

Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse

2. Sūkurinis tekėjimas esant simetriniam dvipusiam kaitinimui

Arūnas Sirvydas,

Robertas Poškas

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

Šiame straipsnyje pateikti skaitinio modeliavimo vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse, esant sūkuriniam oro tekėjimui, rezultatai. Dvimatis modeliavimas atliktas programa FLUENT 6.1, esant tokiam pat kanalui ir tokioms pat sąlygoms kaip ir eksperimento metu. Oro tėkmėje nestacionaraus tekėjimo tyrimai atlikti, kai $Re_m = 2130$, o $Gr_q = 6,2 \cdot 10^8$. Kvazistacionaraus tekėjimo tyrimai atlikti esant dviems Reinoldso skaičiams – 2130 ir 4310, kai Gr_q skaičius kito nuo $7,6 \cdot 10^7$ iki $3,1 \cdot 10^9$, siekiant sumodeliuoti skirtingą termogravitacijos jėgų poveikį.

Tiek nestacionaraus, tiek kvazistacionaraus modeliavimo rezultatai parodė, kad esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui prie kanalo sienelių susidaro lokaliniai antriniai tekėjimai. Jie deformuoja greičio profilius ir sukelia sienelės temperatūros kitimą pagal kanalo ilgį. Sienelės temperatūra įgauna pulsacinį pobūdį, tačiau suvidutinta jos reikšmė, kai $Re_m = 2130$, gana neblogo sutampa su eksperimentiniais duomenimis. Kai $Re_m = 4310$, suvidutinti rezultatai gerai sutampa tik iki $x/d_e \leq 25$. Esant didesniems x/d_e , eksperimentas rodo žemesnę sienelės temperatūrą, nei skaičiavimai. Matomai tai negali visiškai atspindėti stacionarus tėkmės ir šilumos mainų modeliavimas.

Raktažodžiai: skaitinis modeliavimas, vertikalus plokščias kanalas, simetrinis dvipusis kaitinimas, priešingų krypčių mišri konvekcija, sūkurinis oro tekėjimas, palyginimas su eksperimentais

1. ĮVADAS

Pirmajame šios straipsnių serijos straipsnyje [1] buvo apžvelgti darbai, kuriuose tirta tėkmės nestabilumo priklausomybė nuo termogravitacijos jėgų poveikio esant tiek vienkryptėms, tiek priešingų krypčių tėkmėms. Taip pat pateikti šilumos atidavimo vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse, esant laminariniam oro tekėjimui iki perėjimo į sūkurinį tekėjimą, skaitinio modeliavimo rezultatai. Dvimatis modeliavimas buvo atliktas programa FLUENT 6.1 esant 0,1; 0,2 ir 0,4 MPa oro slėgiui, kai Reinoldso skaičius (Re_m) kito nuo 1500 iki 4310, o Grashofa ($Gr_{q, in}$) skaičius buvo keičiamas nuo $1,65 \cdot 10^5$ iki $3,1 \cdot 10^9$. Modeliavimas parodė, jog esant nedideliam termogravitacijos jėgų poveikiui, oro tėkmė visuose kanalo skerspjūviuose yra nukreipta žemyn, t. y. juda priverstinio tekėjimo kryptimi. Didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui stebimas oro tėkmės

atitrūkimas nuo sienelių tam tikroje kanalo vietoje. Toliau didinant kaitinimą didėja ir termogravitacijos jėgų poveikis, ir tėkmės atitrūkimo vieta pasislenka kaitinimo pradžios link. Nuo tėkmės atitrūkimo vietos labai sumažėja kanalo sienelės temperatūra ir pagerėja šilumos atidavimas, kuris panašiam lygyje išsilaiko per visą likusį kanalo ilgį. Išanalizavus modeliavimo rezultatus buvo pasiūlytos apibendrinančios priklausomybės tėkmės nestabilumo padėčiai pagal kanalo ilgį įvertinti ir šilumos atidavimui skaičiuoti laminarinio tekėjimo zonoje.

Šiame straipsnyje pateikti skaitiniai laminarinės mišrios konvekcijos, esant sūkuriniam oro tekėjimui, modeliavimo simetriškai kaitinamame vertikaliame plokščiame kanale, esant priešingų krypčių tėkmėms, rezultatai.

2. SKAITINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Modeliavimas atliktas programa FLUENT 6.1, kuri plačiai taikoma visame pasaulyje modeliuojant taktųjų

medžiagų judėjimą ir šilumos mainus sudėtingose dvimatėse ar trimatėse sistemose [2]. Tekėjimo režimas, kai $Re_{in} = 2130$, modeliuotas ir nestacionariai bei kvazistacionariai, o režimas, kai $Re_{in} = 4310$, – tik kvazistacionariai.

