

Šilumos atidavimo eksperimentinis tyrimas vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse pereinamojo tekėjimo zonoje

2. Vietinio šilumos atidavimo analizė esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui ir rezultatų apibendrinimas

Robertas Poškas,

Arūnas Sirvydas,

Gytis Bartkus

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: rposkas@mail.lei.lt*

Šiame straipsnyje pateikti vietinio šilumos atidavimo pereinamojo tekėjimo zonoje vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse eksperimentinių tyrimų rezultatai. Išanalizuotas vietinio šilumos atidavimo kitimas esant įvairiems oro slėgiams (0,7–1,0 MPa), t. y. esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui. Eksperimentinių rezultatų analizė parodė, jog esant didesniems oro slėgiams šilumos atidavimo tendencijos yra panašios į tas, kurios buvo nustatytos ir esant mažesniems oro slėgiams (0,2–0,4 MPa). Tačiau, kai oro slėgis didesnis (t. y. didesnis termogravitacijos jėgų poveikis), perėjimas iš sukurinio tekėjimo režimo į turbulentinį nesukelia tokio žymaus šilumos atidavimo sumažėjimo, koks buvo pastebėtas esant mažesniems oro slėgiams. Tai yra susiję su gerokai padidėjusiu turbulentiu šilumos pernešimu dėl žymaus termogravitacijos jėgų poveikio ir esant turbulentiui (nesukuriniam) tekėjimui.

Taip pat buvo nustatyta, kad didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui Re skaičius, kuriam esant stebimas minimalus šilumos atidavimas (perėjimas iš sukurinio į turbulentinį tekėjimo režimą), padidėja. Šiam kriziniam Re skaičiui (Re_{cr2}) apskaičiuoti stabilizuoto tekėjimo atveju buvo pasiūlyta apibendrinanti priklausomybė.

Raktažodžiai: vertikalus plokščias kanalas, pereinamojo tekėjimo zona, vietinis šilumos atidavimas, priešingų krypčių mišri konvekcija, žymus termogravitacijos jėgų poveikis

1. ĮVADAS

Pirmame šios straipsnių serijos straipsnyje [1] buvo apžvelgti darbai, kuriuose tirta tėkmės struktūra ir šilumos atidavimas esant pereinamajam tekėjimo režimui. Taip pat buvo pateikti vietinio šilumos atidavimo pereinamojo tekėjimo zonoje vertikaliame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse eksperimentinių tyrimų, atliktų Lietuvos energetikos institute, rezultatai. Išanalizuotas vietinio šilumos atidavimo kitimas esant įvairiems oro slėgiams (0,1–0,4 MPa), t. y. esant skirtingam termogravitacijos jėgų pasireiškimo laipsniui. Rezultatų analizė parodė, jog priklausomai nuo termogravitacijos jėgos dydžio esant tam tikram x/d_e gali staigiai pasikeisti šilumos atidavimo intensyvumas. Tai yra susiję su tekėjimo režimo pokyčiu, t. y. sukurių susidarymu arba išnykimu. Taip pat nustatyta, kad sukurinio tekėjimo atveju šilumos mainai yra gerokai didesni nei esant turbulentiui tekėjimui, o didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui į turbulentinį tekėjimą pereinama esant didesniems Re skaičiams.

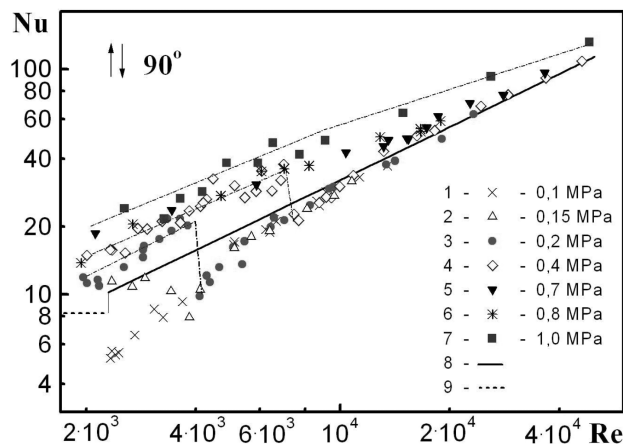
Šiame straipsnyje pateikti vietinio šilumos atidavimo pereinamojo tekėjimo zonoje eksperimentinių tyrimų rezultatai tame pačiame [1] vertikaliame plokščiame kanale esant simetriniam sienelių kaitinimui mišrios konvekcijos atveju, tačiau kai gerokai didesni oro slėgiai (0,7; 0,8 ir 1 MPa), t. y. esant didesniui termogravitacijos jėgų poveikiui laipsniui.

2. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Pirmame šios straipsnių serijos straipsnyje [1] (esant oro slėgiams 0,1–0,4 MPa) parodyta, kad šilumos atidavimo intensyvumas labai priklauso nuo oro slėgio Re kintant iki $8 \cdot 10^3$ (1 pav.). Kuo didesnis slėgis (didesnis Gr_q), tuo intensyvesnis šilumos atidavimas mažų Re srityje. Kaip matyti 1 paveiksle (šiam paveiksle ir kai kuriuose kituose aiškumo dėlei yra pažymėtos brūkšninės-taškinės linijos), kai slėgis 0,2 MPa, Nu esant mažesniems Re skaičiams yra didesnis negu esant priverstinei turbulentei konvekcijai, tačiau kai $Re \approx 4 \cdot 10^3$, matomas staigus šilumos atidavimo sumažėjimas iki $p = 0,1$ MPa. Šis reiškinys rodo, kad kai

$Re = 4 \cdot 10^3$, srauto tekėjimo pobūdis kanale pasikeičia – pereina nuo sukūrinio prie turbulentinio (kuriame sukūriai nėra taip aiškiai išreikšti). Panašiai yra ir kai $p = 0,4$ MPa, tačiau šiuo atveju šilumos atidavimo sumažėjimas iki 0,1 MPa ar 0,2 MPa lygio yra stebimas esant gerokai didesniams Re skaičiams ($Re \approx 8 \cdot 10^3$). Taigi, esant 0,1 MPa slėgiui visų Re skaičių atveju, esant 0,2 MPa slėgiui, kai $Re > 4000$, ir esant 0,4 MPa slėgiui, kai $Re > 8000$, šilumos atidavimo intensyvumas beveik nepriklauso nuo oro slėgio ir monotoniškai didėja didėjant Re skaičiui, kol pasiekia išvystyto turbulentinio tekėjimo priverstinės konvekcijos lygį.

Nauji eksperimentiniai duomenys (1 pav.) esant didesniams oro slėgiams (0,7–1,0 MPa) taip pat rodo panašias šilumos atidavimo tendencijas, kurios buvo nustatytos esant mažesniams oro slėgiams (0,2–0,4 MPa). Tačiau esant didesniams oro slėgiams perėjimas iš sukūrinio tekėjimo režimo į turbulentinį (kai $p = 0,7$ MPa, pereinama esant $Re \approx 15000$, kai $p = 0,8$ MPa – $Re \approx 17000$, kai $p = 1,0$ MPa, tai perėjimas jau nėra aiškiai išreikštas) nesukelia tokio žymaus šilumos atidavimo sumažėjimo, kaip tai buvo pastebėta mažesnių oro slėgių atveju. Taip atsitinka dėl padidėjusio šilumos atidavimo intensyvumo didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui ir turbulentinio (nesukūrinio) tekėjimo atveju.



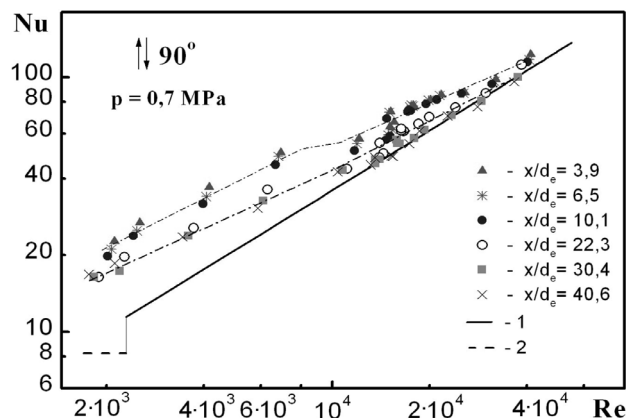
1 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 40,6$) dvipusio kaitinimo atveju: 1–4 – ankstesnių tyrimų rezultatai [1]; 5–7 – nauji duomenys; 8 – turbulentinė priverstinė konvekcija [2]; 9 – laminarinė priverstinė konvekcija [3]

