

# Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainai besileidžiančiame statišškai stabilių putų sraute

**Stasys Šinkūnas,**

**Vidmantas Giedraitis**

*Kauno technologijos universitetas,  
Šilumos ir atomo energetikos katedra,  
K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas  
El. paštas: vidmantas.giedraitis@stud.ktu.lt*

**Jonas Gyllys,**

**Tadas Ždankus**

*Kauno technologijos universiteto  
Energetikos technologijų institutas,  
K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas*

Pateikiami eksperimentinių tyrimų, naudojant putų šilumokaičio modelį, rezultatai. Tokių koridorinio vamzdžių pluošto šilumokaičių sudaro penkios vertikalios vamzdelių eilės po šešis horizontalius vamzdelius kiekvienoje eilėje. Šilumnešiu buvo naudojamas statišškai stabilių putų srautas. Koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės vamzdelių šilumos atidavimas vertikalčiai besileidžiančiam skersiniam statišškai stabilių putų srautui buvo ištirtas eksperimentiškai. Eksperimentinių tyrimų rezultatai, priklausantys nuo vamzdelio padėties koridorinio vamzdžių pluošto viduriniojoje eilėje, yra pateikti šiame straipsnyje.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai apibendrinti naudojant priklausomybes tarp Nusselto (Nu) ir Reinoldso (Re) kriterijų, įvertinant statišškai stabilių putų srauto tūrinį debitinį dujingumą ( $\beta$ ).

Eksperimentiniai koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės vamzdelių šilumos mainų tyrimų vertikalčiai besileidžiančiame skersiniame statišškai stabilių putų sraute rezultatai buvo apibendrinti kriterine lygtimi, įgalinančia apskaičiuoti vidurinėsios eilės vamzdelių vidutinį šilumos mainų intensyvumą, esant įvairiems statišškai stabilių putų srauto parametrams ir dujingumams.

**Raktažodžiai:** putų srautas, šilumos mainai, koridorinis vamzdžių pluoštas, statišškai stabilios putos, eksperimentinis kanalas, tūrinis debitinis dujingumas

## 1. ĮVADAS

Daugelyje šiuolaikinių termoenergetinių technologinių procesų, kuriuose vyksta šilumos ir masės mainai, yra naudojamos dvifazės heterogeninės sistemos, kurias dažniausiai sudaro dujos ir skystis. Šios dvi fazės gali turėti skirtingas savybes, priklausančias nuo visos sistemos hidrodinaminių savybių. Pažymėtina, kad pastaruoju metu sparčiai taikytina ir atskira dvifazių heterogeninių sistemų klasė – dispersiniai srautai, kuriuos sudaro skirtingų fazių mišiniai – skysčio ir dujų (oro), skysčio ir kietųjų dalelių, dujų (oro) ir kietųjų dalelių sistemos. Viena tokių egzistuojančių perspektyvių dvifazių dispersinių dujų ir skysčio sistemų yra statišškai stabilios putos.

Statiškai stabilios putos – tai putos, kurios yra generuojamos barbotuojant dujas per detergentų tirpalą, kuriame yra tam tikras paviršiaus aktyviųjų medžiagų (detergentų) kiekis, sluoksnį. Tokios putos pasižymi pakankamai dideliu atsparumu irimui (nesuyra nuo kelių minučių iki kelių valandų ar dienų), netgi nustojus barbotuoti dujas į detergentų tirpalą. Pažymėtina, kad pradėjus eksperimentiškai tirti statišškai stabilių putų hidrodinamiką ir bendruosius šilumos mainų dėsningumus tokių putų vertikalčiuose srautuose paaiškėjo, jog putos pasižymi pakankamai dideliu tarpfazinio kontakto paviršiumi. Putų srautui aušinant pavienius šilumos mainų paviršius, tokių paviršių vertikalčiasis eiles ar įvairios konfigūracijos pluoštus (šachmati-

nius, koridorinius), pasiekiamos gana didelės vidutinio šilumos atidavimo koeficiento reikšmės (mažesnės nei vandens, kurio atveju  $\bar{\alpha} = 200\text{--}10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , bet kur kas didesnės negu oro, kurio atveju  $\bar{\alpha} = 1\text{--}50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), netgi esant palyginti mažiems putų srautų masiniams debitams [1–7]. Statiškai stabilios putos pasižymi tik joms būdingomis, glaudžiai tarpusavyje susijusiomis savitosiomis savybėmis [1, 8–10], todėl putų srautuose vykstantys procesai komplikuoja šiuolaikinių analitinių skaičiavimų metodų taikymą ir daro proceso matematinį aprašymą sudėtingu bei praktiškai neįvykdomu uždaviniu. Nors yra atlikta nemažai darbų, kuriuose detalai ištirtas ir apibendrintas pavienio vamzdelio, vertikalios vamzdelių eilės bei šachmatinio vamzdžių pluošto šilumos atidavimas vertikalčiai kylančiame ir besileidžiančiame skersiniame statišškai stabilių putų sraute [1–3], šilumos mainų intensyvumą, priklausomai nuo generuojamo putų srauto dujingumo ar putų srauto tekėjimo greičio pasikeitimo vertikalčiai besileidžiančiam statišškai stabilių putų srautui skersai aptekant koridorinį vamzdžių pluoštą, galima tirti daugiausia tik eksperimentiniu būdu.

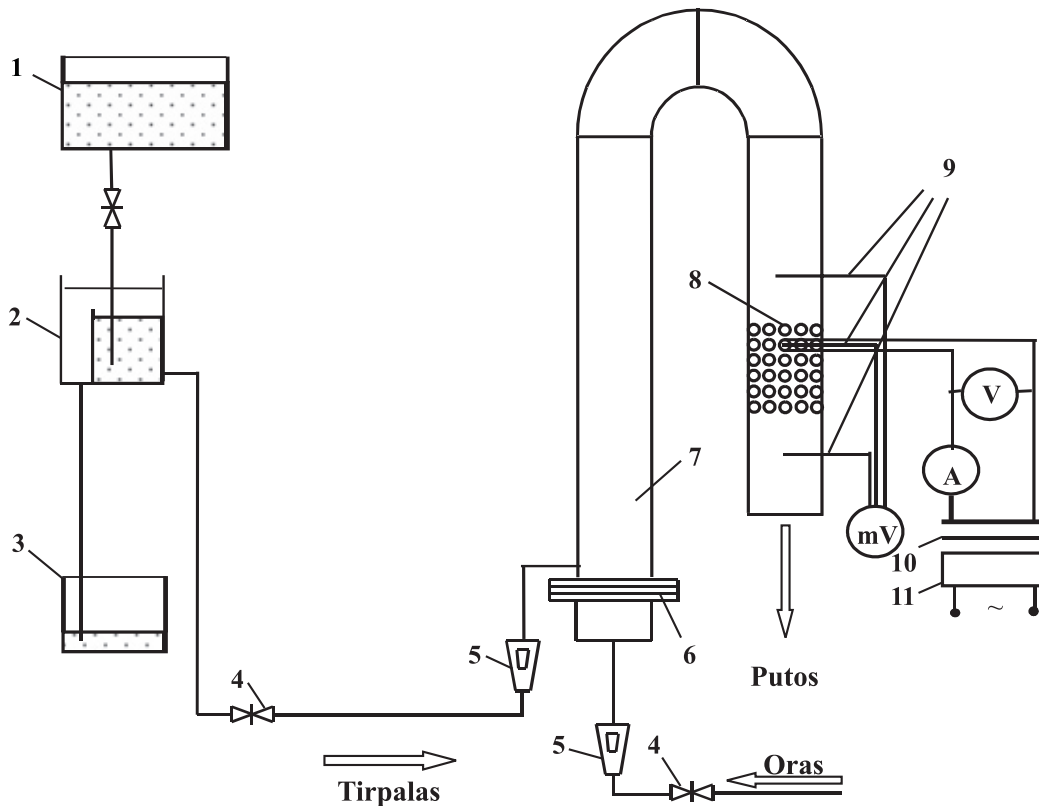
Siekiant išplėsti vykdytus eksperimentinius koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainų bendrųjų dėsningumų vertikalčiuose putų srautuose tyrimus [4–7], buvo atlikti eksperimentiniai koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių šilumos atidavimo vertikalčiai besileidžiančiam skersiniam statišškai stabilių putų srautui intensyvumo tyrimai.

