat channel was performed using low Reynolds numbers Chen–Kim and Lam–Bremhorst k-ε turbulence models in a wide range of buoyancy parameters.

It was established that the Chen–Kim turbulent model can simulate heat transfer in vertical short ($x/d_e \leq 20$) channels with a rather small relative error (less than 15%)

when the buoyancy parameter $Bo = Gr_q / (Re^{3.425} \cdot Pr^{0.8})$ is below the critical values ($Bo \leq Bo_{cr}$).

It was also demonstrated that the Lam–Bremhorst model can simulate heat transfer with a rather small relative error (less than 15%) in the quasistabilized region ($x/d_e \geq 30$) for a wide range of buoyancy parameters.

Key words: turbulent mixed convection, numerical simulation, vertical flat channel, aiding flows, heat transfer

Ренольдас Зуюс, Римантас Макарявичюс, Повилас Пошкас

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПО ДЛИНЕ ПЛОСКОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ ПОПУТНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ СМЕШАННОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ

Р е з ю м е

В данной статье приведены результаты численного двухмерного моделирования теплоотдачи по длине плоского вертикального канала с симметричным нагревом ($q_{w_1} = q_{w_2} = \text{const}$) при турбулентной смешанной конвекции (направления вынужденной и естественной конвекции совпадают), используя модели турбулентности Лам–Бремхорст и Чен–Ким.

Установлено, что с помощью модели турбулентности Чен–Ким можно моделировать теплоотдачу в коротких вертикальных ($x/d_e \leq 20$) каналах с небольшой (не более 15%) относительной погрешностью в случае небольшого влияния термогравитационных сил (при параметре термогравитационных сил $Bo = Gr_q / (Re^{3.425} \cdot Pr^{0.8})$, не превышающих критические значения $Bo \leq Bo_{cr}$). Полученные при использовании модели турбулентности Лам–Бремхорст результаты моделирования теплоотдачи с небольшой (не более 15%) относительной погрешностью согласуются с экспериментальными данными в квазистабильной зоне ($x/d_e \geq 30$) в широком диапазоне воздействия термогравитационных сил.

Ключевые слова: турбулентная смешанная конвекция, численное моделирование, плоский вертикальный канал, потоки совпадающих направлений, теплоотдача