

# Oro tankio stratifikacijos įtakos mišriai konvekcijai plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje eksperimentinis tyrimas

## 1. Šilumos atidavimas mišrios konvekcijos priešingų kryptių tėkmių atveju, kai kanalo polinkio kampas $\varphi = -60^\circ$

Robertas Poškas,

Giedrius Drumstas,

Povilas Poškas,

Jokūbas Kolesnikovas

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

Šiame straipsnyje pateikti vietinio šilumos atidavimo pereinamojo tekėjimo zonoje pasvirusiame (pasvirimo kampas  $\varphi = -60^\circ$  nuo horizontalios padėties), simetriškai kaitinamame ( $q_{w1} \approx q_{w2} \approx \text{const}$ ) plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptių tėkmėse eksperimentinių tyrimų rezultatai. Išanalizuotas vietinio šilumos atidavimo kitimas, kai oro slėgis  $p = 0,2$  ir  $0,4$  MPa, esant įvairiems  $Re$  ir  $Gr_q$  skaičiams ( $Re = 1,5 \cdot 10^3 - 5,3 \cdot 10^4$  ir  $Gr_q$  iki  $1,5 \cdot 10^{10}$ ). Rezultatų analizė parodė, jog šilumos atidavimas sukurinio tekėjimo zonoje, kaip ir vertikaliame plokščiam kanale, yra kur kas intensyvesnis negu esant turbulentiniam tekėjimui. Analizė taip pat parodė, jog šilumos atidavimas nuo apatinės sienelės (nestabili stratifikacija) yra šiek tiek didesnis negu nuo viršutinės sienelės (stabili stratifikacija), tačiau šis skirtumas mažėja, didėjant  $x/d_e$ .

**Raktažodžiai:** vietinis šilumos atidavimas, mišri konvekcija, priešingų kryptių tėkmės, stabili ir nestabili stratifikacija, pasviręs plokščias kanalas, pereinamojo tekėjimo zona

### 1. ĮVADAS

Dėl termogravitacijos jėgų (svorio jėgos veikiamas temperatūris laukas) poveikio kilę fluido srautai yra svarbūs daugelyje technologinių sistemų: atominių reaktorių aušinimui, elektroninių sistemų (kompiuteriuose) aušinimui, šilumokaičiuose ir kt. Kitaip tariant, svorio jėgos laukas įvairiose sistemose daugeliu atvejų yra pagrindinis veiksnys, sąlygojantis fluido judėjimą ir konvecinį šilumos pernešimą. Svorio jėga, veikianti nevienodo tankio terpę, vienu atveju yra pagrindinė (natūrali konvekcija), o esant kartu ir priverstiniam judėjimui – papildoma varomoji jėga, tačiau dėl šios jėgos poveikio gali visiškai pasikeisti turbulentinio pernešimo mechanizmas bei konvecinio šilumos pernešimo pobūdis. Daugelyje kasdienėje buityje ir pramonėje naudojamų įrenginių pasireiškia termogravitacijos jėgų poveikis, tiek esant laminariniam, tiek turbulentiniam tekėjimui. Termogravitacijos jėgų sukeltas poveikis šilumos mainams esant tam tikroms sąlygoms neretai tapdavo avarių priežastimi. Todėl atsižvelgiant į šio reiškinio svarbą, įvairiose šalyse buvo pradėti mišrios konvekcijos moksliniai tyrimai vertikaliuose vamzdžiuose esant turbu-

lentiniam tekėjimui. Tyrimai sparčiausiai plėtojosi buvusios TSRS MA Aukštųjų temperatūrų institute [1] bei Mančesterio universitete (Jungtinė Karalystė) [2, 3]. Kiek vėliau tokie tyrimai tiek mišrios konvekcijos vienkryptėse tėkmėse (kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys sutampa), tiek mišrios konvekcijos priešingų kryptių tėkmėse (kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos) pradėti Lietuvos energetikos institute (LEI), iš pradžių vertikaliuose vamzdžiuose, po to ir įvairiai orientuotuose plokščiuose kanaluose [4–6]. Vykdamas mišrios turbulentinės konvekcijos pasvirusiuose plokščiuose kanaluose esant vienpusiam kaitinimui (stabilios ir nestabilios oro tankio stratifikacijos) tyrimus [6] nustatyta, jog šilumos atidavimą stabilios stratifikacijos atveju (kaitinama viršutinė sienelė) gerokai veikia kanalo pasvirimo kampas, o nestabilios stratifikacijos atveju (kaitinama apatinė sienelė) kanalo pasvirimo kampas šilumos atidavimo intensyvumui žymesnės įtakos neturi.

Laminarinė mišri konvekcija įvairios formos kanaluose esant pastovioms šilumnešio fizikinėms savybėms išnagrinėta gana išsamiai, nes šiomis sąlygomis galima tiksliai teoriškai sumodeliuoti vykstančius procesus kanale ir apskaičiuoti

