

# Pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimas dvifazių putų srautu

**Martynas Gylys**

*Kauno technologijos universitetas,  
Energetikos technologijų institutas,  
K. Donelaičio g. 20–104 LK,  
LT-44239 Kaunas  
El. paštas: martynas.gyllys@ktu.lt*

Eksperimentiškai ir analitiškai tirti šilumos mainai tarp pasvirusio plokščio įkaitusio paviršiaus ir jį išilgai aptekancio kylančio statiškai stabilių putų srauto. Nustatyta, kad ant pasvirusio plokščio paviršiaus susiformuoja iš putų nusidrenavusio skysčio sluoksnis. Paviršiaus aušinimo intensyvumą lemia nusidrenavusio (drenažinio) tirpalo sluoksnio storis, tirpalo greitis ir temperatūra. Šie parametrai priklauso nuo kanalų tekančių putų debito, temperatūros ir dujingumo. Sudarytos analitinės lygtys įvertinti drenažinio tirpalo sluoksnio storį, debitą, vidutinį tirpalo greitį bei temperatūrą. Nustatyta, kad, skirtingai nei vertikalų plokščių paviršių aušinant putomis, vidutinis pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumas didėja (didėjant putų srauto greičiui), pasiekia maksimumą ir pradeda mažėti. Eksperimentinių tyrimų rezultatai palyginti su analitinių tyrimų rezultatais.

**Raktažodžiai:** dvifazių putų srautas, pasviręs plokščias paviršius, drenažinio tirpalo sluoksnis, šilumos mainai

## ĮVADAS

Šiuo metu pramonėje plačiai paplitusiuose rekuperaciniuose šilumokaičiuose šilumos mainų intensyvumas priklauso nuo trijų pagrindinių veiksnių: šilumos mainų paviršiaus ploto, šilumnešių temperatūrų skirtumo ir šilumos perdavimo koeficiento dydžio [1, 2]. Šilumos mainų paviršiaus ploto didinimas susijęs su didesnėmis medžiagų sąnaudomis, didesniais šilumokaičių matmenimis, sudėtingesne šilumokaičių konstrukcija. Padidinti šilumnešių temperatūrų skirtumą ne visada leidžia techninės galimybės, iš kitos pusės – tai nenaudinga ir ekonomiškai (sudeginama daugiau kuro ir t. t.). Lieka trečiasis būdas, leidžiantis padidinti perduodamos šilumos kiekį – tai paties šilumos mainų proceso vyksmo intensyvinimas, veikiantis šilumos perdavimo koeficiento padidėjimą. Šilumos perdavimo nuo vieno šilumnešio kitam proceso intensyvumą paprastai lemia ne

tik šilumnešius skiriančio paviršiaus (sienelės) šilumos laidumas, bet ir šilumos atidavimo nuo paviršiaus šilumnešiu (arba nuo šilumnešio paviršiui) intensyvumas, t. y. šilumos atidavimo koeficiento dydis. Šilumos atidavimo koeficientą galima didinti įvairiais būdais: turbulizuojant paviršių aptekancio šilumnešio srautą, vietoje dujinio šilumnešio naudojant skystąjį šilumnešį arba šilumnešį, kuris keičia agregatinę būseną (verdantį, besikondensuojantį) ir t. t. Pastaruoju metu nemažas dėmesys skiriamas dvifaziams (dažniausiai dujų ir skysčio) šilumnešiams intensyvinant šilumos atidavimo procesą [3–5]. Šiam tikslui tinka ir tokia dvifazė sistema, kaip statiškai stabilios putos [6], pasižyminčios daugeliu privalumų, kurių svarbiausias yra tas, kad jau esant nedideliams putų srauto greičiams (0,1–0,5 m/s) bei mažiems masiniams debitams (nedaug besiskiriantiems nuo dujinio šilumnešio), pasiekiamas sąlyginai didelis šilumos atidavimo intensyvumas.

Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedroje bei Energetikos technologijų institute daug metų tiriamas šilumos atidavimas statišškai stabilių putų srautui. Vertikaliu putų srautu aptekamo pavienio vamzdžio [6], vamzdžių eilės [6], šachmatinio [7, 8], koridorinio [9, 10] ir nestandartinio [11, 12] vamzdžių pluoštų, vertikalios plokščio paviršiaus [13] šilumos atidavimo tyrimai atskleidė statišškai stabilių putų taikymo šilumokaičiuose privalumus ir trūkumus.

Iki šiol tirtas šilumos atidavimas nuo įkaitusio paviršiaus (cilindrinio arba plokščio) vertikalia kryptimi (aukštyne arba žemyn) tekančiam putų srautui. Tačiau praktikoje šilumnešių aptekamieji paviršiai gali būti ne tik vertikalus, bet ir pasviręs bet kokiame kampu nuo vertikales [2]. Vienfazio šilumnešio (skysčio arba dujų) arba dvifazio (dažniausiai vandens ir vandens garų arba oro ir skysčio lašelių) šilumos mainų intensyvumo kitimas pasvirusiame kanale yra tirtas gana plačiai [14]. Pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimas putų srautui, kaip rodo skelbiamų darbų analizė, nėra tirtas. Tirpalo drenažas iš putų, ant įkaitusių paviršių ir kanalo sienelių formuojantis priešingą (arba tą patį) putų srautui tekančio tirpalo sluoksnį (plėvelę) bei persikirstantis tikrojo tūrinio putų dujingumo pasiskirstymą ne tiksliai išilgai, bet ir skersai putų srauto, įneša daug savitumų ir komplikuoja šilumos atidavimo proceso tyrimą.

Šiame straipsnyje analizuojamas pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimas statišškai stabilių putų srautu, pateikiami analitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai.

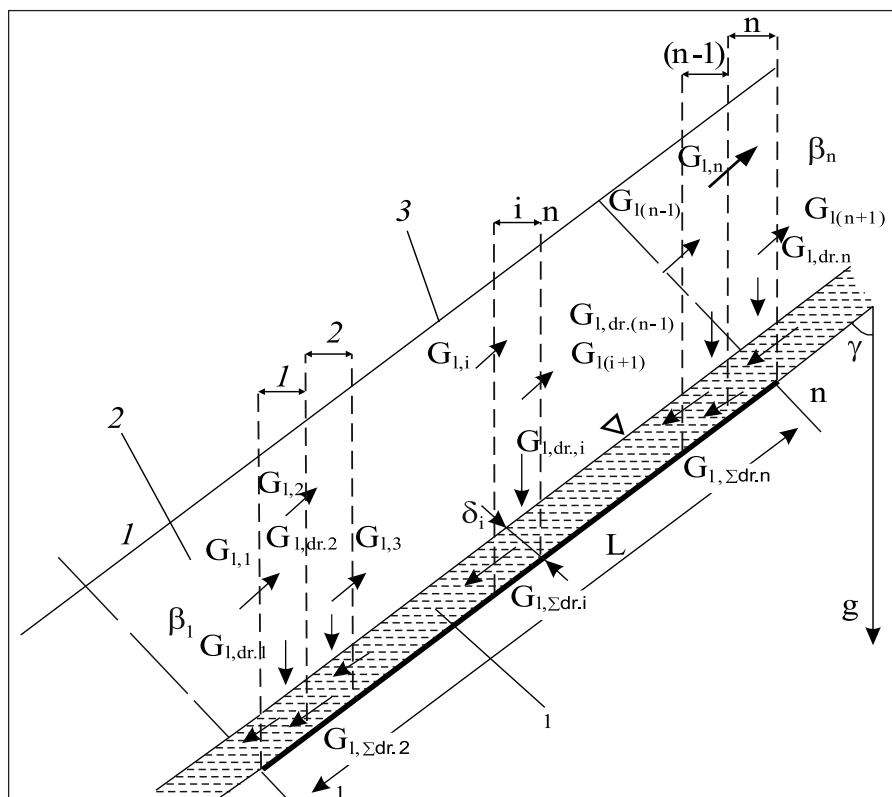
## TEORINIAI TYRIMAI

### Hidrodinamika

Pasvirusiame kanale lemiamą reikšmę pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo putų srauto intensyvumui turi drenažiniai procesai [6, 15], dėl kurių aušinamas paviršius padengiamas nusidrenavusio tirpalo sluoksniu. Tirpalo sluoksnio hidrodinaminių charakteristikų (sluoksnio storio, tekėjimo krypties, greičio ir kt.) radimas būtinas tiriant tokio paviršiaus šilumos atidavimą putų srautui.

