

Pasvirimo kampo įtakos šilumos atidavimui nuo apatinės plokščio kanalo sienelės esant turbulencinei mišriai konvekcijai bei priešingų krypčių tėkmėms eksperimentinis tyrimas

**Robertas Poškas,
Donatas Sabanskis**

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

Straipsnyje pateikiami rezultatai eksperimentinių tyrimų tekant orui pasvirusiame plokščiam kanale ($\varphi = 30^\circ$ nuo horizontalios padėties) su vienpusiu kaitinimu (kaitinama apatinė sienelė), esant priešingų tėkmių turbulencinei mišriai konvekcijai, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$, o $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$. Pateikiami duomenys ir rezultatai papildo anksčiau šiame žurnale paskelbtus tyrimus mišrios konvekcijos atveju. Šie eksperimentiniai duomenys yra palyginti su anksčiau gautais eksperimentiniais duomenimis pasvirusiame ($\varphi = 60^\circ$) plokščiam kanale, kai yra kaitinama apatinė kanalo sienelė.

Raktažodžiai: šilumos mainai, turbulencinė mišri konvekcija, priešingų krypčių tėkmės, nestabili oro tankio stratifikacija, pasviręs plokščias kanalas

1. ĮVADAS

Trumpa mišrios konvekcijos tyrimų vertikalioje ir pasvirusiame kanaluose apžvalga pateikta [1, 2], todėl jos šiame straipsnyje nekartosime.

Darbe [2] pateikiami pradiniai rezultatai, gauti esant vienpusiam kaitinimui nestabilios oro tankio stratifikacijos atveju (kaitinama apatinė kanalo sienelė), kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos (priešingų krypčių tėkmės) pasvirusiame plokščiam kanale ir kanalo polinkio kampas nuo horizontalios padėties $\varphi = 60^\circ$. Gauti eksperimentiniai duomenys palyginti su anksčiau gautais rezultatais pasvirusiame plokščiam kanale, kai yra kaitinama viršutinė kanalo sienelė.

Šiame darbe pateikti tolimesni tyrimų rezultatai ir nagrinėjama pasvirimo kampo įtaka šilumos atidavimui turbulencinės mišrios konvekcijos atveju plokščiam kanale vienpusio kaitinimo nestabilios oro tankio stratifikacijos (kaitinama apatinė sienelė) atveju, kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos.

2. TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentai atlikti naudojant Branduolinės inžinerijos problemų laboratorijoje esantį atviro tipo aerodinaminį kontūrą [1]. Oro slėgis prieš srauto matavimo diafragmas ir eksperimentinio ruožo įėjime

matuojamas pavyzdiniais manometrais, o slėgio kritimai diafragmose – lėkštinio tipo difmanometrais, pripildytais destiliuoto vandens. Tėkmės temperatūra prieš diafragmas ir įtekant į eksperimentinį ruožą matuojama 0,3 mm skersmens chromelio ir aliumelio termoporumis. Visi termoporų elektriniai signalai taip pat įtampos kritimai kalorimetriniuose paviršiuose ir šuntuose matuojami automatinė matavimo ir duomenų surinkimo sistema, prijungta prie IBM asmeninio kompiuterio.

Šilumos mainams tirti plokščiam kanale mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmių atveju panaudotas laboratorijoje esantis eksperimentinis įrenginys [2]. Tai plokščias kanalas, kurio aukščio ir pločio santykis apytiksliai yra 1:10, o bendras ilgis – 6260 mm. Jį sudaro hidrodinaminės stabilizacijos ruožas ir kalorimetrinė dalis. Hidrodinaminės stabilizacijos ruožo ilgis – 2370 mm ($x/d_e \approx 25$), o kalorimetrinės dalies ilgis – 3890 mm ($x/d_e \approx 50$). Eksperimentinio ruožo kalorimetrinį paviršių sudaro 0,38 mm storio ir 370 mm pločio nerūdijančio plieno folija. Kalorimetrinė folija kaitinama nuolatine elektros srove.

