

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

1. Tėkmės struktūros analizė

Renoldas Zujus,

Povilas Poškas,

Jurgis Jankauskas

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

Šiame straipsnyje pateikti mišrios konvekcijos skaitinių tyrimų vertikaliame plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje esant vienkryptėms tėkmėms rezultatai. Skaitiniam dvimačiam modeliavimui naudotas programų paketas FLUENT 6.1. Skaitiniai tyrimai atlikti esant absoliutiniam oro slėgiui $p = 0,2$ MPa, kai Reinoldso ir Grashofo kriterijai įtekėjime atitinkamai yra: $Re_m = 2016$, $Gr_{q, in} = 3,9 \times 10^8$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į kvazistacionarų). Skaitinis modeliavimas 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 seka nestabilus sūkurinio tekėjimo zona. Šioje zonoje sienelės temperatūra ir Nuselto skaičius Nu įgyja pulsuojančią pobūdį. Skaitinių tyrimų šilumos mainų rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis ir rodo gerą sutapimą (maksimalus skirtumas tarp eksperimentų ir skaitinio modeliavimo ne didesnis kaip 4%) kanalo pradžioje, t. y. stabilus laminarinio tekėjimo zonoje, ir neblogą sutapimą (maksimalus skirtumas ne didesnis kaip 12%) recirkuliacinėje tekėjimo zonoje.

Raktažodžiai: mišri konvekcija, dvimatis skaitinis modeliavimas, vienkryptės tėkmės, vertikalus plokščias kanalas, laminarinis ir sūkurinis tekėjimas, pereinamojo tekėjimo zona, palyginimas su eksperimentais

1. ĮVADAS

Analizė parodė, kad šilumos mainų tyrimų, esant perėjimui iš laminarinio į turbulencinį tekėjimą mišrios konvekcijos atveju, yra labai mažai [1–3]. Siekiant vizualizuoti tėkmę [1], esant vienkryptėms tėkmėms, į centrinę vamzdžio dalį buvo įpurškiami dažai. Nustatyta, kad pažeidus tėkmės stabilumą, dažų siūlelis įgydavo sinusoidės formą ir atsirasdavo sienelės temperatūros pulsacijos. Darbuose [2, 3] parodoma, kad greičio tėkmės profiliuose persilenkimo taškų ir ypač priešingo tekėjimo atsiradimas sąlygoja tėkmės stabilumo praradimą ir perėjimą iš laminarinio tekėjimo į turbulencinį, esant Reinoldso skaičiaus reikšmėms, mažesnėms už krizinę ($Re < Re_{cr} = 2300$).

Siame darbe pateikti skaitinių tyrimų rezultatai, esant mišriai konvekcijai vertikaliame plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje vienkryptėse oro tėkmėse. Kanalo kaitinimas simetrinis ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$), oro ab-

soliutinis slėgis $p = 0,2$ MPa bei Reinoldso ir Grashofo kriterijai įtekėjime yra atitinkamai: $Re_m = 2016$, $Gr_{q, in} = 3,9 \times 10^8$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į kvazistacionarų).

2. TYRIMŲ OBJEKTAS IR METODIKA

Nagrinėjamas skaitinio modeliavimo objektas – vertikalus plokščias kanalas, kuris buvo nuodugnai aprašytas [4]. 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 ilgis 3,5 m. Kanalo kaitinimas – simetrinis, šilumos išsiskyrimas išilgai kaitinamo ruožo pastovus ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$). Modeliavimas atliktas tokiais pačiomis sąlygomis, kaip ir eksperimento metu, t. y. esant tokiam pat užtekančio oro srauto absoliutiniam slėgiui ($p \approx 0,2$ MPa), greičiui, temperatūros bei šilumos išsiskyrimui kaitinamoje dalyje. Šiame darbe modeliuotos vienkryptės tėkmės, t. y. toks

atvejais, kai užtekantis oro srautas nukreiptas aukštyn (kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys sutampa). Modeliuojant padaryta prielaida, kad įtekantis oro greitis didėja pagal laiką t eksponentiniu dėsnio pagal lygtį:

$$u_{in} = A \left(1 - \left(\frac{y}{h/2} \right)^2 \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{B} \right) \right). \quad (1)$$