Pasvirusiu kanalu aukštyne tekančios putos eksperimentiniame ruože sausėja, didėja jų dujingumas, nes dalis tirpalo iš putų Gibso kanalais ir gretimus burbulus skiriančiomis sienelėmis drenuojasi [15, 16]. Ant apatinės kanalo sienelės formuojasi priešinga arba ta pačia putų srautui kryptimi tekančio tirpalo sluoksnis. Tirpalo drenažas iš putų vyksta veikiant gravitacinėms, kapiliarinėms, molekulinėms ir elektrostatinėms jėgoms. Kapiliarinės, molekulinės ir elektrostatinės jėgos vyrauja tada, kai putų dujingumas yra artimas vienetui (prieš pat putų sinerezę – suirimą). Kai putos yra pakankamai drėgnos ( $1 \text{ m}^3$  putų yra daugiau kaip  $1 \text{ kg}$  tirpalo), drenažo proceso eigą lemia gravitacinės jėgos [15, 17]. Kadangi eksperimentiškai tirtuose šilumos mainų procesuose naudotų statišškai stabilių putų tūrinis debitinis dujingumas mažesnis kaip 0,999, tai skaičiuojant nusidrenavusio tirpalo hidrodinaminius parametrus įvertinta tik gravitacinių jėgų įtaka [6, 15].

Putų kanalas (1 pav.) vertikaliais pjūviais padalinamas į atskiras elementarias zonas: 1, 2, 3... $i$ ... $(n-1)$ ,  $n$ . Kai tiriama-



1 pav. Putų tirpalo drenažas pasvirusiame kanale. 1 – tirpalo sluoksnis; 2 – putų srautas; 3 – eksperimentinis ruožas

jo eksperimentinio ruožo ilgis  $L$  (m), o elementarios zonos ilgis  $l_i$  (m), tai elementarių zonų skaičius  $n = L/l_i$ . Straipsnyje pateiktuose grafikuose  $x_i = l_i \cdot i$  arba  $x_i = L \cdot (i/n)$ .

Priimama, kad putų srauto dujingumas nekinta elementarios zonos ribose, o keičiasi šuoliškai pereinant iš vienos zonos į kitą. Be to, priimama, kad kiekvienoje zonoje nusidrenuoja  $n$ -oji dalis tirpalo, su putomis atnešamo į tą zoną.

Tokiu atveju gaunama:

lygtis, įgalinanti apskaičiuoti į bet kurią elementarią zoną su putomis atnešamo tirpalo debitą, kg/s:

$$G_{l,i} = G_{l,1} \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)}, \quad (1)$$

čia:  $i$  – zonos numeris ( $i \leq n$ );  $n$  – zonų skaičius,  $G_{l,1}$  – į pirmąją zoną su putomis atnešamo tirpalo debitas, kg/s;

lygtis, skirta įvertinti kiekvienoje zonoje iš putų nusidrenuojančio tirpalo srautą, kg/s:

$$G_{l,dr,i} = \frac{G_{l,1}}{n} \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)}; \quad (2)$$

lygtis, kuria galima surasti bet kurioje zonoje tekančio nusidrenuoto tirpalo debitą, kg/s:

$$\Delta G_{l,i} = G_{l,\Sigma dr,i} = G_{l,1} \left[ \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)} - \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(n)} \right]. \quad (3)$$

Nustatant su putomis pernešamo tirpalo debitą (1 lygtis), būtina žinoti į pirmąją (apatinę) zoną su putomis įnešamo tirpalo debitą  $G_{l,1}$ , kg/s:

$$G_{l,1} = G_{l,n} \cdot \frac{1}{\left( \frac{n-1}{n} \right)^{(n-1)}} \quad (4)$$

bei su putomis pernešamo tirpalo debitą paskutinėje ( $n$ -ojoje) zonoje  $G_{l,n}$ , kg/s:

$$G_{l,n} = \left( \frac{1-\beta_n}{\beta_n} \right) \cdot G_g \cdot \frac{\rho_l}{\rho_g}, \quad (5)$$

čia:  $G_g$  – masinis į putų aparatą tiekiamų dujų (oro) debitas, kg/s;  $\rho_p, \rho_g$  – tirpalo ir dujų tankis, kg/m<sup>3</sup>;  $\beta_n$  – vidutinis masinis debitinis putų dujingumas ištekant iš eksperimentinio ruožo, randamas eksperimentiškai pagal tiekiamo į aparatą tirpalo ir dujų masinius debitus:

$$\beta_n = \left( 1 + \frac{G_{l,n}}{G_g} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-1}. \quad (6)$$

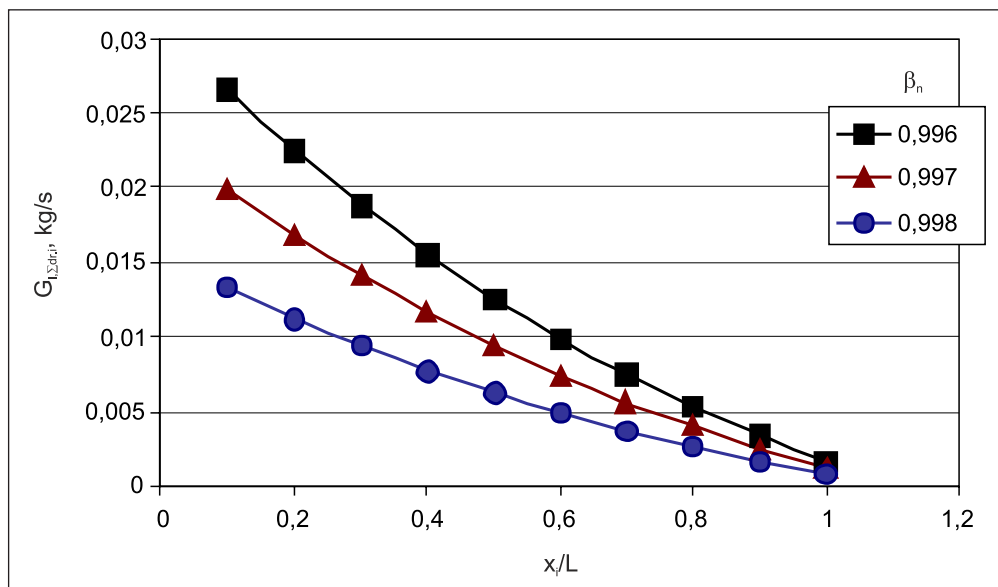
Priimama, kad su putomis iš eksperimentinio ruožo išnešamo tirpalo debitas  $G_{l,n}$  yra lygus į putų generavimo kanalą tiekiamo naujo tirpalo debitui  $G_p$ , kg/s:

$$G_{l,1} = G_{l,n} \cdot \frac{1}{\left( \frac{n-1}{n} \right)^{(n-1)}}. \quad (7)$$

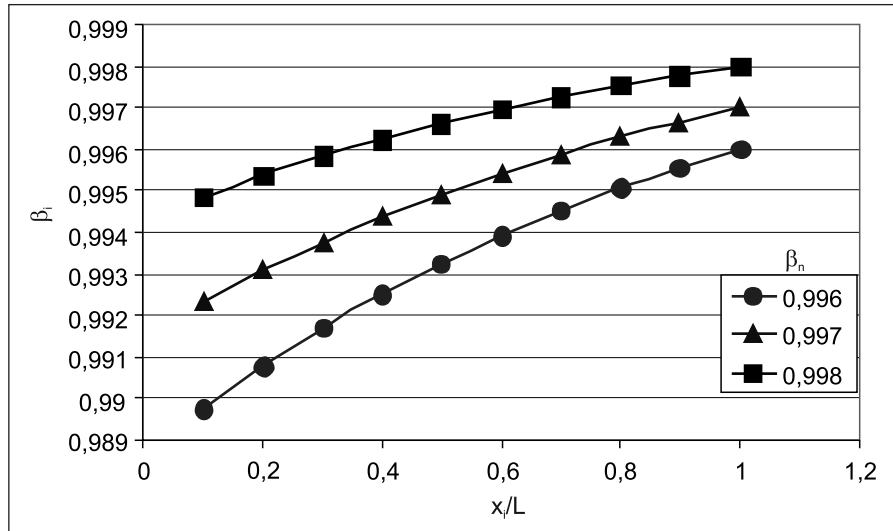
Geometrinė (3) lygties interpretacija pavaizduota 2 pav. Žinant kiekvienoje elementariojoje zonoje su putomis pernešamo tirpalo debitą  $G_{l,i}$  ir tariant, kad masinis dujų (oro) debitas (kg/s) nekinta eksperimentinio ruožo ilgyje ( $G_g = G_{g,i} = \text{const}$ ), galima surasti vidutinį masinį debitinį putų dujingumą kiekvienoje zonoje (8 lygtis, 3 pav.):

$$\beta_i = \left( 1 + \frac{G_{l,i}}{G_g} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-1}. \quad (8)$$

