
Šilumos atidavimas nuo apatinės pasvirusio plokščio kanalo sienelės turbulencinės mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmėse

**Robertas Poškas,
Donatas Sabanskis**

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Atlikti šilumos atidavimo tyrimai pasvirusiame plokščiame kanale ($\varphi = 60^\circ$ nuo horizontalios padėties) su vienpusiu kaitinimu (kaitinama apatinė sienelė), esant priešingų tėkmių turbulencinei mišriai konvekcijai, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^4$, o $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$. Straipsnyje pateikiami duomenys ir rezultatai papildo anksčiau šiame žurnale skelbtus tyrimus mišrios konvekcijos atveju. Gauti duomenys palyginti su anksčiau gautais rezultatais pasvirusiame plokščiame kanale, kai kaitinama viršutinė sienelė.

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

1. ĮVADAS

Kaip yra žinoma, esant turbulencinei mišriai konvekcijai galimi keli turbulencinio tekėjimo atvejai: vienkryptės tėkmės – kai sutampa natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys (tekėjimas iš kanalo apačios į viršų, kai oras šildomas, arba tekėjimas iš kanalo viršaus į apačią, kai oras aušinamas) ir priešingų krypčių tėkmės, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos (tekėjimas iš kanalo viršaus į apačią, kai oras šildomas, arba tekėjimas iš kanalo apačios į viršų, kai oras aušinamas).

Turbulenciniam pernešimui ir šilumos atidavimui kanale didelės įtakos turi oro tankio stratifikacija. Priklausomai nuo to, kuri kanalo sienelė yra kaitinama, stratifikacijos skirstomos į stabilią oro tankio stratifikaciją (kaitinama viršutinė kanalo sienelė) ir nestabilią oro tankio stratifikaciją (kaitinama apatinė kanalo sienelė). Kadangi šiame straipsnyje pateikti duomenys pasvirusio kanalo atveju, kai kaitinama apatinė sienelė, tai bus kalbama apie nestabilią oro tankio stratifikaciją. Nestabili oro tankio stratifikacija – tai tokia stratifikacija, kuri palaiko ar sustiprina kylantį oro judėjimą ir dėl to padidėja šilumos mainai, konvekcija. Nestabili stratifikacija papildomai turbulizuoja srautą dėl Archimedo jėgų poveikio kylant lengvesnėms oro dalelėms į viršų. Dėl to suintensyvėja turbulencinis impulso ir šilumos pernešimas.

Trumpa mišrios konvekcijos tyrimų vertikalioose ir pasvirusiuose kanaluose apžvalga pateikta [1]. To-

liau trumpai paminėsime pastaruoju metu Lietuvos energetikos institute atliktus eksperimentinius mišrios konvekcijos tyrimus priešingų krypčių tėkmėse.

Tai eksperimentiniai tyrimai, atlikti esant vienpusiam kaitinimui (kaitinama viršutinė sienelė), t. y. esant stabiliai tankio stratifikacijai. Pirmiausia nagrinėtas šilumos atidavimas stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje [1]. Gauti eksperimentiniai duomenys palyginti su kitų autorių duomenimis vertikaliems vamzdžiams ir kanalams. Taip pat pasiūlyta apibendrinanti priklausomybė šilumos mainams skaičiuoti vertikaliame kanale su vienpusiu kaitinimu. Rezultatai parodė, kad gauta priklausomybė neblogai koreliuoja su Petuhov–Poliakov pasiūlyta priklausomybe vertikaliems vamzdžiams.

Šilumos atidavimo kitimas išilgai vertikalaus plokščio kanalo nagrinėtas darbe [2]. Tyrimai parodė, kad tolstant nuo kaitinimo pradžios (didėjant x/d_e), santykinis šilumos atidavimas didėja dėl termogravitacijos jėgų poveikio didėjimo, o vėliau truputį sumažėja, nes mažėja termogravitacijos parametrų skaitinės reikšmės išilgai kanalo. Tačiau, kai termogravitacijos jėgų poveikis yra didelis ir $x/d_e > 30$, gerokai suintensyvėja šilumos atidavimas ir buvo konstatuota, jog tai gali būti sąlygojama vietinio srauto atitrūkimo prie kanalo sienelės.

