

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

## 1. Vietinio šilumos atidavimo analizė

**Robertas Poškas,**

**Arūnas Sirvydas,**

**Jokūbas Kolesnikovas**

*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 plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse eksperimentinių tyrimų rezultatai. Išanalizuotas vietinio šilumos atidavimo kitimas esant įvairiems oro slėgiams (0,1–0,4 MPa), t. y. skirtingai pasireiškiant termogravitacijos jėgoms. Rezultatų analizė parodė, jog dėl termogravitacijos jėgos dydžio esant tam tikram  $x/d_c$  gali staigiai pasikeisti šilumos atidavimo intensyvumas. Tai yra susiję su tekėjimo režimo pokyčiu, t. y. su sukurių susidarymu arba išnykimu. Be to, nustatyta, kad esant sūkuriniam tekėjimui šilumos mainai yra žymiai didesni nei esant turbulentiniam tekėjimui, o į turbulentinį tekėjimą pereinama, kai didesnis Re. Taigi gauti rezultatai iš esmės keičia supratimą apie laminarinio tekėjimo perėjimą į turbulencinį esant dideliame termogravitacijos jėgų poveikiui.

**Raktažodžiai:** vertikalus plokščias kanalas, priešingų krypčių mišri konvekcija, pereinamojo tekėjimo zona, vietinis šilumos atidavimas

### 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 turbulentinio pernešimo mechanizmas bei konvekcinio šilumos pernešimo pobūdis. Daugelyje kasdienėje buityje ir pramonėje naudojamų įrenginių pasireiškia termogravitacijos jėgų (svorio jėgos sąlygotas temperatūros laukas) poveikis, esant tiek laminariniam, tiek turbulenciniam tekėjimui.

Įvairūs autoriai laminarinį ir pereinamąjį tekėjimą kanaluose, esant mišriai konvekcijai, nagrinėjo darbuose [1–5]. Darbe [1] tirtas tėkmės judėjimo nestabilumas vertikaliame vamzdyje į jo centrinę dalį įpurškiant dažus ir stebint tėkmę vizualiai. 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 ( $x/d_c$ ).

Darbuose [2, 3] pabrėžiama, jog persilenkimo taškų atsiradimas greičio profiliuose ir ypač atgalinio tekėjimo atsiradimas skatina laminarinio tekėjimo stabilumo praradimą ir perėjimą prie turbulentinio tekėjimo. Tokiu atveju perėjimas iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį įvyksta, kai  $Re < 2300$  (t. y. nepasie-

kus krizinio Reinoldso skaičiaus ( $Re$ ) įprastinėmis sąlygomis). Darbe [2] pasiūlyta priklausomybė, kuri, esant vienkryptėms tėkmėms vamzdyje, įgalina nustatyti nedimensinį atstumą nuo kanalo kaitinimo pradžios, kuriame laminarinis tekėjimas praranda stabilumą. Šilumos atidavimui skaičiuoti laminarinės mišrios konvekcijos atveju esant vienkryptėms tėkmėms taip pat pasiūlyta priklausomybė [2].

Priešingų krypčių tėkmių atveju vamzdyje, didėjant  $Gr_q / Re$ , tėkmės greitis prie kanalo sienelių sumažėja, o kanalo centre – padidėja. Darbe [3] nurodoma, kad kai  $Gr_q / (4Re) \approx 100$ , greičio gradientas prie sienelės pasidaro lygus nuliui, o šių parametru santykiui esant kiek didesniui, prie sienelės atsiranda atgalinis tekėjimas. Kai  $Gr_q / (4Re) \approx 170$ , stabilumas pažeidžiamas, prie sienelės susidaro sūkuriai, o dar labiau padidinus  $Gr_q / (4Re)$  tekėjimas pereina į turbulentinį.

Esant priešingų krypčių tėkmėms, visų pirma tėkmės nestabilumas fiksuojamas dažų siūleliui įgavus nežymią tėkmės asimetriją prieš pat kaitinamą kanalo dalį. Darbe [5] buvo pastebėta, kad padidėjus termogravitacijos jėgų įtakai tėkmė pradeda trūkti.

Lietuvos energetikos institute atlikti skaitiniai tyrimai laminarinio ir pereinamojo tekėjimo zonoje, esant mišrios konvekcijos priešingų krypčių tėkmėms, pateikti darbuose [6, 7], kuriuose nagrinėtas šilumos atidavimas ir srauto struktūra plokščiam kanale. Darbe [6] pateikti šilumos atidavimo vertikaliame plokščiam kanale mišrios konvekcijos atveju, esant laminariniam oro tekėjimui iki perėjimo į sūkurinį tekėjimą, skaitinio modeliavi-

mo rezultatai. Dvimatis modeliavimas buvo atliktas programa FLUENT 6.1 esant 0,1; 0,2 ir 0,4 MPa oro slėgiui, kai  $Re_{in}$  kito nuo 1500 iki 4310, o Grashofio skaičius ( $Gr_{qm}$ ) buvo keičiamas nuo  $1,65 \cdot 10^5$  iki  $3,1 \cdot 10^9$ . Modeliavimas parodė, jog esant nedideliam termogravitacijos jėgų poveikiui, oro tėkmė visuose kanalo skerspjūviuose yra nukreipta žemyn, t. y. juda priverstinio tekėjimo kryptimi. Didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui stebimas oro tėkmės atitrūkimas nuo sienelių tam tikroje kanalo vietoje. Toliau labiau kaitinant didėja ir termogravitacijos jėgų poveikis, ir tėkmės atitrūkimo vieta pasislenka link kaitinimo pradžios. Nuo tėkmės atitrūkimo vietos žymiai sumažėja kanalo sienelės temperatūra ir pagerėja šilumos atidavimas, kuris panašaus lygio išsilaiko per visą likusį kanalo ilgį. Išanalizavus modeliavimo rezultatus buvo pasiūlytos apibendrinančios priklausomybės tėkmės nestabilumo padėčiai pagal kanalo ilgį įvertinti ir šilumos atidavimui skaičiuoti laminarinio tekėjimo zonoje.