## 2. EKSPERIMENTINIS STENDAS

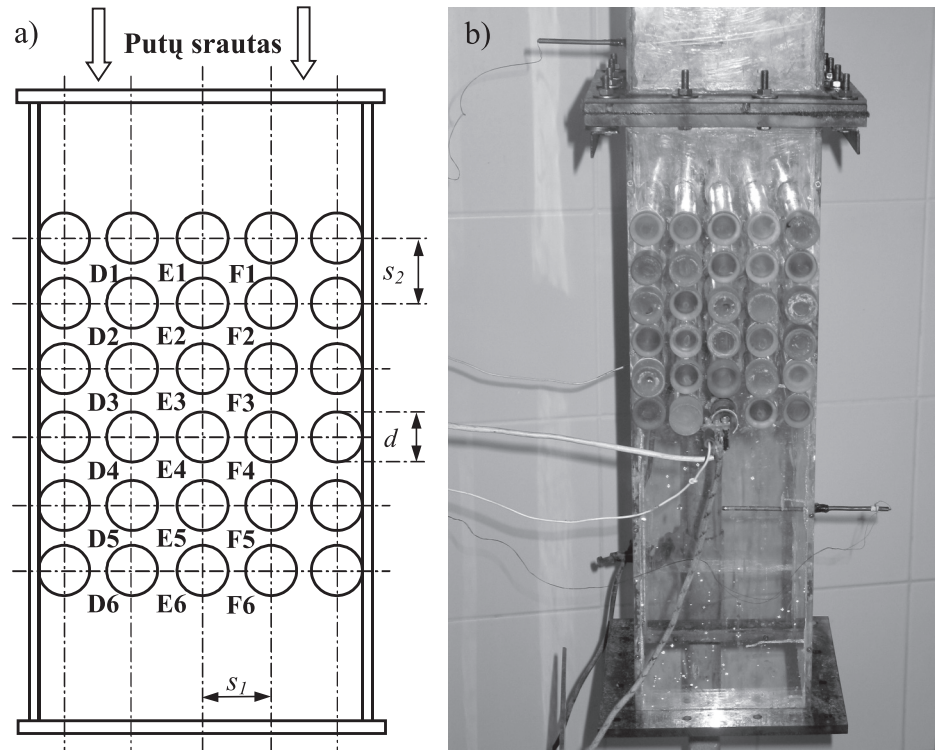
Eksperimentiniai šilumos mainų tarp koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių ir putų srauto intensyvumo tyrimai buvo atlikti naudojant modernizuotą eksperimentinių tyrimų stendą – kompaktišką putų šilumokaičio modelį (1 pav.). Eksperimentinių tyrimų stendas buvo sudarytas iš kelių pagrindinių struktūrinių dalių: putų srauto generavimo įrangos, eksperimentinio ruožo su jame sumontuotu tiriamuoju koridoriniu vamzdžių pluoštu, elektrinių dydžių matavimo prietaisų bei kitos papildomos techninės įrangos, reikalingos eksperimentiniams tyrimams vykdyti. Tyrimų metu statiškaai stabilių putų srautas buvo generuojamas kvadratinio ( $0,14 \times 0,14$ ) m<sup>2</sup> skerspjūvio vertikaliame, skaidriame, 1,8 m aukščio putų generavimo kanale (7), naudojant pastovios, 0,5% masinės detergentų koncentracijos tirpalą. Paruoštas detergentų tirpalas iš 130 l rezervuaro (1), kuriame lygis nustatomas susisiekančių indų principu sumontuotu skaidriu vamzdeliu, per pastovaus lygio palaikymo-persipylimo rezervuarą (2), reguliavimo vožtuvą (4) ir rotametrą (5) savitaka tekėjo ant horizontalios putų generavimo rėtinės (6), įtaisytos putų generavimo kanalo apačioje, viršaus. Ant putų generavimo rėtinės detergentų tirpalas buvo tiekiamas tolygiai iš keturių pusių ties kiekvienos putų generavimo kanalo sienelės viduriu, šitaip užtikrinant tolygų tirpalo pasiskirstymą ant rėtinės. Pastovaus lygio palaikymo-persipylimo rezervuare per pertvarą persipylęs detergentų tirpalo perteklius sutekėdavo į detergentų tirpalo surinkimo rezervuarą (3). Šiame rezervuare sukauptas detergentų tirpalas periodiškai buvo grąžinamas į detergentų tirpalo rezervuarą (1). Oras į apatinę porėtimą putų

generavimo kanalo dalį – dujų kamerą, kurioje sukuriamas pastovus dujų slėgis, buvo tiekiamas kompresoriumi per resiverį, reguliavimo vožtuvą (4) ir rotametrą (5). Oras į pagrindinę putų generavimo kanalo dalį patekdavo per skylutes, esančias putų generavimo rėtinėje. Taip buvo sukuriama daugybė dujų (oro) srovelių, kurios, pratekėdamos per detergentų tirpalo sluoksnį, esantį ant putų generavimo rėtinės, turbulizuodavo jį ir tokiu būdu buvo generuojamos putos. Susidaręs statiškaai stabilių putų srautas tekėjo putų generavimo kanalu iš apačios į viršų, kanalo viršuje darydavo 180° posūkį ir besileisdamas skersai aptekėjo eksperimentiniame ruože patalpintą tiriamąjį koridorinį vamzdžių pluoštą (2 pav.).

