

Plokščių paviršių aušinimas dvifazių putų srautu

Jonas Gyls¹,

Tadas Ždankus²,

Martynas Gyls¹,

Rolandas Jonynas³

¹ *Kauno technologijos universitetas,
Energetikos technologijų institutas,
K. Donelaičio g. 20-212 LK,
LT-44239 Kaunas
El. paštas: jonas.gyls@ktu.lt*

² *Kauno technologijos universitetas,
Statybos ir architektūros fakultetas,
Geoinžinerijos katedra,
Studentų g. 48-437A,
LT-51367 Kaunas*

³ *Kauno technologijos universitetas,
Mechanikos ir mechatronikos fakultetas,
Šilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20-223,
LT-44239 Kaunas*

Eksperimentiškai tirti šilumos mainai tarp vertikalaus ir 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus bei išilgai paviršiaus kylančio statiška stabilų putų srauto. Nustatyti šilumos atidavimo koeficiento reikšmių kitimo išilgai ir skersai plokščio paviršiaus dėsningumai, o taip pat nustatyta įkaitusio plokščio paviršiaus vidutinio šilumos atidavimo putų srautui intensyvumo priklausomybė nuo putų dujingumo ir srauto greičio – išvesta kriterinė lygtis. Gauta, kad 45° kampu pasviręs plokščias paviršius putų srautu aušinamas intensyviau nei vertikalus paviršius. Lyginant vertikalaus plokščio paviršiaus vidutinį aušinimo intensyvumą su koridorinio 1,5 × 1,5 vamzdžių pluošto aušinimo putomis nustatyta, kad vamzdžių pluoštas putomis aušinamas intensyviau.

Raktažodžiai: šilumos mainai, dvifazių putų srautas, plokščias paviršius, pasviręs paviršius, vamzdžių pluoštas

ĮVADAS

Gyvename laikotarpiu, kai daugelis svarbių veiksnių, tokių kaip: senkančios energetinių iškasenų atsargos, vis didėjantis aplinkos užterštumas, klimato kaita, ekonominė krizė ir pan. įpareigoja mus pagamintą energiją panaudoti kiek įmanoma efektyviau. Šiluminės energetikos pagrindiniai tikslai yra: maksimaliai sumažinti energijos sąnaudas šilumai gaminti, kuo efektyviau panaudoti šiluminę energiją, modernizuoti šilumokaičius ir kitus šiluminės technikos įrenginius, didinti jų efektyvumą ir saugumą bei mažinti

medžiagines sąnaudas jų gamybai. Ankstesnių tyrimų metu [1, 2] nustatyta, kad dalį minėtų tikslų galima pasiekti šilumnešiu ar aušalu naudojant dvifazių putų srautus.

Vandeninių putų srautų, kaip šilumnešio ar aušalo, taikymas suteikia keletą esminių privalumų, palyginti su vienfaziais srautais. Vienas svarbiausių privalumų – galimybė keisti šilumos mainų intensyvumą keičiant ne tik putų srauto greitį (vienfazio srauto atveju), bet ir keičiant putų dujingumą, kas gerokai išplečia šilumos mainų intensyvumo reguliavimo diapazoną. Kitas privalumas – sąlyginai didelės šilumos atidavimo koeficiento reikšmės, o

tuot tarpu masinis putų srauto debitas yra mažas. Deja, minėtų privalumų efektyvų praktinį panaudojimą apsunkina specifinės vandeninių putų savybės: skysčio drenažas iš putų [3, 4], dujų difuzija per putų burbulus skiriančias plėveles [5], o taip pat ir šių plėvelių irimas [6]. Šios putų savybės komplikuoja analitinių metodų taikymą putų tyrimuose, todėl prioritetiniu tapo eksperimentinis tyrimų metodas.

Vandeninių putų specifinės savybės laikui bėgant daro įtaką jų stabilumui bei putų struktūros kitimui. Kad putas būtų galima naudoti kaip šilumnešį ar aušalą, jos turi išlaikyti savo struktūrą tekėdamos putų aparatu – šilumokaičiu, ar putoms aptekant įvairius kaitinamus ar aušinamus paviršius, t. y. putas turi išlaikyti savo struktūrą tam tikrą laiko intervalą. Viena iš vandeninių putų rūšių – statišškai stabilios putos, kurios išlaiko savo struktūrą nuo kelių sekundžių iki valandų – jau įrodė savo tinkamumą pritaikyti šilumos mainų procesuose [1, 5].

