ENERGETIKA. 2005. Nr. 3. P. 10–16


# Ðilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokðèiame kanale miðrios konvekcijos atveju prieðingø krypèiø tëkmëse
# 1. Laminarinë miðri konvekcija bei perëjimas á sûkuriná tekëjimà esant simetriniam dvipusiam kaitinimui

**Arûnas Sirvydas,**

**Robertas Poðkas**

*Lietuvos energetikos institutas,*
*Branduolinës inþinerijos problemø laboratorija, Breslaujos g. 3,*
*LT-44403 Kaunas*

Ðiame straipsnyje pateikti ðilumos atidavimo vertikaliame plokðèiame kanale miðrios konvekcijos atveju prieðingø krypèiø tëkmëse, esant laminariniam dujø (oro) tekëjimui, skaitinio modeliavimo rezultatai. Dvimatis modeliavimas atliktas programa FLUENT 6.1 esant 0,1; 0,2 ir 0,4 MPa absoliutiniam oro slëgiui, kai Reinoldso skaièius ($Re_{in}$) buvo keièiamas nuo 1500 iki 4310, o Grashofo ($Gr_{q\ in}$) skaièius – nuo $1{,}65 \cdot 10^5$ iki $3{,}1 \cdot 10^9$, siekiant iðryðkinti termogravitacijos jëgø poveiká ðilumos atidavimui.

Modeliavimas parodë, jog esant nedideliam termogravitacijos jëgø poveikiui, oro tëkmë visuose kanalo skerspjûviuose yra nukreipta þemyn, t. y. juda priverstinio tekëjimo kryptimi. Didëjant termogravitacijos jëgø poveikiui stebimas oro tëkmës atitrûkimas nuo sieneliø tam tikroje kanalo vietoje. Toliau didinant kaitinimà didëja ir termogravitacijos jëgø poveikis, ir tëkmës atitrûkimo vieta pasislenka kaitinimo pradþios link. Nuo tëkmës atitrûkimo vietos gerokai sumaþëja kanalo sienelës temperatûra ir pagerëja ðilumos atidavimas, kuris panaðiame lygyje iðsilaiko per visà likusá kanalo ilgá.

Iðanalizavus modeliavimo rezultatus gautos apibendrinanèios priklausomybës tëkmës nestabilumo padëèiai pagal kanalo ilgá ávertinti ir ðilumos atidavimui skaièiuoti laminarinio tekëjimo zonoje.

**Raktaþodþiai**: ðilumos mainai, oro tëkmë, laminarinë miðri konvekcija, perëjimas á sûkuriná tekëjimà, vertikalus plokðèias kanalas, simetrinis kaitinimas, skaitinis modeliavimas

## 1. ÁVADAS

Daugelyje fizikiniø sistemø svorio jëgos laukas yra pagrindinis veiksnys, sàlygojantis terpës judëjimà ir konvekciná ðilumos perneðimà. Ði svorio (termogravitacijos) jëga gali turëti didelæ átakà konvekciniams ðilumos mainams ávairios formos kanaluose ir esant priverstiniam tekëjimui. Átakos laipsnis priklauso nuo vyraujanèiø Grashofo, Reinoldso ir Prandtlio kriterijø bei nuo kanalo geometrijos.

Laminarinis ir pereinamasis tekëjimas kanaluose, esant miðriai konvekcijai, nagrinëtas darbuose [1–5]. Darbe [1] tirtas tëkmës judëjimo nestabilumas vertikaliame vamzdyje á jo centrinæ dalá ápurðkiant daþus ir stebint tëkmæ vizualiai. Vienkrypèiø tëkmiø atveju praradus tekëjimo stabilumà daþø siûlelis ágaudavo sinusoidës formà ir bûdavo fiksuojamos sienelës temperatûros pulsacijos. Didinant termogravitacijos jëgø poveiká daþø siûlelio sinusoidinio judëjimo amplitudë padidëdavo, kol galiausiai siûlelis bûdavo suardomas. Konstatuota, jog tëkmës nestabilumo atsiradimas priklauso ne tik nuo termogravitacijos jëgos dydþio, bet ir nuo kanalo ilgio ($x/d_e$).

Darbuose [2, 3] pabrëþiama, jog persilenkimo taðkø atsiradimas greièio profiliuose ir ypaè atgalinio tekëjimo atsiradimas skatina laminarinio tekëjimo stabilumo praradimà ir perëjimà prie turbulencinio tekëjimo. Tokiu atveju perëjimas ið laminarinio tekëjimo á turbulenciná ávyksta, kai Re < 2300 (t. y. nepasiekus kritinio Re skaièiaus áprastinëmis sàlygomis).

Darbe [2] pasiûlyta priklausomybë, kuri, esant vienkryptëms tëkmëms vamzdyje, ágalina nustatyti nedimensiná atstumà nuo kanalo kaitinimo pradþios, kuriame laminarinis tekëjimas praranda stabilumà:

$$X_{cr} = 12{,}9\left(\frac{\mathrm{Gr}_q}{\mathrm{Re}}\right)^{-0{,}8}. \qquad (1)$$

Ði formulë galioja, kai $300 < \mathrm{Re} \le 2 \cdot 10^3$, $0{,}6 < \mathrm{Pr} < 10$.

Ðilumos atidavimui skaièiuoti laminarinës miðrios konvekcijos atveju esant vienkryptëms tëkmëms, kai $250 < \mathrm{Re} \le 2 \cdot 10^3$, $0{,}6 < \mathrm{Pr} < 10$ ir $\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re} < 2{,}6 \cdot 10^4$, pasiûlyta priklausomybë [2]:

$$\frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Nu}_l} = \left(1 + \frac{\mathrm{Gr}_q}{\mathrm{Re}\cdot B}\right)^{0{,}27}; \qquad (2)$$

èia $B$ – dydis, priklausantis nuo parametro $X$:

$B = 5{,}4 \cdot X^{-1} + 312 \cdot X^{1/4}$, kai $X \le 0{,}07$,

$B = 240$, kai $X > 0{,}07$.