Didesnei Gr reikšmei gauti ir termogravitacinių jėgų poveikiui padidinti šilumnešio slėgis eksperimentų metu siekė iki 1,0 MPa. Kad tai būtų galima pasiekti, visas eksperimentinis ruožas yra patalpintas slėgio inde, kurio skersmuo 870 mm, ilgis – 7200 mm, svoris – apie 2000 kg, tūris – 4 m³. Visi eksperimentai

atlikti esant kraštinei sąlygai $q_w \approx \text{const}$, kai sienelės ir srauto temperatūrų skirtumas siekė iki 150 K. Išsamesni eksperimentinio ruožo duomenys pateikti [1].

Gautų rezultatų pirminio apdorojimo stadijoje buvo nustatomi pagrindiniai kriterijai Nu , Re , Gr_q ir Pr . Juose sąlygojančiais parametrais laikomi srauto vietiniai vidutiniai masiniai temperatūra ir greitis bei plokščio kanalo ekvivalentinis skersmuo.

Surandant šilumos srauto konvekcines dedamosios linijinį tankį q , įvertinti šilumos nuostoliai į aplinką per termoizoliaciją (q_{is}), šilumos pertekėjimai išilgai kalorimetro sienelės (q_λ) bei spinduliuotės šilumos srautai (q_{sp}):

$$q = q_{el} - q_\lambda - q_{is} - q_{sp}. \quad (1)$$

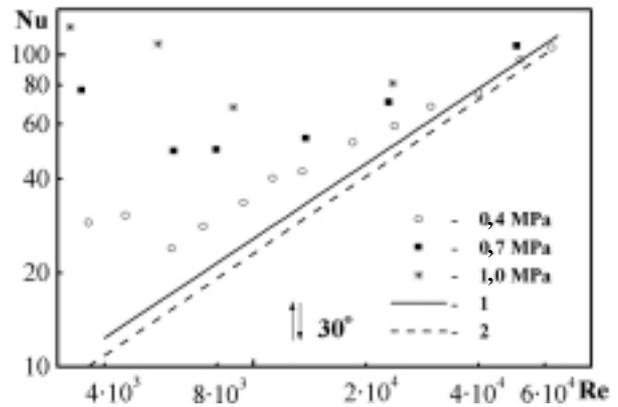
Šilumos srauto per termoizoliaciją linijiniams tankiui nustatyti atlikti specialūs taravimo eksperimentai. Tam tikslui kanalas buvo užpildytas izoliacine medžiaga (asbesto lakštais), siekiant išvengti šilumos pernešimo dėl natūralios konvekcijos, o folijomis buvo leidžiama nuolatinė elektros srovė. Folijoje išsiskyrusi šiluma buvo šalinama tik per termoizoliaciją. Šilumos nuostoliai per termoizoliaciją apskaičiuoti pagal plokščios sienelės šilumos laidumo formulę naudojant termoporų, išdėstytų poromis izoliacinėse plokštėse, rodmenų skirtumą. Gautos šilumos nuostolių į aplinką skaitmeninės reikšmės aproksimuotos antro laipsnio polinomu atskirai kiekvienai sienelei. Pagal šitas priklausomybes ir apskaičiuojami šilumos nuostoliai į aplinką folijos temperatūros matavimo taškuose pagrindinių eksperimentų metu. Nuodugnesnė rezultatų apdorojimo metodika pateikta [1].

3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Turbulencinės mišrios konvekcijos eksperimentiniai tyrimai atlikti plačiame oro tėkmės parametru kitimo intervale ($Re = 4 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$, o $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$) esant įvairiems šilumnešio slėgiams ($p = 0,4; 0,7; 1,0$ MPa) vienpusio kaitinimo atveju (kaitinama tik apatinė sienelė).