įvairius tėkmės parametrus. Šiai problemai spręsti yra paskirta daug eksperimentinių ir teorinių darbų, tačiau mišrios konvekcijos atveju, esant pereinamajam tekėjimo režimui, duomenų literatūroje pateikiama labai nedaug ir jie nėra išsamūs. Srauto tekėjimo pobūdis vamzdžiuose, pereinamojo tekėjimo zonoje, buvo ištirtas darbuose [1, 7, 8]. Darbe [7] tirtas tėkmės nestabilumas vertikaliame vamzdyje į jo centrinę dalį įpurškiant dažus ir stebint srautą vizualiai. Mišrios konvekcijos vienkrypčių tėkmių atveju praradus tekėjimo stabilumą dažų siūlelis įgaudavo sinusoidės formą ir būdavo fiksuojamos sienelės temperatūros pulsacijos. Didinant termogravitacijos jėgų poveikį dažų siūlelio sinusoidinio judėjimo amplitudė padidėdavo, kol galiausiai siūlelis būdavo suardomas. Konstatuota, jog tėkmės nestabilumo atsiradimas priklauso ne tik nuo termogravitacijos jėgos dydžio, bet ir nuo kanalo ilgio ( $x/d_c$ ). Darbe [1] pabrėžiama, jog persilankymo taškų atsiradimas greičio profiliuose ir ypač atgalinio tekėjimo atsiradimas skatina laminarinio tekėjimo stabilumo praradimą ir perėjimą prie turbulentinio tekėjimo. Tokiu atveju iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį pereinama, kai  $Re < 2300$  (t. y. nepasiekus krizinio  $Re$  skaičiaus įprastinėmis sąlygomis). Pasiūlyta priklausomybė, kuri, esant mišrios konvekcijos vienkryptėms tėkmėms vamzdyje, įgalina nustatyti nedimensinį atstumą nuo kanalo kaitinimo pradžios, kuriame laminarinis tekėjimas praranda stabilumą. Taip pat pasiūlyta priklausomybė šilumos atdavimui skaičiuoti laminarinės mišrios konvekcijos atveju esant vienkryptėms tėkmėms, kai  $250 < Re \leq 2 \cdot 10^3$ ;  $0,6 < Pr < 10$  ir  $Gr_q / Re < 2,6 \cdot 10^4$ . Esant mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėms, pirmiausia tėkmės nestabilumą parodė nežymi tėkmės asimetrija prieš pat kaitinamą kanalo dalį. Gerokai padidėjus termogravitacijos jėgų įtakai, buvo pastebėta, kad tėkmė pradeda trūkti. Taip pat nurodoma, jog tuo atveju, kai mišrios konvekcijos tėkmių kryptys yra priešingos, perėjimas prasideda staiga – dėl tėkmės atitrūkimo nuo kanalo sienelių.

Darbe [9] atlikti eksperimentiniai mišrios konvekcijos tyrimai oro sraute, kai  $Re = 420, 840, 1290, 1720, 2190, 2630$ , o  $Gr$  kito nuo  $6,8 \cdot 10^3$  iki  $4,1 \cdot 10^4$ . Nagrinėtas šilumos atdavimas ir šiuurškštumo įtaka pasvirusiame stačiakampio skerspjuvio kanale ( $\varphi = -90^\circ, -60^\circ, -30^\circ$  (priešingų kryptų tėkmės),  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  (vienkryptės tėkmės)) mišrios konvekcijos vienkrypčių bei priešingų kryptų tėkmių atveju. Nustatyta, jog kanalo pasvirimo kampas, kuriam esant gaunamas maksimalus šilumos atdavimas didėjant  $Re$  skaičiui nuo 420 iki 1720, persilenka nuo  $30^\circ$  iki  $-30^\circ$ . Kai  $Re$  didesnis, šilumos atdavimas nebepriklauso nuo kanalo polinkio kampo.

Darbuose [6, 10–13] pateikti LEI eksperimentinių ir skaitinių vietinio šilumos atdavimo pereinamojo tekėjimo zonoje vertikaliame, simetriškai kaitinamame plokščiam kanale, mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėse tyrimų rezultatai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti, kai  $p = 0,1\text{--}1,0$  MPa;  $Re = 2 \cdot 10^3 - 6,6 \cdot 10^4$ ;  $Gr_q = 1,65 \cdot 10^5 - 1,0 \cdot 10^{11}$ ). Buvo nustatyta, kad sukurinio tekėjimo atsiradimas / išnykimas sąlygoja šilumos atdavimo maksimumų / minimumų atsiradimą išilgai kanalo. Esant pakankamai dideliame termogravitacijos

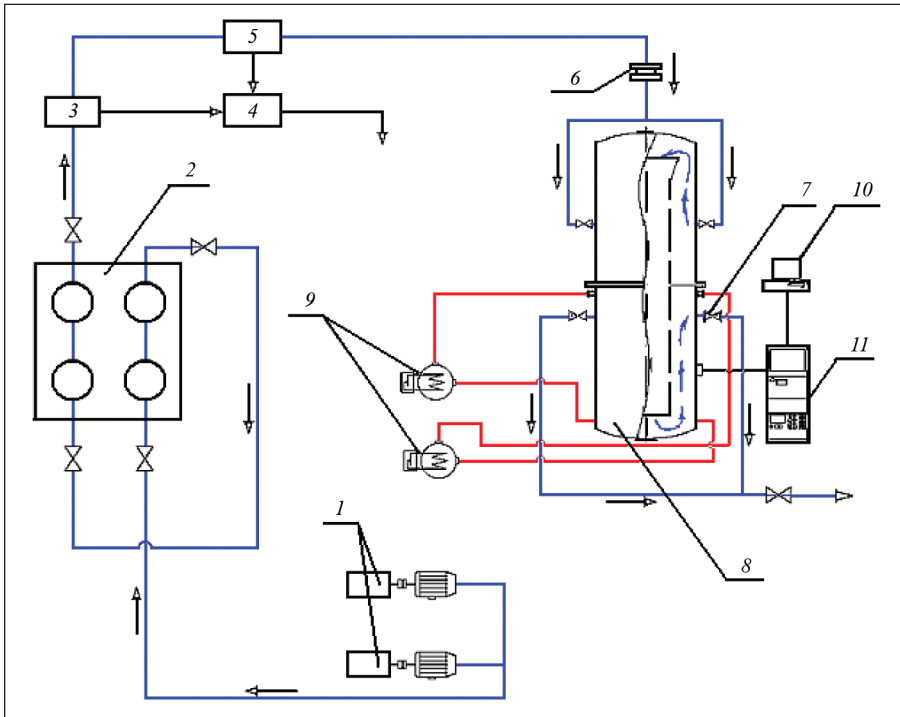
jėgų poveikiui prie kanalo sienelių pagal jo ilgį susiformuoja vietinės tėkmės. Šis sukurinis tekėjimas sukelia greičio profilių nesimetriškumą, pulsacinį sienelės temperatūros kitimą pagal kanalo ilgį ir suintensyvina šilumos mainus. Be to, nustatyta, kad didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui  $Re$  skaičiaus reikšmė, kuriai esant stebimas perėjimas iš sukurinio į turbulentinį tekėjimą (staigus šilumos atdavimo sumažėjimas), didėja. Aukštesniū oro slėgių ( $0,7\text{--}1,0$  MPa) atveju šilumos atdavimas kinta panašiai, kaip ir esant mažesniems oro slėgiams ( $0,2\text{--}0,4$  MPa), tačiau pereinant nuo sukurinio srauto tekėjimo režimo į turbulentinį, nepasireiškia toks drastiškas šilumos atdavimo sumažėjimas, kaip buvo pastebėta mažesniū oro slėgių atveju. Atlikus skaitinius tyrimus buvo pasiūlytos naujos priklausomybės kriziniam atstumui ( $X_{cr1} = (x/d_c) \cdot (1/(Re \cdot Pr))$  ir  $(x/d_c)_{cr1}$ ), kai tėkmė netenka stabilumo ir šilumos atdavimui laminarinės mišrios konvekcijos atveju skaičiuoti.

