
Šilumos atidavimas išilgai pasvirusio kanalo esant priešingų krypčių turbulencinei mišriai konvekcijai

**Robertas Poškas,
Povilas Poškas**

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių šilumos
mainų laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Stasys Šinkūnas

*Kauno technologijos universitetas,
Šilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20,
LT-3000 Kaunas*

Pateikiami vietinio šilumos atidavimo eksperimentinių tyrimų tekant orui pasvirusiame plokščiame kanale ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ nuo horizontalios padėties) rezultatai. Nagrinėtas šilumos atidavimas vienpusio kaitinimo atveju (kaitinama viršutinė kanalo sienelė), esant priešingų tėkmių turbulencinei mišriai konvekcijai, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$. Gauti duomenys palyginti su anksčiau gautais rezultatais vertikaliame plokščiame kanale.

Raktažodžiai: šilumos mainai, turbulencinė mišri konvekcija, priešingų krypčių tėkmės, oras, plokščias kanalas

1. ĮVADAS

Svorio jėga, veikianti nevienodo tankio terpę, vienu atveju yra pagrindinė varomoji jėga (natūrali konvekcija), o esant kartu ir priverstiniam judėjimui – papildoma, tačiau dėl šios jėgos poveikio gali visiškai pasikeisti turbulencinio pernešimo mechanizmas bei konvekcinių šilumos pernešimo pobūdis. Trumpa šilumos mainų tyrimų vertikaliuose kanaluose esant tokioms sąlygoms apžvalga buvo pateikta mūsų ankstesniame darbe [1].

Turbulencinės mišrios konvekcijos atveju, kai natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptys sutampa (vienkryptės tėkmės), buvo nustatytos tėkmės laminarizacijos ir šilumos mainų sumažėjimo, palyginti su priverstine konvekcija, zonos. Tačiau, esant dideliam termogravitacijos jėgų poveikiui, tėkmės turbulenciškumas ir šilumos mainai padidėja, palyginti su priverstine konvekcija.

Esant priešingoms natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptims (priešingos tėkmės), šilumos mainai vertikaliuose vamzdžiuose ir kanaluose turbulencinės mišrios konvekcijos atveju yra didesni nei esant vien priverstinei konvekcijai.

Pasvirusiuose vamzdžiuose ir kanaluose tyrimų atlikta labai nedaug. Esant vienkryptėms tėkmėms mums žinomi tik tyrimų pasvirusiame plokščiame kanale, atliktų Lietuvos energetikos institute, rezulta-

tai [2]. Pastarajame darbe šilumos atidavimas buvo nagrinėtas esant simetriškam kaitinimui. Darbo rezultatai parodė, kad esant stabiliai tankio stratifikacijai (kaitinama viršutinė sienelė) minimalūs šilumos mainai nepriklauso nuo kanalo pasvirimo kampo, bet krizinis termogravitacijos parametras (jam esant stabilus minimalus šilumos atidavimas) yra glaudžiai susijęs su kanalo pasvirimo kampu. Esant nestabiliai tankio stratifikacijai (kaitinama apatinė sienelė), šilumos mainai nepriklauso nuo kanalo pasvirimo kampo, kai $\varphi = 0-60^\circ$.

Ankstesniame mūsų darbe [3] buvo pateikti šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiame kanale ($\varphi = 60^\circ$) stabilizuotoje dalyje esant priešingų krypčių tėkmėms rezultatai.

Šiame darbe pateikiami šilumos mainų kitimo pagal ilgį, esant turbulencinei mišriai konvekcijai, eksperimentinio tyrimo pasvirusiame plokščiame kanale duomenys, kai pasvirimo kampas $\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ nuo horizontalios padėties. Rezultatai gauti vienpusio kaitinimo stabilios tankio stratifikacijos (kaitinama viršutinė sienelė) atveju, kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos (priešingų krypčių tėkmės).