Darbe [7] buvo modeliuojamas dvimatis oro tėkmės judėjimas plokščiam (aukštis 0,0408 m, ilgis 6 m), vertikaliame, simetriškai kaitinamame kanale, esant 0,4 MPa slėgiui. Reynoldso skaičius įtekėjime buvo 2130 ir 4310, o  $Gr_q$  buvo keičiamas nuo  $7,6 \cdot 10^7$  iki  $3,1 \cdot 10^9$ . Kaitinimo ant sienelės galingumas buvo keičiamas plačiame diapazone (nuo  $1 \text{ W/m}^2$  iki galingumo, naudoto eksperimento metu), siekiant sumodeliuoti skirtingą termogravitacijos jėgų poveikį. Tiek nestacionarus, tiek kvazistacionarus modeliavimo rezultatai parodė, kad esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui prie kanalo sienelių susidaro antriniai tekėjimai. Jie deformuoja greičio profilius ir sukelia sienelės temperatūros kitimą pagal kanalo ilgį. Sienelės temperatūra įgauna sinusoidės pobūdį, tačiau vidutinė jos reikšmė, kai  $Re_{in} = 2130$ , gana neblogoai sutampa su eksperimento duomenimis.

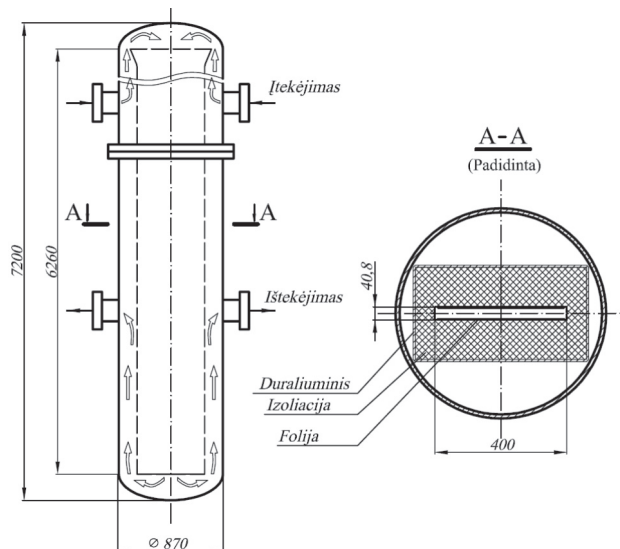
Šiame straipsnyje pateikti eksperimentiniai šilumos atidavimo pereinamojo tekėjimo zonoje tyrimo rezultatai, esant mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėms simetriškai kaitinamame vertikaliame plokščiam kanale.

## 2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentai atlikti naudojant atviro tipo aerodinaminį kontūrą. Oro slėgis prieš debito matavimo diafragmas ir eksperimentinio ruožo įėjime matuojamas pavyzdiniais manometrais, o slėgio kritimai diafragmose – lėkštinio tipo difmanometrais, pripildytais distiliuoto vandens. Srauto temperatūra prieš diafragmas ir įtekant į eksperimentinį ruožą matuojama 0,3 mm skersmens chromelio ir aliumelio termoporomis. Oro slėgis ir debitas ruože reguliuojami ventiliais, kalorimetrinė folija kaitinama nuolatine elektros srove. Tam tikslui naudojamas nuolatinės srovės generatorius. Elektros srovės stiprumas reguliuojamas keitiklyje keičiant įtampą žadinimo apvijose, o jos dydis nustatomas pagal įtampos kritimą 0,5 tikslumo klasės šunte. Generuojamos srovės ir išskiriančios šilumos stabilumas palaikomas naudojant specialų elektroninį įtaisą su grįžtamuju ryšiu.

Visi termoporų elektriniai signalai, taip pat įtampos kritimai kalorimetriniuose paviršiuose ir šuntuose matuojami automatinė matavimo ir duomenų surinkimo sistema, prijungta prie IBM asmeninio kompiuterio. Detalesni aerodinaminio kontūro duomenys pateikti [8].

Šilumos mainams plokščiam kanale pereinamojo tekėjimo zonoje mišrios konvekcijos atveju priešingų kryptų tėkmėse tir-



1 pav. Eksperimentinio ruožo schema (esant priešingų tėkmių atvejui)

ti panaudotas laboratorijoje sukurtas eksperimentinis įrenginys (1 pav.), kuris anksčiau buvo naudotas šilumos atidavimui tirti vienkryptėse bei priešingų kryptų tėkmėse [9] esant turbulentiniam tekėjimui. 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 ( $x/d_e \approx 25$ ).

Kalorimetrinį ruožą, kurio plotis lygus 400 mm, aukštis – 40,8 mm, o 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 bendro storio asbestcemenčio lakštai ant šoninių plokščių.