Šiame straipsnyje pateikti vietinio šilumos atdavimo pereinamojo tekėjimo zonoje pasvirusiame (pasvirimo kampas  $\varphi = -60^\circ$  nuo horizontalios padėties), simetriškai kaitinamame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptų tėkmėse eksperimentinių tyrimų rezultatai. Eksperimentai buvo atlikti esant oro slėgiui  $p = 0,2$  ir  $0,4$  MPa, kai  $Re$  kito nuo  $1,5 \cdot 10^3$  iki  $5,3 \cdot 10^4$  ir  $Gr_q$  iki  $1,5 \cdot 10^{10}$ .

## 2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Tyrimai atlikti naudojant atviro tipo aerodinaminį kontūrą (1 pav.). Kaip minėta, eksperimentai buvo atliekami esant kanale oro slėgiui  $p = 0,2$  ir  $0,4$  MPa. Suslėgtas oras iš kompresorių patenka į pirmą ir antrą resiverių poras bei specialų sausintuvą. Šitai oras keliauja per keletą įrengimų, kuriuose iš jo yra pašalinama drėgmė, t. y. pirmiausia oras sausinamas kompresoriuose, kuriuose yra integruoti sausintuvai, toliau drėgmė orui plečiantis šalinama resiveriuose ir galiausiai oras nusausinamas specialiame sausintuve. Iš sausintuvo oras keliauja per mechaninių dalelių filtrą ir tiekiamas į skirtingo skerspjuvio debito matavimo diafragmas. Praėjęs pro vieną iš šių diafragmų, oras patenka į eksperimentinį ruožą ir per droselinus ventilius išleidžiamas į atmosferą. Oro slėgis prieš debito matavimo diafragmas ir eksperimentinio ruožo įėjime matuojamas pavyzdiniais manometrais, o slėgio kritimai diafragmose – lėkštinio tipo difmanometrais, pripildytais distiliuoto vandens. Oro slėgis ir debitas ruože reguliuojami ventiliais. Kalorimetrinė folija kaitinama nuolatine elektros srove. Elektros srovės stiprumas reguliuojamas keitiklyje keičiant įtampą žadinimo apvijose, o jos dydis nustatomas pagal įtampos kritimą  $0,5$  tikslumo klasės šunte. Generuojamos srovės ir išsiskiriančios šilumos stabilumas palaikomas naudojant specialų elektroninį įtaisą su grįžtamoju ryšiu.

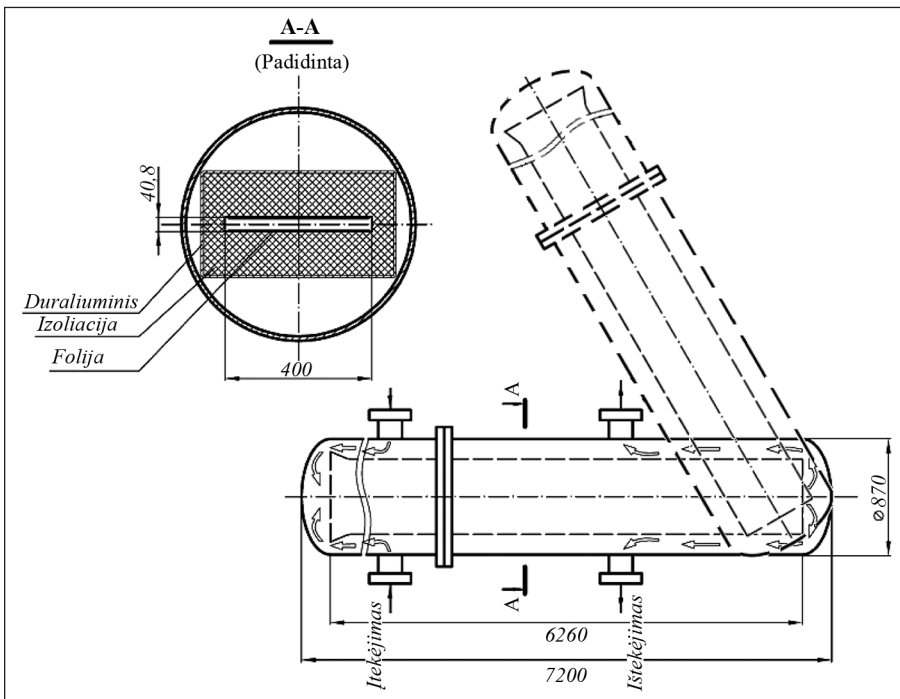
Visi termoporų elektriniai signalai, taip pat įtampos kritimai kalorimetriniuose paviršiuose ir šuntuose matuojami automatiškai matavimo ir duomenų surinkimo sistema, prijungta prie asmeninio kompiuterio. Detalesni aerodinaminio kontūro duomenys pateikti [14].



