

Vamzdžių pluoštų aušinimas dvifaziu putų srautu

Jonas Gylys,

Tadas Ždankus,

Alpas Ingilertas

*Kauno technologijos universitetas,
Energetikos technologijų institutas,
K. Donelaičio g. 20–212,
LT-44239 Kaunas
El. paštas: jonas.gylys@ktu.lt*

Stasys Šinkūnas,

Raimondas Maladauskas

*Kauno technologijos universitetas,
Šilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20–225,
LT-44239 Kaunas
El. paštas: stasys.sinkunas@ktu.lt*

Eksperimentiškai ištirti šilumos mainai tarp vamzdžių pluošto ir vertikaliai žemyn po 180° posūkio besileidžiančio dvifazio putų srauto. Eksperimentinis tyrimų standas sudarytas iš: putų generatoriaus, eksperimentinio kanalo, vamzdžių pluošto, matavimų ir pagalbinės įrangos. Buvo tiriamas dviejų tipų vamzdžių pluoštų – šachmatinio ir koridorinio, aušinimas dvifaziu putų srautu. Nustatyta putų srauto parametrai: tėkmės greičio, tūrinio debitinio putų dujingumo ir skysčio drenažo iš putų įtaka vamzdžių pluošto šilumos mainų intensyvumui. Be to, nustatyta vamzdžio pozicijos pluošte įtaka šilumos mainų intensyvumui. Eksperimentinių tyrimų metu putų tūrinis debitinis dujingumas kito nuo 0,996 iki 0,998; putų srauto greitis – nuo 0,14 iki 0,32 m/s laminariniame tėkmės režime. Tyrimų rezultatai apibendrinti priklausomybe tarp Nuselto ir Reinoldso kriterijų bei putų dujingumo.

Raktažodžiai: šilumos mainai, vamzdžių pluoštas, putų srautas, tėkmės posūkis, eksperimentinis kanalas

1. ĮVADAS

Dvifazius putų srautus taikant įkaitusių paviršių aušinimui galima ženkliai sumažinti šilumnešio medžiagines ir energetines sąnaudas, kartu užtikrinant reikiamą šilumos mainų intensyvumą. Lyginant su vienfaziu šilumnešio atveju, atsiranda galimybė keisti šilumos mainų intensyvumą, keičiant ne tik dvifazio putų srauto greitį, bet ir dujingumą, o tai įgalina platesniame diapazone reguliuoti šilumos mainų intensyvumą. Panaudojus šilumos mainams dvifazius putų srautus, galima sukurti modernų ekonomišką naujos kartos šilumokaitį, pasižymintį kompaktiškumu, lengvumu, paprasta ir saugia eksploatacija ir užtikrinančiu didelį šilumos mainų intensyvumą.

Dvifazius putų srautus taikyti įkaitusių paviršių aušinimui galima tik tada, kai putos nesuyra ir išsaugo savo struktūrą transportavimo į šilumos mainų vietą ir šilumos mainų proceso metu. Ankstesni tyrimai [1, 2] parodė, kad viena putų rūšis – statiška stabilios putos – išlaiko savo struktūrą ir putų burbulų skersmenį ilgą laiko periodą (nuo kelių sekundžių iki kelių parų) ir nutraukus putų generavimą. Šilumos mainų tarp įkaitusių paviršių ir dvifazių putų srautų mokslinius tyrimus apsunkina nenutrūkstamai putose vykstantys šie specifiniai procesai: skysčio drenažas iš putų [3, 4], difuzinis dujų pernešimas per putų burbulų sienelės [3], burbulų sienelių–plėvelių irimas [5]. Visi šie procesai yra neatsiejamai tarpusavyje susiję

ir labai komplikuoja analitinių metodų taikymą įkaitusių paviršių šilumos mainų tyrimams dvifaziuose putų srautuose. Todėl šiame etape buvo pasirinktas ir taikytas eksperimentinis tyrimų metodas.

Ankstesnių mokslinių tyrimų metu eksperimentiškai buvo ištirti šilumos mainai tarp pavienio cilindro [1], cilindrų eilės [1], šachmatinio [2, 6] bei koridorinio [7, 8] vamzdžių pluošto ir jį aptekancio vertikaliai kylančio statiška stabilijų putų srauto. Nustatyta putų dujingumo ir putų srauto greičio įtaka šilumos mainų intensyvumui. Taip pat nustatyta vamzdžio pozicijos šachmatiniame ir koridoriniame pluošte įtaka šilumos mainų putų sraute intensyvumui. Gauti rezultatai parodė, kad vamzdžių pluoštų šilumos mainus vienfaziuose dujų ar skysčio srautuose aprašantys dėsniniai [9, 10] negali būti taikomi dvifazio putų srauto atveju.

Technologinių procesų metu energetikoje dažnai naudojami vertikaliūs daugiaėjai šilumokaičiai, kuriuose vertikali tėkmė keičia savo kryptį, darydama 180° posūkį. Siekiant sukurti daugiaėjų šilumokaitį, kuriame šilumnešiu būtų dvifaziai putų srautai, tikslinga ištirti posūkio įtaką putų srauto hidrodinamikai ir aptekamo vamzdžių pluošto šilumos mainų intensyvumui. Reikalingi dvejopi eksperimentiniai tyrimai: kai vertikaliai kylantis putų srautas atlieka 180° posūkį ir vertikaliai leidžiasi žemyn bei kai vertikaliai besileidžiantis srautas atlieka 180° posūkį ir vertikaliai kyli aukštyn. Pirmiausia buvo vykdomi eksperimentiniai

tyrimai su vertikaliai žemyn po 180° posūkio besileidžiančiu putų srautu.