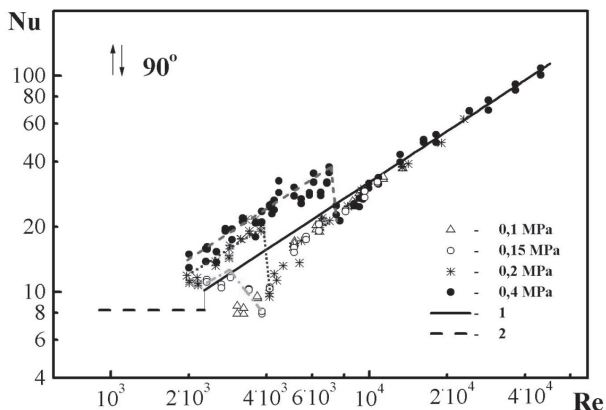
Eksperimentinio ruožo kalorimetrinį paviršių sudaro 0,38 mm storio ir 370 mm pločio nerūdijančio plieno folija. Folijos temperatūra matuojama 0,3 mm skersmens chromelio ir aliumelio termoporomis, privirintomis prie folijos iš oro nepapučiamos pusės. Tomis pačiomis termoporomis matuojami ir įtampos kritimai pagal folijos ilgį. 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, kartu ir termogravitacinių jėgų poveikiui padidinti oro slėgis gali būti padidintas iki 1 MPa. Kad tai būtų galima pasiekti, visas eksperimentinis ruožas yra slėgio inde, kurio skersmuo 870 mm, ilgis – 7200 mm, svoris – apie 2000 kg, tūris –  $4 \text{ m}^3$ . Šiame straipsnyje nagrinėjami šilumos atidavimo duomenys, kai oro slėgis kito nuo 0,1 iki 0,4 MPa.

Visi eksperimentai atlikti esant kraštinei sąlygai  $q_w \approx \text{const}$ . Kanalo gale kaitinamos sienelės temperatūra buvo palaikoma apie 400 K. Tuo atveju temperatūrų skirtumas tarp sienelės temperatūros ir tėkmės vidutinės masinės temperatūros buvo ne mažesnis nei 20 K. Detalesni eksperimentinio ruožo duomenys pateikti [8].

## 3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Šilumos atidavimo priklausomybė nuo  $Re$  esant įvairiems oro slėgiams yra pavaizduota 2 pav. Kaip matyti, iki  $Re \approx 8 \cdot 10^3$ , Nu išsiskuksniuojama priklausomai nuo oro slėgio. Tačiau reikia



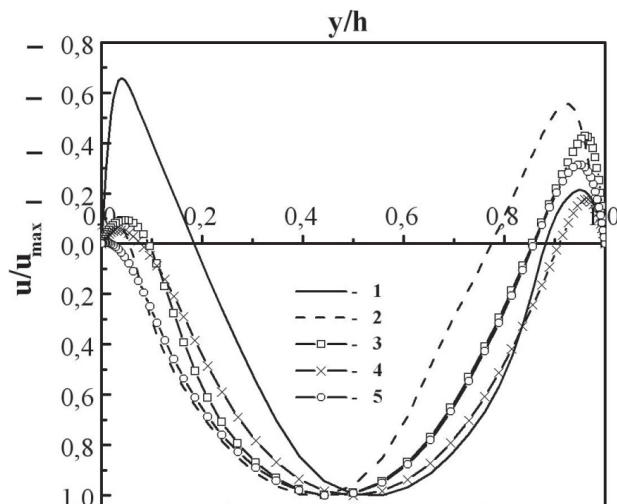
2 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo  $Re$  stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje ( $x/d_e = 42$ ) dvipusio kaitinimo atveju. 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [10]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [11]

turėti omenyje, kad eksperimentų metu taip pat kito ir šilumos srautas ant sienelės. Kuo didesnis oro slėgis (didesnis  $Gr_q$ ), tuo intensyvesnis šilumos atidavimas mažų  $Re$  srityje. Kaip matyti paveiksle, esant 0,15 ir 0,2 MPa slėgiui,  $Nu$ , kai  $Re$  maži, yra aukščiau turbulentinės priverstinės konvekcijos kreivės, bet kai  $Re \approx 3 \cdot 10^3$  ir  $Re \approx 4 \cdot 10^3$ , stebimas gana staigus šilumos atidavimo sumažėjimas iki  $p = 0,1$  MPa. Iš to galima spręsti, kad esant šiems  $Re$  pasikeičia srauto tekėjimo kanale pobūdis. Panašiai yra ir esant 0,4 MPa slėgiui, tačiau čia šilumos atidavimo sumažėjimas iki  $p = 0,1$  MPa pasireiškia esant didesniai  $Re$  skaičiui ( $Re \approx 8 \cdot 10^3$ ). Taigi esant 0,1 MPa slėgiui, kai visi  $Re$  skaičiai, esant 0,15 MPa slėgiui, kai  $Re > 3000$ , esant 0,2 MPa slėgiui, kai  $Re > 4000$ , esant 0,4 MPa slėgiui, kai  $Re > 8000$ , šilumos atidavimo intensyvumas praktiškai nepriklauso nuo oro slėgio ir monotoniškai didėja didėjant  $Re$  skaičiui, kol pasiekia išvystyto turbulentinio tekėjimo priverstinės konvekcijos kreivę.

