

Mišrios konvekcijos tyrimai kanaluose

Povilas Poškas,

Robertas Poškas

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

Šiame straipsnyje trumpai apžvelgti mišrios konvekcijos tyrimai nesudėtingos formos įvairiai orientuotuose kanaluose. Ankstesnėse apžvalgose buvo detaliai išnagrinėta turbulencinė mišri konvekcija vertikaliuose vamzdžiuose, todėl šiame darbe paminėti tiktai svarbiausi šių tyrimų rezultatai ir pateiktos nuorodos. Daugiausia dėmesio skirta šilumos atidavimo ir tėkmės hidrodinamikos mišrios konvekcijos atveju vertikaliuose kanaluose, kai yra laminarinis sūkurinis (perinamasis) oro tekėjimas, analizei. Taip pat analizuojamas šilumos atidavimas pasvirusiuose plokščiuose kanaluose, esant tiek stabiliai, tiek nestabiliai oro tankio stratifikacijai.

Raktažodžiai: šilumos mainai, mišri konvekcija kanaluose, vienkryptės tėkmės, priešingų kryptių tėkmės, oras, stabili tankio stratifikacija, nestabili tankio stratifikacija

1. ĮVADAS

Lietuvos energetikos institute (LEI) mišrios konvekcijos (kai kartu veikia natūrali ir priverstinė konvekcija) tyrimai pradėti 1981 metais Branduolinių įrenginių šilumos mainų laboratorijoje įkūrus Termohidromechanikos sektorių. Buvo sukonstruotas eksperimentinis stendas mišrios konvekcijos tyrimams tekant orui vertikaliuose vamzdžiuose esant didelėms šiluminėms apkrovoms (temperatūros faktoriaus įtakos tyrimui). Lygiagrečiai, bendradarbiaujant su Maskvos Aukštų temperatūrų institutu, pradėti ir skaitiniai tyrimai.

Vertikaliuose kanaluose (vamzdžiuose) galima išskirti du būdingus tekėjimo atvejus:

1. Kai tėkmės priverstinio tekėjimo ir termogravitacijos jėgų vektoriaus kryptys yra priešingos – **priešingų kryptių tėkmės** (šildomo skysčio tekėjimas žemyn arba aušinamo skysčio tekėjimas aukštyn);

2. Kai tėkmės priverstinio tekėjimo ir termogravitacijos jėgų vektoriaus kryptys sutampa – **vienkryptės tėkmės** (šildomo skysčio tekėjimas aukštyn arba šaldomo skysčio tekėjimas žemyn).

Pirmuoju atveju fluideo greitis prie sienelės sumažėja, o tekėjimo branduolyje – padidėja, palyginus su priverstiniu tekėjimu. Tačiau dėl to, kad turbulencinės tėkmės atveju gerokai išauga turbulencinis pernešimas, šilumos atidavimas padidėja, palyginus su šilumos atidavimu priverstinės konvekcijos atveju.

Antruoju atveju, kai priverstinio tekėjimo ir termogravitacijos jėgų vektoriaus kryptys sutampa, tėkmės greitis prie sienelės padidėja, o vamzdžio centre – sumažėja, palyginus su priverstinės konvekcijos atveju. Susidaro vadinamasis „M formos“ greičio profilis. Šiuo atveju, esant turbulenciniam tekėjimui ir didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui, iš pradžių šilumos atidavimas sumažėja, o paskui netgi viršija šilumos atidavimą esant priverstinei

konvekcijai, nes kinta ne tik greičio profilis, bet ir turbulencinis pernešimas.

Horizontaliuose kanaluose turbulenciniam pernešimui ir šilumos atidavimui kanale didelės įtakos turi oro tankio stratifikacija. Atsižvelgus į tai, kuri kanalo sienelė yra kaitinama, turime stabilią oro tankio stratifikaciją (kaitinama viršutinė kanalo sienelė) arba nestabilią oro tankio stratifikaciją (kaitinama apatinė kanalo sienelė). Nestabili oro tankio stratifikacija – tai tokia stratifikacija, kuri palaiko ar sustiprina kylantį oro judėjimą ir dėl to padidėja šilumos mainai, konvekcija. Ji papildomai turbulizuoja srautą dėl Archimedo jėgų poveikio kylant lengvesnėms oro dalelėms į viršų. Dėl to suintensyveja turbulencinis impulso ir šilumos pernešimas. Tuo tarpu esant stabiliai oro tankio stratifikacijai, turbulenciškumo generacija sumažėja, greičio profilis darosi panašus į laminarinės tėkmės profilį, o greičio pulsacijos labai sumažėja. Dėl to, esant stabiliai oro tankio stratifikacijai, šilumos atidavimas sumažėja.

Pasvirusiuose kanaluose turbulenciniam pernešimui ir šilumos atidavimui kanale didelės įtakos turi tiek oro tankio stratifikacija, tiek priverstinė tėkmės kryptis (vienkryptės ar priešingų kryptių mišrios konvekcijos tėkmės). Esant mažesniems polinkio kampams nuo horizontalios padėties didesnės įtakos turbulenciniam pernešimui ir šilumos atidavimui turės stratifikacijos poveikis, o esant didesniems polinkio kampams nuo horizontalios padėties (netoli vertikalios padėties) didesnės įtakos turbulenciniam pernešimui ir šilumos atidavimui turės priverstinės tėkmės kryptis.

2. VERTIKALŪS KANALAI

2.1. Mišri konvekcija vertikaliuose vamzdžiuose

Termogravitacijos jėgų poveikiui turbulenciniuose srautuose išaiškinti atlikta nemažai eksperimentinių ir skaitinių tyrimų, kurių dauguma atlikta vertikaliuose vamzdžiuose. Monografijoje [1] pateikti išsamūs mišrios

konvekcijos tyrimų rezultatai, esant įvairiems tekėjimo režimams bei įvairioms tekėjimo sąlygoms, gauti Maskvos Aukštųjų technologijų universitete. Platus termogravitacijos jėgų poveikio šilumos mainams tyrimai vykdomi Mančesterio universitete, o apibendrinimai pateikti darbuose [2, 3], kuriuose analizuojami tiek originaliųjų tyrimų rezultatai, tiek kitų autorių duomenys, gauti tekant įvairiems fluidams, esant įprastiniam jų slėgiui bei virškritiniams parametrams.