2. EKSPERIMENTINIS RŪOŽAS

Eksperimentai atlikti naudojant atviro tipo aerodinaminį kontūrą. Oro slėgis prieš srauto matavimo

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

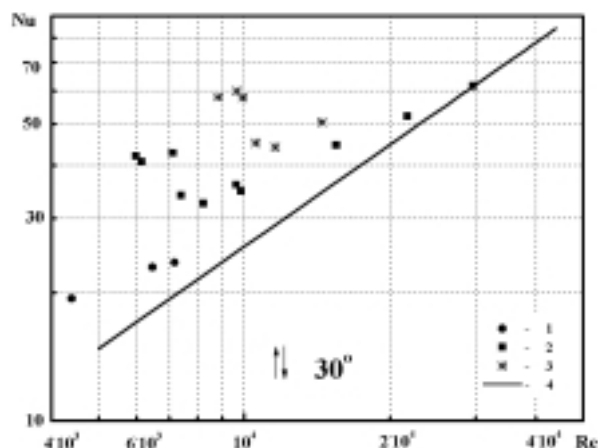
Šilumos mainams tirti plokščiam kanale mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmių atveju panaudotas laboratorijoje esantis eksperimentinis įrenginys. Tai plokščias kanalas, kurio aukščio ir pločio santykis apytiksliai yra 1:10, o bendras ilgis – 6260 mm. Jį sudaro hidrodinaminės stabilizacijos ruožas 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 buvo iki 0,8 MPa. Norint tai 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 $q_w \approx \text{const}$, sienelės ir srauto temperatūrų skirtumui iki 150 K. Išsamesni eksperimentinio ruožo duomenys pateikti [1].

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Eksperimentiniai tyrimai atlikti plačiame oro tėkmės parametrų kitimo intervale ($Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$) esant įvairiems šilumnešio slėgiams (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 MPa) vienpusio kaitinimo atveju. Buvo kaitinama tikrai viršutinė sienelė.

1 pav. matyti, kad šilumos atidavimo intensyvumas labai priklauso nuo oro slėgio (panašiai yra ir vertikalaus kanalo atveju [4]). 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. Esant mažiausioms Re reikšmėms, taškai pradeda išsidėstyti pagal horizontalę, nes čia vyrauja natūrali konvekcija. Šioje zonoje šilumos atidavimas, esant 0,6 ir 0,8 MPa slėgiams, neapima nuo Re . Būdinga tai, kad čia stebimas šuoliškas šilumos atidavimo sumažėjimas esant tiek 0,6 MPa slėgiui (kai $Re \approx 7500$), tiek 0,8 MPa slėgiui (kai $Re \approx 10^4$). Tokio staigaus šilumos atidavimo pasikeitimo priežastys paaiškės vė-



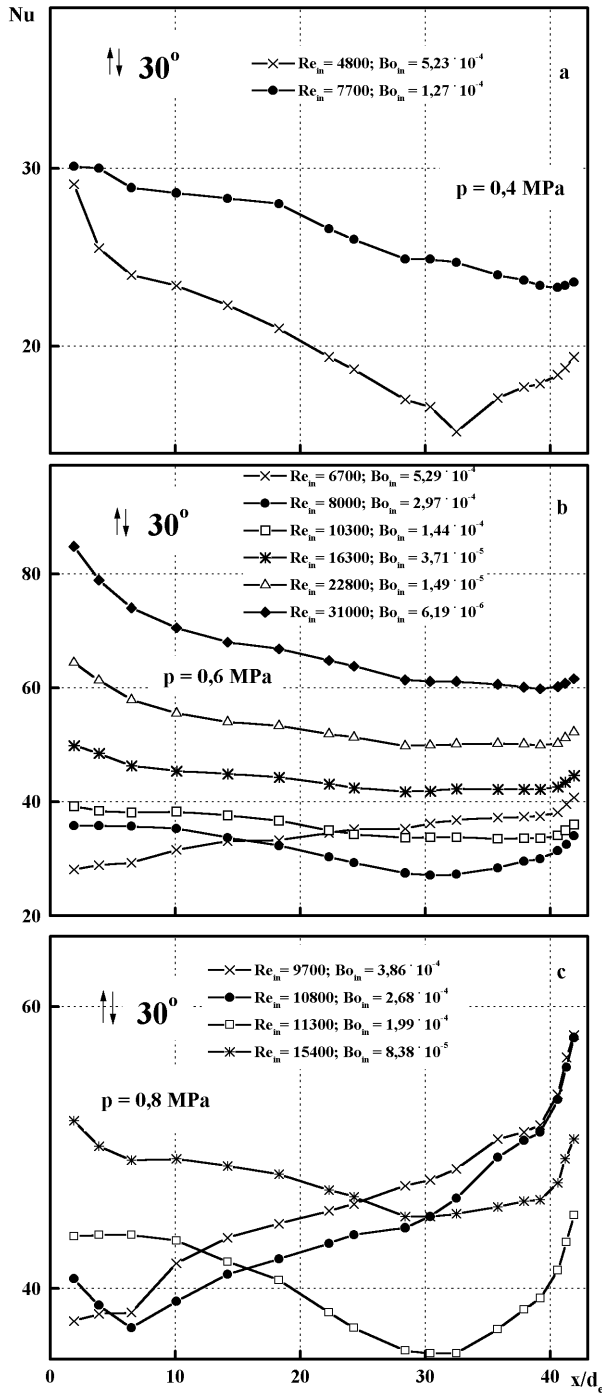
1 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 41,9$) vienpusio kaitinimo atveju, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos (30° kampas). 1 – $p = 0,4$ MPa, 2 – 0,6 MPa, 3 – 0,8 MPa, 4 – priverstinė konvekcija

