



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Monika Miseckienė

**PLOKŠČIO PASVIRUSIO PAVIRŠIAUS AUŠINIMO PUTŲ SRAUTU
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Lekt. Linas Paukštaitis

Kaunas, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA

PLOKŠČIO PASVIRUSIO PAVIRŠIAUS AUŠINIMO PUTŲ
SRAUTU TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Branduolinė energetika (kodas 621E32001)

Vadovas

(parašas) lekt. Linas Paukštaitis
(data)

Recenzentas

(parašas) Algimantas Balčius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Monika Miseckienė
(data)

KAUNAS, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Tvirtinu: _____
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas doc. E. Puida
_____ (vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema : Plokščio pasvirusio paviršiaus aušinimo putų srautu tyrimas

Investigation of the Inclined Flat Surface Cooling by the Foam Flow

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 03d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-7

Užduotis išduota 2016 m. vasario mėn. 01 d.

2. Darbo tikslas : Ištirti plokščio pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimą putų srautui.

3. Darbo struktūra :

3.1 Įvadas

3.2 Statiškai stabilios putos

3.3 Vamzdžių pluoštų ir plokščių paviršių aušinimas putomis

3.5 Vidutinis putų ir pasluoksnio dujingumas

3.6 Drenažinio tirpalo sluoksnio storis

3.7 Šilumos atidavimo koeficientas

3.9 Eksperimentinių ir skaičiavimo duomenų palyginimas

3.10 Išvados

3.11 Literatūra

4. Reikalavimai ir sąlygos: Darbas ir jo apiforminimas turi tenkinti baigiamajam magistro darbui keliamus reikalavimus

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2016 m. gegužės mėn. 24 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentei: **Monikai Miseckienei**

Užduotį gavau Monika Miseckienė.....

(studento vardas, pavardė)

.....2016-02-01

(parašas)

(data)

Vadovas : **lekt. Linas Paukštaitis**

.....2016-02-01



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Monika Miseckienė

(Studento vardas, pavardė)

Branduolinė energetika, 621E32001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto “Plokščio pasvirusio paviršiaus aušinimo putų srautu tyrimas”

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 _____

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Monika Miseckienės** baigiamasis projektas tema “**Plokščio pasvirusio paviršiaus aušinimo putų srautu tyrimas**” yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Miseckienės, M. “Plokščio pasvirusio paviršiaus aušinimo putų srautu tyrimas” *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas lekt. Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Šilumos ir atomo katedra, Energijos inžinerija.

Kaunas, 2016. 63 psl.

SANTRAUKA

Įkaitusių paviršių aušinimui vis plačiau naudojami energetinius ir materialius išteklius taupantys bei šilumos mainų procesą intensyvinantys dvifaziai šilumnešiai. Tokie dvifaziai šilumnešiai, kaip statiškai stabilios putos, gali būti sėkmingai taikomi vamzdžių pluoštų bei plokščių paviršių aušinimui. Šiame darbe, pasinaudojant rezultatais, gautais eksperimentiškai tiriant 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo procesą putų srautui, tiriamas 30° , 45° ir 60° kampais pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo putų srautu procesas. Tyrimo metu nustatomas putų dujingumo pasiskirstymas išilgai paviršiaus; dujingumo kitimas pasluoksnyje; apskaičiuojamas drenažinio tirpalo sluoksnio storis; nustatomas šilumos atidavimo koeficientas. Skaičiavimo rezultatai palyginami su eksperimentiniais duomenimis; numatytos tolesnių tyrimų gairės.

Miseckienė, M. “INVESTIGATION OF THE INCLINED FLAT SURFACE COOLING BY THE FOAM FLOW”: *Master* final work / supervisor lekt. Linas Paukštaitis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, Department of Thermal and Nuclear Energy.

Kaunas, 2016. 63 p.

SUMMARY

Two-phase coolants application for the cooling purposes is applied widely because of the high heat transfer rate and due to the economy of the energy and material resources. Statically stable foam as a two-phase coolant can be used successfully for the cooling of the tube bundles or flat surfaces. This work presents the results of the investigation of the cooling process of the flat surface inclined by the angle of 30° , 45° and 60° . As a starting point have been used the experimental results, obtained during the investigation of the cooling process of the flat surface, which inclination angle was equal to 45° . During the recent investigation there were determined: void fraction distribution along the surface; void fraction changes in the under layer; thickness of the film of the drained liquid; heat transfer coefficient. Results of the calculation were compared with the experimental data. There was provided guidance for the future research.

TURINYS

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS	7
SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI	9
Indeksai:	9
ĮVADAS.....	10
TYRIMO OBJEKTAS	11
DARBO TIKSLAS	11
DARBO UŽDAVINIAI	11
DARBO AKTUALUMAS	11
1. STATIŠKAI STABILIOS PUTOS.....	12
2. VAMZDŽIŲ PLUOŠTŲ AUŠINIMAS PUTOMIS	14
2.1. Koridorinis vamzdžių pluoštas	15
2.2. Šachmatinis vamzdžių pluoštas	16
2.3. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluoštas.....	17
3. PLOKŠČIO PAVIRŠIAUS AUŠINIMAS PUTOMIS.....	18
3.1. Vertikalus plokščias paviršius	18
3.2. Pasviręs plokščias paviršius.....	20
4. Vidutinio tūrinio Putų dujingumo kitimas išilgai tiriamo paviršiaus.....	23
5. NUSIDRENAVUSIO TIRPALO SLUOKSNIO STORIS	26
6. ŠILUMOS ATIDAVIMO KOEFICIENTO NUSTATYMAS	31
6.1. Šilumos atidavimo koeficientas.....	31
6.2. Putų srauto šilumos laidžio koeficientas	34
6.3. Putų pasluoksnio dujingumas	39
6.4. Šilumos atidavimo koeficiento palyginimas.....	45
IŠVADOS.....	47
LITERATŪRA.....	48
PRIEDAS 1	50
PRIEDAS 2	50
PRIEDAS 3	55
PRIEDAS 4	61

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Statiškai stabilios putos	12
1.2 pav.. Putų srauto struktūra.....	13
1.3 pav. Statiškai stabilių putų struktūra priklausomai nuo dujingumo	13
2.1 pav.Vamzdžių pluoštų šilumos atidavimo putų srautui eksperimentinio tyrimo stendo principinė schema.....	14
2.2 pav. Koridorinis vamzdžių pluoštas	15
2.3 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus	15
2.4 pav. Šachmatinis vamzdžių pluoštas	16
2.5 pav. Šachmatinio vamzdžių pluošto vidurinėsios vamzdžių eilės šilumos atidavimo priklausomybė nuo putų srauto dujų greičio	16
2.6 pav. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluoštas.....	17
2.7 pav. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluošto šilumos atidavimas	17
3.1 pav. Plokščio vertikalios paviršiaus tyrimų stendas ir jo schema.....	18
3.2 pav. Vertikalios plokščio paviršiaus šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė:.....	19
3.3 pav. Plokščio paviršiaus vidutinio šilumos atidavimo koeficiento grafinis palyginimas su nestandartinio vamzdžių pluošto šilumos atidavimo koeficientu	20
3.4 pav.. Eksperimentinio stendo su pasvirusiu paviršiumi schema:	20
3.5 pav. Putų tirpalo drenažas pasvirusiame kanale.....	21
3.6 pav. Plokščio pasvirusio paviršiaus pradinės dalies ir galinės dalies aušinimo intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto greičio	22
3.7 pav. Pasvirusio ir vertikalios plokščių paviršių vidutinio šilumos atidavimo intensyvumo priklausomybės nuo putų srauto greičio palyginimas	23
4.1 pav. Su putomis pernešamo tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo.....	24
4.2 pav. Besidrenuojančio tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo	25
4.3 pav. Nusidrenavusio tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo	25
4.4 pav. Vidutinio debitinio dujingumo kitimas išilgai putų kanalo.....	26
5.1 pav. Tirpalo sluoksnio storio kitimas išilgai paviršiaus	28
5.2 pav. Tirpalo sluoksnio storio kitimas išilgai paviršiaus	28
5.3 pav. Tirpalo sluoksnio storio kitimas išilgai paviršiaus	29
5.4 pav. Tirpalo sluoksnio storio kitimas išilgai paviršiaus	30
5.5 pav. Tirpalo storio kitimas išilgai paviršiaus	30
5.6 pav.Tirpalo storio kitimas išilgai paviršiaus	31
6.1 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus	34

6.2 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus	35
6.3 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus.....	36
6.4 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus.....	37
6.5 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus	37
6.6 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus.....	38
6.7 pav. Šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus.....	39
6.8 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo kitimas išilgai plokščio paviršiaus	40
6.9 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo kitimas išilgai plokščio paviršiaus	41
6.10 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo kitimas išilgai plokščio paviršiaus	42
6.11 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo kitimas išilgai plokščio paviršiaus	43
6.12 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo kitimas išilgai plokščio paviršiaus	44
6.13 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo	44
6.14 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus.....	45

SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

a – kvadratinio skerspjūvio putų kanalo kraštinės ilgis, m

G – masinis debitas (srautas), kg/s

g - laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2

L – eksperimentinio ruožo ilgis, m

l_i – elementariosios zonos ilgis, m

n – elementariųjų zonų skaičius

q – šilumos srautas, W/m^2

T – temperatūra, K

V – tūris, m^3

w – greitis, m/s

y – koordinatė

α – šilumos atidavimo koeficientas, $W/(m^2K)$

β - dujingumas

β_n – dujingumas eksperimentinio ruožo gale

$\beta_{i,\delta}$ – putų pasluoksnio dujingumas

γ – posvyrio kampas, laipsniai

δ – tirpalo sluoksnio storis, m

λ – šilumos laidžio koeficientas, $W/(mK)$

ν - kinematinės klampos koeficientas, m^2/s

ρ – tankis, kg/m^3

σ - tirpalo paviršiaus įtempimo koeficientas, N/m

Nu – Nuselto skaičius

Re – Reinoldso skaičius

INDEKSAI:

g – dujos

l – skystis (tirpalas)

f – putos

i – elementariosios zonos numeris

kr – kritinis

Σ – suma

$dr.$ – drenažas

$bang.$ – banguotas tekėjimas

w – paviršius

IVADAS

Įkaitusių paviršių aušinimui pastaruoju metu vis plačiau naudojami dvifaziai (skystis – dujos) šilumnešiai. Dvifazių šilumnešių taikymas leidžia intensyviau šilumos mainų procesą, taupyti energetinius ir materialius resursus. Kaip rodo tyrimai [1, 2, 3], tokios dvifazės sistemos, kaip statiška stabilios putos (SSP), gali būti sėkmingai pritaikytos vamzdžių pluoštų bei plokščių paviršių aušinimui. Naudojant SSP aušinimo intensyvumas būna šiek tiek mažesnis negu aušinant skystais šilumnešiais (pavyzdžiui, vandeniui), bet žymiai didesnis negu aušinant dujomis (pavyzdžiui, oru), todėl santykinai didelis šilumos atidavimo intensyvumas, nedideli masės srautai įgalina statiška stabilias putas naudoti efektyviau šilumnešiu šilumos mainų procesuose.

Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedroje sėkmingai tiriamas įvairių paviršių šilumos atidavimas statiška stabilių putų, sudarytų iš mažos koncentracijos (iki 0,5%) detergentų tirpalo ir oro, srautui. Vertikaliu putų srautu aptekamo pavienio vamzdelio, vamzdelių eilės, koridorinio, šachmatinio ir nestandartinio vamzdžių pluoštų, vertikalaus plokščio paviršiaus šilumos atidavimo tyrimai parodė šio metodo privalumus ir trūkumus. Įvairūs saviti putų srautuose vykstantys procesai (tirpalo drenažas Plato – Gibso kanalais, putų sinerezė – irimas, putų srauto reologiškumas ir kita) riboja modeliavimo, teorinių metodų taikymo galimybes, todėl paprastai naudojami eksperimentiniai tyrimo metodai.

Šiuo metu palyginti gerai ištirtas įvairios konfigūracijos vamzdžių pluoštų bei plokščio paviršiaus šilumos atidavimo procesas vertikalia kryptimi (aukštyn arba žemyn) tekančiam putų srautui.

Tuo tarpu praktikoje šilumos mainų paviršiai gali būti ne tik vertikalūs, bet ir pasvirę bet koku kampu nuo vertikalės. Tokių paviršių šilumos atidavimas dvifazių putų srautui, kaip rodo mokslinių darbų paieška, nėra tirtas. Tuo tarpu tirpalo drenažas, formuojantis priešinga (arba ta pačia) putų srautui tekančio skysčio sluoksnį (plėvelę) ir perskirstantis tikrąjį putų dujingumą ne tiksliai išilgai, bet ir skersai putų srauto, įneša daug savitumų ir dar labiau komplikuoja šilumos atidavimo proceso tyrimą.

Todėl, siekiant projektuoti ir plačiau praktikoje diegti putų šilumokaičius, būtina ištirti ne tiksliai vamzdžių pluoštų, vertikalių paviršių, bet ir pasvirusių plokščių paviršių šilumos atidavimo putų srautui procesą, o tam reikia žinoti putų srauto, besiribojančio su paviršiumi (su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu) dujingumą, to sluoksnio šilumos laidį ir pan..

Maži masiniai putų srautai ir palyginti didelis įkaitusių paviršių aušinimo intensyvumas įgalina statiška stabilias putas naudoti taip pat ir branduoliniuose reaktoriuose (aušinant kanalinių reaktorių valdymo strypus) bei kosminėje technikoje, t. y. ten, kur siekiama minimizuoti masinį šilumnešio srautą, tuo pat metu užtikrinant galimai didžiausią aušinimo efektyvumą.

Šis magistro baigiamasis darbas yra autorės bakalauro baigiamojo darbo tęsą.

TYRIMO OBJEKTAS

Įvairiais kampais pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimas putų srautu.

Tyrimai vykdyti, esant šioms sąlygoms:

- a) plokščio paviršiaus posvyrio kampas $\gamma = 30^0$; 45^0 ir 60^0
- b) putas sudarančių dujų (oro) vidutinis greitis $\bar{w}_g = 0,1$; $0,2$ ir $0,25$ m/s;
- c) vidutinis putų dujingumas eksperimentinio ruožo pabaigoje $\beta n = 0,996$; $0,997$ ir $0,998$;
- d) tekėjimo kryptis: priešsrovis ir pasrovis;
- e) šilumos atidavimas nuo karšto paviršiaus putų srautui vyksta per nusidrenavusio tirpalo sluoksnį laidumu.

DARBO TIKSLAS

Nustatyti pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo putu srautu intensyvumą.

DARBO UŽDAVINIAI

1. Rasti dujingumo β_i pasiskirstymą išilgai kanalo;
2. Apskaičiuoti nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storį δ_i ;
3. Rasti pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo intensyvumą tais atvejais kai:
 - a) plokščio paviršiaus posvyrio kampas $\gamma = 30^0$; 45^0 ; 60^0 ;
 - b) putas sudarančių dujų (oro) vidutinis greitis $\bar{w}_g = 0,1$; $0,2$; $0,25$ m/s;
 - c) vidutinis putų dujingumas eksperimentinio ruožo pabaigoje $\beta n = 0,996$; $0,997$; $0,998$;
 - d) tekėjimo kryptis: priešsrovis ir pasrovis;
 - e) šilumos atidavimas nuo karšto paviršiaus putų srautui vyksta per nusidrenavusio tirpalo sluoksnį laidumu.

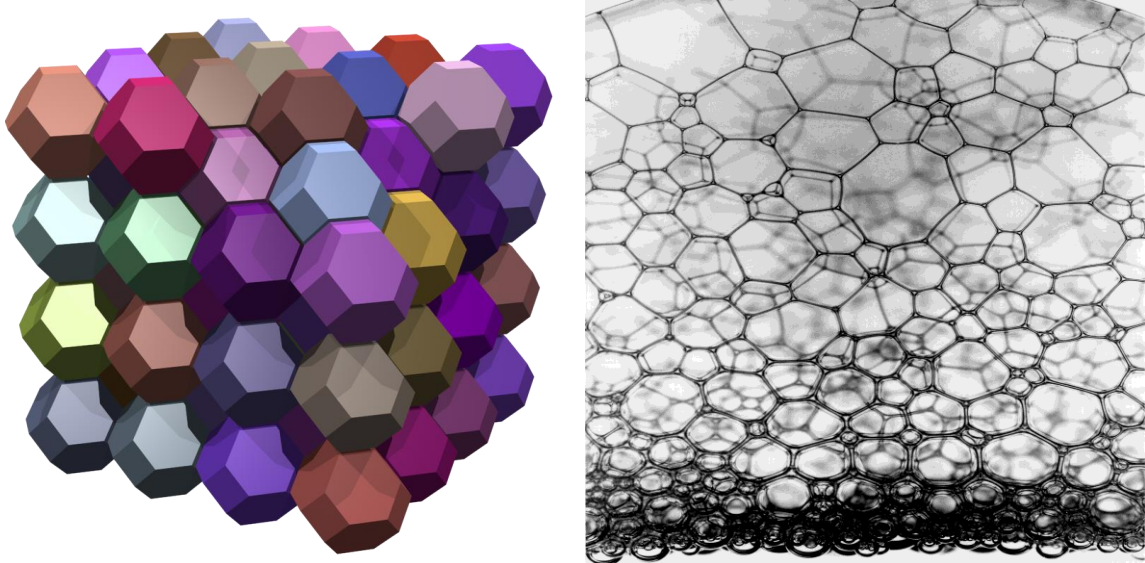
DARBO AKTUALUMAS

Santykinai didelis šilumos atidavimo intensyvumas, nedideli masės srautai leidžia statiškai stabilias putas naudoti efektyviu šilumnešiu šilumos mainų procesuose. Iki šio meto putų srautų panaudojimo šilumokaitos (aušinimo) procesuose tyrimai yra nepakankami.

1. STATIŠKAI STABILIOS PUTOS

Vienas iš svarbiausių termoinžinerijos ir šiluminės energetikos uždavinių yra naujų efektyvių šilumnešių, įgalinančių intensyviai šilumos mainus, tuo pačiu sumažinant energetines bei medžiagines proceso sąnaudas, paieška. Šiuo požiūriu statišškai stabilios yra laikytinos ypač perspektyviu šilumnešiu.

Statiškai stabilios putos – tai dvifazė dispersinė sistema, susidedanti iš daugelio dujų (oro, garų) burbuliukų – putų gardelių, atskirtų tam tikro storio skystčio plėvelėmis (1.1 pav.).

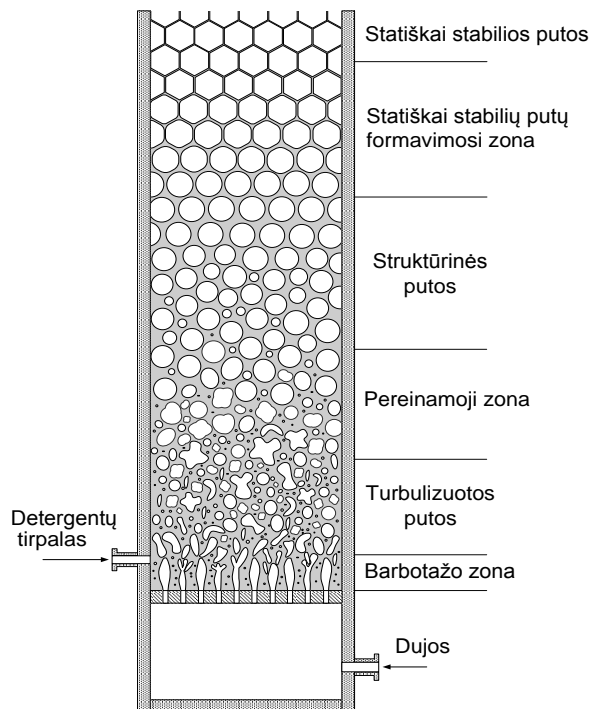


1.1 pav. Statiškai stabilios putos

Dujos šiuo atveju yra laikomos dispersine faze, o skystis – dispersine terpe. Dujų burbuliukus skiriančios skystčio plėvelės sudaro specifinius plėvelinius “griaučius”, kurie yra putų struktūros pagrindas.

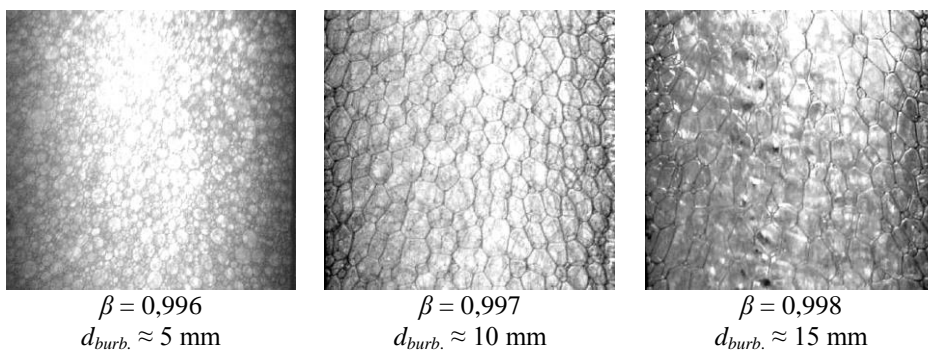
Statiškai stabilios putos paprastai susidaro barbotuojant dujas per detergentų (paviršiaus aktyviųjų medžiagų) tirpalo sluoksnį (1.2 pav.). Pradžioje (apatinėje kanalo dalyje) putų burbuliukai būna sferiniai, o laikui bėgant, drenuojantis tirpalui, virsta taisyklingais erdviniais daugiakampiais – statišškai stabiliomis putomis. Bendru atveju dvifazės sistemos – putų srauto – struktūra kinta pagal vertikalaus kanalo aukštį galima skirti: barbotavimo zoną, turbulizuotų dinaminių putų zoną, struktūrinių putų zoną bei statišškai stabilių putų zoną. Paviršiniame putų sluoksnyje esantys putų burbuliukai gana greitai įgauna daugiabriaunę formą, tuo tarpu žemesniuose sluoksniuose slypintys burbuliukai žymiai ilgiau išlieka sferinės formos, jų sienelės plonėja lėčiau, nes, plonėjant ir yrant viršutinių sluoksnių burbuliukų sienelėms, atsipalaidavęs detergentų tirpalas (drenažinis skystis) teka žemyn (drenuojasi) ir taip sumažina žemesniųjų

sluoksnių putų dujingumą. Kuo putose mažiau skysčio (putos sausesnės), tuo labiau putų burbuliukų forma panašesnė į erdvinius daugiakampius (dodekaedrus ir pan.) (1.1 pav.).