Lietuvos energetikos institute vertikaliuose vamzdžiuose atlikti tyrimai yra apibendrinti [4–8]. Galima pažymėti, kad pirmą kartą buvo gauti duomenys apie vietinį šilumos atidavimą pagal vamzdžio ilgį vienkryptėse tėkmėse esant įvairioms šiluminėms apkrovoms. Parodyta, jog pagal vamzdžio ilgį ir tekant dujiniam šilumos nešėjui (orui) stebimi būdingi šilumos atidavimo minimumai ir maksimumai. Tolesnių tyrimų rezultatai vertikaliuose vamzdžiuose esant vienkryptėms tėkmėms apibendrinti [6, 9, 10], kuriuose parodyta, jog įvairiose publikacijose šilumos atidavimui skaičiuoti yra pasiūlyta keletas priklausomybių, tačiau, remiantis jomis, šilumos atidavimo minimumo padėtis gaunama labai skirtinga. Ir tikrai LEI darbuose buvo parodyta, kad šilumos atidavimo minimumo padėtis labai priklauso nuo atstumo nuo kaitinimo pradžios x/d . Termogravitacijos parametro Bo reikšmė, kuri atitinka šilumos atidavimo minimumą, buvo pavadinta kritine jo reikšme, arba kritiniu termogravitacijos parametru Bo_{cr} . Šiam kritiniam parametru apskaičiuoti, atsižvelgiant į atstumą x/d , buvo pasiūlyta atitinkama priklausomybė.

Be to, LEI atlikus eksperimentus vertikaliuose vamzdžiuose esant įvairiems oro slėgiams, nustatyta, kad apibendrinant duomenis, šilumos mainų mažėjimo (iki Bo_{cr}) ir didėjimo (daugiau už Bo_{cr}) srityse reikia naudoti skirtingus termogravitacijos parametrus. Šilumos atidavimo mažėjimo srityje gerai tinka termogravitacijos parametras $Bo = Gr_q/Re^{3,425}Pr^{0,8}$, o šilumos mainų didėjimo srityje (daugiau už Bo_{cr}) – termogravitacijos parametras $K = Gr_q/4Re^3Pr$. Rekomenduojamos priklausomybės šilumos atidavimui skaičiuoti esant turbulenciniam tekėjimui pateiktos [6].

Turbulencinio impulso ir šilumos pernešimo kitimo dėsninėjimai pagal vamzdžio ilgį tiek režimams su monotoniu šilumos atidavimo kitimu, tiek režimams su būdingais šilumos atidavimo minimumais ir maksimumais buvo apibendrinti darbe [7].

Laminarinė mišri konvekcija įvairios formos kanaluose esant pastovioms šilumnešio fizikinėms savybėms išnagrinėta gana išsamiai, nes šiomis sąlygomis galima gana 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 yra pateikiama labai nedaug ir jie nėra išsamūs. Darbuose [11–13] tirtas tėkmės nestabilumas vamzdžyje, į jo centrinę dalį įpurškiant dažus ir stebint tėkmę vizualiai. Kai tėkmės priešingų krypčių ir $q_w = \text{const}$ pirmasis tėkmės nestabilumas susidarė dažų siūleliui parodžius nežymią tėk-

mės asimetriją prieš pat kaitinamą kanalo dalį. Gerokai padidinus termogravitacijos jėgų įtaką, buvo pastebėta, kad tėkmė pradeda trūkėti.

Darbuose [14, 15] pabrėžiama, jog persilenkimo taškų atsiradimas greičio profiliuose ir ypač atgalinio tekėjimo atsiradimas skatina laminarinio tekėjimo stabilumo praradimą ir perėjimą prie turbulencinio tekėjimo. Tokiu atveju perėjimas iš laminarinio tekėjimo į turbulencinį įvyksta, kai $Re < 2300$ (t. y. nepasiekus kritinio Re skaičiaus įprastinėmis sąlygomis). Literatūroje yra suformuluota nuomonė, jog mišrios konvekcijos atveju perėjimas iš laminarinio į turbulencinį tekėjimą įvyksta staiga, kaip ir priverstinės konvekcijos atveju. Darbe [14] pasiūlyta priklausomybė, kuri, esant vienkryptėms tėkmėms vamzdžyje, įgalina nustatyti nedimensinį atstumą nuo kanalo, kuriame laminarinis tekėjimas praranda stabilumą, kaitinimo pradžios:

$$X_{cr} = 12,9 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{-0,8} \quad (1)$$

Ši formulė galioja, kai $300 < Re \leq 2 \cdot 10^3$, $0,6 < Pr < 10$.

Šilumos atidavimui skaičiuoti laminarinės mišrios konvekcijos atveju esant vienkryptėms tėkmėms, kai $250 < Re \leq 2 \cdot 10^3$, $0,6 < Pr < 10$ ir $Gr_q/Re < 2,6 \cdot 10^4$, pasiūlyta priklausomybė [14]:

$$\frac{Nu}{Nu_l} = \left(1 + \frac{Gr_q}{Re \cdot B} \right)^{0,27} \quad (2)$$

čia B – dydis, priklausantis nuo parametro X :

$$B = 5,4 \cdot X^{-1} + 312 \cdot X^{1/4}, \text{ kai } X \leq 0,07,$$

$$B = 240, \text{ kai } X > 0,07.$$

Jei (2) formulėje, kai $X > 0,07$, atimestume vienetą kaip mažą dydį, tai ji taptų Holmano [16] priklausomybe stabilizuotam šilumos atidavimui skaičiuoti:

$$Nu = 1,45 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{0,27} \quad (3)$$

Darbe [17] tyrimai vykdyti tekant vandeniui iš viršaus žemyn vertikaliu vamzdžiu ($x/d \approx 70$), kai $q_w = \text{const}$ ir $Re < 2000$. Gauta, kad esant nedideliame šilumos srautui (kaitinimui) ant sienelės dėl termogravitacijos jėgų poveikio tam tikrame atstume nuo kaitinimo pradžios stebimas šilumos atidavimo sumažėjimas, palyginus su priverstine konvekcija, o tai dėsninga esant laminariniam tekėjimui. Tačiau, kai šilumos srautas buvo didesnis (tuo pačiu padidėja ir termogravitacijos jėgų poveikis), o $Re = 500\text{--}800$, pastebėtas šilumos atidavimo suintensyvėjimas, sąlygojamas greičio fluktuacijų, atsiradusių dėl tėkmės nestabilumo, kurį sukelia stiprus termogravitacinės jėgos poveikis. Greičio profilyje prie sienelės atsirado įlinkio taškai, t. y. priešingos kryties tekėjimas prie sienelės, todėl suintensyvėjo šilumos atidavimas.