Á (2) formulæ, kai $X > 0{,}07$, neátraukus vieneto kaip maþo dydþio, ji taptø Holmano [4] priklausomybe stabilizuotam ðilumos atidavimui skaièiuoti:

$$\mathrm{Nu} = 1{,}45\left(\frac{\mathrm{Gr}_q}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}27}. \qquad (3)$$

Esant prieðingø krypèiø tëkmëms, visø pirma tëkmës nestabilumas fiksuojamas daþø siûleliui ágavus neþymià tëkmës asimetrijà prieð pat kaitinamà kanalo dalá. Buvo pastebëta, kad padidëjus termogravitacijos jëgø átakai tëkmë pradeda trûkèioti [5].

Prieðingø krypèiø tëkmiø atveju vamzdyje, didëjant $\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re}$ santykiui, tëkmës greitis prie kanalo sieneliø sumaþëja, o kanalo centre – padidëja. Darbe [3] nurodoma, kad, kai $\mathrm{Gr}_q/(4\mathrm{Re}) \approx 100$, greièio gradientas prie sienelës pasidaro lygus nuliui, o ðiø parametrø santykiui esant kiek didesniam, prie sienelës jau atsiranda atgalinis tekëjimas. Kai $\mathrm{Gr}_q/(4\mathrm{Re}) \approx 170$, stabilumas paþeidþiamas, prie sienelës susidaro sûkuriai, o dar labiau padidinus $\mathrm{Gr}_q/(4\mathrm{Re})$ santyká tekëjimas pereina á turbulenciná. Taèiau prieðingø krypèiø tëkmiø atveju nëra pasiûlyta apibendrinanèiø priklausomybiø nei $X_{cr}$, nei ðilumos atidavimui laminarinës miðrios konvekcijos atveju skaièiuoti.

Pirmajame straipsniø serijos „Ðilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokðèiame kanale miðrios konvekcijos atveju prieðingø krypèiø tëkmëse“ straipsnyje pateikti skaitiniai laminarinës miðrios konvekcijos modeliavimo simetriðkai kaitinamame vertikaliame plokðèiame kanale, esant prieðingø krypèiø tëkmëms, rezultatai. Taip pat pasiûlytos apibendrinanèios priklausomybës $X_{cr}$ ir ðilumos atidavimui skaièiuoti laminarinës miðrios konvekcijos atveju.

## 2. SKAITINIØ TYRIMØ METODIKA

Modeliuotas dvimatis stacionarus oro tëkmës judëjimas plokðèiame (aukðtis 0,0408 m, ilgis 6 m), vertikaliame, simetriðkai kaitinamame kanale, esant prieðingø krypèiø tëkmëms, kai absoliutinis slëgis kanale $p$ = 0,1; 0,2; 0,4 Ì Pa. Reinoldso kriterijus átekëjime buvo keièiamas nuo $1{,}5 \cdot 10^3$ iki $4{,}31 \cdot 10^3$, o $\mathrm{Gr}_q$ – nuo $1{,}65 \cdot 10^5$ iki $3{,}1 \cdot 10^9$. Ðilumos srautas ant kaitinamø sieneliø buvo keièiamas plaèiame intervale, siekiant iðryðkinti termogravitacijos jëgø poveiká. Kanalo geometrija parinkta tokia, kaip ir laboratorijoje naudojamo eksperimentinio ruoþo geometrija miðriai konvekcijai tirti. Oro slëgio, temperatûros ir $\mathrm{Re}_{in}$ reikðmës buvo parinktos tokios pat, kaip ir eksperimento metu. Tai ateityje leis geriau suprasti ir interpretuoti gautus eksperimentø duomenis.

Modeliavimas atliktas programa FLUENT 6.1. FLUENT – tai ðiuolaikinë kompiuterinës takiøjø medþiagø dinamikos programa, kuri plaèiai taikoma visame pasaulyje, modeliuojant takiøjø medþiagø judëjimà ir ðilumos mainus sudëtingose dvimatëse arba trimatëse sistemose [6]. Ði programa pagrindines tëkmës ir energijos lygtis leidþia spræsti taikant kontroliniø tûriø metodà.

Mûsø atveju visi tekëjimo reþimai modeliuoti stacionaraus laminarinio tekëjimo lygtimis, t. y. vartotos dvimatës Navje–Stokso lygtys tëkmei apibûdinti bei energijos lygtis ðilumos perneðimui ávertinti.

Tëkmës nepertraukiamumo lygtis:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0. \qquad (4)$$

Judesio lygtis atskiroms greièio komponentëms ($u_x$ ir $u_y$):

$$\rho u_x\frac{\partial u_x}{\partial x} + \rho u_y\frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right) + \rho g, \qquad (5)$$

$$\rho u_x\frac{\partial u_y}{\partial x} + \rho u_y\frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\right). \qquad (6)$$

Kaip matyti, $u_x$ greièio komponentës (4) lygtyje yra papildomas narys $+\rho g$. Šis narys ávertina termogravitacijos jëgø poveiká prieðingø tëkmiø atveju ($x$ aðis yra iðilginë kanalo aðis).

Energijos lygtis:

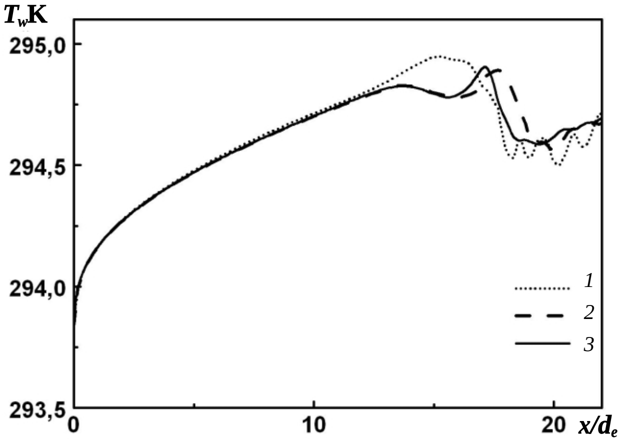
$$\rho u_x\frac{\partial i}{\partial x} + \rho u_y\frac{\partial i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}}\frac{\partial i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}}\frac{\partial i}{\partial y}\right). \qquad (7)$$

Ðios lygtys sprendþiamos esant tokioms ribinëms sàlygoms:

- átekëjime ($x = 0$): $u_x = u_{in}$; $u_y = 0$; $i = i_{in}$;
- ant sienelës ($y = 0$ arba $y = h$): $u_x = u_y = 0$; $q_{w\mathrm{I}} = q_{w\mathrm{II}} = \mathrm{const}$.