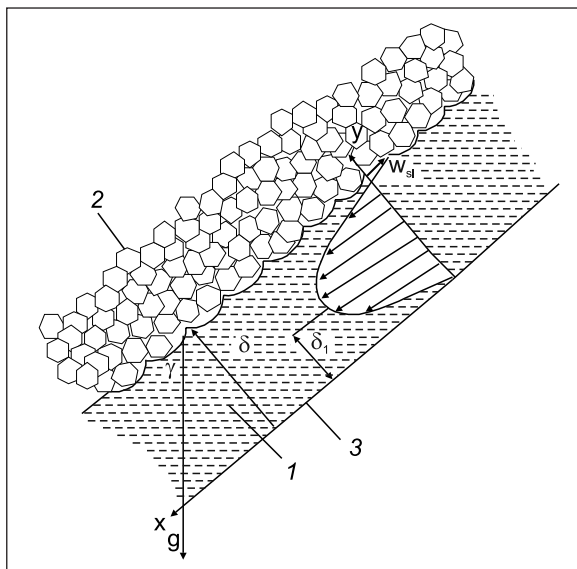
Ant kaitinimo paviršiaus (apatinė kanalo plokštuma) tekančio drenažinio tirpalo sluoksnio hidrodinamika turi lemiamos įtakos šilumos atidavimui nuo paviršiaus putų srautui, todėl būtina surasti skysčio greičio pasiskirstymą drenažinio tirpalo sluoksnio skerspjūvyje (4 pav.).



2 pav. Drenažinio tirpalo debito sluoksnyje kitimas išilgai kanalo ( $\bar{w}_g = 0,2$  m/s;  $L = 0,5$  m)



3 pav. Vidutinio tūrinio dujingumo kitimas pagal putų kanalo ilgį



4 pav. Drenažinio tirpalo greičio profilis: 1 – tirpalas; 2 – putos; 3 – sienelė

Drenažinio tirpalo tekėjimo lygtis atrodytų taip:

$$\rho_l \cdot g \cdot \cos \gamma + \mu_l \frac{d^2 w_l}{dy^2} = 0. \quad (9)$$

Šios lygties sprendinys (m/s):

$$w_l = A_l y \left[ (\delta - y) \pm \frac{w_{sl}}{A_l \delta} \right], \quad (10)$$

čia:  $A_l = \frac{\rho_l \cdot g \cdot \cos \gamma}{2\mu_l}$ ;  $w_{sl}$  – santykinis (slydimo) greitis randamas (m/s):

$$w_{sl} = \mp \frac{A_l}{12} \delta^2 = \mp \frac{g \cdot \delta^2}{24\nu_l} \cos \gamma. \quad (11)$$

Tuomet pasrovio tekėjimo atveju (kai putos ir drenažinis tirpalas juda žemyn) gaunama (m/s):

$$w_l = \frac{A_l y}{12} (13\delta - 12y); \quad (12)$$

priešrovio tekėjimo atveju (kai putos juda aukštyn, o drenažinis tirpalas – žemyn) gaunama (m/s):

$$w_l = \frac{A_l y}{12} (11\delta - 12y). \quad (13)$$

Geometrinė (12, 13) lygčių interpretacija pavaizduota 5 pav.

Siekiant surasti drenažinio tirpalo sluoksnio storį  $\delta$  (m), reikia žinoti tūrinį tirpalo debitą sluoksnyje, tenkanti vienam kanalo pločio metrui,  $m^2/s$ :

$$G_l = \int_0^{\delta} w_l dy = \int_0^{\delta} A_l y \left[ (\delta - y) \pm \frac{w_{sl}}{A_l \delta} \right] dy = \frac{\delta}{6} (A_l \delta^2 \pm 3w_{sl}). \quad (14)$$

Tirpalo debitas, tenkantis vienam kanalo pločio metrui ( $m^2/s$ ),

kai tekėjimo kryptys sutampa:

$$G_l = \frac{\delta}{6} (A_l \delta^2 + 3w_{sl}) = \frac{5}{24} A_l \delta^3; \quad (15)$$

kai tekėjimo kryptys priešingos:

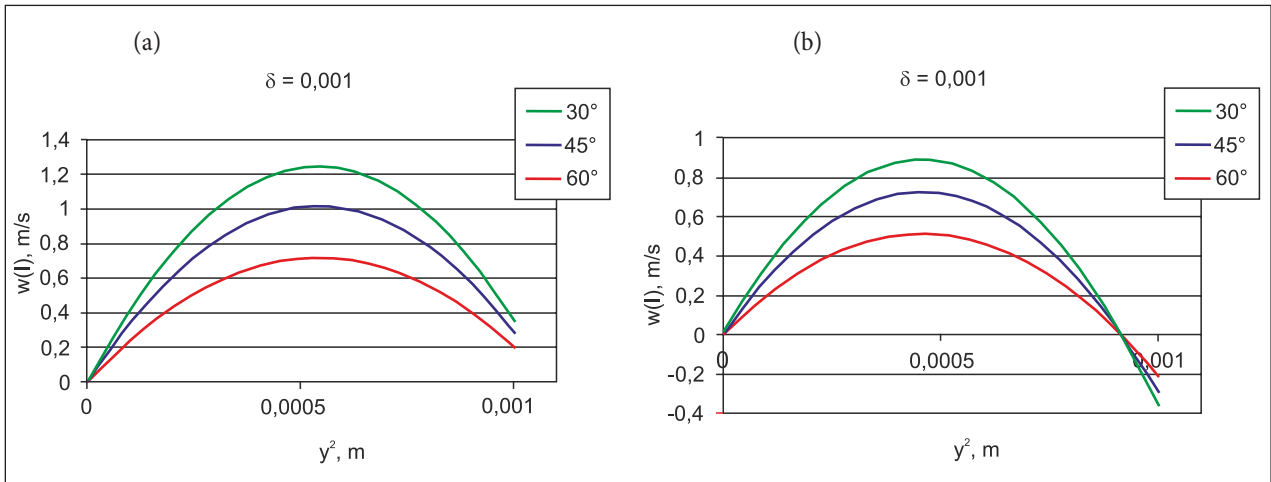
$$G_l = \frac{\delta}{6} (A_l \delta^2 - 3w_{sl}) = \frac{3}{24} A_l \delta^3. \quad (16)$$

Tada vidutinis masinis tirpalo debitas (kg/s), kai tekėjimo kryptys sutampa:

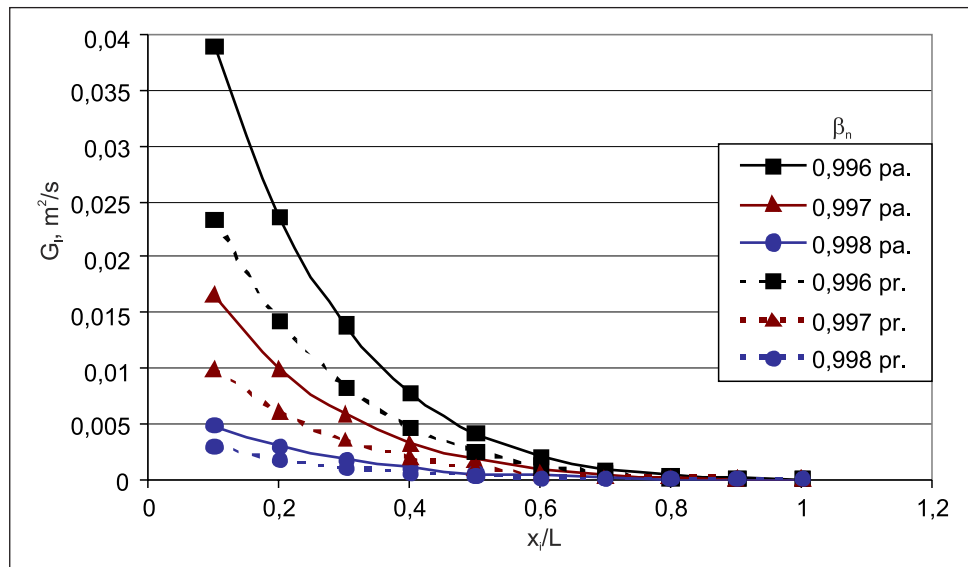
$$G_{l, \Sigma dr, i} = \frac{5}{24} A_l \cdot a \cdot \delta_i^3 \cdot \rho_l; \quad (17)$$

kai tekėjimo kryptys priešingos:

$$G_{l, \Sigma dr, i} = \frac{3}{24} A_l \cdot a \cdot \delta_i^3 \cdot \rho_l. \quad (18)$$