Tiriamasis koridorinis vamzdžių pluoštas buvo sudarytas iš penkių vertikalių aliuminių vamzdelių eilų po šešis horizontalius vamzdelius kiekvienoje vertikaloje eilėje (2 pav.). Visų pluošto vamzdelių išorinis skersmuo  $d = 0,02$  m, išilginis pluošto žingsnis (atstumas tarp horizontalių vamzdelių eilių centrų)  $s_2 = 0,03$  m (santykinis išilginis pluošto žingsnis  $s_2/d = 1,5$ ), o skersinis pluošto žingsnis (atstumas tarp vertikalių vamzdelių eilių centrų) atitinkamai  $s_1 = 0,03$  m (santykinis skersinis pluošto žingsnis  $s_1/d = 1,5$ ). Eksperimentinių tyrimų metu koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės vamzdelių kaitinimui buvo naudojamas elektra kaitinamas vario vamzdelis – kalorimetras (išorinis skersmuo –  $d_k = 0,02$  m), įgalinantis vykdyti eksperimentinius tyrimus ribinėmis sąlygomis, artimomis  $q_w = \text{const}$ . Siekiant išvengti šilumos nuostolių į aplinką, kalorimetro galai buvo izoliuoti termoizoliacine medžiaga. Kalorimetro paviršiaus temperatūra buvo matuojama aštuoniomis vario–konstantano termoporomis, kurių šešios išdėstytos vienodais atstumais



1 pav. Eksperimentinių tyrimų stendo principinė schema: 1 – detergentų tirpalo rezervuaras; 2 – pastovaus lygio palaikymo-persipylimo rezervuaras; 3 – detergentų tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 4 – reguliavimo vožtuvas; 5 – rotametras; 6 – putų generavimo rėtinė; 7 – putų generavimo kanalas; 8 – koridorinis vamzdžių pluoštas; 9 – vario–konstantano termoporos; 10 – autotransformatorius; 11 – stabilizatorius



2 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto principinė schema (a) ir bendras vaizdas (b)

kalorimetro perimetro centrinėje dalyje, o likusios dvi – abiejose kalorimetro galuose, 0,05 m atstumu nuo jo vidurinės dalies. Statiškai stabilių putų srauto temperatūra buvo matuojama dviem, taip pat vario–konstantano termoporomis, įrengtomis prieš eksperimentinį ruožą, kuriame buvo sumontuotas tiriamasis koridorinis vamzdžių pluoštas, ir už jo.

### 3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentinių tyrimų metu buvo tirtas koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės (E) kaitinamųjų vamzdelių šilumos atdavimo putų srautui intensyvumas, priklausomai nuo tiriamojo vamzdelio padėties eilėje, putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g = 190-440$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta = 0,996 - 0,998$ .

Eksperimentinių tyrimų metu gauti duomenys buvo apibendrinti kaip funkcija tarp Reinoldso ir Nuselto skaičių būdinguoju matmeniu naudojant koridorinio vamzdžių pluošto vamzdelio išorinį skersmenį, t. y. buvo nustatomas ryšys:

$$\overline{Nu}_f = f(\beta, \overline{Re}_g). \quad (1)$$

Putų srauto tūrinis debitinis dujingumas buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\beta = \frac{G_g}{G_g + G_l}; \quad (2)$$

čia  $G_g$  – dujų debitas  $m^3/s$ ;  $G_l$  – skysčio debitas  $m^3/s$ .

Putų srauto redukuotasis dujų Reinoldso skaičius buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$Re_g = \frac{G_g}{Av_g}; \quad (3)$$

čia  $G_g$  – dujų debitas  $m^3/s$ ;  $d$  – koridorinio vamzdžių pluošto vamzdelio išorinis skersmuo  $m$ ;  $A$  – eksperimentinio ruožo skerspjūvio plotas  $m^2$ ;  $v$  – dujų kinematinė klampa  $m^2/s$ .

Šilumos mainų apibendrinimui naudotas Nuselto skaičius buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\overline{Nu}_f = \frac{\overline{\alpha}d}{\lambda_f}; \quad (4)$$

čia  $\overline{\alpha}$  – vidutinis šilumos atdavimo koeficientas  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $d$  – koridorinio vamzdžių pluošto vamzdelio išorinis skersmuo  $m$ ;  $\lambda_f$  – putų srauto šilumos laidumo koeficientas  $W/(m \cdot K)$ .

Putų srauto šilumos laidumo koeficientas buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\lambda_f = \beta\lambda_g + (1 - \beta)\lambda_l; \quad (5)$$

čia  $\beta$  – putų srauto tūrinis debitinis dujingumas;  $\lambda_g$  – dujų šilumos laidumo koeficientas  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_l$  – skysčio šilumos laidumo koeficientas  $W/(m \cdot K)$ . Vidutinis šilumos atdavimo intensyvumas, esant nusistovėjusiam šiluminiam režimui eksperimentiniame ruože, buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\overline{\alpha} = \frac{q_w}{\Delta T}; \quad (6)$$

čia  $q_w$  – šilumos srauto tankis ant kaitinimo vamzdelio paviršiaus  $W/m^2$ ;  $\Delta T$  – vidutinis temperatūrų skirtumas tarp vidutinių kaitinamo vamzdelio paviršiaus ir putų srauto temperatūrų  $K$ .

Šilumos srauto tankis ant kaitinimo vamzdelio buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$q_w = \frac{\Delta UI}{\pi dl}; \quad (7)$$

čia  $\Delta U$  – įtampos kritimas ant kaitinimo vamzdžio nichrominės spiralės galų  $V$ ;  $I$  – srovės stipris kaitinimo vamzdžio grandinėje  $A$ ;  $d$  – koridorinio vamzdžių pluošto vamzdžio išorinis skersmuo  $m$ ;  $l$  – kaitinimo vamzdžio ilgis  $m$ .

Vidutinis temperatūrų skirtumas tarp vidutinių kaitinamo vamzdžio paviršiaus ir statišškai stabilių putų srauto temperatūrų buvo skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\overline{\Delta T} = \overline{T}_w - \overline{T}_f; \tag{8}$$

čia  $\overline{T}_w$  – vidutinė kaitinamo vamzdžio paviršiaus temperatūra  $K$ ;  $\overline{T}_f$  – vidutinė statišškai stabilių putų srauto temperatūra  $K$ .

Eksperimentiškai nustatyta, kad po eksperimentinio šilumos atidavimo užtekančiam putų srautui proceso parametru reguliavimo šilumos mainai tarp koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių ir putų srauto nusiustovi praėjus ne mažiau kaip 5 minutėms. Vėliau nekinta nei statišškai stabilių putų srauto, nei kaitinamojo vamzdžio paviršiaus temperatūros, todėl šilumos mainus galima laikyti nusiustovėjusiais ir atlikti matavimus. Siekiant kuo didesnio vykdomų eksperimentinių tyrimų rezultatų tikslumo ir patikimumo, visi eksperimentai buvo kartojami ne mažiau kaip du kartus. Eksperimentinių tyrimų rezultatai yra pakankamai tikslūs, patikimi ir atkuriami, o pagrindinių parametru santykinės paklaidos tokios:  $\delta_\beta = \pm 2,0\%$ ,  $\overline{Re}_g = \pm 2,1\%$ ,  $\overline{Nu}_f = \pm 8,0\%$ .