Darbe [3] nagrinėtas šilumos atidavimas stabilizuotoje pasvirusio plokščio kanalo dalyje, kai kanalo pasvirimo kampas nuo horizontalios padėties yra $\varphi = 60^\circ$. Duomenys analizuoti panaudojant įvairius termogravitacijos parametrus. Gauti duomenys paly-

ginti su duomenimis, gautais vertikaliame kanale. Nustatyta, jog termogravitacijos jėgų poveikis yra šiek tiek mažesnis negu vertikaliame kanale.

Darbe [4] pateikti šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiame kanale ($\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ nuo horizontalios padėties) rezultatai esant priešingų krypčių tėkmėms. Čia daugiausia dėmesio skirta šilumos atidavimo kitimui išilgai pasvirusio plokščio kanalo. Duomenys palyginti su anksčiau gautais rezultatais vertikaliame plokščiame kanale. Rezultatai parodė, kad esant priešingų krypčių turbulencinėms tėkmėms, kai termogravitacijos jėgų poveikis yra didelis ($Bo_2 \geq 0,5$), nuo tam tikro x/d_e gerokai suintensyvėja šilumos atidavimas ir, kaip minėta, tai gali būti sąlygojama vietinio tėkmės atitrūkimo prie kanalo sienelės. Be to, srauto vietinio atitrūkimo (minimalaus šilumos atidavimo) taško padėties priklausomybė nuo termogravitacijos parametro nėra aiškiai išreikšta, o tai galėtų reikšti, kad kanale susiformuoja sukūrinis tekėjimas.

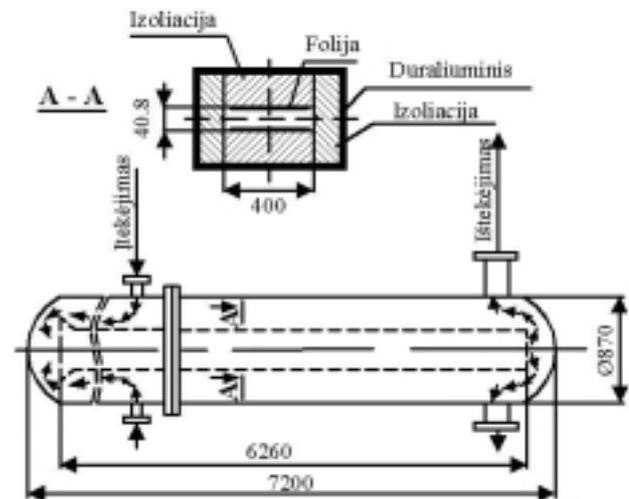
Darbe [5] pateikiami rezultatai, gauti esant vienpusiam kaitinimui stabilios tankio stratifikacijos atveju (kaitinama viršutinė sienelė), kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos (priešingų krypčių tėkmės) pasvirusiame plokščiame kanale, kai kanalo polinkio kampas nuo horizontalios padėties $\varphi = 20^\circ$. Panaudojus šiuos bei ankstesniuose darbuose [1, 3] pateiktus duomenis, gauta apibendrinanti priklausomybė šilumos atidavimui apskaičiuoti vertikaliame ir pasvirusiame plokščiame kanale stabilizuotoje kanalo dalyje.

Šiame darbe pateikiami rezultatai šilumos mainų, esant turbulencinei mišriai konvekcijai, eksperimentinio tyrimo pasvirusiame plokščiame kanale vienpusio kaitinimo nestabilios oro tankio stratifikacijos (kaitinama apatinė sienelė) atveju, kai priverstinės ir natūralios konvekcijų kryptys yra priešingos. Plokščio kanalo pasvirimo kampas su horizontu yra $\varphi = 60^\circ$.

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, papildytais destiliuotojo 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 plokščiame kanale mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmių atveju panaudotas laboratorijoje esantis eksperimentinis įrenginys (1 pav.). 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 nuolatinė elektros srove.



1 pav. Eksperimentinis ruožas

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 $d_e \approx 2h$.