1.2 pav. Putų srauto struktūra [1] 1 – dujų (oro) kamera, 2 – barbotazinė rėtinė, 3 – putų generavimo kanalas

Pagal putas sudarančių burbuliukų dydį statiška stabilios putos paprastai skirstomos į dvi dideles grupes: smulkiadisperse mikroputas (burbuliukų skersmuo neviršija vieno milimetro, o tankis siekia $100 - 500 \text{ kg/m}^3$) ir stambiadisperse makroputas (burbuliukų skersmuo gali būti nuo kelių milimetrų iki dviejų, trijų ar net daugiau centimetrų, o tankis neviršija $1 - 6 \text{ kg/m}^3$). Baigiamajame darbe pateikiami pasvirusio plokščio paviršiaus ir makroputų, kurių burbuliukų skersmuo yra 0,05 m ir didesnis (1.3 pav.), šilumokaitos tyrimo rezultatai.



1.3 pav. Statiškai stabilių putų struktūra priklausomai nuo dujingumo

Vienas pagrindinių parametru, charakterizuojančių putas, yra putų dujingumas, kuris bendroju atveju gali būti išreikštas taip:

$$\beta = V_g / (V_g + V_l), \quad (1.1)$$

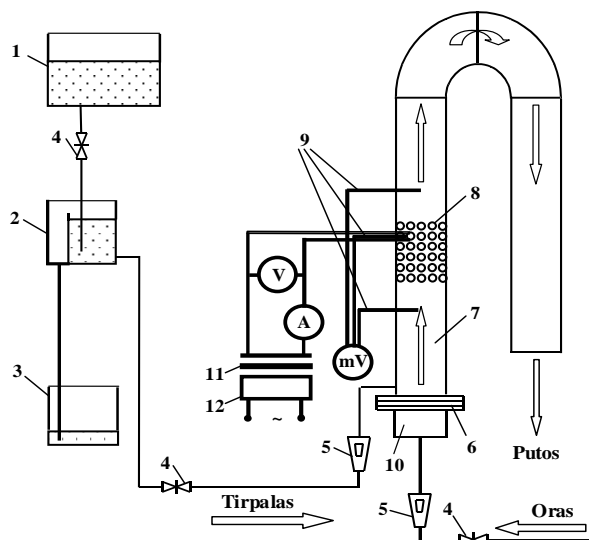
kur: V_g ir V_l – putas sudarančių dujų ir skysčio tūriai, m^3 .

Kuo putos sausesnės, tuo jų dujingumas yra didesnis, tuo putų srautas perneša mažiau skysčio (tirpalo). Putų srauto parametrai (greitis, dujingumas, stabilumas ir kt.) daugiausia priklauso nuo barbotazinių dujų (oro) debito (greičio), nes, augant debitui, susidaro daugiau putų burbuliukų, putos yra drėgnesnės, su jomis pernešama daugiau skysčio [12-14].

Keisdami putų generavimui tiekiamo oro ir detergentų tirpalo debitus, galime gauti skirtingo dujingumo ir greičio putų srautus, būtinus siekiant reikiamu intensyvumu aušinti įvairius paviršius [13].

2. VAMZDŽIŲ PLUOŠTŲ AUŠINIMAS PUTOMIS

Vamzdžių pluoštų šilumos atidavimas putų srautui tirtas naudojant 2.1 pav. pavaizduotą eksperimentinį stendą [9]. Tyrimų metu skirtingos konfigūracijos vamzdžių pluoštai 8 buvo patalpinti aukštyn arba žemyn nukreiptose putų kanalo 7 dalyse



2.1 pav. Vamzdžių pluoštų šilumos atidavimo putų srautui eksperimentinio tyrimo stendo principinė schema [9]:

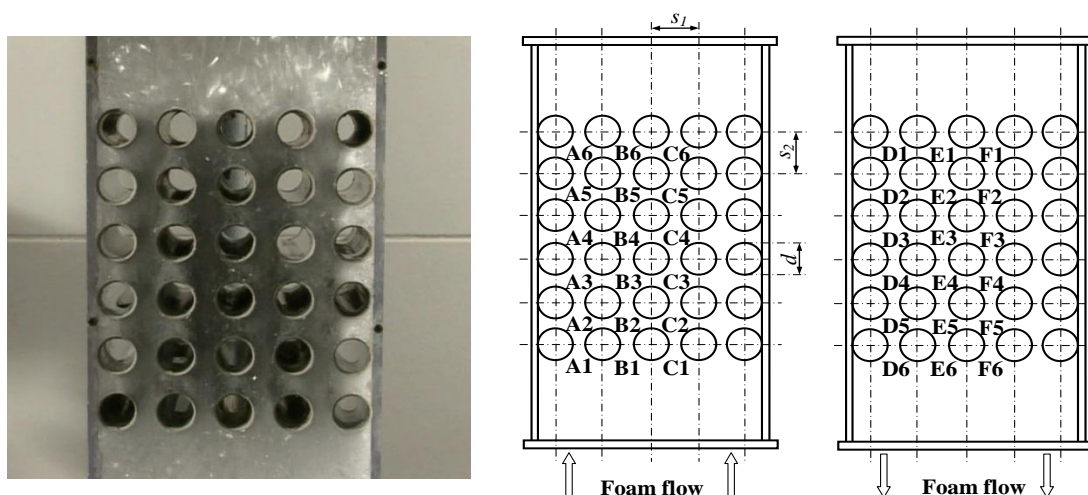
Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad pluoštų šilumos atidavimas putų srautui priklauso ne tik nuo srauto parametru (greičio, dujingumo), bet ir nuo vamzdžių išdėstymo pluošte, nuo srauto tekėjimo krypties (vertikaliai aukštyn ar žemyn), nuo pluošto vamzdžių žingsnio [10].

2.1. Koridorinis vamzdžių pluoštas

Koridorinio vamzdžių pluošto (2.2 pav.) šilumos atidavimo intensyvumas vertikaliai aukštyn tekančiam skersiniam statiškai stabilių putų srautui gali būti apskaičiuotas lygtimi [9]:

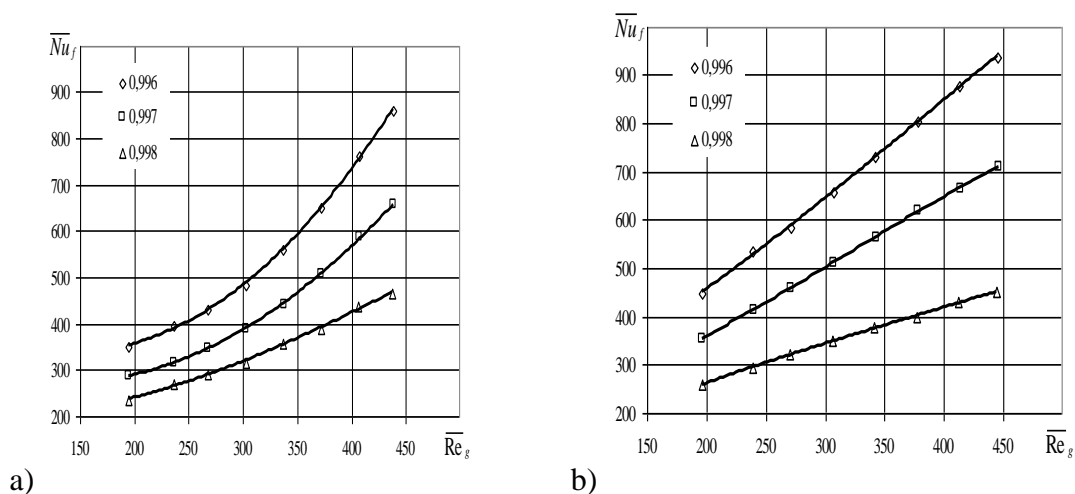
$$\overline{Nu}_f = k \cdot \beta^n \cdot \overline{Re}_g^m, \quad (2.1)$$

kur: \overline{Nu}_f – Nuselto skaičius; β – statiškai stabilių putų srauto tūrinis debitinis dujingumas; \overline{Re}_g – statiškai stabilių putų srauto redukuotasis dujų Reinoldso skaičius; k , n ir m – koeficientai.



2.2 pav. Koridorinis vamzdžių pluoštas

Grafinis (2.1) lygties vaizdas pateiktas 2.3 pav. Matome, kad, didėjant putų srauto greičiui (\overline{Re}_g), šilumos atidavimo intensyvumas (\overline{Nu}_f) taip pat didėja. Be to, kuo putos drėgnesnės (mažesnis dujingumas) tuo šilumos mainai vyksta intensyviau.



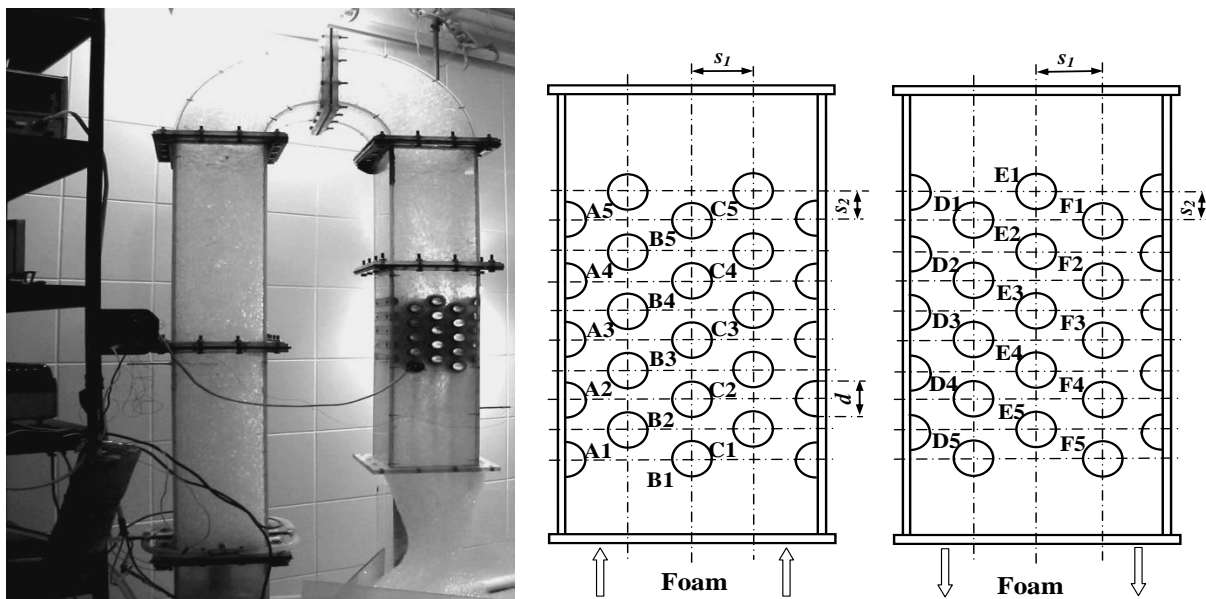
2.3 pav. Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainų intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto dujų Reinoldso skaičiaus [11]. Putų srauto kryptis: a) – aukštyn; b) – žemyn

2.2. Šachmatinis vamzdžių pluoštas

Šachmatinio vamzdžių pluošto (2.4 pav.) šilumos atdavimo intensyvumas vertikaliai aukštyn tekančiam skersiniam statiškai stabilių putų srautui gali būti apskaičiuotas lygtimi [2]:

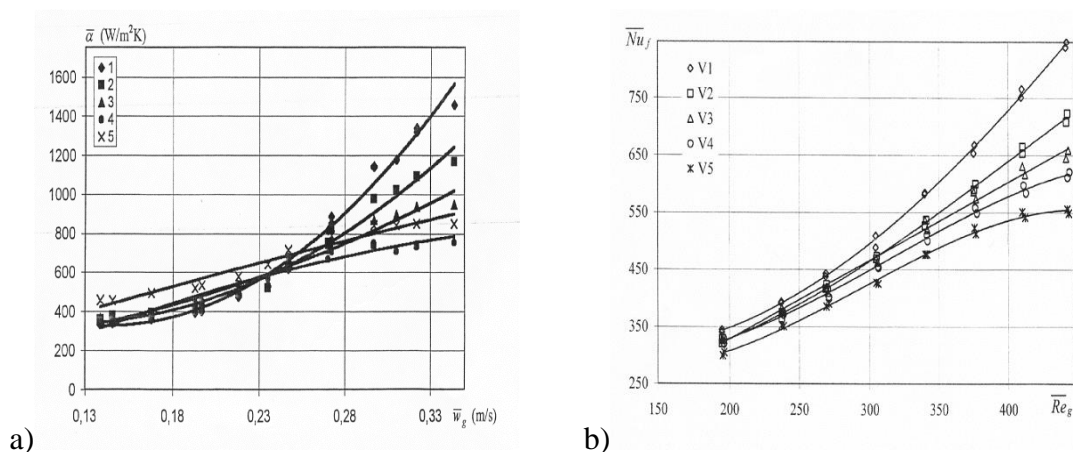
$$\overline{Nu}_f = c_1 \cdot \overline{Re}_g^{n_1}, \quad (2.2)$$

kur: c_1 , ir n_1 – koeficientai, randami [2] literatūroje.



2.4 pav. Šachmatinis vamzdžių pluoštas [2]

Grafiškai (2.2) lygtis pavaizduota 2.5 pav. Šiuo atveju, panašiai kaip ir koridorinio pluošto atveju, šilumos atdavimo intensyvumas auga didėjant putų srauto greičiui.



2.5 pav. Šachmatinio vamzdžių pluošto vidurinėsios vamzdžių eilės šilumos atdavimo priklausomybė nuo putų srauto dujų greičio, a) - aukštyn nukreiptas putų srautas; b) - žemyn nukreiptas putų srautas

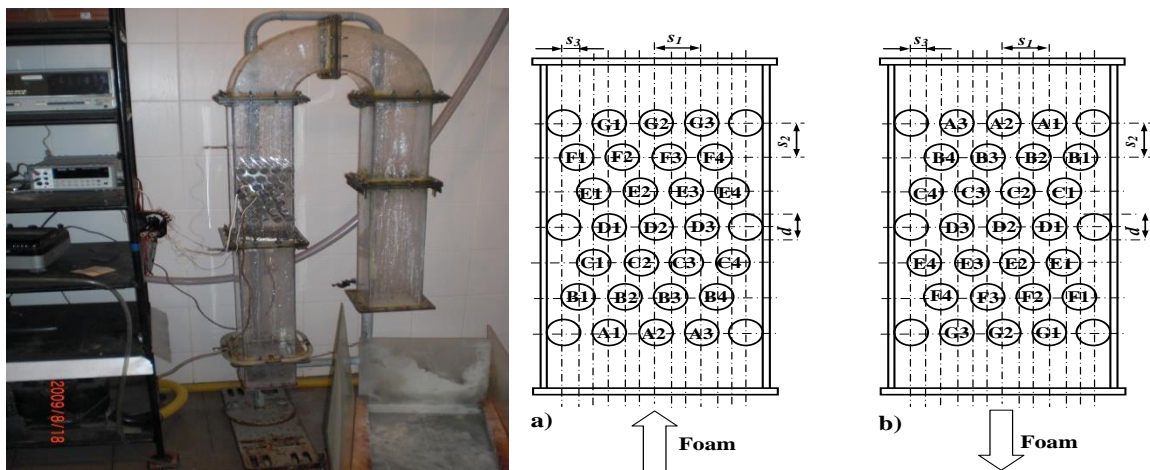
2.3. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluoštas

Nestandartiniu vamzdžių pluoštu laikome tokį vamzdžių pluoštą, kuriame kiekviena aukščiau arba žemiau esanti horizontali vamzdžių eilė yra perstumta per pusę vamzdžio skersmens į kairę arba į dešinę pusę. Tokio vamzdžių pluošto (2.6 pav.) šilumos atidavimo statiškai stabilių putų srautui eksperimentinių tyrimų rezultatai apibendrinti lygtimi [12]:

$$\overline{Nu}_f = k_1 \cdot \beta^l \cdot \overline{Re}_g^p \quad (2.3)$$

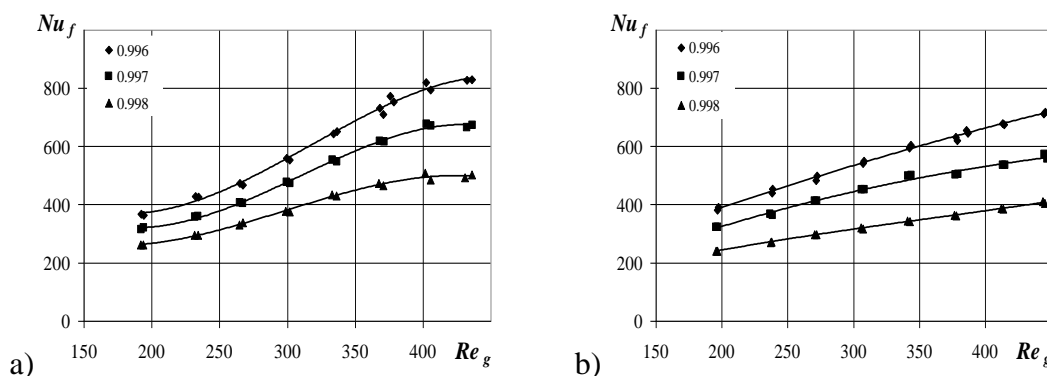
kur: k_1 , l ir p – koeficientai imami iš [12] literatūros.

Lygtis (2.3) galioja tuo atveju, kai putų debitinis dujingumas $\beta = 0,996 - 0,998$, o dujų $\overline{Re}_g = 190 - 455$.



2.6 pav. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluoštas [12]

Grafiškai (2.3) lygtis pavaizduota 2.7 pav. Akivaizdu, kad putų srauto greičio augimas didina šilumos mainų intensyvumą.



2.7 pav. Nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluošto šilumos atidavimas [12]:
a) - aukštyn nukreiptas putų srautas; b) - žemyn nukreiptas putų srautas

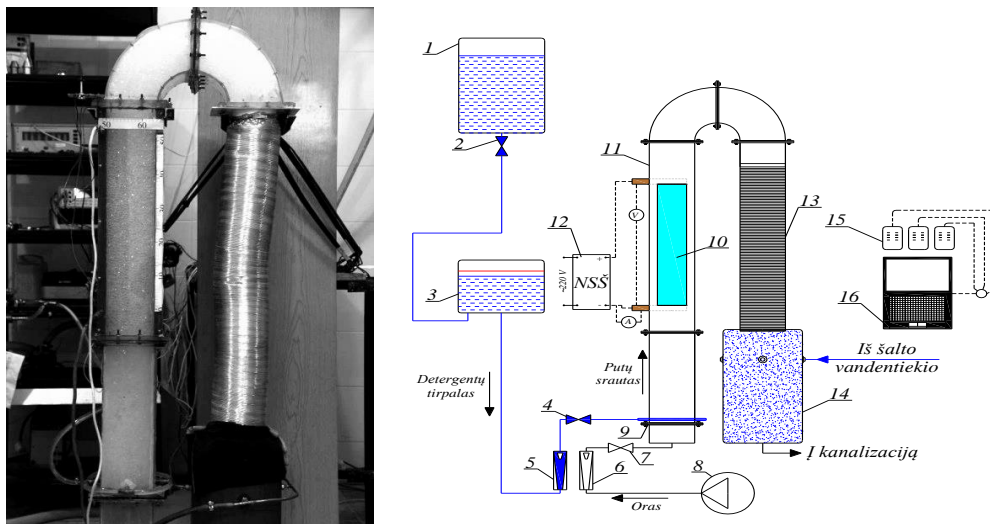
Tyrimai [12] parodė, kad kylančiame statiškaai stabilių putų sraute nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluošto šilumos atidavimas yra pats geriausias: vidutiniškai visam pluoštui yra 14 % geresnis nei šachmatinio ir 7 % geresnis nei koridorinio vamzdžių pluoštų šilumos atidavimas statiškaai stabilių putų srautui, kai srauto tūrinis debitinis dujingumas yra $\beta = 0.996$. Tuo atveju, kai srauto tūrinis debitinis dujingumas yra $\beta = 0.997$, kylančiame statiškaai stabilių putų sraute nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluošto šilumos atidavimas yra apie 13 % geresnis nei šachmatinio ir 9 % geresnis nei koridorinio vamzdžių pluoštų šilumos atidavimas. Tuo atveju, kai srauto tūrinis debitinis dujingumas yra $\beta = 0.998$, kylančiame statiškaai stabilių putų sraute nestandartinio išdėstymo vamzdžių pluošto šilumos atidavimo intensyvumas yra apie 12 % geresnis nei šachmatinio arba koridorinio vamzdžių pluoštų šilumos atidavimo intensyvumas.

3. PLOKŠČIO PAVIRŠIAUS AUŠINIMAS PUTOMIS

Pateiksime plokščio vertikalios ir plokščio pasvirusio paviršių šilumos atidavimo putų srautui tyrimo duomenis [3,14].

3.1. Vertikalus plokščias paviršius

Tiriant vertikalios plokščio paviršiaus šilumos atidavimą putų srautui pasinaudota parodytu eksperimentiniu stendu [3].

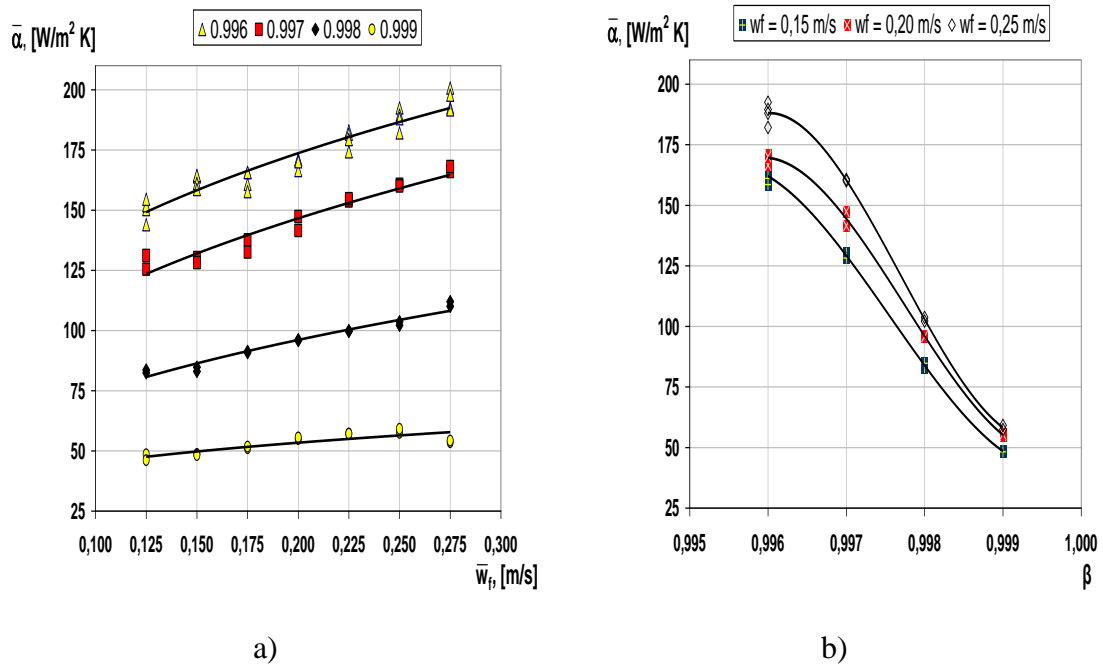


3.1 pav. Plokščio vertikalios paviršiaus tyrimų stendas ir jo schema [3]:

1 - tirpalo rezervuaras, 2 - rutulinis ventilis, 3 - tirpalo lygio palaikymo (persipylimo) indas, 4 - tiekiamo detergentų tirpalo srauto reguliavimo sklendė, 5, 6 - rotametas, 7 - tiekiamo oro srauto reguliavimo sklendė, 8 - kompresorius, 9 - putų generavimo perforuota plokštelė, 10 - nerūdijančio plieno folija ($s = 0,1$ mm), 11 - tekėjimo kanalas, 12 - nuolatinės srovės šaltinis, 13 - lankstus vamzdis ištekančių putų srauto nuvedimui, 14 - ištekančių putų suardymo dėžė, 15 - duomenų kaupikliai, 16 - nešiojamasis kompiuteris

Plokščio vertikalaus paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui procesas skiriasi nuo cilindrinė paviršių šilumos atidavimo proceso. Putos, tekėdamos plokščiu paviršiumi, savo kelyje nesutinka kliūčių (vamzdžių pluoštų); srautas mažiau turbulizuoja todėl galima spėti, kad šilumos atidavimo intensyvumas turėtų būti mažesnis.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai, grafiškai pateikti (3.2 pav.), šį spėjimą pilnai patvirtina.



