

Koridorinių vamzdžių pluoštų aušinimo dvifazių putų srautu eksperimentinis tyrimas

Jonas Gylis¹,

Tadas Ždankus¹,

Martynas Babilas²,

Rolandas Jonynas²,

Romualdas Kėželis³

¹ Kauno technologijos universiteto
Energetikos technologijų institutas,
K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
El. paštas: jonas.gylis@ktu.lt

² Šilumos ir atomo energetikos katedra,
Kauno technologijos universitetas,
K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas
El. paštas: martynasbabilas@inbox.lt

³ Plazminių technologijų laboratorija,
Lietuvos energetikos institutas,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas: kezelis@mail.lei.lt

Šis darbas yra tęsinys ankstesnių tyrimų, kurių tikslas – sukurti ekonomišką ir saugų naujos kartos šilumokaitę, panaudosiantį dvifazių srautų privalumus. Įvykdyti tyrimai su koridoriniais $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštais, kai juos apteka laminarinis vertikaliai kylantis dvifazis putų srautas. Tyrimų metu buvo nustatyta dvifazio putų srauto greičio ir putų dujingumo įtaka įvairių geometrijų koridorinių vamzdžių pluoštų šilumos mainų intensyvumui putų sraute ir vamzdžio pozicijos pluoštuose įtaka jo šilumos mainų intensyvumui. Tyrimų rezultatai buvo apibendrinti kriterine lygtimi, kuri gali būti naudojama vamzdžių pluoštų šilumos mainų intensyvumui dvifaziuose putų srautuose apskaičiuoti.

Raktažodžiai: dvifazis srautas, putų srautas, šilumos mainai, koridorinis vamzdžių pluoštas

1. ĮVADAS

Ankstesnių tyrimų rezultatai parodė, kad dvifazio putų srauto taikymas karšto paviršiaus aušinimui įmanomas tik tuo atveju, kai putos nesuyra ir išsaugo savo struktūrą, putų srautui aptekant įkaitusius paviršius bei putų tėkmės atkarpoje, nuo jų generavimo vietos iki šilumos mainų zonos. Viena dvifazių putų rūšių, tinkamų įkaitusių paviršių aušinimui, yra statiškai stabilios putos. Šio tipo putos, net ir nutraukus jų generavimo procesą, išlaiko savo struktūrą ilgą laiką, t. y. nuo kelių minučių iki kelių parų, todėl statiškai stabilios putos gali būti taikomos kaip šilumnešis [1, 2].

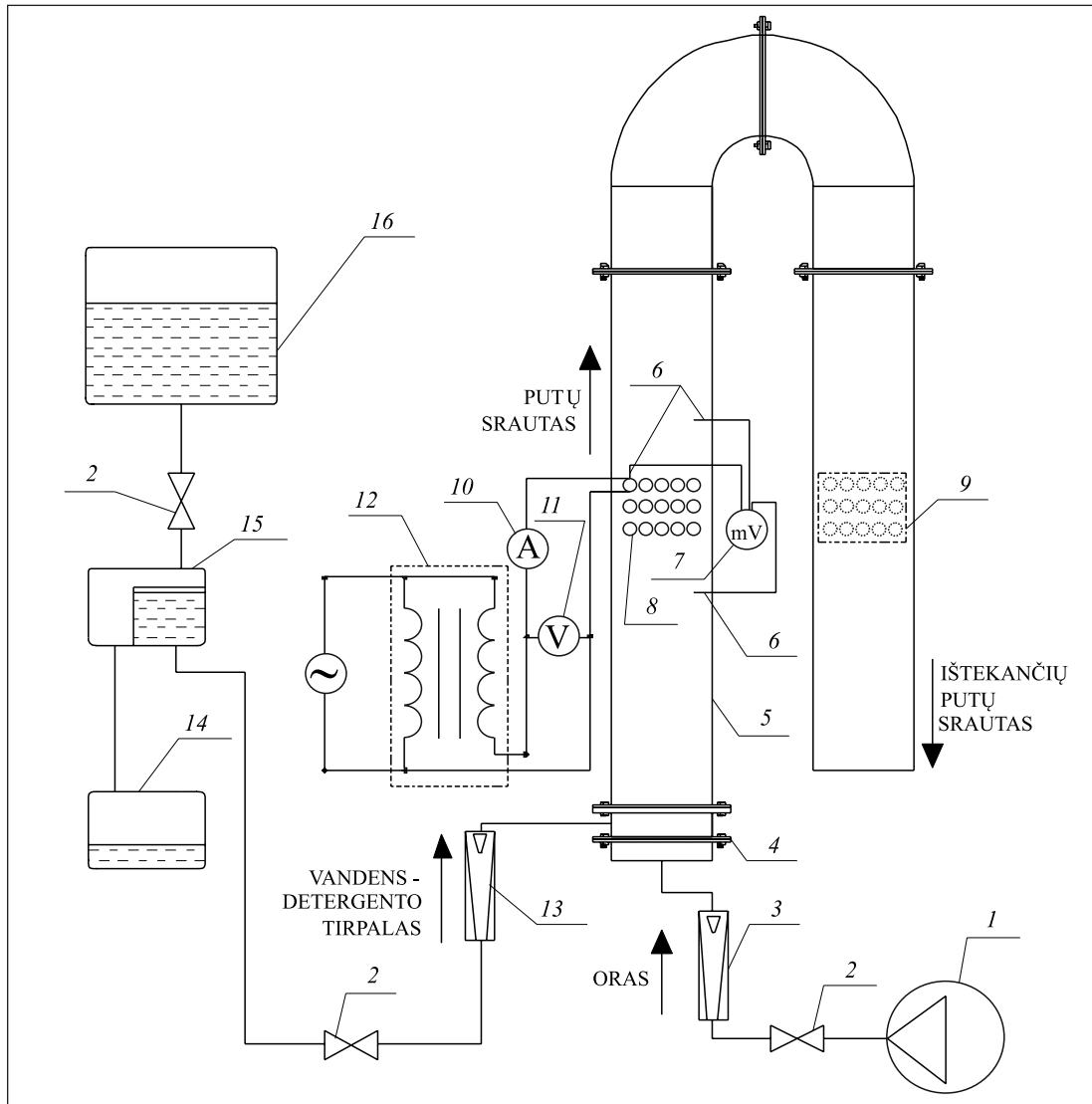
Energetikoje, technologinių procesų metu, dažnai naudojami vertikalūs šilumokaičiai, kuriuose vertikali šilumnešio tėkmė keičia savo kryptį, darydama 180° posūkį. Dėl šios priežasties eksperimentiniai tyrimai buvo vykdomi, kai vamzdžių pluoštą aptekėdavo kylantis putų srautas, taip pat po 180° posūkio besileidžiantis putų srautas. Šio darbo tiks-