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

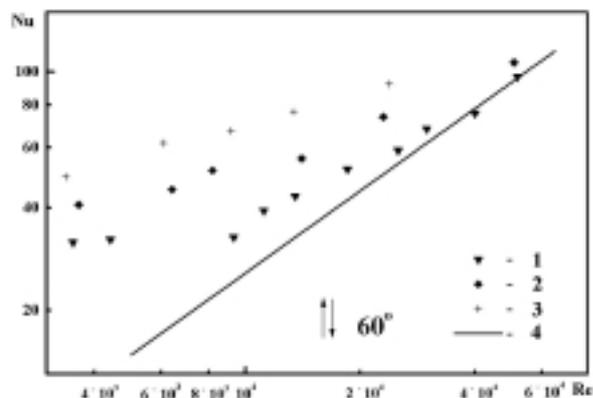
$$q = q_{el} - q_{\lambda} - q_{is} - q_{sp}. \quad (1)$$

Šilumos srauto per termoizoliaciją linijiniams tamsiems nustatyti atlikti specialūs taravimo eksperimentai. Kanalo pratekėjimo skerspjūvis buvo užpildytas izoliacine medžiaga (asbesto lakštais) šilumos pernešimui dėl natūralios konvekcijos išvengti, o folijomis buvo leidžiama nuolatinė elektros srovė. Folijoje išsiskyrusi šiluma 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 sienieli. Pagal šias priklausomybes ir apskaičiuojami šilumos nuostoliai į aplinką folijos temperatūros matavimo taškuose pagrindinių eksperimentų metu. Išsamesnė rezultatų apdorojimo metodika pateikta [1].

3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Eksperimentiniai tyrimai atlikti plačiame oro tėkmės parametrų kitimo intervale ($Re = 4 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^4$, 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 2 pav., šilumos atidavimo intensyvumas labai priklauso nuo oro slėgio (panašiai yra vertikalaus [1] ir kitų kanalo pasvirusimo kampų atveju [3], kai kaitinama viršutinė sienelė). 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 (tai labiausiai išryškėja esant 0,4 MPa

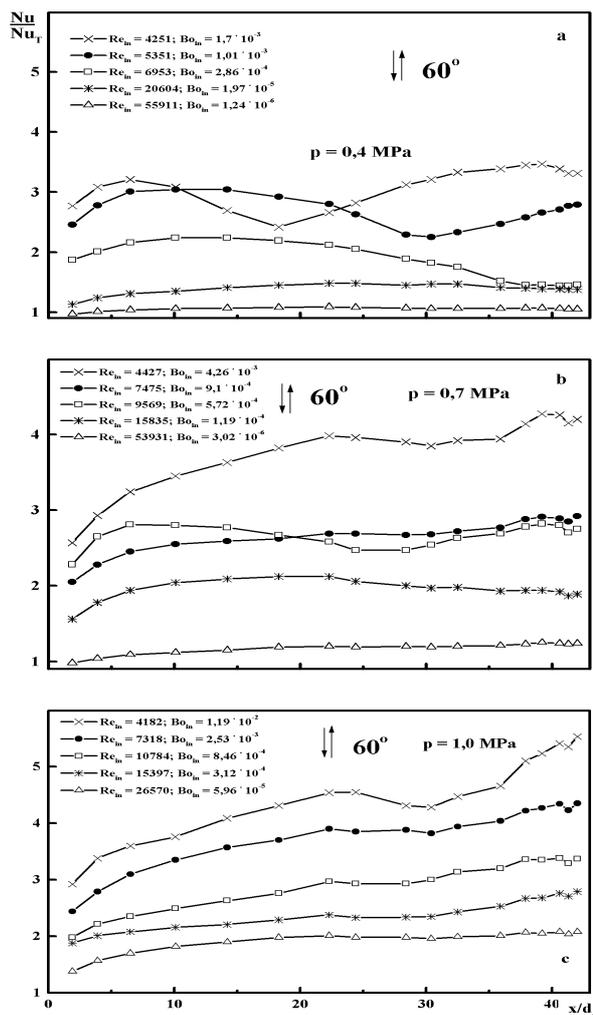


2 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) vienpusio kaitinimo atveju (kaitinama apatinė sienelė), kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos: 1 - $p = 0,4$ MPa, 2 - $0,7$ MPa, 3 - $1,0$ MPa, 4 - priverstinė konvekcija

slėgiui), nes čia vyrauja natūrali konvekcija. Šioje zonoje šilumos atidavimas nebeprisklaido nuo Re .

3 pav. parodytas santykinio šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo esant įvairiems darbo agento slėgiams, kai kanalo pasvirusimo kampas 60° nuo horizontalios padėties. 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 ir nedidelį, srauto savybių kitimą, Nu_T įvertinti naudota [6] pasiūlyta metodika žiediniams kanalams (ribiniu atveju - plokščiam kanalui).

