
Šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiame kanale su vienpusiu kaitinimu, esant priešingų srautų turbulentinei mišriai konvekcijai, eksperimentinis tyrimas

Robertas Poškas*,
Stasys Šinkūnas**,
Povilas Poškas*

* Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių šilumos mainų
laboratorija,

Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas

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

Atlikti šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiame kanale ($\varphi = 60^\circ$) su vienpusiu kaitinimu (kaitinama viršutinė sienelė) esant priešingų srautų turbulentinei mišriai konvekcijai, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, o $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$, tyrimai. Duomenys analizuoti panaudojant įvairius termogravitacijos parametrus. Gauti duomenys palyginti su anksčiau gautais rezultatais vertikaliame kanale.

Raktažodžiai: šilumos mainai, turbulentinė mišri konvekcija, priešingų krypties srautai, oras, plokščias kanalas

1. ĮVADAS

Termogravitacijos jėgų poveikiui turbulentiškuose srautuose išaiškinti atlikta nemažai eksperimentinių ir skaitinių tyrimų. Nepaisant to, dauguma šių tyrimų atlikta vertikaliuose vamzdžiuose, pavyzdžiui, [1–3] darbuose. Naujausi Lietuvos energetikos institute atliktų mišrios konvekcijos tyrimų vertikaliame plokščiame kanale, esant vienkryptiams srautams, rezultatai pateikti [4], o esant priešingų krypties srautams – [5].

Turbulentinės mišrios konvekcijos atveju, kai natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptys sutampa (vienkryptiai srautai), buvo nustatytos srauto laminarizacijos ir šilumos mainų sumažėjimo, palyginti su tik priverstine konvekcija, zonos. Tačiau, esant dideliame termogravitacijos jėgų poveikiui, srauto turbulentiškumas ir šilumos mainai padidėja, palyginti su tik priverstine konvekcija. Išanalizavus įvairių autorių atliktų tyrimų duomenis, atskleista, kad šilumos atidavimo minimumo padėtis labai skirtinga, t. y. stebima esant įvairioms termogravitacijos parametro reikšmėms. Lietuvos energetikos institute gauti originalūs duomenys leido nustatyti, kad krizinė termogravitacijos parametro reikšmė (jai esant gaunamas minimalus šilumos atidavimas) labai priklauso nuo nagrinėjamo atstumo x/d iki kaitinimo pradžios. Taip pat nustatyta, kad ilguose kanaluose esant pakankamai dideliame termogravitacinių jėgų poveikiui

pagal kanalo ilgį atsiranda būdingi šilumos atidavimo minimumai ir maksimumai.

Anksčiau minėtų ir kitų autorių darbuose gauta, kad, esant priešingoms natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptims (priešingi srautai), šilumos mainai vertikaliuose vamzdžiuose ir kanaluose turbulentinės mišrios konvekcijos atveju yra didesni nei esant vienpriverstinei konvekcijai.

Pasvirusiuose vamzdžiuose ir kanaluose tyrimų atlikta labai nedaug. Mums žinomi tik tyrimų pasvirusiame plokščiame kanale, esant vienkryptiams srautams, atliktų Lietuvos energetikos institute, rezultatai [6]. 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 stebimas 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 šis kampas kinta ribose $\varphi = 0-60^\circ$.

Šiame darbe pateikiami šilumos mainų esant turbulentinei mišriai konvekcijai eksperimentinio tyrimo pasvirusiame plokščiame kanale duomenys, kai pasvirimo kampas su horizontu $\varphi = 60^\circ$. Rezultatai gauti vienpusio kaitinimo stabilios tankio stratifikaci-