Toliau pateikti tėkmės struktūros skaitinių tyrimų rezultatai, kai  $Re_m = 2011$  ( $p = 0,2$  MPa,  $Gr_{qm} = 3,9 \cdot 10^8$ ), leidžia geriau suprasti šilumos atidavimo intensifikavimo priežastis. Modeliavimas atliktas programa FLUENT 6.1, kuri plačiai taikoma visame pasaulyje modeliuojant takųjų medžiagų judėjimą ir šilumos mainus sudėtingose dvimatėse ar trimatėse sistemose [12].

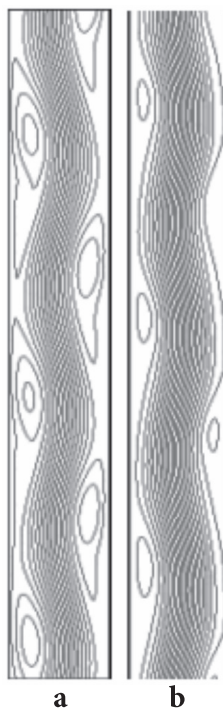
Buvo modeliuojamas stacionarus dvimatis (laminarinis modelis) oro tėkmės judėjimas plokščiam (aukštis 0,0408 m, ilgis 6 m), vertikaliame, simetriškai kaitinamame ( $q_{w1} \approx q_{w2} \approx \text{const}$ ) kanale esant mišrios konvekcijos priešingų kryptų kryptims. Kanalo geometrija parinkta tokia, kaip ir eksperimentuose naudoto eksperimentinio ruožo geometrija mišriai konvekcijai tirti (aukštis 0,0408 m, ilgis 6 m). Įėjime į kanalą oro slėgio, temperatūros ir greičio reikšmės buvo parinktos tokios pat, kokios buvo naudotos ir eksperimento metu.

Esant tokiam  $Re$  ( $Re_m = 2011$ ) orui įtekant į kaitinamą kanalo dalį vis dar turime laminarinę tėkmę. Greičio profilių kitimas šiuo atveju yra parodytas 3 pav. Kaip matyti, centrinėje kanalo dalyje tėkmė visada yra nukreipta žemyn (priverstinės tėkmės kryptis), bet greičio profilis yra asimetriškas. Kai  $x/d_e = 1,9$  (3 pav., 1 kreivė), atgalinė tėkmė prie kairės kanalo sienelės užima didesnę skerspjūvio dalį negu prie dešinės kanalo sienelės, o greičio maksimumas yra beveik kanalo centre ( $y/h \approx 0,55$ ). Kai  $x/d_e = 3,9$  (3 pav., 2 kreivė), atgalinė tėkmė prie dešinės sie-



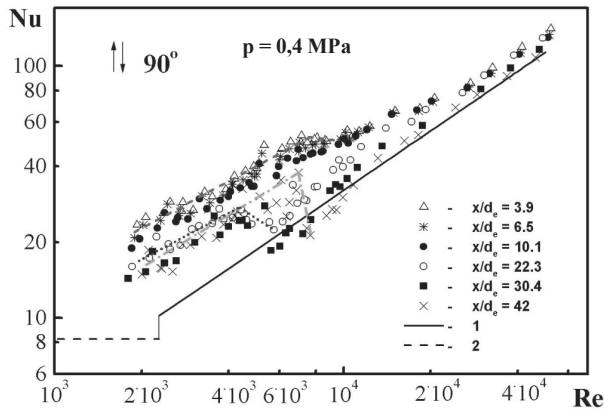
3 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai  $Re_m = 2011$ ,  $Gr_{qm} = 3,9 \cdot 10^8$ . 1 –  $x/d_e = 1,9$ ; 2 –  $x/d_e = 3,9$ ; 3 –  $x/d_e = 22,3$ ; 4 –  $x/d_e = 30,4$ ; 5 –  $x/d_e = 42$

nelės užima didesnę kanalo skerspjūvio dalį negu prie kairės, o greičio maksimumas yra ties  $y/h \approx 0,4$ . Kai  $x/d_e = 22,3$  (3 pav., 3 kreivė), tėkmė prie abiejų kanalo sienelių yra taip pat nukreipta į viršų, bet palyginus su  $x/d_e = 3,9$ , atgalinė tėkmė užima dar didesnę skerspjūvio dalį prie kairės sienelės, tuo tarpu atgalinė tėkmė prie dešinės sienelės yra silpniau išreikšta. Taip pat matyti, kad greičio maksimumas persislinko, kai  $y/h \approx 0,45$ . Kai  $x/d_e = 30,4$ – $42$  (3 pav., 4, 5 kreivės), atgalinė tėkmė prie dešinės sienelės susilpnėja. Greičio maksimumas yra atitinkamai esant  $y/h \approx 0,5$  ir  $y/h \approx 0,45$ , kai  $x/d_e = 30,4$  ir  $x/d_e = 42$ .