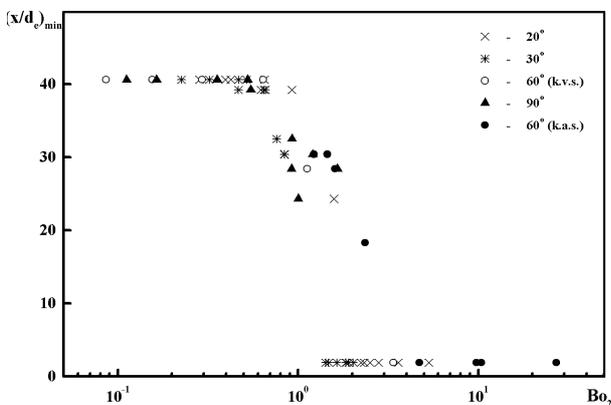
Didelių Re skaičių atveju termogravitacijos jėgų poveikis yra mažiausias, todėl, kai $Re_{in} = 55900$ (3 pav. a) ir $Re_{in} = 53900$ (3 pav. b), šilumos atidavimas per visą kanalo ilgį vyksta priverstinės konvekcijos sąlygomis ($Nu/Nu_T \approx 1$). Kaip matyti 3 pav. a, mišrios konvekcijos sąlygomis (apatinė kreivė) santykinis šilumos atidavimas didėja iki $x/d_e \approx 15$, o po to nedaug mažėja. Santykinio šilumos atidavimo padidėjimas su-



3 pav. Santykinio šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo

sijęs su tuo, kad termogravitacijos jėgų poveikis reiškiasi palaipsniui, t. y. didėja didėjant x/d_e , kol pasiekiami stabilizacija. Nuodugni analizė parodė, kad santykinio šilumos atidavimo sumažėjimas susijęs su tuo, kad termogravitacijos jėgų poveikį lemiančių kriterijų ir parametrų skaitinės reikšmės (Gr_q, Bo_2) mažėja tolstant 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, tik yra geriau išreikštas santykinio šilumos atidavimo padidėjimas ir sumažėjimas. Pagrindinis ypatumas yra tai, kad esant mažiausiems Re šilumos atidavimas nuo tam tikro x/d_e pradeda didėti. Kai slėgis yra 0,4 MPa, tai stebima esant $Re_{in} = 4200$ ir 5300. Esant 0,7 MPa slėgiui (3 pav. b), šilumos atidavimo padidėjimas išryškėja esant $Re_{in} = 9500$. Kai slėgis 1,0 MPa, tokio akivaizdaus šilumos atidavimo pokyčio esant tam tikram x/d_e nėra, tačiau esant mažiausiems Re (3 pav. c 1, 2, 3 kreivės) šilumos atidavimas didėja nuo pat kanalo pradžios. Tai pastebima ir esant mažiausiam Re , kai slėgis 0,7 MPa. 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. Šie šilumos atidavimų pokyčiai panašiai pasireiškia ir kaitinant viršutinę kanalo sienelę [4].

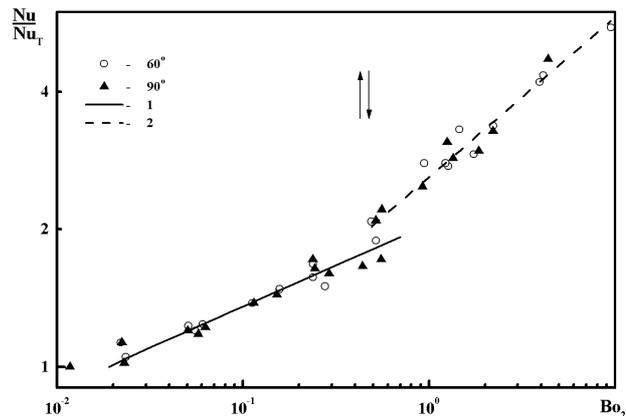
Minimalaus šilumos atidavimo taško dinamika esant įvairiems plokščio kanalo, kai kaitinama viršutinė sienelė, ir pasvirusio plokščio kanalo ($\varphi = 60^\circ$ nuo horizontalios padėties), kai kaitinama apatinė sienelė, polinkio kampams parodyta 4 pav. Čia sąlyginai pavaizduota, kad esant nedidelėms termogravitacijos parametro Bo_2 reikšmėms minimalus šilumos atidavimas yra kanalo gale ($x/d_e \approx 40$). Kai termogravitacijos parametras Bo_2 padidėja iki 0,7, stebimi režimai su tėkmės atitrūkimu, kai $(x/d_e)_{min} \approx 20-35$. Kai $Bo_2 > 1,7$,