las buvo nustatyti koridorinio vamzdžių pluošto, užtikrinančio intensyviausius šilumos mainus kylančiame putų sraute, konstrukcinius parametrus. Eksperimentiškai buvo ištirti keturi koridoriniai vamzdžių pluoštai su skirtingais skersiniais ir išilginiais žingsniais.

2. EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA

Eksperimentinę įrangą (1 pav.) sudarė: putų generavimo ir ardymo sistema, eksperimentinis kanalas, vamzdžių pluoštas, matavimo prietaisai ir pagalbinė įranga.

Eksperimentinių tyrimų metu putos buvo generuojamos ant specialios putų generavimo rėtinės (1 pav.). Šio proceso metu oras iš kompresoriaus į eksperimentinį kanalą ir rėtinę buvo tiekiamas iš apačios, o 0,5 % detergentų koncentracijos vandens tirpalas buvo tiekiamas ant rėtinės. Statiškai stabilių putų srautas buvo generuojamas oru barbotuojant per tirpalo, esančio ant rėtinės, sluoksnį.



1 pav. Eksperimentinio įrenginio schema. 1 – kompresorius; 2 – reguliavimo ventilis; 3 – oro kiekio matavimo prietaisas; 4 – putų generavimo rėtinė; 5 – eksperimentinis kanalas; 6 – termoporos; 7 – milivoltmetras; 8 – vamzdžių pluoštas; 9 – vamzdžių pluošto vieta, kai bandymai atliekami po 180° posūkio besileidžiančiame putų sraute; 10 – ampermetras; 11 – voltmeteras; 12 – autotransformatorius; 13 – tirpalo kiekio matavimo prietaisas; 14 – tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 15 – pastovaus lygio palaikymo indas; 16 – tirpalo rezervuaras

Putų srautas vertikaliu eksperimentiniu kanalu kilo aukštyn, pasisuko 180° kampu (posūkio spindulys $R = 0,17$) ir vertikaliai leidosi žemyn. Pirmuoju atveju eksperimentiškai tirtas prieš posūkį įmontuoto vamzdžių pluošto šilumos atidavimas vertikaliai kylančiam dvifaziam putų srautui. Šio tyrimo rezultatai aptariami šiame darbe. Antruoju atveju vamzdžių pluoštas buvo sumontuotas eksperimentiniame kanale už 180° posūkio – tirtas vamzdžių pluošto šilumos atidavimas vertikaliai besileidžiančiam putų srautui. Abiem atvejais statiškai stabilių putų srautas, ištekėjęs iš eksperimentinio kanalo, patekdavo į specialų lataką, kuriame būdavo suardomas išpurslintu vandeniu.

