

Koridorinio vamzdþiø pluoðto ðilumos mainai kylanèiame statiðkai stabilio putø sraute

Jonas Gylys,

Tadas Þdankus

*Kauno technologijos universiteto
Energetikos technologijø institutas,
K. Donelaièio g. 20, LT-44239 Kaunas*

Stasys Ðinkùnas,

Vidmantas Giedraitis

*Kauno technologijos universitetas,
Ðilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaièio g. 20, LT-44239 Kaunas*

Daugelio technologinio procesø intensyvumas priklauso nuo tarpfazinio kontakto (tarp skysèio ir dujø) pavirðiaus. Putos pasiþymi nepaprastai dideliu tarpfazinio kontakto pavirðiumi ir gali bûti naudojamos ávairios paskirties ðilumos ir masës mainø procesuose. Statiðkai stabilio putø panaudojimas ðilumos mainø procesuose pasiþymi daugeliu privalumø, palyginti su vienfaziu skysèiu: maþi naudojamo skysèio kiekiai, sàlyginai didelis ðilumos atidavimo intensyvumas, o árenginio masë yra gerokai maþesnë.

Putø srauto tekëjimas ir ðilumos mainai jame yra sudëtingas reiškinys. Putos yra dvifazë sistema, putø struktûra aptekant kliûtis kinta: putø burbulø dydis keièiasi, vyksta skysèio drenaþo ið putø procesas ir t. t. Analitinio metodo taikymas dël minëtø ypatumø tampa komplikuoatas, todël ðilumos mainø putose tyrimams buvo pasirinktas eksperimentinis metodas. Tyrimams naudotas eksperimentinis árenginys, susidedantis ið putø generatoriaus, vertikalaus kvadratinio skerspjuvio kanalo ir koridorinio vamzdþiø pluoðto. Eksperimentiniai koridorinio vamzdþiø pluoðto ðilumos mainø tyrimai vertikaliai kylanèiame statiðkai stabilio putø sraute buvo apibendrinti kriterinëmis lygtimis, ágalinanèiomis apskaièiuoti viso koridorinio vamzdþiø pluoðto vamzdþiø vidutiná ðilumos mainø intensyvumà, esant ávairiems statiðkai stabilio putø srauto parametrams ir dujingumams.

Raktaþodþiai: putø srautas, ðilumos mainai, koridorinis vamzdþiø pluoðtas, statiðkai stabilios putos, eksperimentinis kanalas, tûrinis debitinis dujingumas

1. ÁÞANGA

Naujø ðilumneðiø, ágalinanèio intensyvinti ðilumos mainus, kartu sumaþinant energetines bei medþiagines proceso sànaudas, paieðka yra vienas svarbiø terminininerijos ir energetikos mokslø uþdavinio. Ðiuo poþiûriu ypaè perspektyviu ðilumneðiu laikytinos dvifazës sistemos, tarp jø statiðkai stabilios putos. Tyrimai parodë, kad putø srautui auðinant ákaitusius pavirðius, netgi esant maþiems masës srautams, pasiekiamos palyginti didelës ðilumos atidavimo koeficiento reikðmës. Putos pasiþymi nepaprastai dideliu tarpfazinio kontakto pavirðiumi ir yra gera terpë ávairios paskirties ðilumos ir masës mainø procesams. Minëtø procesø efektyvumas priklauso nuo putø srauto hidromechanikos ir ðilumos mainø tarp putø srauto ir aptekamø pavirðio.

Putos – tai dispersinë sistema, susidedanti ið dujø (garø) burbulø – gardelio, atskirtø skysèio plëvelėmis. Dujos laikomos dispersine faze, o skystis – dispersine terpe. Dujø burbulus skirianèios skysèio

plëvelës sudaro specifinius plëvelinius „griauèius“, kurie yra putø struktûros pagrindas. Putø dispersinë terpë gali bûti ir kieta medþiaga, taèiau tokio tipo putos nėra ðio tyrimo objektas. Tiriant putas ir jø srautus, tenka skirti kelis, tarpusavyje susijusius, procesus: putø susidarymo (generavimo) procesas; putø stabilumo periodas; putø irimas (suardymas). Putos, kaip ir kitos dispersinės sistemos, gali bûti gaunamos dviem būdais: dispergavimo ir kondensacijos [1]. Labiausiai paplitë barbotuotinio tipo putø aparatai. Barbotuojant dujas á skystá [1, 2], perteklinis slëgis burbulu viduje yra atsveriamas pavirðiaus átempimo jëgø. Gryname skystyje susidaræs burbulas, pasiekæs skysèio pavirðio, suyra, nes gryni skysèiai pasiþymi dideliu pavirðiaus átempimu ir dideliu pertekliniu slëgiu burbulu viduje, o burbulu sienelio stiprumas yra nepakankamas. Dël ðios prieþasties statiðkai stabilios putos yra formuojamos tiktai ið detergentø tirpalø, pasiþyminèio maþesniu pavirðiaus átempimu [2, 3]. Esant nedideliam pavirðiaus átempimui ir kartu maþam pertekliniam slëgiui bur-