Modeliuojant svarbu sukurti tinkamà tinklelá, nes tinklelio kokybë turi labai svarbià átakà skaitinio modeliavimo tikslumui ir sprendinio stabilumui. Siekiant kuo tiksliau iðdëstyti tinklelio celes kanalo zonoje prie sieneliø (pasienio sluoksnyje), buvo remtasi [7] darbe pateiktu grafiku. Ðis grafikas atspindi hidrodinaminio ($\delta_H/h$) ir šiluminio ($\delta_T/h$) pasienio sluoksniø storius priklausomai nuo Ra (Ra – Ralëjaus skaièius, $\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr}_q \cdot \mathrm{Pr}$) skaièiaus.

Mûsø atvejui pagal didþiausià Ra skaièiø nustatèius abiejø pasienio sluoksniø santykinius storius (po tëkmës atitrûkimo) paaiðkëjo, kad ðiluminio pasienio sluoksnio storis vidutiniðkai 4 kartus maþesnis nei hidrodinaminio. Dël to, kuriant tinklelá skaièiavimui, pirmasis mazgas nuo sienelës buvo nustatytas taip, kad patektø á ðiluminá pasienio sluoksná. Tolstant nuo sieneliø kanalo centro link, tinklelio celës neþymiai didëjo. Taigi zonoje prie sieneliø tinklelio celës buvo iðdëstytos gana tankiai, o ties kanalo centru ðiek tiek reèiau.




**1 pav.** Sienelës temperatûros ir tëkmës nestabilumo taðko padëties priklausomybë nuo tinklelio dydþio: *1* – 30 × 2200; *2* – 50 × 6000; *3* – 60 × 7500

Išbandyti keli tinkleliai. 1 paveiksle parodyti modeliavimo rezultatai laminarinei daliai ir perëjimo (tëkmës nestabilumo) taðkui, naudojant skirtingus tinklelius.

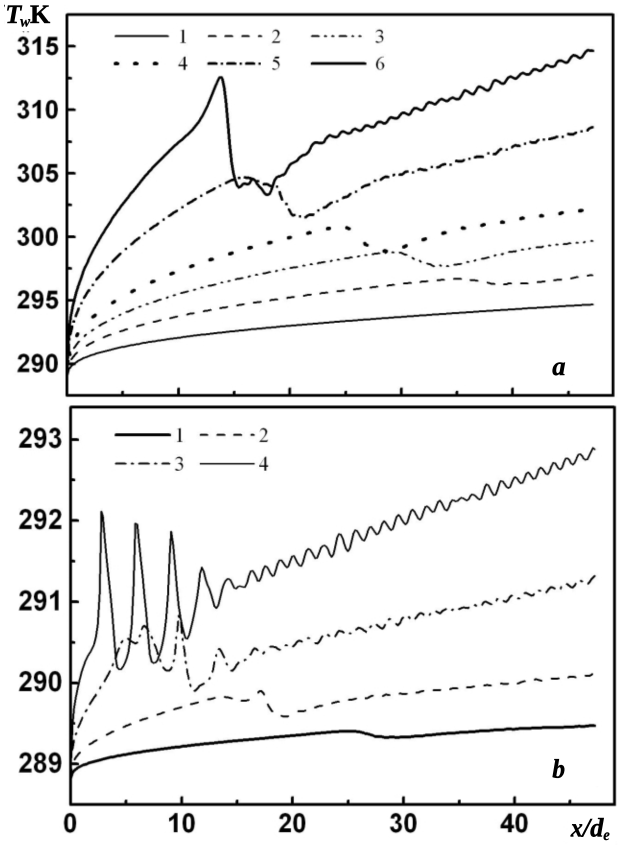
Ið pradþiø skaièiavimai atlikti 30 × 2200 tinkleliu (1 pav., 1 kreivë). Vëliau tinklelis tiek pagal kanalo aukðtá, tiek pagal ilgá buvo gerokai sutankintas ir skaièiavimai pakartoti. Modeliavimo 50 × 6000 tinkleliu rezultatai parodyti 1 paveiksle (2 kreivë). Po to tinklelis buvo dar kartà sutankintas ir skaièiavimai vël pakartoti. Modeliavimo 60 × 7500 tinkleliu rezultatai taip pat parodyti 1 paveiksle (3 kreivë).

Matyti, kad pirmuoju tinkleliu (30 × 2200) gauti rezultatai skiriasi nuo rezultatø, gautø su kitais dviem tinkleliais. Modeliavimo antruoju ir treèiuoju tinkleliais rezultatai tëkmës laminarinëje dalyje ir jos perëjimo taðko vietoje visiðkai sutapo. Todël visi tolesni skaièiavimai atlikti naudojant 60 × 7500 tinklelá.

Gautø rezultatø pirminio apdorojimo stadijoje buvo nustatomi pagrindiniai kriterijai Nu, Re, $Gr_q$ ir *X*. Juose sàlygojanèiais parametrais laikomi srauto vietiniai vidutiniai masiniai temperatûra ir greitis bei plokðèio kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_{e.}$

## 3. SKAITINIØ TYRIMØ REZULTATAI IR JØ ANALIZË

Kaip jau minëta, skaitinis modeliavimas atliktas esant keliems Reinoldso skaièiams ir skirtingam slëgiui kanale ($Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,1 MPa; $Re_{in}$ = 1500, *p* = 0,2 MPa; $Re_{in}$ = 2011, *p* = 0,2 MPa; $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,4 MPa; $Re_{in}$ = 4310, *p* = 0,4 MPa) bei simetriniam sienelës kaitinimui, kuris buvo keièiamas plaèiame diapazone norint sumodeliuoti skirtingà termogravitacijos jëgø poveiká.

