

Mišrios konvekcijos skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje esant vienkryptėms tėkmėms

2. Eksperimentinių režimų skaitinis modeliavimas, kai oro slėgis yra 0,2 MPa

Renoldas Zujus,

Jurgis Jankauskas,

Gytis Bartkus

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: renoldas@mail.lei.lt*

Lietuvos energetikos institute atlikti mišrios konvekcijos esant vienkryptėms tėkmėms eksperimentiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje esant įvairiems šilumnešio (oro) slėgiams norint gauti visapusišką informaciją apie termogravitacijos jėgų įtaką plačiame jos poveikio diapazone. Šiame darbe pateikti eksperimentinių režimų esant oro slėgiui $p = 0,2$ MPa skaitinio modeliavimo rezultatai. Skaitiniam dvimačiam modeliavimui naudotas programų paketas FLUENT 6.2. Modeliuoti trys eksperimentiniai režimai, kai Reinoldso kriterijai $Re_{in} = 2,0 \times 10^3, 2,6 \times 10^3, 2,9 \times 10^3$ ir atitinkamai Grashofio kriterijai $Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8, 4,7 \times 10^8, 5 \times 10^8$. Išsamiai nagrinėta stabilus ir nestabilus (sūkurinio) tekėjimo zonos. Skaitinių tyrimų šilumos mainų rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis ir parodyta, kad, kai hidrodinaminės stabilizacijos ruože išlieka laminarinis tekėjimas, skaitinių tyrimų šilumos atidavimo kanalo kaitinamoje dalyje rezultatai gerai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis.

Raktažodžiai: vertikalus plokščias kanalas, mišrios konvekcijos vienkryptės tėkmės, pereinamojo tekėjimo zona, dvimatis skaitinis modeliavimas, palyginimas su eksperimentais

1. ĮVADAS

Pirmajame šios serijos straipsnyje [1] buvo pateikta mišrios konvekcijos modeliavimo metodika ir preliminarūs modeliavimo rezultatai. Modeliavimas atliktas trumpoje (iki $x/d_e = 15$) vertikalaus plokščio kanalo kalorimetrinėje dalyje. Skaitiniam dvimačiam modeliavimui naudotas programų paketas FLUENT 6.1. Skaitiniai tyrimai atlikti, kai oro slėgis $p = 0,2$ MPa, Reinoldso ir Grashofio kriterijai įtekėjime yra atitinkamai $Re_{in} = 2,0 \times 10^3, Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8$. Gauti rezultatai parodė, kad galima išskirti tris būdingas tekėjimo zonas pagal kanalo ilgį. Pirmoje zonoje dėl termogravitacijos jėgų poveikio parabolinis greičio tėkmės profilis deformuojasi į „M raidės“ formos profilį. Tai – stabilus tekėjimo zona. Esant anksčiau nurodytiems parametrams įtekėjime, ji tęsiasi iki $x/d_e = 8$. Zona su priešingos krypties tekėjimu, atsiradusiu kanalo centre (recirkuliacinė zona), formuojasi intervale $x/d_e = 8-10$. Toliau formuojasi nestabilus sūkurinio tekėjimo zona. Šioje zonoje sienelės temperatūra ir Nuselto kriterijus Nu įgyja pulsuojantį pobūdį.

Lietuvos energetikos institute atlikti mišrios konvekcijos eksperimentiniai tyrimai vertikaliame kanale pereinamojo tekėjimo zonoje esant vienkryptėms tėkmėms, kai šilumnešio

(oro) slėgiai įvairūs, norint gauti visapusišką informaciją apie termogravitacijos jėgų įtaką plačiame jos poveikio diapazone. Šiame darbe pateikti eksperimentinių režimų esant oro slėgiui $p = 0,2$ MPa skaitinio modeliavimo rezultatai ilgame (iki $x/d_e = 45$) vertikaliame plokščiam kanale. Modeliuoti trys eksperimentiniai režimai (dvimatis skaitinis modeliavimas), kai Reinoldso kriterijai $Re_{in} = 2,0 \times 10^3, 2,6 \times 10^3, 2,9 \times 10^3$ ir atitinkamai Grashofio kriterijai $Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8, 4,7 \times 10^8, 5 \times 10^8$.