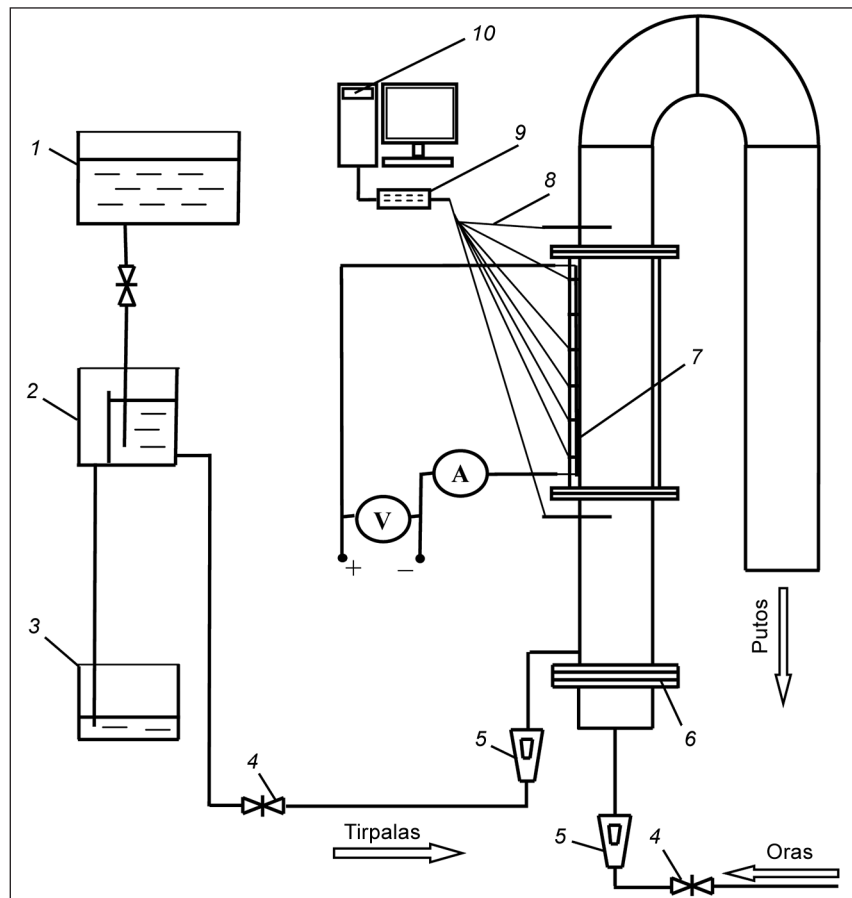
Pramoniniu požiūriu vieni iš efektyviausių yra nesudėtingos konstrukcijos ir paprastos eksploatacijos vamzdiniai *daugiaėjai* šilumokaičiai [7]. Anksčiau mes eksperimentiškai tyrėme aušinimo intensyvumą putoms aptekant

šachmatinį (skersinis ir išilginis žingsniai: $3,5 \times 0,875$) [8, 9], o vėliau koridorinius ($1,5 \times 1,5$, $1,5 \times 3,0$, $3,0 \times 1,5$ ir $3,0 \times 3,0$) [10, 11] bei nestandartinės konfigūracijos vamzdžių pluoštus [12].

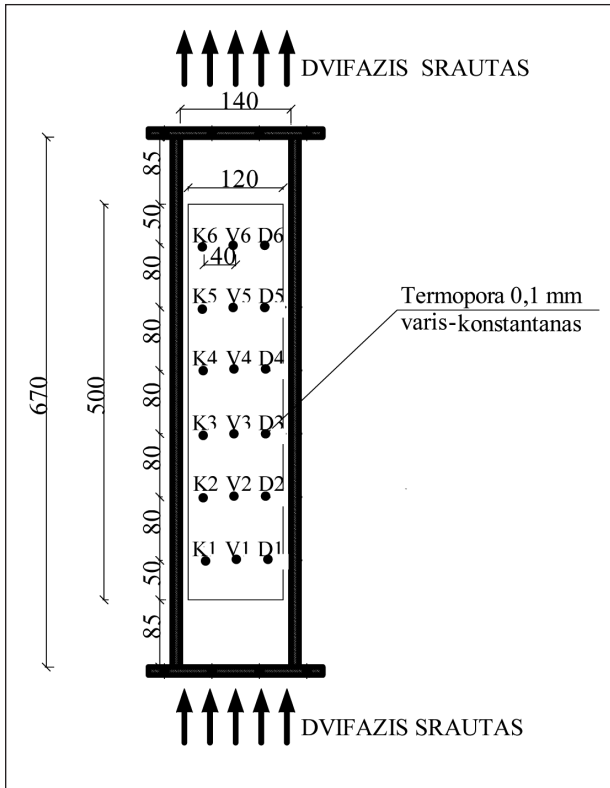
Šiame straipsnyje pateikiami pirmieji šilumos mainų tarp plokščiojo paviršiaus ir statišškai stabilų putų srauto eksperimentinio tyrimo rezultatų apžvalga.

EKSPERIMENTINĖ ĮRANGA

Eksperimentinių tyrimų įrenginį sudarė vertikalus eksperimentinis kanalas (1 pav.) su išilgai vienos kanalo sienelės įmontuotu plokščiu paviršiumi, kurį buvo galima kaitinti elektra. Iš nerūdijančio plieno pagaminto plokščio paviršiaus ilgis – 0,5 m, plotis – 0,12 m, o storis – 0,1 mm. Paviršius įkaisdavo per jį tekant nuolatinei elektros srovei: $I = 0–100$ A ($U = 0–2$ V). Tiriamasis paviršius nuo kanalo sienelės atskirtas termoizoliacine medžiaga. Prie paviršiaus pritaisytos vario-konstantano tipo termoporos. Eksperimentinių tyrimų metu naudota 18 termoporų. Termoporų išdėstymas ir jų pažymėjimai pateikti 2 pav. Eksperimentinio kanalo skerspjūvis kvadratinis: $0,14 \times 0,14$ m².