#### 4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

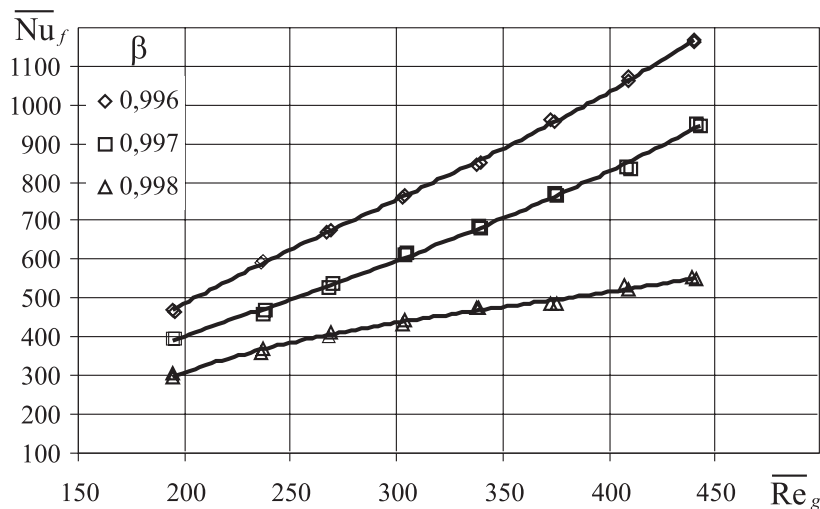
Šilumos mainų tarp koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių ir putų srauto intensyvumo priklausomybės nuo tiriamojo vamzdžio padėties eilėje, putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta$  yra pavaizduotos 3–5 paveiksluose.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad šilumos mainai tarp koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių ir vertikaliai žemyn besileidžiančio skersinio statišškai stabilių putų srauto intensyvėja didėjant putų srauto redukuotajam dujų Reinoldso skaičiui  $\overline{Re}_g$  ir mažėjant tūriniam debitiniam dujingumui  $\beta$ . Visame ištirtame statišškai stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190 - 440$  kitimo intervale, o tai atitinka redukuotąjį dujų greitį  $\overline{w}_g =$

0,14–0,32 m/s, intensyviausias koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių aušinimas nustatytas drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ), mažiau intensyvių – sausesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ), o mažiausiai intensyvių – sausiausių putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute. Pažymėtina, kad šilumos mainai sausiausių putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute, didėjant statišškai stabilių putų srauto redukuotajam dujų Reinoldso skaičiui  $\overline{Re}_g$ , intensyviėja mažiausiai, lyginant su drėgnesniųjų ( $\beta = 0,997$ ) ar drėgniausių ( $\beta = 0,996$ ) putų srautais. Tokį šilumos mainų intensyvumo dėsninumą galima paaiškinti tuo, kad didėjant statišškai stabilių putų srauto tūriniam debitiniam dujingumui  $\beta$  su užtekančiu putų srautu yra nešamas vis mažesnis skysčio kiekis, todėl skysčio drenažo iš putų proceso įtaka šilumos mainų intensyvumui pasireiškia vis mažiau. Be to, pastebėta, kad statišškai stabilių putų srauto tūrinio debitinio dujingumo pokytis turi įtaką ne tik šilumos mainų intensyvumo skaitinėms reikšmėms, bet ir jo kitimo pobūdžiui. Drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute šilumos mainų intensyvumas jautriai reaguoja į statišškai stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g$  kitimą ir keičiasi labiau, nei sausesniųjų ( $\beta = 0,997$ ) ar sausiausių putų ( $\beta = 0,998$ ) putų srautuose. Eksperimentiškai nustatyta, kad visame ištirtame statišškai stabilių putų srauto redukuotojo dujų greičio  $\overline{w}_g = 0,14 - 0,32$  m/s kitimo intervale, sausiausių putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute, šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nuselto skaičius  $\overline{Nu}_f$  padidėja nuo 249 iki 551. Tame pačiame statišškai stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190 - 440$  kitimo intervale, tik drėgnesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) sraute,  $\overline{Nu}_f$  padidėja nuo 316 iki 948. Drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute,  $\overline{Nu}_f$  padidėja nuo 382 iki 1167, t. y. beveik 1,23 karto didesnis, nei sausesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) atveju, ir beveik 2,12 karto didesnis, nei sausiausių putų ( $\beta = 0,998$ ) atveju.

Šilumos mainų tarp intensyviausiai aušinamo koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės pirmojo vamzdžio (E1) ir vertikaliai žemyn besileidžiančio skersinio statišškai stabilių putų srauto intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta$  yra parodyta 3 paveiksle.

Eksperimentiškai nustatyta, kad koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės pirmojo vamzdžio (E1) šilumos mainai vertikaliai žemyn besileidžiančiame skersiniam statišškai stabilių



3 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės pirmojo vamzdžio (E1) šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo statišškai stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus ir tūrinio debitinio dujingumo:  $\beta = 0,996, 0,997, 0,998$