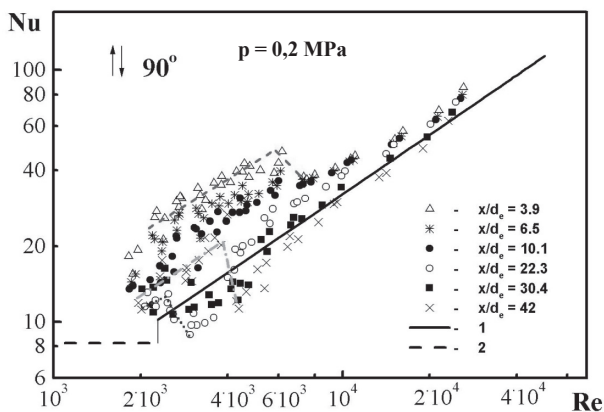


4 pav. Tėkmės struktūra, kai  $Re_m = 2011$ ,  $Gr_{qm} = 3,9 \cdot 10^8$ . a)  $x/d_e = 1,9$ – $3,9$ ; b)  $x/d_e = 39$ – $42$

Kaip matyti 4 pav., sūkūriai susiformuoja prie abiejų kanalo sienelių. Jie yra išsidėstę šachmatine tvarka. Dėl to greičio profilis yra iškraipomas, o tėkmės pobūdis kanalo centre įgauna sinusoidės pavidalą. Dėl sūkūrių susiformavimo šilumos atidavimas gerokai padidėja (2 pav.). Panašios sūkūrinės tėkmės struktūros



5 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$  dvipusio kaitinimo atveju. 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [10]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [11]



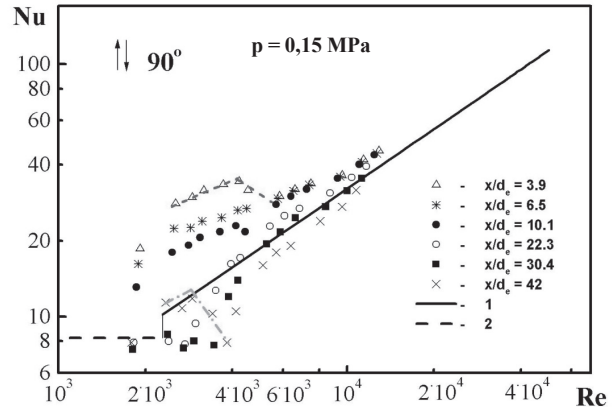
6 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$  dvipusio kaitinimo atveju. 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [10]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [11]

buvo gautos ir tuo atveju, kai  $p = 0,4$  MPa, o  $Re = 2136$  ir  $4317$  [7].

Dabar atliksime detalesnę šilumos atidavimo kitimo išilgai kanalo analizę. Šilumos atidavimo kitimas dėl Re esant įvairiems  $x/d_e$ , kai  $p = 0,4$  MPa, yra parodytas 5 pav. Aiškiai matyti, kad esant mažesniems Re (iki  $Re \approx 10000$ ) šilumos atidavimo intensyvumas labiau priklauso nuo  $x/d_e$  negu esant didesniems Re. Kaip minėta (2 pav.), esant dideliems  $x/d_e$  staigiai pakinta šilumos atidavimo intensyvumas, kai  $Re = 4000-7000$ . Mažėjant  $x/d_e$  toks šilumos atidavimo pokytis persilenka link mažesnių Re, t.y. link didesnių termogravitacijos parametro ( $Bo = Gr_q / Re^m Pr^n$ ) reikšmių. Ne tokie staigūs šilumos atidavimo intensyvumo pokyčiai pastebėti esant mažesniems  $x/d_e$  ( $x/d_e = 3,9-10,1$ ), kai  $Re = 6000-9000$ , tačiau šilumos atidavimo kitimo pobūdis yra kitoks, negu esant didesniems  $x/d_e$ . Taigi galima manyti, jog tai sąlygoja kitokia tėkmės struktūra kaitinamo kanalo pradžioje.

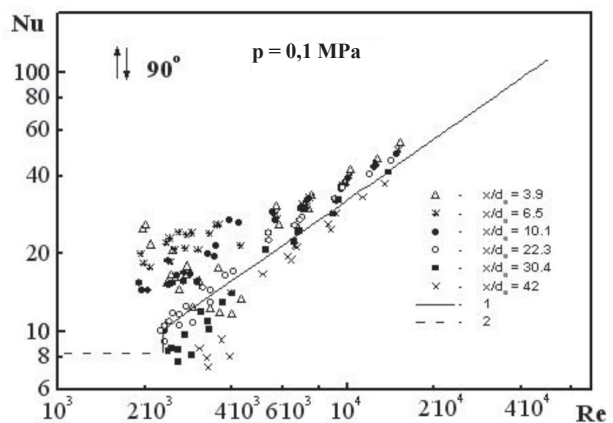
Esant  $0,2$  MPa oro slėgiui, šilumos atidavimo procesai yra panašūs į anksčiau aptartuosius, kai  $p = 0,4$  MPa. Kai  $x/d_e = 3,9$ , o  $Re \approx 6000$ , yra stebimas staigus šilumos atidavimo pokytis (6 pav.). Ne taip staigiai šilumos atidavimas keičiasi, kai  $x/d_e = 6,5$  ir  $10,1$ .  $x/d_e$  padidėjus ( $x/d_e = 22,3-42$ ), šilumos atidavimas staigiai pasikeičia esant mažesniems Re ( $Re = 2500-4000$ ).

Kai  $x/d_e = 22,3-30,4$ , vietinis šilumos atidavimo minimumas yra prie  $Re \approx 2500$ . Didėjant  $x/d_e$  šilumos atidavimo minimumas persilenka didesnių Re link ir, kai  $x/d_e = 42$ , tai stebima esant  $Re \approx 4000$ . Taigi šie rezultatai taip pat parodo, jog mažų  $x/d_e$  atveju yra kitokia tėkmės struktūra nei esant dideliems  $x/d_e$  (4 pav.).