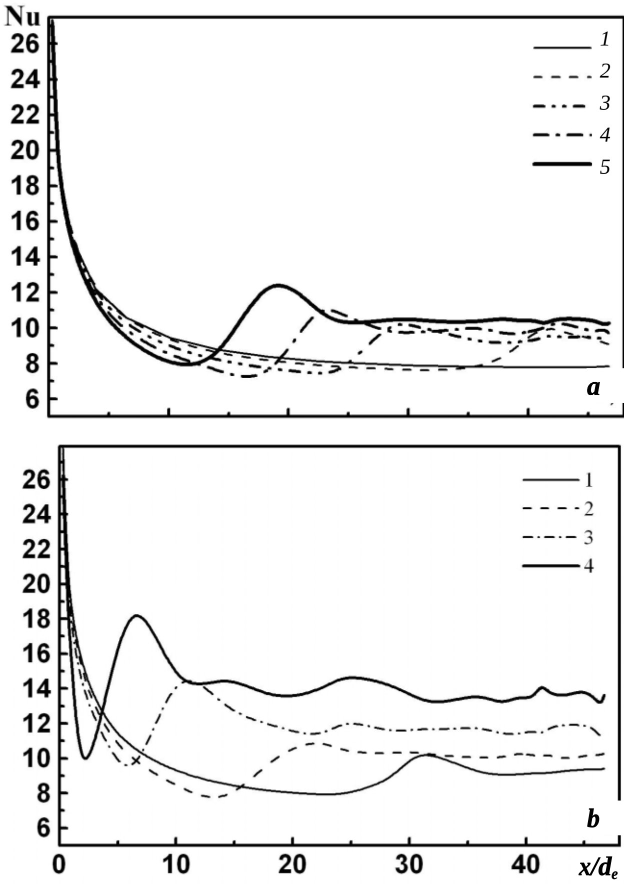



**2 pav.** Sienelës temperatûros momentinës reikðmës kitimas pagal kanalo ilgá priklausomai nuo termogravitacijos jëgø poveikio (ðilumos srauto dydþio ant sienelës), kai $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,1 MPa (*a*): *1* – $Bo_{in}$ = 757; *2* – $Bo_{in}$ = 1135; *3* – $Bo_{in}$ = 1513; *4* – $Bo_{in}$ = 1892; *5* – $Bo_{in}$ = = 2837; *6* – $Bo_{in}$ = 3784. Kai $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,4 MPa (*b*): *1* – $Bo_{in}$ = 1404; *2* – $Bo_{in}$ = 2808; *3* – $Bo_{in}$ = 5616; *4* – $Bo_{in}$ = 9828

Skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad esant nedideliam sienelës kaitinimui, jos temperatûra nuosekliai didëja pagal kanalo ilgá (2 pav. *a*, 1 kreivë). Termogravitacijos jëgø poveikis ðilumos atidavimui beveik nepasireiðkia, o tik kaupia tam tikrà nestabilumo potencialà. Labiau kaitinant (2 pav. *a*, 2 kreivë; 2 pav. *b*, 1 kreivë), didëja ir termogravitacijos jëgø poveikis, sienelës temperatûra taip pat palaipsniui didëja. Taèiau tam tikrame atstume nuo kanalo kaitinimo pradþios (2 pav. *a*, $x/d_e \approx 35$; 2 pav. *b*, $x/d_e \approx 26$) paþeidþiamas tëkmës stabilumas ir atsiranda antriniai tekëjimai. Tëkmëje, nuo jos stabilumo praradimo vietos iki pat kanalo pabaigos, prie sieneliø formuojasi sûkuriai, dël kuriø pagerëja ðilumos nuvedimas ir todël sumaþëja kanalo sienelës temperatûra. Dar labiau padidinus kaitinimà (2 pav. *a*, 3 kreivë; 2 pav. *b*, 2 kreivë) kanalo sienelës temperatûra taip pat nuosekliai didëja pagal kanalo ilgá, taèiau atstumas, nuo kurio tëkmë praranda stabilumà, yra maþesnis (2 pav. *a*, $x/d_e \approx 27$; 2 pav. *b*, $x/d_e \approx 14$) nei prieð tai buvusiu atveju. Dël anksèiau susidaranèiø sûkuriø kanalo sienelës temperatûra taip pat sumaþëja anksèiau.

Vis labiau didinant kaitinimà (2 pav. *a*, 4–6 kreivës; 2 pav. *b*, 3–4 kreivës) stebima ta pati tendencija – kanalo sienelës temperatûra nuosekliai didëja, taèiau atstumas, kuriame tëkmë iðlaiko stabilø judëjimà, vis trumpëja ir dël to kanalo sienelës temperatûros sumaþëjimas pasireiðkia anksèiau (esant maþesniam $x/d_e$).

Kai termogravitacijos jëgø poveikis didelis (2 pav. *b*, 3 ir 4 kreivës), modeliavimo rezultatai rodo, jog tëkmës stabilumo praradimo vietoje labai sumaþëja kanalo sienelës temperatûra. Taip pat matyti, jog toje vietoje formuojasi keli, didesni sûkuriai (tai rodo didesnës temperatûrø pulsacijos ir didesni atstumai tarp temperatûros pikø), o tam tikrame atstume uþ jø formuojasi daugiau, taèiau kur kas maþesniø sûkuriukø, kurie sukelia neþymias sienelës temperatûros pulsacijas.