Pereinamojo tekėjimo režimas kaitinimo vamzdžio pradžioje eksperimentiškai nagrinėtas darbe [18]. Čia pabrėž-

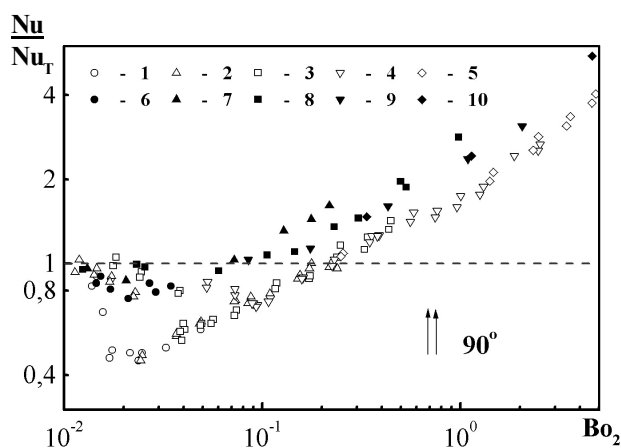
ta, kad tėkmės judėjimas vertikaliame kanale esant priešingoms natūralios ir priverstinės konvekcijos kryptims iš prigimties yra nestabilus. Autoriai nustatė, kad kaitinimo pradžioje prie kanalo sienelių susidaro sūkūriai, kurie sukelia kanalo sienelės temperatūros fluktuacijas.

2.2. Mišri konvekcija vertikaliuose plokščiuose kanaluose

2.2.1. Vienkryptės tėkmės

Įvairių autorių atliktų tyrimų (iki 1998 m.) turbulencinės mišrios konvekcijos atveju vertikaliuose kanaluose esant vienkryptėms tėkmėms apžvalga yra pateikta [6]. Tačiau po to jau pasirodė daugelis naujų publikacijų.

LEI, atlikus tyrimus gana didelių gabaritų vertikaliame plokščiuame kanale oro sraute esant vienkryptėms tėkmėms, kai yra dvipusis simetriškas kaitinimas, nustatyta [19], kad, kaip ir vertikaliuose vamzdžiuose, apibendrinant duomenis šilumos mainų mažėjimo ir didėjimo srityse reikia naudoti skirtingus termogravitacijos parametrus. Šilumos mainų mažėjimo srityje plokščiuose kanaluose, kaip ir vamzdžiuose, tinka termogravitacijos parametras $Bo = Gr_q/Re^{3,425}Pr^{0,8}$, tačiau šilumos mainų didėjimo srityje plokščiuame kanale duomenys esant įvairiems oro slėgiams geriausiai koreliuoja naudojant parametą $Bo_2 = Gr_q/Re^{2,5}Pr^{0,5}$. Taip pat parodyta, kad vertikaliuose plokščiuose kanaluose, esant vienakryptėms tėkmėms, kaip ir vertikaliuose vamzdžiuose, stebimi įvairūs šilumos kitimo pagal jų ilgį režimai. Nustatyta, kad esant vienpusiam kaitinimui šilumos atidavimas sumažėja kur kas mažiau negu dvipusio kaitinimo atveju (1 pav.).



1 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$), kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys sutampa. 1–5 – dvipusio kaitinimo atveju: 1 – p = 0,1, 2 – 0,2, 3 – 0,4, 4 – 0,7, 5 – 1,0 MPa. 6–9 – vienpusio kaitinimo atveju: 6 – p = 0,1, 7 – 0,4, 8 – 0,7, 9 – 1,0 MPa [20]

Darbe [20] buvo pasiūlytos priklausomybės santykiui šilumos atidavimui apskaičiuoti jo mažėjimo srityje ($Bo < Bo_{cr}$) plokščio vertikalaus kanalo atveju esant vienpusiam ir dvipusiam kaitinimui

$$Nu / Nu_T = 1 - (x/d_e - 4)Bo^{2,53} \cdot 10^{12} \cdot c_1, \quad (4)$$

kai $x/d_e > 50$, $c_1 = 0,8$ – vienpusis kaitinimas, $c_1 = 1,0$ – dvipusis kaitinimas;

bei šilumos mainų didėjimo srityje

$$Nu / Nu_T = 1,74 \cdot Bo_2^{0,36} \cdot c_2, \quad (5)$$

kai $x/d_e > 30$, $Bo_{2cr} < Bo_2 < 0,3$, $c_1 = 1,4$ – vienpusis kaitinimas, $c_1 = 1,0$ – dvipusis kaitinimas.

Darbe [21] buvo atlikti srauto struktūros tyrimai vertikaliame plokščiuame kanale, kurio aukštis ir pločio santykis 1 : 7,65 (aukštis – 80 mm, plotis – 612 mm), o ilgis – 4000 mm. Kaitinta vienos sienelės dalis (2500 mm), paliekant nekaitinamus galus. Aplinkos oras buvo tiekiamas iš apačios į viršų, kai $Re = 7000 - 44000$, o $Gr = 3 \cdot 10^8 - 9 \cdot 10^9$. Srauto struktūros tyrimams buvo naudotas dvikomponentis lazerinis Dopplerio anemometras. Tyrimai buvo atliekami viename skerspjūvyje, kai $x/d_e = 12,5$. Nagrinėtas greičio profilių, tėkmės pulsacijų charakteristikų kitimas esant įvairioms Re ir termogravitacijos parametro reikšmėms ($Re = 43380$, $Gr = 2,88 \cdot 10^9$, $Bo = 4,13 \cdot 10^{-7}$, $Bo_2 \approx 0,008$; $Re = 19150$, $Gr = 4,07 \cdot 10^9$, $Bo = 9,72 \cdot 10^{-6}$, $Bo_2 \approx 0,091$; $Re = 10160$, $Gr = 1,5 \cdot 10^9$, $Bo = 3,11 \cdot 10^{-5}$, $Bo_2 \approx 0,162$; $Re = 9560$, $Gr = 3,18 \cdot 10^9$, $Bo = 8,06 \cdot 10^{-5}$, $Bo_2 \approx 0,396$). Mažėjant Re skaičiui didėjo greičių profilių asimetrija izoterminės tėkmės atžvilgiu. Taip pat visais atvejais prie kaitinamos sienelės buvo stebimas išilginių $\sqrt{u_x^2}$ ir skersinių $\sqrt{u_y^2}$ greičio pulsacijų bei Reinoldso įtempimų $u_x u_y$ padidėjimas, palyginus su izoterminėse tėkmėse, tiksliai esant didžiausioms Re termogravitacijos jėgoms poveikis buvo labai nežymus, todėl kreivės sutapo su izoterminės tėkmės kreivėmis.