7 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$  dvipusio kaitinimo atveju. 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [10]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [11]

Esant  $0,15$  MPa oro slėgiui, šilumos atidavimo procesai taip pat panašūs į anksčiau aptartuosius, kai  $p = 0,4$  ir  $0,2$  MPa, tačiau yra ir skirtumų. Kai  $x/d_e = 3,9$ , o  $Re \approx 4000$ , yra stebimas staigiai pasikeitęs šilumos atidavimas (7 pav.). Kai  $x/d_e = 6,5$  ir  $10,1$ , taip pat yra stebimas šilumos atidavimo pokytis, tik jis nėra toks staigus. Pagrindinis ypatumas yra tai, kad staigus šilumos atidavimo pokytis didesnių  $x/d_e$  zonoje egzistuoja tik esant didžiausiam  $x/d_e$  ( $x/d_e = 42$ ) iki  $Re \approx 3000$ . Kai Re yra didesni, šilumos atidavimas staiga sumažėja, o tai rodo, jog sūkurinis tekėjimas išnyksta. Kai  $x/d_e = 22,3-30,4$ , ištirtoje zonoje tekėjimas yra nesūkurinis, nes šilumos atidavimo lygis atitinka priverstinės konvekcijos lygį.



8 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re esant įvairiems  $x/d_e$  dvipusio kaitinimo atveju. 1 – turbulentinė priverstinė konvekcija [10]; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [11]

Šilumos atidavimo kitimas, esant  $p = 0,1$  MPa oro slėgiui, yra parodytas 8 pav. Kaip minėta (2 pav.), kai  $x/d_e = 42$ , perėjimo ir turbulentinės tėkmės zonose stebime šilumos atidavimą esant priverstinei konvekcijai (nesūkurinė tėkmė). Tai stebima ir

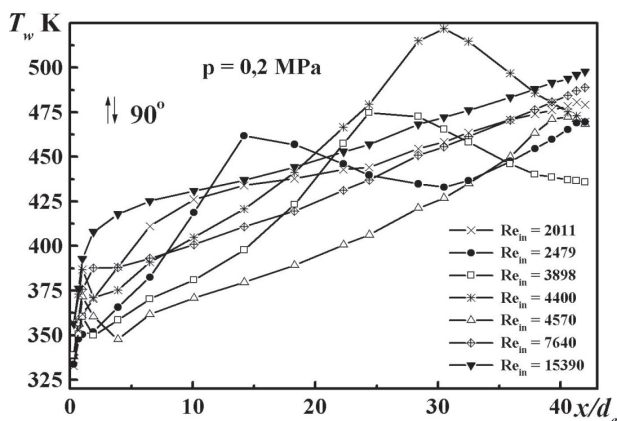


kai  $x/d_e = 22,3-30,4$ , tačiau galima manyti, jog jis būtų stebimas dar mažesnių  $Re$  zonoje negu mūsų išnagrinėtoji  $Re$  kitimo sritis. Bet, kaip matyti 8 pav., esant mažiems  $x/d_e$  ( $x/d_e = 3,9-10,1$ ) šilumos atidavimas panašiai kinta didėjant  $Re$ , kaip ir esant didesniai oro slėgiui, tačiau staigus šilumos atidavimo sumažėjimas yra stebimas kur kas mažesnių  $Re$  ( $Re \approx 4000$ ) atveju, nes termogravitacijos jėgų įtaka sumažėjo, sumažėjus oro slėgiui.

Taigi nuodugniai išnagrinėjus šilumos mainų procesus perėjimo zonoje esant įvairiems oro slėgiams, galima apibendrinti, jog išilgai kanalo yra dvi būdingos šilumos mainų zonos:

- Kanalo pradžioje (iki  $x/d_e = 10$ ) intensyvaus šilumos atidavimo sritis išsilaiko esant didesniems  $Re$ , negu likusioje kanalo dalyje, o šilumos atidavimo staigus sumažėjimo padėtis praktiškai nepriklauso nuo  $x/d_e$ ;

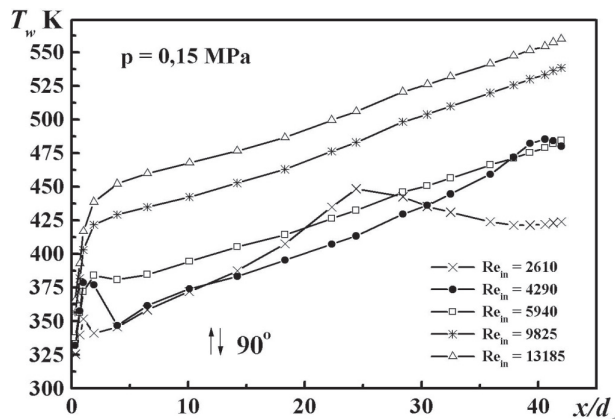
- Kitoje kanalo dalyje intensyvaus šilumos atidavimo sūkurinės tėkmės pabaiga priklauso nuo  $x/d_e$  ir jam didėjant persilenka link didesnių  $Re$ .