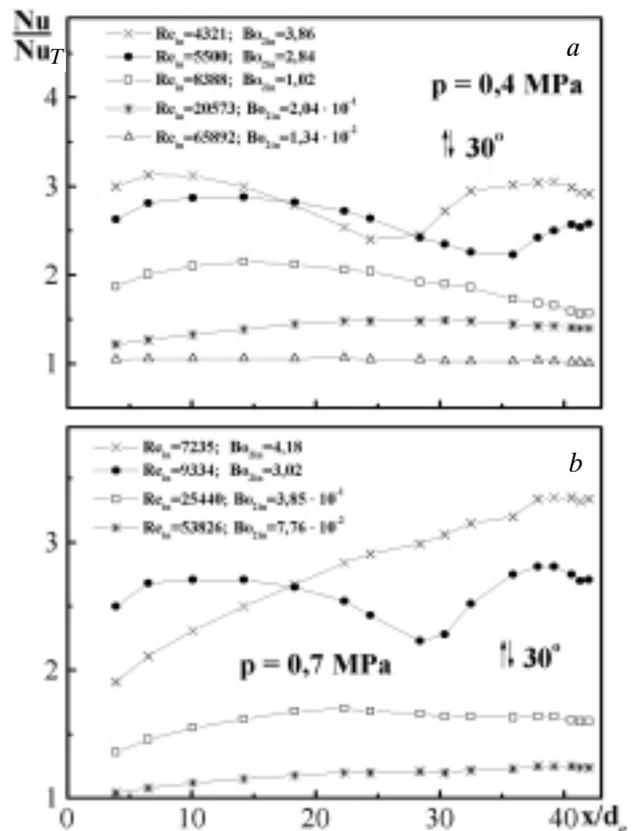
Kaip matyti 1 pav., šilumos atidavimo intensyvumas labai priklauso nuo oro slėgio (panašiai yra ir kitais mišrios konvekcijos atvejais [1–3]). Kuo didesnis oro slėgis (didesnis Gr_q), tuo intensyvesnis šilumos atidavimas mažų Re srityje. Didelių Re srityje šilumos atidavimo intensyvumas artėja prie šilumos atidavimo esant priverstinei konvekcijai (1 pav. 1 ir 2 kreivės). Esant mažiausioms Re reikšmėms, pastebimas tam tikras šuoliškas šilumos mainų pokytis mažų Re zonoje.

Santykinio šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo esant įvairiems darbo agento slėgiams, kai kanalo pasvirimo kampas yra 30° nuo horizontalios pa-



1 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_c = 42$) vienpusio kaitinimo atveju (kaitinama apatinė sienelė), kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos: 1 – priverstinė konvekcija (pastovios srauto fizikinės savybės), 2 – priverstinė konvekcija (eksperimento sąlygos – kintamos srauto fizikinės savybės $\psi = T_w/T_f = 1,2-1,3$)

dėties, parodytas 2 pav. Šilumos atidavimas plokščiam kanale esant vienpusiam kaitinimui priverstinės konvekcijos atveju (Nu_T) buvo naudojamas kaip normuojantis dydis. Nu_T skaičiuotas esant tam pačiam Re , kaip ir eksperimentuose gauta Nu reikšmė mišrios konvekcijos sąlygomis. Siekiant įvertinti nors

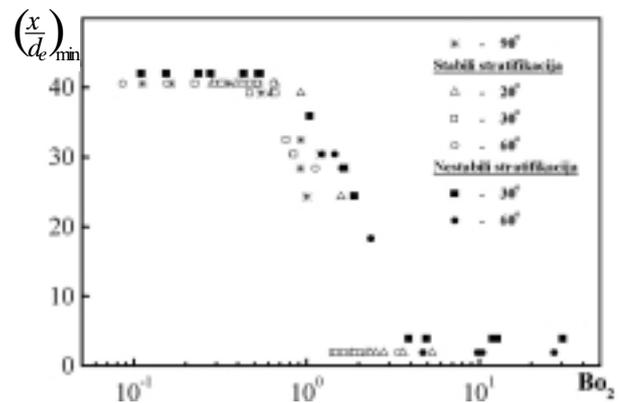


2 pav. Santykinio šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo

ir nedidelį srauto savybių kitimą, Nu_T įvertinti naudota [4] pasiūlyta metodika žiediniams kanalams (ribiniu atveju – plokščiam kanalui).