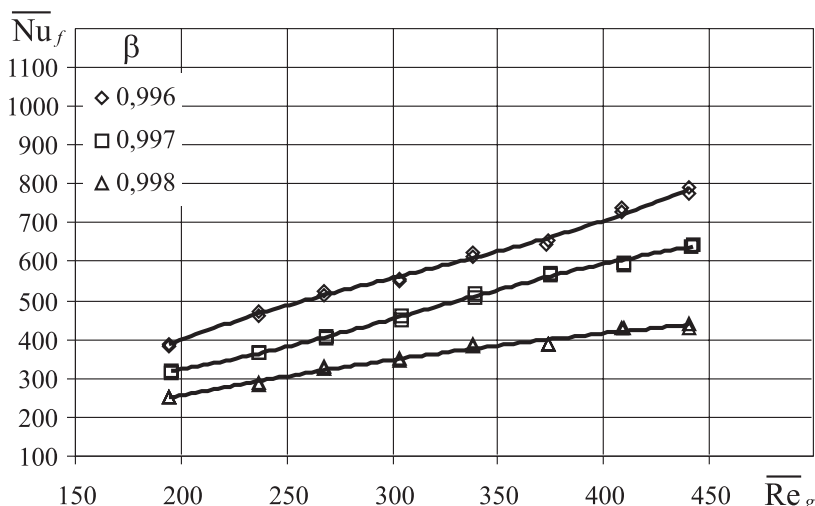
putų sraute yra intensyviausi visame ištirtame redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g = 190 - 440$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta = 0,996-0,998$  kitimo intervale. Tokį šilumos mainų intensyvumo dėsningumą galima paaiškinti tuo, kad vertikaliai žemyn besileidžiančio skersinio statiška stabilijų putų srauto burbuliukams susidūrus su jų kelyje esančiu pirmuoju vidurinėsios eilės vamzdeliu (E1), turinčiu didžiausią, lyginant su tolesniais (giluminiais) šios eilės vamzdeliais, efektyvų šilumos mainų paviršiaus plotą, dalies jų kinta forma, dalis jų susmulkėja, dalis suyra. Suirus putų burbuliukams atsipalaidavęs papildomas skystis, veikiamas traukos jėgų, teka kitų putų burbuliukų sienelėmis ir Plato–Gibso kanalais žemyn, drenuojasi, tokiu būdu intensyvindamas šilumos mainus tarp pirmojo vidurinėsios eilės vamzdelio (E1) ir vertikaliai besileidžiančio skersinio statiška stabilijų putų srauto. Eksperimentiškai taip pat nustatyta, kad visame ištirtame statiška stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g = 190-440$  kitimo intervale, o tai atitinka redukuotąjį dujų greitį  $\bar{w}_g = 0,14-0,32$  m/s, sausiusių putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute šilumos mainus apibendrinančio Nusselto skaičiaus  $Nu_f$  reikšmė padidėja nuo 295 iki 551, drėgnesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) sraute nuo 396 iki 948, o drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute yra pasiekiamos didžiausios šio skaičiaus reikšmės, t. y.  $Nu_f = 468-1167$ . Matyti, kad mažėjant statiška stabilijų putų srauto tūriniam debitiniam dujingumui  $\beta$ , šilumos mainai tarp pirmojo vidurinėsios eilės vamzdelio (E1) ir vertikaliai žemyn besileidžiančio skersinio statiška stabilijų putų srauto intensyvėja. Pažymėtina, kad drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute šilumos mainus apibendrinantis Nusselto skaičius  $Nu_f$ , esant didžiausioms statiška stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus reikšmėms ( $Re_g = 440$ ) yra beveik 1,23 karto didesnis, nei ( $\beta = 0,997$ ) atveju ir beveik 2,12 karto didesnis, nei sausiusių putų ( $\beta = 0,998$ ) atveju.

Šilumos mainų tarp blogiausiai aušinamo koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės paskutinio šeštojo vamzdelio (E6) ir vertikaliai žemyn besileidžiančio skersinio statiška stabilijų putų srauto intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta$  yra parodyta 4 paveiksle.

Eksperimentiškai nustatyta, kad koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės paskutinio šeštojo vamzdelio (E6) šilumos mainai vertikaliai žemyn besileidžiančiame skersiniame

statiška stabilijų putų sraute yra mažiausiai intensyvūs visame ištirtame redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g = 190-440$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta = 0,996-0,998$  kitimo intervale. Tokį šilumos mainų intensyvumo dėsningumą galima paaiškinti skysčio drenažo iš statiška stabilijų putų procesu pradinėje koridorinio vamzdžių pluošto dalyje. Pažymėtina, kad koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės pirmasis pagal putų srauto tekėjimo kryptį kaitinamasis vamzdelis (E1), būdamas kanalo skerspjūvio centre, kur putų srauto tekėjimo greitis yra didžiausias, turi didžiausią, lyginant su tolesniais (giluminiais) šios eilės vamzdeliais, efektyvų šilumos mainų paviršiaus plotą ir yra pirmoji kliūtis vertikaliai žemyn besileidžiančiame skersiniame statiška stabilijų putų sraute. Nudrenuodamas dalį su užtekiančiu putų srautu pernešamo skysčio, dirbtinai didina tikrąjį tūrinį statiška stabilijų putų srauto dujingumą. Todėl tolesnius koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamuosius vamzdelius apiplauna sausesnių statiška stabilijų putų srautas ir šilumos atidavimo intensyvumas sumažėja. Įtakos turi ir vadinamasis „šešelio“ efektas, t. y. tolesni koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamieji vamzdeliai yra išdėstyti užgriozdintoje pluošto vidinėje erdvėje, kurioje užtekantis statiška stabilijų putų srautas yra stabdomas – putų srauto maišymosi intensyvumas (turbulizacija) silpnėja ir susidaro vadinamosios „stovinčio“ putų srauto zonos tarpvamzdinėje pluošto vidinėje erdvėje, t. y. vidinėje erdvėje tarp pluošto horizontalių vamzdelių eilių. Dėl šių reiškinų įtakos užtekantis statiška stabilijų putų srautas blogiau apiplauna kaitinamųjų vamzdelių paviršius ir, tekėdamas mažiausio hidrodinaminio pasipriešinimo keliu – erdve tarp koridorinio vamzdžių pluošto vertikalų vamzdelių eilių, mažai intensyvina šilumos atidavimą. Eksperimentiškai nustatyta, kad visame ištirtame statiška stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $Re_g = 190-440$  kitimo intervale, o tai atitinka redukuotąjį dujų greitį  $\bar{w}_g = 0,14-0,32$  m/s, sausiusių putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nusselto skaičius  $Nu_f$  padidėja nuo 249 iki 440. Tame pačiame  $Re_g$  kitimo intervale, tik drėgnesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) sraute,  $Nu_f$  padidėja nuo 316 iki 645, o drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute  $Nu_f$  padidėja nuo 382 iki 777. Matyti, kad kaip ir pirmojo vidurinėsios eilės vamzdelio (E1) atveju, mažėjant statiška stabilijų putų srauto tūriniam debitiniam dujingumui  $\beta$ , šilumos mainai tarp paskutinio šeštojo šios eilės vamzdelio

4 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės paskutinio, šeštojo, vamzdelio (E6) šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo statiška stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus ir tūrinio debitinio dujingumo:  $\beta = 0,996, 0,997, 0,998$



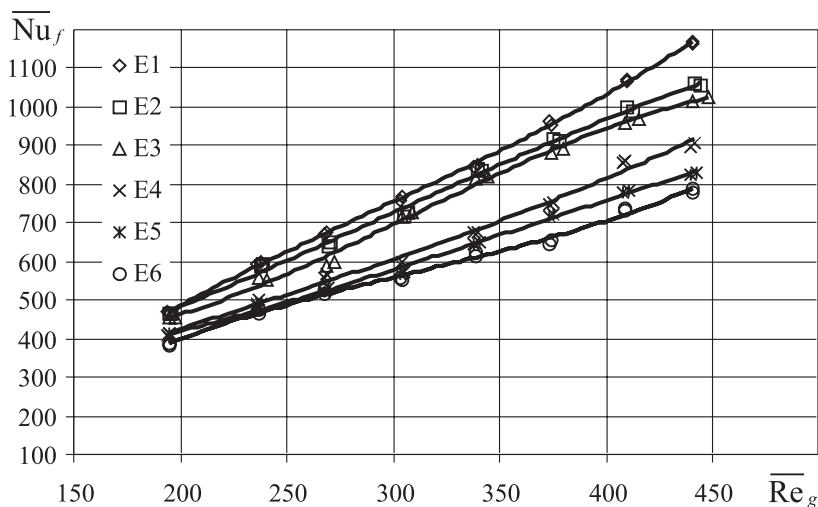
(E6) ir vertikalčiai žemyn besileidžiančio skersinio statiška stabilių putų srauto taip pat intensyvėja, tačiau gerokai silpniau. Pažymėtina, kad drėgniausiųjų putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute šilumos mainus apibendrinantis Nusselto skaičius  $\overline{Nu}_f$ , esant didžiausioms statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus reikšmėms ( $\overline{Re}_g = 440$ ), yra beveik 1,21 karto didesnis, nei sausesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) atveju, ir beveik 1,77 karto didesnis, nei sausiausiųjų putų ( $\beta = 0,998$ ) atveju.