Eksperimentiniams tyrimams buvo naudojamas šachmatinis ir koridorinis vamzdžių pluoštai. Eksperimentai buvo vykdomi keičiant putų tūrinį debitinį dujingumą nuo 0,996 iki 0,998. Putų srauto greitis buvo keičiamas nuo 0,14 iki 0,32 m/s (laminarinis tėkmės režimas). Kaitinamojo vamzdžio šilumos atidavimo putų srautui koeficientas kito nuo 200 iki 1800 W / (m²K). Eksperimentinių tyrimų rezultatai buvo apibendrinti kriterine lygtimi, skirta praktiniam taikymui projektuojant putų aparatus ar šilumokaičius.

2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentiniai tyrimai buvo vykdomi keičiant putų srauto greitį, keičiant putų dujingumą ir keičiant kalorimetrinio vamzdžio padėtį vamzdžių pluošte. Gautų rezultatų analizei pasirinkta priklausomybė tarp Nuselto kriterijaus, viena vertus, ir Reinoldso kriterijaus bei putų srauto dujingumo, kita vertus.

$$Nu_f = f(Re_g, \beta). \quad (1)$$

Tyrimų metu buvo naudojamas laminarinis statiškai stabilių putų srautas, kurio tūrinis debitinis dujingumas buvo apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

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

čia G_g – dujų debitas m³/s; G_l – skysčio debitas m³/s.

Putų srauto šilumos dujų Reinoldso skaičius apskaičiuojamas taip:

$$Re_g = \frac{G_g d}{A v_g}; \quad (3)$$

čia d – pluošto vamzdžio išorinis skersmuo m; A – eksperimentinio kanalo skerspjūvio plotas m²; v_g – dujų kinematinė klampa m²/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/m²; ΔT – temperatūrų skirtumas tarp vidutinių kaitinamo vamzdžio paviršiaus ir putų srauto temperatūrų K.

Šilumos mainams apibendrinti naudotas Nuselto kriterijus:

$$Nu_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f}; \quad (5)$$

čia λ_f – putų srauto šilumos laidumo koeficientas W / (m · K).

Putų srauto šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas taip:

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

čia λ_g – dujų šilumos laidumo koeficientas W / (m · K); λ_l – skysčio šilumos laidumo koeficientas W / (m · K).

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

- Laminarinis tekėjimo režimas $Re_g = 0-600$;
- Pereinamasis tekėjimo režimas $Re_g = 600-1500$;
- Turbulentinis tekėjimo režimas $Re_g = 1500-1900$;
- Emulsinis tekėjimo režimas $Re_g > 1900$.

Nustatyta, kad pakitus eksperimentinio proceso parametrams, 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 matuoti parametrus.

Visi eksperimentiniai tyrimai, siekiant sumažinti matavimo netikslumus, buvo pakartotinai vykdomi du ar tris kartus. Eksperimentinių rezultatų sklaida buvo nedidelė, kadangi variacijos koeficientas neviršijo 1 %. Bendrosios eksperimentinių rezultatų santykinės paklaidos reikšmės neviršijo 5 %. Eksperimentinių tyrimų rezultatus apdorojus statistinėmis programomis buvo nustatyta, kad jie yra pakankamai tikslūs, patikimi ir atkuriami.

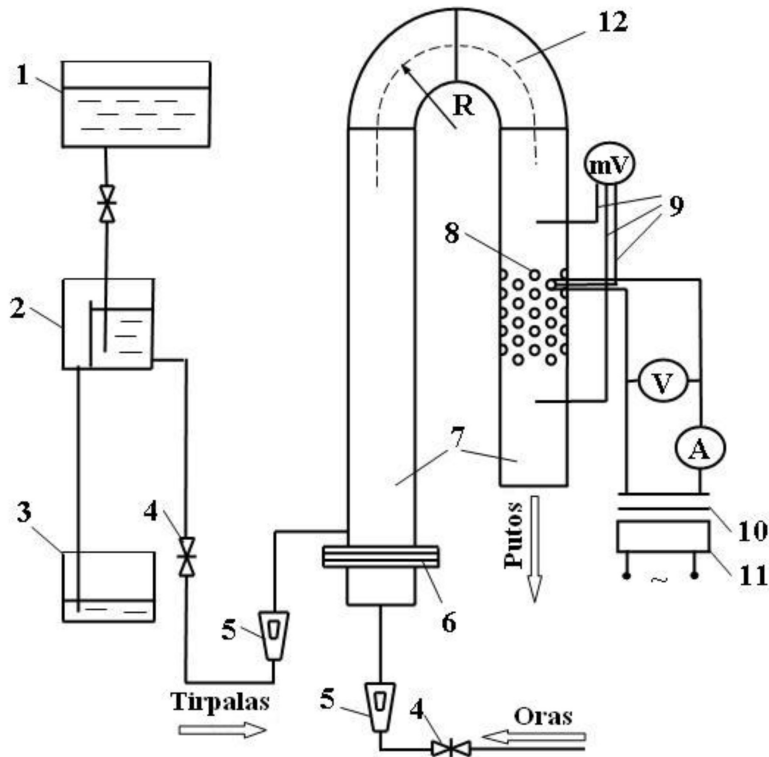
3. EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA

Vamzdžių pluošto šilumos mainų vertikaliai žemyn po 180° posūkio besileidžiančiame putų sraute eksperimentinių tyrimų įrenginio schema parodyta 1 pav. Eksperimentinį įrenginį sudarė putų generavimo ir ardymo sistema, eksperimentinis kanalas, vamzdžių pluoštas, matavimo prietaisai ir pagalbinė įranga.