2. SKAITINIO MODELIAVIMO METODIKA

Kaip ir [1], šiame straipsnyje modeliavimas atliktas vertikaliame plokščiam kanale, kuris buvo išsamiai aprašytas [2]. Šio kanalo pagrindiniai duomenys: ilgis 6,0 m, plotis 0,4 m, aukštis 0,0408 m, hidrodinaminės stabilizacijos ruožo ilgis 2,5 m, kaitinamo ruožo (kalorimetrinės dalies) ilgis 3,5 m. Kanalo kaitinimas – simetrinis, šilumos išsiskyrimas išilgai kaitinamo ruožo pastovus ($q_{w1} = q_{w2} \approx \text{const}$). Modeliavimas atliktas tokiomis pačiomis sąlygomis, kaip ir eksperimento metu, t. y. esant to paties užtekančio oro tėkmės slėgiui ($p \approx 0,2$ MPa), greičiui, temperatūros bei šilumos išsiskyrimui kaitinamoje dalyje. Modeliuotos mišrios konvekcijos vienkryptės tėkmės, t. y. kai priverstinės ir

natūralios konvekcijų kryptys sutampa. Kaip ir [1], naudotos nestacionarios Navje-Stokso ir Furje-Kirchofo (energijos) lygtys dvimačiu atveju. Būtinybė naudoti nestacionarias lygtis iškilo atlikus bandomuosius skaičiavimus naudojant stacionarias lygtis. Šių bandomųjų skaičiavimų rezultatų nebuvo galima logiškai paaiškinti. Panaši problema, naudojant stacionarias lygtis termogravitacijos jėgų poveikiui įvertinti, iškilo ir [4], todėl ten taip pat buvo pereita prie nestacionarių lygčių sistemos sprendimo. Modeliuojant padaryta prielaida, kad įtekančio oro greitis didėja pagal laiką t eksponentiniu dėsniu pagal (1) lygybę:

$$u_m(y,t) = A \left(1 - \left(\frac{y}{h/2} \right)^2 \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{B} \right) \right); \quad (1)$$

čia A ($A = 0,32$ m/s, kai $Re_m = 2,0 \times 10^3$; $A = 0,38$ m/s, kai $Re_m = 2,6 \times 10^3$; $A = 0,41$ m/s, kai $Re_m = 2,9 \times 10^3$). Maksimali greičio reikšmė nustatyta iš parabolinio greičių profilio esant stacionariam laminariniam tekėjimui hidrodinaminės stabilizacijos ruože.

Taupant kompiuterioskaičiavimo laiką, B ($B = 0,217$ s) – konstanta parinkta taip, kad jau esant sąlygai $t = 1$ s, u_m greitis kanalo centre pasiektų 99 % jo maksimalios reikšmės. Taip pat buvo modeliuota, kai $t = 20$ s, o konstanta $B = 4,343$ s. Gauti skaitinio modeliavimo rezultatai buvo labai panašūs.

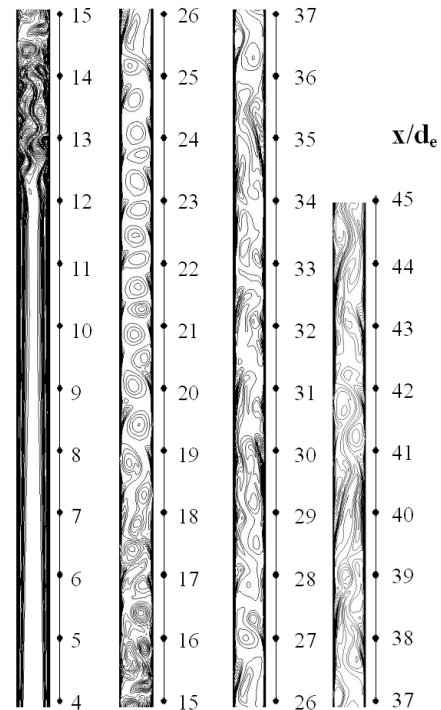
Skaitiniams tyrimams naudotas programų paketas FLU-ENT 6.2 [3]. Skaičiavimo tinklelis buvo $N_y \times N_x = 50 \times 1360$, kuris pagrįstas [1]. Skaičiavimo tinklelio mazgai išdėstyti vienodais atstumais, o y ašies kryptimi nuo kanalo ašies N_y didėja pagal geometrinės progresijos dėsnį. Tinklelio mazgų išdėstymas x ašies kryptimi buvo parinktas vienodais intervalais.

3. SKAITINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

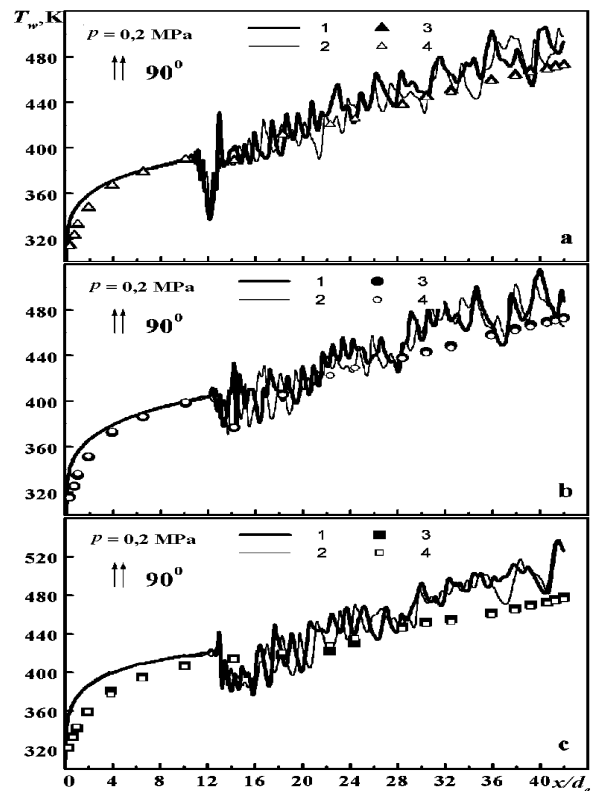
Kaip matyti 1 paveiksle, esant $Re_m = 2,6 \times 10^3$ ir $Gr_{qm} = 4,7 \times 10^8$ tėkmės struktūra žymiai keičiasi pagal kanalo ilgį. Kaitinimo pradžioje iki $x/d_e = 12$ vyrauja stabilus laminarinis tekėjimas. Tolesnėje kanalo dalyje yra stebimas sukūrinis tekėjimas, kuris išlieka iki pat kanalo pabaigos, tačiau jo struktūra keičiasi didėjant x/d_e . Didėjant x/d_e šie sukūriai silpnėja. Galima išskirti tris zonas pagal sukūrių pobūdį: pirmoje zonoje ($12 < x/d_e < 16$) pasireiškia labai intensyvūs sukūriai (sukūriai išsidėsto išilgai kanalo tankiausiai ir sukūrių sukimosi dažnis – sūkuringumo ω modulis – didžiausias), antroje zonoje ($16 < x/d_e < 25$) yra simetriškai išsidėstę sukūriai ir galiausiai trečioje zonoje ($25 < x/d_e < 45$) yra chaotiškai išsidėstę sukūriai.

Panašiai tėkmės struktūra kinta, kai $Re_m = 2,0 \times 10^3$ ir $Gr_{qm} = 3,9 \times 10^8$. Čia skiriasi tik sukūrių kitimo zonų padėtis: pirmoji intensyvių sukūrių zona yra, kai $11 < x/d_e < 13$, antroji zona – kai $13 < x/d_e < 21$ su simetriškai išsidėstę sukūriais, trečioji zona – kai $21 < x/d_e < 45$ su chaotiškai išsidėstę sukūriais. Kai $Re_m = 2,9 \times 10^3$ ir $Gr_{qm} = 5 \times 10^8$, šios būdingos sukūrių zonos yra tokios: pirmoji zona ties $13 < x/d_e < 17$, antroji zona ties $17 < x/d_e < 26$ ir trečioji zona ties $26 < x/d_e < 45$.