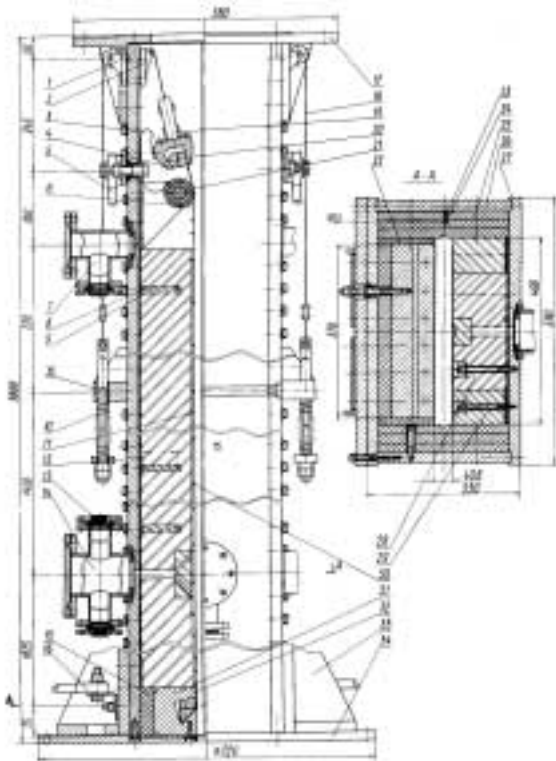
jos (kaitinama viršutinė sienelė) atveju, kai priversinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos.

2. EKSPERIMENTINIS Ruožas

Eksperimentai atlikti naudojant atviro tipo aerodinaminį kontūrą, kuris detalai aprašytas [5].

Šilumos mainams plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptų srautuose tirti panaudotas laboratorijoje sukurtas eksperimentinis įrenginys, kuriuo anksčiau buvo tiriamas šilumos atdavimas mišrios konvekcijos atveju vertikaliame kanale vienkryptuose srautuose. Eksperimentinį ruožą sudaro plokščias kanalas, kurio aukščio ir pločio santykis apytiksliai lygus 1:10, o bendras ilgis – 6260 mm. Jis susideda iš hidrodinaminės stabilizacijos ruožo ir kalorimetrinės dalies. Hidrodinaminės stabilizacijos ruožo ilgis lygus 1945 mm ($x/d_c \approx 25$).

Kalorimetrinio ruožo konstrukcija parodyta 1 pav. Kanala, kurio plotis – 400 mm, aukštis – 40,8 mm, o ilgis – 3890 mm ($x/d_c \approx 50$), sudaro dvi pagrindinės 27 ir dvi šoninės 26 duraliuminio plokštės. Iš vidinės pusės duraliuminio karkasas padengtas šilu-



1 pav. Eksperimentinis ruožas. 1, 2 – kreipiantieji ratai; 3 – lanksčios šinos; 4, 6, 8, 24, 30, 32 – termoporos; 5, 16 – elektros srovės prijungimo kabeliai; 7, 14 – sandarinimo įtaisai; 9, 23 – kamščiai; 10 – spyruoklė; 11 – kalorimetrinė folija; 12, 15, 22 – tarpinės; 13 – hermetiškas lizdas; 17, 33, 34 – tvirtinimo flanšai; 18 – trosas; 19 – izoliatorius; 20, 31 – kontaktai; 21 – volelis-kontaktas; 25, 28, 29 – šilumos izoliacija; 26 – šoninės plokštės; 27 – pagrindinės plokštės; 35 – spyruoklinis įtaisas

mos izoliacija. Izoliaciją sudaro 120 mm storio asbocementinės plytos ant pagrindinių plokščių ir 60 mm bendro storio asbocementiniai lakštai ant šoninių plokščių.

Eksperimentinio ruožo kalorimetrinis paviršius pagamintas iš 0,38 mm storio ir 370 mm pločio nerūdijančio plieno folijos 11. Ruožo įėjimo dalyje folija įtvirtinta nejudamuose žalvariniuose kontaktuose 31, kurie savo ruožtu žalvariniais varžtais sujungti su variniais kontaktais 16, izoliuotais nuo pagrindinių duraliuminio plokščių 27 stiklotekstolito tarpinėmis 15 ir 22. Ruožo išėjimo dalyje folija besisukančiais kreipiančiais žalvariniais kontaktais 21 įtvirtinta judamuose kontaktuose 20, kurie lanksčiomis varinėmis šinomis 3 sujungti su voleliais-kontaktais 21 ir su variniais kontaktais 5. Judami kontaktai 20 per izoliatorius 19 plieniniais lynais 18 sujungti su spyruokliniu įtaisu 35, sukuriančiu iki 28 kN tempimo jėgą. Tokiu būdu ne tik kompensuojamas šiluminis pailgėjimas, bet ir folija gerai prispaudžiama prie šilumos izoliacijos 28.