Konstanta $A = 0,32$ m/s (maksimalus greitis) buvo nustatyta iš parabolinės greičio profilio lygties hidrodinaminės stabilizacijos ruože, kai $Re = 2016$. Konstanta $B = 0,8$ s parinkta taip, kad po 4 s greitis praktiškai būtų lygus maksimaliai galimam greičiui, t. y. sudarytų 99% maksimalaus greičio reikšmės. 4 s laiko pasirinkimas susijęs su esamais kompiuterinio laiko ištekiais. Esant laikui $t > 4$ s įtekėjimo greitis kinta labai nežymiai ir atitinka Reinoldso skaičių $Re_{in} = 2016$. Šilumos mainus ir srauto charakteristikas tyrimo objekte (plokščiame kanale) aprašo nestacionarios pagrindinės tėkmės lygtys:

nepertraukiamumo lygtis

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

judėsio kiekio lygtis greičio u_x komponentei

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

judėsio kiekio lygtis greičio u_y komponentei

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u_x \frac{\partial u}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right); \quad (4)$$

energijos lygtis

$$\rho \frac{\partial i}{\partial t} + \rho u_x \frac{\partial i}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial i}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Šios lygtys sprendžiamos esant tokioms ribinėms sąlygoms:

- Įtekėjime ($x = 0$)

1. Pradinė sąlyga: ($t = 0$):

$$u_x = u_{in} = 0; u_y = 0; i = i_{in}.$$

$$2. (t > 0); u_x = u_{in}; u_{in} = 0,32 \left(1 - \left(\frac{y}{0,0204} \right)^2 \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{0,8} \right) \right); u_y = 0; i = i_{in}.$$

Ant sienelės ($y = 0$ arba $y = h$)

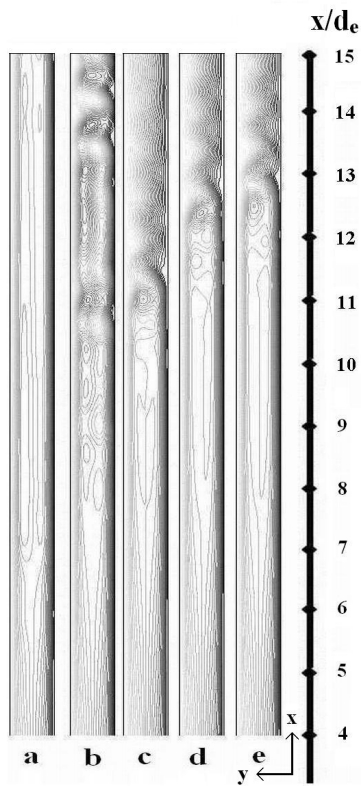
$u_x = u_y = 0; q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ (tokios pat sąlygos kaip ir eksperimentų metu).

Skaitiniams tyrimams (dvimačiu atveju) naudotas programų paketas FLUENT 6.1 [5], kuris plačiai taikomas visame pasaulyje modeliuojant takųjų medžiagų tekėjimą ir šilumos mainus sudėtingais atvejais dvimatėse ar trimatėse sistemose. FLUENT 6.1 programų paketas sprendžia (2) – (5) lygtis baigtinių tūrių metodu. Skaitiniams tyrimams atlikti buvo naudotas skaičiavimo tinklelis, kuris atitinka 15 kanalo ekvivalentinių skersmenų išilgai kanalo. Skaičiavimo tinklelio dydis ir tinklelio ląstelių išsidėstymas buvo kuriamas, atsižvelgiant į tinklelio reikalavimus tiesioginiam skaitiniam modeliavimui, kur ląstelių skaičius kubui, kurio kraštinė lygi kanalo aukščiui h (trimačiu atveju), lygus $N = (0,088Re_h)^{9/4}$ [6]. Šioje formulėje parametrai, esantys Re skaičiuje, yra tėkmės greitis ir kanalo aukštis h . Vienmačiu atveju tinklelio mazgų skaičius nuo sienelės iki sienelės $N_y = (0,088Re_h)^{3/4}$ lygus 32. Tačiau šį tekėjimą apibūdina ne tik Reinoldso $Re_{in} = 2016$, bet ir Grashofo skaičius $Gr_{q_{in}} = 3,9 \times 10^8$, o tai reiškia, kad šiluminis pasienio sluoksnio storis d_T apytiksliai 3,5 karto plonesnis už hidrodinaminį pasienio sluoksnio storį δ_T (pagal [7] šiluminio δ_T ir hidrodinaminio pasienio sluoksnio storį priklausomybes nuo Ralėjaus skaičiaus Ra). Tokiu būdu, buvo sudaryti keli skaičiavimo tinklelių variantai, iš kurių buvo parinktas optimalus tinklelis, už kurį didesnio ląstelių skaičiaus skaičiavimo tinkleliais būdavo gaunami vienodi skaičiavimo rezultatai. Šis optimalus skaičiavimo tinklelis buvo $N_y \times N_x = 50 \times 1360$, kurio skaičiavimo tinklelio mazgai, išdėstyti ne 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