5 pav. Pasrovio (a) ir priešrovio (b) tirpalo sluoksnio greičio profiliai



6 pav. Pasrovio (---) ir priešrovio (----) ( $\gamma = 45^\circ; \bar{w}_g = 0,2 \text{ m/s}$ ) tirpalo debito kitimas eksperimentinio ruožo ilgyje

Lygčių (17, 18) geometrinė interpretacija pateikta 6 pav.

Sulyginę (3) lygties ir (17), (18) lygčių dešiniąsias puses, išreiškiame drenazinio tirpalo sluoksnio storį (m), kai tekėjimo kryptys yra priešingos:

$$\delta_i = 2,52 \left\{ G_g \left( \frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \frac{v_l}{\rho_g \cdot a \cdot g \cdot \cos \gamma} \left[ \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left( \frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (19)$$

kai tekėjimo kryptys sutampa:

$$\delta_i = 2,13 \left\{ G_g \left( \frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \frac{v_l}{\rho_g \cdot a \cdot g \cdot \cos \gamma} \left[ \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left( \frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (20)$$

Geometrinė (19, 20) lygčių interpretacija pateikta 7 pav.

### Šilumos atidavimas

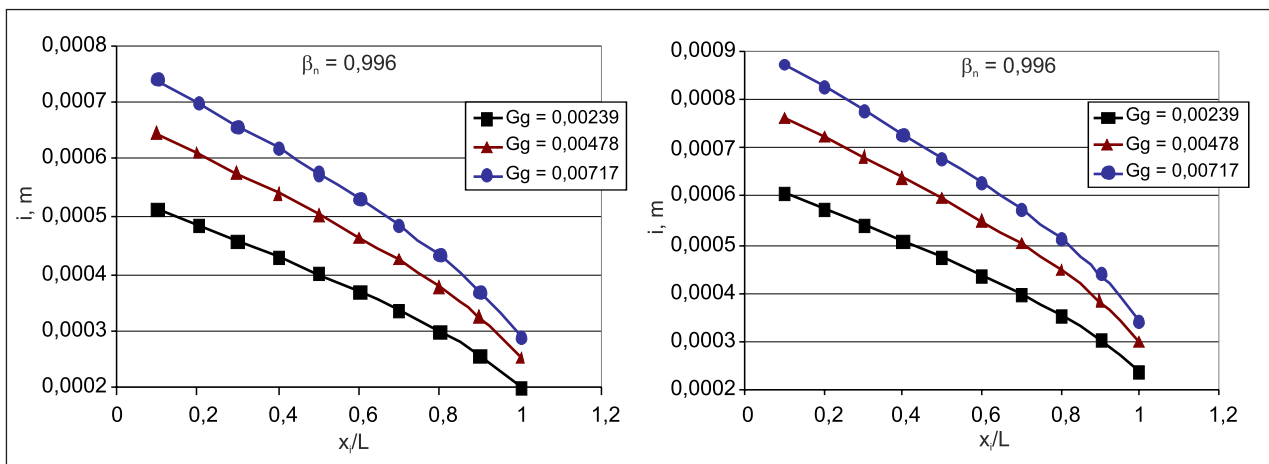
Supaprastinta pasvirusio putų kanalo su apatiniu plokščiu kaitinimo paviršiumi schema pavaizduota 8 pav.

Nustatant plokščio pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui intensyvumą, be hidrodinaminių drenazinio tirpalo sluoksnio parametrų, taip pat būtina žinoti kaitinimo paviršiaus temperatūrą (nustatoma eksperimentiškai) bei tirpalo temperatūros kitimą išilgai kaitinimo paviršiaus (apskaičiuojama).

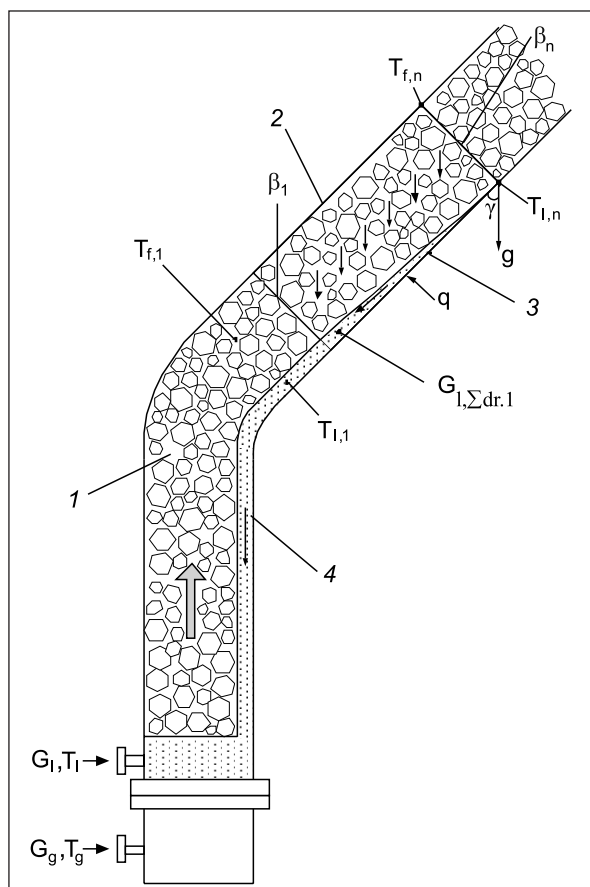
Nustatydami tirpalo sluoksnio temperatūrą, pasinaudosime šilumos balanso lygtimi. Tokiu atveju iš  $i$ -tosios zonos ištekančio tirpalo temperatūra ( $^\circ\text{C}$ ):

$$T_{l,i;is} = T_{l,dr,i} + \frac{q \cdot l_i}{\Delta G_{l,i} \cdot c_{pl,i}} \quad (21)$$

čia:  $c_{pl,i}$  – tirpalo savitoji šiluma,  $\text{kJ}/(\text{kg K})$ ;  $q$  – šilumos srauto tankis,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $T_{l,dr,i}$  –  $i$ -ąją zoną atitekančio drenazinio



7 pav. Tirpalo sluoksnio storio kitimas esant skirtingiems oro debitams (vidutinis dujumas  $\beta = 0,996$ )



8 pav. Supaprastinta pasvirusio putų kanalo schema: 1 – putų srautas; 2 – eksperimentinis ruožas; 3 – plokščias kaitinimo paviršius; 4 – drenažinio tirpalo sluoksnis

tirpalo bei  $i$ -ojoje zonoje nusidrenavusio tirpalo vidutinė temperatūra ( $^{\circ}\text{C}$ ) nustatoma:

$$T_{l,dr,i} = \frac{\Delta G_{l,(i+1)} \cdot T_{l,(i+1)} + G_{l,dr,i} \cdot T_{f,2}}{G_{l,i}}, \quad (22)$$

čia  $T_{f,2}$  – putų srauto temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ .

Drenažinio tirpalo temperatūros kitimas išilgai eksperimentinio ruožo pavaizduotas 9 pav.

Vidutinį  $i$ -ojoje zonoje šilumos atidavimo koeficientą randame pasinaudodami šilumos perdavimo ir šilumos balanso lygtimis.