Folijos temperatūra matuojama 0,3 mm skersmens chromelio-aliumelio termoporomis 30, privirintomis prie folijos iš oru neapiplaunamos pusės. Tomis pačiomis termoporomis matuojami ir įtampos kritimai pagal folijos ilgį. Ant abiejų folijų išilginių simetrijos ašių privirinta po dvidešimt penkias termoporas, o dviuose pjūviuose privirinta papildomai po dvi termoporas folijų kraštuose.

Šilumos nuostoliams į aplinką nustatyti šešiuose pjūviuose pagal pagrindinių plokščių 27 šilumos izoliacijos 28 ilgį ir aštuoniuose pjūviuose pagal šoninių plokščių 29 šilumos izoliacijos 25 ilgį vienodu atstumu nuo paviršiaus pritvirtinta po dvi termoporas 8 ir 24. Visi termoporų laidai į paviršius išvedami per sandarinimo įtaisus 7, 14 ir hermetiškus lizdus 13.

Siekiant didesnės Gr skaičiaus reikšmės ir tuo pačiu didesnio termogravitacinių jėgų poveikio, šilumos nešėjo slėgis eksperimentų metu siekė iki 0,6 MPa. Tam tikslui visas eksperimentinis ruožas buvo patalpintas į slėgiminį indą, kurio skersmuo lygus 870 mm, ilgis – 7200 mm, svoris – apie 2000 kg, tūris – 4 m³. Indas sudarytas iš dviejų korpusų, tarpusavyje sujungtų flanšiniu būdu. Prie korpuso, kuriame yra hidrodinaminės stabilizacijos ruožas, privirinti atvamzdžiai orui tiekti ir užtekančio srauto temperatūros matavimo termoporų laidams išvesti, o prie korpuso, kuriame yra plokščio kanalo kalorimetrinė dalis, privirinti atvamzdžiai orui išleisti.

Toks eksperimentinis įrenginys įgalino atlikti eksperimentinius šilumos mainų tyrimus plokščiame kanale esant įvairiam (mūsų atveju 0,2; 0,4; 0,6 MPa) šilumos nešėjo (oro) slėgiui. Visi eksperimentai atlikti esant ribinei sąlygai $q_w \approx \text{const}$, kai temperatūrų skirtumas tarp sienelės ir srauto siekė iki 150 K.

Tirta tik turbulentinė mišri konvekcija Re skaičių intervale nuo $4 \cdot 10^3$ iki $4 \cdot 10^4$, kai Gr_q skaičius kito nuo $1,7 \cdot 10^8$ iki $1,4 \cdot 10^{10}$.

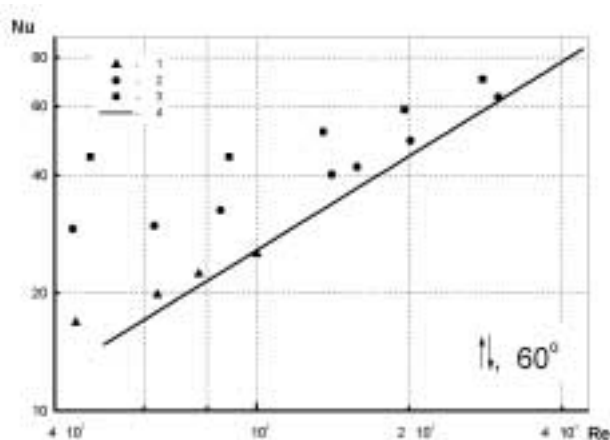
Gautų rezultatų pirminio apdorojimo stadijoje buvo nustatomi pagrindiniai kriterijai Nu, Re, Gr_q ir Pr. Juose būdingi parametrai yra srauto vietiniai vidutiniai masiniai temperatūra ir greitis bei plokščio kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_e \approx 2h$.