Analizuojant tėkmės struktūrą laiko momentu $t = 2,066$ s (1 pav. a) matyti, kad kanale formuojasi uždaro srauto funkcijos izolinijos, kurios telkiasi kanalo centre (pagal y koordinatę), o pagal kanalo ilgį $6,5 < x/d_e < 15$. Greičių profiliai (3 pav. a) parodo, kad laiko momentu $t = 2,066$ s greitis kanalo viduryje artimas nuliui (esant $x/d_e = 6,5$), o jau esant ($x/d_e = 8,8$) (3 pav. b) greičio kryptis kanalo centre tampa „neigiama“, t. y. priešinga priverstinio tekėjimo kryptiai, ir ši tendencija išlieka iki ($x/d_e = 13$) (3 pav. c). Taigi galima teigti, kad kanalo srityje $6,5 < x/d_e < 15$ formuojasi recirkuliacinė zona (1 pav. a).

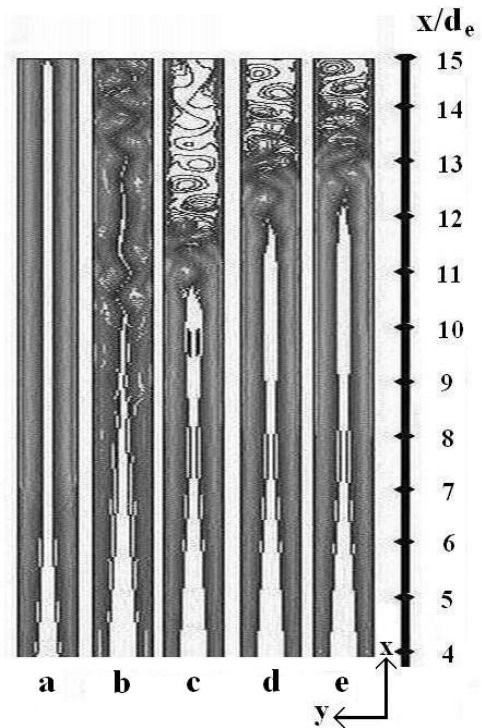
Laiko momentu $t = 2,6563$ s (1 pav. b) srauto funkcijos izolinijos kanalo zonoje ($6,5 < x/d_e < 15$) „susky-



1 pav. Srauto funkcijos ψ izolinijų struktūra kanale skirtingais laiko momentais: $a - t = 2,066$ s, $Bo_{in} = 2,09 \times 10^5$; $b - 2,6563$ s, $Bo_{in} = 2,01 \times 10^5$; $c - 5,5113$ s, $Bo_{in} = 1,98 \times 10^5$; $d - 11,168$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$; $e - 18,301$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$