Putoms perduodama šilumos galia nustatoma iš šilumos perdavimo lygties (kW):

$$Q = \alpha_i \cdot (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.}) \cdot F_{w,i}, \quad (23)$$

čia:  $\alpha_i$  – vidutinis šilumos atidavimo koeficientas  $i$ -ojoje zonoje,  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ ;  $F_{w,i}$  –  $i$ -osios zonos kaitinimo paviršiaus plotas,  $\text{m}^2$ ;  $T_{l,i}^{vid.}$  – vidutinė tirpalo temperatūra  $i$ -ojoje zonoje,  $^{\circ}\text{C}$ .

Eksperimento metu nustatytas kaitinamo paviršiaus temperatūros  $T_{w,i}$  kitimas pavaizduotas 10 pav.

Šilumos galią galima surasti ir iš balanso lygties (įvertinamas tiksliai su putomis pernešamo tirpalo debitas), kW:

$$\Delta G_{l,(i+1)} \cdot c_{pl} \cdot T_{l,(i+1)} + G_{l,idr.} \cdot c_{pl} \cdot T_{f,2} + Q_{kait.,i} = \Delta G_{l,i} \cdot c_{pl} \cdot T_{l,i}, \quad (24)$$

čia:

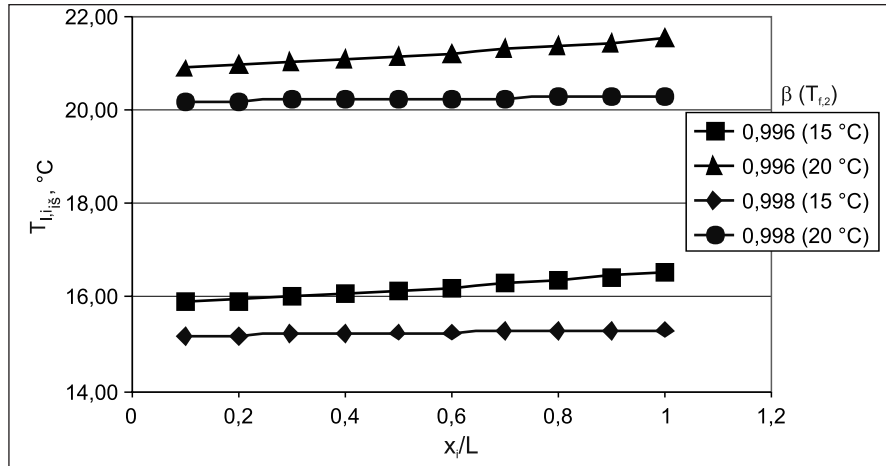
$$Q = Q_{kait.,i} = c_{pl} \left( \Delta G_{l,i} \cdot T_{l,i} - \Delta G_{l,(i+1)} \cdot T_{l,(i+1)} - G_{l,idr.} \cdot T_{f,2} \right), \quad (25)$$

čia:  $Q_{kait.,i}$  – kaitinimo paviršiaus tirpalo srautui  $i$ -ojoje zonoje suteiktos šilumos galia, kW.

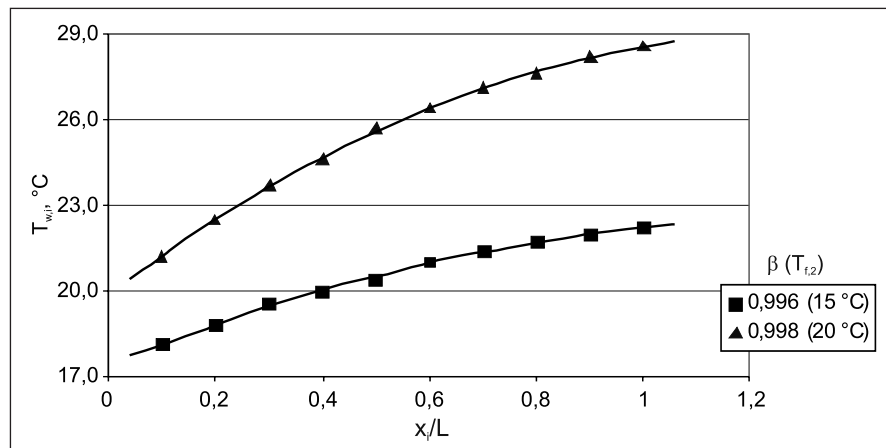
Kadangi:

$$\Delta G_{l,i} = \Delta G_{l,(i+1)} + G_{l,idr.}, \quad (26)$$

tai lygtis (25) atrodo taip:



9 pav. Nusidrenavusio tirpalo temperatūros kitimas išilgai eksperimentinio ruožo ( $\bar{w}_g = 0,2 \text{ m/s}$ )



10 pav. Eksperimentinio ruožo (kaitinimo paviršiaus) temperatūros kitimas (eksperimentiniai duomenys)

$$Q = c_{p_l} (\Delta G_{l,(i+1)} \cdot T_{l,i\delta} + G_{l,idr.} \cdot T_{l,i\delta} - \Delta G_{l,(i+1)} \cdot T_{l,(i+1)\delta} - G_{l,idr.} \cdot T_{f,2}) \quad (27)$$

arba:

$$Q = c_{p_l} \left[ \sum G_{l,(i+1)} (T_{l,i\delta} - T_{l,(i+1)\delta}) + G_{l,idr.} (T_{l,i\delta} - T_{f,2}) \right] \quad (28)$$

Iš (23, 28) lygčių nustatome šilumos atidavimo koeficientą,  $W/m^2K$ :

$$\alpha_i = \frac{\Delta G_{l,(i+1)} \cdot c_{p_l} (T_{l,i\delta} - T_{l,(i+1)\delta})}{F_{w,i} \cdot (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.})} + \frac{G_{l,idr.} \cdot c_{p_l} (T_{l,i\delta} - T_{f,2})}{F_{w,i} \cdot (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.})} \quad (29)$$

arba

$$\alpha_i + \alpha_{i,\Sigma} + \alpha_{i,dr.} \quad (30)$$

čia:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{i,\Sigma} &= \frac{\Delta G_{l,(i+1)} \cdot c_{p_l} \cdot (T_{l,i\delta} - T_{l,(i+1)\delta})}{F_{w,i} \cdot (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.})} \\ \alpha_{i,dr.} &= \frac{G_{l,idr.} \cdot c_{p_l} \cdot (T_{l,i\delta} - T_{f,2})}{F_{w,i} \cdot (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.})} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Šilumos atidavimo koeficientas  $\alpha_{i,\Sigma}$  charakterizuoja nusidrenavusio tirpalo sluoksnio pašilimo intensyvumą  $i$ -ojoje zonoje, o šilumos atidavimo koeficientas  $\alpha_{i,dr.}$  charakterizuoja  $i$ -ojoje zonoje besidrenuojančio tirpalo pašilimo intensyvumą.

Lygtį (30) galima perrašyti taip:

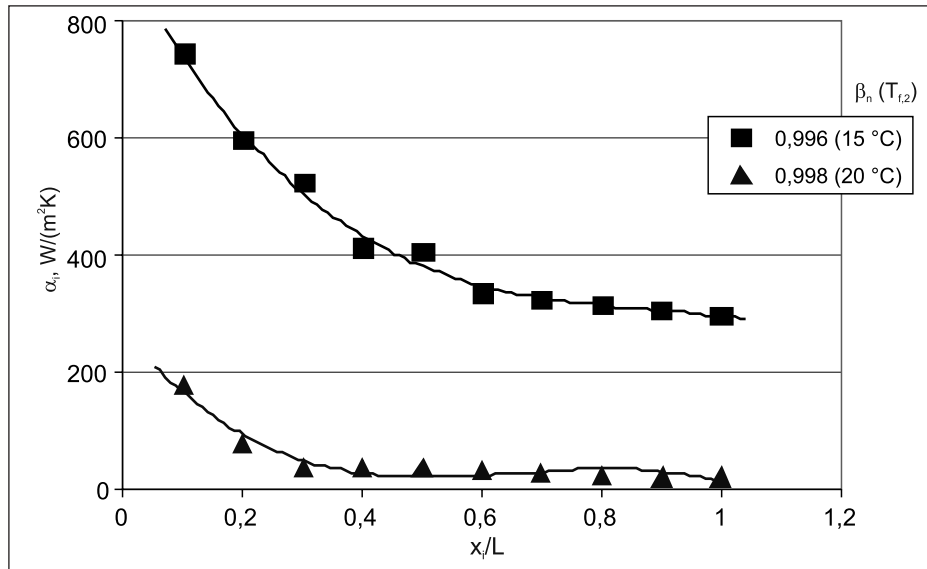
$$\alpha_i = \alpha_{i,l} \frac{\Delta T_{l,i}}{\Delta \vartheta_i} + \alpha_{i,f} \frac{\Delta T_{l,idr.}}{\Delta \vartheta_i}, \quad (32)$$

čia:

$$\alpha_{i,l} = \frac{\Delta G_{l,(i+1)} \cdot c_{p_l}}{F_{w,i}}, \alpha_{i,f} = \frac{G_{l,idr.} \cdot c_{p_l}}{F_{w,i}}, \Delta T_{l,i} = (T_{l,i\delta} - T_{l,(i+1)\delta});$$

$$\Delta T_{l,idr.} = (T_{l,i\delta} - T_{f,2}); \Delta \vartheta_i = (T_{w,i} - T_{l,i}^{vid.}); T_{l,i}^{vid.} = \frac{T_{l,(i+1)\delta} + T_{l,i\delta}}{2}.$$

Geometrinė (29) lygties interpretacija pateikta 11 pav.