Reikia pažymėti srauto struktūros tyrimus [3, 22] vertikaliame žiediniame kanale ($d_1/d_2 = 0,54$). Eksperimentiniai tyrimai atlikti, kai $Re = 1500 - 20000$, o $Gr = 2 \cdot 10^8 - 1,7 \cdot 10^9$ vandeniui tekant iš apačios į viršų (aukštis – 5 m, kaitinama dalis 3 m (viršus ir apačia nekaitinama), išorinio vamzdžio vidinis skersmuo – $d_2 = 140$ mm, vidinio vamzdžio išorinis skersmuo $d_1 = 76$ mm, o sienelės storis – 1,6 mm). Kaitintas buvo vidinis paviršius (vidinis vamzdis), tuo tarpu išorinis paviršius buvo adiabatinis. Srauto struktūros tyrimams naudotas dvikomponentis lazerinis Dopplerio anemometras. Išnagrinėtas tiek greičio profilių, tiek tėkmės pulsacijų charakteristikų kitimas esant įvairioms Re ir termogravitacijos parametro reikšmėms. Darbe [22] tyrimai buvo atlikti esant 4 režimams: 1) $Re = 12000$, $Bo = 3,5 \cdot 10^{-6}$, $Bo_2 \approx 0,014$; 2) $Re = 8500$, $Bo = 4,89 \cdot 10^{-6}$, $Bo_2 \approx 0,014$; 3) $Re = 8500$, $Bo = 1,22 \cdot 10^{-5}$, $Bo_2 \approx 0,036$; 4) $Re = 2000$, $Bo = 1,54 \cdot 10^{-3}$, $Bo_2 \approx 1,17$, tuo tarpu darbe [3] esant kitokiems režimams: 1) $Re = 11800$, $Gr = 6,12 \cdot 10^8$, $Bo = 1,49 \cdot 10^{-6}$, $Bo_2 \approx 0,006$; 2) $Re = 4090$, $Gr = 1,89 \cdot 10^9$, $Bo = 1,59 \cdot 10^{-4}$, $Bo_2 \approx 0,232$. Visais atvejais prie kaitinamos sienelės buvo stebimas išilginių $\sqrt{u_x^2}$ ir skersinių $\sqrt{u_y^2}$ greičio pulsacijų bei Reinoldso įtempimų $u_x u_y$ padidėjimas, palyginus su izoterminėse tėkmėse. Taip pat mažėjant Re skaičiui didėjo greičio profilių asimetrija izoterminės tėkmės atžvilgiu.

Duomenys, gauti darbuose [3, 21, 22], papildo anksčiau atliktus gana detalius mišrios konvekcijos turbulencinio pernešimo tyrimus vamzdyje esant vienkryptėms tėkmėms [1, 7] bei išryškina ypatumus, kurie būdingi vienpusio kaitinimo atveju.

LEI neseniai atlikti skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale laminarinio-sūkurinio (pereinamojo) tekėjimo zonoje. Šilumos atidavimas nagrinėtas simetrinio kaitinimo atveju esant vienkryptėms tėkmėms. Atliktas dvimatis nestacionarus skaitinis modeliavimas programa FLUENT esant 0,2 MPa oro slėgiui, Reinoldso skaičiui $Re_{in} = 2,016 \cdot 10^3$ ir Grashofo skaičiui $Gr_{qm} = 3,9 \cdot 10^8$ (nestacionariam tekėjimo režimui perėjus į stacionarų) parodė, kad galima išskirti tris būdingas tekėjimo zonas pagal kanalo ilgį. Pirmoje zonoje dėl termogravitacijos jėgų poveikio parabolinis greičio tėkmės profilis deformuojasi į „M formos“ profilį. Ši zona – stabilus tekėjimo. Esant anksčiau nurodytiems tekėjimo parametrų ji kinta iki $x/d_e = 8$. Zona su priešingos krypties tekėjimu, atsiradusiu kanalo centre, formuojasi intervale $x/d_e = 8-10$. Toliau seka nestabilus sūkurinio tekėjimo zona. Šioje zonoje sienelės temperatūra ir Nuselto skaičius įgyja pulsuojantį pobūdį. Skaitinių tyrimų šilumos mainų rezultatai palyginti su LEI eksperimentiniais duomenimis ir rodo gerą sutapimą (maksimalus skirtumas tarp eksperimentų ir skaitinio modeliavimo yra ne didesnis kaip 4%) kanalo pradžioje, t. y. stabilus laminarinio tekėjimo zonoje, ir neblogą sutapimą (maksimalus skirtumas ne didesnis kaip 12%) recirkuliacinėje tekėjimo zonoje (2 pav.).

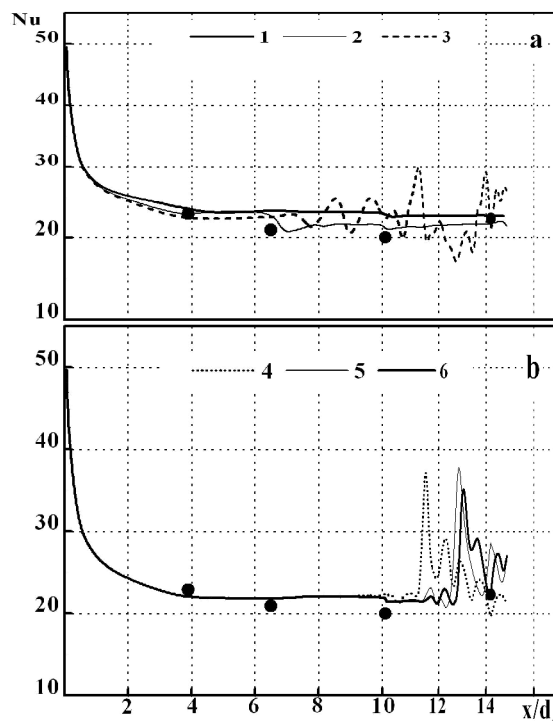
2.2.3. Priešingų kryptių tėkmės

Esant priešingų kryptių tėkmėms, kaip jau minėta, šilumos mainai monotoniškai didėja (3 pav.). Čia duomenys esant įvairiems oro slėgiams bei vienpusiam kaitinimui, taip pat, kaip ir esant vienkryptėms tėkmėms, šilumos mainų didėjimo srityje, geriausiai koreliuoja naudojant parametru $Bo_2 = Gr_q/Re^{2,5}Pr^{0,5}$. Pagal kanalo ilgį esant pakankamai žyriam termogravitacijos jėgų poveikiui ($Bo_2 > 0,7$) stebimi būdingi šilumos atidavimo minimumai ir maksimumai. Atlikus tyrimus buvo pasiūlytos priklausomybės šilumos atidavimui skaičiuoti vertikalaus kanalo stabilizuotoje dalyje:

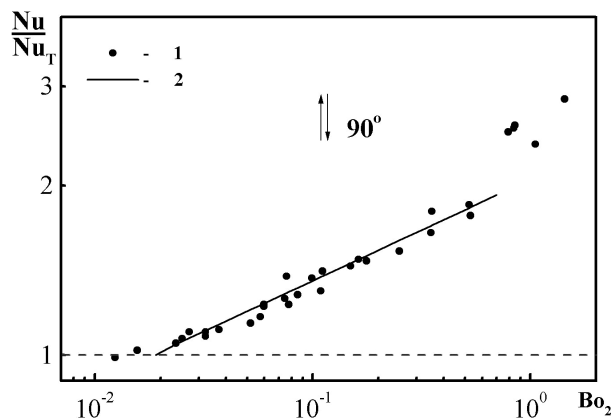
$$\frac{Nu}{Nu_T} = 2,05Bo_2^{0,18}, \quad (6)$$

kai $Bo_{2rib} \leq Bo_2 \leq 0,7$.