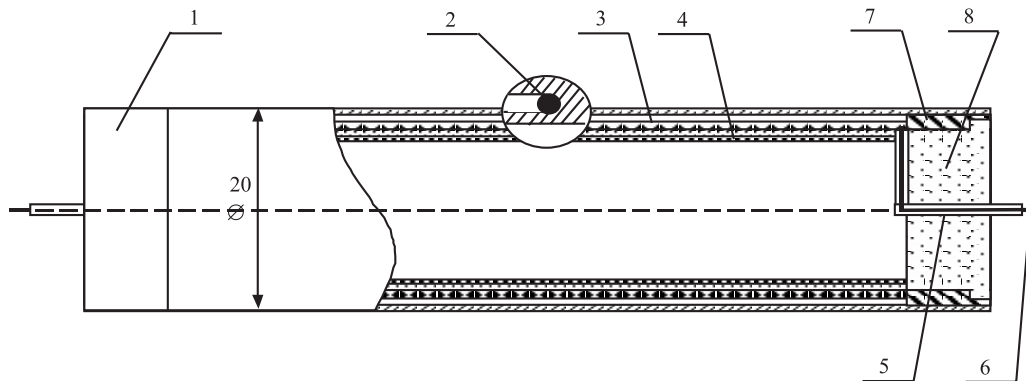
Putų generavimo sistema buvo sudaryta iš specialios putų generavimo rėtinės (1 pav.) bei skysčio (tirpalo su detergentais) ir dujų (oro) tiekimo posistemų. Atitinkamai oro tiekimo posistemę sudarė kompresorius, suslėgto oro resiveris, oro kiekio reguliavimo vožtuvas ir oro kiekio matavimo prietaisai. Oras buvo tiekiamas į eksperimentinio kanalo apačią. Statiškai stabilių putų generavimui buvo naudojamas 0,5 % detergentų koncentracijos vandens tirpalas, kuris iš tirpalo rezervuaro per pastovaus lygio palaikymo indą, kiekio reguliavimo vožtuvą ir kiekmatį buvo tiekiamas ant putų generavimo rėtinės viršaus iš visų keturių eksperimentinio kanalo sienelių pusių, siekiant išlaikyti tolygų tirpalo pasiskirstymą ant rėtinės. Statiškai stabilių putų srautas buvo gaunamas oro barbotazo per tirpalo, esančio ant rėtinės, sluoksnį metu. Putų srautas vertikaliu eksperimentiniu kanalu kilo aukštyn, atliko 180°, $R = 0,17$ m posūkį ir vertikaliai leidosi eksperimentiniu kanalu žemyn, aptekėdamas vamzdžių pluoštą. Iš eksperimentinio kanalo ištekėjęs putų srautas buvo suardomas išpurslinto vandens srautu.

Eksperimentinio kanalo aukštis buvo 1,8 m. Kanalas buvo kvadratinio skerspjūvio 0,14 × 0,14 m². Kanalo sienelės buvo pagamintos iš skaidrios medžiagos, o tai įgalino eksperimentinių tyrimų metu sekti putų srauto struktūros pokyčius.

Putų generavimui skirta rėtinė buvo pagaminta iš 2 mm storio nerūdijančio plieno plokštelės. Skylių skersmuo buvo 1 mm, jos buvo išdėstytos šachmatine tvarka, atstumas tarp skylių centrų buvo 5 mm.



1 pav. Eksperimentinio įrenginio schema: 1 – tirpalo rezervuaras; 2 – pastovaus lygio palaikymo indas; 3 – tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 4 – reguliavimo vožtuvas; 5 – kiekmatis; 6 – putų generavimo rėtinė; 7 – putų kanalas; 8 – vamzdžių pluoštas; 9 – termoporos; 10 – transformatorius; 11 – stabilizatorius; 12 – eksperimentinio kanalo posūkis



2 pav. Kaitinamojo vamzdžio–kalorimetro struktūrinė schema: 1 – kalorimetro korpusas; 2 – termoporos galvutė; 3 – kaitinimo spiralė; 4 – elektroizoliacija; 5 – termoizoliatorius; 6 – laidai; 7 – keramika; 8 – elektrotermoizoliacinė medžiaga

Eksperimentiniams tyrimams buvo pagamintas kalorimetras – elektra kaitinamas varinis vamzdis (2 pav.) (išorinis skersmuo – 0,02 m), įgalinantis eksperimentus vykdyti sąlygomis, artimomis $q_w = \text{const}$. Siekiant išvengti šilumos nuostolių į aplinką kalorimetro galai buvo termiškai izoliuoti. Kalorimetro paviršiaus temperatūra matuota aštuoniomis vario–konstantano termoporomis, kurių šešios išdėstytos vienodais atstumais kalorimetro perimetro centrinėje dalyje, o likusios dvi – kalorimetro galuose, 50 mm atstumu nuo jo centro. Eksperimentinių tyrimų metu kalorimetras buvo įstatomas vietoje vieno iš pluošto vamzdžių.

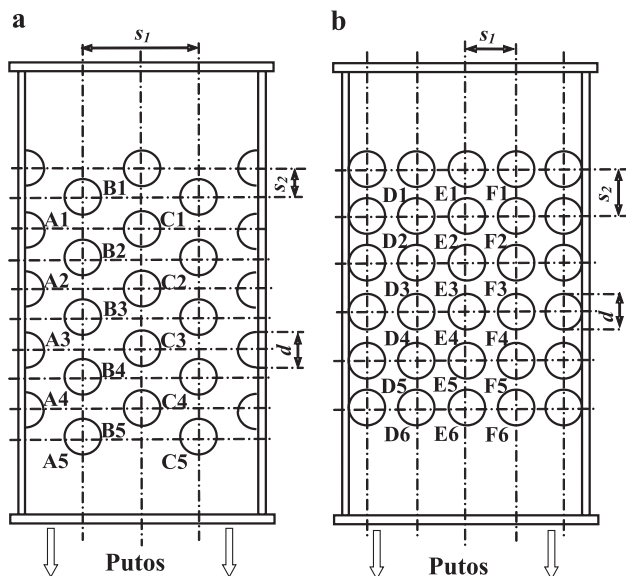
Statiškai stabilių putų srauto temperatūros matuotos dviem vario–konstantano termoporomis, įrengtomis prieš ir po eksperimentinio ruožo.