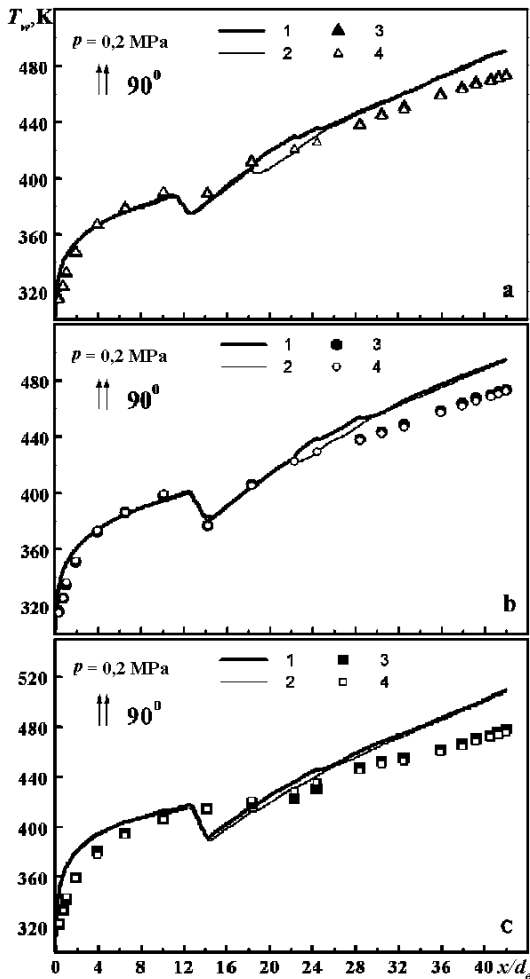
Skaitinis modeliavimas rodo, kad kaitinimo ruožo pradinėje dalyje sienelės temperatūra monotoniškai auga iki $x/d_e = 11$



1 pav. Sūkuringumo modulio (ω) izolinijos laiko momentu: $t = 52$ s (nestacionariam tekėjimui perėjus į stacionarų), $Bo_m = 1,8 \times 10^5$, $Re_m = 2,6 \times 10^3$



2 pav. Sienelės temperatūros kitimo priklausomumas nuo x/d_e laiko momentais: a) $t = 43$ s, $Bo_m = 2,0 \times 10^5$, $Re_m = 2,0 \times 10^3$; b) $t = 52$ s, $Bo_m = 1,8 \times 10^5$, $Re_m = 2,6 \times 10^3$; c) $t = 55$ s, $Bo_m = 1,7 \times 10^5$, $Re_m = 2,9 \times 10^3$ (nestacionariam tekėjimui perėjus į stacionarų). 1, 2 – skaitiniai tyrimai (sienelės momentinė temperatūra); 3, 4 – eksperimentiniai tyrimai. 1, 3 – pirmą sienelę; 2, 4 – antrą sienelę