**3 pav.** Šilumos atidavimo kitimas pagal kanalo ilgá priklausomai nuo termogravitacijos jëgø poveikio, kai $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,1 MPa (*a*): *1* – $Bo_{in}$ = 757; *2* – $Bo_{in}$ = 1135; *3* – $Bo_{in}$ = 1892; *4* – $Bo_{in}$ = 2837; *5* – $Bo_{in}$ = 3784. Kai $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,4 MPa (*b*): *1* – $Bo_{in}$ = 1404; *2* – $Bo_{in}$ = 2808; *3* – $Bo_{in}$ = 5616; *4* – $Bo_{in}$ = 9828

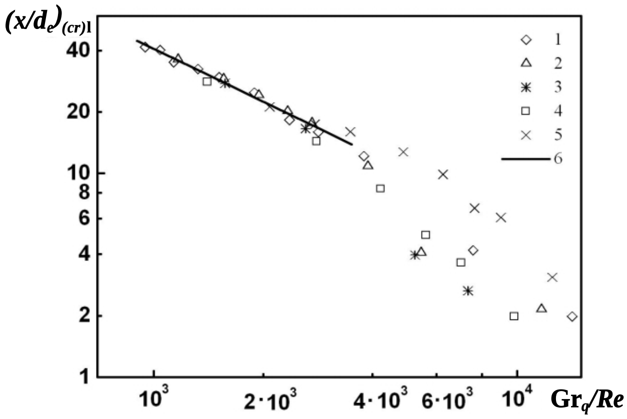
Aiðku, kad dël susidariusiø sûkuriø labai pagerëja ðilumos atidavimas kanale. Tai akivaizdþiai atspindi Nu kitimas pagal kanalo ilgá (3 pav. *a*, *b*).

Tolstant nuo kanalo kaitinimo pradþios Nu maþëja, nes storëja ðiluminis pasienio sluoksnis. Taèiau ðilumos atidavimas, esant neþymiam kaitinimui, stabilizuojasi pagal kanalo ilgá (3 pav. *a*, 1 kreivë). Kai kaitinimas didesnis, tai didëja ir termogravitacijos jëgø poveikis. Dël to prie kanalo sieneliø tëkmës greitis sumaþëja, ðilumos atidavimas taip pat sumaþëja ir tam tikrame atstume nuo kanalo kaitinimo pradþios, prie sieneliø jau atsiranda prieðingos krypties tekëjimas. Kaip matyti 3 paveiksle, ðis tekëjimo pokytis sàlygoja staigø ðilumos atidavimo padidëjimà (3 pav. *a*, 2–5 kreivës; 3 pav. *b*, 1–4 kreivës). Po to, didëjant $x/d_e$, ðilumos atidavimas neþymiai sumaþëja ir toks iðsilaiko per visà likusá kanalo ilgá.

3 paveiksle matyti, kad didëjant termogravitacijos jëgø poveikiui, atstumas nuo kaitinimo pradþios, kuriame takioji medþiaga iðlaiko stabilø tekëjimà, t. y. neatitrûksta nuo kanalo sieneliø ir nesusidaro antriniø tekëjimø, trumpëja.

## 4. TYRIMO REZULTATØ APIBENDRINIMAS

Kaip jau minëta, esant nedideliam termogravitacijos jëgø poveikiui oro tëkmë per visà kanalo skerspjûvá juda þemyn (pagal priverstinio tekëjimo kryptá), o greièio profilis simetrinis. Didinant kaitinimà (didëja ir termogravitacijos jëgø poveikis), jau kai $Gr_q/Re \approx 950$, tam tikru atstumu nuo kaitinimo pradþios tëkmë praranda stabilumà. Dar labiau padidinus kaitinimà tëkmës stabilumo praradimo taðko vieta slenkasi kanalo kaitinamos dalies pradþios link. Nedimensinio atstumo, nuo kurio tëkmë praranda stabilumà, kitimas nuo termogravitacijos jëgø poveikio, esant ávairiems tekëjimo reþimams, parodytas 4 pav.




**4 pav.** Nedimensinio atstumo, nuo kurio tëkmë praranda stabilumà, priklausomybë nuo termogravitacijos parametro $Gr_q$/Re: *1* – $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,1 MPa; *2* – $Re_{in}$ = 2011, *p* = 0,2 MPa; *3* – $Re_{in}$ = 1494, *p* = 0,2 MPa; *4* – $Re_{in}$ = 2136, *p* = 0,4 MPa; *5* – $Re_{in}$ = 4317, *p* = 0,4 MPa; *6* – pagal (8) priklausomybæ

Matyti, kad ðiose koordinatëse modeliavimo rezultatai koreliuoja tik stabilizuoto tekëjimo zonai, t. y. kai $x/d_e \geq 15$.

Èia rezultatai, kai $1490 \leq \mathrm{Re} \leq 4310$, $950 < \mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re} \leq 3000$ ir $x/d_e \geq 15$, apibendrinti priklausomybe:

$$(x/d_e)_{cr1} = 15{,}5 \cdot 10^3 \left( \frac{\mathrm{Gr}_q}{\mathrm{Re}} \right)^{-0{,}86}. \tag{8}$$

(8) priklausomybë modeliavimo rezultatus apibendrina su ne didesne kaip 9% neapibrëþtimi.

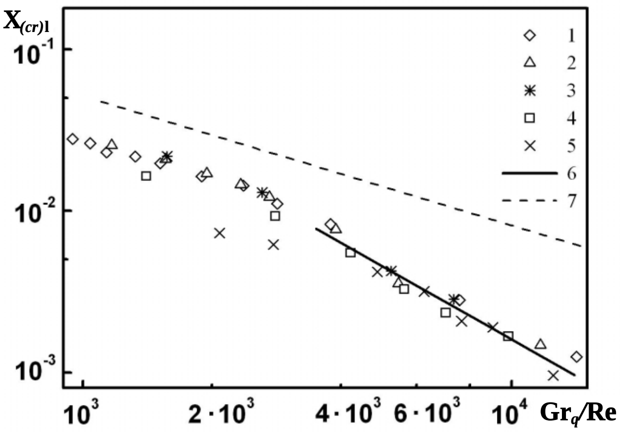
Siekiant apibendrinti rezultatus ir tuo atveju, kai $x/d_e < 15$, nedimensinis atstumas apskaièiuotas pagal priklausomybæ:

$$X_{cr1} = (x/d_e) \cdot (1/(\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr})). \tag{9}$$