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

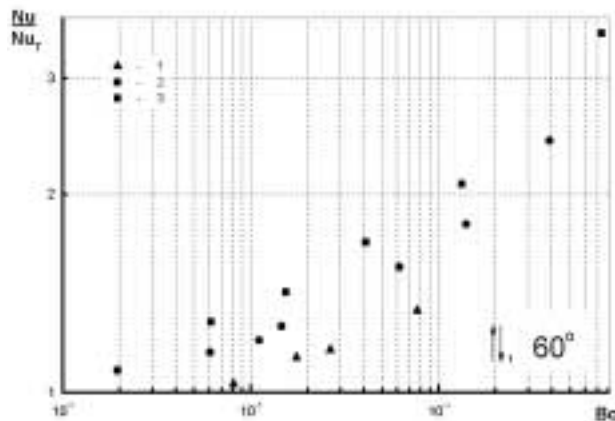
Eksperimentiniai tyrimai atlikti plačiame oro srauto parametrų kitimo intervale ($Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1,7 \cdot 10^8 - 1,4 \cdot 10^{10}$) esant įvairiems šilumnešio slėgiams (0,2; 0,4; 0,6 MPa) vienpusio kaitinimo atveju. Buvo kaitinama tikrai viršutinė plokštė.

2 pav. pateikti duomenys rodo, kad šilumos atidavimo intensyvumas labai priklauso nuo oro slėgio. Kuo didesnis oro slėgis (didesnis Gr), tuo šilumos atidavimas mažų Re srityje intensyvesnis. Didelių Re srityje bet kurio slėgio atveju šilumos atidavimo intensyvumas artėja prie šilumos atidavimo priverstinės konvekcijos atveju. Esant mažiausio Re reikšmėms, taškai pradeda išsidėstyti pagal horizontalę, nes šioje srityje vyrauja natūrali konvekcija. Dėl šios priežasties čia šilumos atidavimas esant 0,4 ir 0,6 MPa slėgiams neapima nuo Re.

Kaip matyti 3 pav., santykinis šilumos atidavimas pasvirusiame plokščiam kanale esant priešingų krypčių srautams ir vienpusiam kaitinimui, su analogišku atveju vertikaliame kanale monotoniškai didėja didėjant termogravitacijos parametrai Bo. Šiuo atveju šilumos atidavimas plokščiam kanale esant vienpusiam kaitinimui vien priverstinės konvekcijos atveju (Nu_T) buvo naudojamas kaip normuojantis dydis. Siekiant įvertinti, nors ir nedidelį, srauto savybių kiti-



2 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. 1 – p = 0,2 MPa, 2 – 0,4 MPa, 3 – 0,6 MPa, 4 – priverstinė konvekcija



3 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro $Bo = Gr_q / (Re^{3,425} Pr^{0,8})$ stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 41,9$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos. 1 – p = 0,2 MPa, 2 – 0,4 MPa, 3 – 0,6 MPa

mą, panaudota [7] pasiūlyta metodika žiediniams kanalams, pagal kurią ribiniam plokščio kanalo atvejui:

$$\frac{Nu_T}{Nu_{\psi=1}} = 1 - 0,744 \left\{ 1 - \exp \left[-K_f (af + n_\mu \Phi K_f) \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\text{čia } a = -0,53n_\rho - \frac{1}{3}n_\lambda - \frac{1}{4}n_c,$$