bulo viduje, jo sienelės stiprumo pakanka tam, kad burbulas kurį laiką nesuirtų skysčio paviršiuje. Stabilus putų sluoksnis arba srautas susidaro tada, kai egzistuoja dinaminė pusiausvyrą tarp per tam tikrą laiką atsirandanėio ir suyranėio burbulų. Pradžioje statybai stabilio putų burbulai būna sferiniai, o laikui bėgant virsta taisyklingais daugiakampiais. Paviršiniame putų sluoksnyje esantys putų burbulai gana greitai įgauna daugiakampę formą, tuo tarpu žemesniuose sluoksniuose esantys burbulai pirmiausia išlieka sferiški, jė sienelės plonėja lėčiau, nes, plonėjant ir yrant viršutinių sluoksnių burbulų sienelėms, atsipalaidavęs detergentų tirpalas teka žemyn ir padidina žemesnių sluoksnių burbulų stabilumą bei lėtina jė irimo procesą [1]. Palaipsniui nutekant (drenuojantis) detergentų tirpalui žemyn, žemesnių sluoksnių putų burbulų sienelės plonėja (sausėja). Statybai stabilio putų susidarymą ypač sąlygoja detergentų koncentracija tirpale.

Putų generavimas, stabilumas ir irimas priklauso nuo daugelio tarpusavyje susijusių fizikinių-cheminių, fizikinių-techninių ir kitų veiksnių. Atakos turi ir kiekvieno konkretaus technologinio proceso ar eksperimento vykdymo sąlygos. Daug kintamų parametrų, kurių dalį yra labai sunku įvertinti, daro proceso matematiną aprašymą komplikuoju ir praktiškai neįvykdomu uždaviniu.

Papūmėtina, kad dabar statybai stabilio putų dilumokaiėio panaudojimà riboja tai, jog nepakankamai yra ištirti tik žioms putoms būdingi specifiniai procesai ir dėsningumai, vykstantys putų srautui aptekant àvairios konfigūracijos vamzdžio pluoštus. Nors žioje srityje jau yra atlikta nemažai reikšmingų tyrinėjimų bei paskelbti rezultatai darbų [2, 4, 5], kuriuose gana išsamiai tirti statybai stabilio putų srauto susidarymo, tekėjimo (transportavimo), irimo, garavimo, putų laželių atsiradimo bei skysčio ištekejimo iš putų procesai, jė hidrodinaminės, fizikinės, cheminės, geometrinės bei termofizikinės charakteristikos, taėiau dilumos mainai tarp statybai stabilio putų srauto ir paviršiaus išlieka mažiausiai tirta sritimi.

2. EKSPERIMENTINĖ ÀRANGA

Eksperimentiniams koridorinio vamzdžio pluošto dilumos atidavimo intensyvumo vertikaliam aukštyui kylančiam statybai stabilio putų srautui tyrimams naudotas modernizuotas eksperimentinio tyrimo àrenginys (1 pav.). Eksperimentinio tyrimo àrenginys buvo sudarytas iš kelių pagrindinių struktūrinių dalių: putų srauto generavimo àrangos, eksperimentinio ruožo su sumontuotu tiriamuoju koridoriniu vamzdžio pluoštu, elektrinio dydžio matavimo prietaisų bei papildomos techninės àrangos, reikalingos eksperimentiniams tyrimams vykdyti. Tyrimo metu statybai stabilio putų srautas kvadratinio (0,14 × 0,14) m² skerspjūvio vertikaliam 1,8 m aukšėio kanale kildamas skersai aptekėjo koridorinà vamzdžio pluoštà.

Eksperimentiniams tyrimams naudotas elektra kaitinamas varinis vamzdis – kalorimetras (išorinis skersmuo – 0,02 m), àgalinantis vykdyti eksperimentinius tyrimus sąlygomis, artimomis $q_w = \text{const}$. Siekiant išvengti dilumos nuostolių à aplinkà, kalorimetro galai buvo termiškai izoliuoti. Kalorimetro paviršiaus temperatūra matuota adūuoniomis vario-konstantano termoporomis, kurių žėdiš iždėstytos vienodais atstumais kalorimetro perimetro centrinėje dalyje, o likusios dvi – kalorimetro galuose, 50 mm atstumu nuo jo centro. Statybai stabilio putų srauto temperatūros matuotos dviem vario-konstantano termoporomis, àrengtomis prieš eksperimentinà ruožà ir uš jo.