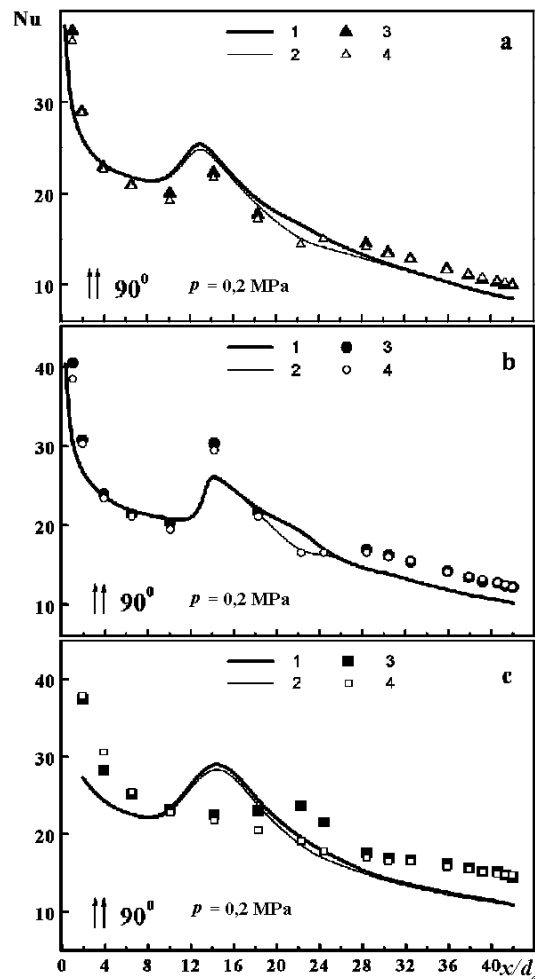


3 pav. Sielės temperatūros kitimo priklausomumas nuo x/d_e : a) $Bo_{in} = 2,0 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,0 \times 10^3$; b) $Bo_{in} = 1,8 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,6 \times 10^3$; c) $Bo_{in} = 1,7 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,9 \times 10^3$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į stacionarų). 1, 2 – skaitiniai tyrimai (sielės temperatūra suvidurkinta pagal laiką); 3, 4 – eksperimentiniai tyrimai. 1, 3 – pirma sienelė; 2, 4 – antra sienelė

(2 pav., a), $x/d_e = 12$ (2 pav., b) ir iki $x/d_e = 13$ (2 pav., c). Sūkurinio tekėjimo atsiradimas (nestabilumo pradžia) sąlygoja staigų pasikeitimą temperatūros kitime (pulsacinis kitimo pobūdis). Eksperimentiniai duomenys nerodo tokių žymių pulsacijų, kadangi eksperimento metu išmatuotos reikšmės atitinka suvidurkintas reikšmes pagal laiką.

Sielės suvidurkintos temperatūros pagal laiką parodytos 3 pav. Kaip minėta, iki $x/d_e = 11$ (2 pav., a), $x/d_e = 12$ (2 pav., b) ir $x/d_e = 13$ (2 pav., c) tekėjimas yra laminarinis. Staigus kanalo sienelės temperatūros sumažėjimas matyti sūkurių atsiradimo zonoje (pirmoji zona – labai intensyvių sūkurių (1 pav.) tęsiasi iki $x/d_e = 13$ (3 pav., a), $x/d_e = 16$ (3 pav., b) ir $x/d_e = 17$ (3 pav., c)).

Šis sienelės temperatūros sumažėjimas susijęs su šilumos mainų padidėjimu tarp oro tėkmės ir sienelės (4 pav.) Skaitiniai tyrimai rodo, kad tiek temperatūros minimumai (3 pav., a, b), tiek šilumos atidavimo maksimumai (4 pav., a, b) gerai lokaliai sutampa su eksperimentiniais duomenimis. Susiformavus sūkuriniam tekėjimui, kai $x/d_e > 13$ (3 pav., a) ir $x/d_e > 16$ (3 pav., b), sūkurių intensyvumas silpnėja ir šilumos mainai tampa mažiau intensyvi (4 pav.). Matyti, kad



4 pav. Šilumos atidavimo kitimo priklausomumas nuo x/d_e : a) $Bo_{in} = 2,0 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,0 \times 10^3$; b) $Bo_{in} = 1,8 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,6 \times 10^3$; c) $Bo_{in} = 1,7 \times 10^5$, $Re_{in} = 2,9 \times 10^3$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į stacionarų). 1, 2 – skaitiniai tyrimai (Nu kriterijus suvidurkintas pagal laiką); 3, 4 – eksperimentiniai tyrimai. 1, 3 – pirma sienelė; 2, 4 – antra sienelė

sūkurinio tekėjimo formavimosi zonoje, kai $x/d_e \approx 15-30$ (4 pav.), nežymiai skiriasi šilumos atidavimo intensyvumas nuo vienos ir kitos sienelių, todėl šiek tiek skiriasi ir jų temperatūros (3 pav.).