liau, išnagrinėjus šilumos atidavimo kitimą išilgai kanalo. Panašiai šilumos mainai vyksta ir polinkio kampe $\phi = 60^\circ$ atveju, tačiau šilumos atidavimo sumažėjimas nėra ryškus.

2 pav. parodyta, kaip keičiasi šilumos atidavimas (Nu) išilgai kanalo esant įvairiems oro slėgiams, kai kanalo pasvirimo kampas yra 30° . Matyti, kad ne visada šilumos atidavimo kitimas yra monotoniškas. Yra režimų, kai nuo tam tikro x/d_e stebimas gana staigus šilumos mainų suintensyvėjimas. Taip atsitinka mažiausių Re atvejais esant 0,4 ir 0,6 MPa slėgiams (2 pav., a, b). Esant 0,8 MPa slėgiui (2 pav., c) Nu kitimo anomalijos pasireiškia akivaizdžiausiai. Kai kanalo polinkio kampas $\phi = 60^\circ$, šios anomalijos yra mažesnės.

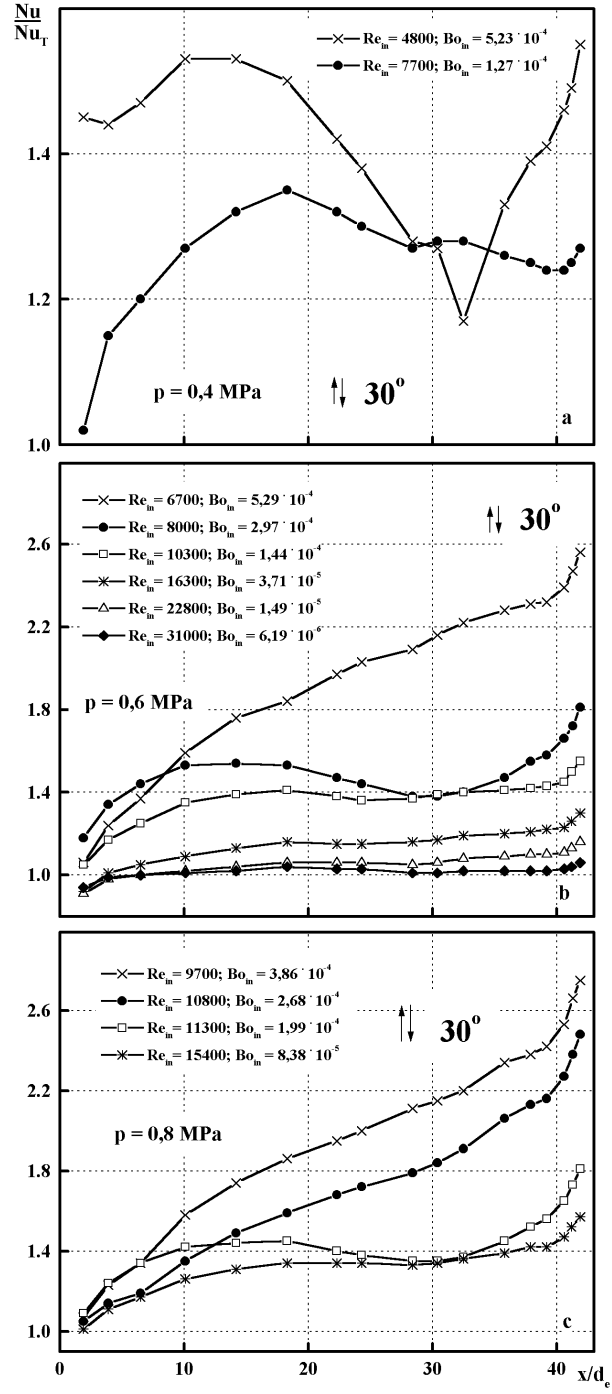
3 pav. parodyta, kaip keičiasi santykinis šilumos atidavimas išilgai kanalo esant įvairiems oro slėgiams, kai kanalo pasvirimo kampas yra 30° . Šilumos atidavimas grynai priverstinės turbulencinės konvekcijos atveju (Nu_T) plokščiam kanale vienpusio kaitinimo atveju buvo naudojamas kaip normuojantis dydis esant tam pačiam Re skaičiui. Kad ir nedideliame tėkmės savybių kitime šiuose tyrimuose įvertinti naudota šilumos atidavimui žiediniuose kanaluose nustatyti pasiūlyta metodika [5].