1 pav. Eksperimentinio įrenginio schema: 1 – tirpalo rezervuaras; 2 – pastovaus lygio palaikymo indas; 3 – tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 4 – reguliavimo ventiliai; 5 – debitomatai; 6 – perforuota putų generavimo plokštelė; 7 – eksperimentinio kanalo ruožas su įmontuotu plokščiu paviršiumi; 8 – termoporos; 9 – duomenų kaupikliai; 10 – kompiuteris



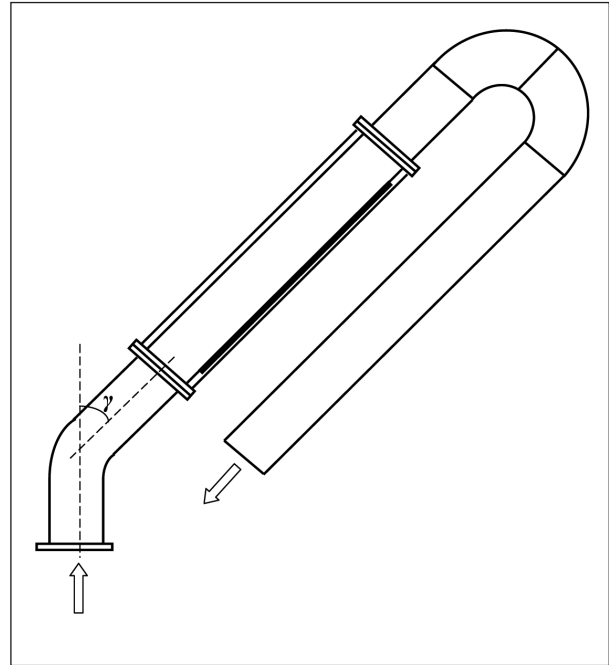
2 pav. Termoporų išdėstymas ant plokščio paviršiaus

Tyrimams naudotos statiskai stabilios putos, generuojamos barbotuojant orą per detergentų tirpalą vandenyje. Speciali perforuota plokštelė, skirta putų generavimui, sumontuota eksperimentinio kanalo apačioje (1 pav.). Detergentų tirpalas tiekiamas ant plokštelės, o oras iš oro paskirstymo kameros atiteka iki perforuotos plokštelės. Oro barbotąžo per tirpalą metu susidariusios putos eksperimentiniu kanalu vertikaliai kyla aukštyn, išilgai aptekėdamos ties viena sienele esantį įkaitusių plokščių paviršių. Vėliau srautas po 180° posūkio leidžiasi žemyn ir yra suardomas išpurslinto vandens čiurkšle.

Putų generavimui naudotas toks pat detergentų tirpalas kaip ir ankstesnių tyrimų metu – detergentų koncentracija tirpale 0,5 %. Putų srauto tekėjimo režimas laminarinis, o putų tūrinis debitinis dujingumas kito nuo 0,996 iki 0,998. Putų generavimui tiekiamo tirpalo ir oro kiekiai matuojami debitomačiais. Taip pat matuojama putų srauto temperatūra prieš kontakto su kaitinamuoju paviršiumi zoną (dvi termoporos) ir už šios zonos (dvi termoporos).

Tyrimų metu termoporų išėjimo signalai realiu laiku per duomenų kaupiklį perduodami į kompiuterį ir kaupiami duomenų bazėje. Atitinkamai registruojami debitomačių, ampermetro ir voltmetro parodymai.

Baigus eksperimentinius vertikalaus plokščio paviršiaus šilumos atidavimo tyrimus, toliau eksperimentiškai tirtas 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus (3 pav.) aušinimas dvifazių putų srautu.

3 pav. Eksperimentinio įrenginio schema, kai plokščias paviršius pasviręs kampu γ

Po bet kokie putų srauto dujingumo, greičio ar kaitinamojo paviršiaus elektrinių parametrų reguliavimo (pakeitimų) laukiama visiško režiminių parametrų nusistovėjimo. Tik tada registruojami prietaisų parodymai. Eksperimentinių tyrimų metu kiekvienas bandymas vykdomas ne mažiau dviejų kartų. Eksperimentinių rezultatų sklaida yra nedidelė, nes variacijos koeficientas neviršijo 1 % reikšmės. Bendrosios eksperimentinių rezultatų santykinės paklaidos reikšmės neviršijo 5 %. Eksperimentinių tyrimų rezultatus, apdorojus statistinėmis programomis, nustatyta, kad jie yra pakankamai tikslūs, patikimi ir atkuriami.

EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Šilumos mainams aprašyti naudota priklausomybė tarp Nuselto ir Reinoldso kriterijaus bei putų srauto dujingumo $Nu_f = f(Re_g, \beta)$. Putų tūrinis debitinis dujingumas apskaičiuojamas pagal formulę:

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

čia: G_g – dujų debitas, m^3/s ; G_l – skysčio debitas, m^3/s . Vidutinis putų srauto greitis apskaičiuojamas taip:

$$w_f = \frac{G_g + G_l}{A}, \quad (2)$$

čia: A – eksperimentinio kanalo skerspjūvio plotas, m^2 ;

Putų srauto dujų Reinoldso skaičius apskaičiuojamas taip:

$$\text{Re}_g = \frac{G_g d_{ekv}}{A v_g}, \quad (3)$$

čia: d_{ekv} – eksperimentinio kanalo ekvivalentinis skersmuo: $d_{ekv} = 4A/P = 0,14$ m; P – eksperimentinio kanalo perimetras, m; v_g – dujų kinematinė klampa, m^2/s .

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

$$\alpha = \frac{q_w}{\Delta T} = \frac{UI}{A_{pl} \Delta T}, \quad (4)$$

čia: q_w – šilumos srauto tankis ties plokščiu paviršiumi, W/m^2 ; ΔT – temperatūrų skirtumas tarp plokščio paviršiaus temperatūros ir putų srauto temperatūros, K; U – įtampa ant kaitinamojo plokščio paviršiaus gnybtų, V; I – plokščiu paviršiumi tekančios elektros srovės stipris, A; A_{pl} – plokščio paviršiaus plotas, m^2 : $A_{pl} = 0,5 \times 0,12 = 0,06$ m^2 .

Vidutiniam šilumos mainų intensyvumui apskaičiuoti naudotas Nuselto kriterijus:

$$\text{Nu}_f = \frac{\alpha_{vid} d}{\lambda_f}, \quad (5)$$

čia: α_{vid} – vidutinis viso plokščio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$; d – plokščio paviršiaus plotis: $d = 0,12$ m; λ_f – putų šilumos laidžio koeficientas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Putų srauto šilumos laidžio koeficientas apskaičiuojamas taip:

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

čia: λ_g – dujų šilumos laidžio koeficientas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_p – skysčio šilumos laidžio koeficientas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

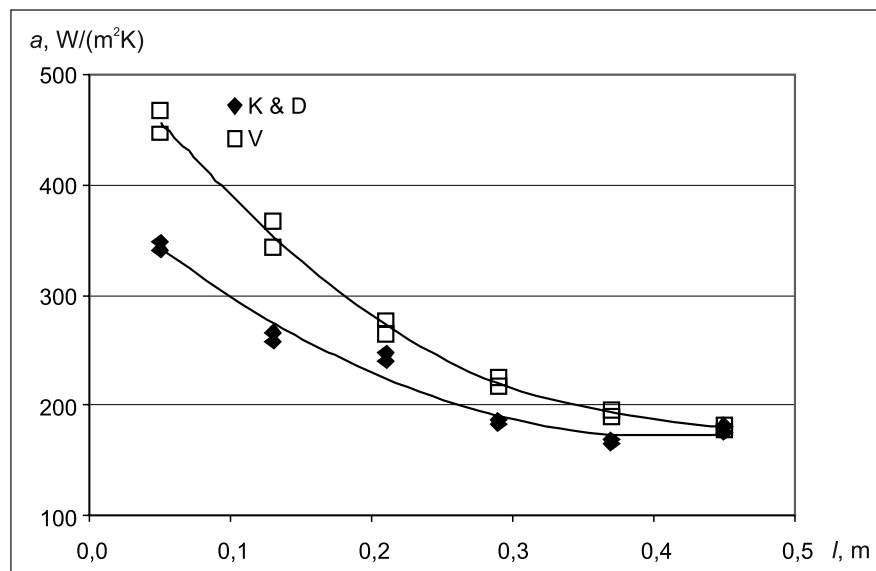
REZULTATAI

Pirmiausiai eksperimentiškai tirti šilumos mainai tarp vertikalaus plokščio paviršiaus ($\gamma = 0^\circ$) ir paviršių išilgai aptekancio kylančio dvifazių putų srauto. Išmatuotos temperatūros 18-oje kaitinamo plokščio paviršiaus taškų ($T_{w_{ij}}$) esant tam tikram putų dujingumui (β) bei putų srauto greičiui (w_f). Taip pat išmatuota putų srauto temperatūra prieš ($T_{f_{prieš}}$) ir už ($T_{f_{už}}$) plokščio paviršiaus. Temperatūrų skirtumas (ΔT) įvairiose plokščio paviršiaus vietose apskaičiuotas laikant, kad plokščio paviršiaus zonoje putų srauto temperatūros kitimas yra tiesinis (nuo $T_{f_{prieš}}$ iki $T_{f_{už}}$). Išmatavus per plokščią paviršių tekančios srovės stiprį (I) ir įtampos kritimą ant gnybtų (U), pagal formulę (4) apskaičiuotos vietinio šilumos atidavimo koeficiento (α) vertės plokščio paviršiaus taškams: K1, K2, ..., K6; V1, V2, ..., V6 ir D1, D2, ..., D6.