Tyrimų metu naudotas kalorimetras – elektra kaitinamas varinis vamzdis (išorinis skersmuo $d = 0,02$ m). Siekiant išvengti šilumos nuostolių į aplinką, kalorimetro galai buvo

termiškai izoliuoti. Kalorimetro paviršiaus temperatūra matuota aštuoniomis vario–konstantano termoporomis. Eksperimentinių tyrimų metu kalorimetras buvo įstatomas vietoje vieno iš pluošto vamzdžių. Tyrimų metu prie eksperimentinio kanalo sienelių esantys vamzdžiai kaitinami nebuvo.

Eksperimentinio kanalo matmenys: aukštis – 1,8 m, vidinis skerspjūvis – kvadratinis: $0,14 \times 0,14$ m². Eksperimentinis kanalas buvo pagamintas iš skaidraus organinio stiklo, o tai suteikė galimybę eksperimentinių tyrimų metu vizualiai sekti putų srauto struktūros pokyčius.

Putų generavimo rėtinė – 2 mm storio nerūdijančio plieno plokštelė su 1 mm skersmens skylėmis, kurios išdėstytos šachmatine tvarka, atstumas tarp jų centrų – 5 mm.

Putų srauto temperatūra prieš vamzdžių pluoštą ir po jo matuota vario–konstantano termoporomis.

Eksperimentinių tyrimų metu naudoti keturi koridoriniai vamzdžių pluoštai [3, 4]. Visų vamzdžių išorinis skersmuo $d = 0,02$ m.

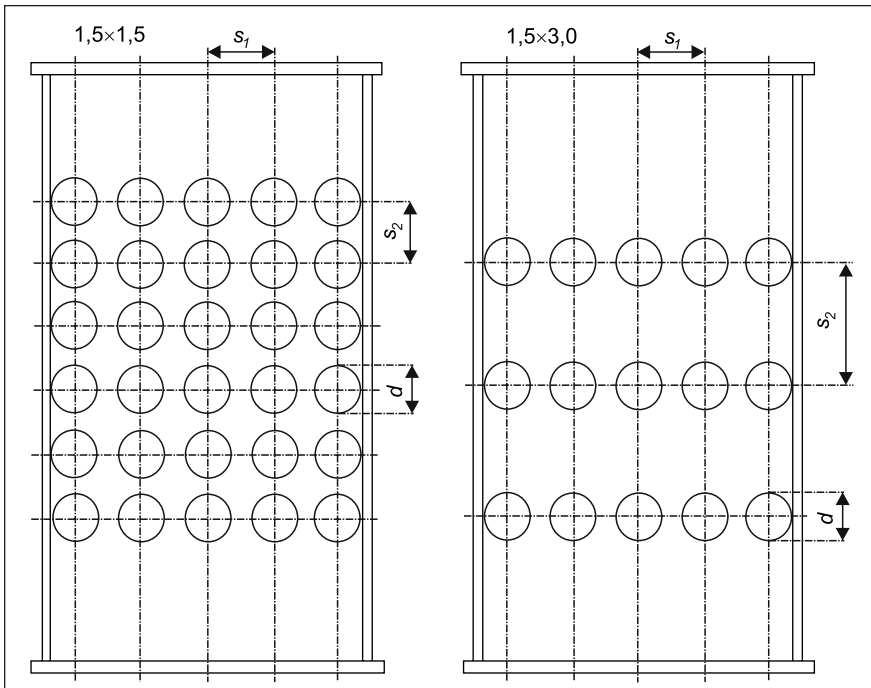
Pirmąjį koridorinį vamzdžių pluoštą sudarė šešios horizontalios vamzdžių eilės su penkiais vamzdžiais kiekvienoje (2 pav.). Atstumas tarp vamzdžių centrų eilėje $s_1 = 0,03$ m, o atstumas tarp skirtingų eilių vamzdžių centrų $s_2 = 0,03$ m. Šio koridorinio vamzdžių pluošto skersinis žingsnis: $a = s_1 / d = 1,5$, išilginis žingsnis: $b = s_2 / d = 1,5$. Toliau tekste šis pluoštas vadinamas „koridoriniu $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluoštu“ [5, 6].