Esant dideliems Re skaičiams yra mažiausias termogravitacijos jėgų poveikis, todėl, kai $Re_m = 65892$ (2 pav. a) ir $Re_m = 53826$ (2 pav. b), šiluma per visą kanalo ilgį atiduodama priverstinės konvekcijos sąlygomis ($Nu/Nu_T \approx 1$). Mažėjant Re kreivių pobūdis keičiasi. Kaip matyti 2 pav. a, esant mišrios konvekcijos sąlygoms (apatinė kreivė) santykinis šilumos atidavimas nežymiai didėja iki $x/d_e \approx 15-20$, o po to nežymiai mažėja. Santykinio šilumos atidavimo padidėjimas susijęs su tuo, kad termogravitacijos jėgų poveikis reiškiasi palaipsniui, t. y. didėja didėjant x/d_e , kol pasiekama stabilizacija. Nuodugni analizė parodė, kad santykinio šilumos atidavimo sumažėjimas susijęs su tuo, jog termogravitacijos jėgų poveikį lemiančių kriterijų ir parametrų skaitinės reikšmės (Gr_q , Bo_2) mažėja tostant nuo kaitinimo pradžios, tuo tarpu Re reikšmės išilgai kanalo keičiasi mažai. Mažėjant Re didėja santykinis šilumos atidavimas (didėja termogravitacijos jėgų poveikis), o kreivių pobūdis išlieka tas pats, tiktai yra geriau išreikštas santykinio šilumos atidavimo padidėjimas ir sumažėjimas. Ta pati tendencija vyrauja ir plokščiam kanale, kai yra kaitinama viršutinė kanalo sienelė [5], bei esant nestabiliai stratifikacijai, kai kanalas pasviręs 60° kampu [2]. Esant mažesniems Re atsiranda režimai su ryškiai išreikštu šilumos atidavimo minimumu, vėliau šilumos atidavimas padidėja. Kai slėgis yra 0,4 MPa, tai stebima esant $Re_m = 5500$ ir 4321. Esant 0,7 MPa slėgiui (2 pav. b) šilumos atidavimo padidėjimas išryškėja, kai $Re_m = 9334$. Esant mažiausiems Re 0,7 MPa slėgio (2 pav. b, 1 kreivė) atveju šilumos atidavimas didėja nuo pat kanalo pradžios. Tai yra susiję su tėkmės vietiniu atitrūkimu prie kanalo sienelės dėl termogravitacijos jėgų poveikio ir su dėl to kylančia papildoma tėkmės turbulizacija. Šie šilumos atidavimo pokyčiai taip pat panašiai pasireiškia ir kaitinant viršutinę kanalo sienelę [5] bei esant nestabiliai stratifikacijai, kai kanalas pasviręs 60° kampu [2].

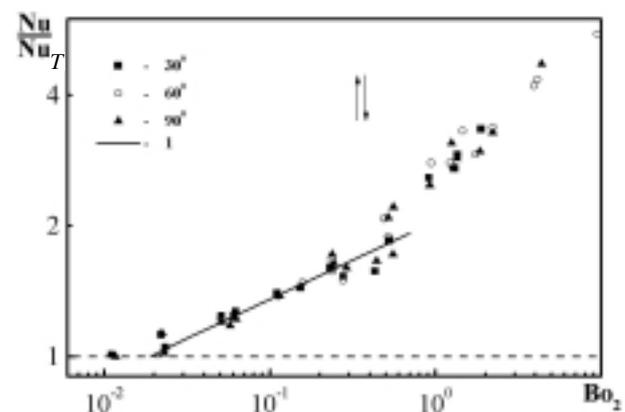
Minimalaus šilumos atidavimo taško dinamika esant įvairiems plokščio kanalo, kai yra kaitinama viršutinė sienelė ($\varphi = 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$), vertikalaus kanalo ($\varphi = 90^\circ$) ir pasvirusio plokščio kanalo ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ nuo horizontalios padėties), kai yra kaitinama apatinė sienelė, polinkio kampams parodyta 3 pav. Čia sąlyginai pavaizduota, kad esant nedidelėms termogravitacijos parametro Bo_2 reikšmėms minimalus šilumos atidavimas yra kanalo gale ($x/d_e \approx 40$). Galima išskirti tris zonas: kai $Bo_2 \leq 0,7$, šilumos atidavimas yra monotoniškas (tokie režimai, kaip 2 pav. a, 3 ir 4 kreivės; 2 pav. b, 3 kreivė). Kai $0,7 \leq Bo_2 \leq 2$, yra režimai su ryškiai išreikštu šilumos atidavimo minimumu (tokie režimai, kaip 2 pav. a, 1