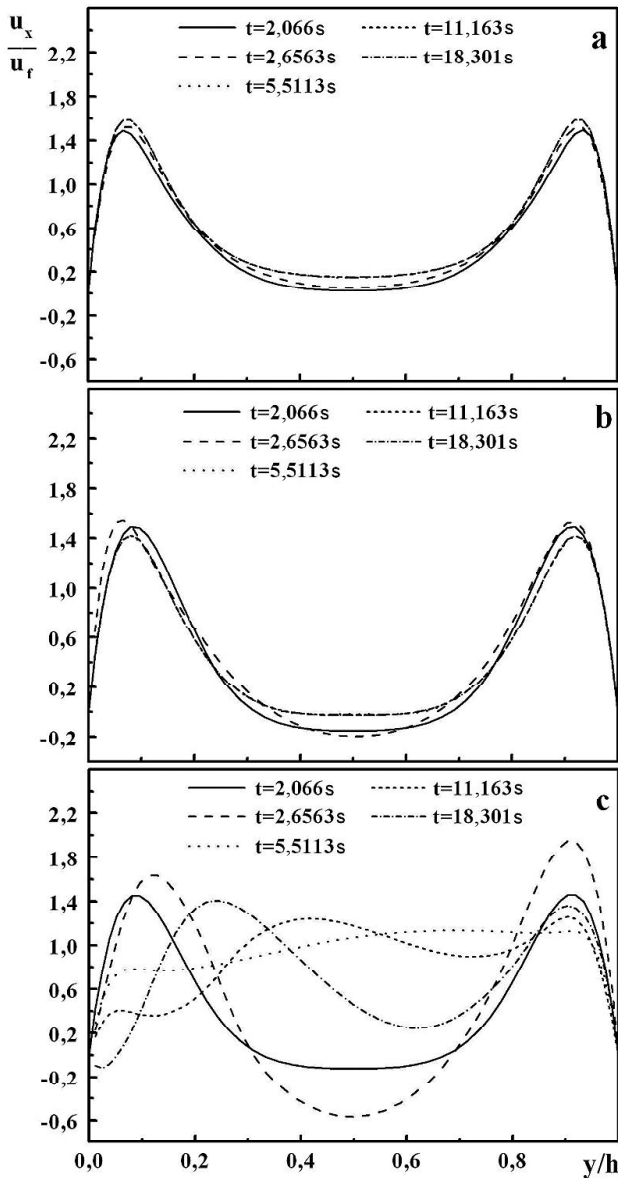
la“ į smulkesnes uždaras izolinijas. Recirkuliacinė zona stebima nuo $x/d_e > 7$, o srityje $8,8 < x/d_e < 15$ jau vyrauja nestabilus sukūrinis tekėjimas. Vėlesniais laiko momentais ($t = 5,5113$ s) sukūrinio tekėjimo padėtis išilgai kanalo pasislenka į didesnių x/d_e reikšmių sritį ($10,5 < x/d_e < 15$) (1 pav. *c*), o dar vėlesniais laiko momentais $t = 11,163$ s (1 pav. *d*) ir $t = 18,301$ s (1 pav. *e*) sukūrinio tekėjimo padėtis kinta labai nežymiai ir tekėjimą jau galima vadinti „kvazistacionariu“. Atlikus tekėjimo struktūros kanale analizę, galima tvirtinti, kad išilgai kanalo (1 pav. *c*, *d*, *e*) formuojasi trys būdingos tekėjimo zonos. Pirmoje zonoje dėl termogravitacijos jėgų poveikio parabolinis greičio tėkmės profilis deformuojasi į M raidės formos profilį. Tai stabilus tekėjimo zona. Kai $t = 5,5113$ s (1 pav. *c*, *d*, *e*), ji tęsiasi iki $x/d_e = 8$. Esant didesnėms laiko momento reikšmėms (1 pav. *c*) $x/d_e = 8 - 10,5$, o (1 pav. *d*, *e*) atveju $x/d_e = 8 - 11,5$ kanalo centre formuojasi zona su priešingos krypties tekėjimu priverstinio tekėjimo krypties atžvilgiu. Po to seka nestabilus sukūrinio tekėjimo zona. Analizuojant greičio profilius nestabilus sukūrinio tekėjimo zonoje (3 pav. *c* $x/d_e = 13$), galima pastebėti šiai zonai būdingus požymius: greičio krypties pokytis skirtingais laiko momentais ir greičio profilio asimetrija (kai $t = 2,6563 - 18,301$ s).