LEI neseniai atlikti eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiam kanale laminarinio-sūkurinio (pereinamojo) tekėjimo zonoje. Šilumos atidavimas nagrinėtas simetrinio kaitinimo atveju. Skaitinio modeliavimo rezultatai naudojant kompiuterinę programą FLUENT parodė, jog didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui prie kanalo sienelių susiformuoja nestacionarios cirkuliacinės tėkmės, išsidėsčiusios šachmatine tvarka pagal kanalo ilgį, o tai sukelia greičio profilių nesimetriškumą bei sienelės temperatūros pulsacijas (4 pav.). Didėjant termogravitacijos jėgų poveikiui tėkmė pradeda atitrūkti nuo kanalo siene-



2 pav. Šilumos atidavimo kitimo priklausomybė nuo x/d_e skirtingais laiko momentais: 1 – $t = 1,6725$ s, $Bo_{in} = 2,21 \times 10^5$; 2 – 2,066 s, $Bo_{in} = 2,09 \times 10^5$; 3 – 2,6563 s, $Bo_{in} = 2,01 \times 10^5$; 4 – 5,5113 s, $Bo_{in} = 1,98 \times 10^5$; 5 – 11,168 s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$; 6 – 18,301 s, $Bo_{in} = 1,94 \times 10^5$. Juodi taškai – LEI eksperimento duomenys [23]



3 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 – eksperimentiniai duomenys, 2 – pagal (6) priklausomybę [24]

lių. Šiam kritiniam atstumui skaičiuoti pasiūlytos apibendrinančios priklausomybės:

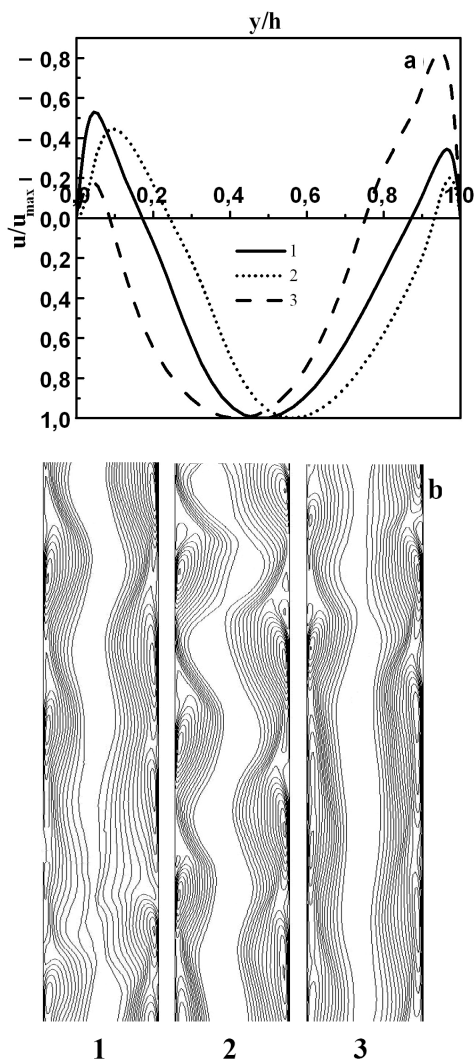
$$(x/d_e)_{cr1} = 15,5 \cdot 10^3 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{-0,86}, \quad (7)$$

kai $1490 \leq Re \leq 4310$, $950 < Gr_q/Re \leq 3000$ ir $x/d_e \geq 15$;

$$X_{cr1} = 16 \cdot 10^2 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{-1,5}, \quad (8)$$

kai $1490 \leq Re \leq 4310$, $3000 < Gr_q/Re \leq 14 \cdot 10^4$ ir $x/d_e < 15$.

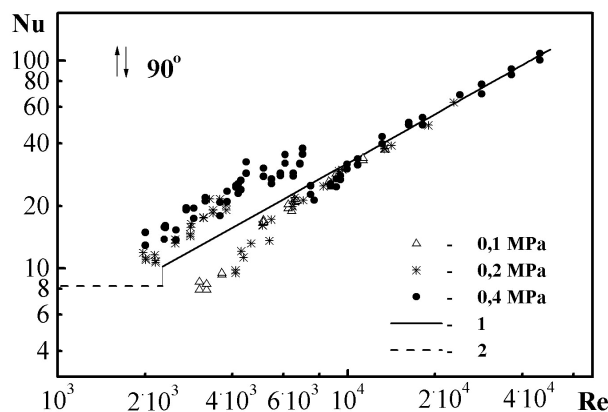
Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad kanale vyraujant sūkuriniam tekėjimui šilumos atidavimas yra intensyvesnis nei esant turbulenciniam tekėjimui (5 pav.). Kaip



4 pav. Greičių profilių (a) (skerspjūvyje $x/d_e = 25,7$) ir tėkmės struktūros (b) kitimas vertikaliame plokščiaame kanale (tarp skerspjūvių $x/d_e = 24$ ir $x/d_e = 28$) priklausomai nuo laiko momento t , kai $Bo_{2in} = 9,980$ ir $Re_{in} = 2130$: 1 – $t = 40,8$ s; 2 – $t = 41,36$ s; 3 – $t = 42,6$ s [25]

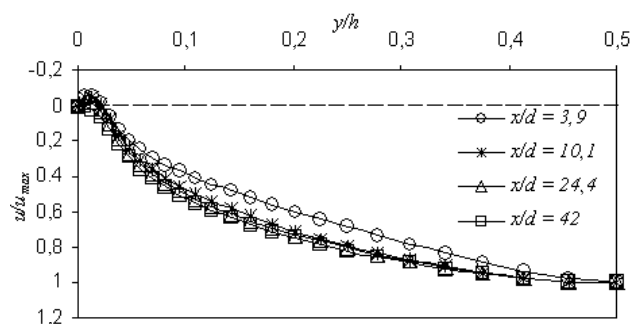
matyti 5 paveiksle, šilumos atidavimo intensyvumas iki $Re = 8000$ labai priklauso nuo oro slėgio. Kuo didesnis oro slėgis (didesnis Gr_q), tuo intensyvesnis šilumos atidavimas mažų Re srityje. Atsižvelgiant į duomenis esant 0,1 MPa, galima teigti, kad dėl oro sklاندus įtekėjimo į kanalą perėjimas iš laminarinio į turbulencinį tekėjimą yra persislinkęs, kai $Re = 4000$. Esant 0,2 ir 0,4 MPa slėgiui, duomenys mažų Re zonoje yra išsidėstę aukščiau priverstinės konvekcijos kreivės, tačiau padidėjus Re , esant tam tikrai jo reikšmei, yra stebimas gana staigus šilumos atidavimo sumažėjimas (esant 0,2 MPa – kai $Re \approx 4000$; esant 0,4 MPa – kai $Re \approx 8000$), kuris didėjant slėgiui atsiranda esant didesniems Re . Iš to galima spręsti, kad pasikeičia srauto tekėjimo pobūdis kanale, t. y. šis šilumos atidavimo