1 pav. Aerodinaminio kontūro schema: 1 – kompresoriai, 2 – resiverių aikštelė, 3 – sausintuvas, 4 – kondensato valymas, 5 – mechaninių dalelių filtras, 6 – debito matavimo diafragma, 7 – droselinis ventilis, 8 – eksperimentinis ruožas, 9 – elektros generatorius, 10 – kompiuteris, 11 – duomenų surinkimo sistema

Šilumos mainams pasvirusiame plokščiame kanale mišrios konvekcijos atveju laminarinio-turbulentinio (pereinamojo) tekėjimo zonoje tirti naudotas Branduolinės inžinerijos problemų laboratorijoje sukurtas eksperimentinis įrenginys (2 pav.), kuris taip pat buvo naudotas šilumos atidavimui tirti tiek vertikaliame ir pasvirusiame kanale esant turbulentiniam tekėjimui [6], tiek pereinamajam tekėjimui vertikaliame kanale [12, 13]. Tai plokščias kanalas, kurio aukščio ir pločio santykis apytiksliai yra 1 : 10 (40,8 : 400 mm), o bendrasis ilgis – 6260 mm. Jį sudaro hidrodinaminės stabilizacijos

ruožas ir kalorimetrinė dalis. Hidrodinaminės stabilizacijos ruožo ilgis – 2370 mm ( $x/d_e \approx 25$ ). Kalorimetrinį ruožą, kurio plotis lygus 400 mm, aukštis – 40,8 mm, ilgis – 3890 mm ( $x/d_e \approx 50$ ), sudaro dvi pagrindinės ir dvi šoninės duraliuminio plokštės. Iš vidinės pusės duraliuminio karkasas padengtas šilumos izoliacija. Ją sudaro 120 mm storio asbestcemenčio lakštai ant pagrindinių plokščių ir 60 mm bendrojo storio asbestcemenčio lakštai ant šoninių plokščių. Eksperimentinio ruožo kalorimetrinius paviršius sudaro dvi 0,38 mm storio ir 370 mm pločio nerūdijančio plieno folijos.



2 pav. Eksperimentinio ruožo schema

Folijos temperatūra matuojama 0,3 mm skersmens chromelio ir aliumelio termoporomis, privirintomis prie folijos iš oro neapipučiamos pusės. Tomis pačiomis termoporomis matuojami ir įtampos kritimai išilgai folijos. Prie šių abiejų folijų ties išilgine simetrijos ašimi privirinta po dvidešimt penkias termoporas, o dviejuose pjūviuose papildomai privirinta po dvi termoporas folijų kraštuose.

Didesnei  $Gr_q$  reikšmei gauti ir termogravitacinių jėgų poveikiui padidinti šilumnešio slėgis eksperimentų metu siekė iki 0,4 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 m<sup>3</sup>.

Oras tekėjo eksperimentiniu kanalu iš viršaus žemyn, buvo kaitinamos abi kanalo sienelės, taigi eksperimentai buvo atliekami esant mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmėms. Visi eksperimentai atlikti esant kraštinei sąlygai  $q_w \approx \text{const}$ . Maksimali kaitinamos sienelės paviršiaus temperatūra buvo palaikoma apie 500 K. Tuo atveju sienelės temperatūros ir tėkmės vidutinės masinės temperatūros skirtumas buvo ne mažesnis nei 20 K. Eksperimentinio įrenginio ir tyrimų metodologijos išsamesnis aprašymas pateiktas [14].

Gautų rezultatų pirminio apdorojimo stadijoje buvo nustatomi pagrindiniai kriterijai Nu, Re ir  $Gr_q$ . Juose sąlygojančiais parametrais laikomi srauto vietiniai vidutiniai masiniai temperatūra ir greitis bei plokščio kanalo ekvivalentinis skersmuo  $d_e$ . Eksperimentinių rezultatų neapibrėžtys: Re  $\approx$  3,5 %, Nu  $\approx$  4 %,  $Gr_q \approx$  5,8 %.

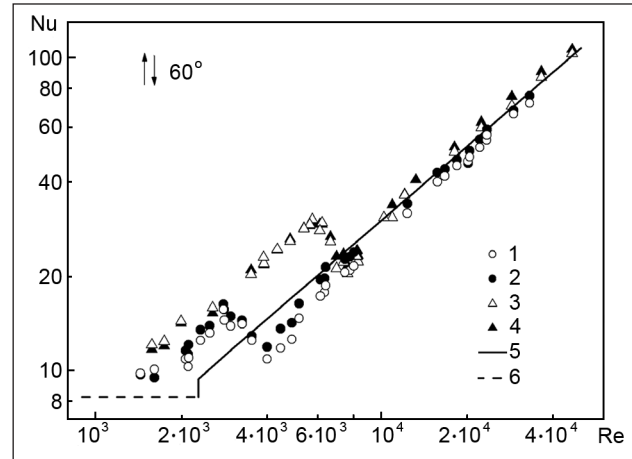
### 3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re esant 0,2 ir 0,4 MPa oro slėgiams pavaizduota 3 paveiksle. Esant 0,2 MPa oro slėgiui ir mažiems Re šilumos atidavimas monotoniškai didėja iki Re  $\approx$  3000. Pasiekus šią reikšmę šilumos atidavimas staigiai sumažėja nuo Nu  $\approx$  17 iki 10 (Re  $\approx$  4000), o tai byloja apie procesų, vykstančių kanale, pasikeitimą. Matyti (3 pav.), kad šilumos atidavimas tiek stabilios, tiek nestabilios stratifikacijos atveju yra labai panašus (apatinės ir viršutinės sienelės taškai yra išsidėstę šalia vienas kito).