Buvo modeliuojamas dvimatis oro tėkmės judėjimas plokščiamame (aukštis 0,0408 m, ilgis 6 m), vertikaliame, simetriškai kaitinamame kanale esant priešingoms natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptims, kai slėgis kanale $p = 0,4$ MPa; Reinoldso skaičius įtekėjime buvo 2130 ir 4310, o Gr_q buvo keičiamas nuo $7,6 \cdot 10^7$ iki $3,1 \cdot 10^9$. Kaitinimo galingumas ant sienelės buvo keičiamas plačiame diapazone (nuo 1 W/m² iki galingumo, naudoto eksperimento metu), siekiant sumodeliuoti skirtingą termogravitacijos jėgų poveikį.

Eksperimentinio ruožo aprašymas ir pagrindiniai matmenys bei tyrimo metodika pateikti literatūroje [3]. Taigi modeliavimas atliktas esant tokioms pat sąlygoms, kaip ir eksperimento metu, t. y. esant tokiam pat užtekančios tėkmės greičiui, slėgiui, temperatūrai, o kvazistacionaraus tekėjimo atveju dar ir keičiant sienelės kaitinimą.

Mūsų eksperimento atveju visi tekėjimo režimai modeliuoti laminarinio tekėjimo lygtimis, t. y. naudotos dvimatės Navje–Stokso bei energijos lygtys, aprašančios šilumos mainus ir tėkmės charakteristikas:

Tėkmės nepertraukiamumo lygtis:

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

Judėsio lygtis atskiroms greičio komponentėms (u_x ir u_y):

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

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

Kaip matyti, u_x greičio komponentės lygtyje yra papildomas narys „ ρg “. Šis narys įvertina termogravitacijos jėgų poveikį (x ašis yra išilginė modelio ašis).

Energijos lygtis:

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

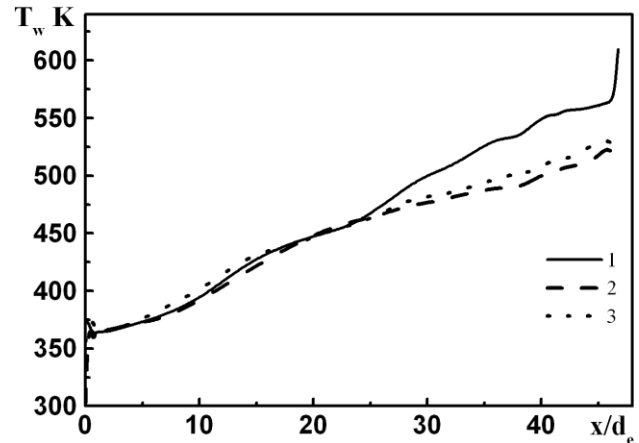
Šios lygtys sprendžiamos esant tokioms pradinėms ir ribinėms sąlygoms:

– įtekėjime ($x = 0$): kai $t = 0$, $u_x = u_{in}$; $u_y = 0$;
 $i = i_m$;

– ant sienelės ($y = 0$ arba $y = h$): $u_x = u_y = 0$;
 $q_{wl} = q_{wl}$.

Kvazistacionaraus tekėjimo atveju naudojamos lygtys yra tokios pat, tik jose atitinkami nariai nekinta pagal laiką.

Kaip ir pirmajame šios serijos straipsnyje [1], čia irgi buvo išbandyti tie patys tinkleliai. Siekiant užtikrinti skaičiavimo rezultatų patikimumą, palyginamieji skaičiavimai atlikti esant kvazistacionariam tekėjimui,



1 pav. Suvidutintinos sienelės temperatūros priklausomybė nuo tinklelio dydžio, kai $Re_{in} = 4310$ ir $Gr_q = 2,5 \cdot 10^9$: 1 – 30×2200 ; 2 – 50×6000 ; 3 – 60×7500

didžiausiam Re_{in} skaičiui ir dideliame sienelės kaitinime ($Gr_q = 2,5 \cdot 10^9$). Nagrinėta, kaip keičiasi kanalo sienelės temperatūra pagal jo ilgį. Visų pirma išbandytas 30×2200 tinklelis, o juo gauti rezultatai parodyti 1 paveiksle (1 kreivė).

Po to skaičiavimai pakartoti 50×6000 ir 60×7500 dydžio tinkleliais. Modeliavimo šiais tinkleliais rezultatai taip pat parodyti 1 paveiksle (2, 3 kreivės). Kaip matyti, kai $x/d_e < 25$, visais trimis tinkleliais apskaičiuotos sienelės temperatūros beveik nesiskiria. Nuo $x/d_e \geq 25$ iki kanalo galo pirmas tinklelis (30×2200) rodo žymų sienelės temperatūros padidėjimą, o rezultatai, gauti antru ir trečiu tinkleliais, šioje kanalo dalyje tokio padidėjimo nerodo ir praktiškai sutampa. Todėl trečiasis tinklelis (60×7500) ir buvo naudojamas, nagrinėjant sūkurinį tekėjimą [1].

Pirmame šios serijos straipsnyje 1 tinklelis irgi parodė blogesnius rezultatus, palyginus su kitais dviem tinkleliais. O modeliavimo antru ir trečiu tinkleliais rezultatai tėkmės laminarinėje dalyje ir jos perėjimo taško vietoje visiškai sutapo.