Eksperimentiniams tyrimams naudoti šachmatinis ir koridorinis vamzdžių pluoštai. Šachmatinį vamzdžių pluoštą

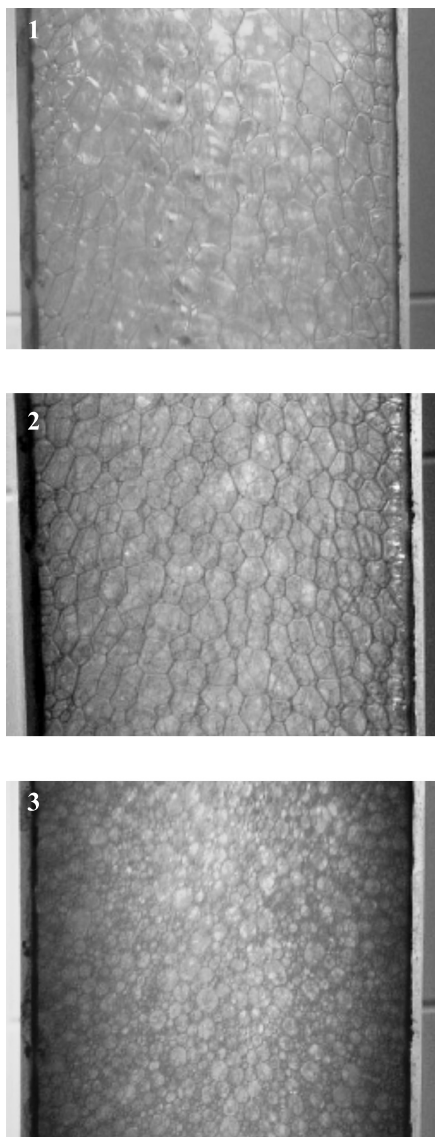
(3 pav. a) sudarė trys vertikalių vamzdžių eilės. Kiekvienoje eilėje buvo sumontuoti penki vamzdžiai, kurių kiekvieno išorinis skersmuo buvo 0,02 m. Atstumas tarp vertikalių vamzdžių eilių $s_1 = 0,07$ m. Atstumas tarp vamzdžių išilgai kanalo $s_2 = 0,0175$ m. Atitinkamai šio vamzdžių pluošto skersinis žingsnis $a = s_1 / d = 3,5$, išilginis žingsnis $b = s_2 / d = 0,875$.

Koridorinį vamzdžių pluoštą sudarė penkios vertikalių vamzdžių eilės po šešis vamzdžius (3 pav. b). Visų vamzdžių išorinis skersmuo buvo 0,02 m, atstumai tarp vamzdžių centrų: $s_1 = s_2 = 0,03$ m. Skersinis ir išilginis vamzdžių pluošto žingsniai buvo $1,5 \times 1,5$. Tyrimų metu prie eksperimentinio ruožo sienelių esantys vamzdžiai vertikaliuose eilėse nebuvo kaitinami.

Eksperimentinių tyrimų metu elektros įtampa buvo stabilizuojama specialiu stabilizatoriumi, o paskui transformatoriumi sumažinama iki darbinės. Tyrimų metu buvo matuojamos ir registruojamos įtamos kritimo ant kalorimetro galų



3 pav. Šachmatinio (a) ir koridorinio (b) vamzdžių pluoštų struktūrinės schemas

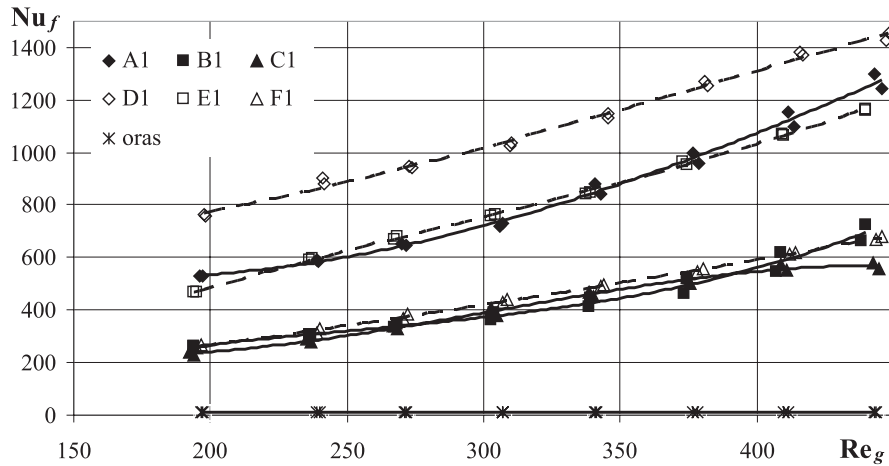
4 pav. Putų srauto struktūra ($Re_g = 190$); 1 – $\beta = 0,998$,
2 – $\beta = 0,997$, 3 – $\beta = 0,996$

gnybtų ir kalorimetru pratekančios elektros srovės reikšmės. Termoporų išėjimo elektrinis signalas (mV) eksperimentinių tyrimų metu buvo matuojamas specialiu aukštos tikslumo klasės multimetru.