3.2 pav. Vertikalaus plokščio paviršiaus šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė [3, 13]:

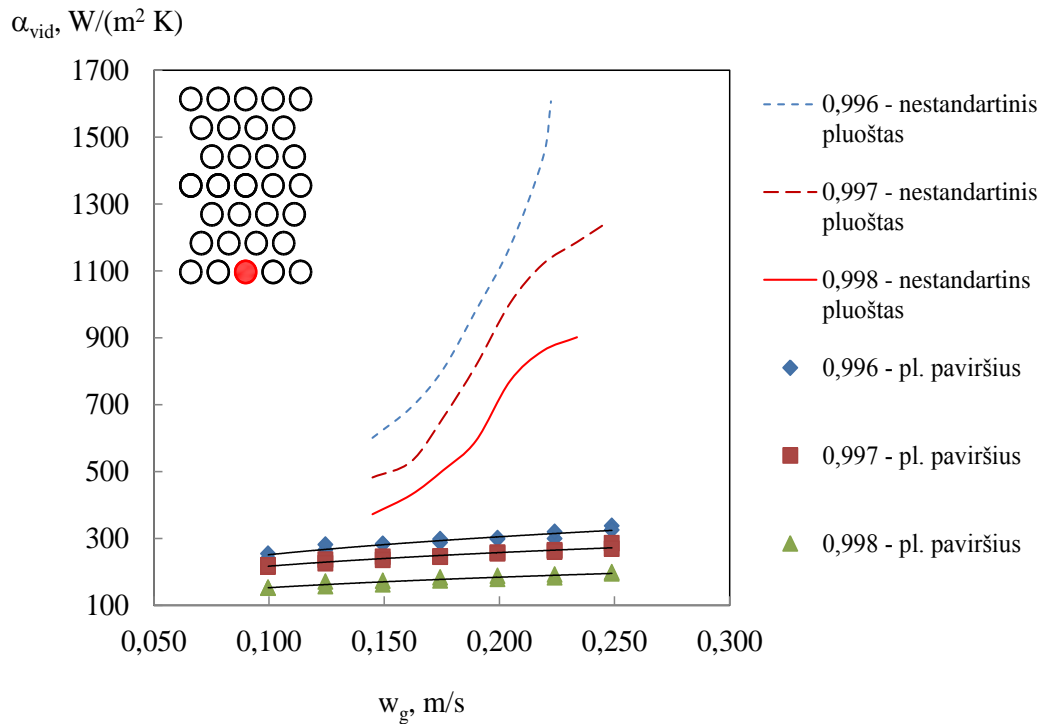
a) - nuo putų srauto greičio; b) – nuo putų dujingumo

Eksperimentiniai tyrimai [3] parodė, kad vertikalaus plokščio paviršiaus šilumos atidavimo intensyvumas kylančiam dvifaziam putų srautui yra:

a) vidutiniškai 2 kartus mažesnis nei vienišo vamzdelio arba vidurinio pirmosios eilės vamzdelio koridoriniame vamzdžių pluošte;

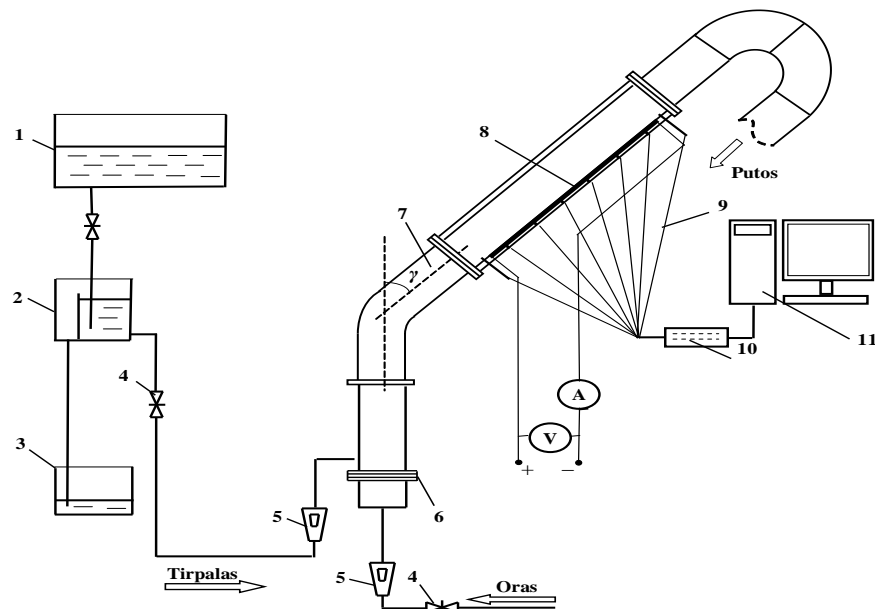
b) vidutiniškai 1,6 karto mažesnis nei vidurinio pirmosios eilės vamzdelio šachmatiniame vamzdžių pluošte;

c) vidutiniškai 3,5 karto mažesnis nei vidurinio pirmosios eilės vamzdelio nestandartiniame vamzdžių pluošte (3.3 pav.).



3.3 pav. Plokščio paviršiaus vidutinio šilumos atdavimo koeficiento grafinis palyginimas su nestandartinio vamzdžių pluošto (kaitinamas pirmosios eilės vidurinis vamzdelis) šilumos atdavimo koeficientu

3.2. Pasviręs plokščias paviršius



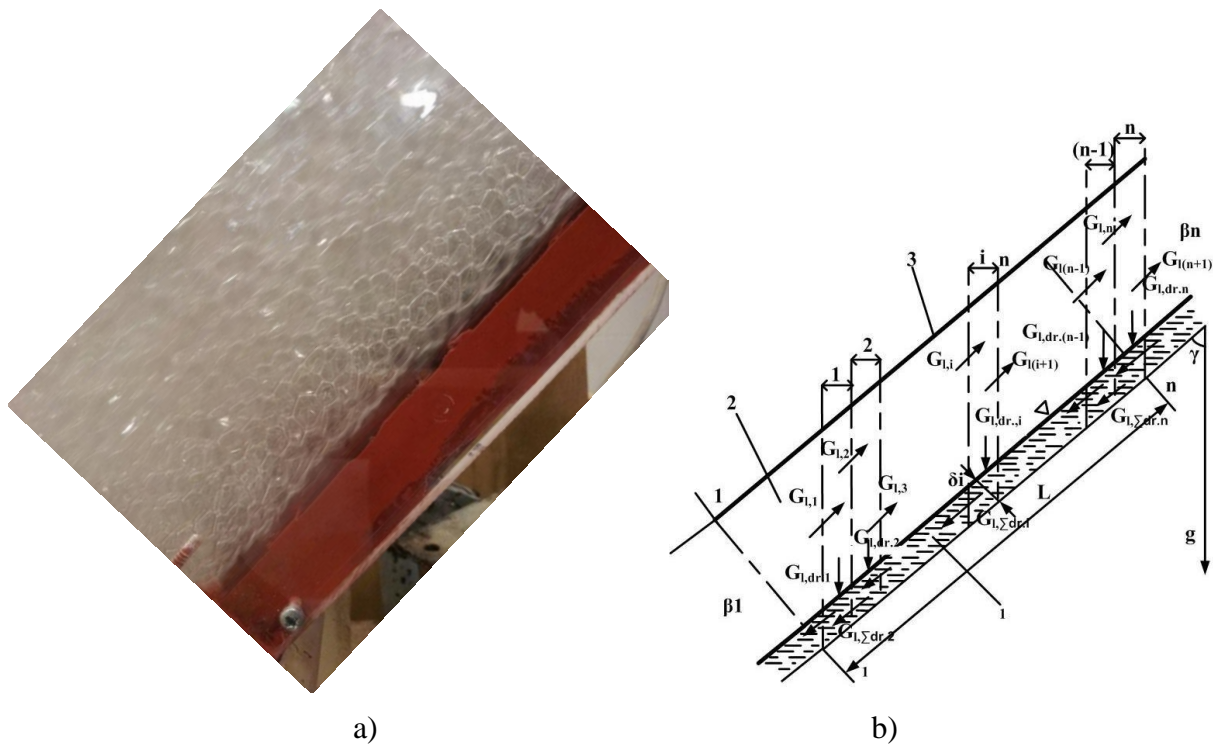
3.4 pav. Eksperimentinio stendo [14] su pasvirusiu paviršiumi schema:

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

Pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimas putų srautui buvo tiriamas pasinaudojant 3.4 pav. pavaizduotu eksperimentiniu stendu [14]. Tyrimų metu laikytasi šių sąlygų:

- tirpalo kinematinė klampa $\nu_l = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;
- dujų (oro) tankis $\rho_g = 1,22 \text{ kg/m}^3$;
- putų kanalo kvadratinio skerspjūvio kraštinė $a = 0,14 \text{ m}$;
- laisvojo kritimo pagreitis $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- plokščio paviršiaus posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$.

Kaip galima matyti 3.5 pav., dvifazis šilumnešis (putų srautas) teka pasvirusiu kanalu, o tirpalas drenuojasi vertikaliai žemyn, t.y. skersai putų srauto. Tokiu atveju putų dujingumas keičiasi ne tik išilgai kanalo (kaip yra vertikalaus tekėjimo atveju), bet ir skersai. Vykstant skersiniam tirpalo drenažui, apatinėje kanalo dalyje formuojasi nusidrenavusio skysčio sluoksnis, kuriame dujingumas mažiausias. Priešingoje kanalo pusėje putos sausios, jų dujingumas didžiausias. Dėl tokio dujingumo pasiskirstymo apatinė kanalo dalis (plokščias paviršius) aušinama geriausiai, o viršutinė - blogiausiai. Nusidrenavusio skysčio sluoksnio judėjimo kryptis priklauso nuo putų srauto judėjimo greičio ir gali būti nukreipta priešinga aukštyr tekancio putų srauto judėjimo kryptiai (priešsrovis) arba gali judėti ta pačia kryptimi (pasrovis).



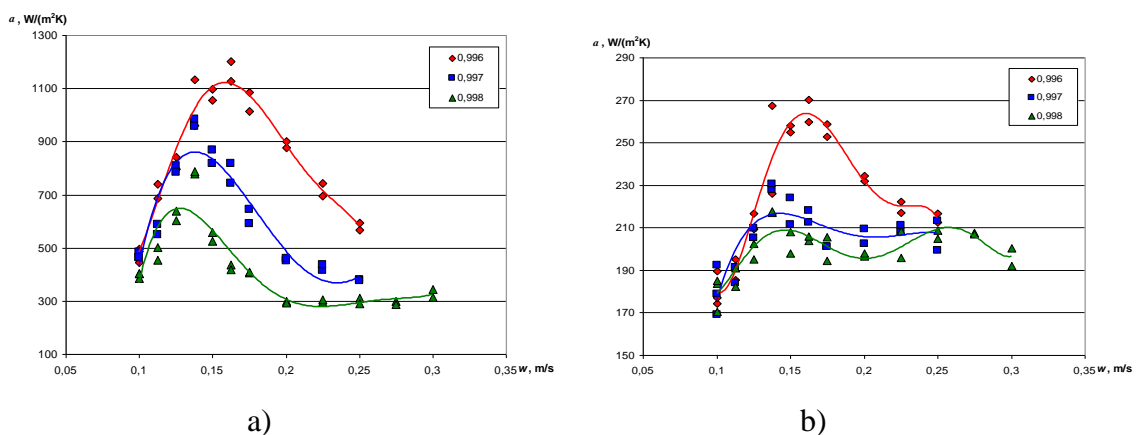
3.5 pav. Putų tirpalo drenažas pasvirusiame kanale [14]:

a) – bendras vaizdas; b) principinė schema

1 - putų kanalas; 2 - putų srautas; 3 - nusidrenavusio tirpalo sluoksnis; 4 - karštas paviršius

3.6 ir 3.7 pav. grafiškai pavaizduotas eksperimentų metu surasto vidutinio šilumos atidavimo koeficiento kitimas priešsrovio atveju plokščio pasvirusio paviršiaus dviejuose skerspjūviuose: pradiniam (apačioje) ir galiniame (viršuje) [14].

Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad maksimali šilumos atidavimo koeficiento (α) vertė tuo atveju, kai putų srauto dujingumas: $\beta=0,996$, pasiekama tada, kai srauto greitis $w_{fkr}=0,1625$ m/s. Greičiui didėjant iki šios vertės, aušinimo intensyvumas auga, toliau didinant greitį – mažėja. Tuo atveju, jeigu $\beta=0,997$, pradinės paviršiaus dalies aušinimo intensyvumas pasiekia maksimalią vertę, esant greičiui $w_{fkr}=0,1375$ m/s. Sausiausių putų atveju ($\beta=0,998$), didėjant putų srauto greičiui, šilumos atidavimo koeficiento vertė pasiekia maksimumą tada, kai $w_{fkr}=0,125$ m/s. Toliau didinant srauto greitį, šilumos atidavimo intensyvumas mažėja, o nuo $w_f=0,22$ m/s vėl ima didėti.

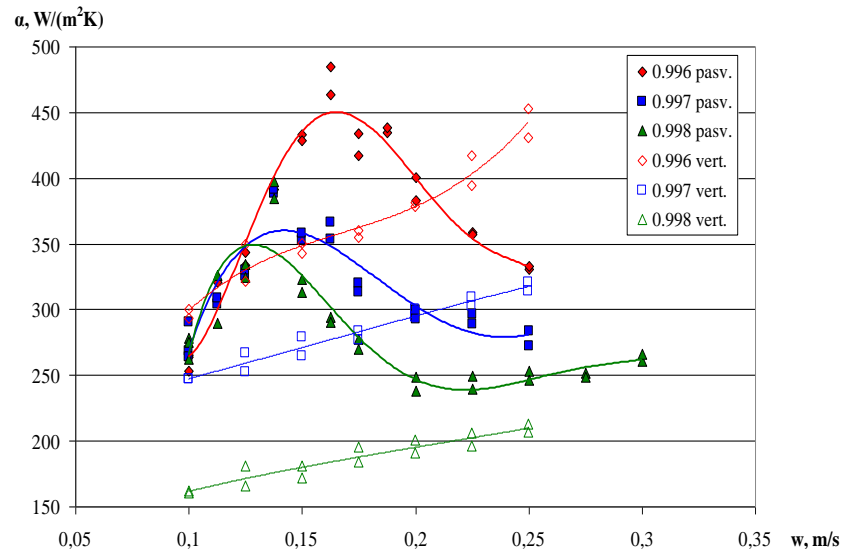


3.6 pav. Plokščio pasvirusio paviršiaus pradinės dalies (a) ir galinės dalies (b) aušinimo intensyvumo priklausomybė nuo putų srauto greičio

Pateikta grafinė medžiaga (3.6 pav.) rodo, kad, skirtingai negu vienfazių šilumnešiu atveju, kur, augant šilumnešio greičiui, didėja ir šilumos atidavimo intensyvumas, putų srauto atveju greičio didinimas duoda teigiamą efektą tik iki tam tikros greičio vertės. Šilumos atidavimo intensyvumą putoms lemia ne tikai srauto dujingumas ir greitis, bet ir su šiais dviem parametrais bei posvyrio kampu susiję nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis ir sluoksnio tekėjimo kryptis. Jeigu putų srautas teka aukštyn, o nusidrenavusio tirpalo sluoksnis – žemyn, didėjantis putų srauto greitis intensyvina šilumos atidavimą. Tačiau, srauto greičiui pasiekus kritinę vertę, putų srautas ima stabdyti žemyn tekančią drenažinio tirpalo sluoksnį. Dėl to ima augti šio sluoksnio storis ir šilumos atidavimo intensyvumas sumažėja. Toliau didėjant putų srauto greičiui, nusidrenavusio tirpalo sluoksnis palaipsniui ima judėti į viršų, t. y. ta pačia kryptimi, kaip ir putų srautas. Dar daugiau didinant putų srauto greitį, vis didesnis drenažinio tirpalo srautas „nešamas“ aukštyn, jo greitis didėja, o tirpalo sluoksnio storis mažėja, dėl ko aušinimo intensyvumas vėl ima augti. Būtina pastebėti (tai rodo ir pateikta grafinė medžiaga),

kad, kuo putų dujingumas mažesnis (drėgnesnės putos), tuo storesnis ant paviršiaus susidariusio nusidrenavusio tirpalo sluoksnis ir tuo didesnei kritinio greičio vertei esant pasiekiamas aušinimo intensyvumo maksimumas.

Plokščio vertikalaus [3] ir 45° kampu pasvirusio [14] paviršiaus vidutinio šilumos atidavimo intensyvumo palyginimas pateiktas 3.7 pav. Nesunku pastebėti, kad beveik visame tirtų greičių diapazone pasviręs paviršius aušinamas geriau negu vertikalus plokščias paviršius.



3.7 pav. Pasvirusio ir vertikalaus plokščių paviršių vidutinio šilumos atidavimo intensyvumo priklausomybės nuo putų srauto greičio palyginimas ($\beta = 0,996; 0,997$ ir $0,998$)

Pateikta medžiaga rodo, kad iki šio meto buvo tirtas tiksliai 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimas putų srautui priešsrovio atveju. Šiame darbe numatoma, pasinaudojant ankstesnio tyrimo duomenimis, ištirti ne tik 45° kampu, bet ir 30° bei 60° kampais pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimą putų srautui.

4. VIDUTINIO TŪRINIO PUTŲ DUJINGUMO KITIMAS IŠILGAI TIRIAMO PAVIRŠIAUS

Putų srauto dujingumo pasiskirstymo išilgai ir skersai kanalo įvertinimas yra būtinas skaičiuojant aušinimo intensyvumą bei projektuojant putų šilumokaičius [13,14]. Siekdami apskaičiuoti putų dujingumo pasiskirstymą išilgai kanalo, putų kanalą padalinkime vertikaliais pjūviais, kaip parodyta 3.5 pav., į atskiras elementarias zonas: 1, 2, 3... i ... $(n-1)$, n .

Prielaida. Laikysime, kad putų srauto dujingumas nekinta elementariosios zonos ribose, o keičiasi pereinant iš vienos zonos į kitą. Be to, laikome, kad kiekvienoje elementariojoje zonoje nusidrenuoja n -toji dalis tirpalo, su putomis atnešamo į tą zoną.

Pažymėkime: n - elementariųjų zonų skaičius ($n = L/l_i$), kur: L – eksperimentinio ruožo ilgis, m; l_i – elementariosios zonos ilgis, m; i - atskiros i - tosios zonos numeris ($1 \leq i \leq n$).

Bendruoju atveju dujų dalis putų sraute gali būti įvertinta putų debitiniu dujingumu β_n , kuris apskaičiuojamas lygtimi:

$$\beta_n = G_g / (G_g + G_l), \quad (4.1)$$

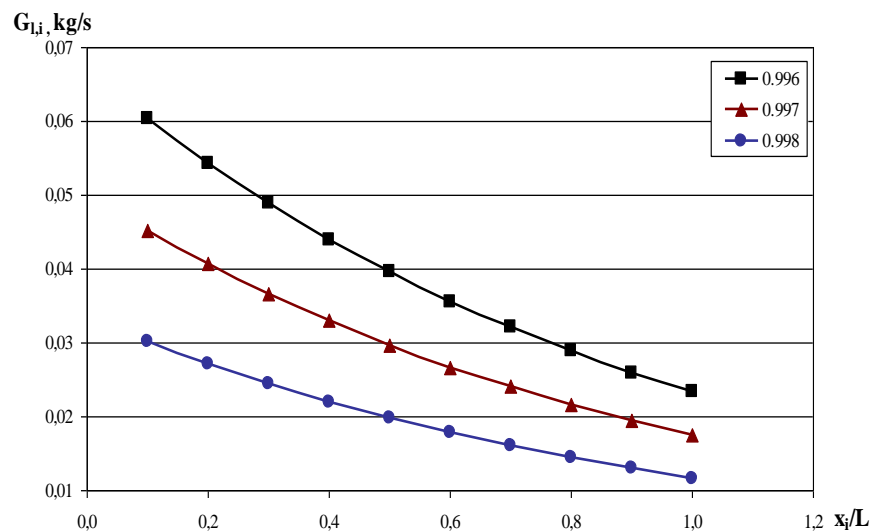
kur: G_g ir G_l – putas sudarančių dujų ir skysčio srautai (debitai), kg/s arba m³/s.

Akivaizdu, kad kuo didesnis β_n , tuo sausesnės putos ir tuo mažesnis paviršių aušinimo intensyvumas.

Atsižvelgę į ankščiau minėtą prielaidą, galime surasti su putomis iš apatinės (1-osios) eksperimentinio ruožo zonos iki viršutinės (n -tosios zonos) pernešamo tirpalo srautą, kg/s:

$$G_{l,i} = G_{l,1} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)}. \quad (4.2)$$

Šios lygties grafinė interpretacija pavaizduota 4.1 pav..