Literatūroje [4] nurodoma, kad tokiais medžiagai tekant kanalais apytikris trimačio tinklelio taškų skaičius, modeliuojant tiesiogiai, gali būti apskaičiuotas pagal išraišką: $N = (0,088 Re)^{9/4}$. Šioje formulėje būdingi parametrai, priklausantys Re skaičiui, yra tėkmės greitis ir kanalo aukštis. Vienmačiu atveju laipsnio rodiklis būtų ne $9/4$, o $3/4$, išskaičiavę gautume, jog tokiu atveju tinklelis turėtų būti $\approx 53 \times 7750$. Taigi mūsų naudotas tinklelis yra labai artimas tam, koks turėtų būti modeliuojant tiesiogiai (modeliuojant tiesiogiai reikalavimai tinklelio dydžiui yra patys aukščiausi, lyginant su visais kitais skaitiniais modeliais). Todėl visi tolesni skaičiavimai atlikti naudojant 60×7500 dydžio tinklelį.

3. TYRIMŲ REZULTATAI MODELIOJANT NESTACIONARŲ TEKĖJIMĄ

Nestacionarus skaitinis modeliavimas buvo atliktas, kai $Re_{in} = 2130$ ir $Bo_{2m} = 9,980$, esant simetriniam sienelės kaitinimui (eksperimento sąlygos). Greičių profiliai

2 pav., a rodo, kad bet kuriuo laiko momentu tėkmė kanalo centre juda žemyn, t. y. priverstinio tekėjimo kryptimi, o greičio profilis nėra simetriškas. Laiko momentu $t = 40,6$ s (2 pav., a, 1 kreivė) matyti, jog kanale prie kairiosios sienelės grįžtamas tekėjimas užima didesnę skerspjūvio dalį nei prie dešinėsios, o priverstinio tekėjimo tėkmės greičio maksimali reikšmė yra beveik ties kanalo centru ($y/h \approx 0,5$). Kitu laiko momentu, kai $t = 41,36$ s (2 pav., a, 2 kreivė), tėkmė taip pat prie abiejų kanalo sienelių yra nukreipta aukštyn, tačiau lyginant su laiko momentu $t = 40,6$ s, matyti, jog grįžtamas tekėjimas prie kairiosios kanalo sienelės užima dar didesnę skerspjūvio dalį, o prie dešinėsios jis yra sumažėjęs, taip pat matyti, kad priverstinio tekėjimo greičio maksimalios reikšmės vieta yra pasislinkusi dešiniau ($y/h \approx 0,6$) kanalo centro atžvilgiu. Vėlesniu laiko momentu, kai $t = 42,6$ s (2 pav., a, 3 kreivė), grįžtamas tekėjimas prie dešinės kanalo sienelės užima didesnę skerspjūvio dalį negu prie kairės. Priverstinio tekėjimo greičio profilio maksimali reikšmė šiuo atveju jau yra pasislinkusi kairiau kanalo centro atžvilgiu ($y/h \approx 0,4$).

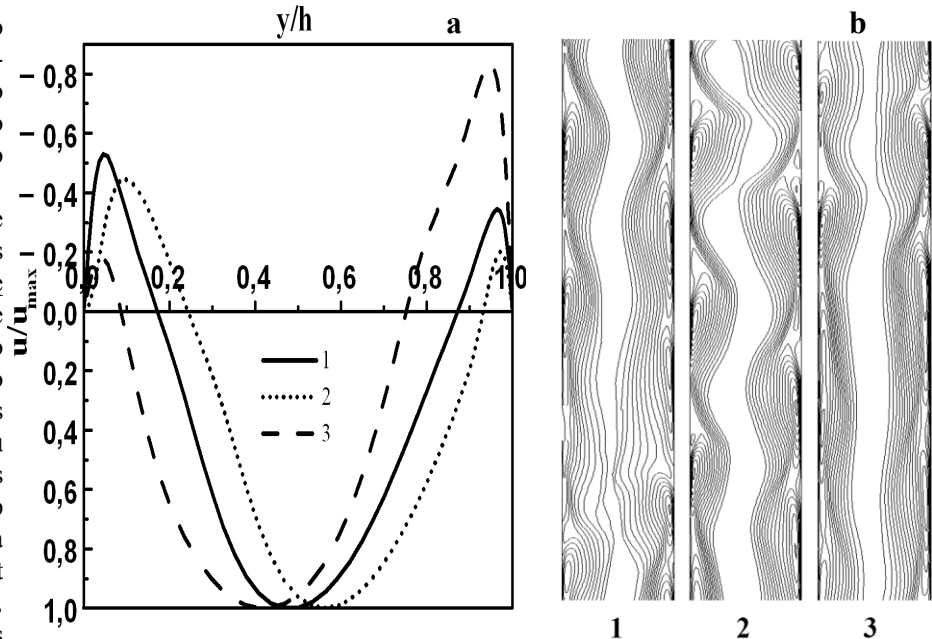
Laiko momentu $t = 40,8$ s tėkmės struktūra rodo (2 pav., b, 1 vaizdas), kad prie kanalo sienelių formuojasi lokaliniai sūkuriai. Jie išsidėsto šachmatine tvarka tai prie vienos, tai prie kitos kanalo sienelės, dėl to iškreipiamas greičio profilis ir tėkmė kanalo centre įgauna sinusoidės pobūdį. Kitu laiko momentu, kai $t = 41,36$ s (2 pav., b, 2 vaizdas), tėkmėje, prie kanalo sienelių taip pat matyti susidarę sūkuriai, tačiau jų padėtis yra kiek kitoje vietoje, o dar kitu laiko momentu, kai $t = 42,6$ s (2 pav., b, 3 vaizdas), sūkuriukai jau yra vėl kitoje vietoje prie sienelės. Atlikus tokius stebėjimus, galima daryti išvadą, kad palaipsniui sūkuriai slenka išilgai kanalo sienelių, priešinga priverstinio tekėjimo kryptimi.