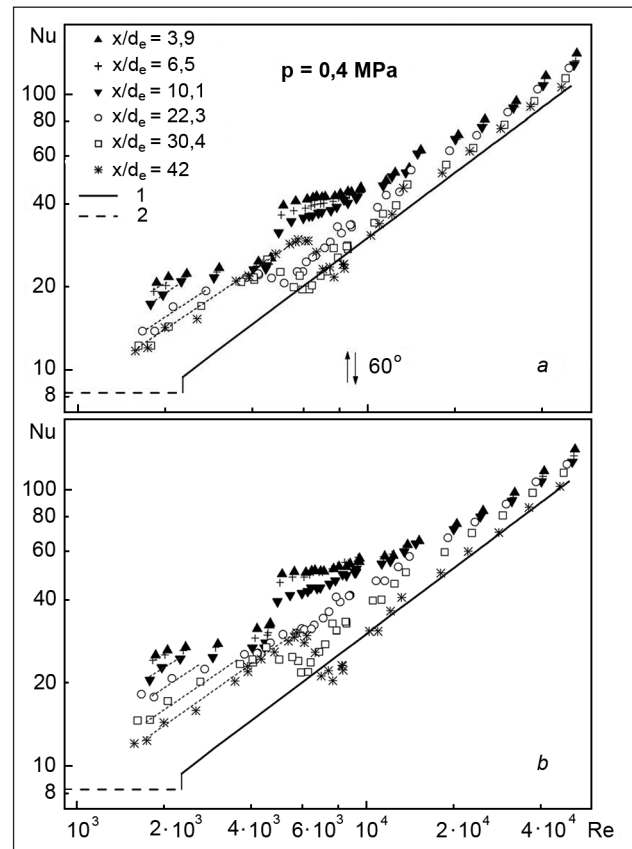
Šilumos atidavimo priklausomumas nuo Re, esant didesniam oro slėgiui (0,4 MPa) ir mažiems Re, monotoniškai didėja iki Re  $\approx$  6000. Pasiekus šią reikšmę šilumos atidavimas staigiai sumažėja nuo Nu  $\approx$  35 iki 20 (Re  $\approx$  8000), o tai, kaip ir mažesnio oro slėgio (0,2 MPa) atveju, byloja apie kanale vykstančių procesų pokytį.

Šilumos atidavimo kitimas ant viršutinės sienelės priklauso nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$ , kai  $p = 0,4$  MPa, ir yra pateiktas (4 pav., a). Aiškiai matyti, kad esant mažesniems Re (iki Re  $\approx$  10000) šilumos atidavimo intensyvumas labiau priklauso nuo  $x/d_e$  negu esant didesniems Re. Esant mažiausioms Re reikšmėms pastebimas aiškus šilumos atidavimo priklausomumas nuo  $x/d_e$  ir didžiausias šilumos atidavimas yra kaitinamo kanalo pradžioje (4 pav., a,  $x/d_e = 3,9$ ). Toliau šis skirtumas mažėja. Kaip minėta (3 pav.), esant dideliems

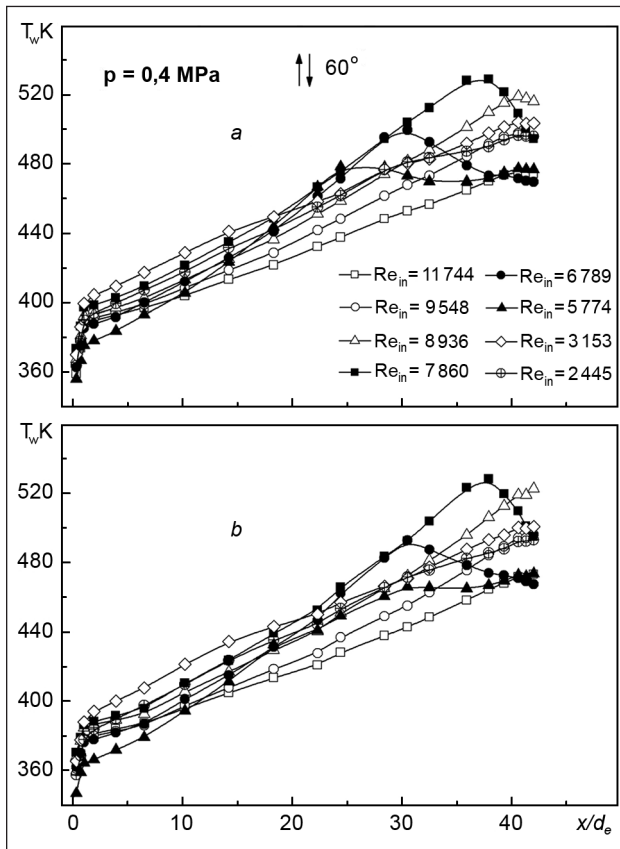
$x/d_e$  ( $x/d_e = 22,3-42$ ) šilumos atidavimo intensyvumas staigiai pasikeičia (sumažėja), kai Re = 4000–8000. Mažėjant  $x/d_e$  toks šilumos atidavimo pokytis pasislenka link mažesnių Re, t. y. link didesnių termogravitacijos parametro  $Bo = Gr_q / (RePr)$  reikšmių. Esant  $x/d_e = 42$ , kai Re  $\approx$  2000–6000, vyrauja sūku-