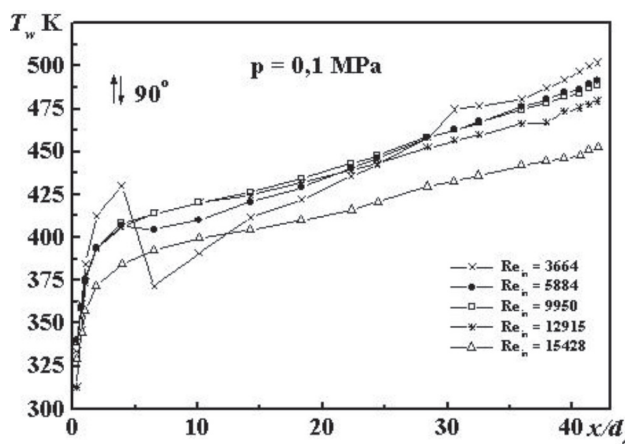
9 pav. Sielės temperatūros kitimas išilgai kanalo esant 0,2 MPa slėgiui

Įvairių režimų sienelių temperatūros kitimas išilgai kaitinamo kanalo suteikia papildomos informacijos suvokiant šilumos mainų procesus. Eksperimentinių tyrimų metu esant 0,2 MPa oro slėgiui gautos sienelės temperatūros pavaizduotos 9 pav. Didelių  $Re$  ( $Re = 15390-7640$ ) atveju iki šilumos atidavimo minimumo taško (duomenų „šoliuko“ 2 pav.) sienelės temperatūra monotoniškai didėja pagal kanalo ilgį. Mažesnių  $Re$  ( $Re = 4570-2011$ ) atveju pastebimas sienelės temperatūros padidėjimas esant tam tikram  $x/d_e$  (kai  $Re = 4570$ ,  $x/d_e \approx 40$ , kai  $Re = 4400$ ,  $x/d_e \approx 30$ , kai  $Re = 3898$ ,  $x/d_e \approx 25$ , kai  $Re = 2479$ ,  $x/d_e \approx 15$ , kai  $Re = 2011$ ,  $x/d_e \approx 15$ ), po to seka staigus sienelės temperatūros mažėjimas, nes susidaro sūkuriai, kurie suintensyvina šilumos atidavimą (3 ir 4 pav.). Be to, esant mažiems  $x/d_e$  susidaro papildomi sienelės temperatūros minimumai ir maksimumai, kurie suintensyvina šilumos atidavimą kanalo kaitinimo pradžioje. Šie papildomi temperatūros minimumai ir maksimumai pasireiškia esant ne tik mažiausiems  $Re$ , bet ir režimams nedidėjant sienelės temperatūrai išilgai kanalo ( $Re_{in} = 7640$ ).

Sielės temperatūros kitimas esant 0,15 MPa oro slėgiui parodytas 10 pav. Čia kreivių kitimo pobūdis yra panašus, kaip ir esant 0,2 MPa slėgiui. Didelių  $Re$  ( $Re = 13185-5940$ ) atveju iki šilumos atidavimo minimumo taško ( $Re \approx 4000$ , 2 pav.) yra režimai, kai sienelės temperatūra monotoniškai didėja pagal kanalo ilgį. Mažesnių  $Re$  ( $Re = 4290-2610$ ) atveju pastebimas sienelės temperatūros padidėjimas esant tam tikram  $x/d_e$  (kai  $Re = 4290$ ,



10 pav. Sielės temperatūros kitimas išilgai kanalo esant 0,15 MPa slėgiui



11 pav. Sielės temperatūros kitimas išilgai kanalo esant 0,1 MPa slėgiui

$x/d_e \approx 40$ , kai  $Re = 2610$ ,  $x/d_e \approx 25$ ), po to sienelės temperatūra palaipsniui mažėja. Iš to galima spręsti, kad toje vietoje, kurioje atsiranda sienelės temperatūros pikas, kanale pradeda formuotis sūkurys, suintensyviantis šilumos atidavimą nuo sienelės, ir dėl to nuo tam tikro  $x/d_e$  sienelės temperatūra sumažėja (t. y. pagerėja šilumos atidavimas nuo sienelės).

Analogiškai yra ir su sienelės temperatūra, kai  $p = 0,1$  MPa (11 pav.), tik šiuo atveju nėra temperatūros maksimumų. Taigi, kaip minėta, esant šiam oro slėgiui, praktiškai visais atvejais perėjimo ir turbulencinėje zonoje nustatyta priverstinė konvekcija, tačiau kanalo kaitinimo pradžioje išlieka gana dideli sienelės temperatūros maksimumai–minimumai net iki  $Re_{in} = 5884$ , ir tai be abejo turi įtakos šilumos atidavimo padidėjimui šioje vietoje (8 pav.).

#### 4. IŠVADOS

Atlikus eksperimentinius tyrimus plokščiam, simetriškai kaitinamame kanale pereinamojo tekėjimo zonoje mišrios konvekcijos priešingų tėkmių atveju galima padaryti tokias išvadas:

1. Gauti duomenys iš esmės keičia traktavimą apie laminarinio tekėjimo perėjimą į turbulentinį vertikaliuose kanaluose mišrios konvekcijos sąlygomis. Perėjimas į turbulentinį tekėjimą dėl sūkurinio tekėjimo susiformavimo, esant žymiam termogravitacijos jėgų poveikiui, įvyksta esant didesniems  $Re$ .

2. Šilumos atidavimas sūkurinio tekėjimo zonoje yra gerokai intensyvesnis negu esant turbulentiniam tekėjimui.

3. Sūkurinio tekėjimo atsiradimas / išnykimas sąlygoja šilumos atidavimo maksimumų / minimumų atsiradimą pagal kanalo ilgį.