Šilumos atidavimo kitimo priklausomybė nuo Re skaičiaus esant 0,7 MPa oro slėgiui ir skirtingiems x/d_e parodyta 2 paveiksle. Matyti, jog esant mažesniams Re skaičiams (iki $Re \leq 10000$) šilumos atidavimo intensyvumas labiau priklauso nuo x/d_e negu esant didesniams Re skaičiams. Kai Re kinta nuo 9000 iki 15000, tai grafike matyti, jog šilumos atidavimas šiek tiek sumažėja esant visiems x/d_e . Tačiau šie pokyčiai nėra tokie ryškūs (ypač esant dideliems x/d_e), kaip buvo pastebėti esant mažesniams oro slėgiams [1]. Šilumos atidavimo pokyčiai aiškiau išreikšti esant mažesniams x/d_e , o esant didesniams – ne taip aiškiai. Didėjant x/d_e šie būdingi taškai šiek tiek pasilenka link mažesnių Re skaičių (t. y. kinta panašiai, kaip ir buvo pastebėta esant mažesniams oro slėgiams). Toliau didėjant Re skaičiui šilumos atidavimas artėja prie šilumos atidavimo, būdingo priverstinai turbulentinei konvekcijai.

Taigi, esant 0,7 MPa oro slėgiui, šilumos atidavimo duomenys iki $Re \approx 9000$ rodo, kad visoje kaitinamo kanalo dalyje tikėtinas sukūrinis tekėjimas. Re skaičiui kintant nuo 9000 iki 15000

(2 pav.) šilumos atidavimas ima mažėti. Tai rodo, kad keičiasi tēkmės struktūra kanale ir, kai $Re > 15000$, kanale vyrauja turbulentinė tēkmė.

Esant 0,8 MPa oro slėgiui (3 pav., a) šilumos atidavimo procesai yra panašūs į anksčiau aptartuosius, kai $p = 0,7$ MPa (2 pav.). Šilumos atidavimas esant mišriai konvekcijai yra didesnis, nei esant priverstinai konvekcijai. Nuo $Re \approx 10000$ matyti šilumos atidavimo pokytis, kuris parodo, jog tēkmės struktūra kanale keičiasi iš sukūrinės į nesukūrinę. Šis perėjimas yra gana sklandus (sklandesnis negu buvo esant 0,7 MPa oro slėgiui) ir labiau išreikštas esant mažesniams x/d_e . Būdingų taškų vieta tik labai nežymiai priklauso nuo x/d_e . Lyginant su rezultatais, gautais esant 0,7 MPa oro slėgiui, matyti, jog šie būdingi taškai šiek tiek pasislenko į didesnių Re skaičių sritį.



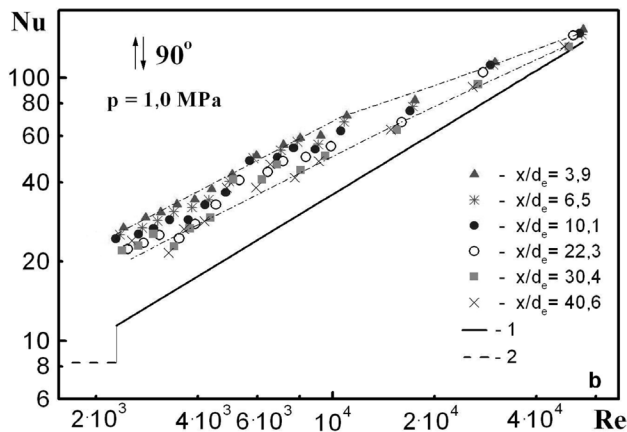
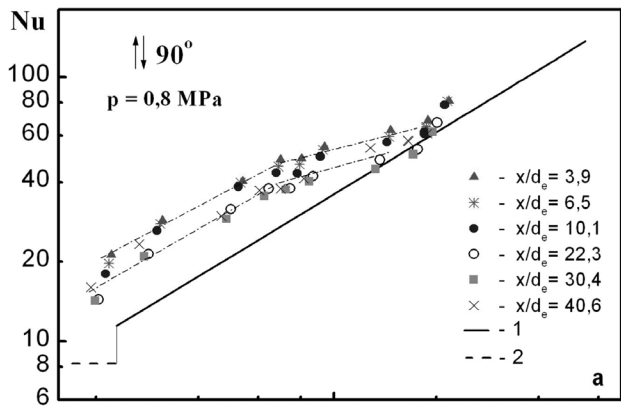
2 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re , kai x/d_e įvairūs, dvipusio kaitinimo atveju, esant 0,7 MPa oro slėgiui: 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [2]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [3]