Tėkmės struktūros kitimą laike trečioje nestabilus sukūrinio tekėjimo zonoje ypač gerai atspindi ω sukūringumo izolinijos kanale (2 pav. *a-e*).



2 pav. Sukūringumo ω izolinijos kanale skirtingais laiko momentais: $a - t = 2,066$ s, $Bo_{in} = 2,09 \times 10^5$; $b - 2,6563$ s, $Bo_{in} = 2,01 \times 10^5$; $c - 5,5113$ s, $Bo_{in} = 1,98 \times 10^5$; $d - 11,168$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$; $e - 18,301$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$

Šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo (4 pav. *a*, *b*) tiesiogiai susijęs su anksčiau aptartais tėkmės struktūros ypatumais (1 pav.). Šilumos atidavimo pokytis laiko momentu $t = 2,066$ s (4 pav. *a* 2 kreivė) esant $x/d_e \geq 6,5$ susijęs su greičio tėkmės krypties pokyčiu kanalo viduryje (1 pav. *a*). Kitu laiko momentu $t = 2,6563$ s, kai $x/d_e \geq 8,8$, Nu skaičiaus kitimas įgyja pulsuojantį pobūdį (4 pav. *a* 3 kreivė) ir taip įvyksta dėl sukūrinio tekėjimo atsiradimo šioje srityje (1 pav. *b*). Vėlesniais laiko momentais pulsuojantis šilumos atidavimo pobūdis pasireiškia esant didesnėms x/d_e reikšmėms (4 pav. *b* 4–6 kreivės). 4 paveiksle taip pat pateikti eksperimentinių tyrimų duomenys (taškai), esant toms pačioms sąlygoms, kaip ir skaitiniuose tyrimuose. Kitaip negu modeliavimo rezultatai, eksperimentiniai taškai neatspindi momentinio šilumos atidavimo kitimo dėl baigtinio storio (0,38 mm) folijos šiluminės inercijos bei prietaisų rodmenų vidurkinimo eksperimento metu. Matyti (4 pav. *b* 4, 5, 6 kreivės), jog tiek kanalo pradžioje, t. y. stabilus laminarinio tekėjimo zonoje, tiek antroje (recirkuliacinėje) zonoje kreivės praktiškai nesiskiria, t. y. nepriklauso nuo laiko, todėl šiose zonose galima lyginti eksperimentinius duomenis su skaitinių tyrimų rezultatais (momentinėmis kreivėmis). Taigi gautas geras skaitinių tyrimų rezultatų ir eksperimentinių duomenų sutapimas (maksimalus skirtumas tarp eksperimentų ir skaitinio modeliavimo ne didesnis kaip 4%) kanalo pradžioje, t. y. stabilus laminarinio tekėjimo zonoje, ir neblogas (maksimalus skirtumas ne didesnis kaip 12%) recirkuliacinėje zonoje.



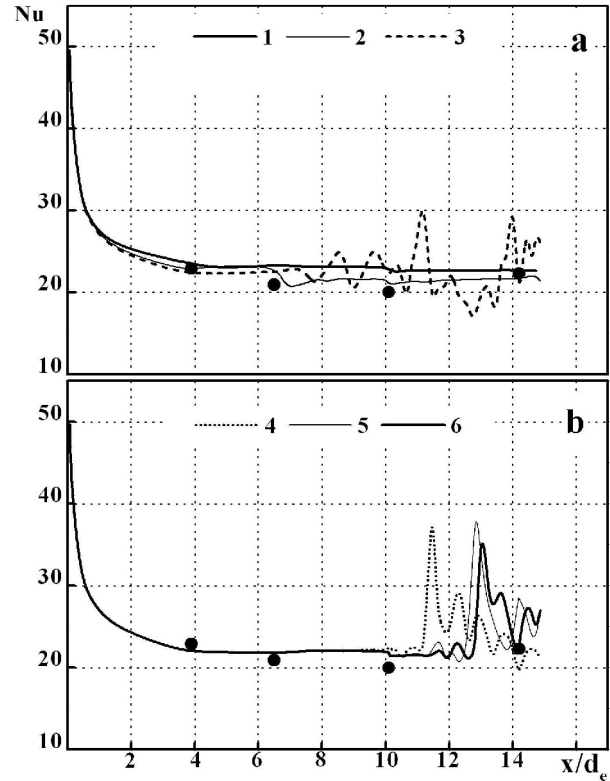
3 pav. Greičių profiliai skirtinguose kanalo skerspjūviuose: $a - x/d_e = 6,5$; $b - x/d_e = 8,8$; $c - x/d_e = 13$; $t = 2,066$ s, $Bo_{in} = 2,09 \times 10^5$; $t = 2,6563$ s, $Bo_{in} = 2,01 \times 10^5$; $t = 5,5113$ s, $Bo_{in} = 1,98 \times 10^5$; $t = 11,168$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$; $t = 18,301$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$