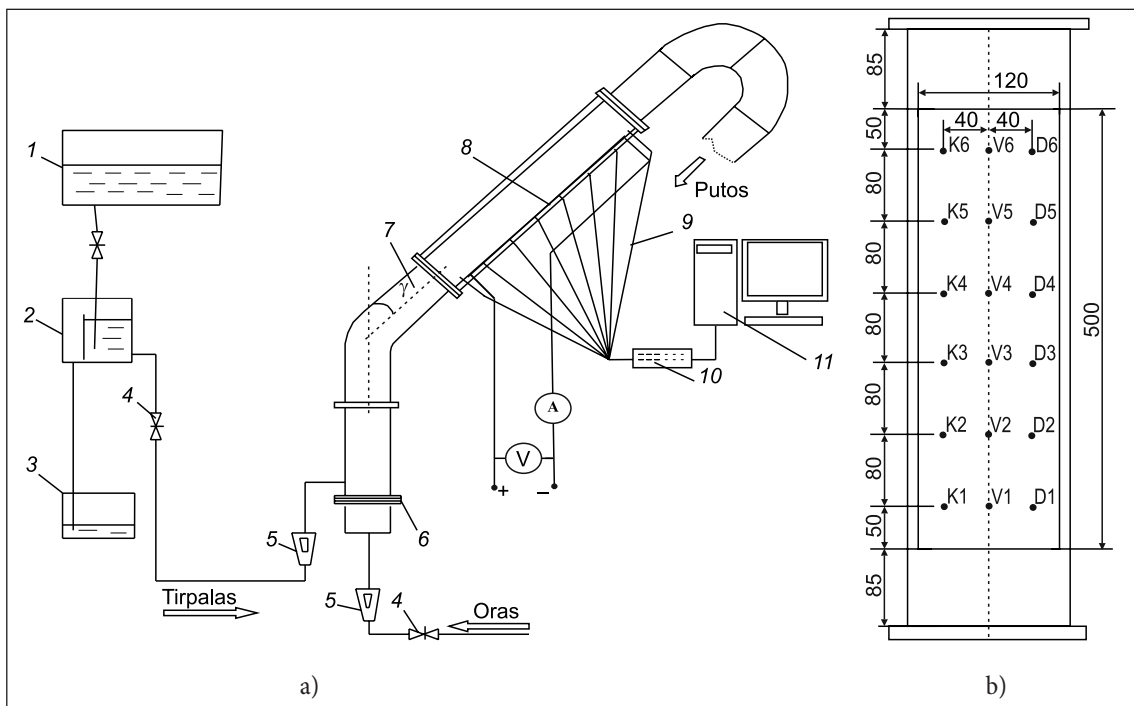


11 pav. Šilumos atdavimo koeficiento  $\alpha_n$  kitimas išilgai eksperimentinio ruožo ( $\bar{w}_g = 0,2$  m/s)

## EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Pasvirusiame eksperimentinio kanalo ruože (12 pav.) išilgai vidinės apatinės kanalo sienelės sumontuotas plokščias, elektros srove kaitinamas paviršius. Iš nerūdijančio plieno pagaminto plokščio paviršiaus ilgis – 0,5 m, plotis – 0,12 m, o storis – 0,1 mm. Prie plokščio paviršiaus trimis išilginėmis eilėmis pritvirtinta aštuoniolika vario-konstantano ter-

moporų (po šešias kiekvienoje eilėje), kurių išėjimo signalai realiu laiku per duomenų kaupiklį perduodami į kompiuterį ir įrašomi į duomenų bazę. Atstumai tarp termoporų: išilgine kryptimi – 80 mm, skersine – 40 mm. Įtampos kritimas ant kaitinamo plokščio paviršiaus gnybtų matuotas voltmetru, o srovės stipris – ampermetru, parodymus nurodant jų skalėse ir periodiškai registruojant – įvedant į kompiuterio duomenų bazę.



12 pav. Eksperimentinio stendo (a) ir kaitinimo plokštės (b) schema: 1 – tirpalo rezervuaras; 2 – pastovaus lygio palaikymo rezervuaras; 3 – tirpalo pertekliaus surinkimo rezervuaras; 4 – debito reguliavimo ventilis; 5 – debitomatis; 6 – perforuota putų generavimo plokštelė; 7 – eksperimentinio kanalo ruožas su įmontuotu plokščiu paviršiumi; 8 – plokščias paviršius; 9 – termoporos; 10 – duomenų kaupikliai; 11 – kompiuteris



Plokščias paviršius aušinamas jį išilgai aptekančių dvifazių statiskai stabilių putų srautu. Šilumos atidavimo koeficiento vertės  $W/(m^2K)$  esant nusistovėjusiam šiluminiam režimui eksperimentiniame ruože nustatomos taip:

$$\alpha = \frac{q_w}{\Delta T} = \frac{UI}{A_{pl}\Delta T}, \quad (33)$$

čia:  $q_w$  – plokščio paviršiaus atiduodamos šilumos srauto tankis,  $W/m^2$ ;  $\Delta T$  – temperatūrų skirtumas tarp plokščio paviršiaus temperatūros ir tirpalo temperatūros drėgninio skysčio plėvelėje ties ta pačia plokščio paviršiaus vieta, K;  $U$  – įtampa ant kaitinamojo plokščio paviršiaus gnybtų, V;  $I$  – plokščiu paviršiumi tekančios elektros srovės stipris, A;  $A_{pl}$  – plokščio paviršiaus plotas (mūsų atveju –  $A_{pl} = 0,5 \times 0,12 = 0,06$ ),  $m^2$ .

Vidutinis skersine paviršiaus kryptimi šilumos atidavimo koeficientas randamas laikant, kad vidutinė paviršiaus temperatūra skersine kryptimi yra lygi trijų termoporų, išdėstytų skersine srautui kryptimi, parodymų vidurkiui.