4.1 pav. Su putomis pernešamo tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo

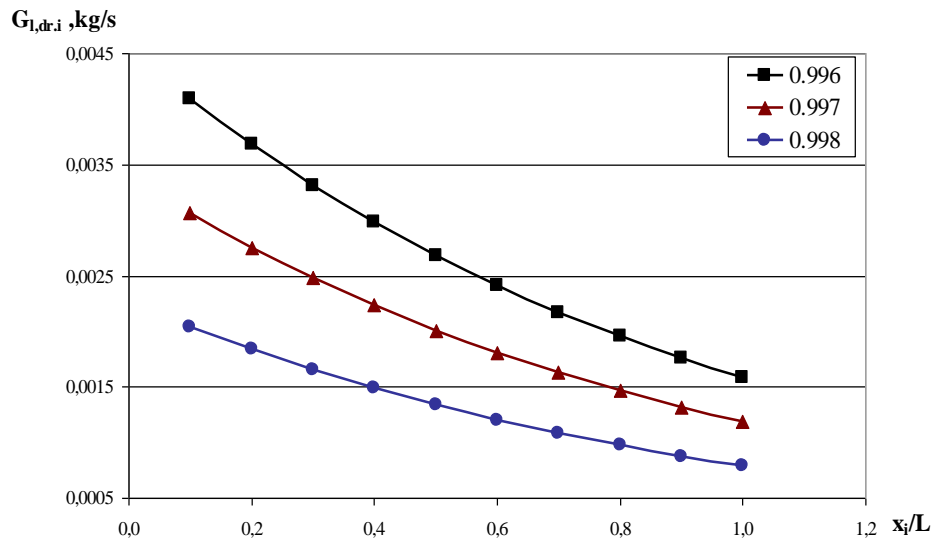
$$(G_g=0,00478 \text{ kg/s}; \bar{w}_g=0,2 \text{ m/s}; L=0,5 \text{ m})$$

Pateikta grafinė medžiaga rodo, kad su putomis pernešamo tirpalo debitas tolygiai mažėja išilgai eksperimentinio paviršiaus.

Tokiu atveju kiekvienoje zonoje iš putų besidrenuojančio tirpalo srautas, formuojantis tirpalo sluoksnį ant plokščio paviršiaus (apatinės kanalo sienelės), gali būti surastas taip, kg/s:

$$G_{l,dr,i} = \frac{G_{l,1}}{n} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)}. \quad (4.3)$$

Šios lygties grafinė interpretacija pateikta 4.2 pav..



4.2 pav. Besidrenuojančio tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo

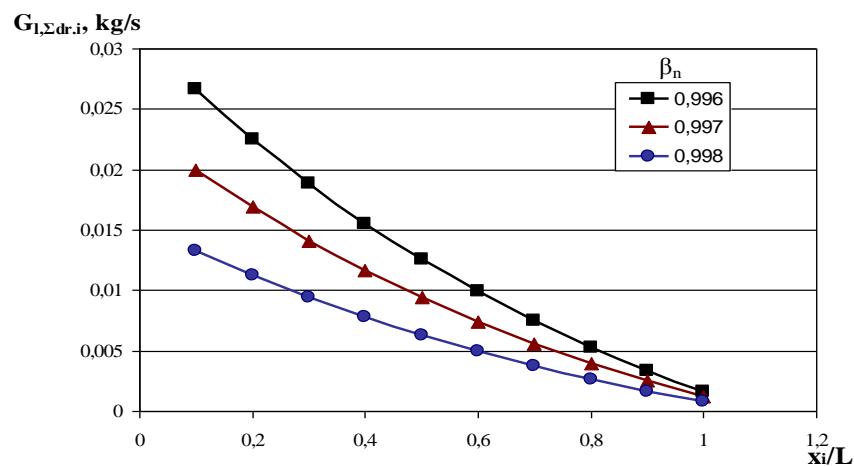
$$(G_g=0, 00478 \text{ kg/s}; \bar{w}_g=0,2 \text{ m/s}; L=0,5 \text{ m})$$

Pateikta grafinė medžiaga rodo, kad besidrenuojančio tirpalo debitas mažėja išilgai putų kanalo srauto tekėjimo kryptimi.

Suradę kiekvienoje zonoje besidrenuojančio tirpalo debitą (4.3 lygtis), galime apskaičiuoti kiekvienoje zonoje apatinę eksperimentinio ruožo sienelę (plokščiu paviršiumi) tekančio tirpalo srautą, kg/s:

$$\Delta G_{l,i} = G_{l,\Sigma dr,i} = G_{l,1} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-1)} - \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(n)} \right], \quad (4.4)$$

Šios lygties grafinė interpretacija pateikta (4.3 pav.). Matome, kad suminis nusidrenavusio tirpalo debitas mažėja išilgai paviršiaus putų srauto tekėjimo kryptimi.



4.3 pav. Nusidrenavusio tirpalo debito kitimas išilgai putų kanalo

$$(G_g=0, 00478 \text{ kg/s}; \bar{w}_g=0,2 \text{ m/s}; L=0,5 \text{ m})$$

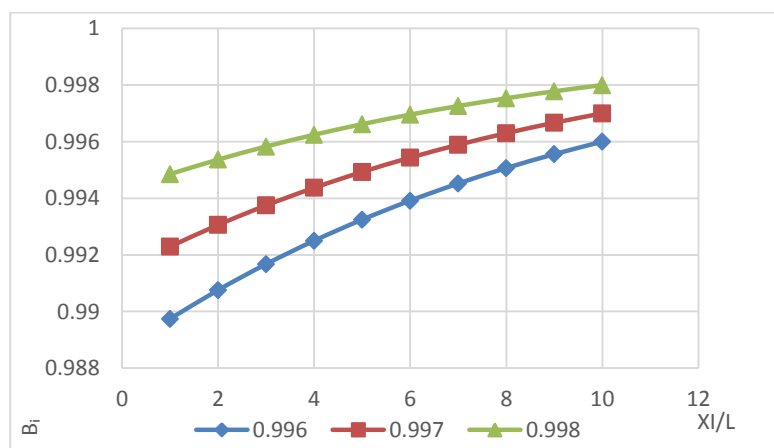
Iš 4.3 pav. matome, kad nusidrenavusio tirpalo debitas mažėja putų srautui tekėjimo kryptimi.

Grafinė medžiaga rodo, kad su putomis pernešamo, besidrenuojančio ir nusidrenavusio tirpalo debitai didėja mažėjant putų dujingumui, t. y. tuo atveju, kai putos drėgnesnės.

Turėdami kiekvienoje zonoje su putomis pernešamo tirpalo debitą $G_{l,i}$ ir, tardami, kad masinis dujų (oro) debitas nekinta išilgai eksperimentinio ruožo ($G_g = G_{g,i} = \text{const}$), galime surasti vidutinį masinį debitinį putų dujingumą kiekvienoje zonoje [14]:

$$\beta_i = \frac{\beta_n}{\beta_n + (1 - \beta_n) \left(\frac{n-1}{n}\right)^{(i-n)}} \quad (4.5)$$

Šios lygties grafinė interpretacija pateikta 4.4 pav.



4.4 pav. Vidutinio debitinio dujingumo kitimas išilgai putų kanalo
($G_g=0,00478$ kg/s; $\bar{w}_g=0,2$ m/s; $L=0,5$ m)

Grafinė medžiaga (4.4 pav.) rodo, kad vidutinis putų srauto dujingumas tolygiai didėja srauto tekėjimo kryptimi, nes dalis tirpalo pakeliui nusidrenuoja.

5. NUSIDRENAVUSIO TIRPALO SLUOKSNIO STORIS

Siekiant apskaičiuoti įkaitusio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui intensyvumą, būtina žinoti nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storį δ_i , kuris priklauso nuo putų srauto parametrų (dujingumo, tekėjimo greičio, dujų tankio, tirpalo klamos) bei nuo plokščio paviršiaus charakteristikų (matmenų, posvyrio kampo).

Nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storį randame pasinaudodami [14] šaltiniu.

Tuo atveju, kai putų srauto ir nusidrenavusio tirpalo sluoksnio tekėjimo kryptys sutampa (pasrovis tekėjimas), turėsime:

$$\delta_i = 2,13 \left\{ G_g \left(\frac{1-\beta_n}{\beta_n} \right) \frac{v_l}{\rho_g \cdot a \cdot g \cdot \cos \gamma} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.1)$$

Atveju, kai putų srauto ir tirpalo sluoksnio tekėjimo kryptys yra priešingos (priešrovis tekėjimas), turėsime:

$$\delta_i = 2,52 \left\{ G_g \left(\frac{1-\beta_n}{\beta_n} \right) \frac{v_l}{\rho_g \cdot a \cdot g \cdot \cos \gamma} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.2)$$

Šios lygtys (5.1 ir 5.2) leidžia apskaičiuoti drenažinio tirpalo sluoksnio, susidariusio ant kaitinamo paviršiaus, storį priklausomai nuo dujų (oro) debito, kanalo posvyrio kampo, putų dujingumo ištekant iš eksperimentinio ruožo, tirpalo kinematinės klampos, dujų (oro) tankio, kanalo pločio bei elementarios zonos eiliškumo.

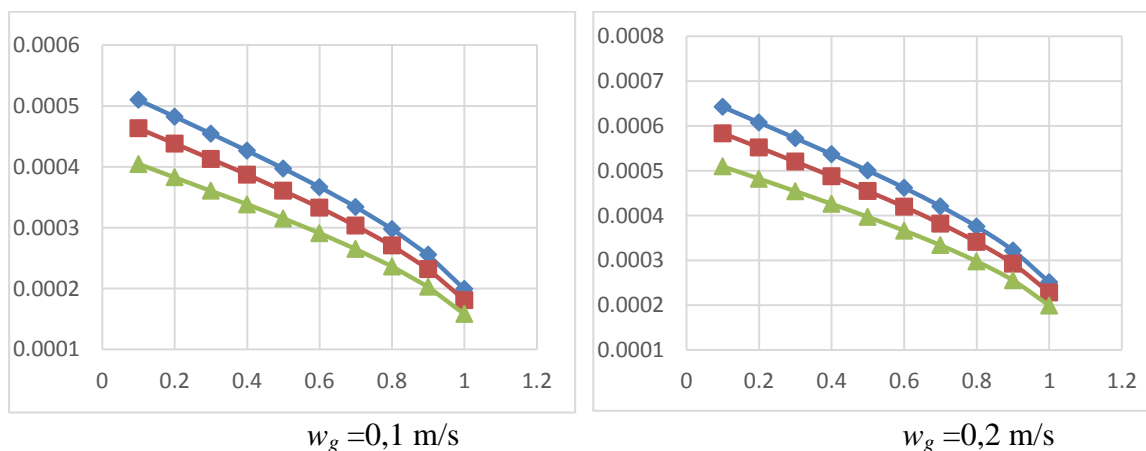
Pritaikome (5.1 ir 5.2) formules konkrečioms eksperimentinių tyrimų sąlygoms.

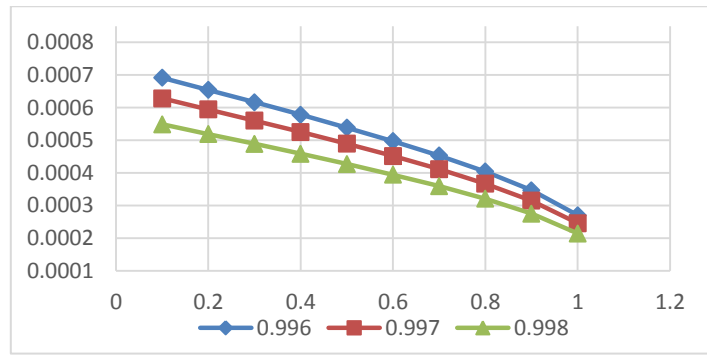
1. Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas** $\gamma = 45^\circ$; tirpalo klampa $v_l = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m²/s; tirpalo tankis $\rho_g = 1,22$ kg/m³; kanalo kraštinė $a = 0,14$ m; laisvojo kritimo pagreitis $g = 9,81$ m/s².

Tokiu atveju (5.1) lygtis atrodytų taip:

$$\delta_i = 2,01 \cdot 10^{-2} \cdot \left\{ G_g \left(\frac{1-\beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.3)$$

Geometrinė (5.3) lygties interpretacija pateikta 5.1 pav. Nesunku pastebėti, kad nusidrenavusio (drenažinio) tirpalo sluoksnio storis mažėja išilgai putų srauto tekėjimo krypties. Didesnio putų dujingumo atveju tirpalo sluoksnio storis mažesnis, nes tirpalas drenuojasi iš sausesnių putų. Be to, tirpalo sluoksnio storis auga didėjant putų srauto greičiui, nes su putomis pernešama daugiau ir, tuo pačiu, nusidrenuoja daugiau tirpalo.





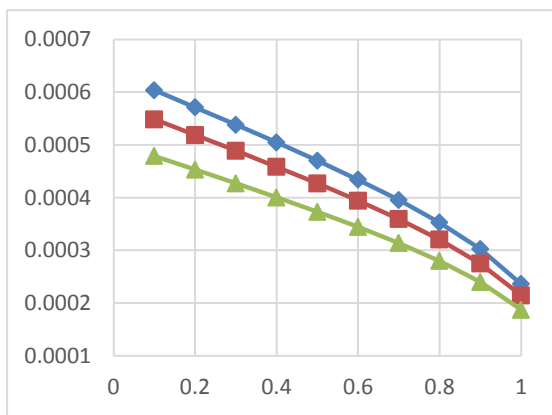
$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

5.1 pav. Tirpalo sluoksnio storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L) (pasrovis, posvyrio kampas $\gamma = 45^0$)

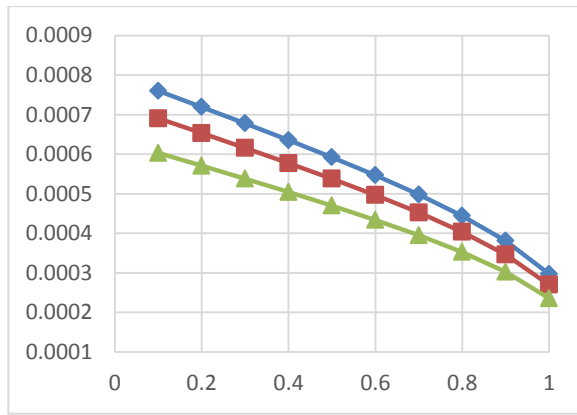
2. Tegul turime **priešrovi tekėjimą**; kanalo **posvyrio kampas $\gamma = 45^0$** .

Tokiu atveju (5.2) lygtis atrodytų taip:

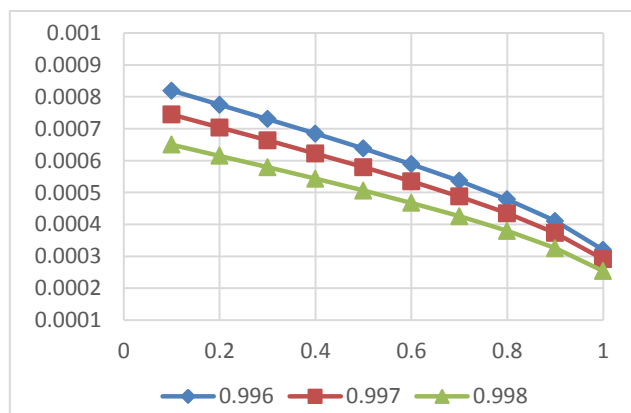
$$\delta_i = 2,38 \cdot 10^{-2} \cdot \left\{ G_g \left(\frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.4)$$



$w_g = 0,1 \text{ m/s}$



$w_g = 0,2 \text{ m/s}$



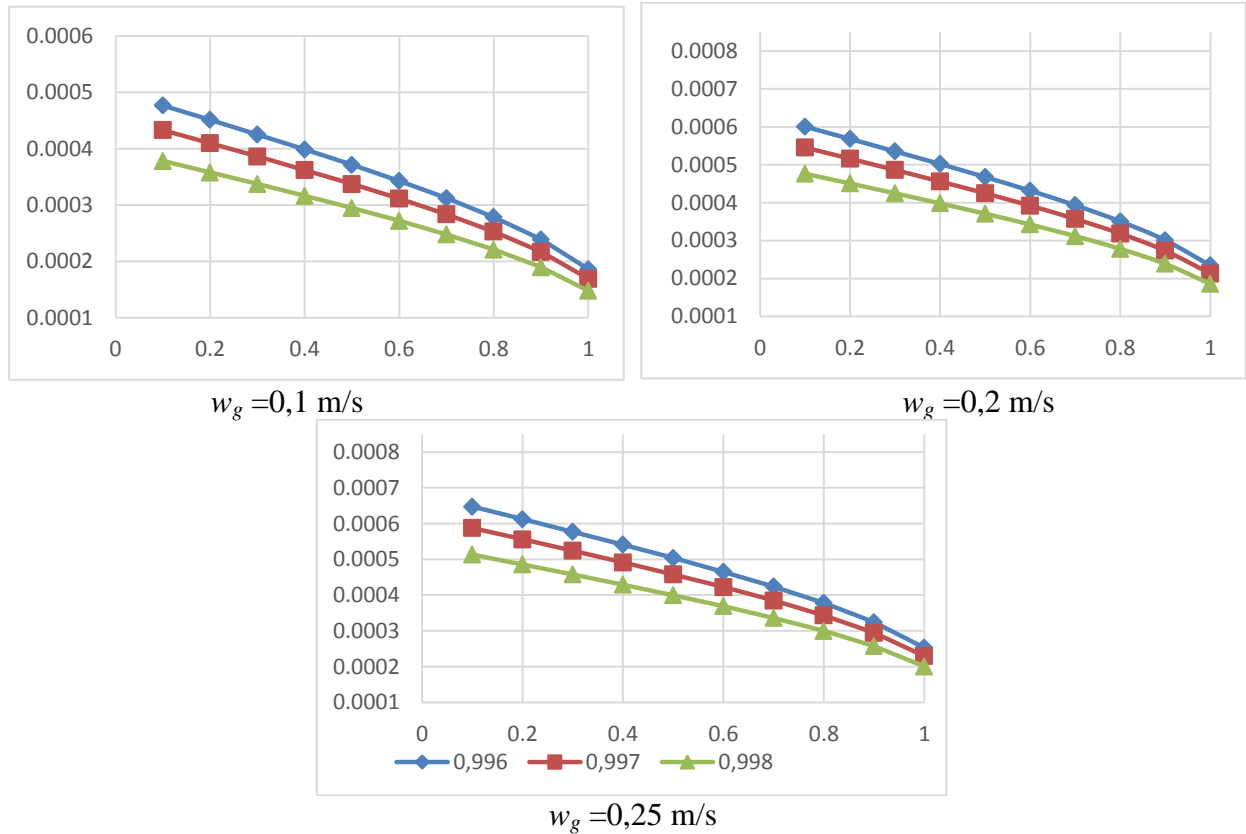
$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

5.2 pav. Tirpalo sluoksnio storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L) (priešrovis, posvyrio kampas $\gamma = 45^0$)

3. Tegul turime **pasrovi tekėjimą**; kanalo **posvyrio kampas $\gamma = 30^0$** .

Tokiu atveju (5.1) lygtis atrodytų taip:

$$\delta_i = 1,88 \left\{ G_g \left(\frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.5)$$

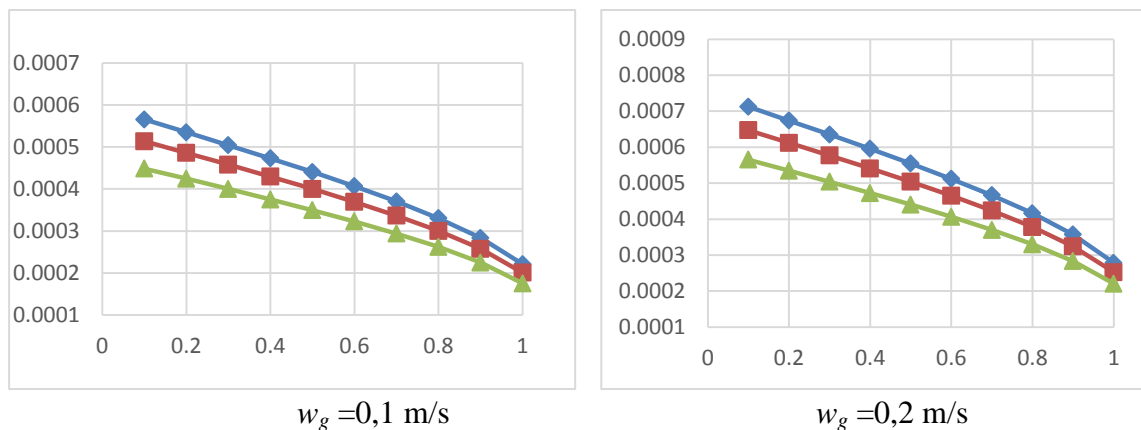


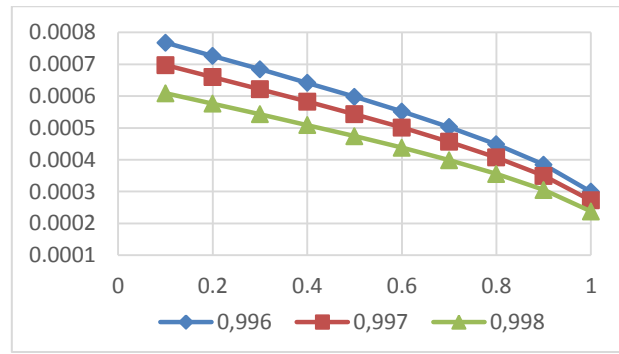
5.3 pav. Tirpalo sluoksnio storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L) (pasrovis, posvyrio kampas $\gamma = 30^0$)

4. Tegul turime **priešsrovi tekėjimą**; kanalo **posvyrio kampas $\gamma = 30^0$** .

Tokiu atveju (5.2) lygtis atrodytų taip:

$$\delta_i = 2,23 \left\{ G_g \left(\frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.6)$$





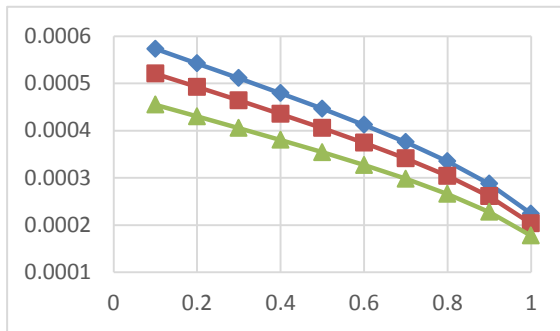
$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

5.4 pav. Tirpalo sluoksnio storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L)
(priešsrovis, posvyrio kampas $\gamma = 30^0$)

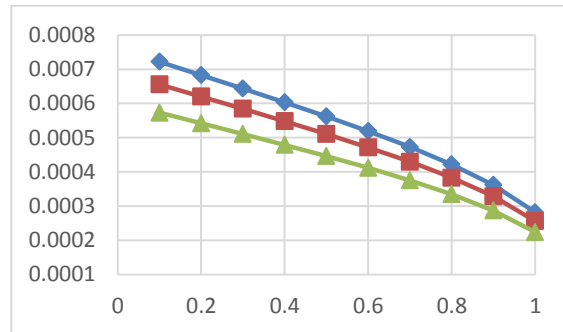
5. Tegul turime **pasrovi tekėjimą**; kanalo **posvyrio kampas $\gamma = 60^0$** .