Antrąjį koridorinį vamzdžių pluoštą sudarė trys horizontalios vamzdžių eilės su penkiais vamzdžiais kiekvienoje

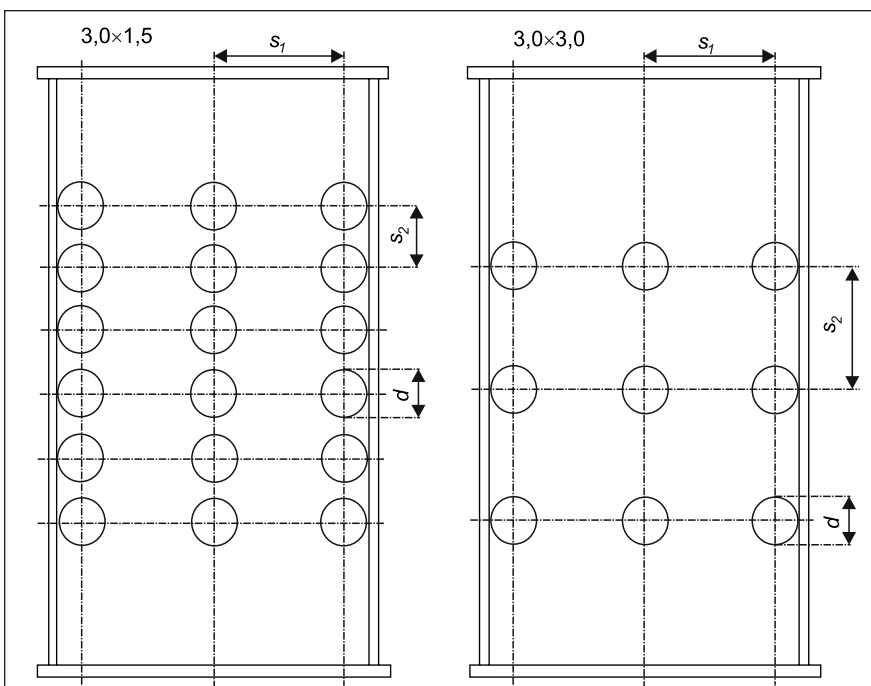
(2 pav.). Atstumas tarp vamzdžių centrų eilėje $s_1 = 0,03$ m, o atstumas tarp skirtingų eilių vamzdžių centrų $s_2 = 0,06$ m. Atitinkamai šio koridorinio vamzdžių pluošto skersinis žingsnis: $a = 1,5$, išilginis žingsnis: $b = 3,0$.

Trečiąjį koridorinį vamzdžių pluoštą sudarė šešios horizontalios vamzdžių eilės su trimis vamždžiais kiekvienoje (3 pav.). Atstumas tarp vamzdžių centrų eilėje $s_1 = 0,06$ m, o atstumas tarp skirtingų eilių vamzdžių centrų $s_2 = 0,03$ m. Atitinkamai šio koridorinio vamzdžių pluošto skersinis žingsnis: $a = 3,0$, išilginis žingsnis: $b = 1,5$.

Ketvirtąjį vamzdžių pluoštą sudarė trys horizontalios vamzdžių eilės su trimis vamždžiais kiekvienoje (3 pav.).



2 pav. Koridorinių $1,5 \times 1,5$ ir $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų struktūrinės schemos



3 pav. Koridorinių $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų struktūrinės schemos

Atstumas tarp vamzdžių centrų eilėje $s_1 = 0,06$ m, o atstumas tarp skirtingų eilių vamzdžių centrų $s_2 = 0,06$ m. Atitinkamai šio koridorinio vamzdžių pluošto skersinis ir išilginis žingsniai: $a = b = 3,0$.

Eksperimentinių tyrimų metu elektros tinklo įtampa buvo stabilizuojama ir sumažinama iki darbinės 12 V įtampos. Kaitinamojo vamzdžio–kalorimetro įtampa reguliuota reostatu. Tyrimų metu matuotos ir registruotos: įtampos kritimo ant kalorimetro galų gnybtų ir kalorimetru pratekančios elektros srovės stiprumo reikšmės. Termoporų išėjimo elektrinis signalas (mV) eksperimentinių tyrimų metu buvo matuotas specialiu aukštos tikslumo klasės multimetru.

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentiniai tyrimai vykdyti keičiant putų srauto greitį, putų dujingumą, taip pat kalorimetro padėtį vamzdžių pluošte. Gautų rezultatų analizei pasirinkta tinkamiausias priklausomumas tarp Nuselto kriterijaus, viena vertus, ir Reinoldso kriterijaus bei putų srauto dujingumo, kita vertus.

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

Tyrimų metu naudotas laminarinis statiškaiai stabilių putų srautas, kurio tūrinis debitinis dujingumas buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

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

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

Putų srauto dujų Reinoldso skaičius apskaičiuojamas taip:

$$\text{Re}_g = \frac{G_g d}{A v_g}; \quad (3)$$

čia d – pluošto vamzdžio išorinis skersmuo m; A – eksperimentinio kanalo skerspjūvio plotas m^2 ; v_g – dujų kinematinė klampa m^2/s .

Vidutinės šilumos atidavimo koeficiento reikšmės, esant nusistovėjusiam šiluminiam režimui eksperimentiniame ruože, apskaičiuojamos taip:

$$\alpha = \frac{q_w}{\Delta T}; \quad (4)$$

čia q_w – šilumos srauto tankis kalorimetro paviršiuje W/m^2 ; ΔT – temperatūrų skirtumas tarp vidutinių kaitinamo vamzdžio paviršiaus ir putų srauto temperatūrų K.