Palyginę 3 ir 4 paveikluose pateiktus eksperimentinių tyrimų rezultatus matome, kad šilumos mainų intensyvumą apibendrinančios kreivės turi žymiai didesnę kilimo kampą visame ištirtame statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190\text{--}440$  kitimo intervale atveju, kai  $\beta = 0,996$ . Tokio reiškinio priežastis – padidėjęs pernešamo su užtekančiu statiška stabilių putų srautu skysčio kiekis. Tame pačiame  $\overline{Re}_g$  kitimo intervale, tik atvejais, kai  $\beta = 0,997$  ir  $\beta = 0,998$ , šilumos mainų intensyvumą apibendrinančių kreivių kilimo kampas yra mažesnis. Tai gali būti aiškinama tuo, kad sausesniųjų ( $\beta = 0,997$ ) ir sausiausiųjų ( $\beta = 0,998$ ) statiška stabilių putų srautais yra pernešamas pastebimai mažiau skysčio, nei drėgniausiųjų ( $\beta = 0,996$ ) putų atveju. Palyginus koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės pirmojo (E1) ir paskutinio šeštojo (E6) vamzdžių eksperimentiškai nustatytą šilumos mainų intensyvumą vertikalčiai žemyn besileidžiančiame skersiniame statiška stabilių putų sraute, esant didžiausioms putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus reikšmėms ( $\overline{Re}_g = 440$ ), gauta, kad šiluma nuo paskutinio, šeštojo, eilės vamzdžio drėgniausiųjų putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute nuvedama apytiksliai 1,50 karto, sausesniųjų putų ( $\beta = 0,997$ ) sraute – apytiksliai 1,47 karto, o sausiausiųjų putų ( $\beta = 0,998$ ) sraute – apytiksliai 1,25 karto blogiau nei nuo pirmojo šios eilės vamzdžio.

Pažymėtina, kad koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdžių aušinimo intensyvumas priklauso ir nuo tiriamojo vamzdžio padėties eilėje vertikalčiai žemyn besileidžiančio skersinio statiška stabilių putų srauto atžvilgiu, t. y. pirmųjų šios eilės vamzdžių aušinimas visame ištirtame putų srauto tūrinio debitinio dujingumo  $\beta = 0,996\text{--}0,998$  kitimo intervale intensyvėja smarkiau nei tolesniųjų (giluminių) ir silpnėja, didėjant vamzdžio padėties numeriui eilėje (5 pav.). Tai gali būti aiškinama pirmojo ir tolesniųjų pagal putų srauto tekėjimo kryptį vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdžių įtaka užtekančio statiška stabilių putų srauto hidrodinamikai.

Šilumos mainų tarp koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdžių ir vertikalčiai žemyn besileidžiančio skersinio drėgniausiųjų statiška stabilių putų srauto intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g$  ir tūrinio debitinio dujingumo  $\beta$  yra parodyta 5 paveiksle.

Analizuodami 5 pav. pateiktus eksperimentinių tyrimų rezultatus matome, kad koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės atskirų vamzdžių šilumos mainų intensyvumą apibendrinančios kreivės yra tarpusavyje išsiskyrusios, o pirmojo šios eilės vamzdžio (E1) šilumos mainai vertikalčiai žemyn besileidžiančiame skersiniame drėgniausiųjų ( $\beta = 0,996$ ) statiška stabilių putų sraute yra intensyviausi visame ištirtame putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190\text{--}440$  kitimo intervale, t. y. šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nusselto skaičius kinta intervale  $\overline{Nu}_f = 468\text{--}1167$ . Aptekėjęs pirmąjį vidurinėsios eilės vamzdį (E1) vertikalčiai žemyn besileidžiantis skersinis drėgniausiųjų statiška stabilių putų srautas kontaktuoja su antruoju (E2), trečiuoju (E3) ir tolesniais (giluminiais) šios eilės vamzdeliais. Visame ištirtame putų srauto redukuotojo dujų greičio  $\overline{w}_g = 0,14\text{--}0,32$  m/s kitimo intervale antrojo (E2) ir trečiojo (E3) vidurinėsios eilės vamzdžių šilumos atidavimo vertikalčiai žemyn besileidžiančiam skersiniam drėgniausiųjų statiška stabilių putų srautui intensyvumas yra mažesnis už pirmojo šios eilės vamzdžio (E1), t. y. šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nusselto skaičius kinta atitinkamai intervaluose  $\overline{Nu}_f = 464\text{--}1056$  ir  $\overline{Nu}_f = 455\text{--}1024$ . Pažymėtina, kad esant mažiausioms statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų greičio reikšmėms ( $\overline{w}_g = \sim 0,14$  m/s), pirmojo (E1), antrojo (E2) ir trečiojo (E3) vidurinėsios eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumas mažai skiriasi tarpusavyje. Šis skirtumas didėja, greitėjant putų srautui, t. y. didėjant statiška stabilių putų srauto redukuotajam dujų Reinoldso skaičiui  $\overline{Re}_g$ . Esant didžiausioms statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų greičio reikšmėms ( $\overline{w}_g = \sim 0,32$  m/s), antrojo vidurinėsios eilės vamzdžio (E2) šilumos mainai drėgniausiųjų putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute yra apytiksliai 3,03% intensyvesni už trečiojo šios eilės vamzdžio (E3). Pažymėtina, kad visame ištirtame statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190\text{--}440$  kitimo intervale šilumos mainų intensyvumo skirtumas tarp koridorinio vamzdžių pluošto antrojo (E2) ir trečiojo (E3) vidurinėsios eilės vamzdžių yra ne toks ryškus,