Kai $Re_{in} = 2,9 \times 10^3$, skaitinių ir eksperimentinių tyrimų duomenų sutapimas kur kas blogesnis. Šilumos atidavimo maksimumas (4 pav., c) skaitinių tyrimų atveju yra išreikštas gerokai labiau ir atsiranda esant mažesnėms x/d_e reikšmėms, nei gauta eksperimentinių tyrimų metu. Tai dėl to, kad šiuo atveju jau ir hidrodinaminės stabilizacijos ruože tekėjimas yra pereinamasis. Todėl greičio profilis yra labiau užpildytas ir greičio gradientas prie sienelės yra didesnis. Dėl šios priežasties vietinis tėkmės atitrūkimas nuo sienelės matyti, esant didesnėms x/d reikšmėms (tai parodo šilumos mainų maksimumas), negu gauname modeliuodami laminarinį tekėjimą.

Visais trim nagrinėtais atvejais eksperimentiniai duomenys esant didesnėms x/d_e reikšmėms rodo šiek tiek žemesnes temperatūras (šiek tiek didesnius Nu kriterijus) nei skaitinio modeliavimo rezultatai. Tai matyti sąlygoja mažos tėkmės struktūros, susiformuojančios esant didesnėms x/d_e reikšmėms, kurių neįvertina nestacionarus laminarinis modeliavimas.

Kai $Re_{in} = 2,0 \times 10^3$ (4 pav., a) ir $Re_{in} = 2,6 \times 10^3$ (4 pav., b), Nu kriterijaus didžiausias nuokrypis tarp skaitinių tyrimų ir eksperimentinių duomenų neviršija atitinkamai 15 ir 17 %, o koreliacijos koeficientas R tarp eksperimentinių taškų ir modeliavimo kreivių yra atitinkamai 0,935 ir 0,934, ir tai rodo neblogą kiekybinį duomenų sutapimą. Kai $Re_{in} = 2,9 \times 10^3$ (4 pav., c), Nu kriterijaus didžiausias nuokrypis tarp skaitinių tyrimų ir eksperimentinių duomenų yra iki 44 %, o koreliacijos koeficientas R tarp eksperimentinių taškų ir modeliavimo kreivių yra lygus 0,794.

4. IŠVADOS

Atlikus eksperimentinių režimų dvimatį skaitinį modeliavimą plokščio, simetriškai kaitinamo vertikalios kanalo kalorimetrinėje dalyje (iki $x/d_e = 45$) pereinamojo tekėjimo zonoje esant mišrios konvekcijos vienkryptėms tėkmėms, kai oro slėgis $p = 0,2$ MPa, trims Reinoldso kriterijams $Re_{in} = 2,0 \times 10^3, 2,6 \times 10^3, 2,9 \times 10^3$, kai Grashofio kriterijai yra atitinkamai $Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8, 4,7 \times 10^8, 5 \times 10^8$, galima padaryti tokias išvadas:

1. Visais trimis tirtais atvejais kanale x/d_e nuo 11 iki 13 susiformuoja sukūrinis tekėjimas, kuris sukelia šilumos mainų padidėjimą.

2. Kai hidrodinaminės stabilizacijos ruože išlieka laminarinis tekėjimas, skaitinių tyrimų šilumos atidavimo rezultatai gerai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis, tačiau kai hidrodinaminės stabilizacijos ruože pradeda vystytis pereinamasis tekėjimas, modeliavimo rezultatai jau ir kokybiškai neatspindi eksperimentinių duomenų.

Žymėjimai

b – kanalo plotis m,

c_p – savitoji šiluma $J / (kg \cdot K)$,

d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo, $d_e = 2(h \times b) / (h + b)$, m,

g – laisvojo kritimo pagreitis m/s^2 ,

h – kanalo aukštis m,

i – entalpija J/kg ,

p – slėgis MPa,

q – šilumos srauto tankis W/m^2 ,

R – koreliacijos koeficientas,

$$R = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

t – laikas s,

T – temperatūra K,

u – tėkmės greitis m/s,

x – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė) m,

X, Y – atsitiktiniai dydžiai,

\bar{x}, \bar{y} – atsitiktinių dydžių vidurkiai,

y – skersinė koordinatė m,

α – šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$, $W / (m^2 \cdot K)$,