3 pav. Minimalaus šilumos atidavimo taško padėties priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2

ir 2 kreivės; 2 pav. b, 2 kreivė), o kai $Bo_2 > 2$, yra režimai, kai šilumos atidavimas didėja nuo pat kanalo kaitinimo pradžios (tokie režimai, kaip 2 pav. b, 1 kreivė). Šiame grafike matyti tendencija, jog šilumos atidavimo minimumai ir tėkmės atitrūkimas nuo paviršiaus esant nestabiliai stratifikacijai yra persistūmę didesnių termogravitacijos parametro reikšmių atveju. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant nestabiliai stratifikacijai vyrauja turbulencinis turbulizuotas greičio profilis, kuris yra labiau užpildytas nei turbulencinis greičio profilis neutralios arba stabilios stratifikacijos atveju. Dėl to srauto atitrūkimas esant nestabiliai tankio stratifikacijai stebimas didesnių termogravitacijos parametro reikšmių atveju.

Santykinis šilumos atidavimas (Nu/Nu_T) plokščiam kanale esant priešingų kryptų srautams ir vienpusiam kaitinimui (kaitinama apatinė sienelė) monotoniškai didėja didėjant termogravitacijos parametru Bo_2 (4 pav.). Kanalo pasvirimo kampas



4 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos: 1 – pagal (2) priklausomybę

praktiškai neturi įtakos šilumos atidavimui (priešingai negu plokščio kanalo su viršutiniu sienelės kaitinimu atveju [6]). Esant didelėms termogravitacijos parametro reikšmėms ($Bo_2 \geq 7 \cdot 10^{-1}$) šilumos atidavimo pobūdis pasikeičia (tai išryškėja ir viršutinės kanalo sienelės kaitinimo atveju [6]). Tai yra susiję su anksčiau minėtu srauto atitrūkimu prie sienelės.

Kadangi kanalo pasvirimo kampas praktiškai neturi įtakos šilumos atidavimui, tai $Bo_{2rib} \leq Bo_2 \leq 7 \cdot 10^{-1}$ ribose galioja apibendrinanti priklausomybė, pasiūlyta [2]:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 2,05Bo_2^{0,18}. \quad (2)$$

Ji aprašo eksperimentinius duomenis su ne didesne kaip 12% paklaida.

Bo_{2rib} – tai tokia Bo_2 reikšmė, kuriai esant pradeda pasireikšti termogravitacijos jėgų poveikis, t. y. pradeda didėti šilumos mainai, palyginus su šilumos atidavimu esant priverstinei konvekcijai. Šiuo atveju $Bo_{2rib} = 0,018$, kuris gautas iš (2) priklausomybės, kai $Nu/Nu_T = 1,0$.

4. IŠVADOS

Išanalizavus pasvirimo kampo įtaką šilumos atidavimui plokščiam kanale vienpusio kaitinimo atveju (kai yra kaitinama apatinė kanalo sienelė) esant priešingų kryptių tėkmėms, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$, galima padaryti šias išvadas.

1. Nustatyta, kad esant tiek 30° , tiek 60° kanalo pasvirimo kampui, yra šilumos mainų režimai su aiškiai išreikštu minimumu pagal kanalo ilgį, o tai susiję su vietiniu srauto atitrūkimu prie sienelės.

2. Stebima tendencija, kad esant nestabiliai tankio stratifikacijai srautas nuo sienelės atitrūksta, kai Bo_2 didesni, negu stabilios stratifikacijos atveju.