5 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės atskirų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo statiška stabilių putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus ir tūrinio debitinio dujingumo:  $\beta = 0,996$

kaip tarp pirmojo (E1) ir antrojo (E2) šios eilės vamzdelių. Tą patį galima pasakyti ir apie ketvirtąjį (E4) bei penktąjį (E5) vidurinėsios eilės vamzdelius, kurių šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nusselto skaičius kinta atitinkamai intervaluose  $\overline{Nu}_f = 407 - 908$  ir  $\overline{Nu}_f = 401 - 829$ . Pažymėtina, kad esant mažiausioms statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų greičio reikšmėms ( $\overline{w}_g = \sim 0,14$  m/s), ketvirtojo (E4) ir penktojo (E5) vidurinėsios eilės vamzdelių šilumos mainų intensyvumas mažai skiriasi tarpusavyje. Esant didžiausioms statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų greičio reikšmėms ( $\overline{w}_g = \sim 0,32$  m/s), ketvirtojo vidurinėsios eilės vamzdelio (E4) šilumos mainai drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute yra apytiksliai 8,7% intensyvesni už penktojo šios eilės vamzdelio (E5). Pažymėtina, kad visame ištirtame statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190 - 440$  kitimo intervale šilumos mainų intensyvumo skirtumas tarp koridorinio vamzdžių pluošto ketvirtojo (E4) ir penktojo (E5) vidurinėsios eilės vamzdelių taip pat yra nedidelis, o šilumos mainų intensyvumą apibendrinančių kreivių pobūdis, priklausomai nuo  $\overline{Re}_g$  reikšmės, yra beveik analogiškas kaip pirmojo (E1) ir antrojo (E2) šios eilės vamzdelių. Tačiau paskutinio, šeštojo, vidurinėsios eilės vamzdelio (E6) šilumos atidavimas vertikaliai žemyn besileidžiančiam skersiniam drėgniausių putų statiškai stabilijų putų srautui išsiskiria iš bendros tirtos eilės vamzdelių šilumos atidavimo intensyvumo kitimo tendencijos. Visame ištirtame putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g = 190 - 440$  kitimo intervale yra aušinamas blogiausiai, lyginant su visais kitais tirtos eilės vamzdeliais, ir šilumos mainų intensyvumą apibendrinantis Nusselto skaičius įgyja reikšmes intervale  $\overline{Nu}_f = 382 - 777$ . Analizuodami 5 paveiksle pateiktus eksperimentinių tyrimų rezultatus matome, kad esant didžiausioms statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus reikšmėms ( $\overline{Re}_g = 440$ ) šiluma nuo paskutinio, šeštojo, vidurinėsios eilės vamzdelio (E6) drėgniausių putų ( $\beta = 0,996$ ) sraute nuvedama apytiksliai 1,50 karto blogiau nei nuo pirmojo eilės vamzdelio (E1), apytiksliai 1,36 karto blogiau nei nuo antrojo eilės vamzdelio (E2), apytiksliai 1,32 karto blogiau nei nuo trečiojo eilės vamzdelio (E3), apytiksliai 1,17 karto blogiau nei nuo ketvirtojo eilės vamzdelio (E4) ir apytiksliai 1,07 karto blogiau nei nuo penktojo tirtos eilės vamzdelio (E5).

Analizuojant straipsnyje pateiktas koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių šilumos mainų intensyvumo priklausomybes nuo statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus  $\overline{Re}_g$  (3–5 pav.), būtina įvertinti ir procesus, vykstančius putų srautui skersai kertant tiriamąjį koridorinį vamzdžių pluoštą. Esant pradinėms, nedidelėms  $\overline{Re}_g = 190 - 300$  reikšmėms o tai atitinka  $\overline{w}_g = 0,14 - 0,23$  m/s, į koridorinį vamzdžių pluoštą atitekančių statiškai stabilijų putų srautą sudaro stambūs, apytiksliai 8–12 mm išorinio skersmens, putų burbuliukai, kurie trukdo vėliau atitekančioms putų gardelėms pasiekti pluošto vamzdelius. Todėl užtekantis statiškai stabilijų putų srautas pradinėje koridorinio vamzdžių pluošto dalyje yra stabdomas. Pratekant koridorinį vamzdžių pluoštą kinta pratekėjimo skerspjuvio plotas. Be to, užtekamajame statiškai stabilijų putų sraute vyksta intensyvus skysčio drenažo iš putų procesas (skysčio ištekėjimas iš putų burbuliukų sienelių ir jų sujungimo vietų – Plato–Gibso kanalų), kurio kryptis sutampa su srauto tekėjimo kryptimi, ir srauto greitis padidėja. Pažymėtina,

kad statiškai stabilijų putų srautui skersai kertant koridorinį vamzdžių pluoštą, dalis putų burbuliukų suyra natūraliai – drenuojantis skysčiui arba mechaniškai – atsimušant į pluošto vamzdelių paviršius. Suirusių putų burbuliukų skystis teka žemyn kitų putų burbuliukų sienelėmis ir Plato–Gibso kanalais, drenuojasi, papildomai intensyvindamas bendrąjį skysčio drenažo iš putų procesą. Esant galinėms, didelėms,  $\overline{Re}_g = 350 - 440$  reikšmėms o tai atitinka  $\overline{w}_g = 0,26 - 0,32$  m/s, generuojamas statiškai stabilijų putų srautas būna sudarytas iš smulkesnių putų gardelių, todėl iki koridorinio vamzdžių pluošto atitekančias vientisesnes putų srautas, sudarytas iš apytiksliai 2–5 mm išorinio skersmens putų burbuliukų, geriau apiplauna koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamuosius vamzdelius, intensyvindamas šilumos mainus.

Eksperimentiniai koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių šilumos atidavimo putų sraute intensyvumo tyrimų rezultatai buvo apibendrinti kriterine lygtimi, nusakanti putų srauto Nuselto skaičiaus priklausomybę nuo putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus bei putų srauto tūrinio debitinio dujingumo. Lygtis gali būti taikoma koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainų vertikaliai žemyn besileidžiančiame skersiniame statiškai stabilijų putų sraute skaičiavimams, kai putų srauto redukuotasis dujų Reinoldso skaičius  $\overline{Re}_g = 190 - 440$ , putų srauto tūrinis debitinis dujingumas  $\beta = 0,996 - 0,998$ , o skersinis ir išilginis pluošto žingsniai  $1,5 \times 1,5$ :

$$\overline{Nu}_f = c\beta^n \overline{Re}_g^m. \quad (9)$$

Analitiškai nustatytos ir vidutinės koeficientų reikšmės koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės vamzdeliams:  $c = 16,1$ ,  $n = 518,0$ ,  $m = 140,7$  ( $1,003 - \beta$ ) ir viso koridorinio vamzdžių pluošto vamzdeliams:  $c = 12,7$ ,  $n = 334,0$ ,  $m = 114,6 \cdot (1,004 - \beta)$ .

## 5. IŠVADOS

1. Eksperimentiškai ištirti ir apibendrinti koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių šilumos mainai vertikaliai besileidžiančiame skersiniame statiškai stabilijų putų sraute.