Tiriamasis koridorinis vamzdžio pluoštas buvo sudarytas iš penkių vertikalio vamzdžio eilių, po žėdiš horizontalius vamzdžius kiekvienoje vertikalioje eilėje (2 pav.). Visų koridorinio vamzdžio pluošto vamzdžio išorinis skersmuo yra 0,02 m, atstumas tarp vamzdžio eilių centro išilgai kanalo $s_2 = 0,03$ m, o atstumas tarp vertikalio vamzdžio eilių centro atitinkamai $s_1 = 0,03$ m. Žio koridorinio vamzdžio pluošto skersinis ir išilginis žingsniai buvo 1,5 × 1,5. Eksperimentinio tyrimo metu prieš eksperimentinio ruožo sienelės esantys vamzdžiai vertikaliose eilėse nebuvo kaitinami.

Eksperimentinio tyrimo metu putų srautas buvo generuojamas barbotuojant dujas (orà) à 0,5% detergentų koncentracijos tirpalà.

3. EKSPERIMENTINIO TYRIMO METODIKA

Dilumos mainai tarp koridorinio vamzdžio pluošto ir vertikaliam kylanėio statybai stabilio putų srauto tirti keičiant kalorimetro padėtà vamzdžio pluošte, statybai stabilio putų srauto greità bei dujingumà. Tūrinis debitinis putų srauto dujingumas apskaiėiuojamas taip:

$$\beta = \frac{G_g}{G_g + G_l}; \quad (1)$$

ėia G_g – dujų debitas m³/s; G_l – skysėio debitas m³/s.

Eksperimentiniuose tyrimuose naudoti trijų skirtingų dujingumų statybai stabilio putų srautai: $\beta = 0,996$, 0,997 ir 0,998.

Putų srauto dujų Reinoldso skaiėius apskaiėiuojamas taip:

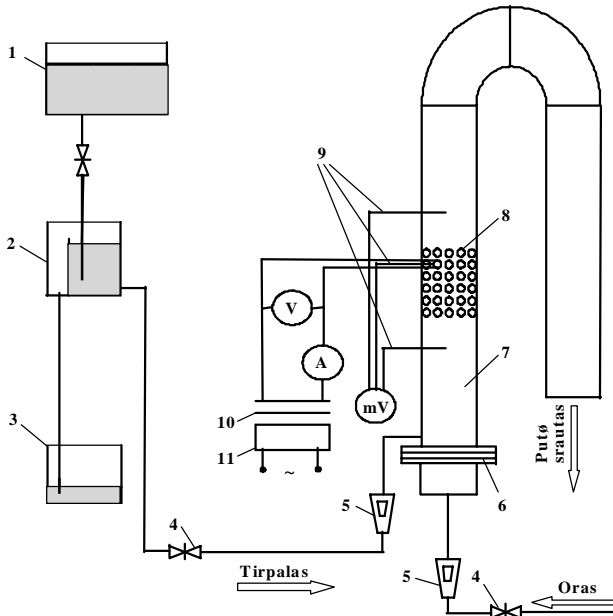
$$\text{Re}_g = \frac{G d}{Av_g}; \quad (2)$$

ėia d – vamzdžio išorinis skersmuo m; A – eksperimentinio kanalo skerspjūvio plotas m²; v_g – dujų kinematinė klampa m²/s.

Putų srauto skysėio Reinoldso skaiėius:

$$\text{Re}_l = \frac{G_l d}{Av_l}; \quad (3)$$

ėia v_l – kinematinė skysėio (tirpalo) klampa m²/s.



1 pav. Eksperimentinio ėrenginio schema. 1 - tirpalo rezervuaras; 2 - pastovaus lygio palaikymo indas; 3 - tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 4 - reguliavimo vožtuvas; 5 - rotametas; 6 - putų generavimo rėtinė; 7 - putų kanalas; 8 - vamzdžių pluoštas; 9 - termoporos; 10 - transformatorius; 11 - stabilizatorius

Vidutinės ėilumos atidavimo koeficiento reikėmės, esant nusistovėjusiam ėiluminiam reėimui eksperimentiniame ruoėe, apskaiėiuojamos taip:

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

ėia q_w - šilumos srauto tankis kalorimetro pavirėiuje W/m^2 ; ΔT - temperatėrų skirtumas tarp vidutinio kaitinamo vamzdėio pavirėiaus ir putų srauto temperatėrų K.