Esant didžiausioms Re ($Re_{in} = 31000$, 3 pav., b) šilumos atidavimas per visą kanalo ilgį vyksta priverstinės konvekcijos sąlygomis ($Nu/Nu_T \approx 1$). Mažėjant Re santykinio šilumos atidavimo pobūdis pasikeičia, nes tada jau yra mišrios konvekcijos režimai. Esant 0,4 MPa slėgiui ir $Re_{in} = 7700$ (3 pav., a) iki $x/d_e \approx 18$ santykinis šilumos atidavimas didėja. Tai susiję su tuo, kad termogravitacijos jėgų poveikis reiškiasi palaipsniui, t. y. didėja didėjant x/d_e , kol pasiekama stabilizacija. Pradedant $x/d_e \approx 18$ santyki-



2 pav. Šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo (30° kampas)

nis šilumos atidavimas pradeda mažėti. Tai susiję su tuo, kad termogravitacijos jėgų poveikį lemiančių kriterijų ir parametru skaitinės reikšmės (Gr_q , Bo_1 , Bo_2) mažėja tolstant nuo kaitinimo pradžios, gi Re reikšmės išilgai kanalo keičiasi mažai. Šilumos atidavimo augimas palaipsniui didėjant x/d_e stebimas ir esant 0,6 MPa slėgiui (3 pav., b), kai Re_{in} kinta nuo 10^4 iki $3,1 \cdot 10^4$. Pagrindinis ypatumas yra tai, kad visų slėgių atvejais esant mažiausiems Re šilumos atidavimas nuo tam tikro x/d_e pradeda didėti. Kai



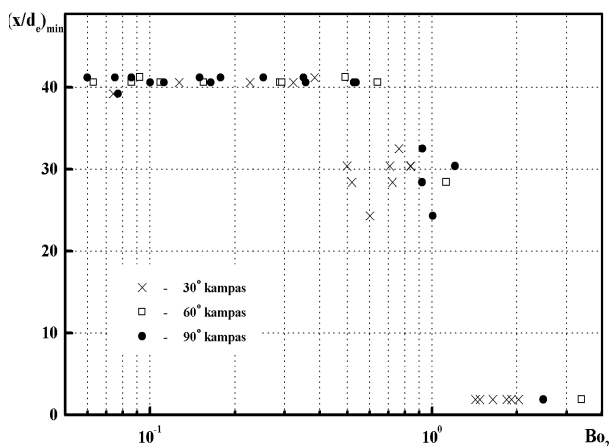
3 pav. Santykinio šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo (30° kampas)