Dėl sūkurių susidarymo kanalo sienelės temperatūra pulsuojančiai kinta pagal kanalo ilgį (3 pav.).

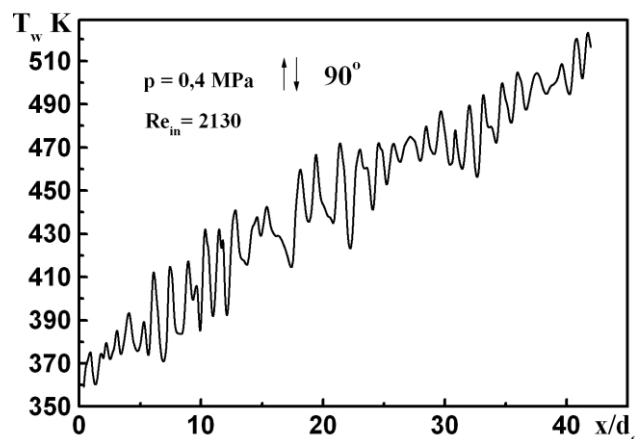
Nestacionaraus režimo modeliavimas reikalauja labai daug kompiuterinių išteklių ir laiko, todėl buvo padarytas supaprastinimas ir toliau toks tekėjimas modeliuotas kaip kvazistacionarus.

4. TYRIMŲ REZULTATAI MODELIOJANT KVAZISTACIONARŲ TEKĖJIMĄ

Šiuo atveju skaitinis modeliavimas buvo atliktas esant dviem Reynolds skaičiams – $Re_{in} = 2130$,



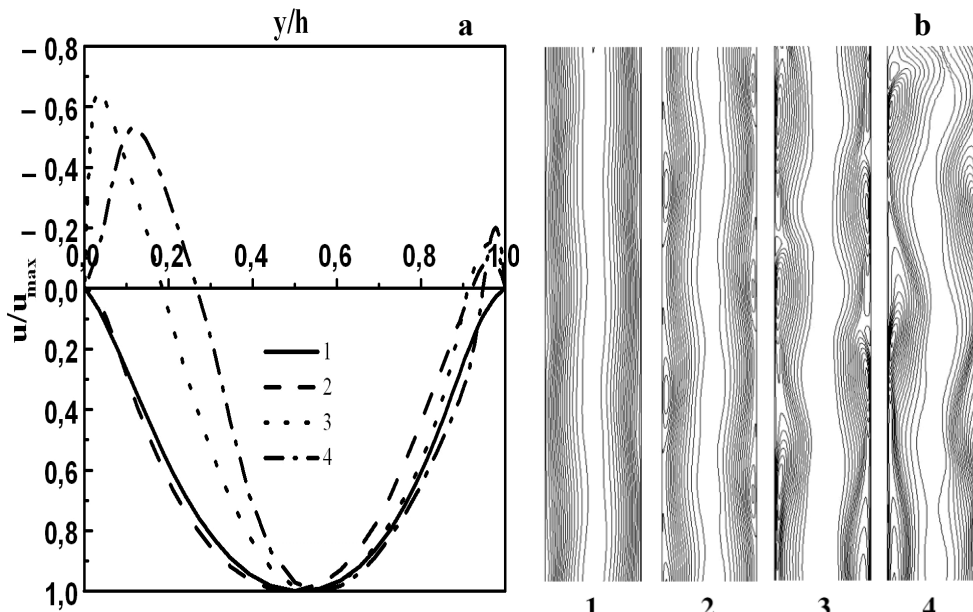
2 pav. Greičių profilių (a) (skerspjūvyje $x/d_e = 25,7$) ir tėkmės struktūros (b) kitimas vertikaliame plokščiame kanale (tarp skerspjūvių $x/d_e = 24$ ir $x/d_e = 28$) priklausomai nuo laiko momento t , kai $Bo_{2in} = 9,980$ ir $Re_{in} = 2130$: 1 – $t = 40,8$ s; 2 – $t = 41,36$ s; 3 – $t = 42,6$ s