β – tūrinio plėtimosi koeficientas $\beta = 1 / T$, $1 / K$,

λ – šilumos laidumo koeficientas $W / (m \cdot K)$,

μ – dinaminės klampos koeficientas $Pa \cdot s$,

ν – kinematinės klampos koeficientas m^2/s ,

ρ – tankis kg/m^3 ,

$$\omega - \text{sūkuriumas, } \omega = \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x}, s^{-1}.$$

Nedimensiniai parametrai

Bo – termogravitacijos parametras, $Bo = Gr_q / Re$,

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

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

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

Indeksai

1 – pirma sienelė,

2 – antra sienelė,

f – vidutinis masės,

in – įtekėjime,

w – ant sienelės,

x – išilginė dedamoji,

y – skersinė dedamoji.

Gauta 2009 06 15

Priimta 2009 08 03

Literatūra

- Zujus R., Poškas P., Jankauskas J. Mišrios konvekcijos skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale pereinamojo tekėjimo zonoje esant vienkryptėms tėkmėms. 1. Tėkmės struktūros analizė // Energetika. 2006. Nr. 4. P. 84–89.
- 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 // Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Brighton. UK, 1994. Vol. 5. P. 555–560.
- FLUENT User's Guide. Fluent Inc., 2005.
- Kuczmariski M. A., Gokoglu S. A. Buoyancy suppression in gases at high temperatures // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28. No. 3. P. 496–511.

Renoldas Zujus, Jurgis Jankauskas, Gytis Bartkus

NUMERICAL SIMULATION OF MIXED CONVECTION IN VERTICAL FLAT CHANNEL IN CASE OF TRANSITIONAL REGION FOR AIDING FLOWS

2. NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENTAL REGIMES AT AIR PRESSURE 0.2 MPa

Summary

Experimental investigations of aiding mixed convection heat transfer in a vertical flat channel in the transition region for different airflow pressures were performed at the Lithuanian Energy Institute to get an exhaustive information on the buoyancy effect. The results of numerical modelling for experimental regimes in case of the airflow pressure $p = 0.2$ MPa are presented in this paper. Numerical two-dimensional simulations using the FLUENT 6.2 code were performed for three Reynolds numbers – $Re_m = 2.0 \times 10^3, 2.6 \times 10^3, 2.9 \times 10^3$ – with the Gr_q numbers $Gr_{qin} = 3.9 \times 10^8, 4.7 \times 10^8, 5 \times 10^8$, respectively. Zones with stable and unstable vortex flows were analysed in detail. The results of the numerical modelling of heat transfer were compared with experimental data. When the laminar flow is in the hydrodynamic stabilization region, the results of the numerical modelling of heat transfer in the calorimetric region are in good agreement with experimental data.

Key words: vertical flat channel, aiding mixed convection, transition region, two-dimensional numerical simulation, comparison with experiment

Ренольдас Зуюс, Юргис Янкаускас, Гитис Барткус

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПУТНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПОТОКОВ

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА 0,2 МПа

Резюме

В Литовском энергетическом институте были проведены экспериментальные исследования теплоотдачи при попутных направлениях потоков смешанной конвекции в вертикальном плоском канале в зоне переходного течения при различных давлениях теплоносителя (воздуха) в целях получения исчерпывающей информации о воздействии термогравитационных сил. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования экспериментальных режимов при давлении воздуха $p = 0,2$ МПа. Численные двухмерные исследования проведены с использованием компьютерной программы FLUENT 6.2. Моделирование было проведено для трех экспериментальных режимов, при числах Рейнольдса $Re_m = 2,0 \times 10^3, 2,6 \times 10^3, 2,9 \times 10^3$ и числах Грасофа $Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8, 4,7 \times 10^8, 5 \times 10^8$ соответственно. Детально были проанализированы зоны стабильного и нестабильного (вихревого) течения. Результаты численного исследования теплоотдачи сравнены с экспериментальными данными. Когда на участке гидродинамической стабилизации имеет место ламинарное течение, результаты численного моделирования теплоотдачи в нагреваемом участке канала хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

Ключевые слова: вертикальный плоский канал, смешанная конвекция при попутных направлениях потоков, зона переходного течения, двухмерное численное моделирование, сравнение с экспериментальными данными