3 pav. Šilumos atidavimo priklausomumas nuo Re stabilizuotoje pasvirusio plokščio kanalo dalyje ( $x/d_e = 42$ ): 1, 2 – eksperimentiniai duomenys esant 0,2 MPa slėgiui (viršutinė ir apatinė sienelės); 3, 4 – eksperimentiniai duomenys esant 0,4 MPa slėgiui (viršutinė ir apatinė sienelės); 5 – turbulentinė priverstinė konvekcija [1]; 6 – laminarinė priverstinė konvekcija [15]



4 pav. Šilumos atidavimo priklausomumas nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$  dvipusio kaitinimo atveju. a – viršutinė sienelė, b – apatinė sienelė, 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [1], 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [15]

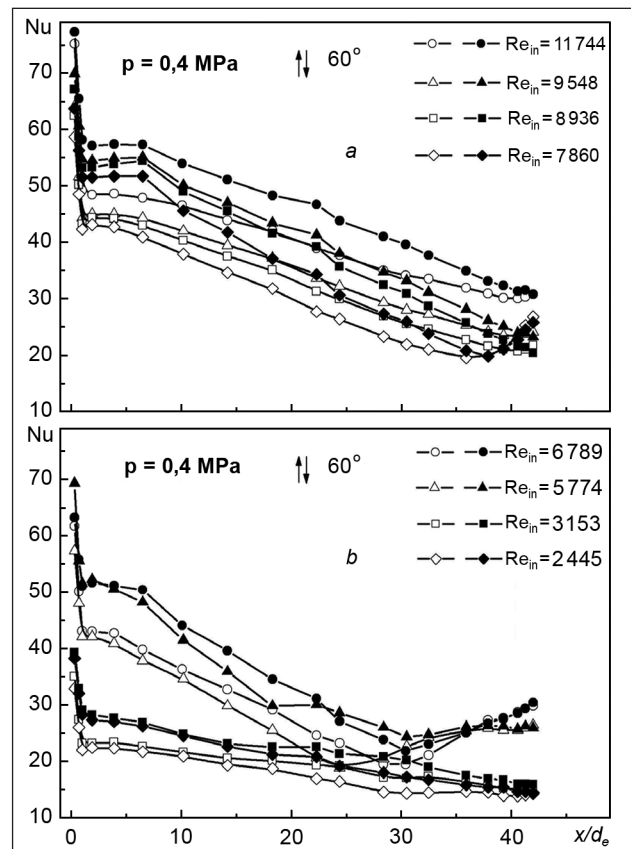


5 pav. Sienelės temperatūros kitimas išilgai kanalo esant įvairiems  $Re$ :  $a$  – viršutinė sienelė,  $b$  – apatinė sienelė

rinis tekėjimas ir jis išlieka iki  $Re \approx 8000$ . Sukurinio tekėjimo zona mažėja mažėjant  $x/d_e$ . Kaitinamo kanalo pradžioje ( $x/d_e = 3,9-10,1$ ) susiformuoja kitoks tekėjimo pobūdis, nei šiluminės stabilizacijos dalyje ( $x/d_e = 22,3-42$ ), dėl gal kitokios tėkmės struktūros, nes iš pradžių šilumos atidavimas praktiškai nepriklauso nuo  $Re$  ( $Re \approx 2000-4000$ ). Toliau ties  $Re \approx 5000$  šilumos atidavimas gana staigiai išsauga, o zonoje nuo  $Re \approx 6000-10000$  praktiškai vėl nebepriskaito nuo  $Re$  skaičiaus. Taigi mažų  $x/d_e$  atveju yra stebimas kitoks šilumos atidavimo kitimas negu buvo gauta vertikalaus kanalo atveju [12], kai šilumos atidavimas didėjo monotoniškai  $Re$  skaičiumi kintant nuo 2000 iki 6000.

Analizuojant šilumos atidavimą nuo apatinės sienelės (nestabili oro tankio stratifikacija) (4 pav.,  $b$ ), galima matyti panašias šilumos atidavimo kitimo tendencijas, tačiau šilumos atidavimo intensyvumas esant mažesniems  $x/d_e$  yra truputį didesnis negu viršutinės sienelės atveju (stabili oro tankio stratifikacija). Taip pat, esant  $x/d_e = 22,3$ , ties  $Re = 4000$  šilumos atidavimas nesumažėja, kaip matyti viršutinės sienelės atveju (4 pav.,  $a$ ). Panašus šilumos atidavimo kitimas gautas ir esant 0,2 MPa oro slėgiui.

Sienelių temperatūros kitimas išilgai kaitinamo kanalo suteikia papildomos informacijos suvokiant šilumos mainų procesus. Eksperimentinių tyrimų metu esant 0,4 MPa oro slėgiui gautas sienelės temperatūros kitimas pagal kanalo ilgį parodytas 5 paveiksle. Esant didžiausiems



6 pav. Šilumos atidavimo nuo viršutinės ir apatinės sienelių palyginimas. Viršutinė sienelė – šviesūs taškai, apatinė sienelė – tamsūs taškai