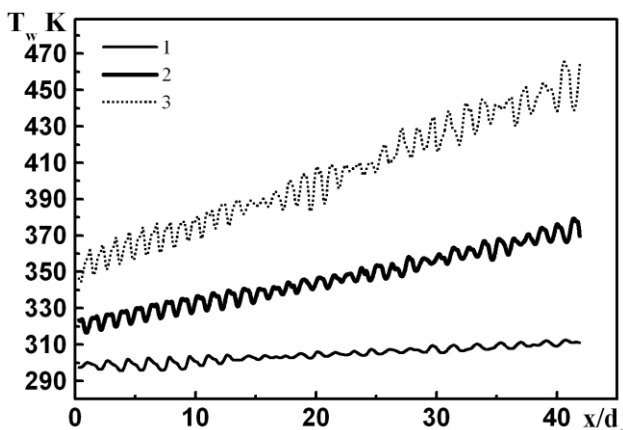
3 pav. Sienelės temperatūros kitimas pagal kanalo ilgį laiko momentu $t = 42,6$ s, kai $Re_{in} = 2130$, $Bo_{2in} = 9,980$

$Re_{in} = 4310$ – bei esant simetriniam sienelės kaitinimui, kuris buvo keičiamas plačiame diapazone siekiant sumodeliuoti skirtingą termogravitacijos jėgų poveikį.

4 pav., a parodyti greičių profiliai, kai $Re_{in} = 2130$ (skerspjūvyje $x/d_e = 25,7$), rodo, jog esant nedideliame sienelės kaitinimui (4 pav., a, 1 kreivė) oro tėkmė per visą kanalo skerspjūvį nukreipta žemyn (pagal priverstinio tekėjimo kryptį), o greičio profilis simetriškas. Didinant kaitinimą (didėja ir termogravitacijos jėgų poveikis) greičio profilis tampa nesimetriškas (4 pav., a, 2 kreivė), be to, prie dešinės sienelės oro tėkmė jau nukreipta aukštyn. Toliau didinant kaitinimą oro tėkmė jau prie abiejų kanalo sienelių yra nukreipta aukštyn, o kanalo centre – žemyn (t. y. išlaiko priverstinio tekėjimo kryptį). Greičio profilis taip pat yra nesimetriškas (4 pav., a, 3 kreivė). Dar daugiau



4 pav. Greičių profilių (a) (skerspjūvyje $x/d_e = 25,7$) ir tėkmės struktūros (b) kitimas vertikaliame plokščiajame kanale (tarp skerspjūvių $x/d_e = 24$ ir $x/d_e = 28$) priklausomai nuo termogravitacijos parametro Bo_{2in} , kai $Re_{in} = 2130$: 1 – $Bo_{2in} = 0,017$; 2 – $Bo_{2in} = 0,166$; 3 – $Bo_{2in} = 5,807$; 4 – $Bo_{2in} = 9,980$



5 pav. Sienelės temperatūros kitimo pagal kanalo ilgį priklausomybė nuo Bo_{2in} , kai $Re_{in} = 2130$: 1 – $Bo_{2in} = 0,83$; 2 – $Bo_{2in} = 3,31$; 3 – $Bo_{2in} = 7,46$

padidinus kaitinimą (tai jau atitinka eksperimento sąlygas) greičio profilis dar labiau deformuojamas (4 pav., a, 4 kreivė).

4 pav. b parodytas tėkmės struktūros kitimas priklausomai nuo termogravitacijos jėgų poveikio. Esant silpnam termogravitacijos jėgų poveikiui, matyti, kad tėkmėje nėra jokių deformacijų (4 pav., b, 1 vaizdas). Padidinus termogravitacijos jėgų poveikį (4 pav., b, 2 vaizdas), kanale tai prie vienos, tai prie kitos sienelės pradeda formotis nežymūs lokaliniai sūkurių. Labiau padidinus kaitinimą (4 pav., b, 3 ir 4 vaizdai) jau aiškiai matyti susiformavę ir šachmatine tvarka išsidėstę sūkurių prie kanalo sienelių. Dėl šachmatiškai išsidėstusių sūkurių prie kanalo sienelių tėkmė kanalo centre įgauna sinusoidės pobūdį. Taigi matyti, kad čia irgi susidaro tokios pat tėkmės struktūros kaip ir nestacionaraus tekėjimo atveju.

Buvo analizuotas ir sienelės temperatūros kitimas priklausomai nuo termogravitacijos parametro Bo_{2in} dydžio. Kol kaitinimas nedidelis, sienelės temperatūra tolygiai didėja pagal kanalo ilgį, tačiau pulsacinio kitimo dar nėra, nes nėra atgalinio tekėjimo ir tėkmė per visą kanalo skerspjūvį juda pagal priverstinio tekėjimo kryptį. Padidinus kaitinimą sienelės temperatūros kitimas pagal kanalo ilgį jau nėra tolygus – susidarę sūkurių prie sienelių sukelia nežymų jos temperatūros pulsacinį kitimą

(5 pav., 1 kreivė) pagal kanalo ilgį.