4 pav. Mažiausio šilumos atidavimo taško padėties priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2

šilumos atidavimo minimumas persikelia į kaitinimo pradžią. Kaip matyti, šilumos atidavimo minimumo $(x/d_e)_{min}$ padėtis, kai kaitinama apatinė sienelė, kinta panašiai kaip ir kaitinant viršutinę kanalo sienelę, tačiau matyti tendencija, jog yra tam tikras $(x/d_e)_{min}$ persislinkimas link didesnių Bo_2 reikšmių. Tai matyt susiję su tuo, jog nestabilios oro tankio stratifikacijos atveju tėkmė yra turbulizuotesnė, greičio profilis prie sienelės labiau užpildytas ir todėl vietinis tėkmės atitrūkimas prie sienelės dėl priverstinės tėkmės poveikio pasislenka link didesnių Bo_2 reikšmių.

5 pav. matyti, kad santykinis šilumos atidavimas (Nu/Nu_T) plokščiam kanale esant priešingų krypčių srautams ir vienpusiam kaitinimui (kaitinama apatinė sienelė) monotoniškai didėja didėjant termogravitacijos parametru Bo_2 . Kanalo pasvirimo kampas praktiškai neturi įtakos šilumos atidavimui (priešingai negu plokščio kanalo, kai kaitinama viršutinė sienelė, atveju [5]). Esant didelėms termogravitacijos parametro reikšmėms ($Bo_2 \geq 7 \cdot 10^{-1}$) šilumos atidavimo pobūdis pasikeičia (tai išryškėja ir viršutinės kanalo sienelės kaitinimo atveju [5]). Tai susiję su anksčiau minėtu srauto atitrūkimu prie sienelės.



5 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos: 1 – pagal (3) priklausomybę; 2 – pagal (4) priklausomybę

Šilumos atidavimui apskaičiuoti pasvirusiuose kanaluose ($\varphi = 20-90^\circ$, kai kaitinama viršutinė kanalo sienelė) $Bo_{2rib} \leq Bo_2 \leq 7 \cdot 10^{-1}$ ribose pasiūlyta ši apibendrinanti priklausomybė [7]:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 1,9Bo_2^{0,18} \varphi^{0,17} \quad (2)$$

Ji aprašo eksperimentinius duomenis su ne didesne kaip 10% paklaida.

Kaip matyti 5 pav., kai kaitinama apatinė kanalo sienelė ($\varphi = 90^\circ, 60^\circ$), kanalo pasvirimo kampas praktiškai neturi įtakos, todėl šilumos mainus galima apskaičiuoti naudojant (2) priklausomybę, kai $\varphi = 90^\circ$:

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 2,05Bo_2^{0,18} \quad (3)$$

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 (3) priklausomybės, kai $Nu/Nu_T = 1,0$.

Kaip minėta, darbe [7] buvo pasiūlyta priklausomybė šilumos mainams skaičiuoti, kai $Bo_2 < 0,7$. Toliau didėjant Bo_2 keičiasi šilumos mainų pobūdis, tačiau darbe [7] nebuvo galima pasiūlyti apibendrinančios priklausomybės šilumos mainams skaičiuoti dėl ribotų tyrimų rezultatų. Šiame darbe vertikaliame kanale buvo atlikti papildomi tyrimai, esant didesnėms Bo_2 reikšmėms, taip pat tyrimai, kai $\varphi = 60^\circ$ gana plačiame Bo_2 kitimo diapazone. Tai sudarė prielaidas pasiūlyti priklausomybę šilumos mainams skaičiuoti, kai $Bo_2 > 0,7$. Kaip matyti 5 pav., šilumos mainai šioje zonoje taip pat nepriklauso nuo polinkio kampo ($\varphi = 90-60^\circ$). Šilumos mainus galima apibendrinti priklausomybe

$$\frac{Nu}{Nu_T} = 2,6Bo_2^{0,35} \quad (4)$$

kuri galioja $0,7 < Bo_2 < 10$ ribose. Ji aprašo eksperimentinius duomenis su ne didesne kaip 10% paklaida.

4. IŠVADOS

Atlikus šilumos atidavimo tyrimus pasvirusiame ($\varphi = 60^\circ$ nuo horizontalios padėties) plokščiam kanale vienpusio kaitinimo atveju (kai kaitinama apatinė kanalo sienelė) esant priešingų kryptių tėkmėms, kai $Re = 4 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4,4 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^{10}$, galima padaryti išvadas:

1. Nustatyta, kad, kaip ir stabilios oro tankio stratifikacijos atveju (kaitinama viršutinė sienelė), yra šilumos mainų režimai, kai staigiai pasikeičia šilumos mainų pobūdis pagal kanalo ilgį.