Tokiu atveju (5.1) lygtis atrodytų taip:

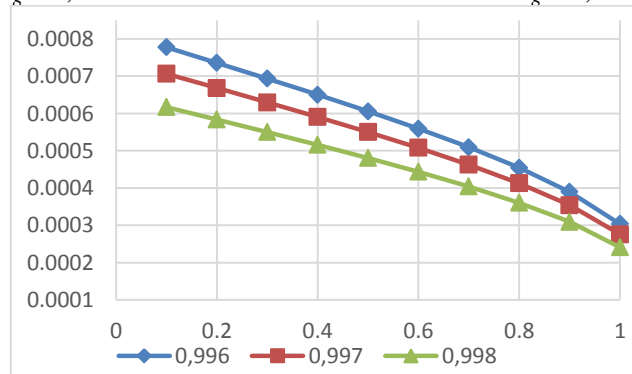
$$\delta_i = 2,26 \left\{ G_g \left(\frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.7)$$



$w_g = 0,1 \text{ m/s}$



$w_g = 0,2 \text{ m/s}$



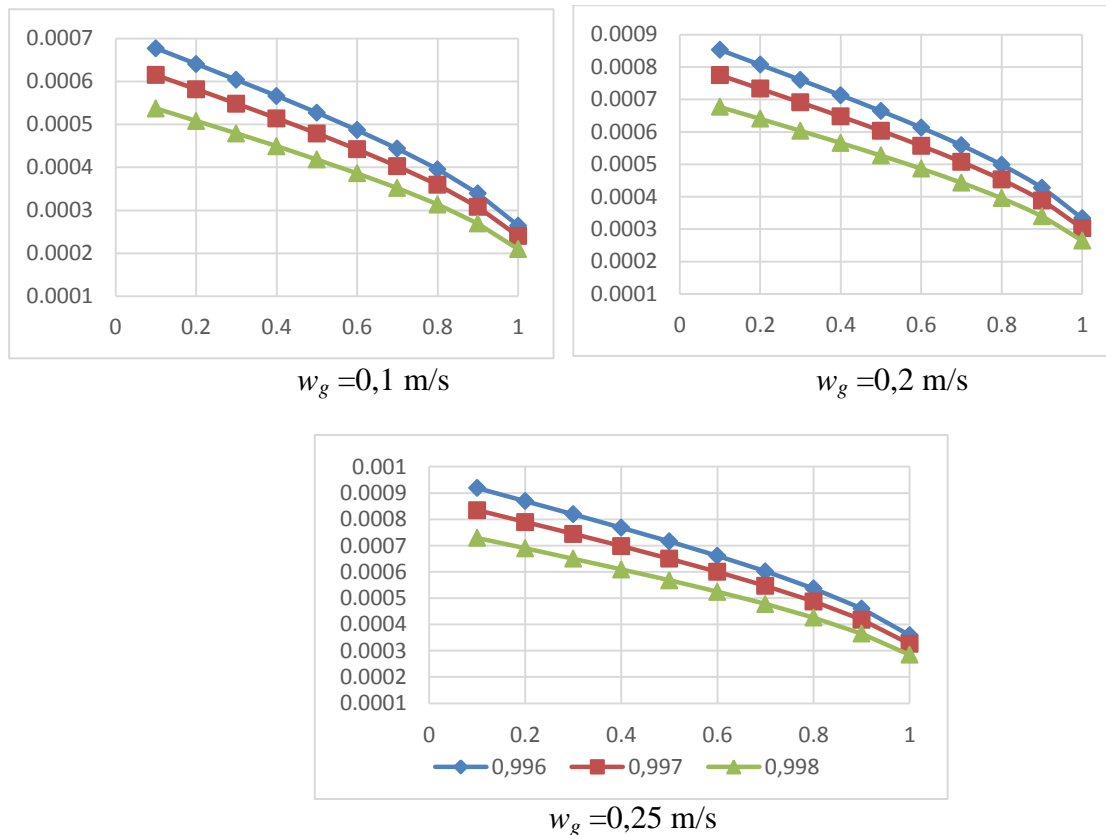
$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

5.5 pav. Tirpalo storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L)
(pasrovis, posvyrio kampas $\gamma = 60^0$)

1. Tegul turime **priešsrovi tekėjimą**; kanalo **posvyrio kampas $\gamma = 60^0$** .

Tokiu atveju (5.2) lygtis atrodytų taip:

$$\delta_i = 2,67 \left\{ G_g \left(\frac{1 - \beta_n}{\beta_n} \right) \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^{(i-n)} - \left(\frac{n-1}{n} \right) \right] \right\}^{0,333} \quad (5.8)$$



5.6 pav. Tirpalo storio (δ_i) kitimas išilgai paviršiaus (x/L)

(priešsrovis, posvyrio kampas $\gamma = 60^0$)

Iš (5.1 – 5.8) paveiksluose pateiktų kreivių matyti, kad tirpalo sluoksnio storis yra didžiausias eksperimentinio ruožo pradžioje, nes čia putos yra drėgniausios (mažiausias dujingumas). Putų srauto tekėjimo kryptimi (išilgai eksperimentinio ruožo) tirpalo sluoksnio storis mažėja, nes pakeliui nusidrenuoja dalis tirpalo.

6. ŠILUMOS ATIDAVIMO KOEFICIENTO NUSTATYMAS

6.1. Šilumos atidavimo koeficientas

Šiuo metu yra žinomi tiksliai 45^0 kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui tyrimo rezultatai [14]. Šiame tyrimų etape laikysime, kad tais atvejais, kai paviršiaus posvyrio kampas yra 30^0 ir 60^0 , šilumos atidavimo koeficientas kinta pagal analogišką dėsnį kaip ir 45^0 posvyrio atveju. Vėlesnių eksperimentinių tyrimų metu šią prielaidą būtina patikslinti.

Nusidrenavusio tirpalo sluoksnio šilumos atidavimo intensyvumą, esant laminariniam tekėjimui, lemia tirpalo sluoksnio storis bei sluoksnio šilumos laidis.

Tirpalo sluoksnio Reinoldso skaičių galima apskaičiuoti šia žinoma formule:

$$Re_l = \frac{\bar{w}_{l,i} \cdot \delta_i}{\nu_{l,i}}, \quad (6.1)$$

kur: $\bar{w}_{l,i}$ – vidutinis tirpalo sluoksnio greitis i -tojoje elementariojoje zonoje, m/s; δ_i – tirpalo sluoksnio storis i -tojoje zonoje, m; $\nu_{l,i}$ – tirpalo kinematinė klampa i -tojoje zonoje, m²/s.

Banguoto tekėjimo atveju tirpalo sluoksnio Reinoldso skaičius randamas šia formule [15]:

$$Re_{bang.} = 0,56 \cdot \left(\frac{\delta_i}{\rho_l \cdot g^{0,333} \cdot \nu^{1,333}} \right)^{0,273}, \quad (6.2)$$

kur: σ – tirpalo paviršiaus įtempimo koeficientas, N/m; ρ_l – tirpalo tankis, kg/m³; g – laisvo kūnų kritimo pagreitis, m/s².

Apskaičiuosime $Re_{bang.}$ ir Re_l . Laikome, kad: $\bar{w}_l = 0,001$ m/s; $\delta = 0,001$ m; $\nu_l = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m²/s; $\rho_l = 1002$ kg/s; $\delta = 3,6 \cdot 10^{-2}$ N/m; $g = 9,81$ m/s².

Tada iš (6.1) lygties gauname:

$$Re_l = \frac{0,001 \cdot 0,001}{1 \cdot 10^{-6}} = 1,0;$$

Iš (6.2) lygties apskaičiuojame:

$$Re_{bang.} = 0,56 \left(\frac{0,036}{1002 \cdot 9,81^{0,333} \cdot (1,0 \cdot 10^{-6})^{1,333}} \right)^{0,273} = 0,56 \left(\frac{0,036}{0,0000214} \right)^{0,273} = 4,25.$$

Gavome, kad tirpalo sluoksnio tekėjimas yra laminarinis, nes $Re_l < Re_{bang.}$

Tuo atveju, jeigu nevertiname temperatūros pokyčio išilgai eksperimentinio ruožo ir laikant, kad temperatūra keičiasi tikrai y ašies kryptimi, energijos lygtis atrodytų taip:

$$\frac{d^2 T_{l,i}}{dy^2} = 0. \quad (6.3)$$

Ribinės sąlygos:

$$\text{kai } y=0, \text{ tai } T_{l,i} = T_{w,i}; \text{ kai } y=\delta, \text{ tai } T_{l,i} = T_{f,2}.$$

čia: y – koordinatė, statmena tirpalo tekėjimo kryptimi; $T_{l,i}$, $T_{w,i}$ ir $T_{f,2}$ – tirpalo, paviršiaus ir putų temperatūra, °C.

Tada temperatūros gradientas statmena tekėjimui kryptimi:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{T_{w,i} - T_{f,2}}{\delta_i}. \quad (6.4)$$

Šilumos srautą galima surasti iš žinomų lygčių, W/m²:

- šilumos laidumo lygtis:

$$q_i = \lambda_l \frac{dT}{dy}; \quad (6.5)$$

- šilumos atidavimo lygtis:

$$q_i = \alpha_i (T_{w,i} - T_{f,2}). \quad (6.6)$$

Sulyginę (6.5) ir (6.6) lygčių kairiąsias ir dešiniąsias puses, gauname, W/(m²K):

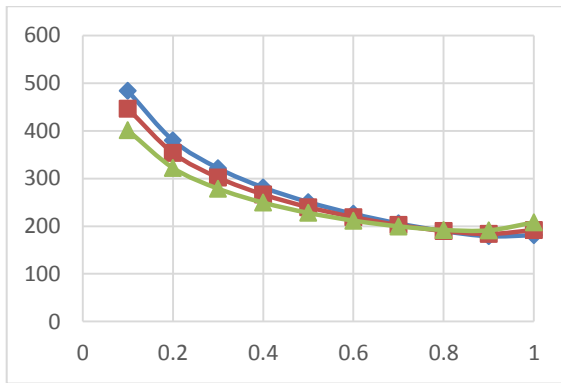
$$\alpha_i = \frac{\lambda_l \frac{dT}{dy}}{T_{w,i} - T_{f,2}} = \frac{\lambda_l \frac{T_{w,i} - T_{f,2}}{\delta_i}}{T_{w,i} - T_{f,2}} = \frac{\lambda_l}{\delta_{l,i}}, \quad (6.7)$$

čia: $\delta_{l,i}$ – tirpalo sluoksnio storis *i*-tojoje zonoje; α_i – šilumos atidavimo koeficientas *i*-tojoje zonoje, W/(m²K); λ_l – tirpalo šilumos laidžio koeficientas (laikome, kad λ_l nepriklauso nuo tirpalo temperatūros), W/(mK); $T_{w,i}$ – kaitinamo paviršiaus temperatūra *i*-tojoje zonoje, °C; $T_{f,2}$ – putų srauto temperatūra ištekant iš *n*-tosios zonos, °C.

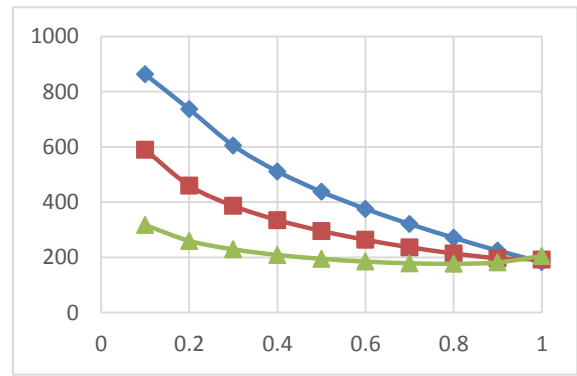
(6.7) lygtis rodo, kad, kaip ir buvo priimta, šiluma skersai nusidrenavusio tirpalo sluoksnio pernešama tik laidumu.

Eksperimentiniai tyrimai [14] rodo, kad šilumos pernešimo intensyvumas priklauso ne tik nuo nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storio $\delta_{l,i}$, randamo iš (5.1) lygties, bet ir nuo betarpiškai su tirpalo sluoksniu besiliečiančio putų srauto šilumos laidžio $\lambda_{f,i}$, kuriam didžiausią įtaką turi putų dujingumas kontakto su tirpalo sluoksniu vietoje. Pasinaudoję eksperimentiniais šilumos atidavimo koeficiento tyrimo duomenimis [14], rasime betarpiškai su tirpalo sluoksniu besiliečiančio putų srauto šilumos laidį $\lambda_{f,i}$.

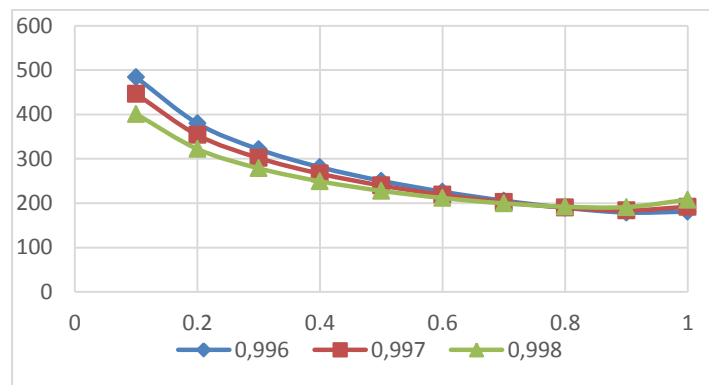
Priešsrovio tekėjimo atveju eksperimentiškai gautos 45⁰ kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui priklausomybės [14] pavaizduotos (6.1) paveiksluose.



$w_g = 0,1 \text{ m/s}$



$w_g = 0,2 \text{ m/s}$



$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

6.1 pav. Šilumos atidavimo koeficiento (α_i) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) [14]

Pateikta grafinė medžiaga rodo, kad šilumos atidavimo intensyvumas yra didžiausias eksperimentinio ruožo (paviršiaus) pradžioje, t. y. ten, kur putos drėgniausios. Mažėjant putų dujingumui (sausėjant putoms) šilumos atidavimo intensyvumas mažėja. Putų srauto greičio įtaka yra sudėtingesnė: pradžioje, didėjant greičiui, šilumos atidavimo (aušinimo) intensyvumas auga, tačiau, toliau didėjant greičiui, aušinimo intensyvumas ima mažėti. Tai rodo ir 3.6 bei 3.7 pav..

Eksperimentai [14] vykdyti, esant šioms sąlygoms: putas sudarančių dujų (oro) vidutinis greitis $\bar{w}_g = 0,1; 0,2$ ir $0,25 \text{ m/s}$; vidutinis putų dujingumas eksperimentinio ruožo pabaigoje $\beta = 0,996; 0,997$ ir $0,998$.

6.2. Putų srauto šilumos laidžio koeficientas

Taikome (6.7) lygtį (6.1) pav. pavaizduotiems atvejams. Tada turėsime, $W/(m^2K)$:

$$\alpha_i = \lambda_{f,i} / \delta_{l,i}, \quad (6.8)$$

kur: $\lambda_{f,i}$ – putų sluoksnio, besiribojančio su tirpalo sluoksniu, šilumos laidžio koeficientas, W/(m K), randamas iš lygties:

$$\lambda_{f,i} = \beta_{i,\delta} \cdot \lambda_g + (1 - \beta_{i,\delta}) \cdot \lambda_l, \quad (6.9)$$

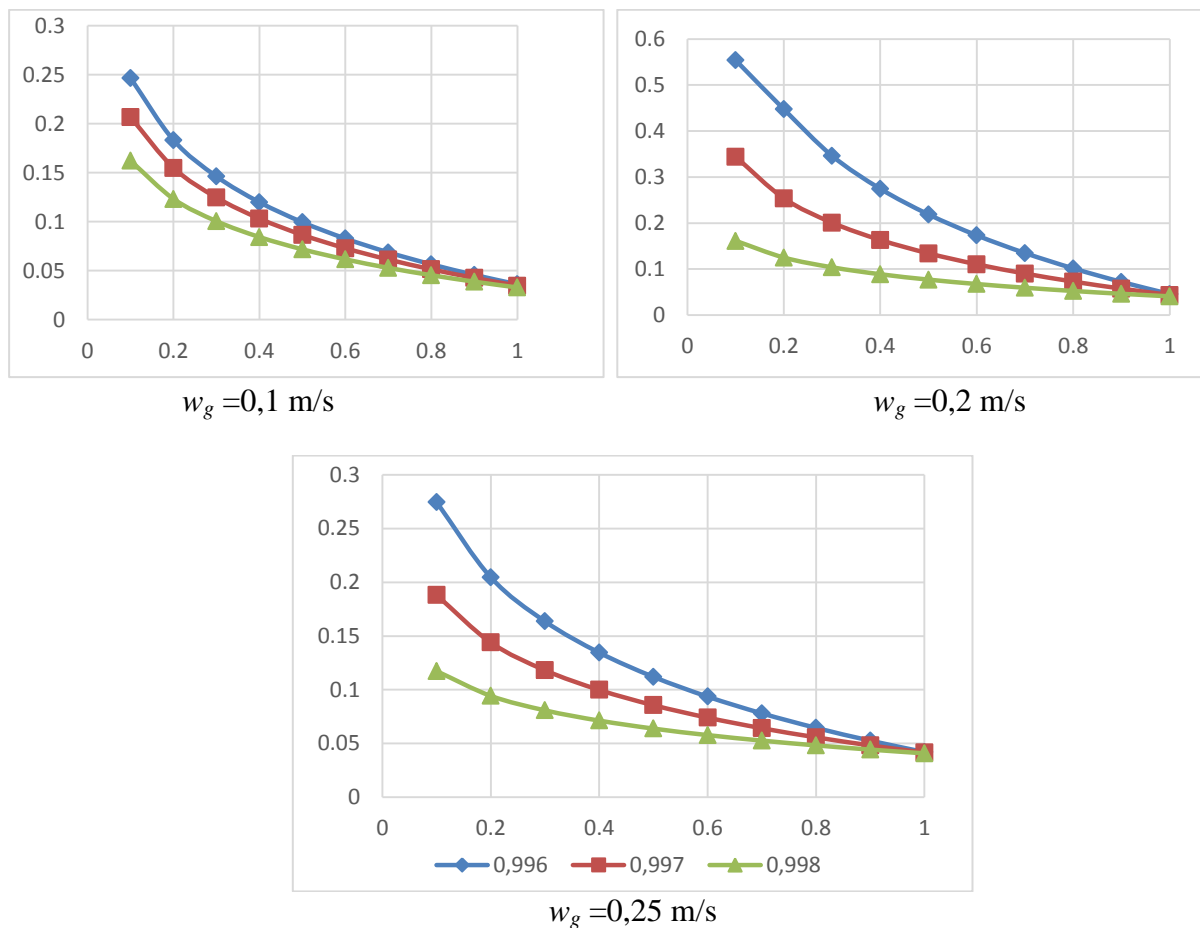
čia: $\beta_{i,\delta}$ – su tirpalu besiribojančio putų sluoksnio dujingumas; λ_g , λ_l – putas sudarančių dujų (oro) ir tirpalo šilumos laidžio koeficientai, W/(m K).

Iš (6.8) lygties išsireiškiame putų šilumos laidžio koeficientą, W/(m K):

$$\lambda_{f,i} = \alpha_i \cdot \delta_{l,i}. \quad (6.10)$$

Pritaikome (6.10) lygtį konkrečioms tyrimų sąlygoms.

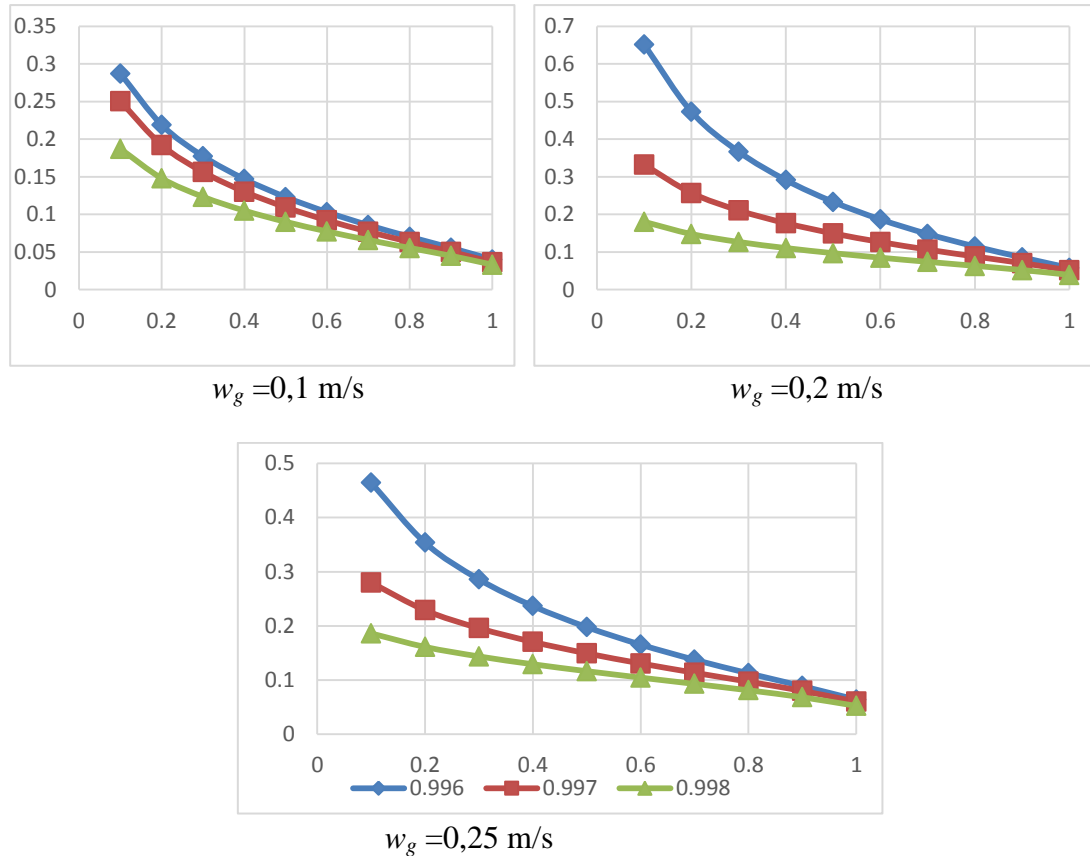
Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas** $\gamma = 45^\circ$.



6.2 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) pasrovio, $\gamma = 45^\circ$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis $\delta_{l,i}$ apskaičiuotas (5.3) lygtimi (5.1 pav.).