Šilumos mainams apibendrinti naudotas Nuselto kriterijus:

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

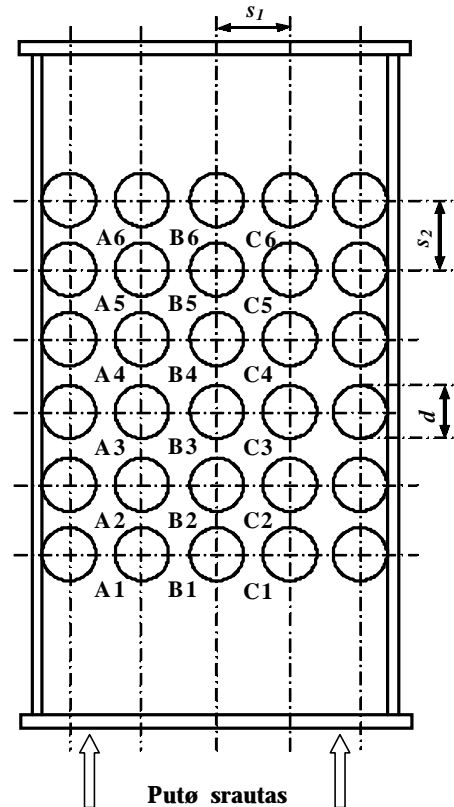
ėia λ_f - putų ėilumos laidumo koeficientas $W/(m \cdot K)$.

Putų srauto ėilumos laidumo koeficientas apskaiėiuojamas taip:

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

ėia β - tūrinis debitinis putų srauto dujingumas; λ_g - dujų ėilumos laidumo koeficientas, $W/(m \cdot K)$; λ_l - skysėio ėilumos laidumo koeficientas $W/(m \cdot K)$.

Nustatyta, kad po eksperimentinio proceso parametrų reguliavimo ėilumos mainai tarp vamzdėio pluošto ir putų srauto nusistovi praėjus 5 minutėms. Nuo tada nekinta nei putų srauto, nei kaitinamojo vamzdėio pavirėiaus temperatėros ir ėi-



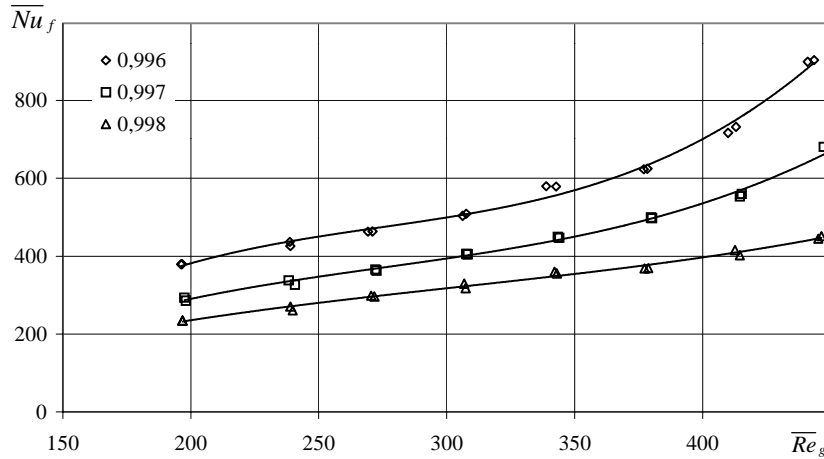
2 pav. Koridorinio vamzdėio pluošto principinė schema

lumos mainus galima laikyti nusistovėjusiais bei atlikti matavimus.

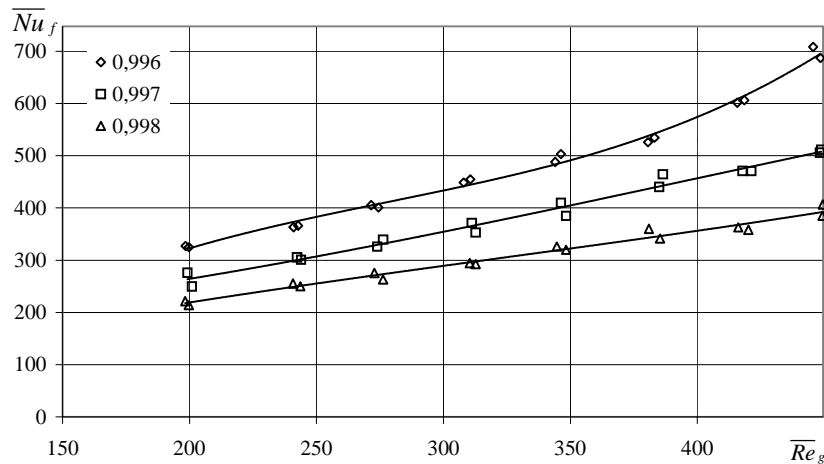
Siekiant iėvengti matavimo netikslumų, visi eksperimentai kartoti du-tris kartus. Eksperimentinio tyrimų rezultatai yra pakankamai tikslūs, patikimi ir atkuriami. Pagrindinio parametrų paklaidos [6]: $\delta_\beta = \pm 2,2\%$; \overline{Re}_g ir \overline{Re}_l paklaidos buvo lygios $\pm 2,2\%$, o \overline{Nu}_f lygi $\pm 8,1\%$.