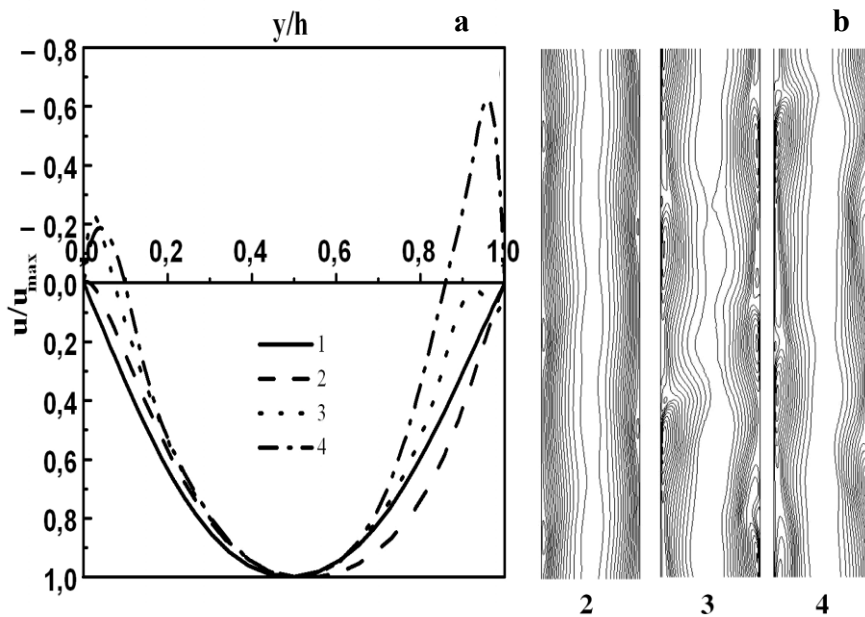
Dar daugiau padidinus šilumos srautą ant sienelių, jos temperatūra dar labiau padidėja, greičio profilis labiau deformuojamas, tai, aišku, sukelia ir didesnes sienelės temperatūros pulsacijas (5 pav., 2, 3 kreivės). Kadangi sūkurių šiuo atveju yra didesni, dėl to sienelės temperatūros kitimo amplitudės taip pat yra didesnės.

Panašūs greičio profiliai bei tėkmės struktūra gauti ir esant didesniam $Re_{in} = 4310$ skaičiui (6 pav.), tačiau šiuo atveju grįžtamas tekėjimas prie sienelių ir tėkmės asimetriškumas atsiranda esant didesniam sienelės kaitinimui, nei tuo atveju, kai $Re_{in} = 2130$. Kaip ir ankstesniu atveju, šie rezultatai irgi rodo, kad profilio nesimetriškumas susijęs su natūralios tėkmės atsiradimu prie kanalo sienelių, nes dėl jos atsiranda antriniai tekėjimai tai prie vienos, tai prie kitos kanalo sienelės (šachmatinis išsidėstymas). Tėkmė kanalo centre išlaiko priverstinio judėjimo kryptį, bet įgauna sinusoidės charakterį, t. y. gauti rezultatai tokie, kaip ir nestacionaraus tekėjimo atveju.

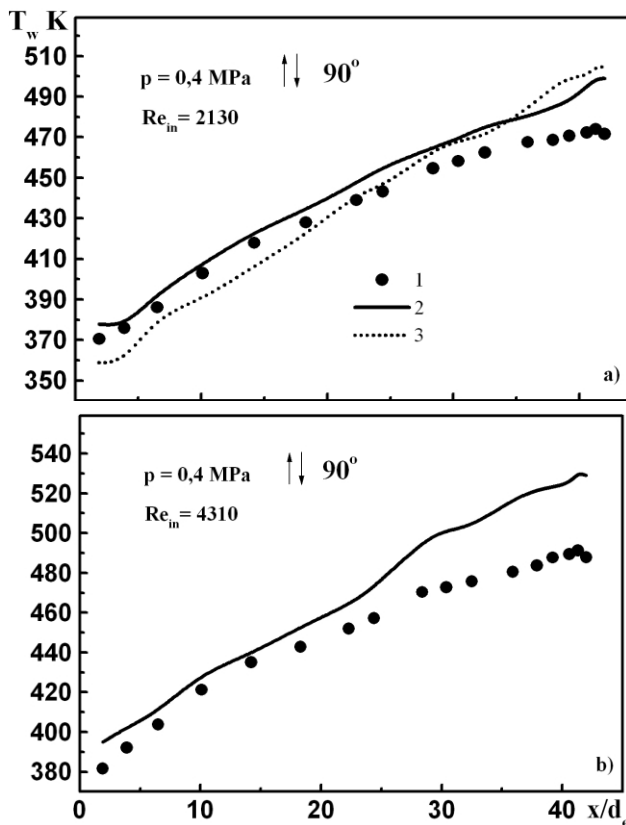
Susiformavęs cirkuliacinis, šachmatiškai išsidėstęs tekėjimas prie kanalo sienelių žinoma stipriai paveikia kanalo sienelės temperatūros kitimą pagal jo ilgį. Jau kai $Bo_{2in} = 0,029$, zonoje prie sienelių atsiranda pulsacinis temperatūros kitimas pagal kanalo ilgį dėl periodiškai pasikartojančių, šachmatiškai išsidėstusių lokalinių sūkurių tose vietose.

5. Palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais

Patogiausia šiuo atveju palyginti suvidutintą pagal laiką sienelės temperatūros kitimą pagal kanalo ilgį.



6 pav. Greičių profilių (a) ir tėkmės struktūros (b) kitimas vertikaliame plokščiame kanale (tarp skerspjūvių $x/d_e = 24$ ir $x/d_e = 28$) priklausomai nuo termogravitacijos parametro Bo_{2in} , kai $Re_{in} = 4310$: 1 – $Bo_{2in} = 0,00258$; 2 – $Bo_{2in} = 0,029$; 3 – $Bo_{2in} = 1,71$; 4 – $Bo_{2in} = 2,8$



7 pav. Sienelės temperatūros kitimas pagal kanalo ilgį. 1 – eksperimentiniai duomenys; 2 – skaičiavimo rezultatai (kvazistacionarus tekėjimas); 3 – skaičiavimo rezultatai (nestacionarus tekėjimas)

Atvejui, kai $Re_{in} = 2130$, suvidutintintos sienelės temperatūros reikšmės pagal kanalo ilgį tuose pačiuose taškuose, kuriuose temperatūra yra matuojama

eksperimento metu, parodytos 7 pav., a (3 kreivė). Matyti, kad nestacionaraus modeliavimo rezultatai neblogai sutampa su eksperimentiniais duomenimis.

Modeliuojant kvazistacionarų tekėjimą ir nusistovėjus sprendiniui, sienelės temperatūros buvo įvertinamos kas tam tikrą iteracijų skaičių ir po to suvidutininamos pagal sienelės temperatūros failų skaičių. Sienelės temperatūros reikšmės tuose pačiuose taškuose, kaip ir yra matuojama kanale eksperimento metu, parodytos 7 pav., a (2 kreivė). Šiuo atveju rezultatai taip pat neblogai sutampa su eksperimentiniais duomenimis (didžiausia neapibrėžtis 5,2%, kai $x/d_e \approx 40$). Kaip matyti, modeliuojant nestacionarų tekėjimą iki $x/d_e \approx 20$ gaunama šiek tiek žemesnė ($\approx 3\%$) sienelės

temperatūra nei kvazistacionaraus modeliavimo atveju, o toliau rezultatai beveik nesiskiria.

Kai $Re_{in} = 4310$, suvidutintinta sienelės temperatūra (7 pav., b) neblogai sutampa (didžiausias skirtumas tik 1,3%) su eksperimentiniais rezultatais tik iki $x/d_e \leq 25$. Esant didesniems x/d_e skaičiams rodo aukštesnę (iki 6%) sienelės temperatūrą nei eksperimentai. Čia tikriausiai įtakos turi tėkmės stacionarumas.

6. IŠVADOS

Atlikus dvimatį modeliavimą plokščiame, simetriškai kaitinamame kanale sūkurinio tekėjimo zonoje galima padaryti tokias išvadas:

1. Skaitinis modeliavimas rodo, kad didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui prie kanalo sienelių susiformuoja lokalinės cirkuliacinės tėkmės, išsidėsčiusios šachmatine tvarka pagal kanalo ilgį, kurios sukelia greičio profilių nesimetriškumą bei pulsacinį sienelės temperatūros kitimą pagal kanalo ilgį.

2. Modeliuojant kvazistacionarų tekėjimą gauti rezultatai labai artimi rezultatams, gautiems modeliuojant nestacionarų tekėjimą.

3. Kai $Re_{in} = 2130$, suvidutintinta kanalo sienelės temperatūra tiek nestacionaraus, tiek kvazistacionaraus modeliavimo atveju neblogai sutampa su eksperimentinių tyrimų duomenimis, ir tai rodo, jog susiformavę laminariniai sūkuriai turi lemiamą įtaką šilumos atidavimo padidėjimui. Kai Re_{in} yra didesni ($Re_{in} = 4310$), modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai sutampa blogiau, ir tai rodo, jog stacionarios laminarinio tekėjimo ir energijos lygtys nevisiškai atspindi susiformavusį sūkurinį tekėjimą.

Pažymėjimai

- c_p – savitoji šiluma J/(kg · K);
 b – kanalo plotis m;
 d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo, $d_e = 2(h \cdot b) / (h + b)$, m;
 g – laisvojo kritimo pagreitis m/s²;
 h – kanalo aukštis m;
 t – laikas s;
 q – šilumos srauto tankis W/m²;
 i – entalpija J/kg;
 N – celių skaičius;
 p – slėgis Pa;
 t – laikas s;
 T – temperatūra K;
 u – vidutinis masinis tėkmės greitis m/s;
 x – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė) m;
 y – skersinė koordinatė m;
 β – tūrinio plėtimosi koeficientas 1/K;
 λ – šilumos laidumo koeficientas W/(m · K);
 μ – dinaminio klampumo koeficientas Pa · s;
 ν – kinematinio klampumo koeficientas m²/s;
 ρ – tankis kg/m³.