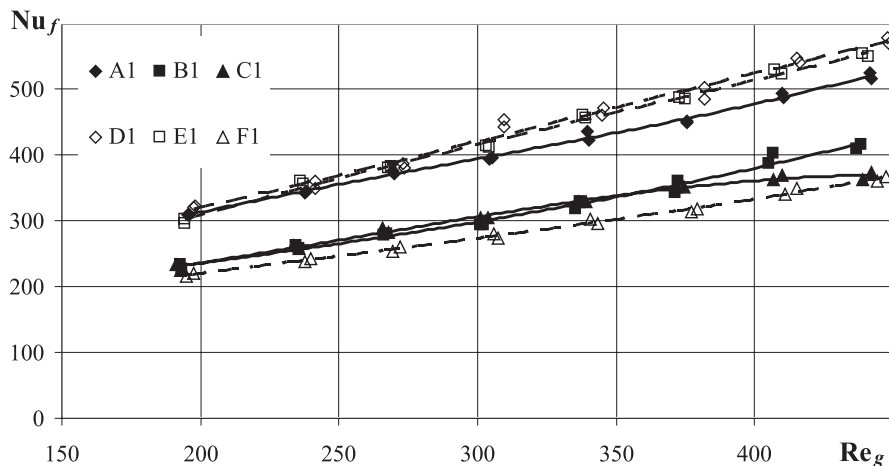
4. REZULTATAI

Eksperimentiniai rezultatai parodė aiškų vamzdžių pluoštų šilumos mainų intensyvumo priklausomumą nuo statiskai stabilių putų srauto greičio bei putų srauto dujingumo ir struktūros tuo pačiu metu. Putų struktūrą galima apibūdinti vienu pagrindinių parametru – putų burbulų skersmeniu. Tačiau šio parametro reikšmė priklauso ne tik nuo generuojamų putų dujingumo, bet ir nuo pačių putų generavimo sąlygų. Didelio burbulų skersmens putų srautas yra išgaunamas, kai putų generavimui tiekiamo oro kiekio G_g ir atitinkamai Re_g reikšmės yra nedidelės. Kai putų tūrinis debitinis dujingumas $\beta = 0,998$, o $Re_g = 190$, putų srauto vidutinis burbulų skersmuo $d_b = 15 \pm 2$ mm (4 pav. 1). Putų srauto struktūros priklausomybė nuo putų dujingumo, esant toms pačioms Re_g reikšmėms, parodyta 4 pav. Drėgnųjų tirtų putų ($\beta = 0,997$) srauto vidutinis burbulų skersmuo $d_b = 10 \pm 1,5$ mm (4 pav. 2), kai $Re_g = 190$ ir pačių drėgniausių ($\beta = 0,996$) putų vidutinis burbulų skersmuo $d_b = 5 \pm 1$ mm (4 pav. 3). Didėjant putų generavimui tiekiamo oro kiekiui (Re_g reikšmės artėja prie 400) yra generuojamas putų srautas su maždaug 1,5–2 kartus mažesniu vidutiniu putų burbulų skersmeniu, tuo pačiu putų srautas pasidaro homogeniškesnis. Putų srautui aptekant kliūtį – vamzdžių pluoštą, putų burbulai yra maišomi, dalis burbulų suyra, dalis skyla, todėl vidutinis putų burbulų skersmuo dar labiau sumažėja.

Šachmatinio vamzdžių pluošto ($3,5 \times 0,875$) šilumos atidavimo besileidžiančiam po 180° posūkio statiskai stabilių putų srautui intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto greičio (Re_g) ir putų dujingumo (β) parodyta 5 pav. Matyti, kad vamzdžių šilumos mainai putų sraute yra daug kartų intensyvesni nei vienfaziam oro sraute esant toms pačioms srauto greičio reikšmėms (5 pav.). Kaip matyti pateiktame paveiksle, ir šachmatinio, ir koridorinio vamzdžių pluoštų vamzdžiai, esantys arčiau vidinės eksperimentinio kanalo sienelės (A1 ir D1), yra aušinami intensyviau nei patalpinti kanalo viduryje (B1 ir E1) ar prie išorinės kanalo sienelės (C1 ir F1). Šis reiškinys gali būti paaiškinamas dėl skysčio drenažo iš putų įtakos susidariusiu netolygiu putų vietinio dujingumo pasiskirstymu kanalo skerspjūvyje. Skystis iš putų išteka arba drenuojasi Plato–Gibso kanalais, veikiamas traukos ir kapiliarinių jėgų. Putose vertikalia kryptimi šios jėgos veikia kartu. Horizontalia kryptimi traukos jėgų poveikio nėra, ir visi procesai putų gardelių (burbulų) sienelėse vyksta veikiant kapiliarinėms jėgoms. Elektrostatinės bei molekulinės jėgos taip pat turi įtaką skysčio drenažui, tačiau šių jėgų poveikis nėra žymus. Putų srautui darant posūkį, atsiranda skysčio drenažui įtakos turinti traukos jėgų dedamoji, veikianti skersai putų srauto. Todėl vyksta skysčio drenažas iš putų, nukreiptas skersai putų srauto, kryptimi nuo išorinės kanalo sienelės link vidinės kanalo sienelės. Todėl po posūkio tekančiame putų sraute lokalinis putų dujingumas yra didžiausias prie išorinės kanalo sienelės, čia putos yra sausiausios (C ir F vamzdžiai), o pačios drėgniausios putos yra prie vidinės kanalo sienelės (A ir D vamzdžiai).



5 pav. Šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) ir koridorinio ($1,5 \times 1,5$) pluoštų pirmųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,996$, ir vamzdžio E1 šilumos atidavimas oro srautui



6 pav. Šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) ir koridorinio ($1,5 \times 1,5$) pluoštų pirmųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,998$

Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainai putų sraute yra intensyvesni už šachmatinio visame Re_g diapazone ir tai galima paaiškinti tuo, kad koridorinio vamzdžių pluošto atveju srauto tėkmės skerspjūvio plotas aptekant vamzdžius yra mažesnis ir tėkmės vidutinis greitis pasiekiamas didesnis. Ryškus skirtumas yra tarp kairės ir vidurinės eilės vamzdžių (A1 ir D1; B1 ir E1) šilumos mainų intensyvumų, tuo tarpu dešinės-šoninės eilės vamzdžiai aušinami beveik vienodu intensyvumu (5 pav.). Kintant Re_g reikšmėms nuo 190 iki 440, vamzdžio A1 šilumos mainų intensyvumas išauga 2,4 karto (Nu_f reikšmė padidėja nuo 531 iki 1270), vamzdžio B1 – 2,6 karto (Nu_f padidėja nuo 262 iki 691), o vamzdžio C1 – 2,4 karto (Nu_f kinta nuo 235 iki 568), kai $\beta = 0,996$. Atitinkamai koridorinio vamzdžių pluošto atveju vamzdžio D1 šilumos mainų intensyvumas išauga 1,9 karto (Nu_f kinta nuo 762 iki 1442), vamzdžio E1 – 2,5 karto ($Nu_f = 468-1164$), o vamzdžio F1 – 2,6 karto ($Nu_f = 261-674$).