$Re$  ( $Re_m = 11744-9548$ ) iki šilumos atidavimo minimumo taško ( $Re \approx 8000$ , 3 pav.,  $Re_m = 8936$ , 5 pav.,  $a$ ) yra režimai, kai sienelės temperatūra monotoniškai didėja pagal kanalo ilgį. Esant mažesniems  $Re$  ( $Re_m = 7860-5774$ ) matyti sienelės temperatūros padidėjimas (temperatūros maksimumas) esant tam tikram  $x/d_e$ , po to seka gana staigus sienelės temperatūros mažėjimas. Šis sienelės temperatūros maksimumas ypač išryškėja šilumos mainų sumažėjimo (ir netoli jo) zonoje (3 pav.), t. y. kai  $Re_m = 7860$ ,  $x/d_e \approx 37$ , kai  $Re_m = 6789$ ,  $x/d_e \approx 30$ , kai  $Re_m = 5774$ ,  $x/d_e \approx 25$ . Kai  $Re_m = 5774-7860$  (5 pav.), jau ties kaitinimo pradžia yra turbulentinis tekėjimas, tačiau dėl termogravitacijos jėgų (kurių įtaka dar yra pakankamai didelė) poveikio turbulentinis tekėjimas kaitinamame ruože gale virsta į sukurinį tekėjimą. Dėl to susten-syvėja šilumos atidavimas nuo sienelės, ir nuo tam tikro  $x/d_e$  sienelės temperatūra pradeda mažėti. Esant mažiausioms  $Re$  reikšmėms ( $Re_m = 2445-3153$ , 5 pav.), laminarinis tekėjimas virsta į sukurinį tekėjimą kanalo pradžioje, todėl pagal visą kanalo ilgį formuojasi sukuriniai ir sienelės temperatūra monotoniškai didėja pagal kanalo ilgį.

Analogiškos sienelės temperatūrų pokyčių tendencijos išilgai kanalo nustatytos ir ant apatinės sienelės (5 pav.,  $b$ ), tik reikėtų pažymėti, jog didžiausias temperatūrų skirtumas matyti režime esant  $Re_m = 5774$ , kadangi šiuo atveju ant viršutinės sienelės (5 pav.,  $a$ ) matyti temperatūros maksimumas, kai  $x/d_e \approx 25$ , o ant apatinės sienelės (5 pav.,  $b$ ) – kai  $x/d_e \approx 30$ .

Panašūs sienelės temperatūros kitimo dėsningumai matyti ir esant mažesniai slėgiui (0,2 MPa), tik šiuo atveju ir esant mažiausiems Re matyti, nors ir nedideli, sienelės temperatūros maksimumai / minimumai.

Vietinio šilumos atidavimo nuo viršutinės (stabili stratifikacija) ir apatinės (nestabili stratifikacija) sienelių palyginimas parodytas 6 paveiksle. Kaip matyti, šilumos atidavimo intensyvumas nuo apatinės sienelės visame Re kitimo intervale yra šiek tiek didesnis, tačiau didėjant  $x/d_e$  šis skirtumas mažėja. Režimuose, kai  $Re_{in} = 2445-3153$ , šilumos atidavimas monotoniškai mažėja per visą kanalo ilgį, o vietinių šilumos atidavimo minimumų nėra.

Taip pat matyti, jog režimuose, kai  $Re_{in} = 5774-6789$ , stebimi vietiniai šilumos atidavimo minimumai yra skirtingi abiemis sienelėms. Kai  $Re_{in} = 5774$ , ant viršutinės sienelės minimumas yra ties  $x/d_e \approx 25$ , o ant apatinės sienelės – ties  $x/d_e \approx 30$ . Kai  $Re_{in} = 6789$ , ant viršutinės sienelės minimumas yra ties  $x/d_e \approx 27$ , o ant apatinės sienelės – ties  $x/d_e \approx 30$ .

Esant didesniam Re ( $Re_{in} = 7860$ ) ant abiejų sienelių šilumos atidavimo minimumas sutampa ir yra ties  $x/d_e \approx 38$ . Iš to galima teigti, jog sukūrinis tekėjimas ties apatine ir viršutine sienelėmis susiformuoja esant panašioms  $x/d_e$  reikšmėms.

#### 4. IŠVADOS

Atlikus eksperimentinius stabilios bei nestabilios oro tankio stratifikacijos įtakos mišriai konvekcijai pasvirusiame ( $\varphi = -60^\circ$ ) plokščiaame kanale (esant priešingų kryptų tėkmėms) pereinamojo tekėjimo zonoje tyrimus, galima padaryti šias išvadas:

1. Šilumos atidavimas sukūrinio tekėjimo zonoje, kaip ir vertikaliame plokščiaame kanale, yra kur kas intensyvesnis negu esant priverstinei turbulentinei konvekcijai, todėl keičiantis tekėjimo režimui matyti šuoliškas šilumos atidavimo sumažėjimas. Tekėjimo pobūdžio pokytis sąlygoja ir šilumos atidavimo maksimumų / minimumų atsiradimą pagal kanalo ilgį.

2. Visame nagrinėtų Re ir  $Gr_q$  (oro slėgių) diapazone matyti šiek tiek intensyvesnis šilumos atidavimas nuo apatinės sienelės (nestabili stratifikacija) negu nuo viršutinės (stabili stratifikacija), tačiau šis skirtumas mažėja didėjant atstumui nuo kaitinimo pradžios.

#### 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 (išilginė koordinatė) m;

$\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas,  $\alpha = q_w / (T_w - T_f)$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\beta$  – tūrinio plėtimosi koeficientas  $1/K$ ;

$\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas  $W/(m \cdot K)$ ;

$\nu$  – kinematinio klampumo 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,  $Re = u d_e / \nu$ .

#### Indeksai

1 – pirmą sienelė,

2 – antra sienelė,

$in$  – įtekėjime,

$w$  – ant sienelės,

$f$  – vidutinis masinis.