3. Nustatyta, kad šilumos atidavimas nepriklauso nuo kanalo pasvirimo kampo jam kintant nuo 90 iki 30° .

Pažymėjimai

b – kanalo plotis m; c_p – savitoji šiluma J/(kg · K); d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_e = 2hb/(h + b)$, (m); g – laisvojo kritimo pagreitis m/s²; h – plokščio kanalo aukštis m; p – slėgis Pa; q – šilumos srauto tankis W/m²; T – temperatūra K; u – vidutinis masinis tėkmės greitis m/s; x – atstumas nuo kaitinimo pradžios m; α – šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = q_w/(T_w - T_f)$, W/(m² · K); β – temperatūrinis plėtimosi koeficientas 1/K; λ – šilumos laidumo koeficientas W/(m · K); ν – kinematinės klampos koeficientas m²/s; μ – dinaminės klampos koeficientas Pa · s; φ – pasvirimo kampas laipsniais,adianais. Bo_2 –

termogravitacijos parametras, $Bo_2 = Gr_q/(Re^{2,5}Pr)$; Gr_q – Grashofo skaičius pagal šilumos srautą, $Gr_q = (g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w)/(v^2 \cdot \lambda)$; Nu – Nuselto skaičius, $Nu = \alpha d_f/\lambda$; Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \mu c_p/\lambda$; Re – Reinoldso skaičius, $Re = u_f d_f/\nu$.

Indeksai: f – srautas; T – priverstinė turbulencinė konvekcija; w – ant sienelės; in – įtekėjime.

Gauta
2004 07 12

Literatūra

- Poškas R., Poškas P., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiam kanale turbulencinės mišrios konvekcijos atveju, esant priešingų kryptių srautams bei vienpusiam kaitinimui, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 53–60.
- Poškas R., Sabanskis D. Šilumos atidavimas nuo apatinės pasvirusio plokščio kanalo sienutės turbulencinės mišrios konvekcijos priešingų kryptių tėkmėse // Energetika. 2003. Nr. 4. P. 49–54.
- Poškas R., Šinkūnas S., Poškas P. Šilumos atidavimas išilgai vertikalaus kanalo esant priešingų kryptių turbulencinei mišriai konvekcijai // Mechanika. 2001. Nr. 5(31). P. 21–26.
- Vilemas J., Čėsna B. and Survila V. Heat Transfer in Gas-Cooled Annular Channels // New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1987. 226 p.
- Poškas R. Šilumos atidavimo ypatumai pasvirusiame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju // Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2002. P. 283–288.
- Poškas R., Poškas P. Šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiam kanale turbulencinės mišrios konvekcijos priešingų kryptių tėkmėse esant stabiliai oro tankio stratifikacijai apibendrinimas // Energetika. 2004. Nr. 2. P. 9–14.

Robertas Poškas, Donatas Sabanskis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE INCLINATION OF THE FLAT CHANNEL TURBULENT OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN ITS BOTTOM WALL

S u m m a r y

Experimental investigation and analysis on the effect of the inclination of the flat channel on heat transfer in a flat channel with bottom wall heating (unstable density stratification) for turbulent mixed convection opposing flow conditions have been performed in the region of $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$.

There are regimes with a sharp change of heat transfer along the channel as in the case of stable density stratification. This increase of heat transfer is related to the separation of the flow from the channel wall.

There is a tendency that under unstable density stratification the flow separates from the wall at higher Bo_2 values than under stable stratification.

Key words: heat transfer, turbulent mixed convection, opposing flows, unstable density stratification, inclined flat channel

Робертас Пошкас, Донатас Сабанскис

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ НАКЛОНА ПЛОСКОГО КАНАЛА
НА ТЕПЛОТДАЧУ ОТ ЕГО НИЖНЕЙ
СТЕНКИ ПРИ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ
НАПРАВЛЕНИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ
СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ**

Резюме

Приведены результаты экспериментального исследования и анализ влияния наклона плоского канала на теплоотдачу от нижней его стенки (неустойчивая стратификация плотности) при турбулентной сме-

шанной конвекции в условиях противоположных направлений вынужденной и естественной конвекций в интервале $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$.

Установлено, что, как и в случае устойчивой стратификации плотности, существуют режимы теплоотдачи, при которых резко изменяется характер теплоотдачи по длине канала. Такое изменение теплоотдачи, по-видимому, связано с отрывом потока от стенки канала.

Наблюдается тенденция, что при неустойчивой стратификации плотности отрыв потока осуществляется при больших Bo_2 по сравнению с устойчивой стратификацией плотности.

Ключевые слова: теплоотдача, турбулентная смешанная конвекция, противоположные направления потоков, неустойчивая стратификация плотности, наклонный плоский канал