sumažėjimas, galima sakyti, yra atskaitos taškas, nuo kurio mažėjant Re prasideda nestabilus tekėjimas (atsiranda sūkuriai). Panašūs rezultatai gauti [26] nagrinėjant šilumos atidavimą, kai $T_w = const$. Čia aiškinama, kad tokie reiškiniai esant mažiems Re galimi tik esant sąlygai $T_w = const$, dėl šilumos atidavimo ypatumų, nes esant sąlygai $T_w = const$ temperatūrų skirtumas išilgai kanalo pamažu mažėja. Taip pat pabrėžiama, kad tokių reiškinių negali būti esant sąlygai $q_w = const$, nes temperatūrų skirtumas išlieka pakankamai didelis. Tačiau duomenys, pateikti 5 paveiksle, paneigia minėtas prielaidas.



5 pav. Šilumos atidavimo priklausomybė nuo Re stabilizuotoje vertikalaus plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) dvipusio kaitinimo atveju: 1 – turbulencinė priverstinė konvekcija; 2 – laminarinė priverstinė konvekcija [27]

LEI taip pat buvo atlikti turbulencinės mišrios konvekcijos skaitiniai tyrimai naudojant kompiuterinę programą FLUENT ([28]) esant simetriniam kaitinimui. Gauti rezultatai parodė, jog esant dideliame termogravitacijos jėgų poveikiui ir turbulencinio tekėjimo atveju yra galimas tėkmės atitrūkimas nuo kaitinamos sienelės (6 pav.). Dėl to susiformuoja cirkuliacinis tekėjimas kanale, kai prie kaitinamos sienelės oro tėkmė yra nukreipta aukštyn, o likusioje kanalo skerspjūvio dalyje – žemyn. Tai patvirtina eksperimentiniai greičio profilių matavimo rezultatai [3, 21, 22], kurie parodo, jog tokie režimai gali egzistuoti. Eksperimentiniai tyrimai atlikti, kai Re ir Gr_q skaičiai įvairūs. Mažėjant Re skaičiui stebima didėjanti greičių profilių asimetrija izoterminės tėkmės atžvilgiu. Kai $Re = 2000$ ([22]) ir nėra kaitinimo, greičio profilis yra laminarinis.



6 pav. Greičio profilis skirtinguose skerspjūviuose: $Re_{in} = 6251$, $Bo_{2in} = 1,66$ [29]

Tačiau pradėjus kaitinti vaizdas labai pasikeičia dėl termogravitacijos jėgų poveikio. Prie kaitinamos sienelės yra stebimas tėkmės krypties pokytis, t. y. įvyksta vietinis tėkmės atitrūkimas nuo sienelės. Išmatuotos greičio fluktuacijos ir tangentiniai įtempimai yra dideli ir net didesni nei izoterminiu atveju, kai $Re = 8500$.

Šilumos atidavimo tyrimai vertikaliuose žiediniuose kanaluose mišrios konvekcijos atveju jau buvo išnagrinėti [6], todėl šiame straipsnyje to neaprašinsime.

3. PASVIRĘ KANALAI

3.1. Vienkryptės tėkmės

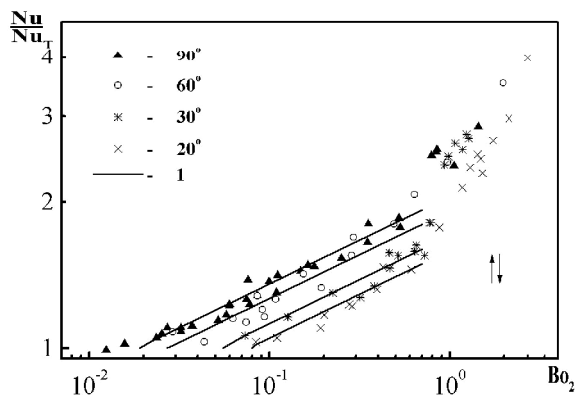
LEI atlikti vietinio šilumos atidavimo tyrimai pasvirusiuose plokščiuose kanaluose [20, 30–32]. Parodyta, kad, vienkryptėse tėkmėse, esant dvipusiam kaitinimui ir stabiliai tankio stratifikacijai, maksimalus šilumos atidavimo sumažėjimas nepriklauso nuo plokščio kanalo orientacijos, bet kritinis termogravitacijos parametras yra glaudžiai susijęs su polinkio kampu. Esant nestabiliai tankio stratifikacijai, santykinis šilumos atidavimas mažai priklauso nuo polinkio kampo, kol jis kinta tarp 0 ir 60°. Detali šių tyrimų pasvirusiuose plokščiuose kanaluose esant vienkryptėms tėkmėms apžvalga yra pateikta [6].

Mažų Re srityje galima paminėti darbą [33], kuriame vidutinio šilumos atidavimo nuo viršutinės arba apatinės sienelės tyrimai esant vienkryptėms tėkmėms atlikti labai trumpame kanale ($L/d_e = 5$), kai $Re < 3000$. Čia buvo gautas šilumos mainų padidėjimas, palyginus su priverstine konvekcija.

3.2. Priešingų kryptių tėkmės

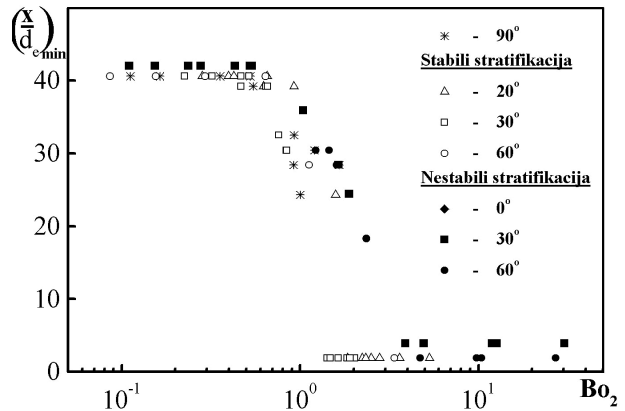
Nustatyta, kad esant priešingų kryptių tėkmėms kaitinant viršutinę kanalo sienelę ir mažėjant kanalo polinkio kampui (nuo 90° iki 20°), šilumos mainų intensyvumas mažėja ir tai susiję su stiprėjančiu stabilios tankio stratifikacijos poveikiu (7 pav.).