Gauta 2009 11 20

Priimta 2010 05 17

#### Literatūra

- Petukhov B. S., Polyakov A. F. Teploobmen pri smeshannoy turbulentnoy konvekcii. Moskva: Nauka, 1986. 192 p.
- Jackson J. D., Cotton M. A., Axell B. P. Studies of mixed convection in vertical tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1988. Vol. 10. No. 1. P. 2–15.
- Jackson J. D. Influences of buoyancy on velocity, turbulence and heat transfer in ascending and descending flows in vertical passages. *Proceedings of 4th Baltic Heat Transfer Conference. Advances in Heat Transfer Engineering, August 25–27, 2003, Kaunas, Lithuania*. P. 57–78.
- Vilemas J., Poskas P., Kaupas V. Local heat transfer in a vertical gas-cooled tube with turbulent mixed convection and different heat fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1992. Vol. 35. No. 10. P. 2421–2428.
- Vilemas J., Poskas P. *Effect of Body Forces on Turbulent Heat Transfer in Channels*. LEI–Begell House, Kaunas–New York, 1999.
- Poskas P., Poskas R. Mixed convection in the channel flows. *Heat Transfer Research*. 2009. Vol. 40. No. 1. P. 31–56.
- Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J. Effects of natural convection on transition to turbulence in vertical pipes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1960. Vol. 38. P. 67–73.
- Scheele G. F., Hanratty T. J. Effects of natural convection instabilities on rates of heat transfer at low Reynolds numbers. *AIChE Journal*. 1963. Vol. 9. No. 2. P. 183–185.
- Chong D. T., Liu J. P., Yan J. J. Effects of duct inclination angle on thermal entrance region of laminar and transition mixed convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. No. 15–16. P. 3953–3962.
- Sirvydas A., Poškas R. Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptų tėkmėse. 1. Laminarinė mišri konvekcija bei perėjimas į sukūrinį tekėjimą esant simet-

- riniam dvipusiam kaitinimui. *Energetika*. 2005. Nr. 3. P. 10–16.
11. Sirvydas A., Poškas R. Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse. 2. Sūkurinis tekėjimas esant simetriniam dvipusiam kaitinimui. *Energetika*. 2006. Nr. 1. P. 9–15.
  12. Poškas R., Sirvydas A., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo eksperimentinis tyrimas vertikaliame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse pereinamojo tekėjimo zonoje. 1. Vietinio šilumos atidavimo analizė. *Energetika*. 2007. T. 53. Nr. 4. P. 38–44.
  13. Poškas R., Sirvydas A., Bartkus G. Šilumos atidavimo eksperimentiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse pereinamojo tekėjimo zonoje. 2. Vietinio šilumos atidavimo analizė esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui ir rezultatų apibendrinimas. *Energetika*. 2008. T. 54. Nr. 3. P. 13–16.
  14. Poškas R., Poškas P., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiam kanale turbulentinės mišrios konvekcijos atveju, esant priešingų krypčių srautams bei vienpusiam kaitinimui, eksperimentinis tyrimas. *Energetika*. 2000. Nr. 4. P. 53–60.
  15. Petukhov B. S. *Teploobmen i soprotivleniye pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh*. Moskva: Energiya, 1967. P. 411.

Robertas Poškas, Giedrius Drumstas, Povilas Poškas,  
Jokūbas Kolesnikovas

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE IMPACT OF AIR DENSITY STRATIFICATION ON MIXED CONVECTION IN THE FLAT CHANNEL IN THE TRANSITION REGION

##### 1. OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN AN INCLINED ( $\varphi = -60^\circ$ ) CHANNEL

###### Summary

In this paper, we present the results of an experimental investigation of the local opposing mixed convection heat transfer in an inclined (inclination angle  $\varphi = -60^\circ$  from horizontal position), flat channel with symmetrical heating in the laminar-turbulent transition region. The experiments were performed in airflow ( $p = 0.2$  and  $0.4$  MPa) in the range of Re from  $1.5 \cdot 10^3$  to  $5.3 \cdot 10^4$  and  $Gr_q$  up to  $1.5 \cdot 10^{10}$  at the limiting condition  $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ . The results have shown that heat transfer in the vortex flow region, like in the vertical channel, is more intensive than in the turbulent flow. Also, heat transfer from the bottom wall (unstable air density stratification) is more intensive than that from the upper one (stable air density stratification), but this difference is decreasing with increasing  $x/d_e$ .

**Key words:** local heat transfer, mixed convection, opposing flows, stable and unstable air density stratification, inclined flat channel, transition region

Робертас Пошкас, Гедриус Друмстас, Повилас Пошкас,  
Йокубас Колесниковас

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА НА СМЕШАННУЮ КОНВЕКЦИЮ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

##### 1. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПОТОКОВ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В НАКЛОННОМ ( $\varphi = -60^\circ$ ) КАНАЛЕ

###### Резюме

В настоящей работе приводятся данные экспериментального исследования местной теплоотдачи в симметрично нагреваемом плоском наклонном (угол наклона  $\varphi = -60^\circ$  от горизонтальной плоскости) канале в зоне ламинарно-турбулентного переходного течения при противоположных направлениях потоков смешанной конвекции. Эксперименты проведены в потоке воздуха ( $p = 0,2$  и  $0,4$  МПа) при Re от  $1,5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$  и  $Gr_q$  до  $1,5 \cdot 10^{10}$  при условии  $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ . Анализ данных показал, что теплоотдача в зоне вихревого течения, как и в вертикальном канале, выше по сравнению с турбулентной вынужденной конвекцией. Анализ также показал, что теплоотдача от нижней стенки (неустойчивая стратификация) больше, чем от верхней стенки (устойчивая стратификация), однако эта разница уменьшается при увеличении  $x/d_e$ .

**Ключевые слова:** местная теплоотдача, смешанная конвекция, противоположные направления потоков, устойчивая и неустойчивая стратификация, вертикальный плоский канал, переходная зона течения