Šilumos mainams apibendrinti naudotas Nuselto kriterijus:

$$\text{Nu}_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f}; \quad (5)$$

čia λ_f – putų šilumos laidumo koeficientas $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Putų srauto šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\lambda_f = \beta \lambda_g + (1 - \beta) \lambda_p; \quad (6)$$

čia λ_g – dujų šilumos laidumo koeficientas $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_l – skysčio šilumos laidumo koeficientas $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Ankstesnių tyrimų metu buvo nustatyti keturi pagrindiniai statiškaiai stabilių putų tėkmės vertikaliame stačiakampiame kanale režimai [1]:

- Laminarinis tekėjimo režimas $\text{Re}_g = 0-600$;
- Pereinamasis tekėjimo režimas $\text{Re}_g = 600-1500$;
- Turbulentinis tekėjimo režimas $\text{Re}_g = 1500-1900$;
- Emulsinis tekėjimo režimas $\text{Re}_g > 1900$.

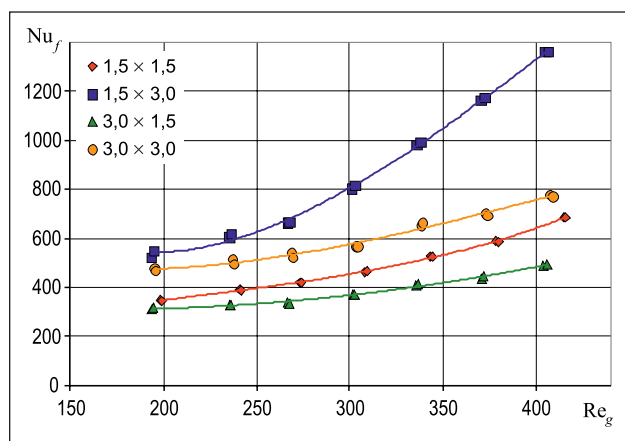
Nustatyta, kad po eksperimentinio proceso parametru reguliavimo šilumos mainai tarp vamzdžių pluošto ir putų srauto nusistovi praėjus 5 minutėms. Nuo tada nekinta nei putų srauto, nei kaitinamojo vamzdžio paviršiaus temperatūros, ir šilumos mainus galima laikyti nusistovėjusiais bei atlikti matavimus.

4. REZULTATAI

Pirmiausia eksperimentiškai ištirti koridorinio $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto ir vertikaliai kylančio dvifazio putų srauto šilumos mainai. Vėliau vietoje šio pluošto buvo sumontuotas koridorinis $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas, po to – $3,0 \times 1,5$ pluoštas ir galiausiai – koridorinis $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas. Siekiant palyginti šilumos mainų intensyvumą tarp įvairios geometrijos koridorinių vamzdžių pluoštų ir kylančio statiškaiai stabilių putų srauto, buvo apskaičiuotas vidutinis koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidurinių vertikalių eilių vamzdžių šilumos mainų intensyvumas, atsižvelgus į putų srauto dujų Reinoldso skaičių (Re_g) ir putų srauto dujingumą (β). Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidurinės vertikalių eilės vamzdžių vidutinių šilumos mainų intensyvumų priklausomumas nuo Re_g , kai $\beta = 0,996$, yra pateiktas 4 paveiksle.

Putų srautui aptekant vamzdžių pluoštą, kinta tėkmės skerspjūvio plotas ir vidutinis tėkmės greitis. Pjūviuose ties vamzdžių pluošto horizontalios vamzdžių eilės vamzdžių centrais – mažiausio tėkmės skerspjūvio vietose – vidutinis tėkmės greitis yra maksimalus. Koridorinių $1,5 \times 1,5$ ir $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų atvejais minėtuose pjūviuose tėkmės skerspjūvio plotas yra $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, o koridorinių $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų atveju – $11,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, t. y. dukart didesnis nei pirmuoju atveju. Todėl pirmuoju atveju putų srauto vidutinis greitis aptekant vamzdžių pluoštą mažiausio tėkmės skerspjūvio vietose bus dukart didesnis. Analitiškai įvertinti vidutinio, taip pat vietinio putų srauto greičio įtaką šilumos mainų intensyvumui yra sudėtingas uždavinys, nes aptekant vamzdžių pluoštą kinta ir putų vietinio dujingumo pasiskirstymas skerspjūvyje, ir putų struktūra: dalis putų burbulų suyra, kinta burbulų matmenys ir pan.