$$f = 1 - \exp(-0,1\tilde{x}),$$

$$\Phi = \frac{1,25(0,01\tilde{x})^2}{1 + (0,01\tilde{x})^2},$$

$$\tilde{x} = \frac{x}{d_e},$$

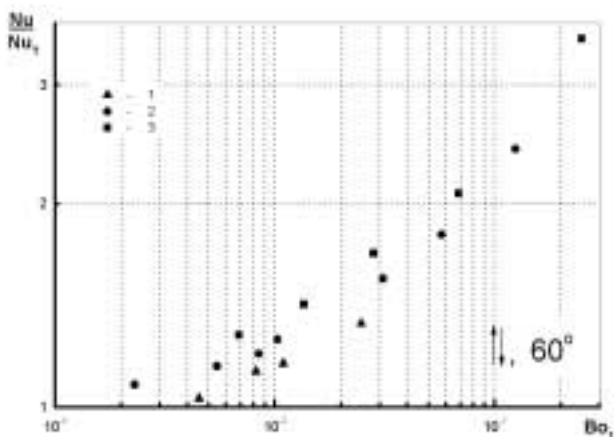
$$K_f = \frac{q_w d_e}{\lambda_f T_f Nu_{\psi=1}}.$$

$n_\rho, n_\lambda, n_c, n_\mu$ – funkcijų, įvertinančių dujų individualių savybių priklausomybę nuo temperatūros, laipsnio rodikliai. $Nu_{\psi=1}$ – Nuselto skaičius, apskaičiuotas esant pastovioms srauto fizikinėms savybėms.

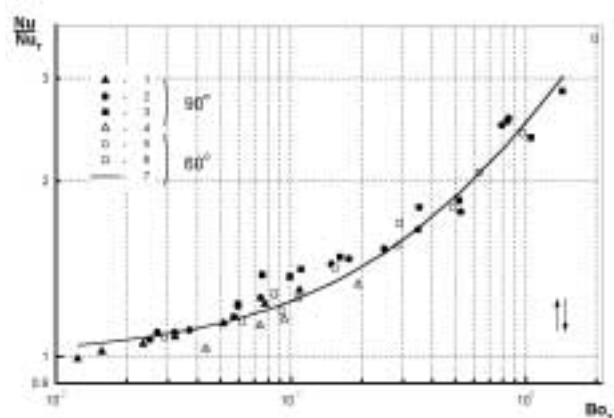
Plokščiam kanalui vienpusio kaitinimo atveju $Nu_{\psi=1}$ surandamas pagal [1] pasiūlytą formulę:

$$Nu_{\psi=1} = 0,01935 Re^{0,8} Pr^{0,6} [0,86 + 0,8(x/d_e)^{-0,4}]. \quad (2)$$

Apdorojant šių tyrimų duomenis, kaip ir analizuojant šilumos mainų duomenis vertikaliame kanale [5], laipsnio rodikliai prie Re buvo parinkti $m = 3,425$,



4 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro $Bo_1 = Gr_q / (Re^{2.75} Pr^{1.12})$ stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 41,9$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos. 1 – $p = 0,2$ MPa, 2 – $0,4$ MPa, 3 – $0,6$ MPa



5 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro $Bo_2 = Gr_q / (Re^{2.5} Pr)$ stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 41,9$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos. 1 – $p = 0,2$ MPa, 2 – $0,4$ MPa, 3 – $0,6$ MPa, 4 – $0,2$ MPa, 5 – $0,4$ MPa, 6 – $0,6$ MPa, 7 – pagal (3) priklausomybę

2,75 ir 2,5. Kaip rodo 3–5 pav. pateikti rezultatai, kaip ir vertikalaus kanalo atveju, duomenys, gauti esant skirtingiems oro slėgiams (5 pav.), geriausiai koreliuoja, kai $m = 2,5$. Tačiau ir šiuo atveju galima pastebėti nedidelį taškų išsisklaidymą priklausomai nuo oro slėgio. Tikėtina, kad laipsnio rodiklio m reikšmė gali mažėti mažėjant kanalo polinkio kampui. Galutinę išvadą bus galima padaryti atlikus tyrimus prie kitų polinkio kampo reikšmių. Galima konstatuoti, kad šilumos atidavimas esant 60° polinkio kampui mažai skiriasi nuo šilumos atidavimo vertikaliame kanale ir jo skaičiavimui galima naudoti [5] darbe pasiūlytą priklausomybę:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 1 + 1,52 Bo_2^{0,79} \quad (3)$$

(Darbe [5] šioje priklausomybėje yra neteisingas koeficientas bei 6 pav. x ašyje praleistas daugiklis 10^{-2} .)