Esant didžiausiam (1,0 MPa) oro slėgiui, gauti rezultatai taip pat rodo (3 pav., b), kad šilumos atidavimo intensyvumas (esant mažesniams x/d_e) didėjant Re skaičiui didėja, tačiau tik maždaug iki $Re 10000$. Toliau didėjant Re skaičiui šilumos atidavimo intensyvumo augimas lėtėja ir artėja prie šilumos atidavimo intensyvumo, būdingo išvystytai priverstinai turbulentinei konvekcijai. Taigi, esant didžiausiam oro slėgiui ($p = 1,0$ MPa), perėjimas iš sukūrinio tekėjimo į turbulentinį yra dar sklandesnis, nei esant 0,8 MPa oro slėgiui.

Sieneles temperatūros išilgai kanalo esant 0,7 ir 1,0 MPa oro slėgiams parodytas 4 paveiksle. Matyti, kad didesnių oro slėgių atveju jau nebėra jokių sieneles temperatūros padidėjimų esant tam tikram x/d_e ar vietinių temperatūros minimumų–maksimumų kaitinamo kanalo pradžioje, kaip tai stebėta esant mažesniams oro slėgiams [1]. Tačiau esant kai kuriems režimams (4 pav.) ir didesniams x/d_e stebimi sieneles temperatūros pokyčiai išilgai kanalo. Šie pokyčiai yra susiję su sklandžiu perėjimu nuo vieno tekėjimo režimo prie kito esant tam tikram x/d_e , tačiau nuodugniau duomenys bus išanalizuoti atlikus skaitinius šių režimų tyrimus.

3. REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

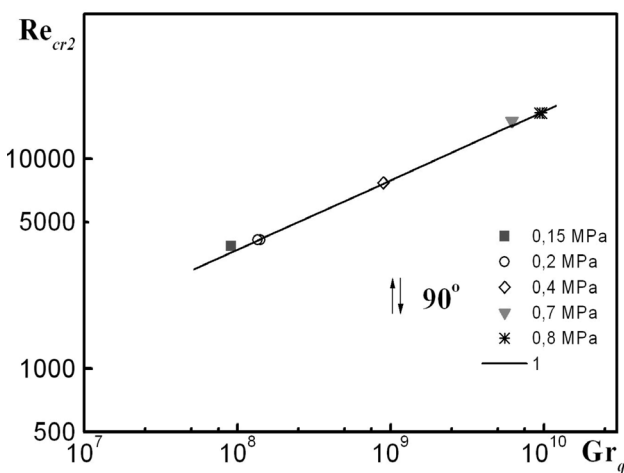
1 paveiksle matyti, kad esant stabilizuotam tekėjimui įvairių režimų (0,15–0,8 MPa) minimalaus šilumos atidavimo taškai yra gana aiškiai išsidėstę ir priklauso nuo Re skaičiaus.