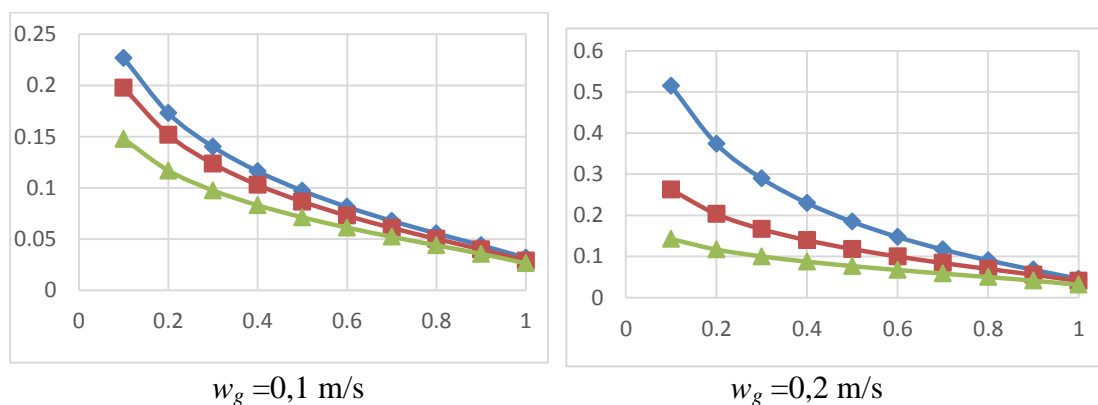
1. Tegul turime **priešrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$** .

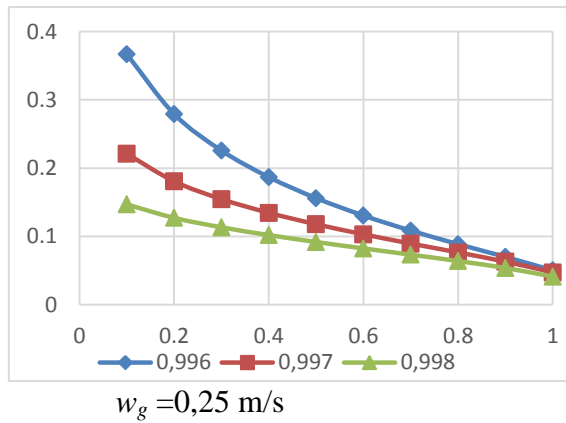


6.3 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) priešrovis, $\gamma = 45^\circ$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis apskaičiuotas (5.4) lygtimi (5.2 pav.).

2. Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 30^\circ$** .

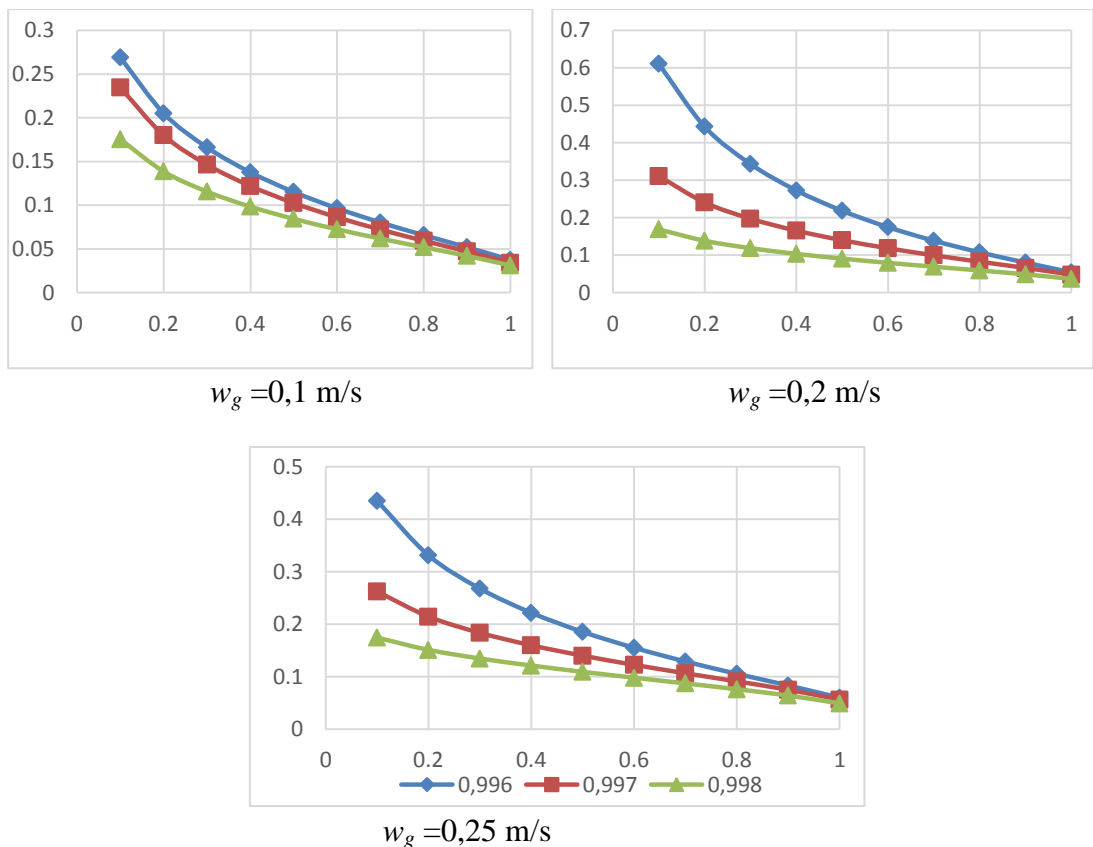




6.4 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) pasrovis, $\gamma = 30^0$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis apskaičiuotas (5.5) lygtimi (5.3 pav.).

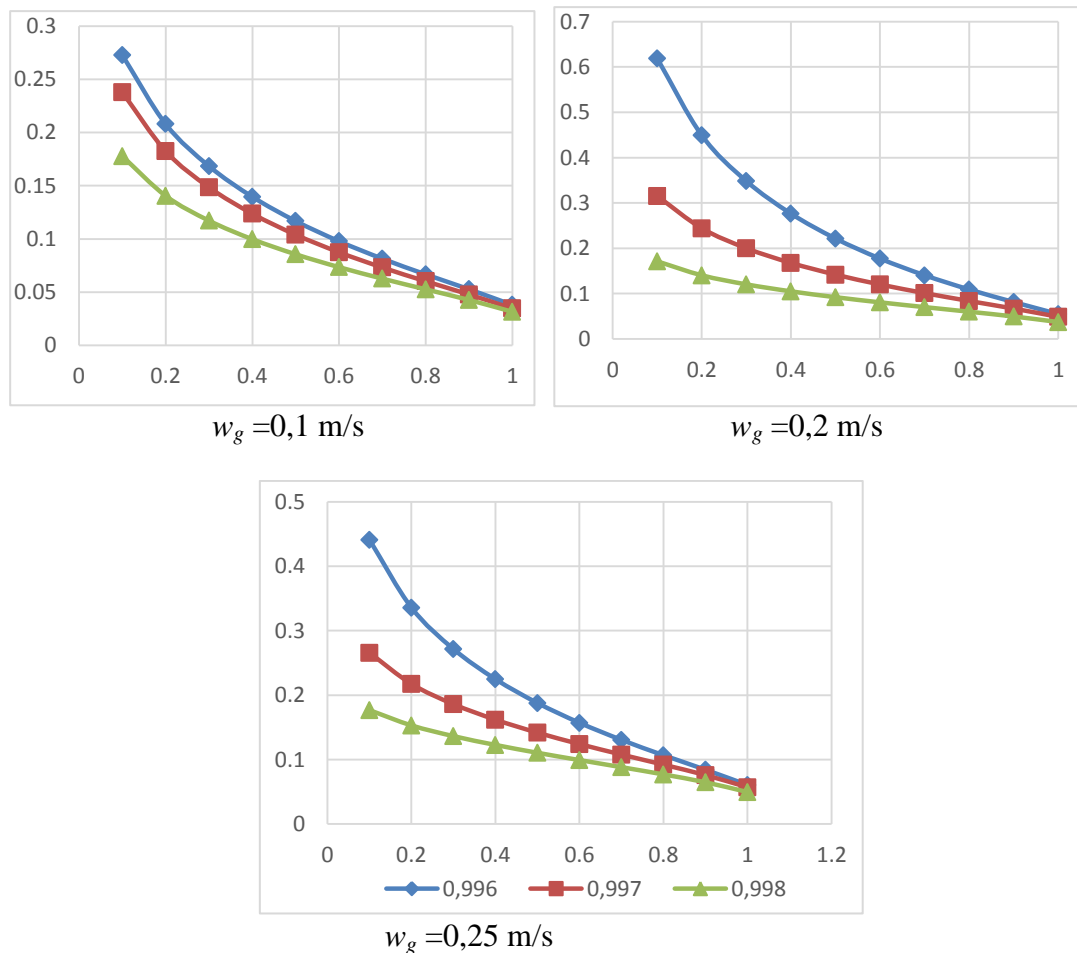
3. Tegul turime **priešrovi** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas** $\gamma = 30^0$.



6.5 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) priešrovis, $\gamma = 30^0$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis apskaičiuotas (5.6) lygtimi (5.4 pav.).

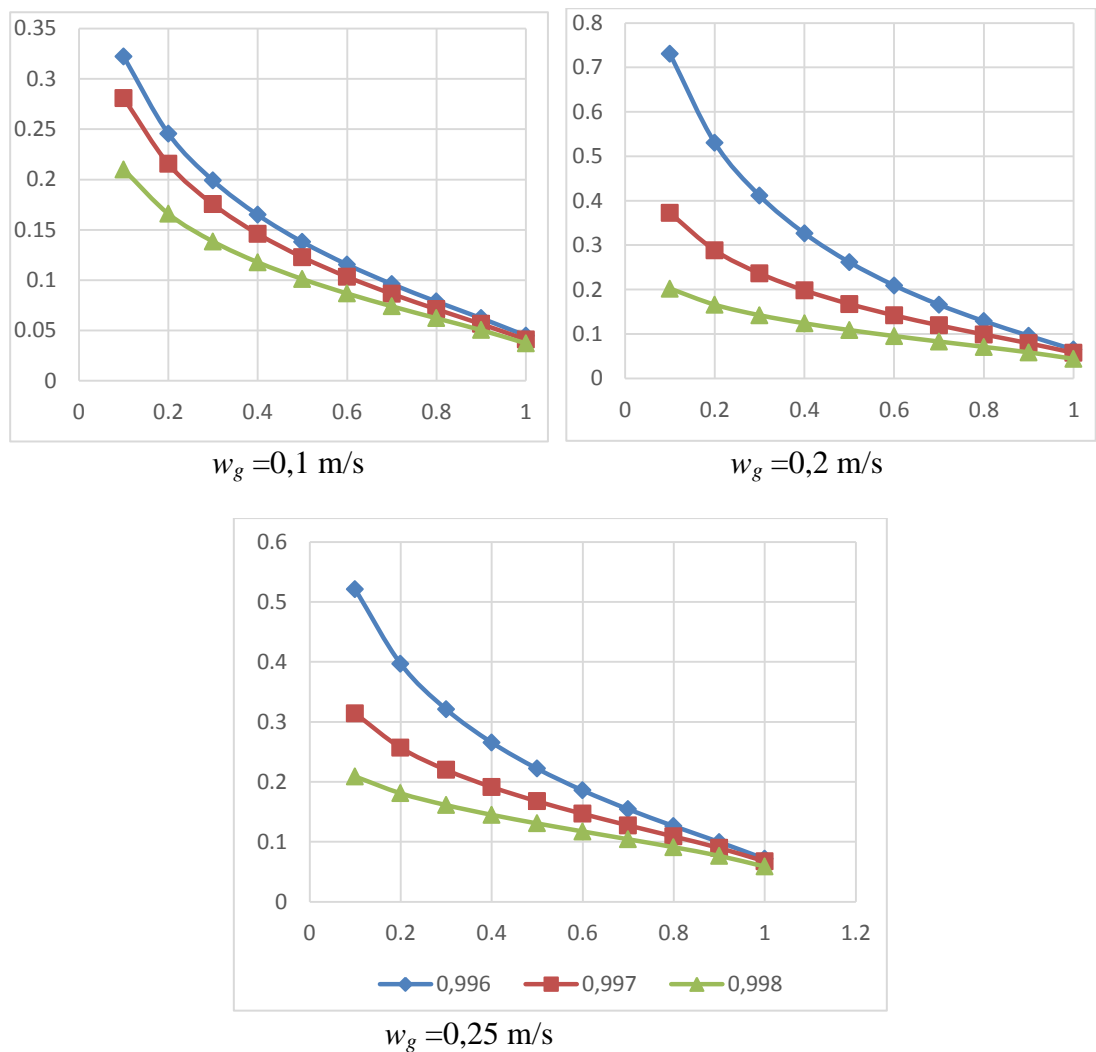
4. Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$** .



6.6 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) pasrovio, $\gamma = 60^\circ$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis apskaičiuotas (5.7) lygtimi (5.5 pav.).

5. Tegul turime **priešsrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$** .



6.7 pav. Šilumos laidžio koeficiento ($\lambda_{f,i}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L) priešsrovis, $\gamma = 60^\circ$

Apskaičiuojant $\lambda_{f,i}$, šilumos atidavimo koeficientas α_i paimtas iš eksperimentinių duomenų (6.1 pav.); nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storis apskaičiuotas (5.4) lygtimi (5.2 pav.).

Pateikta grafinė medžiaga (6.2 – 6.7 pav.) rodo, kad šilumos laidžio koeficientas $\lambda_{f,i}$ mažėja išilgai eksperimentinio ruožo putų tekėjimo kryptimi, nes didėja putų srauto dujingumas. Augant srauto greičiui šilumos laidžio koeficientas pradžioje didėja; toliau didinant greitį, ima mažėti. Didėjant plokščio paviršiaus posvyrio kampui šilumos laidis didėja.

6.3. Putų pasluoksnio dujingumas

Nustatysime putų srauto sluoksnio, besiribojančio su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu (pasluoksnio), dujingumo pasiskirstymą išilgai pasvirusio plokščio paviršiaus tuo atveju, kai yra žinomas paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas α_b (nustatytas

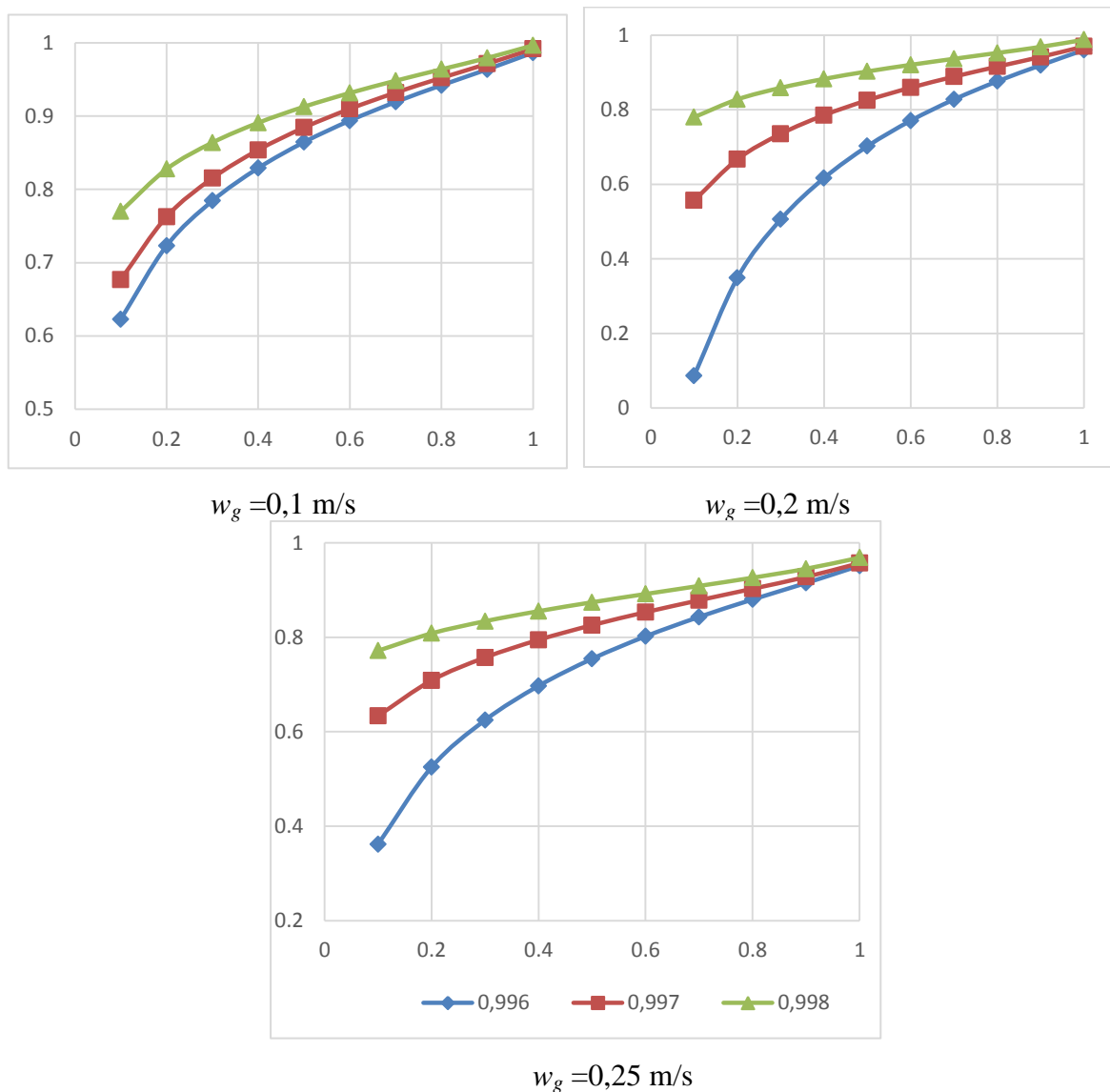
eksperimentiškai [13,14]), esant 45^0 kanalo posvyrio kampui. Pasluoksnių parametrai (ypač šilumos laidis) turi didelę reikšmę perduodant šilumą nuo pasvirusio plokščio paviršiaus putų srautui per drenažinio tirpalo sluoksnį.

Iš (6.10) lygties gautą šilumos laidžio koeficiento išraišką, įstatome į (6.9) lygtį ir išsireiškiame putų srauto, besiribojančio su tirpalu (pasluoksnių), dujingumą:

$$\beta_{i,\delta} = \left(\lambda_l - \lambda_{f,i} \right) / \left(\lambda_l - \lambda_g \right). \quad (6.11)$$

Pagal (6.11) lygtį surastas dujingumo $\beta_{i,\delta}$ kitimo pobūdis grafiškai pavaizduotas (6.8 – 6.13) pav.

Tegul turime **pasrovi** tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas** $\gamma = 45^0$.

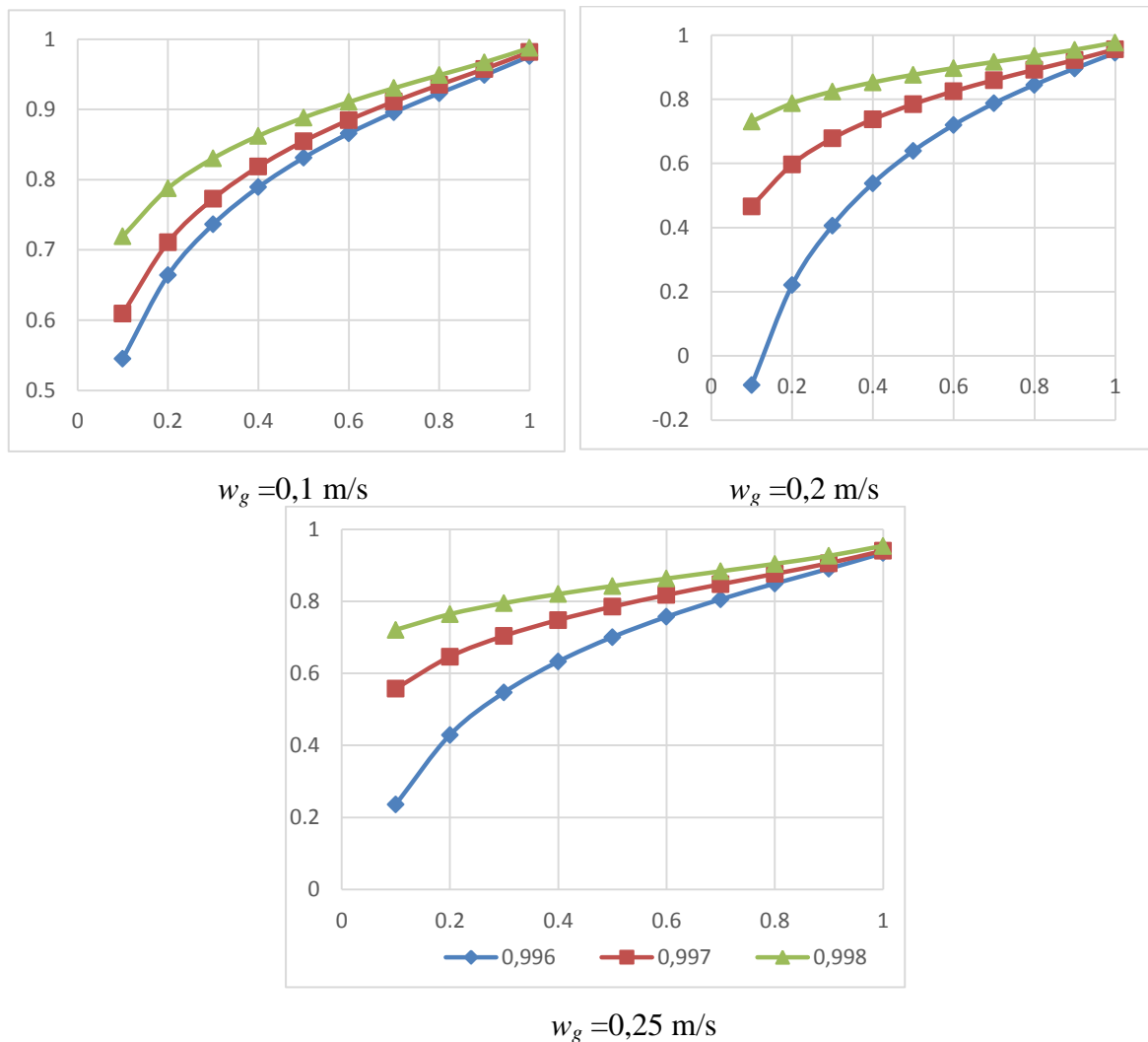


6.8 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo ($\beta_{i,\delta}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), pasrovis, $\gamma = 45^0$

Matome, kad su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu besiribojančių putų dujingumas didėja putų srauto tekėjimo kryptimi.

Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų (pasluoksniu) dujingumą tuo atveju, kai turime pasrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$.