Naujose koordinatëse ($X_{cr1} = f\,(\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re})$) duomenys pavaizduoti 5 pav. Kai $x/d_e < 15$, jie apibendrinti (10) priklausomybe:

$$X_{cr1} = 16 \cdot 10^2 \left( \frac{\mathrm{Gr}_q}{\mathrm{Re}} \right)^{-1{,}5}. \tag{10}$$

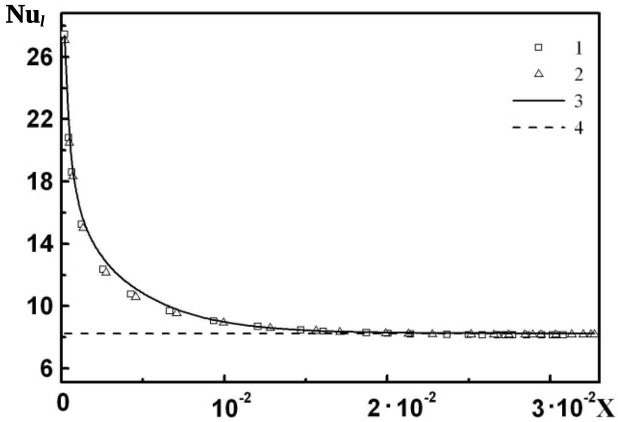
Priklausomybë (10) modeliavimo rezultatus ($1490 \leq \mathrm{Re} \leq 4310$, $3000 < \mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re} \leq 14 \cdot 10^4$) apibendrina su ne didesne kaip 10% neapibrëþtimi.




**5 pav.** Nedimensinio atstumo, nuo kurio tëkmë praranda stabilumà, priklausomybë nuo termogravitacijos parametro $\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re}$: *1* – $\mathrm{Re}_{in}$ = 2136, $p$ = 0,1 MPa; *2* – $\mathrm{Re}_{in}$ = 2011, $p$ = 0,2 MPa; *3* – $\mathrm{Re}_{in}$ = 1494, $p$ = 0,2 MPa; 4 – $\mathrm{Re}_{in}$ = 2136, $p$ = 0,4 MPa; 5 – $\mathrm{Re}_{in}$ = 4317, $p$ = 0,4 MPa; *6* – pagal (10) priklausomybæ; *7* – pagal (1) priklausomybæ vienkryptëms tëkmëms [2]

5 pav. taip pat matyti, kad tëkmës nestabilumas, esant prieðingø krypèiø tëkmëms, atsiranda anksèiau, nei tai ávyksta vamzdyje esant vienkryptëms tëkmëms (5 pav., 7 tiesë).

Norint apibendrinti ðilumos mainø duomenis miðrios konvekcijos atveju, juos tikslinga normalizuoti panaudojant ðilumos atidavimo priverstinës konvekcijos atveju duomenis. Skaitinio modeliavimo rezultatai nepasireiðkiant termogravitacijos jëgø átakai pateikti 6 paveiksle. Buvo apskaièiuoti du tekëjimo re-

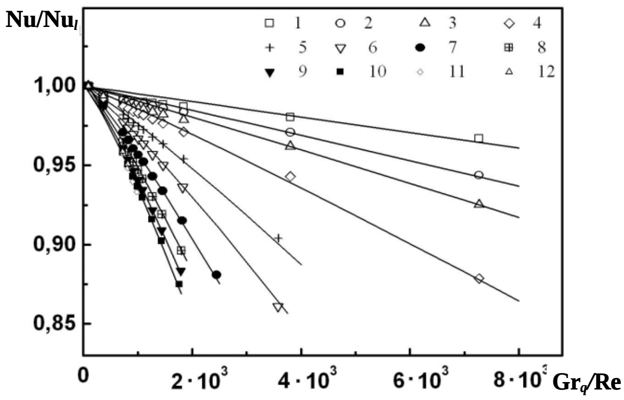



**6 pav.** Šilumos atidavimo kitimas pagal kanalo ilgá, nepasireiðkiant termogravitacijos jëgø átakai: *1* – $\mathrm{Re}_{in}$ = 2136, $p$ = 0,1 MPa; *2* – $\mathrm{Re}_{in}$ = 2011, $p$ = 0,2 MPa; *3* – pagal (11) priklausomybæ; *4* – Nu = 8,24 [8]

þimai esant panaðiems $\mathrm{Re}_{in}$ kriterijams, taèiau skirtingiems slëgiams, t. y. 0,1 MPa ir 0,2 MPa. Stabilizuoto ðilumos atidavimo zonoje Nu = 8,24 ir sutampa su [8] duomenimis dvipusio kaitinimo atveju, kai $q_w$ = const. Skaitiniams rezultatams apraðyti pasiûlyta priklausomybë:

$$\mathrm{Nu}_l = 8{,}24 + 18{,}44 e^{-X/0{,}00052} + 7{,}12^{-X/0{,}0042}, \tag{11}$$

kuri apibendrina duomenis su ne didesne kaip 4% neapibrëþtimi.




**7 pav.** Santykinio ðilumos atidavimo priklausomybë nuo $\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re}$ esant ávairiems $x/d_e$, kai $\mathrm{Re}_{in}$ = 2136, $p$ = 0,1 MPa: *1* – $x/d_e$ = 0,3; *2* – 0,7; *3* – 1; *4* – 1,9; *5* – 3,9; *6* – 6,5; *7* – 10,1; *8* – 14,2; *9* – 18,3; *10* – 22,3; *11* – 35,9; *12* – 42. Taðkai – modeliavimo rezultatai. Iðtisinës linijos – pagal (12) priklausomybæ

Santykinio šilumos atidavimo priklausomybë nuo termogravitacijos parametro $\mathrm{Gr}_q/\mathrm{Re}$, esant ávairiems $x/d_e$, pavaizduota 7 paveiksle. Èia $\mathrm{Nu}/\mathrm{Nu}_l$ reikðmës atidëtos iki tëkmës atitrûkimo vietos kanale. Ðiame paveiksle matyti, kad didëjant termogravitacijos jëgø poveikiui santykinis ðilumos atidavimas sumaþëja þymiai daugiau didëjant $x/d_e$ reikðmei, taèiau asimptotiðkai artëja prie ðilumos atidavimo, bûdingo $x/d_e \geq 20$. Taigi, kai $x/d_e \geq 20$, $Nu/Nu_l$ stabilizuojasi pagal kanalo ilgá.