4. IŠVADOS

Atlikus dvimatį skaitinį modeliavimą plokščiame, simetriškai kaitinamame, vertikaliame kanale mišrios konvekcijos atveju pereinamojo tekėjimo zonoje, esant oro absoliutiniam slėgiui $p = 0,2$ MPa, kai Reynoldso ir Grashofio kriterijai įtekėjime yra atitinkamai $Re_{in} = 2016$, $Gr_{qin} = 3,9 \times 10^8$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į kvazistacionarų), galima padaryti tokias išvadas:

1. Išilgai kanalo susiformuoja trys būdingos tekėjimo zonos – stabilus laminarinio, recirkuliacinio ir sukurinio tekėjimo.

2. Šilumos atidavimas antroje – recirkuliacinio tekėjimo zonoje mažai skiriasi nuo šilumos atidavimo stabilus laminarinio tekėjimo zonoje.



4 pav. Šilumos atidavimo kitimo priklausomybė nuo x/d_e skirtingais laiko momentais: 1 – $t = 1,6725$ s, $Bo_{in} = 2,21 \times 10^5$; 2 – $2,066$ s, $Bo_{in} = 2,09 \times 10^5$; 3 – $2,6563$ s, $Bo_{in} = 2,01 \times 10^5$; 4 – $5,5113$ s, $Bo_{in} = 1,98 \times 10^5$; 5 – $11,168$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$; 6 – $18,301$ s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$. Juodi taškai – eksperimento duomenys

3. Sukurinio tekėjimo zonoje šilumos atidavimas įgyja pulsuojančią pobūdį.

Pažymėjimai

- b – kanalo plotis m;
- c_p – savitoji šiluma J/(kg · K);
- d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo, $d_e = 2(hb)/(h+b)$, m;
- g – laisvo kritimo pagreitis m/s²;
- h – kanalo aukštis m;
- i – entalpija J/kg;
- p – slėgis MPa;
- q – šilumos srauto tankis W/m²;
- N – skaičiavimo tinklelio ląstelių skaičius arba mazgų skaičius;
- t – laikas s;
- T – temperatūra K;
- u – tėkmės greitis m/s;
- x – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė) m;
- y – skersinė koordinatė m.

Graikiški pažymėjimai

- α – šilumos atidavimo koeficientas, $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$, W/(m²K);

β – tūrinio plėtimosi koeficientas $b = 1/T$, $1/K$;

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

μ – dinaminio klampumo koeficientas $Pa \cdot s$;

ν – kinematinio klampumo koeficientas m^2/s ;

ρ – tankis kg/m^3 ;

ω – sukuringumas, $\omega = \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x}$, s^{-1} ;

ψ – srauto funkcija, $\rho u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$; $\rho u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, kg/s .

Nedimensiniai parametrai

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

Gr_q – Grashofo skaičius pagal šilumos srautą,

$$Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / (\nu^2 \cdot \lambda);$$

Nu – Nuselto skaičius, $Nu = \alpha d_e / \lambda$;

Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \mu c_p / \lambda$;

Ra – Ralėjaus skaičius, $Ra = Pr \cdot Gr_q$;

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

Indeksai

1 – pirma sienelė;

2 – antra sienelė;

cr – krizinis;

f – vidutinis masinis;

in – įtekėjime;

w – ant sienelės;

x – išilginė dedamoji;

y – skersinė dedamoji.