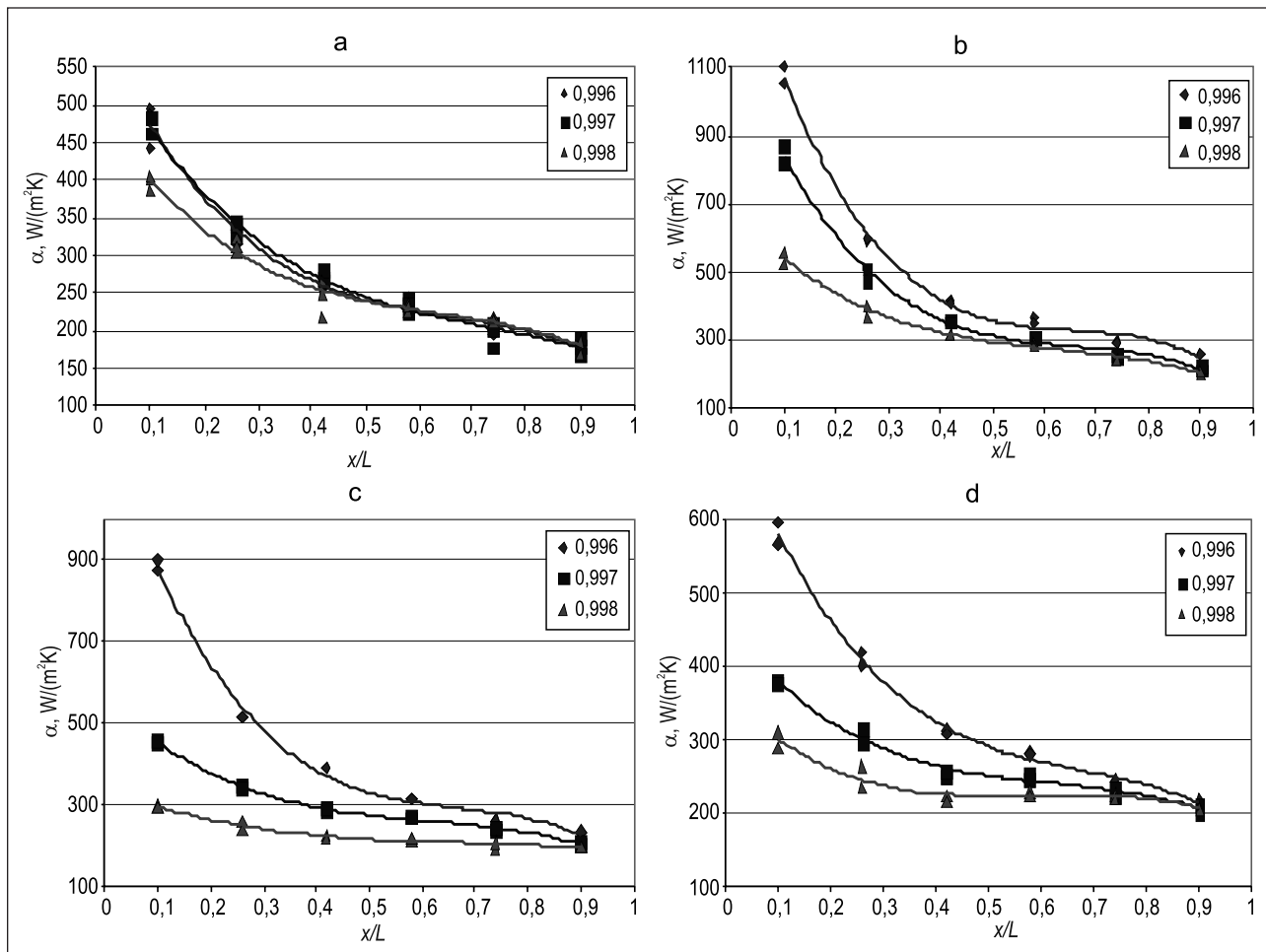
Eksperimentinių tyrimų sąlygos: putų tūrinis debitinis dujingumas  $\beta = 0,996, 0,997$  ir  $0,998$ , putų srauto greitis

$w = 0,1-0,25$  m/s, kai  $\beta = 0,996$  ir  $0,997$  ir  $w = 0,1-0,3$  m/s, kai  $\beta = 0,998$ ; į eksperimentinį stendą tiekiamo oro debitas  $G_g = 1,96 \cdot 10^{-3}-5,90 \cdot 10^{-3}$   $m^3/s$ ; tiekiamo tirpalo debitas  $G_l = 3,93 \cdot 10^{-6}-19,76 \cdot 10^{-6}$   $m^3/s$ ; per kaitinamą paviršių tekančios srovės stipris:  $I = 64,5 \pm 0,5$  A; įtampos kritimas ant gnybtų  $U = 1,55 \pm 0,02$  V; kaitinimo galia  $Q = 1500-1800$   $W/m^2$ ; kanalo posvyrio kampas  $\gamma = 45^\circ$ .

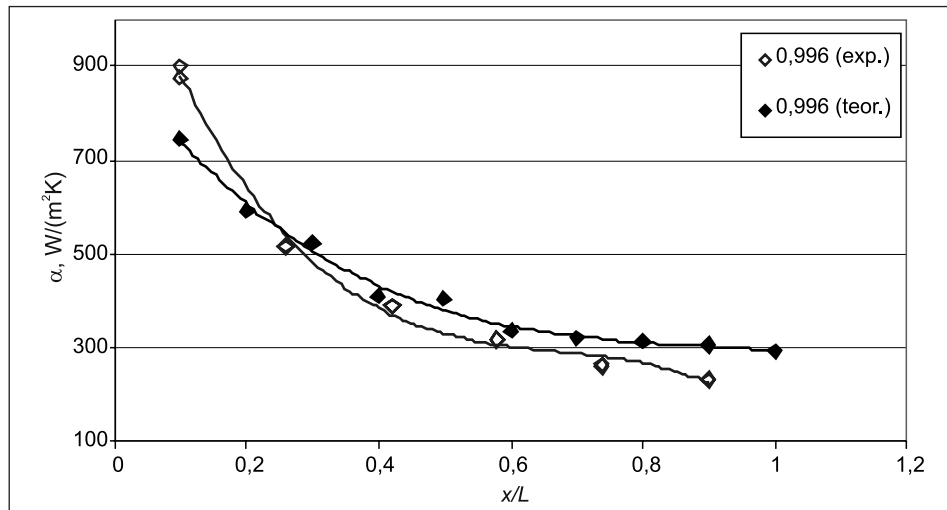
## TYRIMO REZULTATAI

Straipsnyje pateikiami rezultatai, gauti tiriant vidutinio skersine kryptimi šilumos atidavimo koeficiento kitimą išilgai eksperimentinio ruožo, esant skirtingam putų srauto greičiui bei dujingumui. Eksperimentinių tyrimų rezultatai grafiškai pavaizduoti 13 pav.

Plokščio pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui intensyvumas mažėja išilgai eksperimentinio ruožo putų tekėjimo kryptimi, nes besidrenuojant iš putų srauto tirpalui putos sausėja ir tuomet blogiau aušina paviršių. Mažėjant putų srauto dujingumui (drėgnėjant putoms) šilumos atidavimo koeficientas didėja.



13 pav. Plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumo kitimas išilgai paviršiaus, kai putų srauto greitis  $w$  (m/s): a – 0,1; b – 0,15; c – 0,2; d – 0,25 ir  $\beta = 0,996, 0,997$  ir  $0,998$



14 pav. Plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumo kitimas išilgai paviršiaus, kai putų  $w = 0,2$  m/s ir  $\beta = 0,996$

Teorinių ((29)–(32) lygtys) bei eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas pateiktas 14 pav. Rezultatų nesutapimas yra mažesnis kaip 25 %, kas dvifazių putų srautų atveju yra priimtina.

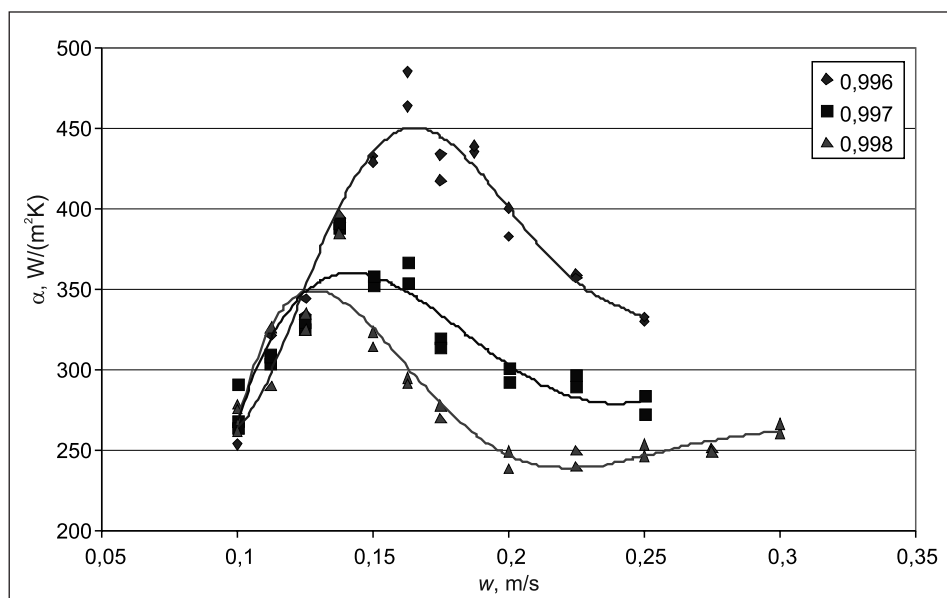
Eksperimentiškai nustatytas taip pat ir vidutinis  $45^\circ$  kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas. 15 pav. pateikta šio koeficiento priklausomybė nuo putų srauto greičio, kai putų dujingumas  $\beta = 0,996$ ;  $0,997$  ir  $0,998$ .