2. Išnagrinėta statiškai stabilijų putų srauto redukuotojo dujų Reinoldso skaičiaus ir tūrinio debitinio dujingumo įtaka šilumos mainų intensyvumui, priklausomai nuo kaitinamojo vamzdelio padėties koridorinio vamzdžių pluošto viduriniojoje eilėje.

3. Nustatyta, kad didėjant statiškai stabilijų putų srauto redukuotajam dujų Reinoldso skaičiui koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės kaitinamųjų vamzdelių aušinimo intensyvumas tiesiogiai priklauso nuo tiriamojo vamzdelio padėties eilėje putų srauto atžvilgiu. Pirmųjų šios eilės vamzdelių aušinimas yra intensyvesnis negu tolesnių, o paskutinis eilės vamzdelis aušinamas blogiausiai.

4. Nustatyta, kad vienas svarbių veiksnių, mažinančių koridorinio vamzdžių pluošto vidurinėsios eilės tolesnių kaitinamųjų vamzdelių šilumos atidavimo vertikaliai besileidžiančiam statiškai stabilijų putų srautui intensyvumą, yra „šešelio“ efektas. Putų srauto tekėjimo kryptimi vidurinėsios eilės tolesnių kaitinamųjų vamzdelių šilumos mainai yra mažiau intensyvūs nei pirmųjų vamzdžių.

5. Eksperimentiniai koridorinio vamzdžių pluošto vidurinišios eilės kaitinamųjų vamzdelių šilumos mainų putų sraute intensyvumo tyrimų rezultatai apibendrinti kriterine lygtimi, įgalinančia apskaičiuoti tirtos eilės vamzdelių ir visų pluošto vamzdelių vidutinį šilumos mainų intensyvumą, esant įvairiems statiška stabilių putų srauto parametrams ir dujینگumams.

Gauta 2007 06 20

Priimta 2007 08 20

## Literatūra

1. Gylys J. Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiška stabilių putų sistemose. Kaunas, 1998. 388 p.
2. Jakubčionis M. Šachmatinio vamzdžių pluošto šilumos atidavimas kylančiame skersiniame putų sraute. Daktaro disertacija. Kaunas, 2002. 102 p.
3. Ždankus T. Šilumos mainų tyrimas besileidžiančiam dvifaziui srautui aptekant šachmatinį vamzdžių pluoštą. Daktaro disertacija. Kaunas, 2004. 112 p.
4. Gylys J., Ždankus T., Šinkūnas S., Giedraitis V. Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame statiška stabilių putų sraute // Energetika. 2005. Nr. 4. P. 28–33.
5. Gylys J., Giedraitis V., Šinkūnas S., Ždankus T., Gylys M. Study of tube bank cooling in vertical foam flow // IIR – IRHACE Conference [The university of Auckland, New Zealand, February 16–18, 2006]. New Zealand, 2006. No. 1. P. 550–557.
6. Giedraitis V., Šinkūnas S., Gylys J. Cilindrinų paviršių šilumos mainų dėsningumai vertikaliame putų sraute // Respublikinės mokslinės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“ pranešimų medžiaga. Vilnius, 2006 m. balandžio 27, 28 d. Vilnius, 2006. P. 214–219.
7. Gylys J., Giedraitis V., Šinkūnas S., Ždankus T., Gylys M. Study of in-line tube bundle heat transfer in upward vertical foam flow. Energy: production, distribution and conservation [Milan, May 14–17, 2006]. Milan, 2006. Vol. 2. P. 550–557.
8. Weaire D., Phelan R., Verbist G. The structure and geometry of foams // Foams and Emulsions. NATO ASI Series. 1997. P. 287–302.
9. Verbist G., Weaire D., Phelan R. Rheology and drainage of liquid foams // Foams and Emulsions. NATO ASI Series. 1997. P. 303–314.
10. Weaire D., Hutzler S., Cox S., Kern N., Alonso M. D., Drenckhan W. The fluid dynamics of foams // Journal of physics: condensed matter. 2003. N 15. P. 65–73.

Stasys Šinkūnas, Vidmantas Giedraitis, Jonas Gylys, Tadas Zdankus

## HEAT TRANSFER OF IN-LINE TUBE BANK IN DOWNWARD STATICALLY STABLE FOAM FLOW

### Summary

In this paper, are presented the experimental results concerning a model of cellular foam flow heat exchanger. This model of in-line tube bundle consists of five vertical tube lines with six horizontal tubes in each. A statically stable cellular foam flow as a heat transfer carrier was used. Heat transfer from the in-line tube bundle middle line tubes to the vertical downward statically stable cellular foam flow was investigated experimentally. Experimental results of the investigation and the influence of tube position in the middle line of the in-line tube bundle are discussed in this paper.

The experimental results were treated analysing relationships between Nusselt (Nu) and Reynolds (Re) numbers with respect to statically stable cellular foam flow volumetric void fraction ( $\beta$ ).

Experimental heat transfer results of in-line tube bundle middle line tubes in a vertical downward statically stable cellular foam flow were summarized by a criterion equation which enables determination of the average heat transfer intensity rate of the middle line tubes and of all tubes in the tube bundle for different values of volumetric void fractions and parameters of a statically stable cellular foam flow.

**Key words:** foam flow, heat transfer, in-line tube bank, statically stable cellular foam, experimental channel, volumetric void fraction

Стасис Шинкунас, Видмантас Гедрайтис, Йонас Гилис, Тадас Жданкус

## ТЕПЛОБМЕН КОРИДОРНОГО ПУЧКА ТРУБ В ПОТОКЕ СТАТИЧЕСКИ УСТОЙЧИВОЙ ЯЧЕЙСТОЙ ПЕНЫ

### Резюме

Приведенные в статье результаты экспериментальных исследований получены с использованием модели пенного теплообменника. Такой пенотеплообменник коридорного пучка труб состоит из пяти вертикальных рядов по шесть горизонтальных труб в каждом ряду. В качестве теплоносителя использовался статически устойчивый ячейистый поток пены. Теплоотдача из центрального ряда трубочек коридорного пучка направленному вниз вертикально потоку статически устойчивой ячейистой пены исследована экспериментально. Результаты исследований и их зависимость от положения трубки в центральном ряду коридорного пучка труб приводятся в статье.

Результаты экспериментальных исследований обобщены между критериями Нуссельта (Nu) и Рейнольдса (Re) с учетом объемного дебиторского газосодержания ( $\beta$ ) статически устойчивого ячейистого потока пены.

Экспериментальные результаты исследования теплообмена центрального ряда коридорного пучка труб направленному вниз вертикальному потоку статически устойчивой ячейистой пены были обобщены с помощью критериального уравнения, пригодного для определения средней интенсивности теплообмена центрального ряда труб и всего пучка труб при разных параметрах статически устойчивой ячейистой пены и объемного газосодержания.

**Ключевые слова:** поток пены, теплообмен, коридорный пучок труб, статически устойчивая ячейистая пена, экспериментальный канал, объемное дебиторское газосодержание