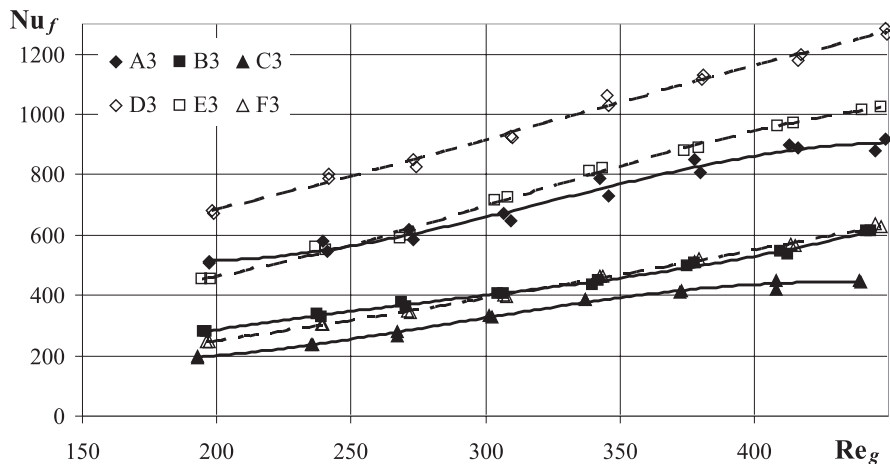
Vamzdžių B1 ir C1 šilumos mainų intensyvumas yra beveik vienodas iki $Re_g = 375$, o vamzdžio A1 yra aušinamas beveik du kart intensyviau už vamzdžius B1 ir C1, visame Re_g diapazone, kai $\beta = 0,996$.

Šachmatinio ir koridorinio pluoštų pirmųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,998$, yra parodytas 6 pav. Analogiškai drėgnų putų atvejui ($\beta = 0,996$) šachmatinio pluošto vamzdžiai B1 ir C1 yra aušinami beveik vienodai

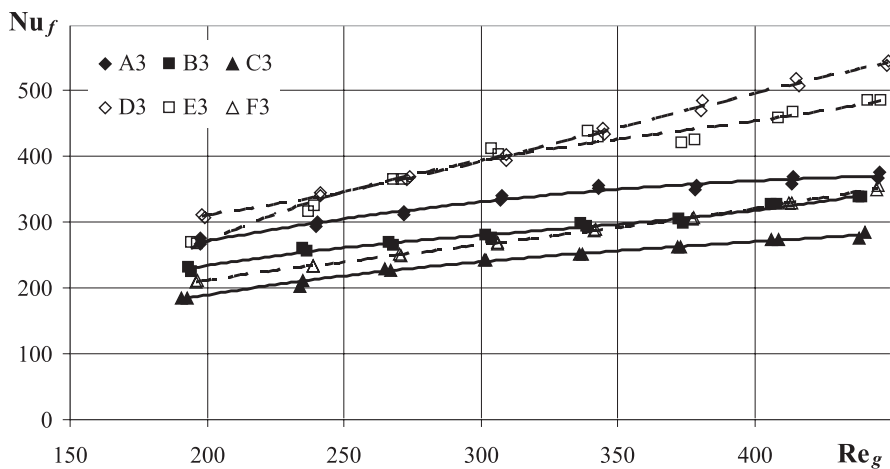
iki $Re_g = 375$, nuo tada vamzdžio B1 yra aušinamas intensyviau. Kitaip nei ankstesniu atveju, vamzdžio A1 šilumos mainai tik 32 % yra intensyvesni už B1 ir C1 vamzdžių šilumos mainus. Koridorinio vamzdžių pluošto vamzdžių D1 ir E1 aušinimas yra panašaus intensyvumo visame Re_g diapazone, o vamzdžio F1 šilumos mainų intensyvumas yra dukart mažesnis.

Trečiųjų šachmatinio ir koridorinio pluoštų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,996$, yra pavaizduotas 7 pav. Šachmatinio pluošto vamzdžio A3 šilumos mainų intensyvumas yra 66 % didesnis už B3 vamzdžio, kurio šilumos mainai yra 30 % intensyvesni nei C3 vamzdžio, kai putų dujingumas $\beta = 0,996$. Koridorinio pluošto atveju vamzdžio D3 aušinamas 31 % intensyviau nei vamzdžio E3, kuris savo ruožtu net 73 % intensyviau aušinamas, lyginant su F3 vamzdžiu (7 pav.). Toks „nevienodas“ vamzdžių aušinimas yra nulemtas vamzdžių išdėstymo pluoštuose geometriniais skirtumais. Pažymėtina, kad visame Re_g diapazone geriau aušinami koridorinio pluošto tretieji vamzdžiai, kai $\beta = 0,996$.

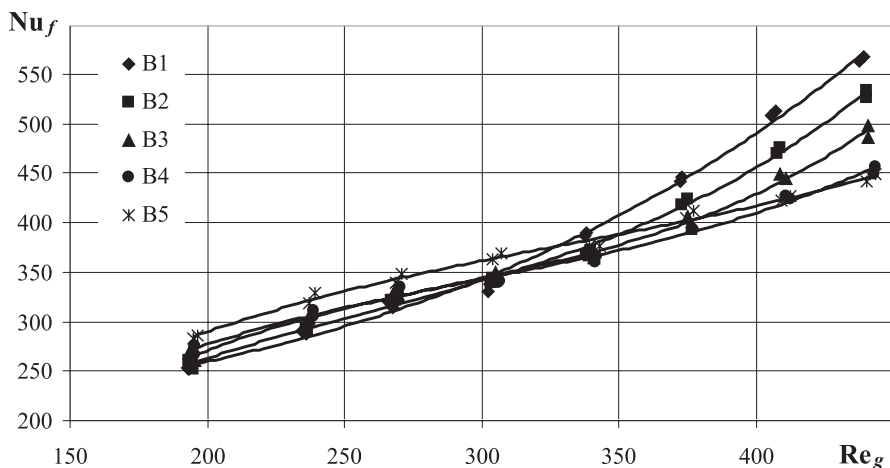
Šachmatinio ir koridorinio pluoštų trečiųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,998$, yra parodytas 8 pav. Šachmatinio pluošto vamzdžio A3 šilumos mainų intensyvumas yra 64 % didesnis už B3 vamzdžio, B3 vamzdžio šilumos mainai yra 29 % intensyvesni nei C3 vamzdžio, kai putų dujingumas $\beta = 0,998$. Koridorinio pluošto atveju D3