Analizuojant eksperimentinių tyrimų rezultatus, nustatyta, kad koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni tuo atveju, kai pluošto skersinis žingsnis yra mažesnis, esant tam pačiam išilginiam



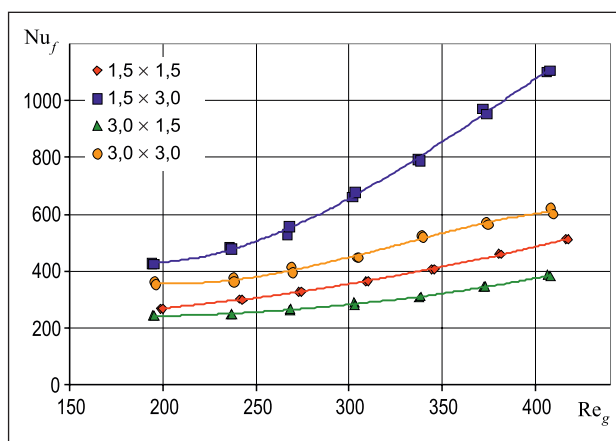
4 pav. Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidutinių vidurinių vertikalių eilių vamzdžių šilumos mainų intensyvumų palyginimas kylančiame putų sraute, kai $\beta = 0,996$

žingsniui. Koridorinio $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni nei $3,0 \times 1,5$ vamzdžių pluošto, o $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto – nei $3,0 \times 3,0$ pluošto.

Esant mažesniau koridorinio vamzdžių pluošto išilginiam žingsniui, tolesni vamzdžiai aušinami mažėjančiu intensyvumu, todėl šilumos mainai tarp vamzdžių pluošto ir putų srauto yra intensyvesni tuo atveju, kai atstumas tarp vamzdžių išilgai pluošto (išilginis pluošto žingsnis) yra didesnis, esant tam pačiam skersiniam žingsniui. Todėl koridorinio $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni nei $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto, o $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluošto – nei $3,0 \times 1,5$ pluošto.

Tiriant šilumos mainus tarp keturių skirtingos geometrijos koridorinių vamzdžių pluoštų ir kylančio putų srauto, nustatyta, kad putų srautu intensyviausiai aušinamas $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas, mažiau intensyviai – $3,0 \times 3,0$ pluoštas, dar mažiau intensyviai – $1,5 \times 1,5$ pluoštas ir neintensyviausiai – $3,0 \times 1,5$ pluoštas (4 pav.). Kintant putų srauto dujų Reinoldso skaičiui (Re_g) nuo 190 iki 410, vidutinis pluošto vidurinės vertikalių eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumas (Nu_f) kylančiame putų sraute padidėjo dvigubai koridorinio $1,5 \times 1,5$ pluošto atveju, 2,5 karto – $1,5 \times 3,0$ pluošto atveju, 1,6 karto – $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ pluoštų atvejais, kai putų dujųingumas $\beta = 0,996$. Šilumos mainų tarp koridorinio $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto ir kylančio putų srauto intensyvumas buvo didesnis vidutiniškai 1,8 karto – už koridorinio $1,5 \times 1,5$ pluošto, 2,3 karto – už $3,0 \times 1,5$ pluošto ir 1,5 karto – už $3,0 \times 3,0$ pluošto šilumos mainų intensyvumą, kai $\beta = 0,996$ ir $Re_g = 190-410$.

Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidutinių vidurinės vertikalių eilės šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo Re_g , kai $\beta = 0,997$, pateiktas 5 paveiksle. Šiuo atveju putos yra sausesnės, palyginti su $\beta = 0,996$ dujųingumo putų srautu, atitinkamai ir šilumos mainų proceso intensyvumas yra mažesnis. Tačiau galima matyti, kad išlieka tie patys dėsniniai: intensyviausiai

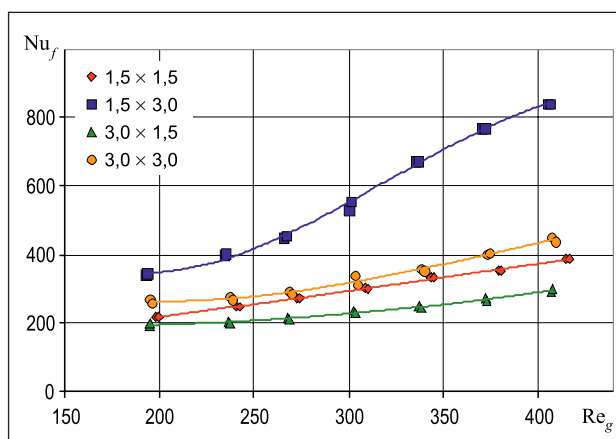


5 pav. Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidutinių vidurinių vertikalių eilių vamzdžių šilumos mainų intensyvumas kylančiame putų sraute, kai $\beta = 0,997$

aušinamas $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas, mažiau intensyviai – $3,0 \times 3,0$ pluoštas, dar mažiau intensyviai – $1,5 \times 1,5$ pluoštas ir neintensyviausiai – $3,0 \times 1,5$ pluoštas.