Nedimensiniai parametrai

- Bo_2 – termogravitacijos parametras, $Bo_2 = Gr_q / (Re^{2.5} Pr)$;
 Gr_q – Grashofo skaičius, $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / \nu^2 \cdot \lambda$;
 Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \mu c_p / \lambda$;
 Re – Reinoldso skaičius, $Re = u_f d_e / \nu$.

Indeksai

- I – pirma sienelė;
 II – antra sienelė;
 max – maksimalus;
 in – įtekėjime;
 w – ant sienelės;
 x – išilginė dedamoji;
 y – skersinė dedamoji.

Gauta 2005 09 20

Literatūra

- Sirvydas A., Poškas R. Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptų tėkmėse. 1. Laminarinė mišri konvekcija bei perėjimas į sukurtinį tekėjimą esant simetriniam dvipusiam kaitinimui // Energetika. 2005. Nr. 3. P. 10–16.
- Fluent 6.1 documentation // Fluent inc. 2002.
- Poškas R., Poškas P., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiaame kanale turbulentinės mišrios konvekcijos atveju, esant priešingų kryptų srautams bei vienpusiam kaitinimui, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 53–60.
- Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD // DCW Industries, La Canada, California, 1993.

Arūnas Sirvydas, Robertas Poškas

NUMERICAL INVESTIGATIONS OF OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN VERTICAL FLAT CHANNEL
2. VORTEX FLOW IN CASE OF SYMMETRICAL HEATING

Summary

We present the results on numerical investigation of the local opposing mixed convection heat transfer in a vertical flat channel with symmetrical heating at low Reynolds numbers. Numerical two-dimensional simulation was performed for the same channel and for the same conditions as in the experiment using the FLUENT 6.1 code. The unsteady flow investigations were performed in airflow for the experimental conditions at the Reynolds number 2130 and Grashof number $6.2 \cdot 10^8$. Quasi-steady flow investigations were performed for two Reynolds numbers (2130 and 4310) and the Grashof number up to $3.1 \cdot 10^9$ in order to simulate the buoyancy effect on the flow structure.

In both steady and quasi-steady modelling cases the results demonstrated that under the high buoyancy effect the checkerwise local circular flow took place near the heated walls. This made velocity profiles asymmetrical and caused pulsations of the wall temperature.

Wall temperature had a pulsatory character, however, the resulting averaged values correlated rather well with experimental data for steady and quasi-steady cases for $Re_{in} = 2130$. For $Re_{in} = 4310$, the resulting averaged values for $x/d_e \leq 25$ correlated rather well with experimental data. When $x/d_e > 25$, the difference between the experimental and the calculated wall temperature was increasing, possibly due to a steady flow and heat transfer modelling.

Key words: numerical simulation, vertical flat channel, two-side symmetrical heating, opposing mixed convection, region of vertical air flow, comparison with experiments

Арунас Сирвидас, Робертас Пошкас

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В СИММЕТРИЧНО НАГРЕВАЕМОМ ПЛОСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОВ
2. ВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ДВУХСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ

Резюме

В настоящей работе приводятся данные экспериментального и численного исследования местной теплоотдачи в симметрично нагреваемом плоском вертикальном канале в зоне ламинарно-вихревого течения при противоположных направлениях смешанной конвекции. Моделирование проводилось в потоке воздуха при нестационарном течении для $Re_{in} = 2130$ и $Gr_q = 6,2 \cdot 10^8$ и при квазистационарном течении

для двух чисел $Re_m = 2130$ и 4310 . В последнем случае в целях выявления эффекта термогравитационных сил на структуру потока число Грасгофа изменялось от $7,6 \cdot 10^7$ до $3,1 \cdot 10^9$.

Для численного исследования использована компьютерная программа FLUENT 6.1. Получено, что как при нестационарном, так как и при квазистационарном моделировании у стенок канала появляются локальные вихри, расположенные в шахматном порядке. Это вызывает асимметричность профилей скорости и пульсации температур стенки.

Осреднённая температура стенки довольно хорошо совпадает с экспериментальными данными как при нестационарном, так и при квазистационарном

моделировании, когда $Re_m = 2130$. Когда $Re_m = 4310$, осреднённая температура стенки довольно хорошо совпадает с экспериментальными данными при $x/d_e \leq 25$. Когда $x/d_e > 25$, разница между экспериментальной и рассчитанной температурами увеличивается. Возможно, здесь определённую роль играет стационарность потока и теплоотдачи, которые данная модель уже не может учитывать.

Ключевые слова: численное моделирование, вертикальный плоский канал, симметричный двухсторонний нагрев, смешанная конвекция, противоположные направления, вихревое течение, сравнение с экспериментами