Didėjant putų srauto greičiui paviršiaus vidutinio šilumos atidavimo koeficiento vertė didėja iki tam tikro maksimalaus dydžio, priklausančio nuo putų srauto dujingumo. Toliau didinant putų srauto greitį aušinimo intensyvumas mažėja. Maksimali šilumos atidavimo koe-

ficiento vertė yra didesnė ir pasiekama esant didesniam greičiui tada, kai putų srautas yra drėgnesnis (mažesnis dujingumas). Be to, didėjant putų srauto greičiui nuo  $w = 0,1$  m/s iki  $w = 0,137$  m/s šilumos atidavimo intensyvumas beveik nepriklauso nuo putų dujingumo (skirtumas nesiekia 8 %).

Tokį neįprastą šilumos atidavimo intensyvumo kitimą, priklausomai nuo putų srauto greičio, galima paaiškinti.

Putoms tekant pasvirusiu eksperimentiniu kanalu ant kaitinimo paviršiaus formuojasi drenažinio tirpalo sluoksnis. Veikiamas sunkio jėgos, sluoksnyje esantis tirpalas juda žemyn. Didėjant putų srauto greičiui didėja putų srauto poveikis į priešinga kryptimi tekančio tirpalo srautą.



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

Toliau didėjant putų srauto greičiui tirpalo srautas keičia kryptį, ima tekėti, „tempiamas“ putų srauto ta pačia kryptimi (į viršų). Pasiekus pakankamai didelį putų srauto greitį, kartu padidėja ir tirpalo greitis sluoksnyje, sumažėja sluoksnio storis ir šilumos atidavimo intensyvumas vėl ima augti (15 pav. apatinė kreivė). Drenažinio tirpalo srautas keičia tekėjimo kryptį tuo greičiau (esant mažesniai putų srauto greičiui), kuo didesnis putų dujingumas (mažesnis nusidrenavusio tirpalo sluoksnis).

## IŠVADOS

1. Pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo putų srautu intensyvumą lemia ant paviršiaus susiformavusio iš putų nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis, tirpalo greitis drenažiniame sluoksnyje ir tirpalo temperatūra. Šie parametrai priklauso nuo paviršiaus posvyrio kampo, putų temperatūros, debito ir dujingumo.

2. Plokščio pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui intensyvumas mažėja išilgai eksperimentinio ruožo putų tekėjimo kryptimi, nes besidrenuojant iš putų srauto tirpalui putos sausėja ir blogiau aušina paviršių.

3. Didėjant putų srauto greičiui paviršiaus vidutinio šilumos atidavimo koeficiento vertė didėja iki tam tikro maksimalaus dydžio, priklausančio nuo putų srauto dujingumo. Toliau didinant putų srauto greitį aušinimo intensyvumas mažėja. Maksimali šilumos atidavimo koeficiento vertė yra didesnė ir pasiekama esant didesniam greičiui tada, kai putų srautas yra drėgnesnis (mažesnis dujingumas).

Gauta 2012 11 30

Priimta 2012 12 20

## Literatūra

1. Жукаускас А. *Конвективный перенос в теплообменниках*. Москва: Наука, 1982. 472 с.
2. Kuppan T. *Heat Exchanger Design Handbook*. New York: Marcel Dekker, 2000. 1119 p.
3. Kaji M., Sawai T., Kagi Y., Ueda T. Heat transfer and fluid dynamics of air-water two phase flow in micro-channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. Vol. 34. No. 4. P. 446–453.
4. Wu J., Koettig T., Franke Ch., Helmer D., Eisel T., Haug F., Bremer J. Investigation of heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub> two-phase flow in a horizontal minichannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54. No. 9–10. P. 2154–2162.
5. Chang S. W., Yang T. L. Forced convective flow and heat transfer of upward cocurrent air-water slug flow in vertical plain and swirl tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009. Vol. 33. No. 7. P. 1087–1099.
6. Gylys J. *Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiš-kai stabilų putų sistemoje*. Kaunas, 1998. 388 p.
7. Gylys J., Sinkunas S., Zdankus T. Experimental study of staggered tube bundle heat transfer in foam flow. *Proceedings of the 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Transfer and Energy Conversion, ISMF'05, 2005, Xi'an, China*. P. 1–6.
8. Jakubčionis M. *Šachmatinio vamzdžių pluošto šilumos atidavimas kylančiame skersiniame putų sraute*. Daktaro disertacija. Kaunas, 2002. 102 p.
9. Sinkunas S., Gylys J., Sunden B., Gabrielaitiene I., Zdan-kus T. Peculiarities of heat transfer from in-line tube bundles to upward aqueous foam flow. In: Sunden B., Brebbia C. A. (eds.). *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer X*. 2008. P. 117–125.
10. Giedraitis V. *Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mai-nai vertikaliame statiškaai stabilų putų sraute*. Daktaro disertacija. Kaunas, 2007. 119 p.
11. Gylys J., Zdankus T., Ingilertas A., Gylys M., Babilas M. Heat transfer between the non-standard tube bundle and statically stable foam flow. *Mechanika*. 2012. Vol. 18. No. 4. P. 409–414.
12. Ingilertas A. *Nestandartinio vamzdžių pluošto šilumos atidavimas statiškaai stabilų putų srautui*. Daktaro diser-tacija. Kaunas, 2012. 124 p.
13. Gylys J., Gabrielaitienė I., Ždankus T., Jonynas R., Gy-lys M. Plokščio paviršiaus šilumos mainų dvifaziame putų sraute eksperimentinis tyrimas. *Šilumos energetika ir technologijos – 2011: konferencijos pranešimų me-džiaga*. Kaunas: Technologija. 2011. P. 128–133.
14. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S. Numerical investigation of laminar heat transfer performance of various cooling channel designs. *Applied Thermal Engi-neering*. 2011. Vol. 31. No. 6–7. P. 1293–1304.
15. Тихомиров В. К. *Пены. Теория и практика их полу-чения и разрушения*. Москва: Химия. 1983. 262 с.
16. Sadoc J. F., Rivier N. *Foams and Emulsions. Nato ASI Series*. London: Kluwer Academic Press, 1997. 596 p.
17. Schramm L. L. *Emulsions, Foams, and Suspensions*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. 463 p.

Martynas Gylys

## INCLINED FLAT SURFACE COOLING BY TWO-PHASE FOAM FLOW

### Summary

The results of the experimental and analytical investigation of the heat transfer between the inclined flat surface and the statically stable foam flow are presented. On the inclined surface a film of the drained liquid is formed, which parameters – film thickness, liquid velocity, flow rate and temperature – influence the intensity of cooling. Drained liquid film parameters depend on the foam flow

rate, void fraction and temperature. The analytical equations were proposed for the calculation of the liquid film thickness, flow rate, mean flow velocity and temperature. It was stated that the intensity of cooling rises with increase of the foam flow velocity, reaches its maximum value and goes down. Comparison of the analytical and experimental results showed a good agreement.

**Key words:** two-phase foam flow, inclined flat surface, drained liquid film, heat transfer

Мартинас Гилис

## ОХЛАЖДЕНИЕ ПЛОСКОЙ НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕННЫМ ПОТОКОМ

### *Резюме*

Представлены результаты экспериментального и аналитического исследования теплообмена между наклонной плоской поверхностью и потоком статически устойчивой ячеистой пены. Определено, что на поверхности образуется слой дренажной жидкости, толщина которого, температура и скорость течения влияют на интенсивность охлаждения. Эти параметры зависят от расхода температуры и газосодержания пенного потока. Аналитическим путем получены уравнения, пригодные для расчета гидродинамических параметров дренажного слоя. Экспериментально определено, что средний коэффициент теплоотдачи всей поверхности увеличивается до определенного максимального значения с увеличением скорости пенного потока. При дальнейшем увеличении скорости пенного потока происходит снижение коэффициента теплоотдачи. Представлено сравнение результатов, полученных экспериментальным путем, с аналитическим решением.

**Ключевые слова:** двухфазного потока пены, наклонной плоской поверхности, решение дренажный слой, теплообмен