4. REZULTATAI

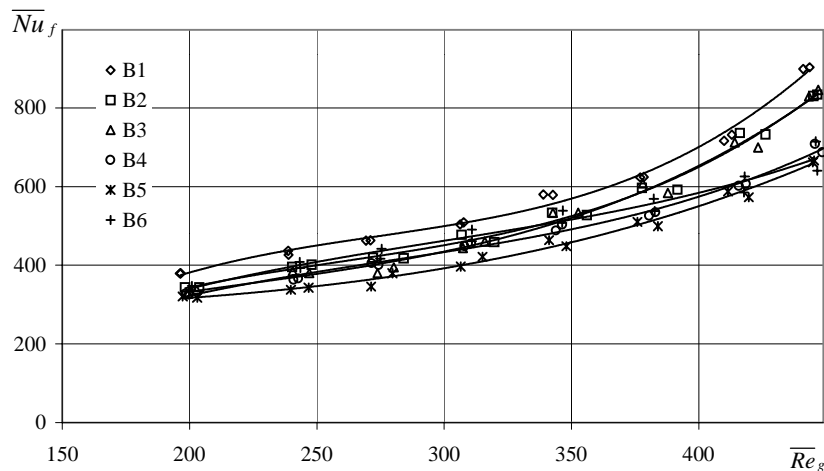
Đilumos mainų tarp koridorinio vamzdėio pluošto vidurinės eilės pirmojo vamzdėio (B1) ir vertikaliam kylanėio statėikai stabilio putų srauto intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto dujų Reynoldsso skaiėiaus \overline{Re}_g ir putų dujingumo β parodyta 3 pav. Visame iėtirtame putų srauto dujų greiėio kitimo diapazone $\overline{w}_g \in [0,14; 0,32]$ m/s, o tai atitinka $\overline{Re}_g \in [190; 440]$, intensyviausias vamzdėio pluošto auėinimas yra drėgniausio putų ($\beta = 0,996$) sraute, maėiau intensyvus - sausesnio putų ($\beta = 0,997$) ir maėiausiai - sausiausio putų ($\beta = 0,998$) srautuose. Đilumos mainai sausiausio putų sraute ($\beta = 0,998$), didėjant putų srauto dujų greiėiui, intensyvėja maėiau nei drėgnesnio putų. Kintant putų srauto \overline{Re}_g nuo 190 iki 440, sausiausio putų



3 pav. Pirmojo vidurinės eilės vamzdžio (B1) šilumos mainø intensyvumo priklausomybė nuo statiškai stabilio putø srauto dujų Reynoldso skaičiaus ir putø dujingumo: $\beta = 0,996, 0,997, 0,998$



4 pav. Ketvirtąjo vidurinės eilės vamzdžio (B4) šilumos mainø intensyvumo priklausomybė nuo statiškai stabilio putø srauto dujų Reynoldso skaičiaus ir putø dujingumo: $\beta = 0,996, 0,997, 0,998$



5 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto vidurinės eilės vamzdžių šilumos mainø intensyvumo priklausomybė nuo statiškai stabilio putø srauto dujų Reynoldso skaičiaus ir vamzdžio pozicijos pluošte, kai $\beta = 0,996$

sraute ($\beta = 0,998$) šilumos mainø intensyvumą nusakantis \overline{Nu}_f padidėja nuo 235 iki 451. Tame paèiame \overline{Re}_g diapazone drėgnesniø putø ($\beta = 0,997$) sraute \overline{Nu}_f padidėja nuo 294 iki 659, o drėgniausiø ($\beta = 0,996$) – nuo 379 iki 903, t. y. net 2,4 karto didesnis.