Eksperimentiniai tyrimai vykdyti pradėdant nuo putų tūrinio debitinio dujingumo $\beta = 0,998$ ir putų srauto greičio $w_f = 0,10$ m/s. Baigus bandymą, putų srauto greitis didinamas 0,025 m/s ir atliekamas kitas bandymas. Po devynių bandymų su $\beta = 0,998$ dujingumo putomis (tirpalo greitis (w_p) kito nuo 0,1 iki 0,3 m/s), dujingumas keičiamas į $\beta = 0,997$ ir bandymai kartojami srauto greičiui kintant nuo 0,1 iki 0,3 m/s. Analogiškai eksperimentuota ir su $\beta = 0,996$ dujingumo putų srautu.

Baigus eksperimentinius tyrimus su vertikaliu plokščiu paviršiumi ($\gamma = 0^\circ$), eksperimentinis kanalas perdarytas taip, kad plokščias paviršius būtų pasviręs 45° kampu ($\gamma = 45^\circ$), kaip parodyta 3 pav., ir ištirti šilumos mainai tarp 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus ir jį išilgai aptekancio kylančio dvifazių putų srauto.

Vertikalaus plokščio paviršiaus aušinimo dvifazių putų srautu intensyvumo kitimas išilgai paviršiaus, kai putų dujingumas $\beta = 0,997$, o putų srauto greitis $w_f = 0,15$ m/s, pateiktas 4 pav.



4 pav. Šilumos atidavimo putų srautu intensyvumo kitimas išilgai vertikalaus plokščio paviršiaus, kai putų $\beta = 0,997$ ir $w_f = 0,15$ m/s

Plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumą veikia putų srauto greičio ir tikrojo putų dujingumo pasiskirstymas kanalo skerspjūviuose. Plokščio paviršiaus apatinėje dalyje atitekančių putų temperatūra skerspjūvyje yra vienoda, todėl putų dujingumo įtakos plokščio paviršiaus skersiniam aušinimui beveik nėra. Pagrindinis veiksnys, darantis įtaką skersiniam paviršiaus aušinimo intensyvumui jo apačioje, yra putų srauto greitis. Nustatyta, kad vertikalaus plokščio paviršiaus apatinės dalies ($l = 0,05$ m) vidurys putomis aušinamas 24 % intensyviau nei šonai (4 pav.). Reikia pažymėti, kad putų tikrojo dujingumo pasiskirstymas kanalo skerspjūvyje veikia plokščią paviršių dengiančios skysčio plėvelės storį. Ši plėvelė skersai plokščio paviršiaus yra ploniausia viduryje, o ties šonais (kanalo skerspjūvio kampais) jos storis yra didesnis. Tai reiškia, kad skerspjūvyje ties plokščio paviršiaus centru esančioje plėvelėje yra mažiau skysčio, kuris tiesiogiai turi įtakos paviršiaus aušinimo intensyvumui. Putoms tekant išilgai kanalo, plokščio paviršiaus centre jį dengiančioje plėvelėje skystis yra labiau išilgęs nei šonuose, todėl ir šilumos atidavimo intensyvumas čia mažėja labiau nei plokščio paviršiaus šonuose – išilgai kanalo pastebimas skirtumas tarp $\alpha_{K \& D}$ ir α_V reikšmių mažėjimas. Plokščio paviršiaus viršuje ($l = 0,45$ m) vidurys tik 0,6 % aušinamas intensyviau nei paviršiaus šonai.

Analizuojant aušinimo intensyvumo kitimą išilgai vertikalaus plokščio paviršiaus, kai putų $\beta = 0,997$ ir $w_f = 0,15$ m/s, nustatyta, kad išilgai plokščio paviršiaus vidurio (taškai V) šilumos atidavimo koeficiento (α_V) reikšmės sumažėjo 2,5 karto (nuo $\alpha_V = 456$ W/(m²K) iki $\alpha_V = 180$ W/(m²K)), o išilgai paviršiaus šonų (taškai K & D) – sumažėjo 1,8 karto (nuo $\alpha_{K \& D} = 345$ W/(m²K) iki $\alpha_{K \& D} = 179$ W/(m²K)).

45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo dvifazių putų srautu intensyvumo kitimas išilgai pavir-

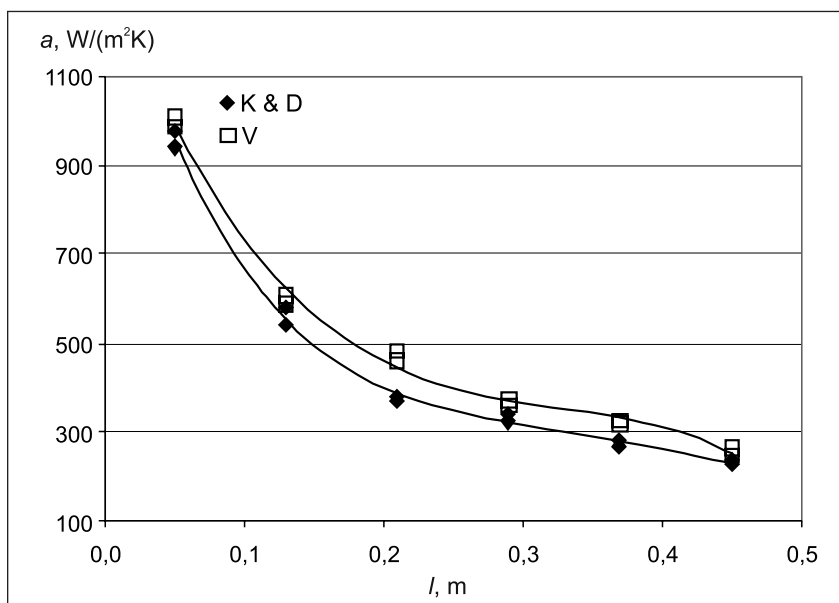
šiaus, kai putų dujingumas $\beta = 0,997$, o putų srauto greitis $w_f = 0,15$ m/s, pateiktas 5 pav.