Kintant putų srauto dujų Reinoldso skaičiui (Re_g) nuo 190 iki 410, vidutinis vidurinės vertikalių eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumas (Nu_f) kylančiame putų sraute išaugo 1,9 karto $1,5 \times 1,5$ pluošto atveju, 2,5 karto – $1,5 \times 3,0$ pluošto atveju, 1,6 karto – $3,0 \times 1,5$ pluošto atveju ir 1,7 karto – $3,0 \times 3,0$ pluošto atveju, kai putų dujųingumas $\beta = 0,997$. Koridorinis $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas aušinamas vidutiniškai 1,5 karto intensyviau nei $3,0 \times 3,0$ pluoštas, 1,9 karto – nei $1,5 \times 1,5$ pluoštas ir 2,4 karto – nei $3,0 \times 1,5$ pluoštas ($\beta = 0,997$ ir $Re_g = 190-410$).

Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidurinės eilės vamzdžių vidutinių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo Re_g , kai $\beta = 0,998$, parodytas 6 paveiksle. Kintant putų srauto dujų Reinoldso skaičiui (Re_g) nuo 190 iki 410, vidutinis pluošto vidurinės eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumas (Nu_f) kylančiame



6 pav. Koridorinių $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų vidutinių vidurinių vertikalių eilių vamzdžių šilumos mainų intensyvumas kylančiame putų sraute, kai $\beta = 0,998$

putų sraute išaugo 1,8 karto $1,5 \times 1,5$ pluošto atveju, 2,4 karto – $1,5 \times 3,0$ pluošto atveju, 1,5 karto – $3,0 \times 1,5$ pluošto atveju ir 1,7 karto – $3,0 \times 3,0$ pluošto atveju, kai putų dujingumas $\beta = 0,998$. Šiuo atveju koridorinis $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluoštas aušinamas vidutiniškai 1,7 karto intensyviau nei $3,0 \times 3,0$ pluoštas, 1,9 karto – nei $1,5 \times 1,5$ pluoštas ir 2,5 karto – nei $3,0 \times 1,5$ pluoštas.

Ekperimentiniai koridorinių vamzdžių pluoštų šilumos mainų tyrimai vertikaliai kylančiame statiškai stabilių putų sraute buvo apibendrinti kriterine lygtimi, nusakančia priklausomumą tarp putų srauto Nuselto skaičiaus ir putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus bei putų dujingumo. Ši lygtis gali būti taikoma, kai $190 < Re_g < 410$, o putų srauto tūrinis debitinis dujingumas $\beta = 0,996; 0,997$ ir $0,998$.

$$Nu_f = c\beta^n Re_g^m \quad (7)$$

- Koridorinio $1,5 \times 1,5$ ($s_1 = s_2 = 0,03$ m) vamzdžių pluošto vidurinės vertikalios eilės vamzdžiams kylančiame putų sraute: $c = 5,7; n = 340; m = 102,1$ ($1,006 - \beta$);

- Koridorinio $1,5 \times 3,0$ ($s_1 = 0,03$ ir $s_2 = 0,06$ m) vamzdžių pluošto vidurinės vertikalios eilės vamzdžiams kylančiame putų sraute: $c = 0,29; n = -125; m = 14,3$ ($1,089 - \beta$);

- Koridorinio $3,0 \times 1,5$ ($s_1 = 0,06$ ir $s_2 = 0,03$ m) vamzdžių pluošto vidurinės vertikalios eilės vamzdžiams kylančiame putų sraute: $c = 7,4; n = -111; m = 22,8$ ($1,023 - \beta$);

- Koridorinio $3,0 \times 3,0$ ($s_1 = s_2 = 0,06$ m) vamzdžių pluošto vidurinės vertikalios eilės vamzdžiams kylančiame putų sraute: $c = 25,4; n = 363; m = 77,5$ ($1,006 - \beta$).

5. IŠVADOS

1. Eksperimentiškai ištirti koridorinių vamzdžių pluoštų šilumos mainai vertikaliai kylančiame dvifaziam putų sraute, kai vamzdžių pluošto skersinis ir išilginis žingsniai buvo: $1,5 \times 1,5; 1,5 \times 3,0; 3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$.

2. Nustatyta, kad intensyviausi šilumos mainai yra tarp koridorinio $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto ir kylančio putų srauto, mažiau intensyvūs – $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluošto, dar mažiau intensyvūs – $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto, o neintensyviausi – $3,0 \times 1,5$ pluošto atveju.