Gauta 2006 10 30
Parengta 2006 11 30

Literatūra

1. Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J. Effects of natural convection on transition to turbulence in vertical pipes // Can. J. Chem. Eng. 1960. Vol. 38. P. 67–73.
2. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Стригин Б. К. Исследование теплообмена в трубах при вязкостно-гравитационном течении. Москва: Энергия, 1968. Т. 1. 607 с.
3. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
4. 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. Brighton. UK, 1994. Vol. 5. P. 555–560.
5. Fluent 6.1 documentation // Fluent inc. 2002.
6. Wilcox D. C., Turbulence modeling for CFD // DCW Industries, La Canada, California, 1993.
7. Kenjereš K., Hanjalić K. Numerical insight into flow structure in ultraturbulent thermal convection // Physical Review E, 66, 2002.

Renoldas Zujus, Povilas Poškas, Jurgis Jankauskas

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

1. ANALYSIS OF FLOW STRUCTURE

Summary

Results of the numerical modelling of mixed convection in a vertical flat channel in case of a transitional region for aiding flows are presented. Unsteady numerical two-dimensional simulations were performed using the FLUENT 6.1 code. Investigations were performed in airflow of 0.2 MPa absolute pressure for Reynolds number 2016 and Grashof number 3.9×10^8 (in quasisteady state). Numerical results revealed three characteristic zones of the flow along the channel. In the first zone, the parabolic velocity profile was transformed into an M-shaped profile. This was a stable zone. For the flow parameter indicated above it existed up to $x/d_e = 8$. The region of $x/d_e = 8 - 10$ was a region of the reversal flow in the core of the channel (zone with recirculation). Next to that zone we had a zone with an unstable vortex flow. In this zone, a typical wall temperature and Nusselt number pulsations were noted. The results of heat transfer modeling were compared with the experimental data and showed a good agreement (difference between numerical and experimental data was no more than 4%) in the region of the stable laminar flow and a sufficient agreement (with the difference no more than 12%) in the recirculation zone.

Key words: mixed convection, two-dimensional numerical simulation, aiding flows, vertical flat channel, laminar and vortex flow, transitional region, comparison with experiments

Ренольдас Зуюс, Повилас Пошкас, Юргис Янкаускас

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

1. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ

Резюме

В настоящей работе представлены результаты численного исследования смешанной конвекции в плоском вертикальном канале в зоне переходного течения для попутных направлений потоков. Численные двумерные исследования проведены с использованием компьютерной программы FLUENT 6.1. Исследования проводились в потоке воздуха при его абсолютном давлении 0,2 МПа, числе Рейнольдса 2016 и числе Грасгофа $3,9 \times 10^8$ (после выхода в квазистационарный режим). Численное моделирование показало, что можно выделить три характерные зоны течения по длине канала. В первой зоне под влиянием термогравитационных сил происходит деформация параболического профиля скорости в М-образный профиль. Это – зона устойчивого течения. При вышеуказанных параметрах течения она распространяется до $x/d_e = 8$. При

$x/d_e = 8 - 10$ имеет место зона с противоположным течением потока в центре канала (рециркуляционная зона). Далее следует зона с неустойчивым вихревым характером течения. В этой зоне температура стенки и число Nu приобретают пульсационный характер. Результаты численного моделирования теплоотдачи сравнены с экспериментальными данными и показывают хорошее совпадение (максимальное различие между расчетными и экспериментальными данными не превы-

шает 4 %) в начале канала, т. е. в зоне устойчивого ламинарного течения, и неплохое совпадение (максимальное различие не превышает 12 %) в рециркуляционной зоне.

Ключевые слова: смешанная конвекция, двумерное численное моделирование, попутные направления потоков, вертикальный плоский канал, ламинарное и вихревое течение, зона переходного течения, сравнение с экспериментами