45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo putomis tikrojo putų dujingumo pasiskirstymas skerspjūvyje yra nesimetriškas dėl skersai kanalo iš putų besidrenuojančio skysčio. Ties plokščiu paviršiumi putos yra drėgnesnės nei ties viršutine kanalo sienele (3 pav.). Putų dujingumo įtaka plokščio paviršiaus aušinimui išauga. Tačiau putų srauto greitis skersai plokščio paviršiaus yra didžiausias jo viduryje. Abu minėti veiksniai kompensuoja vienas kito įtaką pasvirusio plokščio paviršiaus skersiniam aušinimui, kas lemia panašų skersinį plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumą (5 pav.) visame jo ilgyje.

Analizuojant aušinimo intensyvumo kitimą išilgai pasvirusio plokščio paviršiaus ($\gamma = 45^\circ$), kai putų $\beta = 0,997$ ir $w_f = 0,15$ m/s, buvo nustatyta, kad išilgai plokščio paviršiaus vidurio (taškai V) šilumos atidavimo koeficiento (α_V) reikšmės sumažėjo 3,9 karto (nuo $\alpha_V = 998$ W/(m²K) iki $\alpha_V = 257$ W/(m²K)), o išilgai paviršiaus šonų (taškai K & D) – sumažėjo 4,1 karto (nuo $\alpha_{K \& D} = 958$ W/(m²K) iki $\alpha_{K \& D} = 233$ W/(m²K)).

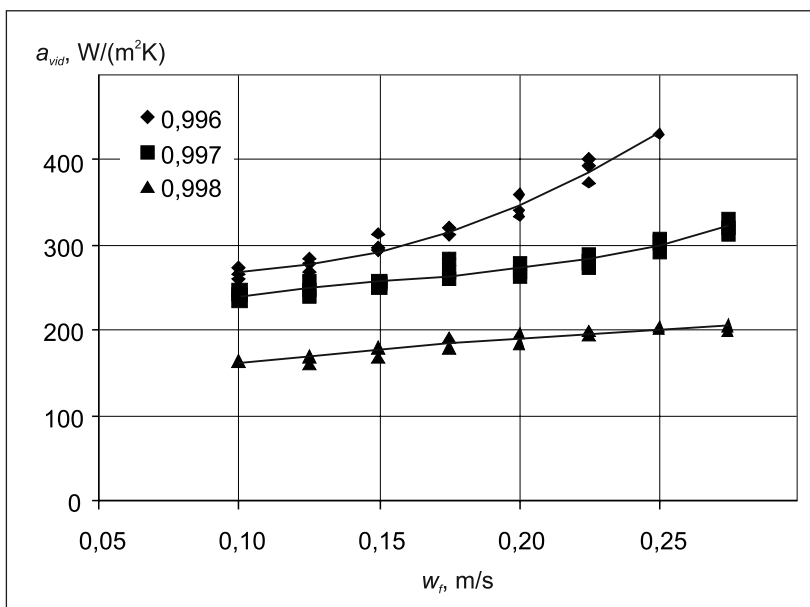
Lyginant vertikalaus plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumą su 45° laipsnių kampu pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimu nustatyta, kad, kai putų $\beta = 0,997$ ir $w_f = 0,15$ m/s, intensyviau aušinamas pasviręs paviršius. Santykis $\alpha_{V,45^\circ}/\alpha_{V,0^\circ}$ kito nuo 2,2 karto, kai $l = 0,15$ m, iki $\alpha_{V,45^\circ}/\alpha_{V,0^\circ} = 1,4$, kai $l = 0,45$ m. Analogiškai išilgai paviršiaus šonų: $\alpha_{K \& D,45^\circ}/\alpha_{K \& D,0^\circ} = 2,8$, kai $l = 0,15$ m, ir $\alpha_{K \& D,45^\circ}/\alpha_{K \& D,0^\circ} = 1,3$, kai $l = 0,45$ m.