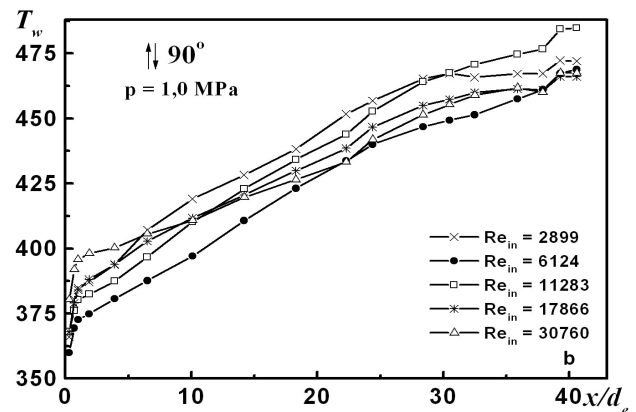
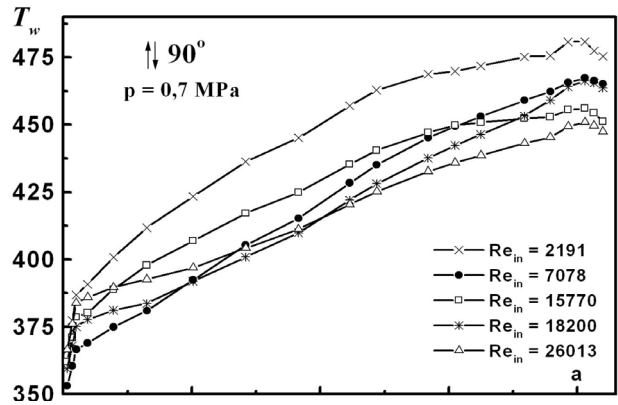
3 pav. Šilumos atdavimo priklausomybė nuo Re , esant įvairiems x/d_e , dvipusio kaitinimo atveju: a – $p = 0,8$ MPa; b – $p = 1,0$ MPa; 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [2]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [3]

Krizinio Re_{cr2} skaičiaus (esant stabilizuotam tekėjimui, minimalaus šilumos atdavimo taške) priklausomybė nuo Gr_q skaičiaus parodyta 5 paveiksle. Kriziniams Reinoldso skaičiams šiame taške, kai $2,3 \cdot 10^7 \leq Gr_q \leq 9,4 \cdot 10^9$, nustatyti pasiūlyta apibendrinanti priklausomybė:

$$Re_{cr2} = 8,46 \cdot Gr_q^{0,33} \quad (1)$$



5 pav. Krizinio Re_{cr2} skaičiaus priklausomybė nuo Gr_q skaičiaus stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje. 1 – pagal (1) priklausomybę



4 pav. Sienelės temperatūros kitimas išilgai kanalo esant skirtingiems Re_{in} : a – $p = 0,7$ MPa; b – $p = 1,0$ MPa

Ši priklausomybė rodo, kad didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui Re skaičius, kuriam esant matyti minimalus šilumos atdavimas (tekėjimo režimo pasikeitimas), pasislenka į didesnių Re skaičių sritį.

Priklausomybė (1) aprašo eksperimentinius rezultatus su ne didesne kaip 7% neapibrėžtimi.

4. IŠVADOS

Atlikus eksperimentinius vietinio šilumos atdavimo tyrimus vertikaliame plokščiam kanale esant mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėms bei žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui galima padaryti tokias išvadas:

1. Didėjant oro slėgiui (termogravitacijos jėgų poveikiui) perėjimas iš sukurinio į turbulentinį tekėjimo režimą nesukelia tokio žymaus šilumos atdavimo sumažėjimo, kaip tai buvo gauta esant mažesniems oro slėgiams. Taip yra dėl gana intensyvaus šilumos atdavimo veikiant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui net ir esant nesukurinio tekėjimo režimams.

2. Nustatyta, kad didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui Re skaičiaus reikšmė, kuriai esant stebimas perėjimas iš sukurinio į turbulentinį tekėjimą (minimalus šilumos atdavimas), didėja. Šiam kriziniam Re skaičiui (Re_{cr2}) nustatyti pasiūlyta apibendrinanti priklausomybė.

3. Siekiant geriau suprasti tėkmės struktūros pokyčius išilgai kanalo esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui, būtina atlikti tolesnius skaitinius tyrimus.

Žymėjimai

b – kanalo plotis m ;
 d_e – kanalo ekvivalentinis skersmuo, $d_e = 2(h \cdot b) / (h + b)$ m ;
 g – laisvojo kritimo pagreitis m/s^2 ;
 h – kanalo aukštis m ;
 q – šilumos srauto tankis W/m^2 ;
 p – slėgis MPa;
 T – temperatūra K;
 u – vidutinis masinis tėkmės greitis m/s
 x – atstumas nuo kaitinimo pradžios m ;
 α – šilumos atidavimo koeficientas, $\alpha = q_w / (T_w - T_f) W / (m^2 \cdot K)$;
 β – temperatūrinio plėtimosi koeficientas $1/K$;
 λ – šilumos laidumo koeficientas $W / (m \cdot K)$;
 ν – kinematinės klampos koeficientas m^2/s .