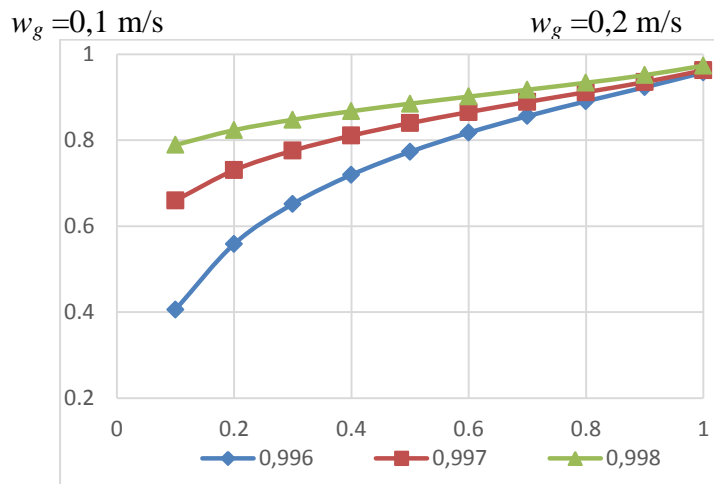
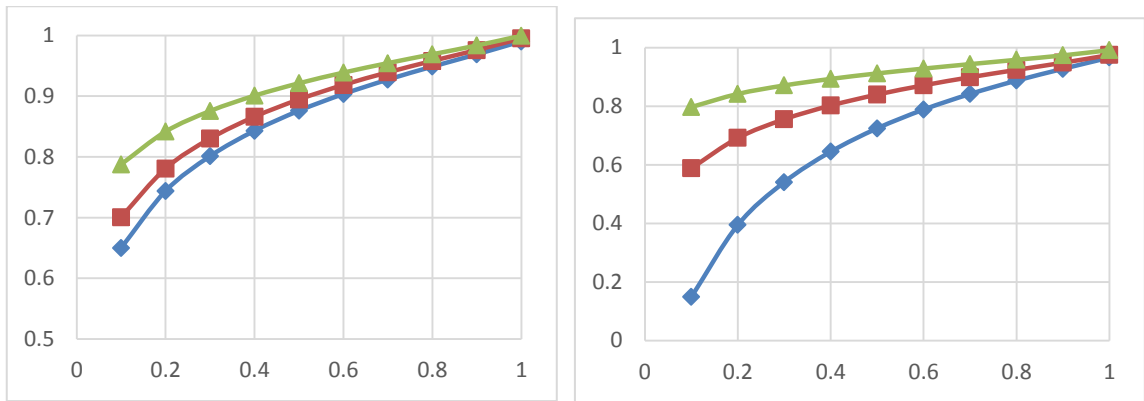
1. Tegul turime **priešrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$** .



6.9 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo ($\beta_{i,\delta}$) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), priešrovis, $\gamma = 45^\circ$

Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime priešrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$.

2. Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 30^\circ$** .

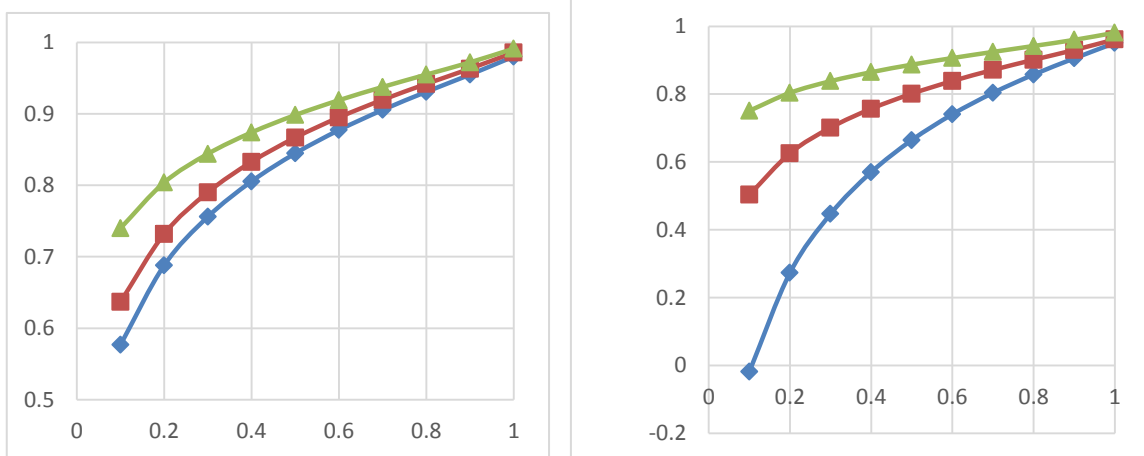


$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

6.10 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo (β_i, δ) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), pasrovis, $\gamma = 30^\circ$

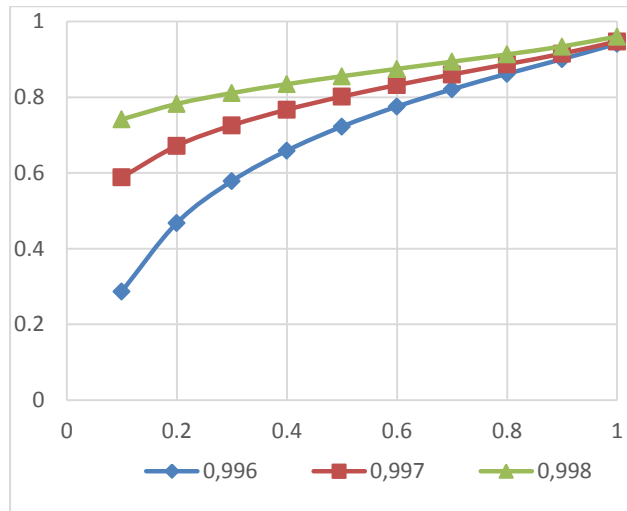
Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime pasrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25 \text{ m/s}$; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 30^\circ$.

3. Tegul turime **priešrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 30^\circ$** .



$w_g = 0,1 \text{ m/s}$

$w_g = 0,2 \text{ m/s}$

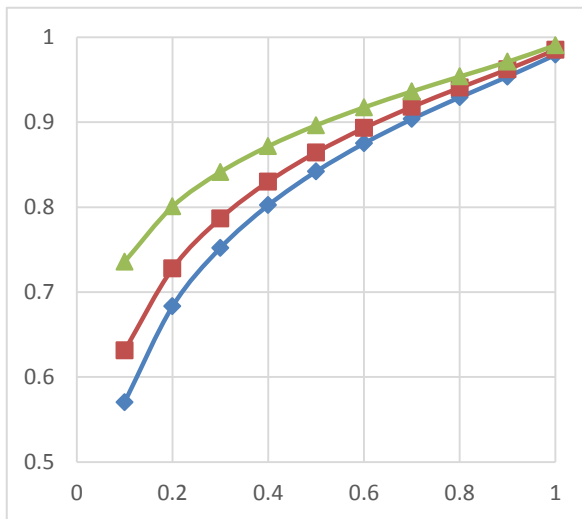


$w_g = 0,25 \text{ m/s}$

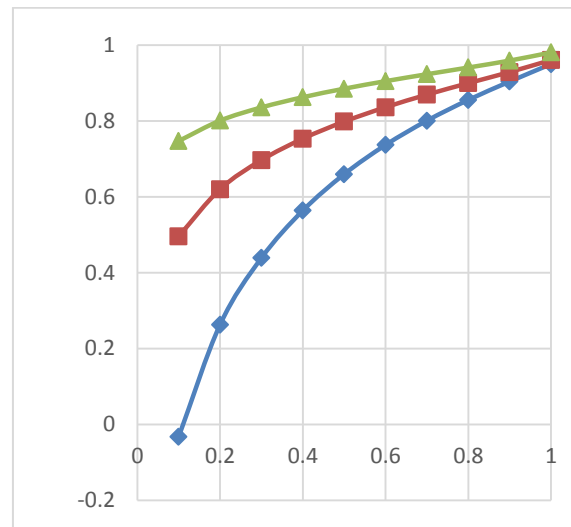
6.11 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusiu tirpalo sluoksniu, dujingumo (β_i, δ) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), priešrovis, $\gamma = 30^\circ$

Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime priešrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25 \text{ m/s}$; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 30^\circ$.

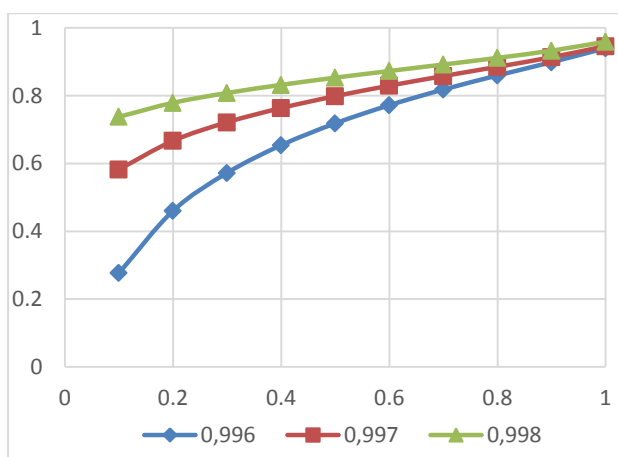
4. Tegul turime **pasrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$** .



$w_g = 0,1 \text{ m/s}$



$w_g = 0,2 \text{ m/s}$

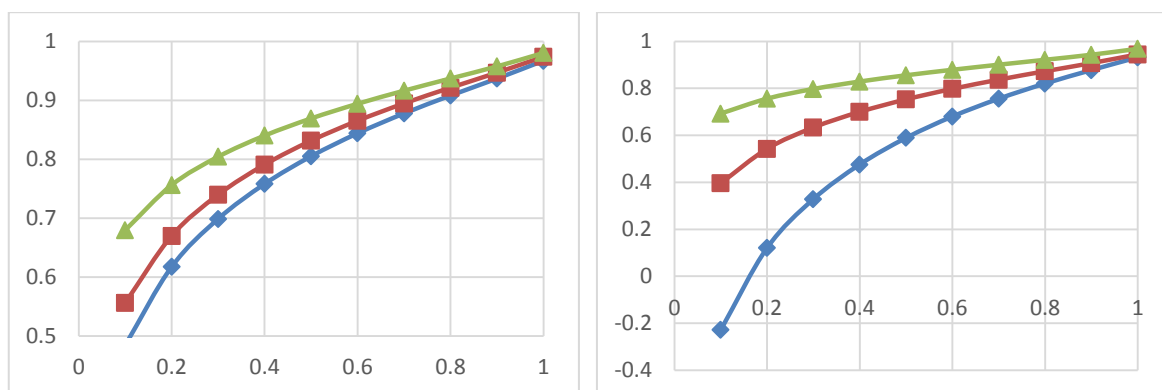


$w_g = 0,25$ m/s

6.12 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo (β_i, δ) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), pasrovis, $\gamma = 60^\circ$

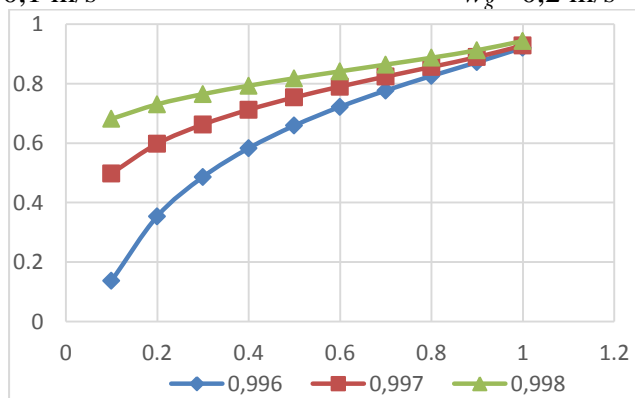
Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime pasrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$.

5. Tegul turime **priešsrovį** tekėjimą; kanalo (paviršiaus) **posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$** .



$w_g = 0,1$ m/s

$w_g = 0,2$ m/s



$w_g = 0,25$ m/s

6.13 pav. Putų, besiribojančių su nusidrenavusio tirpalo sluoksniu, dujingumo (β_i, δ) kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), priešsrovis, $\gamma = 60^\circ$

Šios kreivės gali būti panaudotos skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime priešrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 60^\circ$.

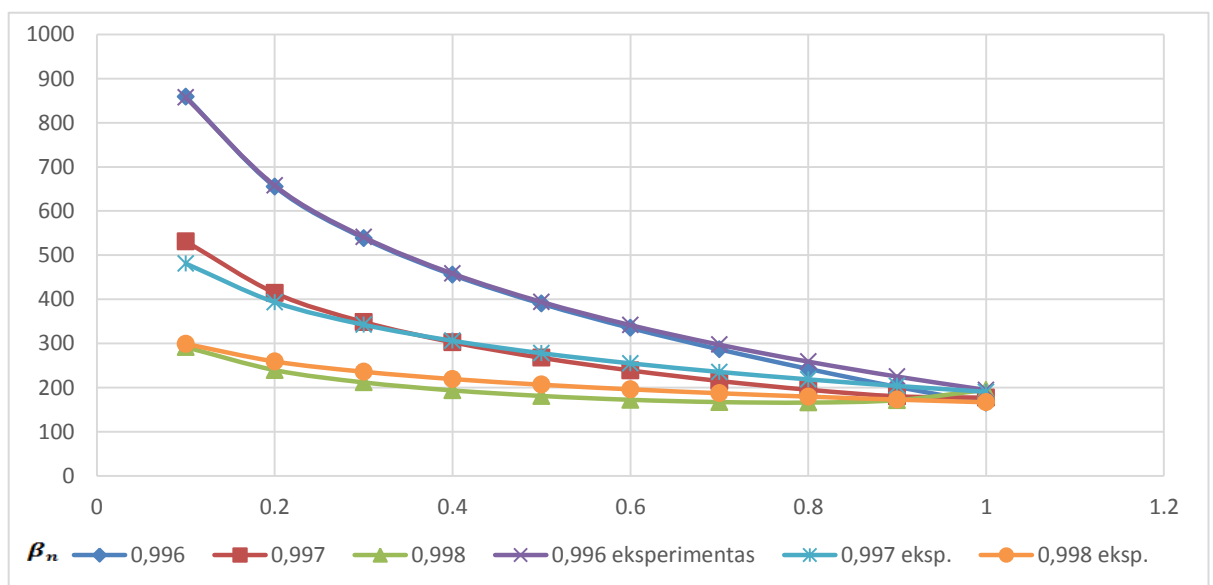
6.4. Šilumos atidavimo koeficiento palyginimas

Šiuo metu turimi eksperimentiniai duomenys yra gauti, kaip minėta, tikrai tiriant 45° kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo procesą putų srautui pasrovio tekėjimo atveju [14]. Todėl tikslingu ir realiu laikome tikrai šio atvejo teorinio skaičiavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimą. Vėliau, papildžius eksperimentinių tyrimų rezultatus kitais atvejais gautais duomenimis (30° kampu pasvirusio paviršiaus pasrovio ir priešrovio tekėjimo; 45° kampu pasvirusio paviršiaus pasrovio tekėjimo ir 60° kampu pasvirusio paviršiaus pasrovio ir priešrovio tekėjimo), galima būtų visiems tiems atvejams palyginti realius teorinio skaičiavimo ir eksperimentiškai gautus rezultatus.

Putų srauto sluoksnio, besiribojančio su nusidrenavusiu tirpalo sluoksniu (pasluoksnio), dujingumo pasiskirstymas išilgai pasvirusio plokščio paviršiaus tuo atveju, kai kanalo posvyrio kampas yra 45° , parodytas 6.9 pav. Šiame paveiksle pavaizduotos kreivės gali būti aprašomos lygtimi:

$$\beta_{i,\delta} = 4 \cdot 10^6 Re_g^{-0.45} \left(\frac{1-\beta_n}{\beta_n}\right)^{2.21} \cdot \ln\left(\frac{x_i}{L}\right) + 0.533 \cdot Re_g^{6.44 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{1-\beta_n}{\beta_n}\right)^{-0.007}, \quad (6.12)$$

kur: $Re_g = \frac{w_g \cdot L}{\nu_g}$; w_g – putų srauto greitis, m/s; L – plokščio paviršiaus ilgis, m; ν_g – kinematinės klamos koeficientas, m^2/s .



6.14 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai plokščio paviršiaus (x/L), (priešrovis, $\bar{w}_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$)

(6.12) lygtis gali būti naudojama skaičiuojant su nusidrenavusiu tirpalu besiribojančių putų dujingumą tuo atveju, kai turime priešrovį tekėjimą; vidutinis oro greitis yra: $w_g = 0,1; 0,2; 0,25$ m/s; putų dujingumas β_n kinta nuo 0,996 iki 0,998, kanalo (paviršiaus) posvyrio kampas $\gamma = 45^\circ$.

Grafinis eksperimentinių duomenų [14] palyginimas su rezultatais, gautais pagal (6.12) lygtį, pavaizduotas 6.14 pav.

Šilumos atidavimo koeficientas mažėja putų srauto tekėjimo kryptimi (didėja putų dujingumas, mažėja drėgnumas). Didėjant putų srauto greičiui šilumos atidavimo koeficientas pradžioje didėja, o vėliau ima mažėti (keičiasi drenažinio tirpalo sluoksnio tekėjimo kryptis); augant paviršiaus posvyrio kampui – mažėja (auga drenažinio tirpalo sluoksnio storis).

6.14 pav. pateikta grafinė medžiaga rodo palyginti gerą eksperimentinių ir skaičiavimo duomenų sutapimą, kas leidžia dujingumą, gautą iš 6.12 lygties, taikyti skaičiuojant plokščio pasvirusio paviršiaus šilumos atidavimo putų srautui procesą priešrovio tekėjimo, 45° posvyrio kampo atveju.

IŠVADOS

Baigiamajame darbe pateikiami preliminaraus tyrimo, susijusio su pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimu (aušinimu) jį išilgai aptekančiam statiškai stabilių putų srautui, rezultatai. Tyrimo metu:

- Nustatyta, kad putų dujingumas auga išilgai putų tekėjimo krypties.
- Gauta, kad nusidrenavusio tirpalo sluoksnis plonėja putų tekėjimo kryptimi.
- Nustatyta, kad aušinimo intensyvumas priklauso ne tik nuo nusidrenavusio tirpalo sluoksnio storio, bet ir nuo su tuo sluoksniu besiribojančių putų dujingumo.
- Parodyta, kad, šiluma skersai nusidrenavusio tirpalo sluoksnio pernešama tik laidumu.
- Pasinaudojus eksperimentiniais 45^0 kampu pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimo putų srautu duomenimis, gauta lygtis, leidžianti apskaičiuoti su ant paviršiaus susidariusio nusidrenavusio tirpalo sluoksniu besiribojančių putų dujingumą.
- Pritaikius gautą lygtį 30^0 ir 60^0 kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo skaičiavimui, gautos šilumos atidavimo intensyvumo kitimo kreivės išilgai aušinamo paviršiaus.
- Nustatyta, kad šilumos atidavimo koeficientas didėja:
 - a) augant putų srauto greičiui (iki tam tikro greičio);
 - b) mažėjant putų dujingumui;
 - c) didėjant paviršiaus posvyrio kampui.
- Toliau tęsiant eksperimentinius tyrimus būtina nustatyti 30^0 ir 60^0 kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo intensyvumą putų srautui pasrovio ir priešsrovio tekėjimo atvejais bei 45^0 kampu pasvirusio plokščio paviršiaus šilumos atidavimo intensyvumą putų srautui pasrovio tekėjimo atveju.

LITERATŪRA

1. Attia, J.A., McKinley, I.M., Moreno – Magana, D., Pilon, L. Convective heat transfer in Foams Under Laminar flow in pipes and Tube Bundles / *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, issue 25 - 26, 1212, p. 7823 – 7831.
2. Gyls, J., Jakubčionis, M., Šinkūnas, S., Ždankus T. Average Heat Transfer of staggered tube bundle in cross foam flow // *3er Congreso International de Ingenieria Electromecanica y de Sistemas / Mexico*, 2002, p. 221 – 227.
3. Jonynas R. ir kt. Plokščio paviršiaus šilumos mainų dvifaziame putų sraute eksperimentinis tyrimas// *Šilumos energetika ir technologijos – 2011 / Kaunas: Technologija*, 2011, p. 128 – 133.
4. Gyls J. Hidrodinamika, šilumos ir masės mainai statiškai stabilių putų sistemose. Monografija. Kaunas, 1998. 389p. ISBN 9986-13-636-9.
5. Stevenson, Paul (Editor). *Foam engineering: fundamentals and applications*. (e-book) Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2012. ISBN: 978-1-1199-6109-3
6. Ekserova, Dotchi; Krugliakov, Pyotr. *Foam and Foam Films, Volume 5: Theory, Experiment, Application (Studies in Interface Science)*. Amsterdam; New York: Elsevier, 1998. *Studies in interface science, Vol. 5*. ISBN: 0-44-81922-3
7. S. A. Koehler, H.A. Stone, M. P. Brenner, and J. Eggers. Dynamics of foam drainage. *PHYSICAL REVIEW*, Vol. 58, Number 2. 1998.
8. S.J. Neethling, H.T. Lee, P. Grassia. The growth, drainage and breakdown of foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 263, Issues 1–3. 2005, Pages 184–196.
9. Gyls, Jonas; Šinkūnas, Stasys; Ždankus, Tadas. Experimental study of staggered tube bundle heat transfer in foam flow // *ISMF'05 : 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Transfer and Energy Conversion [elektroninis išteklius]*, Xi'an, China, 3-6 July 2005. Xi'an : Xi'an Jiaotong University Press, 2005. ISBN 7900661484/Z. p. [1-6].
10. Gyls, Jonas; Ždankus, Tadas; Šinkūnas, Stasys; Giedraitis, Vidmantas. Koridorinio vamzdžių pluošto šilumos mainai kylančiame statiškai stabilių putų sraute // *Energetika = Power engineering = Энергетика / Lietuvos mokslų akademija*. Vilnius : Lietuvos mokslų akademijos leidykla. ISSN 0235-7208. 2005, nr. 4, p. 28-33. Prieiga per internetą:
11. Gyls, Jonas; Ždankus, Tadas; Ingilertas, Alpas; Šinkūnas, Stasys; Babilas, Martynas. Study in-line tube bundle heat transfer to downward foam flow // *Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment: proceedings of the 5th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'07)*, August 25-27,

2007, Vouliagmeni, Athens, Greece. Athens : WSEAS Press, 2007. ISBN 9789606766008. p. 166-170.

12. Gylys, Jonas; Ždankus, Tadas; Ingilertas, Alpas; Gylys, Martynas; Babilas, Martynas. Heat transfer between the non-standard tube bundle and statically stable foam flow // *Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas*. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1207. 2012, T. 18, nr. 4, p. 409-414.

13. Gylys, J., Ždankus, T., Gylys M. Investigation of Heat Transfer from inclined flat surface to aqueous foam// *International Journal of Heat and Mass Transfer*/ 2013, vol. 59, p. 272 – 278.

14. Gylys, Martynas. Pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimas dvifazių putų srautu // *Energetika = Power engineering = Энергетика / Lietuvos mokslų akademija*. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla. ISSN 0235-7208. 2012, T. 58. Nr. 4. P. 219-230.