slėgis yra 0,4 MPa, tai stebima esant $Re_{in} = 4800$, kai $p = 0,6$ MPa – esant $Re < 8000$, kai $p = 0,8$ MPa – esant $Re < 15000$. Matyti, kad ryškus šilumos atidavimo didėjimas atsiranda, kai $x/d_e \approx 30$, ir po to peršoka į kaitinimo pradžią (3 pav., b, $Re_{in} = 6700$; 3 pav., c, $Re_{in} = 10800$).

Panašūs šilumos atidavimo padidėjimo reiškiniai pastebimi ir esant kitam kanalo pasvirimo kampui ($\varphi = 60^\circ$), taip pat vertikaliajam kanalui ($\varphi = 90^\circ$), tiktai jie mažiau išreikšti, palyginti su $\varphi = 30^\circ$ kampui.

Autorių žiniomis, toks šilumos atidavimo išilgai kanalo dėsningumo pokytis, esant priešingų krypčių turbulencinėms tėkmėms, nustatytas pirmą kartą. Tai gali būti susiję su tėkmės vietiniu atitrūkimu prie kanalo sienelės dėl termogravitacijos jėgų poveikio ir su dėl to kylančia papildoma tėkmės turbulizacija. Tačiau, norint tiksliai nustatyti šilumos atidavimo intensyvumo pokyčio priežastį, reikia atlikti struktūrinius srauto tyrimus.

Tėkmės vietinio atitrūkimo (minimalaus šilumos atidavimo) taško dinamika esant įvairiems polinkio kampams parodyta 4 pav. Čia sąlyginai pavaizduota, kad esant nedidelėms termogravitacijos parametro Bo_2 reikšmėms minimalus šilumos atidavimas yra kanalo gale ($x/d_e \approx 40$). Kai termogravitacijos parametras Bo_2 padidėja iki 0,5 stebimi režimai su tėkmės atitrūkimu, kai $x/d_e \approx 25-35$. Kai kanalo polinkio kampas $\varphi = 30^\circ$, tėkmė atitrūksta esant Bo_2 mažesniems, negu vertikaliame kanale. Kai kanalo polinkio kampas $\varphi = 60^\circ$, turime tik vieną tokį režimą, todėl iš esamų duomenų negalima pasakyti, ar galioja bendras dėsningumas, kad didėjant polinkio kampui tėkmė atitrūksta esant didesnėms termogravitacijos parametro Bo_2 reikšmėms. Kai $Bo_2 > 1,4$ ir $\varphi = 30^\circ$, šilumos atidavimo minimumas persikelia į kaitinimo pradžią. Didėjant polinkio kampui tai įvyksta esant didesnėms Bo_2 reikšmėms. Aiškiai išreikštos $(x/d_e)_{\min}$ priklausomybės nuo Bo_2 nebuvimas galėtų reikšti, jog priklausomai nuo Bo_2 dydžio susiformuoja didesnis arba mažesnis sūkurys pagal kanalo aukštį.



4 pav. Tėkmės vietinio atitrūkimo (mažiausio šilumos atidavimo) taško priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2

4. IŠVADOS

1. Atlikus šilumos atidavimo tyrimus pasvirusiame ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ nuo horizontalios padėties) plokščiaame kanale vienpusio kaitinimo atveju ($q_w \approx \text{const}$) esant priešingų krypčių tėkmėms, kai $Re = 4 \cdot 10^3 -$

$- 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$, galima padaryti tokias išvadas.

1. Esant priešingų krypčių turbulencinėms tėkmėms, kai termogravitacijos jėgų poveikis didelis ($Bo_2 \geq 0,5$), nuo tam tikro x/d_e gerokai suintensyvėja šilumos atidavimas ir tai gali būti sąlygojama vietinio srauto atitrūkimo prie kanalo sienelės.