Šilumos mainø tarp koridorinio vamzdžių pluošto vertikalios vidurinės eilės tolimesniojo (giluminio) – ketvirtąjo vamzdžio (B4) ir vertikaliai kylanèio statiškai stabilio putø srauto intensyvumo priklausomybė nuo putø srauto dujų Reynoldso skaičiaus \overline{Re}_g ir putø dujingumo β parodyta 4 pav. Kintant putø srauto \overline{Re}_g

nuo 190 iki 440, sausiausio putø sraute ($\beta = 0,998$) \overline{Nu}_f padidėja nuo 221 iki 406. Tame paèiame greièio diapazone vidutinio drėgnumo ($\beta = 0,997$) putø sraute \overline{Nu}_f padidėja nuo 276 iki 511, o drėgniausiø ($\beta = 0,996$) – nuo 327 iki 708. Palyginà ketvirtąjo (B4) ir pirmojo (B1) vamzdžių šilumos mainø intensyvumą, esant maksimalioms \overline{Re}_g reikð-

mėms, gauname, kad pirmojo vamzdžio šilumos mainai drėgniausiø putø ($\beta = 0,996$) sraute yra intensyvesni 1,3 karto, o sausiausio putø $\beta = 0,998$ sraute – 1,1 karto. Ketvirtąjo vamzdžio (B4) šilumos mainai, augant \overline{Re}_g , didėja tolygiau nei pirmojo vamzdžio (B1). Be to, priklausomybė nuo putø srauto dujingumo, esant maksimalioms tirtoms \overline{Re}_g reikðmėms, mažesnė nei pirmojo vamzdžio atveju. Kai $\overline{Re}_g = 440$, drėgniausiø putø sraute ($\beta = 0,996$) pirmojo vidurinės eilės vamzdžio (B1) \overline{Nu}_f yra dukart didesnis nei sausiausio putø sraute ($\beta =$

0,998), o ketvirtojo vamzdžio (B4) atveju šis santykis lygus 1,7.

Analizuojant koridorinio vamzdžio pluošto vidurinės eilės vamzdžio ėilumos mainų intensyvumo priklausomybę nuo statiškaai stabilio putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus ir vamzdžio padėties pluošte (5 pav.), būtina atsipvelgti á procesus, vykstančius putų srautui skersai kertant koridoriná vamzdžio pluoštą. Esant nedidelėms \overline{Re}_g reikđmėms á vamzdžio pluoštą atitekančá putų srautą sudaro 8–12 mm skersmens putų burbulai. Putų sraute vyksta intensyvus skysėio drenažo procesas, todėl srautui tekant per vamzdžio pluoštą, dalis burbulų suyra drenuojantis skysėiui arba atsimuđant burbulams á vamzdžio pavirđių. Suirusių burbulų skystis nuteka, papildomai intensyvindamas bendrą skysėio drenažo iđ putų procesą. Pluošto vamzdžio ėilumos atidavimo intensyvumą veikia ir „ėeđelio“ efektas. Pagrindinis putų srautas teka mažiausio pasiprieđinimo keliu – erdve tarp gretimų vertikalio vamzdžio eilių, o vamzdžio vertikalio eilių tarpvamzdiniėje erdvėje statiškaai stabilio putų srautas yra pristabdomas.

Pirmojo vidurinės eilės vamzdžio (B1) ėilumos mainai statiškaai stabilio putų sraute yra intensyviausi visame tirtame \overline{Re}_g intervale (5 pav.). Antrojo (B2) ir treėiojo (B3) vamzdžio ėilumos mainų intensyvumas yra praktiškaai vienodas. Kai \overline{Re}_g kinta nuo 190 iki 300, ketvirtojo vamzdžio (B4) ėilumos mainų intensyvumas artimas treėiojo ir antrojo vamzdžio ėilumos mainų intensyvumui. Penktasis vidurinės eilės vamzdis (B5) yra auđinamas prasėiausiai visame \overline{Re}_g intervale. Paskutinis, ėeđtasis, vamzdis (B6) iđsiskiria iđ bendros tendencijos: ėio vamzdžio ėilumos mainų intensyvumas yra geresnis uđ kitų vamzdžių, iđskyrus pirmąjį vamzdá, kai \overline{Re}_g kinta nuo 190 iki 330. Eksperimentai rodo, kad didinant oro srauto greitá, generuojamų putų burbulų skersmuo mažiaja, todėl iki vamzdžio pluošto atiteka putų srautas, sudarytas iđ mažiausio skersmens putų burbulų. Tokiam putų srautui aptekant vamzdžio pluoštą, putų struktūra beveik nesmulkėja. Kai \overline{Re}_g reikđmės kinta nuo 330 iki 420, paskutinio vamzdžio ėilumos mainai jau yra pasyvesni nei antrojo ir treėiojo, taėiau intensyvesni uđ ketvirtojo ir penktojo vamzdžio.