Kaip matyti 7 paveiksle, yra stebimas šilumos atidavimo pobūdžio pokytis, kai $Bo_2 \geq 0,7$. Kai $Bo_2 \geq 0,7$, pagal kanalo ilgį atsiranda šilumos atidavimo vietiniai



7 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 stabilizuotoje plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) esant stabiliai stratifikacijai, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos. 1 – pagal (9) priklausomybę [31]

minimumai ir maksimumai. Kaip minėta pirmiau, toks šilumos mainų pokytis yra sąlygojamas vietinio srauto atitrūkimo nuo kanalo sienelės dėl termogravitacijos jėgų poveikio. Be to, yra stebima tendencija, kad esant nestabiliai oro tankio stratifikacijai tėkmė atitrūksta, kai yra didesni Bo_2 , negu esant stabiliai oro tankio stratifikacijai (8 pav.).



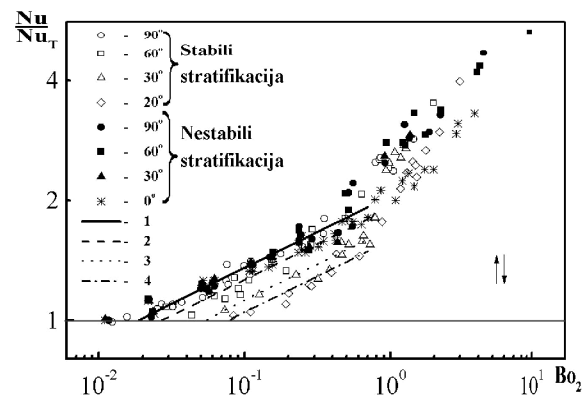
8 pav. Minimalaus šilumos atidavimo taško padėties priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 [31]

Šilumos atidavimui pasvirusiuose plokščiuose kanaluose ($\varphi = 20^\circ - 90^\circ$) skaičiuoti stabilios stratifikacijos atveju pasiūlyta apibendrinanti priklausomybė [31]:

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

kuri galioja, kai $Bo_{2,rib} \leq Bo_2 \leq 0,7$.

Kai yra kaitinama apatinė kanalo sienelė, kitaip nei stabilios stratifikacijos atveju, kanalo pasvirimo kampo kitimas ($\varphi = 60^\circ, 30^\circ$) praktiškai neturi įtakos (iki $Bo_2 = 0,7$) šilumos atidavimo intensyvumui, todėl šilumos mainus galima skaičiuoti naudojant (9) priklausomybę, kai $\varphi = 90^\circ$, t. y. vertikaliai kanalui (9 pav.). Kai $Bo_2 > 0,7$, šilumos atidavimo pobūdis pasikeičia prie visų kanalo pasvirimo kampų, išskyrus horizontalų kanalą, kuriame



9 pav. Santykinio šilumos atidavimo priklausomybė nuo termogravitacijos parametro Bo_2 stabilizuotoje pasvirusio plokščio kanalo dalyje ($x/d_e = 42$) esant vienpusiam kaitinimui, kai natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys yra priešingos. 1–4 – pagal (9) priklausomybę [34]

šis pokytis pasireiškia esant didesniai termogravitacijos parametru (Bo_2) . Tai reiškia, kad horizontaliame kanale tėkmė neatitrūksta nuo sienelės ir mūsų duomenys rodo, kad (9) priklausomybė gali būti pratęsta iki $Bo_2 \approx 2$. Kai $Bo_2 \geq 2$, santykinio šilumos atidavimo (Nu/Nu_0) priklausomybė nuo Bo_2 taip pat kinta horizontaliame kanale, bet šis pokytis yra, matyt, susijęs su perėjimu į natūralią konvekciją.

4. IŠVADOS

Atlikus pastarųjų metų šilumos atidavimo ir srauto struktūros kanaluose mišrios konvekcijos atveju tyrimų apžvalgą, galima padaryti šias išvadas:

1. Vienkryptėse mišrios konvekcijos tėkmėse termogravitacijos jėgų laminarizuojantis poveikis yra maksimalus, kai šiluma atiduodama pagal visą kanalo ilgį. Yra gautos apibendrinančios priklausomybės šilumos atidavimui skaičiuoti dviem ribiniams atvejams: vienpusiam ir dvipusiam simetriškam kaitinimui vertikaliuose plokščiuose kanaluose.

2. Neseniai vertikaliuose kanaluose atlikti eksperimentiniai mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėse turbulencinės struktūros tyrimai kartu su esamais ir neseniai atliktais turbulencinės struktūros tyrimais vienkryptėse tėkmėse leidžia suprasti ir paaiškinti šilumos pernešimo mechanizmą turbulencinės mišrios konvekcijos atveju vertikaliuose kanaluose.

3. Nauji šilumos atidavimo ir tėkmės hidrodinamikos tyrimo duomenys iš esmės keičia supratimą apie laminarinio tekėjimo perėjimą į turbulencinį vertikaliuose kanaluose mišrios konvekcijos sąlygomis.

4. Tyrimai plokščiam pasvirusiam kanale, esant mišrios konvekcijos priešingų kryptų tėkmėms, parodė, jog stabilios oro tankio stratifikacijos poveikis šilumos atidavimo intensyvumui labai priklauso nuo kanalo polinkio kampo, tuo tarpu nestabilios oro tankio stratifikacijos atveju šilumos atidavimas nepriklauso nuo kanalo polinkio kampo.