Siekiant nustatyti putų plokštelinio šilumokaičio efektyvumą ir palyginti jį su koridoro 1,5 × 1,5 vamzdžių pluoštų šilumokaičio efektyvumu [10, 11], apskaičiuotas vidutinis viso vertikalaus plokščio paviršiaus ($\gamma = 0^\circ$) šilumos atidavimo intensyvumas (6 pav.). Vertikalaus plokščio

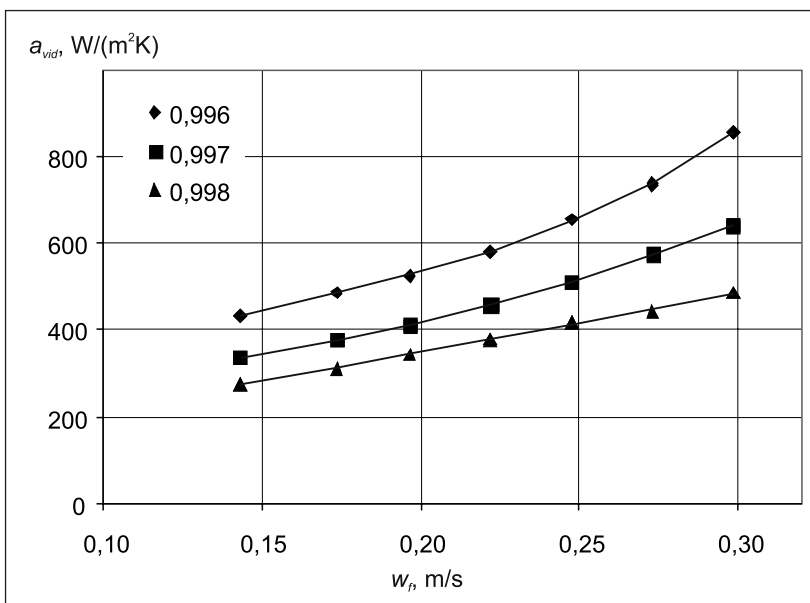


5 pav. Šilumos atidavimo putų srautui intensyvumo kitimas išilgai 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus, kai putų $\beta = 0,997$ ir $w_f = 0,15$ m/s

6 pav. Vertikalaus plokščio paviršiaus vidutinio šilumos mainų putų sraute intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto greičio, kai $\beta = 0,996$; 0,997 ir 0,998



7 pav. Koridorinio $1,5 \times 1,5$ pluošto vamzdžių vidutinio šilumos mainų putų sraute intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto greičio, kai $\beta = 0,996$; 0,997 ir 0,998



paviršiaus aušinimo intensyvumas palygintas su analogiškų tyrimų rezultatais, kai vertikaliai kylantis putų srautas skersai apteka $1,5 \times 1,5$ koridorinį vamzdžių pluoštą (7 pav.).

Galima pastebėti, kad koridorinis $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluoštas, skersai jį aptekant kylančiam putų srautui, yra aušinamas intensyviau nei vertikalus plokščias paviršius, išilgai jį aptekant kylančiam putų srautui, vidutiniškai 1,5 karto, kai $\beta = 0,996$, o $w_f = 0,15-0,25$ m/s; 1,5 karto, kai $\beta = 0,997$, o $w_f = 0,15-0,275$ m/s; 1,9 karto, kai $\beta = 0,998$, o $w_f = 0,15-0,275$ m/s.

Šis palyginimas sąlyginis, nes vamzdžių pluošto atveju vamzdžiai patalpinami skersai kanalo, todėl, putoms pratekant tarp vamzdžių, jų greitis išauga, taip pat dalis putų burbulų atsimuša į vamzdžius ir suyra, kas skatina skysčio

drenažo iš putų suintensyvėjimą, o tai lemia šilumos mainų intensyvumo padidėjimą.

Eksperimentiniai vertikalaus plokščio paviršiaus ($\gamma = 0^\circ$) šilumos mainų tyrimai kylančiame statiškai stabilų putų sraute apibendrinti kriterine lygtimi, nusakančia priklausomybę tarp Nuselto skaičiaus ir putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus bei putų dujingumo. Ši lygtis gali būti taikoma, kai $930 < Re_g < 2\,560$, o putų srauto tūrinis debitinis dujingumas $\beta = 0,996, 0,997$ ir $0,998$.

$$Nu_f = k \left(\frac{1-\beta}{\beta} \right)^m Re_g^n, \quad (7)$$

vidutiniam viso paviršiaus Nu_f apskaičiuoti: $k = 14\,500$, $m = 0,84$, $n = 0,33$. Lygtis (7) eksperimentinius rezultatus aprašo $\pm 12,5\%$ tikslumu.

IŠVADOS

1. Eksperimentiškai tirti šilumos mainai tarp plokščio paviršiaus ir jį išilgai aptekancio kylančio dvifazių putų srauto, kai plokščias paviršius vertikalus ir kai plokščias paviršius pasviręs 45° kampu.

2. Pasvirusiame kanale ($\gamma = 45^\circ$) dėl skysčio drenažo iš putų dedamosios, nukreiptos skersai tėkmės ir kanalo, ties plokščiu paviršiumi putų tikrasis dujingumas padidėja, o paviršiaus aušinimas putomis suintensyvėja. Tai veikia 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus intensyvesnį aušinimą putomis nei vertikalaus plokščio paviršiaus atveju.