Eksperimentiniai koridorinio vamzdžio pluošto ėilumos mainų tyrimai vertikaliai kylanėiame statiškaai stabilio putų sraute buvo apibendrinti kriterinėmis lygtimis, nusakanėiomis priklausomybę tarp putų srauto Nuselto skaičiaus ir putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus bei putų dujingumo. Đi lygtis gali būti taikoma koridorinio vamzdžio pluošto ėilumos mainų putų sraute skaiėiavimams, kai: $190 < \overline{Re}_g < 440$, skersinis ir išilginis įingsniai $1,5 \times 1,5$, putų srauto tūrinis debitinis dujingumas β kinta nuo 0,996 iki 0,998:

$$\overline{Nu}_f = c\beta^u \overline{Re}_g^m \quad (7)$$

Vidutiniškai vamzdžio pluošto vertikalios vidurinės eilės vamzdiams: $c = 6,64$, $u = 305$, $m = -95(\beta - 1,006)$. Vidutiniškai viso pluošto vamzdiams $c = 7,6$, $u = 328$, $m = -95(\beta - 1,006)$.

5. IŠVADOS

1. Eksperimentiškaai iđtirti koridorinio vamzdžio pluošto ėilumos mainai vertikaliai kylanėiame statiškaai stabilio putų sraute.

2. Tūrinio debitinio dujingumo (β) átaka putų srauto kryptimi tolimesniojų koridorinio vamzdžio pluošto vamzdžio ėilumos mainų intensyvumui yra mažiaesnė, nei pirmojų.

3. Vienas svarbių veiksnių, turinėio átaką koridorinio vamzdžio pluošto vamzdžio ėilumos mainų intensyvumui vertikaliai kylanėiame statiškaai stabilio putų sraute, yra skysėio drenažas iđ putų. Đis veiksnys priklauso nuo putų srauto dujingumo, putų srauto greiėio, vamzdžio pluošto konfiguracijos, vamzdžio padėties pluošte.

4. Pluošto vamzdžio ėilumos atidavimo intensyvumą sąlygoja ir „ėeđelio“ efektas. Putų srauto kryptimi tolimesniojų koridorinio pluošto vamzdžio, iđskyrus paskutinius, ėilumos mainai mažiau intensyvūs nei pirmojų vamzdžio.

5. Koridorinio vamzdžio pluošto vertikalioose statiškaai stabilio putų srautuose eksperimentiniai ėilumos mainų tyrimo rezultatai apibendrinti kriterine lygtimi (7). Đi lygtis pravers kuriant naują efektyvų statiškaai stabilio putų ėilumokaitá

Gauta 2005 11 15

Literatūra

1. Ėeđi ėi ėđi á Ā. Ē. Ĩ ái ū. Ōái đėý ė i đáėđėėá ėđ Ĩ Ĩėó-áí ėý ė đáçđóó-áí ėý. Ĩ Ĩñėáá: Ōėi ėý, 1983. 262 c.
2. Gylys J. Hidrodinamika, ėilumos ir masės mainai statiškaai stabilio putų sistemose. Kaunas: Technologija, 1998. 386 p.
3. Sadoc J. F., Rivier N. Foams and Emulsions. Nato ASI Series, 1997. 596 p.
4. Gylys J., Jakubcionis M., Sinkunas S., Zđankus T. Description of tube bundle heat transfer in foam flow // Proc. of the 4th Baltic Heat Transfer Conference. Kaunas: Begell House Inc., Lithuanian Energy Institute, 2003. P. 541–548.
5. Gylys J., Đinkūnas S., Pđankus T. Dependence of heat transfer intensity on foam flow direction // Advanced Computational Methods in Heat Transfer VIII. ISBN: 1-85312-705-1, ISSN: 1369-7331. Southampton: WIT press, 2004. P. 243–252.
6. Schenck H. Theories of Engineering Experimentation. Moscow: Mir, 1972.

Jonas Gylys, Tadas Pdankus, Stasys Šinkūnas,
Vidmantas Giedraitis

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

Summary

The intensity of many of technological processes depends on the interface surface size of both phases (liquid and gas). Foam is distinguished by an especially large interphase contact surface and can be applied for different heat and mass transfer purposes. Usage of statically stable foam flow for heat transfer has a number of advantages in comparison with one-phase liquid: a small quantity of liquid is required, the heat transfer rate is rather high, the mass of equipment is much smaller.

The phenomena of foam flow and heat transfer in it are rather complex. Foam is a two-phase flow, and its structure changes while it passes an obstacle: bubbles change their size, liquid drainage is going on, and so on. All these peculiarities complicate the application of analytical methods. Thus, the experimental method was selected for heat transfer investigations. The investigations were performed on experimental equipment consisting of a foam generator, a vertical channel with rectangular cross-section, and an in-line bank of the horizontal tubes. Experimental heat transfer results of in-line tube bank in an upward vertical cross foam flow were summarized by criterion equations which enable determination of average heat transfer intensity of the tubes in the bank for different values of volumetric void fractions and regime parameters of statically stable foam flow.