2. Toks šilumos mainų pokytis susijęs su vietiniu srauto atitrūkimu prie kanalo sienelės ir stebima tendencija, kad nestabilios oro tankio stratifikacijos atveju tai įvyksta esant didesniems Bo_2 , negu stabilios stratifikacijos atveju.

3. Pasiūlytos priklausomybės šilumos mainams skaičiuoti tiek termogravitacijos parametro Bo_2 kitimo zonoje, kai tėkmė neatitrūksta, tiek zonoje, kurioje tėkmė atitrūksta.

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

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

Gauta
2003 11 28

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., Šinkūnas S., Poškas P. Šilumos atidavimas išilgai vertikalaus kanalo esant priešingų kryptių turbulencinei mišriai konvekcijai // Mechanika. 2001. Nr. 5(31). P. 21–26.
- Poškas R., Šinkūnas S., Poškas P. Šilumos atidavimo pasvirusiame plokščiam kanale su vienpusiu kaitinimu, esant priešingų srautų turbulencinei mišriai konvekcijai, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2001. Nr. 1. P. 10–14.
- Poškas R., Poškas P., Šinkūnas S. Šilumos atidavimo kitimas išilgai pasvirusio kanalo esant priešingų kryptių turbulencinei mišriai konvekcijai // Energetika. 2002. Nr. 3. P. 12–16.
- Poškas R., Poškas P. Šilumos atidavimo apibendrinimas pasvirusiame plokščiam kanale turbulencinės mišrios konvekcijos priešingų kryptių tėkmėse esant stabiliai oro tankio stratifikacijai // Energetika. Spaudoje.
- Vilemas J., Čėsna B. and Survila V. Heat Transfer in Gas-Cooled Annular Channels. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1987. 226 p.
- Poškas P., Poškas R. Local turbulent opposing mixed convection heat transfer in inclined flat channel for stably stratified airflow // Int. J. Heat and Mass Transfer. Spaudoje.

Robertas Poškas, Donatas Sabanskis

**TURBULENT OPPOSING MIXED CONVECTION
HEAT TRANSFER FROM THE BOTTOM WALL OF
INCLINED FLAT CHANNEL**

S u m m a r y

An experimental investigation of heat transfer in an inclined ($\varphi = 60^\circ$ from horizontal position) flat channel with bottom wall heating (unstable density stratification) for turbulent mixed convection opposing flow conditions has been performed in the region of $Re = 4 \cdot 10^3 - 6.5 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4.4 \cdot 10^7 - 7.6 \cdot 10^{10}$.

It has been revealed that there are regimes with a sharp change of heat transfer along the channel as in the case of stable stratification. We suppose that this increase of heat transfer is related to the separation of the flow from the channel wall. There is a tendency that under unstable stratification the flow separates from the wall at higher Bo_2 values than under stable stratification.

Correlation (3) for calculation of heat transfer in inclined flat channels was suggested for the region without buoyancy instabilities, and correlation (4) for calculation of heat transfer in inclined and vertical flat channels was suggested for the region with buoyancy instabilities.

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

Робертас Пошкас, Донатас Сабанскис

**ТЕПЛОТДАЧА ОТ НИЖНЕЙ СТЕНКИ
НАКЛОННОГО ПЛОСКОГО КАНАЛА ПРИ
ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ
ТУРБУЛЕНТНОЙ СМЕШАННОЙ
КОНВЕКЦИИ**

Р е з ю м е

Приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи от нижней стенки наклонного ($\varphi = 60^\circ$ от горизонтального положения) плоского канала (неустойчивая стратификация плотности) при турбулентной смешанной конвекции в условиях противоположных направлений вынужденной и естественной конвекций в интервале $Re = 4 \cdot 10^3 - 6.5 \cdot 10^4$, $Gr_q = 4.4 \cdot 10^7 - 7.6 \cdot 10^{10}$.

Установлено, что, как и в случае устойчивой стратификации плотности, есть 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 совершается при больших Bo_2 по сравнению с устойчивой стратификацией плотности.

На основе этих данных предложены две обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи: зависимость (3) – при стабильном потоке и зависимость (4) – при нестабильном потоке.

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