3. Plokščio paviršiaus aušinimo putomis vidutinis intensyvumas priklauso nuo putų dujingumo ir srauto greičio. Mažėjant putų dujingumui ir didėjant putų srauto greičiui, paviršiaus aušinimo putomis intensyvumas didėja.

4. Lyginant vertikalaus plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumą su koridorinio $1,5 \times 1,5$ vamzdžių pluošto aušinimu nustatyta, kad vamzdžių pluoštas, skersai jį aptekant kylančiam putų srautui, yra aušinamas intensyviau nei vertikalus plokščias paviršius, išilgai jį aptekant kylančiam putų srautui.

5. Tyrimų rezultatai apibendrinti kriterine lygtimi (7), įgalinančia apskaičiuoti vidutinį šilumos mainų intensyvumą tarp vertikalaus plokščio paviršiaus ir išilgai paviršiaus kylančio dvifazių putų srauto, kai putų dujingumas $\beta = 0,996-0,998$ ir $930 < Re_g < 2\,560$. Ši lygtis tinka moksliniams ir inžineriniams skaičiavimams, gali būti taikoma projektuojant putų aparatus.

Gauta 2011 08 15

Priimta 2012 01 18

Literatūra

- Gylys J. Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiskai stabilų putų sistemose. Kaunas, 1998. 388 p.
- 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. No. 6. P. 632–637.
- Stevenson P. Dimensional analysis of foam drainage. *Chemical Engineering Science*. 2006. No. 61(14). P. 4503–4510.
- Sadoc J. F., Rivier N. Foams and Emulsions. *Nato ASI Series*, 1997. 596 p.
- Tichomirov V. K. Teorija i praktika ich palutchenija i razruschenija. Maskva: Khimija, 1983. 262 s.
- Schramm L. L., Emulsions, Foams, and Suspensions. Wiley-VCH, Weinheim, 2006. P. 209–222.
- Žukauskas A. Kanviektivny pierienos v tieploobmenikah. Maskva: Nauka, 1982. 472 s.
- Ždankus T., Šilumos mainų tyrimas besileidžiančiam dvifaziui srautui aptekant šachmatinį vamzdžių pluoštą. *Daktaro disertacija*. Kaunas, 2004. 112 p.
- Gylys J., Sinkunas S., Zdankus T. Analysis of staggered tube bundle heat transfer to vertical foam flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. No. 51(1–2). P. 253–262.
- Gylys J., Zdankus T., Gabrielaitienė I., Sinkunas S. Experimental research of heat transfer from an in-line tube bundle to a vertical foam flow. *Heat Transfer Research*. 2009. No. 40(5). P. 455–472.
- 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 X*, 2008. P. 117–125.
- Gylys J., Zdankus T., Gylys M., Ingilertas A., Jonynas R. Heat transfer between non-standard in-line tube bundle and vertically upward aqueous foam flow. *CYSENI 2010: the 7th Annual Conference of Young Scientists on Energy Issues*, Kaunas, Lithuania, 2010. P. 286–293.

Jonas Gylys, Tadas Ždankus, Martynas Gylys,
Rolandas Jonynas

USAGE OF TWO-PHASE FOAM FLOW FOR COOLING OF PLANE SURFACES

Summary

Heat transfer between the vertical and inclined (45°) plane surface, and the longitudinally upward flow of statically stable foam was investigated experimentally. The value variation regularities of the heat transfer coefficient along and across the plane surface were determined. The dependence of the mean intensity of the plane surface heat transfer to the foam flow on the foam volumetric void fraction and flow velocity was determined, and the criterion equation was obtained. It was noticed that the intensity of the inclined (45°) plane surface cooling by the foam flow was more than that of the vertical surface. The comparison of the mean intensity of the vertical plane surface cooling with that of the in-line 1.5×1.5 tube bundle showed that the cooling of the tube bundle was more intensive.

Key words: heat transfer, two-phase foam flow, plane surface, inclined surface, tube bundle

Йонас Гилис, Тадас Жданкус, Мартинас Гилис,
Роландас Йонинас

ОХЛАЖДЕНИЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТОКОМ ДВУХФАЗНОЙ ПЕНЫ

Резюме

Экспериментально исследован теплообмен между вертикальной плоской поверхностью и поверхностью с наклоном под углом 45 градусов и продольно вверх направленным потоком статически устойчивой пены. Установлена закономерность изменения значения коэффициента теплоотдачи продольно и поперечно плоской поверхности, а также установлено влияние газосодержания пены и скорости потока на среднюю интенсивность теплообмена плоской поверхности – создано критериальное уравнение. Установлено, что плоская поверхность с наклоном под углом 45 градусов охлаждается потоком пены интенсивнее, чем вертикальная поверхность. Сравнив среднюю интенсивность охлаждения вертикальной плоской поверхности с охлаждением потоком пены коридорного $1,5 \times 1,5$ пучка труб, установлено, что пучок труб охлаждается интенсивнее.

Ключевые слова: теплообмен, поток двухфазной пены, плоская поверхность, наклонная поверхность, пучок труб