4. IŠVADOS

Atlikus šilumos atidavimo tyrimus pasvirusiame plokščiame kanale vienpusio kaitinimo atveju (kaitinama viršutinė plokštė) esant priešingų krypčių srautams, 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. Nustatyta, jog termogravitacijos jėgų įtaka plokščiame pasvirusiame kanale $\varphi = 60^\circ$ mišrios konvekcijos vienpusio kaitinimo atveju esant priešingų krypčių srautams yra panaši į jos įtaką vertikaliame kanale.

2. Termogravitacijos parametre $Bo = Gr_q / Re^m Pr^n$ keičiant laipsnio rodiklį m nuo 3,425 iki 2,5, esant įvairiems slėgiams, gauti eksperimentiniai duomenys geriausiai koreliuoja, kai jo reikšmė $m = 2,5$.

3. Kai kanalo polinkio kampas $\varphi = 60^\circ$, šilumos atidavimo rezultatai pakankamai gerai koreliuoja su analogiškomis sąlygomis vertikaliame kanale gautais duomenimis.

Pažymėjimai

- c_p – savitoji šiluma J/(kg · K);
- d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo $d_e = 2h$ (m);
- g – laisvo 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.

Graikiški pažymėjimai

- 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, $Nu = \alpha d_f / \lambda$;
 Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \mu c_p / \lambda$;
 Re – Reinoldso skaičius, $Re = u d_f / \nu$.

Indeksai

f – srautas;
 T – priverstinė turbulentinė konvekcija;
 w – sienelė.

Gauta
2001 02 05

Literatūra

1. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва, 1986. 192 с.
2. Jackson J. D., Cotton M. A., Axell B. P. Studies of mixed convection in vertical tubes. Review // Int. J. Heat Fluid Flow. 1988. Vol. 10, N 1. P. 2–15.
3. Вилемас Ю., Пошкас П. Теплоотдача в газоохлаждаемых каналах при воздействии термогравитационных сил. Вильнюс, 1992. 240 с.
4. Пошкас П., Барткус Г., Колесниковас Й. Теплоотдача в вертикальном плоском канале при смешанной турбулентной конвекции // Energetika. 1996. №. 1. С. 18–24.
5. 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.
6. 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.
7. Vilemas J., Čėsna B. and Survila V. Heat Transfer in Gas-Cooled Annular Channels. New York, 1987.

Robertas Poškas, Stasys Šinkūnas, Povilas Poškas

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPPOSING FLOW TURBULENT MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN INCLINED FLAT CHANNEL WITH ONE-SIDE HEATING

S u m m a r y

An experimental investigation of heat transfer in an inclined flat channel with one-side heating (the upper wall

is heated) for turbulent mixed convection opposing flow conditions have been performed in the region of $Re = 4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$, $Gr_q = 1.7 \cdot 10^8 - 1.4 \cdot 10^{10}$.

With changing the power index of Re in the buoyancy parameter $Bo = Gr_q / Re^m Pr^n$ within the limits of $m = 3.425 - 2.5$, the best correlation of data for different pressure of air was found to be at $m = 2.5$.

It is demonstrated that the heat transfer rate in inclined flat channel ($\varphi = 60^\circ$) is close to the heat transfer rate in vertical flat channel for the same boundary conditions.

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

Робертас Пошкас, Стасис Шинкунас,
Повилас Пошкас

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОДНОСТОРОННИМ НАГРЕВОМ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОВ

Р е з ю м е

Приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи в наклонном 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 при изменении показателя степени при Re в параметре термогравитации $Bo = Gr_q / Re^m Pr^n$ в пределах m от 3,425 до 2,5 наилучшая корреляция данных, полученных при разных давлениях воздуха, достигается при использовании показателя степени $m = 2,5$.

Показано, что теплоотдача, когда угол наклона плоского канала $\varphi = 60^\circ$, довольно хорошо коррелирует с данными, полученными при аналогичных условиях в вертикальном канале.

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