Modeliavimo rezultatams ($1,9 \cdot 10^3 < Re \leq 4 \cdot 10^3$, $90 \leq Gr_q/Re \leq 7,2 \cdot 10^3$) apibendrinti pateikta priklausomybë:

$$\frac{Nu}{Nu_l} = 1 - C \cdot \left( \frac{Gr_q}{Re} \right)^D; \tag{12}$$

èia $C = 7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} \ln(x/d_e)$; $D = 1{,}0499 + 0{,}0542 \cdot \ln(x/d_e)$. Kai $x/d_e \geq 20$, tai $C$ ir $D$ nebepriklauso nuo $x/d_e$ ir $C = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$, $D = 1{,}22$. (12) priklausomybë apibendrina duomenis su ne didesne kaip 3% neapibrëþtimi.

## 5. IÐVADOS

Atlikus dvimaèius skaitinius miðrios konvekcijos tyrimus laminarinio tekëjimo zonoje vertikaliame plokðèiame kanale esant prieðingø krypèiø tëkmëms bei simetriniam sieneliø kaitinimui, galima padaryti ðitokias iðvadas:

1. Skaitinis modeliavimas laminarinio tekëjimo zonoje rodo, kad didëjant termogravitacijos jëgø poveikiui tëkmë pradeda atitrûkti nuo kanalo sieneliø. Điam kritiniam atstumui ($X_{cr1}$ arba $(x/d_e)_{cr1}$) apskaièiuoti pateiktos (8) ir (10) priklausomybës.

2. Esant laminarinei miðriai konvekcijai ðilumos atidavimas pagal kanalo ilgá stabilizuojasi, kai $x/d_e \approx 20$. Đilumos atidavimui apskaièiuoti pateikta (12) priklausomybë.

**Paþymëjimai**

$h$ – kanalo aukštis m;
$b$ – kanalo plotis m;
$d_e$ – kanalo ekvivalentinis skersmuo, $d_e = 2(h \cdot b) / (h + b)$, m;
$q$ – šilumos srauto tankis W/m²;
$i$ – entalpija J/kg;
$y$ – skersinë koordinatë m;
$p$ – slëgis MPa;
$T$ – temperatûra K;
$x$ – atstumas nuo kaitinimo pradþios (iðilginë koordinatë) m;
$\alpha$ – šilumos atidavimo koeficientas, $\alpha = q_w/(T_w - T_f)$, $W/(m^2 \cdot K)$;
$\beta$ – tûrinio plëtimosi koeficientas 1/K;
$\delta$ – pasienio sluoksnio storis m;
$\lambda$ – šilumos laidumo koeficientas $W/(m \cdot K)$;
$\mu$ – dinaminio klampumo koeficientas Pa · s;
$\nu$ – kinematinio klampumo koeficientas m²/s;
$\rho$ – tankis kg/m³.

**Nedimensiniai parametrai**

Bo – termogravitacijos parametras, $Bo = Gr_q/Re$;
$Gr_q$ – Grashofo skaièius, $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / \nu^2 \cdot \lambda$;
Nu – Nuselto skaièius, $Nu = \alpha d_e/\lambda$;
Pr – Prandtlio skaièius, $Pr = \mu c_p/\lambda$;
Re – Reinoldso skaièius, $Re = u_f d_e/\nu$;
X – santykinis atstumas, $X = (x/d_e)/(Re \cdot Pr)$.

**Indeksai**

I – pirma sienelë,
II – antra sienelë,
*cr*, *cr*1 – kritinis,
*H* – hidrodinaminis,
*in* – átekëjime,
*l* – be termogravitacijos jëgø átakos,
*T* – šiluminis,
*w* – ant sienelës.

Gauta 2005 03 29

**Literatûra**


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. Ïåòóõîâ Á. Ñ., Ïîëÿêîâ À. Ô., Ñòðèãèí Á. Ê. Èññëåäîâàíèå òåïëîîáìåíà â òðóáàõ ïðè âÿçêîñòíî-ãðàâèòàöèîííîì òå÷åíèè // Ìîñêâà: Ýíåðãèÿ, 1968. Ò. 1. 607 ñ.
3. Ïåòóõîâ Á. Ñ., Ãåíèí Ë. Ã., Êîâàëåâ Ñ. À. Òåïëîîáìåí â ÿäåðíûõ ýíåðãåòè÷åñêèõ óñòàíîâêàõ // Ìîñêâà: Ýíåðãîàòîìèçäàò, 1986.
4. Hallman T. M. Combined forced and free laminar convection in vertical tubes with uniform internal heat generation // Trans. ASME. Ser. C. 1956. Vol. 78. N 8. P. 1831–1841.
5. Scheele G. F., Hanratty T. J. Effects of natural convection instabilities on rates of heat transfer at low Reynolds numbers // AIChE J. 1963. Vol. 9. No. 2. P. 183–185.
6. Fluent 6.1 documentation // Fluent inc. 2002.
7. Kenjereš K., Hanjaliã K. Numerical insight into flow structure in ultraturbulent thermal convection / Physical Rewiev E, 66, 2002, 036307.
8. Ïåòóõîâ Á. Ñ., Ïîëÿêîâ À. Ô. Òåïëîîáìåí ïðè ñìåøàííîé òóðáóëåíòíîé êîíâåêöèè. Ìîñêâà: Íàóêà, 1986.