7 pav. Šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) ir koridoro ($1,5 \times 1,5$) pluoštų trečiųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,996$



8 pav. Šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) ir koridoro ($1,5 \times 1,5$) pluoštų trečiųjų vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus, kai $\beta = 0,998$



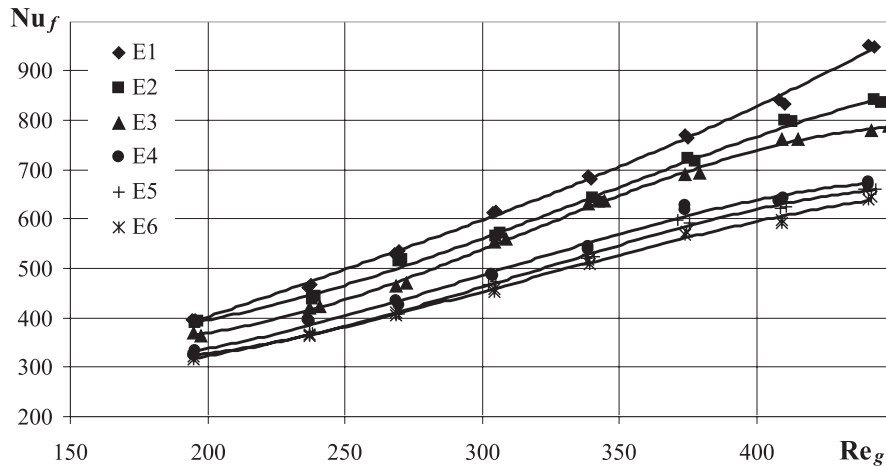
9 pav. Šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) vamzdžių pluošto vidurinės eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus ir vamzdžio pozicijos pluošte, kai $\beta = 0,997$

vamzdžio šilumos mainai 31 % intensyvesni nei E3 vamzdžio, kurio šilumos mainai 74 % intensyvesni už F3 vamzdžio.

Šachmatinio vamzdžių pluošto vidurinės eilės vamzdžių eilės šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo putų srauto dujų Re_g pateikta 9 pav. Šachmatinio vamzdžių pluošto pirmojo, antrojo, trečiojo ir ketvirtojo (B1–B4) vamzdžių šilumos mainų intensyvumas yra praktiškai vienodas Re_g kitimo ribose nuo 190 iki 310. Tik paskutinis – penktasis (B5), vamzdis yra aušinamas intensyviausiai. Re_g pasiekus 310 reikšmę, žymiai suintensyvėja pirmojo (B1) vamzdžio šilumos mainai, analogiškai kinta ir antrojo, trečiojo bei šiek tiek mažiau ketvirtojo vamzdžių šilumos

mainų intensyvumas. Tik paskutinis, penktasis, vamzdis yra aušinamas mažiau.

Koridoro vamzdžių pluošto vidurinės eilės vamzdžių eilės šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo putų srauto dujų Re_g parodytas 10 pav. Iš karto galima pastebėti keletą esminių skirtumų, lyginant su šachmatinio pluošto atveju. Koridoro pluošto pirmasis vidurinės eilės vamzdis (E1) yra aušinamas geriausiai visame Re_g diapazone, prasčiau aušinamas antrasis (E2), dar prasčiau trečiasis (E3) ir t. t. Paskutinio, šeštojo (E6), koridoro pluošto vamzdžio šilumos mainų intensyvumas yra mažiausias.



10 pav. Koridorinio ($1,5 \times 1,5$) vamzdžių pluošto vidurinės eilės vamzdžių šilumos mainų intensyvumo priklausomumas nuo besileidžiančio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus ir vamzdžio pozicijos pluošte, kai $\beta = 0,997$

Ekspirimentiniai šachmatinio ir koridorinio vamzdžių pluoštų šilumos mainų tyrimai vertikaliai besileidžiančiame po 180° posūkio statiškai stabilų putų sraute buvo apibendrinti kriterine lygtimi, nusakančia priklausomybę tarp putų srauto Nuselto skaičiaus ir putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus bei putų dujingumo. Ši lygtis gali būti taikoma skaičiuoti šachmatinio ($3,5 \times 0,875$) ir koridorinio ($1,5 \times 1,5$) vamzdžių pluoštų šilumos mainų putų sraute intensyvumą, kai $190 < Re_g < 440$, o putų srauto tūrinis debitinis dujingumas $\beta = 0,996, 0,997$ ir $0,998$:

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

Vidutiniškai visai šoninei–kairei (A) šachmatinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 153, n = 881, m = 217,66-217,65\beta$. Vidutiniškai visai vidurinei (B) šachmatinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 142, n = 1091, m = 224,31-224,25\beta$. Vidutiniškai visai šoninei–dešinei (C) šachmatinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 318, n = 1560, m = 282,06-282,1\beta$ ir vidutiniškai visam šachmatiniam ($3,5 \times 0,875$) vamzdžių pluoštui: $c = 134, n = 1025, m = 223,25-223,2\beta$.