### Žymėjimai

- $b$  – kanalo plotis m  
 $d_e$  – kanalo ekvivalentinis skersmuo,  $d_e = 2(h \cdot b)/(h + b)$ , m  
 $g$  – laisvo 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  
 $y$  – skersinė koordinatė m  
 $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas,  $\alpha = q_w / (T_w - T_p)$ ,  $W / (m^2 \cdot K)$   
 $\beta$  – 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 – pirma sienelė  
 2 – antra sienelė  
 $in$  – įtekėjime  
 $w$  – ant sienelės

Gauta 2007 02 20

Priimta 2007 09 21

### Literatūra

- Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J. Effects of natural convection on transition to turbulence in vertical pipes // Canadian J. Chemical Engineering. 1960. Vol. 38. P. 67–73.
- Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Стригин Б. К. Исследование теплообмена в трубах при вязкостно-гравитационном течении. Москва: Энергия, 1968. Т. 1. 607 с.
- Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 470 с.
- Hallman T. M. Combined forced and free laminar convection in vertical tubes with uniform internal heat generation // Trans. ASME. Ser. C. 1956. Vol. 78. No. 8. P. 1831–1841.
- 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.
- Sirvydas A., Poškas R. Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse. 1. Laminarinė mišri konvekcija bei perėjimas į sūkurinį tekėjimą esant simetriniam dvipusiam kaitinimui // Energetika. 2005. Nr. 3. P. 10–16.
- Sirvydas A., Poškas R. Šilumos atidavimo skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale mišrios konvekcijos atveju priešingų krypčių tėkmėse. 2. Sūkurinis tekėjimas esant simetriniam dvipusiam kaitinimui // Energetika. 2006. Nr. 1. P. 9–15.
- Poškas R., Poškas P., Kolesnikovas J. Šilumos atidavimo vertikaliame plokščiaame kanale turbulentinės mišrios konvekcijos atveju, esant priešingų krypčių srautams bei vienpusiam kaitinimui, eksperimentinis tyrimas // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 53–60.
- Poškas P., Poškas R. Mišrios konvekcijos tyrimai kanaluose // Energetika. 2006. Nr. 4. P. 1–8.
- 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.
- Fluent 6.1 documentation // Fluent Inc., 2002.

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas, Jokūbas Kolesnikovas

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF OPPOSING MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER IN A VERTICAL FLAT CHANNEL IN THE TRANSITION REGION 1. ANALYSIS OF LOCAL HEAT TRANSFER

#### Summary

We present results of an experimental investigation of 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 an airflow ( $p = 0.1, 0.15, 0.2$  and  $0.4$  MPa) in the range  $Re$  from  $2 \cdot 10^3$  to  $5 \cdot 10^4$  and  $Gr_q$  up to  $1.5 \cdot 10^{10}$  at the limiting condition  $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ . Numerical two-dimensional simulations were performed also for the same channel and for the same conditions as in experiments using the FLUENT 6.1 code. Experimental investigations show a sharp increase in heat transfer for the air pressure of  $0.15$  MPa up to  $Re \approx 3 \cdot 10^3$ ,  $0.2$  MPa up to  $Re \approx 4 \cdot 10^3$  and  $0.4$  MPa up to  $Re \approx 8 \cdot 10^3$  in comparison to forced convection heat transfer. The numerical investigations revealed this intensification of heat transfer to be caused by the formation of vortices under the effect of buoyancy. Analysis of local heat transfer also shows that for some regimes there are regions with a vortex flow at the beginning of the heating, but due to the turbulization effect the non-vortical flow is prevailing along the channel. However, under a strong effect of buoyancy such vortices are dominating along the whole length of the channel.

**Key words:** vertical flat channel, opposing mixed convection, transition region, local heat transfer

Робертас Пошкас, Арунас Сирвидас, Йокубас Колесниковас

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛОТДАЧИ В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ  
ТЕЧЕНИЯ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В  
ПЛОСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ  
ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОВ  
1. АНАЛИЗ МЕСТНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ**

*Резюме*

В настоящей работе 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 ( $p = 0,1, 0,2$  и  $0,4$  МПа) при  $Re$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$  и  $Gr_q$  до  $1,5 \cdot 10^{10}$  для условия  $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ . Также проведено численное двухмерное моделирование для того же канала и для тех же условий, как и

в экспериментах. Для этого использована компьютерная программа FLUENT 6.1. Эксперименты показывают увеличение теплоотдачи по сравнению с вынужденной конвекцией: при давлении воздуха  $0,15$  МПа до  $Re \approx 3 \cdot 10^3$ , при давлении воздуха  $0,2$  МПа до  $Re \approx 4 \cdot 10^3$  и при давлении воздуха  $0,4$  МПа до  $Re \approx 8 \cdot 10^3$ . Численные исследования продемонстрировали, что эта интенсификация теплоотдачи обусловлена образованием вихрей под воздействием термогравитационных сил. Анализ местной теплоотдачи показал, что для некоторых режимов возможно образование вихревого течения в начале канала, но по течению вследствие турбулизации потока они могут исчезнуть и далее может преобладать безвихревое течение. Однако при сильном воздействии термогравитационных сил вихревое течение сохраняется по всей длине канала.

**Ключевые слова:** вертикальный плоский канал, противоположные направления, смешанная конвекция, переходная зона, местная теплоотдача