2. Tėkmės vietinio atitrūkimo (minimalaus šilumos atidavimo) taško priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 nėra aiškiai išreikšta ir tai galėtų reikšti, jog priklausomai nuo Bo_2 dydžio susiformuoja didesnis arba mažesnis sūkurys pagal kanalo aukštį.

Pažymėjimai

- c_p – savitoji šiluma J/(kg · K);
- d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_e = 2h$ (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 – srauto vidutinis masinis greitis m/s;
- x – atstumas nuo kaitinimo pradžios m;
- α – šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$, W/(m² · K);
- β – tūrinis plėtimosi koeficientas 1/K;
- λ – šilumos laidumo koeficientas W/(m · K);
- ν – kinematinis klampumo koeficientas m²/s;
- μ – dinaminis klampumo koeficientas Pa · s;
- φ – polinkio kampas laipsniais.

Kriterijai

- Bo – termogravitacijos parametras, $Bo = Gr_q / (Re^{3,425} Pr^{0,8})$;
- Bo_1 – termogravitacijos parametras, $Bo_1 = Gr_q / (Re^{2,75} Pr^{1,12})$;
- Bo_2 – termogravitacijos parametras, $Bo_2 = Gr_q / (Re^{2,5} Pr)$;
- Gr_q – Grashofio skaičius pagal šilumos srautą, $Gr_q = (g \cdot \beta \cdot d^4 \cdot q_w) / (\nu^2 \cdot \lambda)$;
- Nu – Nuselto skaičius, $Nu = \alpha d_e / \lambda$;
- Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \mu c_p / \lambda$;
- Re – Reinoldso skaičius, $Re = u d_e / \nu$;

Indeksai

- f – srautas;
- in – įėjime;
- T – priverstinė turbulencinė konvekcija;
- w – sienelė.

Gauta
2002 04 03

Literatūra

- Poškas R., Poškas P., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiame kanale turbulentinės mišrios konvekcijos atveju, esant priešingų krypčių srautams bei vienpusiam kaitinimui, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 53–60.
- Poškas P., Bartkus G., Vilemas J. Turbulent mixed convection heat transfer in upward inclined flat channel gas flow // Heat Transfer. Kyongju, 1998. Vol. 3. P. 275–280.
- Poškas R., Šinkūnas S., Poškas P. Šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiame kanale su vienpusiu kaitinimu, esant priešingų srautų turbulentinei mišriai konvekcijai, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2001. Nr. 1. P. 10–14.
- Poškas R., Šinkūnas S., Poškas P. Šilumos atidavimas išilgai vertikalaus kanalo esant priešingų krypčių 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.

Robertas Poškas, Povilas Poškas, Stasys Šinkūnas

OPPOSING FLOW TURBULENT MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER ALONG INCLINED FLAT CHANNEL

Summary

An experimental investigation of heat transfer in an inclined ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$) flat channel with one-side heating (the upper wall is heated) for turbulent mixed convection opposing flow conditions has been performed in the re-

gion of $Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1.7 \cdot 10^8 - 1.4 \cdot 10^{10}$. It was revealed that in an inclined flat channel, when the buoyancy effect is quite high ($Bo_2 \geq 0.5$), for appropriate x/d_e values there is a significant increase in heat transfer. We suppose that this increase of heat transfer is related with the separation of the flow from the channel wall.

Key words: heat transfer, turbulent mixed convection, opposing flows, air, flat channel

Робертас Пошкас, Повилас Пошкас,
Стасис Шинкунас

ТЕПЛОТДАЧА ПО ДЛИНЕ НАКЛОННОГО ПЛОСКОГО КАНАЛА ПРИ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

Резюме

Приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи в наклонном ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$) плоском канале с односторонним нагревом (нагревается верхняя стенка) при турбулентной смешанной конвекции в условиях противоположных направлений вынужденной и естественной конвекций в интервале $Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$. Получено, что в наклонном плоском канале, когда влияние термогравитационной силы ($Bo_2 \geq 0,5$) велико, при определенных x/d_e теплоотдача резко вырастает. Предполагается, что это связано с отрывом потока от стенки канала.

Ключевые слова: теплоотдача, турбулентная смешанная конвекция, противоположные направления потоков, воздух, плоский канал