Vidutiniškai visai šoninei–kairei (D) koridorinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 4, n = -286,5, m = 22,5 (1,03-\beta)$. Vidutiniškai visai vidurinei (E) koridorinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 16,1, n = 518, m = 140,7 (1,003-\beta)$. Vidutiniškai visai šoninei–dešinei (F) koridorinio pluošto vamzdžių eilei: $c = 106,6, n = 1345, m = 270,5 (1,0004-\beta)$ ir vidutiniškai visam koridoriniam vamzdžių pluoštui: $c = 12,7, n = 334, m = 114,6 (1,004-\beta)$.

5. IŠVADOS

1. Ekspirimentškai ištirti šilumos mainai besileidžiančiam statiškai stabilų putų srautui, prieš tai pasisukus 180° kampu, aptekant šachmatinį ($3,5 \times 0,875$) ir koridorinį vamzdžių pluoštus ($1,5 \times 1,5$).

2. Nustatyta, kad koridorinio vamzdžių pluošto ($1,5 \times 1,5$) vamzdžiai yra geriau aušinami besileidžiančiu po posūkio statiškai stabilų putų srautu, palyginti su šachmatinio pluošto ($3,5 \times 0,875$) atveju, visame tirtame putų srauto greičio diapazone.

3. Atskleista skysčio drenažo iš putų įtaka vamzdžių šilumos mainų intensyvumui. Tiek šachmatinio, tiek koridorinio pluošto atvejais, kaip ir buvo galima tikėtis, intensyviau aušinami vamz-

džiai, esantys arčiau vidinės (kairės) ekspirimentinio kanalo sienelės.

4. Nustatyta, kad šachmatinio ir koridorinio vamzdžių pluoštų aušinimas dvifaziu putų srautu skiriasi nuo vamzdžių pluoštų šilumos mainų vienfaziuose srautuose. Dvifaziame sraute šilumos mainai intensyviau vyksta priekinėse vamzdžių eilėse, o vienfazio srauto atveju – tolesnėse vamzdžių eilėse.

5. Ekspirimentiniai tyrimų rezultatai apibendrinti kriterine lygtimi, kuri papildo turimus ankstesnių tyrimų rezultatus ir gali būti panaudota projektuojant statiškai stabilų putų šilumokaičius.

Gauta 2008 12 10
Priimta 2009 01 16

Literatūra

1. Gylys J. Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiškai stabilų putų sistemose. Kaunas: Technologija, 1998. 386 p.
2. Gylys J., Jakubčionis M., Sinkunas S., Zdankus T. Peculiarities of tube bank heat transfer in cross foam flow // Heat transfer VII. Advanced Computational Methods in Heat Transfer: Seventh International Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer. 2002. P. 461–470.
3. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. Москва: Химия, 1983. 262 с.
4. Sadoc J. F., Rivier N. Foams and emulsions // Nato ASI Series. 1997. 596 p.
5. Vilkovala N. G., Kruglyakov P. M. Investigation of foam and emulsion destruction under the great pressure gradients // Advances in Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 108–109. P. 159–165.
6. Gylys J., Jakubčionis M., Sinkunas S., Zdankus T. Analysis of staggered tube bank heat transfer in cross foam flow // 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. South Africa, 2002. Vol. 1. Part 2. P. 1115–1120.
7. Gylys J., Zdankus T., Sinkunas S., Giedraitis V. Study of in-line tube bundle cooling in vertical foam flow // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 1. Issue 6. P. 632–637.

8. Gylys J., Šinkūnas S., Ždankus T., Giedraitis V., Balčius A. Foam flow turn influence on the in-line tube bundle heat transfer intensity // WIT Transactions on Modelling and Simulation: Computational Methods and Experimental Measurements XIII. 2007. Vol. 46. P. 457–464.
9. Žukauskas A. Конвективный перенос в теплообменниках. Москва: Наука, 1982. С. 472.
10. Hewitt G. F. Heat Exchanger Design Handbook. New York: Begell House, 2002. P. 320.

**Jonas Gylys, Tadas Ždankus, Alpas Ingilertas,
Stasys Šinkūnas, Raimondas Maladauskas**

TWO-PHASE FOAM FLOW FOR TUBE BUNDLE COOLING

Summary

Heat transfer from tube bundles to vertical downward two-phase foam flow after the 180-degree turn was investigated experimentally. An experimental setup of the investigation consisted of the foam generator, experimental channel, a tube bundle, measurement and auxiliary equipment. The cooling of staggered and in-line tube bundles in a two-phase foam flow was investigated. We determined the dependence of heat transfer intensity on flow parameters: flow velocity, the volumetric void fraction of foam and liquid drainage from foam. Also, the influence of tube position in the bundle on heat transfer intensity was investigated. The volumetric void fraction of the foam was 0.996–0.998; foam flow velocity was 0.14–0.32 m/s (the laminar foam flow regime). The results of the study

were summarized using relationships between the Nusselt number and the Reynolds number and the volumetric void fraction of foam.

Key words: heat transfer, tube bundle, foam flow, flow turn, experimental channel

**Йонас Гилис, Тадас Жданкус, Алпас Ингилертас,
Стасис Шинкунас, Раймондас Маладаускас**

ОХЛАЖДЕНИЕ ПУЧКОВ ТРУБ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ ПЕНЫ

Резюме

Проведены экспериментальные исследования теплообмена между пучком труб и вертикально вниз после поворота 180° направленным двухфазным потоком пены. Экспериментальная установка научных исследований состоялась из пеногенератора, экспериментального канала, пучка труб, измерительной и вспомогательной аппаратуры. Исследовано охлаждение пучков труб двух типов – шахматного и коридорного в двухфазном потоке пены. Установлено влияние параметров потока: скорости потока, газосодержание пены и дренажа жидкости из пены на интенсивность теплообмена. Исследовано также влияние позиции труб в пучке на интенсивность теплообмена. Газосодержание пены было 0,996–0,998; скорость течения пены 0,14–0,32 м/с – ламинарный режим потока. Результаты обобщены зависимостью между критерием Нуссельта, критерием Рейнольдса и газосодержанием пены.

Ключевые слова: теплообмен, пучок труб, поток пены, поворот потока, экспериментальный канал