3. Nustatyta, kad iš ištirtų koridorinių vamzdžių pluoštų šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni mažesnio pluošto skersinio žingsnio atveju, esant tam pačiam išilginiam žingsniui. Koridorinio $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni nei $3,0 \times 1,5$ vamzdžių pluošto, o $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto – nei $3,0 \times 3,0$ pluošto.

4. Šilumos mainai tarp ištirtų koridorinių vamzdžių pluoštų ir putų srauto yra intensyvesni tuo atveju, kai vamzdžių pluošto išilginis žingsnis yra didesnis, esant tai pačiai skersinio žingsnio reikšmei. Koridorinio $1,5 \times 3,0$ vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame putų sraute yra intensyvesni nei $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto, o $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluošto – nei $3,0 \times 1,5$ pluošto.

5. Tyrimų rezultatai apibendrinti kriterine lygtimi, įgalinančia apskaičiuoti koridorinių $1,5 \times 1,5; 1,5 \times 3,0; 3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$ vamzdžių pluoštų šilumos atidavimą vertikaliai kylančiam dvifaziam putų srautui. Ši lygtis gali būti naudojama minėtų vamzdžių pluoštų šilumos mainų intensyvumui dvifaziuose putų srautuose apskaičiuoti.

Gauta 2009 03 16

Priimta 2010 04 30

Literatūra

1. Gylys J. *Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiškai stabilių putų sistemose*. Kaunas, 1998. 388 p.
2. Ždankus T. *Šilumos mainų tyrimas besileidžiančiam dvifaziui srautui aptekant šachmatinį vamzdžių pluoštą*. Daktaro disertacija. Kaunas, 2004. 112 p.
3. Gylys J., Zdankus T., Sinkunas S., Giedraitis V. Study of inline tube bundle cooling in vertical foam flow. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 1. Issue 6. P. 632–637.
4. Sinkunas S., Gylys J., Sunden B., Gabrielaitienė I., Zdankus T. Peculiarities of heat transfer from in-line tube bundles to upward aqueous foam flow. *Advanced Computational Methods in Heat Transfer*. 2008. Vol. X. P. 117–125.
5. Gylys J., Šinkūnas S., Zdankus T., Giedraitis V., Balčius A. Foam flow turn influence on the inline tube bundle heat transfer intensity. *WIT Transactions on Modelling and Simulation: Computational Methods and Experimental Measurements*. 2007. Vol. 46. P. 457–464.
6. Gylys J., Šinkūnas S., Zdankus T., Jonynas R., Maladauskas R. Heat transfer from in-line tube bundles to downward aqueous foam flow. In: Mammoli A. A., Brebbia C. A. (eds.). *Energy and Sustainability II: Energy 2009: Second International Conference on Energy and Sustainability*. Southampton: WIT Press, 2009. P. 379–388.

Jonas Gylys, Tadas Ždankus, Martynas Babilas,
Rolandas Jonynas, Romualdas Kėželis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INLINE TUBE BUNDLE COOLING WITH TWO-PHASE FOAM FLOW

Summary

This work is a continuation of the previous investigation with the aim to create a new heat exchanger which would be economical and safe and employ the major advantages of a two-phase flow. Series of in-line tube bundles with dimensions $1,5 \times 1,5, 1,5 \times 3,0, 3,0 \times 1,5$ and $3,0 \times 3,0$ in a two-phase laminar vertical upward foam flow were investigated in this work. The dependence of heat transfer intensity on flow parameters (velocity and the volumetric void fraction) were determined. Also, the influence of tube position in bundles on heat transfer intensity was investigated. The experimental results were summarized by a criterion equation which could be used for calculating the heat transfer intensity for tube bundles in a two-phase foam flow.

Key words: two-phase flow, foam flow, heat transfer, inline tube bundle

Йонас Гилис, Тадас Жданкус, Мартинас Бабилас,
Роландас Йонинас, Ромуалдас Кежелис

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОХЛАЖДЕНИЯ КОРИДОРНЫХ ПУЧКОВ ТРУБ
ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ ПЕНЫ**

Резюме

Эта работа – продолжение предыдущих исследований, проведенных в целях создания экономического и безопасного теплообменника нового поколения с применением преимуществ двухфазного потока. Проведена серия исследований с пучками труб $1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ и $3,0 \times 3,0$ при их обтекании вертикально вверх направленным двухфазным потоком пены. Во время исследований были установлены влияние газосодержания и скорости двухфазного потока пены на интенсивность теплообмена между пучками труб с разными геометрическими параметрами и потоком пены, а также влияние позиции трубы в пучке на интенсивность теплообмена. Результаты исследований были обобщены критериальной зависимостью для вычисления интенсивности теплообмена пучков труб, помещенных в двухфазном потоке пены.

Ключевые слова: двухфазный поток, поток пены, теплообмен, коридорный пучок труб