Nedimensiniai parametrai

Gr_q – Grashofo skaičius, $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / \nu^2 \cdot \lambda$;
 Nu – Nuselto skaičius, $Nu = \alpha d_e / \lambda$;
 Re – Reinoldso skaičius, $Re = u_f d_e / \nu$.

Indeksai

f – vidutinis masės;
 in – įtekėjime;
 w – ant sienelės.

Gauta 2008 01 14
 Priimta 2008 05 15

Literatūra

- Poškas R., Sirvydas A., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo eksperimentinis tyrimas vertikaliame plokščiaame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse per einamojo tekėjimo zonoje. 1. Vietinio šilumos atidavimo analizė // Energetika. 2007. T. 53. Nr. 4. P. 38–44.
- Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва: Наука, 1986. 192 с.
- Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. Москва: Энергия, 1967. 411 с.

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas, Gytis Bartkus

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN A VERTICAL FLAT CHANNEL IN THE TRANSITION REGION

2. ANALYSIS OF LOCAL HEAT TRANSFER IN CASE OF PREVAILING EFFECT OF BUOYANCY AND GENERALIZATION OF THE DATA

Summary

In this paper, we present the results of an experimental investigation of the local opposing mixed convection heat transfer in a vertical flat channel with symmetrical heating in the laminar-turbulent transition region. The experiments were performed in airflow ($p = 0.7, 0.8$ and 1.0 MPa) in the range of Re from $2 \cdot 10^3$ to $5 \cdot 10^4$ and Gr_q up to $1.0 \cdot 10^{11}$

at the boundary condition $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$. Experimental investigations show similar tendencies in heat transfer at higher air pressures (0.7–1.0 MPa) as it was revealed at smaller air pressures (0.2–0.4 MPa). But at higher air pressures (higher buoyancy effect) the transition from vortical flow regime to turbulent one does not cause such a drastic decrease in heat transfer as noticed at lower air pressures. This is due to a significant increase of the turbulent heat transfer with an increase of buoyancy effect.

It was also determined that the Re number where the minimum heat transfer is observed (transition from vortical to the turbulent flow) due to an increase of buoyancy is higher. The correlation for determination of this critical Re number (Re_{cr2}) in case of a stabilized flow was suggested.

Key words: vertical flat channel, transition region, local heat transfer, opposing mixed convection, prevailing effect of buoyancy

Робертас Пошкас, Арунас Сирвидас, Гитис Барткус

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ТЕЧЕНИЯ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПЛОСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОВ
2. АНАЛИЗ МЕСТНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ ВЛИЯНИИ СИЛ ПЛАВУЧЕСТИ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Резюме

В настоящей статье приводятся данные экспериментального исследования местной теплоотдачи в симметрично нагреваемом плоском вертикальном канале в зоне ламинарно-турбулентного переходного течения при противоположных направлениях смешанной конвекции. Эксперименты проведены в потоке воздуха (0,7; 0,8 и 1,0 МПа) при Re от $2 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4$ и Gr_q до $1,0 \cdot 10^{11}$ для условия $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$. При более высоких давлениях воздуха (0,7–1,0 МПа) экспериментальные исследования показывают подобные тенденции теплоотдачи как и при более низких давлениях воздуха (0,2–0,4 МПа). Но при более высоких давлениях воздуха (более высоком влиянии сил плавучести) переход от вихревого режима течения к турбулентному не вызывает такого резкого снижения теплоотдачи, как это было отмечено при более низких давлениях. Это обусловлено возросшей интенсивностью теплоотдачи при турбулентном течении при увеличении влияния сил плавучести.

Также было определено, что число Re , при котором наблюдается минимальная теплоотдача (переход вихревого течения в турбулентное), с увеличением сил плавучести – увеличивается. При стабилизированной теплоотдаче предложена обобщающая зависимость для определения этого критического числа Re (Re_{cr2}).

Ключевые слова: вертикальный плоский канал, переходная зона течения, местная теплоотдача, противоположные направления смешанной конвекции, существенное влияние сил плавучести