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

Éīīāñ Āēēēñ, Ōāāāñ Āēāīēōñ, ņōāñēñ
Ōēīēōīāñ, Āēāī āīōāñ Āāāāēōēñ

ŌĀĪ ĒĪĪ ĀĪ ĀĪ ĒĪ ĐĒĀĪ ĐĪĪ ĀĪ Ī Ō×ĒĀ ŌĐŌĀ Ā ĪĪ ŌĪ ĒĀ ņŌĀŌĒ×ĀŅĒĒ ŌŅŌĪ Ē×ĒĀĪ Ē Ĭ×ĀĒŅŌĪ Ē Ī ĀĪ Ū

Đāçþìā

Ēīōāī ñēāī īñōū īīīāēāñōāā ōāōī īēīāē+āñēēō īđīōāññīā çāāēñēō īō īāēōāçīāīē (īāēāō æēāēīñōūþ è āāçīī) ēīīōāēōīīē īīāāđōīīñē. Ī āī āī ñāīēñōāāī Ū ēñēēþ+ēōāēūī ī āīēūōēā īāēōāçīāūā ēīīōāēōī ūā īīāāđōīīñē, ā ñāýçē ñ+āī īīē īīāōō āūōū ēñīīēūçīāāī Ū ā īđīōāññāō ōāī ēī- ē īāññīāī āī ā. Ēñīīēūçīāāī ēā ñōāđē+āñēē ōñōīē+ēāūō ý+āēñōūō īāī ā īđīōāññāō ōāī ēīīāī āī ā ēīāāō đýā īđāēīōūāñōā īī ñđāāīāīēþ ñ īāīīōāçīāūī ē (æēāēīñōýī ē): īāī ūōā çāōđāōū ēñīīēūçōāī ēē æēāēīñēē īđē āīēūōīē ēīōāī ñēāī īñēē ōāī ēīīāī āī ā ē īāī ūōā īāññā ñāī īāī ōñōđīēñōāā.

Ī īōīē īāī Ū ē ōāī ēīīāī āī ā īāī - ñēīāēīā yāēāī ēā. Ī āī ā - āāōōōāçī āý ñēñōāī ā. ņōđōēōōđā īāī Ū īāī ýāōñý īđē īāōāēāī ēē īđāī ýōñōāēý: ēçī āī ýāōñý āēāī āōđ īōçūđý, īđīēñōī āēō īđīōāññ āđāī āēā æēāēīñēē èç īāī Ū. Ēñīīēūçīāāī ēā āī āēēōē+āñēēō īāōīāīā īñēīāēīāīī, īīýōīīō āūē īđēīāīāī ýēñī āđēī āī ōāēūī ūē īāōī ā ēññēāāī āāī ēý ōāī ēīīāī āī ā ā īīōīēā īāī Ū. Ā ýēñī āđēī āī ōāēūī ūō ēññēāāī āāī ēýō ēñīīēūçīāāī ā ōñōāī īāēā, ñīñōīýūāý èç īāī īāāī āđāōī đā, āāđōēēāēūī īāī ēāī āēā ñ ēāāāđāōī ūī īđīōēēāī ñā+āī ēý è ēīđēāīđīīāī īō+ēā ōđōā. Ýēñī āđēī āī ōāēūī ūā ēññēāāī āāī ēý ōāī ēīīāī āī ā ēīđēāīđīīāī īō+ēā ōđōā ā āāđōēēāēūīī āāāđō īāī đāāēāīīīī īīōīēā ñōāōē+āñēē ōñōīē+ēāīē ý+āēñōīē īāī Ū āūēē īāī āūāī Ū ñ īīīīūūþ ēđēōāđēāēūī ūō ōđāāī āī ēē, īđēāīāī ūō āēý īīđāāāēāī ēý ñđāāī āē ēīōāī ñēāī īñēē ōāī ēīīāī āī ā ōđōā āñāāī ēīđēāīđīīāī īō+ēā īđē đāçī ūō īāđāī āōđāō īīōīēā ñōāōē+āñēē ōñōīē+ēāīē ý+āēñōīē īāī Ū.

Ēēþ+āāūā ñēīāā: īīōīē īāī Ū, ōāī ēīīāī āī, ēīđēāīđī ūē īō+īē ōđōā, ñōāōē+āñēē ōñōīē+ēāāý ý+āēñōāý īāī ā, ýēñī āđēī āī ōāēūī ūē ēāī āē, đāñōī āī īā āāçī ñī āāđāēāī ēā