Gauta 2006 08 31

Parengta 2006 11 30

Literatūra

1. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва, 1986. 192 с.
2. Jackson J. D., Cotton M. A., Axell B. P. Studies of mixed convection in vertical tubes. Review // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 1988. Vol. 10. No. 1. P. 2–15.
3. Jackson J. D. Influences of buoyancy on velocity, turbulence and heat transfer in ascending and descending flows in vertical passages // *Proc. of 4th Baltic Heat Transfer Conference. Advances in Heat Transfer Engineering*. 2003. P. 57–78.
4. Вилемас Ю. В., Пошкас П. С. Теплоотдача в газоохлаждаемых каналах при воздействии термогравитационных и центробежных сил. Вильнюс: Academia, 1992. 240 с.
5. Vilemas J. V., Poškas P. S. and Kaupas E. V. Local heat transfer in a vertical gas-cooled tube with turbulent mixed convection and different heat fluxes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1992. Vol. 35. No. 10. P. 2421–2428.
6. Poškas P., Vilemas J. Šilumos atidavimas kanaluose turbulencinės mišrios konvekcijos atveju // *Energetika*. 1998. Nr. 2. P. 14–21.
7. Poškas P. Turbulentinis impulso ir šilumos pernešimas vertikaliuose kanaluose mišrios konvekcijos atveju // *Energetika*. 1998. Nr. 4. P. 11–18.
8. Vilemas J. and Poškas P. Effect of Body Forces on Turbulent Heat Transfer in Channels. Kaunas–New York, 1999. P. 195.
9. Poškas P., Pabarčius R. and Vilemas J. Experimental investigation of turbulent mixed convection heat transfer in a vertical tube for different pressure of air // *Proc. of 2nd Baltic Heat Transfer Conference. Advances in Engineering Heat Transfer*. Jurmala–Riga, Latvia, 1995. P. 139–148.
10. Пошкас П., Пабарчюс Р. Теплоотдача и сопротивление трения в вертикальной трубе при разных давлениях газа в условиях турбулентной смешанной конвекции // *Energetika*. 1995. Nr. 1. P. 14.
11. Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J. Effects on natural convection on transition to turbulence in vertical pipes // *Can. J. Chem. Eng.* 1960. Vol. 38. No. 3. P. 67–73.
12. Scheele G. F., Hanratty T. J. Effects on natural convection instabilities on rates of heat transfer at low Reynolds numbers // *AIChE J.* 1963. Vol. 39. No. 2. P. 183–185.
13. Zeldin B., Schmidt F. W. Developing flow with combined forced-free convection in an isothermal vertical tube // *J. Heat Transfer*. 1972. Vol. 94. P. 211–223.
14. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Стригин Б. К. Исследование теплообмена в трубах при вязкостно-гравитационном течении. Москва: Энергия, 1968. Т. 1. 607 с.
15. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 470 с.
16. Hallman T. M. Combined forced and free laminar convection in vertical tubes with uniform internal heat generation // *Trans. ASME. Ser. C*. 1956. Vol. 78. N 8. P. 1831–1841.
17. Mori Y., Ohbuchi M. A. Fundamental study of flow and heat transfer performances of downward water flow at low Reynolds numbers in a vertical heated straight tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. No. 7. P. 1231–1238.
18. Joye D. D., Jacobs W. S. Backflow in the inlet region of opposing mixed convection heat transfer in a vertical tube // *Proc. of 10th Int. Heat Transfer Conference*. Brighton, 1994. Vol. 5. P. 489–494.
19. Poškas P., Adomaitis J. E., Vilemas J. and Bartkus G. Development of turbulent heat transfer over the length of vertical flat channel under a strong influence of buoyancy // *Proc. of 10th Int. Heat Transfer Conference*. Brighton, UK, 1994. Vol. 5. P. 555–560.
20. Пошкас П., Барткус Г. Теплоотдача при смешанной турбулентной конвекции в вертикальном плоском канале с односторонним нагревом // *Промышленная теплотехника*. 1999. Т. 21. № 2–3. С. 7–12.
21. Wang J., Li J., Jackson J. D. A Study of the influence of buoyancy on turbulent flow in a vertical plane passage // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2004. Vol. 25. No. 3. P. 420–430.

22. Jackson J. D., Tian-Hua W., Zeyuan X. Turbulent buoyancy-influenced flow and heat transfer in a vertical annulus // Proc. of 12th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble, France, 2002 (in CD).
23. Poškas P., Poškas R., Zujus R. and Jankauskas J. Aiding mixed convection heat transfer in the vertical flat channel in a laminar-turbulent transition region // Proc. of 5th Int. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Dubrovnik, Croatia, 2006 (accepted for publication).
24. Poškas P., Poškas R. Turbulent opposing mixed convection heat transfer in a vertical flat channel with one side heating // Int. J. Heat Transfer Engineering. 2004. Vol. 25. No. 2. P. 17–23.
25. Poškas P., Poškas R. and Sirvydas A. Modeling of the opposing mixed convection heat transfer in a vertical flat channel in the regions of a laminar and vortex flow // Proc. of 4th Int. Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT, Cairo, Egypt. September 2005. P. 1–6.
26. Joye D. D. Comparison of correlations and experiment in opposing flow, mixed convection heat transfer in a vertical tube with Grashof number variation // Int. J. Heat Mass Transfer. 1996. Vol. 39. No. 5. P. 1033–1038.
27. Poškas P., Poškas R., Sirvydas A. Opposing mixed convection heat transfer in the vertical flat channel in a laminar-turbulent transition region // Proc. of 13th Int. Heat Transfer Conference. Sydney, Australia, 2006 (accepted for publication).
28. Fluent 6.1 documentation // Fluent inc. 2002.
29. Poškas P., Poškas R., Sabanskis D., Turbulent opposing mixed convection heat transfer in vertical flat channel with symmetrical heating. In: B. Sunden, J. Vilemas (Eds.). Proc. of 4th Baltic Heat Transfer Conference. Advances in Heat Transfer Engineering. Kaunas–New York: LEI-Bigell House, 2003. P. 411–418.
30. Пошкас П. Турбулентная смешанная конвекция в каналах при их различной ориентации в пространстве // Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69. № 6. С. 969–976.
31. 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. 2003. Vol. 46. No. 21. P. 4023–4032.
32. Poškas R., Poškas P., Sabanskis D. Local turbulent opposing mixed convection heat transfer in inclined flat channel for unstably stratified airflow // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48. No. 5. P. 956–964.
33. Каменецкий Б. Я. Экспериментальное исследование смешанной конвекции в односторонне обогреваемом канале // ТВТ. 1983. Т. 21. № 2. С. 292–296.
34. Poškas P., Poškas R., Sabanskis D. Comparison of the turbulent opposing mixed convection heat transfer in inclined flat channel for stably and unstably stratified airflows // Proc. of 6th World Conf. Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. Matsushima, Miyagi, Japan, 2005 (in CD).

Povilas Poškas, Robertas Poškas

INVESTIGATIONS OF MIXED CONVECTION IN CHANNEL FLOWS

Summary

Investigations of mixed convection heat transfer in different channels and for different orientation is reviewed. The most important results for vertical channels are highlighted, and the main publications where these data were published are indicated. Attention is focused on the effect of mixed convection on the laminar-turbulent transition region in vertical flat channels. Also, a detailed analysis of heat transfer in inclined flat channels under the effect of stable and unstable density stratification is performed.

Key words: heat transfer, mixed convection in channels, aiding flows, opposing flows, air, stable density stratification, unstable density stratification

Повилас Пошкас, Робертас Пошкас

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В КАНАЛАХ

Резюме

Представлен обзор результатов исследований смешанной конвекции в разных каналах при их различной ориентации в пространстве. Для вертикальных каналов при турбулентном течении теплоносителей приводится только краткий обзор основных результатов и даются ссылки на оригинальные источники. Особое внимание уделено результатам исследований в вертикальных плоских каналах при ламинарно-турбулентном переходе, а также особенностям теплоотдачи в наклонных плоских каналах при устойчивой и неустойчивой стратификации плотности потока.

Ключевые слова: теплоотдача, смешанная конвекция в каналах, совпадающие и противоположные направления потоков, воздух, устойчивая и неустойчивая стратификация плотности потока