**Arûnas Sirvydas, Robertas Poðkas**

**NUMERICAL INVESTIGATIONS OF OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN VERTICAL FLAT CHANNEL
1. LAMINAR MIXED CONVECTION AND TRANSITION TO VORTEX FLOW IN CASE OF SYMMETRICAL HEATING**

S u m m a r y

Results on numerical investigation of the local opposing mixed convection heat transfer in a vertical flat channel with symmetrical heating in laminar airflow are presented. A numerical two-dimensional simulation was performed using the FLUENT 6.1 code. Investigations were performed in airflow of 0.1, 0.2 and 0.4 MPa absolute pressure at Reynolds numbers from 1500 up to 4310 with $Gr_q$ number variation from 1.65 · $10^5$ to 3.1 · $10^9$ in order to define the effect of the influence of buoyancy on heat transfer.

Numerical calculations demonstrated that under the effect of small buoyancy there were only small transformations in the velocity profile, but the flow was oriented downward (direction of forced flow).

With increasing the buoyancy forces, flow separation occurred at some distance from the beginning of the heated channel section. With a further increase of buoyancy, the position of flow separation point moved towards the beginning of the heated section. The channel wall temperature noticeably decreased at the flow separation point.

Correlations for calculation of heat transfer in the laminar mixed convection region and for the determination of the position of flow separation from the wall are suggested.

**Key words**: heat transfer, air flow, laminar mixed convection, transition to vortex flow, vertical flat channel, symmetrical heating, numerical simulation

**Àðóíàñ Ñèðâèäàñ, Ðîáåðòàñ Ïîøêàñ**

**×ÈÑËÅÍÍÛÅ ÈÑÑËÅÄÎÂÀÍÈß ÒÅÏËÎÎÒÄÀ×È ÏÐÈ ÑÌÅØÀÍÍÎÉ ÊÎÍÂÅÊÖÈÈ Â ÑÈÌÌÅÒÐÈ×ÍÎ ÍÀÃÐÅÂÀÅÌÎÌ ÏËÎÑÊÎÌ ÂÅÐÒÈÊÀËÜÍÎÌ ÊÀÍÀËÅ Â ÓÑËÎÂÈßÕ ÏÐÎÒÈÂÎÏÎËÎÆÍÛÕ ÍÀÏÐÀÂËÅÍÈÉ ÏÎÒÎÊÎÂ. 1. ËÀÌÈÍÀÐÍÀß ÑÌÅØÀÍÍÀß ÊÎÍÂÅÊÖÈß È ÏÅÐÅÕÎÄ Â ÂÈÕÐÅÂÎÅ ÒÅ×ÅÍÈÅ Â ÑËÓ×ÀÅ ÑÈÌÌÅÒÐÈ×ÍÎÃÎ ÄÂÓÕÑÒÎÐÎÍÍÅÃÎ ÍÀÃÐÅÂÀ**

Ðåçþìå

Â íàñòîÿùåé ñòàòüå ïðèâîäÿòñÿ ðåçóëüòàòû äâóõìåðíîãî ÷èñëåííîãî èññëåäîâàíèÿ ìåñòíîé òåïëîîòäà÷è â ñèììåòðè÷íî íàãðåâàåìîì ïëîñêîì âåðòèêàëüíîì êàíàëå â çîíå ëàìèíàðíîãî òå÷åíèÿ âîçäóõà ïðè ïðîòèâîïîëîæíûõ íàïðàâëåíèÿõ ñìåøàííîé êîíâåêöèè. ×èñëåííûå èññëåäîâàíèÿ ïðîâåäåíû ñ èñïîëüçîâàíèåì êîìïüþòåðíîé ïðîãðàììû FLUENT 6.1. Èññëåäîâàíèÿ ïðîâîäèëèñü â ïîòîêå âîçäóõà ïðè åãî àáñîëþòíîì äàâëåíèè 0,1, 0,2 è 0,4 ÌÏà, ÷èñëàõ Ðåéíîëüäñà îò 1500 äî 4310 è ÷èñëàõ Ãðàñãîôà îò 1,65 · $10^5$ äî 3,1 · $10^9$.

×èñëåííîå ìîäåëèðîâàíèå ïîêàçàëî, ÷òî ïðè íåáîëüøèõ òåïëîâûõ íàãðóçêàõ ïðîèñõîäèò îïðåäåëåííàÿ äåôîðìàöèÿ ïðîôèëÿ ñêîðîñòè, íî ïîòîê âîçäóõà ïî âñåìó ñå÷åíèþ êàíàëà íàïðàâëåí âíèç, ò. å. ïî íàïðàâëåíèþ âûíóæäåííîãî òå÷åíèÿ. Ñ óâåëè÷åíèåì íàãðåâà óñèëèâàåòñÿ âîçäåéñòâèå òåðìîãðàâèòàöèîííûõ ñèë è ïðè îïðåäåëåííîì ðàññòîÿíèè îò íà÷àëà îáîãðåâà ïîòîê îòðûâàåòñÿ îò ñòåíîê êàíàëà è îáðàçóåòñÿ âèõðåâîå òå÷åíèå. Ïðè äàëüíåéøåì óâåëè÷åíèè íàãðåâà òî÷êà îòðûâà ïîòîêà ïåðåìåùàåòñÿ â ñòîðîíó íà÷àëà îáîãðåâà. Íà ìåñòå îòðûâà ïîòîêà òåìïåðàòóðà ñòåíêè êàíàëà ðåçêî ñíèæàåòñÿ.

Â ðåçóëüòàòå àíàëèçà ïðåäëîæåíû îáîáùàþùèå çàâèñèìîñòè äëÿ ðàñ÷åòà òåïëîîòäà÷è ïðè ëàìèíàðíîé ñìåøàííîé êîíâåêöèè è äëÿ îïðåäåëåíèÿ ïîëîæåíèÿ òî÷êè îòðûâà ïîòîêà (îáðàçîâàíèÿ âèõðåâîãî ïîòîêà).

**Êëþ÷åâûå ñëîâà**: òåïëîîòäà÷à, ïîòîê âîçäóõà, ëàìèíàðíàÿ ñìåøàííàÿ êîíâåêöèÿ, ïåðåõîä â âèõðåâîå òå÷åíèå, âåðòèêàëüíûé ïëîñêèé êàíàë, ñèììåòðè÷íûé íàãðåâ, ÷èñëåííîå ìîäåëèðîâàíèå