15. Gimbutis G. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. – Vilnius: Mokslas, 1988. – 233p.

PRIEDAS 1

Vidutinio dujingumo kitimas išilgai eksperimentinio ruožo

i	β	n	kai $\beta=0,0996$, tai $\beta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\beta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\beta_i=$
1	0.996	10	0.989740191	0.992293034	0.994853924
2	0.997		0.990756688	0.993058381	0.995366147
3	0.998		0.991673323	0.993748203	0.995827599
4			0.992499745	0.994369863	0.996243272
5			0.993244704	0.994930022	0.996617674
6			0.993916124	0.995434705	0.996954876
7			0.994521178	0.995889358	0.997258554
8			0.995066357	0.996298901	0.997532022
9			0.99555753	0.996667777	0.997778271
10			0.996	0.997	0.998

PRIEDAS 2

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000509797	0,000463071	0,000404449
0.2		0,000482271	0,000438068	0,000382612
0.3		0,000454482	0,000412826	0,000360565
0.4		0,000426181	0,000387118	0,000338112
0.5		0,000397026	0,000360636	0,000314982
0.6		0,000366523	0,000332929	0,000290782
0.7		0,000333896	0,000303293	0,000264898
0.8		0,000297798	0,000270503	0,000236259
0.9		0,000255464	0,00023205	0,000202674
1		0,00019919	0,000180933	0,000158028
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,00060364	0,000548313	0,0004789
0.2		0,000571047	0,000518707	0,000453043
0.3		0,000538143	0,000488819	0,000426938
0.4		0,000504632	0,000458379	0,000400351
0.5		0,00047011	0,000427022	0,000372964
0.6		0,000433992	0,000394214	0,00034431
0.7		0,00039536	0,000359123	0,00031366
0.8		0,000352616	0,000320297	0,000279749
0.9		0,00030249	0,000274765	0,000239982
1		0,000235857	0,000214239	0,000187118

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00478	0,000642156	0,000583298	0,000509457
0.2		0,000607483	0,000551804	0,000481949
0.3		0,000572479	0,000520008	0,000454178
0.4		0,00053683	0,000487626	0,000425896
0.5		0,000500106	0,000454268	0,000396761
0.6		0,000461683	0,000419367	0,000366278
0.7		0,000420586	0,000382037	0,000333673
0.8		0,000375115	0,000340733	0,000297599
0.9		0,000321791	0,000292297	0,000255294
1		0,000250906	0,000227909	0,000199057
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000760363	0,000690671	0,000603237
0.2		0,000719308	0,000653379	0,000570666
0.3		0,000677861	0,000615731	0,000537783
0.4		0,000635649	0,000577388	0,000504295
0.5		0,000592165	0,000537889	0,000469796
0.6		0,00054667	0,000496564	0,000433703
0.7		0,000498007	0,000452362	0,000395096
0.8		0,000444166	0,000403455	0,000352381
0.9		0,000381026	0,000346102	0,000302288
1		0,000297093	0,000269862	0,0002357

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00598	0,000691882	0,000628467	0,000548907
0.2		0,000654525	0,000594534	0,00051927
0.3		0,00061681	0,000560276	0,000489349
0.4		0,0005784	0,000525386	0,000458876
0.5		0,000538833	0,000489445	0,000427485
0.6		0,000497435	0,000451842	0,000394642
0.7		0,000453155	0,000411621	0,000359512
0.8		0,000404163	0,000367119	0,000320644
0.9		0,000346709	0,000314931	0,000275063
1		0,000270336	0,000245558	0,000214472
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000819244	0,000744155	0,00064995
0.2		0,00077501	0,000703975	0,000614857

0.3		0,000730352	0,000663411	0,000579428
0.4		0,000684872	0,000622099	0,000543346
0.5		0,000638021	0,000579542	0,000506176
0.6		0,000589002	0,000535017	0,000467287
0.7		0,000536572	0,000487392	0,000425691
0.8		0,000478561	0,000434698	0,000379668
0.9		0,000410531	0,000372904	0,000325697
1		0,000320099	0,00029076	0,000253952

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešsrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000476825	0,000433121	0,000378291
0.2		0,000451079	0,000409735	0,000357866
0.3		0,000425088	0,000386126	0,000337245
0.4		0,000398617	0,000362081	0,000316244
0.5		0,000371348	0,000337311	0,00029461
0.6		0,000342818	0,000311396	0,000271976
0.7		0,000312301	0,000283677	0,000247765
0.8		0,000278537	0,000253008	0,000220979
0.9		0,000238942	0,000217041	0,000189565
1		0,000186307	0,000169231	0,000147808
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000565596	0,000513755	0,000448717
0.2		0,000535057	0,000486016	0,000424489
0.3		0,000504226	0,000458011	0,00040003
0.4		0,000472827	0,00042949	0,000375119
0.5		0,000440482	0,000400109	0,000349458
0.6		0,00040664	0,000369369	0,000322609
0.7		0,000370442	0,000336489	0,000293892
0.8		0,000330393	0,00030011	0,000262118
0.9		0,000283426	0,000257448	0,000224857
1		0,000220992	0,000200737	0,000175325

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešsrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00478	0,000600623	0,000545572	0,000476507
0.2		0,000568193	0,000516115	0,000450778
0.3		0,000535453	0,000486375	0,000424804
0.4		0,000502109	0,000456088	0,00039835
0.5		0,000467761	0,000424888	0,0003711
0.6		0,000431823	0,000392244	0,000342589

0.7		0,000393384	0,000357328	0,000312093
0.8		0,000350854	0,000318696	0,000278351
0.9		0,000300978	0,000273392	0,000238782
1		0,000234678	0,000213169	0,000186183
i	G _g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000712441	0,000647142	0,000565218
0.2		0,000673974	0,0006122	0,0005347
0.3		0,000635138	0,000576924	0,00050389
0.4		0,000595587	0,000540998	0,000472511
0.5		0,000554844	0,000503989	0,000440187
0.6		0,000512216	0,000465268	0,000406368
0.7		0,00046662	0,000423852	0,000370195
0.8		0,000416172	0,000378028	0,000330172
0.9		0,000357011	0,000324289	0,000283236
1		0,000278368	0,000252854	0,000220845

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g= 0,25$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G _g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00598	0,000647134	0,00058782	0,000513406
0.2		0,000612193	0,000556081	0,000485685
0.3		0,000576917	0,000524039	0,000457699
0.4		0,000540991	0,000491406	0,000429198
0.5		0,000503983	0,00045779	0,000399837
0.6		0,000465262	0,000422618	0,000369118
0.7		0,000423847	0,000384998	0,00033626
0.8		0,000378023	0,000343375	0,000299906
0.9		0,000324285	0,000294562	0,000257273
1		0,000252851	0,000229676	0,0002006
i	G _g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000767611	0,000697255	0,000608987
0.2		0,000726165	0,000659607	0,000576105
0.3		0,000684322	0,0006216	0,000542909
0.4		0,000641708	0,000582891	0,000509101
0.5		0,000597809	0,000543016	0,000474274
0.6		0,00055188	0,000501297	0,000437836
0.7		0,000502754	0,000456674	0,000398862
0.8		0,0004484	0,000407301	0,00035574
0.9		0,000384657	0,000349401	0,000305169
1		0,000299925	0,000272435	0,000237946

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g= 0,1$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000573205	0,000520667	0,000454754
0.2		0,000542255	0,000492554	0,0004302
0.3		0,00051101	0,000464172	0,000405411
0.4		0,000479188	0,000435268	0,000380166
0.5		0,000446407	0,000405491	0,000354159
0.6		0,00041211	0,000374338	0,000326949
0.7		0,000375426	0,000341016	0,000297846
0.8		0,000334837	0,000304147	0,000265644
0.9		0,000287239	0,000260911	0,000227882
1		0,000223965	0,000203437	0,000177684
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000677193	0,000615124	0,000537254
0.2		0,000640629	0,000581911	0,000508245
0.3		0,000603715	0,000548381	0,000478959
0.4		0,00056612	0,000514232	0,000449134
0.5		0,000527393	0,000479054	0,000418409
0.6		0,000486874	0,000442249	0,000386263
0.7		0,000443534	0,000402881	0,000351879
0.8		0,000395582	0,000359325	0,000313837
0.9		0,000339348	0,000308245	0,000269223
1		0,000264596	0,000240344	0,000209918

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g=0,2$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00478	0,000722026	0,000655848	0,000572822
0.2		0,000683041	0,000620436	0,000541893
0.3		0,000643683	0,000584685	0,000510668
0.4		0,0006036	0,000548276	0,000478868
0.5		0,000562308	0,000510769	0,000446109
0.6		0,000519107	0,000471527	0,000411835
0.7		0,000472898	0,000429554	0,000375175
0.8		0,000421771	0,000383113	0,000334614
0.9		0,000361814	0,000328652	0,000287047
1		0,000282113	0,000256256	0,000223816
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000853013	0,000774829	0,000676741
0.2		0,000806955	0,000732993	0,000640201
0.3		0,000760457	0,000690757	0,000603312
0.4		0,000713102	0,000647742	0,000565742
0.5		0,00066432	0,000603431	0,000527041

0.6		0,000613281	0,00055707	0,000486549
0.7		0,000558689	0,000507482	0,000443238
0.8		0,000498287	0,000452616	0,000395318
0.9		0,000427453	0,000388274	0,000339122
1		0,000333293	0,000302745	0,000264419

Nusidrenavusio tirpalo storio kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai greitis $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00598	0,000777937	0,000706635	0,00061718
0.2		0,000735934	0,000668481	0,000583856
0.3		0,000693528	0,000629962	0,000550213
0.4		0,000650341	0,000590733	0,00051595
0.5		0,000605852	0,000550322	0,000480655
0.6		0,000559305	0,000508041	0,000443727
0.7		0,000509518	0,000462817	0,000404228
0.8		0,000454432	0,00041278	0,000360525
0.9		0,000389832	0,000354102	0,000309275
1		0,000303959	0,0002761	0,000241147
i	G_g	kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$
0.1	0.00239	0,000919068	0,000834829	0,000729146
0.2		0,000869444	0,000789754	0,000689776
0.3		0,000819345	0,000744247	0,00065003
0.4		0,000768323	0,000697901	0,000609552
0.5		0,000715763	0,000650159	0,000567853
0.6		0,000660772	0,000600208	0,000524226
0.7		0,000601952	0,00054678	0,000477561
0.8		0,000536873	0,000487665	0,00042593
0.9		0,000460554	0,000418341	0,000365382
1		0,000359102	0,000326189	0,000284895

PRIEDAS 3

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,246683532	0,20676103	0,16222165
0.026	0.6	0,183282104	0,154975136	0,123275341
0.026	0.6	0,146194645	0,124682329	0,100493211
0.026	0.6	0,119880675	0,103189241	0,084329032

0.026	0.6	0,099469974	0,086517907	0,071791121
0.026	0.6	0,082793217	0,072896435	0,061546902
0.026	0.6	0,068693219	0,061379645	0,052885538
0.026	0.6	0,056479246	0,051403347	0,045382723
0.026	0.6	0,045705758	0,042603629	0,038764771
0.026	0.6	0,036068545	0,034732013	0,032844812
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,28712377	0,25033859	0,18713388
0.026	0.6	0,218976816	0,192095008	0,147932232
0.026	0.6	0,177338704	0,15637027	0,123367946
0.026	0.6	0,146987444	0,130228514	0,105013595
0.026	0.6	0,122980195	0,109465982	0,090118136
0.026	0.6	0,103008015	0,092114765	0,077377748
0.026	0.6	0,085732932	0,077028383	0,066009664
0.026	0.6	0,070201699	0,063380031	0,055411786
0.026	0.6	0,055483639	0,05034434	0,044915629
0.026	0.6	0,039956562	0,036446407	0,033194764

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,620451133	0,344319186	0,161500154
0.026	0.6	0,447497737	0,253857805	0,125178894
0.026	0.6	0,346326486	0,200941289	0,103932319
0.026	0.6	0,274544341	0,163396424	0,088857634
0.026	0.6	0,218865784	0,134274364	0,0771648
0.026	0.6	0,17337309	0,110479908	0,067611059
0.026	0.6	0,134909566	0,090361983	0,059533487
0.026	0.6	0,101590945	0,072935043	0,052536375
0.026	0.6	0,072201839	0,057563392	0,046364484
0.026	0.6	0,045912388	0,043812983	0,040843541
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,651778855	0,3322034	0,180333821
0.026	0.6	0,473093604	0,257111997	0,147872242
0.026	0.6	0,366731752	0,210790079	0,126824518
0.026	0.6	0,291266221	0,17670147	0,110592289
0.026	0.6	0,233311714	0,149466138	0,097004176
0.026	0.6	0,186701757	0,126557425	0,085008716
0.026	0.6	0,147988373	0,106491582	0,073942598

0.026	0.6	0,11491939	0,088179515	0,063245163
0.026	0.6	0,085667056	0,070499833	0,052209086
0.026	0.6	0,057787512	0,051381796	0,039281706

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, pasrovis ir priešsrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,246683532	0,20676103	0,16222165
0.026	0.6	0,183282104	0,154975136	0,123275341
0.026	0.6	0,146194645	0,124682329	0,100493211
0.026	0.6	0,119880675	0,103189241	0,084329032
0.026	0.6	0,099469974	0,086517907	0,071791121
0.026	0.6	0,082793217	0,072896435	0,061546902
0.026	0.6	0,068693219	0,061379645	0,052885538
0.026	0.6	0,056479246	0,051403347	0,045382723
0.026	0.6	0,045705758	0,042603629	0,038764771
0.026	0.6	0,036068545	0,034732013	0,032844812
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,464497166	0,279873968	0,186086942
0.026	0.6	0,353627022	0,228838999	0,16111009
0.026	0.6	0,285958168	0,195849914	0,143596821
0.026	0.6	0,236686097	0,170478464	0,12917923
0.026	0.6	0,197758105	0,149295575	0,116385566
0.026	0.6	0,165414782	0,130644132	0,104459388
0.026	0.6	0,137480917	0,113483472	0,092862107
0.026	0.6	0,112412084	0,096941048	0,081046526
0.026	0.6	0,088710095	0,079926898	0,06818157
0.026	0.6	0,06378289	0,060065157	0,052225148

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešsrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,22680365	0,197746449	0,14782004
0.026	0.6	0,172973283	0,151738914	0,116854032
0.026	0.6	0,140082674	0,123519373	0,09745031
0.026	0.6	0,116107729	0,102869582	0,082951915
0.026	0.6	0,09714402	0,086468927	0,071185754
0.026	0.6	0,081367676	0,072762923	0,061121918

0.026	0.6	0,067721812	0,060845949	0,052142088
0.026	0.6	0,055453443	0,050064898	0,043770655
0.026	0.6	0,043827413	0,039767798	0,035479572
0.026	0.6	0,031562327	0,028789599	0,026221074
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,269027734	0,234560948	0,175339728
0.026	0.6	0,205175756	0,17998818	0,138608772
0.026	0.6	0,166161895	0,146515001	0,115592655
0.026	0.6	0,137723529	0,122020834	0,098395091
0.026	0.6	0,115229343	0,102566866	0,084438421
0.026	0.6	0,096515914	0,086309212	0,072500999
0.026	0.6	0,080329596	0,072173653	0,061849391
0.026	0.6	0,065777222	0,059385491	0,051919447
0.026	0.6	0,051986771	0,047171377	0,042084812
0.026	0.6	0,037438292	0,034149365	0,031102657

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,514850524	0,26241277	0,142448565
0.026	0.6	0,373704192	0,203096871	0,116806645
0.026	0.6	0,289687266	0,166506449	0,100180711
0.026	0.6	0,230075839	0,139579312	0,087358615
0.026	0.6	0,184296648	0,118065689	0,076625147
0.026	0.6	0,147478699	0,099969731	0,067149742
0.026	0.6	0,116898378	0,084119401	0,058408439
0.026	0.6	0,090776661	0,069654407	0,049958364
0.026	0.6	0,067669775	0,055688944	0,041240791
0.026	0.6	0,045647279	0,040587301	0,031029247
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,610700356	0,311266211	0,168968244
0.026	0.6	0,44327678	0,240907459	0,138552563
0.026	0.6	0,343618406	0,19750499	0,118831376
0.026	0.6	0,272909106	0,165564823	0,103622187
0.026	0.6	0,218607194	0,140046003	0,090890467
0.026	0.6	0,17493484	0,118581117	0,079651024
0.026	0.6	0,138661374	0,099779928	0,069282351
0.026	0.6	0,107676572	0,082621982	0,059259123
0.026	0.6	0,080267872	0,066056567	0,048918597

0.026	0.6	0,054145442	0,048143448	0,036805968
-------	-----	-------------	-------------	-------------

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 30 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,366913728	0,221076916	0,146993046
0.026	0.6	0,279335631	0,180763579	0,127263432
0.026	0.6	0,225882922	0,154704974	0,113429422
0.026	0.6	0,186962127	0,13466366	0,102040737
0.026	0.6	0,156212284	0,117930959	0,091934817
0.026	0.6	0,130663778	0,103197886	0,082514139
0.026	0.6	0,108598371	0,089642406	0,073353261
0.026	0.6	0,0887961	0,076575282	0,064019945
0.026	0.6	0,07007352	0,063135533	0,053857711
0.026	0.6	0,050383123	0,047446426	0,041253479
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,435222135	0,262234852	0,174358773
0.026	0.6	0,331339605	0,214416373	0,150956092
0.026	0.6	0,267935594	0,183506432	0,134546601
0.026	0.6	0,221768906	0,159734023	0,121037682
0.026	0.6	0,185294359	0,13988619	0,109050341
0.026	0.6	0,154989481	0,122410259	0,097875813
0.026	0.6	0,128816153	0,106331152	0,087009453
0.026	0.6	0,105327289	0,090831318	0,075938552
0.026	0.6	0,083119122	0,074889488	0,063884412
0.026	0.6	0,05976296	0,056279538	0,048933648

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,272646941	0,237716476	0,177698559
0.026	0.6	0,207935968	0,182409546	0,140473464
0.026	0.6	0,168397257	0,148486055	0,117147713
0.026	0.6	0,139576312	0,12366237	0,099718792
0.026	0.6	0,116779513	0,103946689	0,085574364
0.026	0.6	0,097814334	0,087470323	0,073476348
0.026	0.6	0,081410264	0,073144599	0,062681446
0.026	0.6	0,066662118	0,060184399	0,052617915

0.026	0.6	0,052686145	0,04780597	0,042650975
0.026	0.6	0,037941946	0,034608773	0,031521079
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,322109439	0,280842031	0,209935908
0.026	0.6	0,245658865	0,215501543	0,165957587
0.026	0.6	0,198947202	0,17542379	0,138400175
0.026	0.6	0,164897678	0,146096694	0,117809369
0.026	0.6	0,137965177	0,122804274	0,101098917
0.026	0.6	0,115559412	0,103338833	0,086806129
0.026	0.6	0,096179382	0,086414194	0,074052858
0.026	0.6	0,078755688	0,071102807	0,062163643
0.026	0.6	0,062244251	0,056478734	0,050388542
0.026	0.6	0,044825219	0,040887356	0,037239505

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,2$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,618916055	0,315453649	0,17124136
0.026	0.6	0,449240145	0,244148367	0,140416499
0.026	0.6	0,348241075	0,200162008	0,120430004
0.026	0.6	0,276580529	0,167792152	0,105016207
0.026	0.6	0,221548098	0,14193003	0,092113209
0.026	0.6	0,177288223	0,120176378	0,080722562
0.026	0.6	0,140526774	0,101122258	0,0702144
0.026	0.6	0,109125135	0,083733489	0,060056331
0.026	0.6	0,081347709	0,06694522	0,049576695
0.026	0.6	0,054873856	0,048791117	0,037301116
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,731197287	0,372681966	0,20230727
0.026	0.6	0,530739464	0,288440769	0,165890288
0.026	0.6	0,411417554	0,236474585	0,142277925
0.026	0.6	0,326756643	0,198232321	0,12406782
0.026	0.6	0,261740452	0,167678399	0,108824013
0.026	0.6	0,209451131	0,141978288	0,095366921
0.026	0.6	0,166020569	0,119467447	0,082952411
0.026	0.6	0,128922173	0,098924077	0,070951506
0.026	0.6	0,096105479	0,079090149	0,058570697
0.026	0.6	0,064828848	0,057642603	0,044068133

Putų srauto šilumos laidžio koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 60 laipsniai, pasrovis ir priešsrovis

λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,441077141	0,265762675	0,176704407
0.026	0.6	0,335797088	0,217300898	0,152986892
0.026	0.6	0,271540109	0,185975128	0,136356645
0.026	0.6	0,224752344	0,161882911	0,122665992
0.026	0.6	0,187787108	0,141768067	0,110517386
0.026	0.6	0,157074541	0,124057033	0,099192528
0.026	0.6	0,130549106	0,107761616	0,088179984
0.026	0.6	0,106744248	0,092053264	0,076960147
0.026	0.6	0,084237317	0,07589697	0,064743844
0.026	0.6	0,050383123	0,047446426	0,041253479
λ_{oro}	$\lambda_{skyscio}$	0.996	0.997	0.998
		λf	λf	λf
0.026	0.6	0,52109556	0,313976258	0,208761401
0.026	0.6	0,396716029	0,256722743	0,180741151
0.026	0.6	0,32080181	0,219713979	0,161093913
0.026	0.6	0,265526	0,19125105	0,144919557
0.026	0.6	0,22185468	0,167487053	0,130567001
0.026	0.6	0,185570365	0,146562955	0,117187633
0.026	0.6	0,154232793	0,12731129	0,104177238
0.026	0.6	0,126109355	0,108753193	0,090921944
0.026	0.6	0,099519308	0,089665889	0,076489409
0.026	0.6	0,071554755	0,06738402	0,058588717

PREIDAS 4

Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,1$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, priešsrovis

0,996	0,997	0,998	0,996	0,997	0,998
kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$	λf	λf	λf
0,000642156	0,000583298	0,000509457	0,551533758	0,309841709	0,148515188
0,000607483	0,000551804	0,000481949	0,397994999	0,228719409	0,115476988
0,000572479	0,000520008	0,000454178	0,308180583	0,181265906	0,09615088
0,00053683	0,000487626	0,000425896	0,24445624	0,14759711	0,082438788
0,000500106	0,000454268	0,000396761	0,1950278	0,121481562	0,071802864

0,000461683	0,000419367	0,000366278	0,154641824	0,100143606	0,06311268
0,000420586	0,000382037	0,000333673	0,120495968	0,082102621	0,055765235
0,000375115	0,000340733	0,000297599	0,090917482	0,06647481	0,049400589
0,000321791	0,000292297	0,000255294	0,064827408	0,052690103	0,043786572
0,000250906	0,000227909	0,000199057	0,041489042	0,040359262	0,038764664
0,996	0,997	0,998			
kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$			
0,000642156	0,000583298	0,000509457			
0,000607483	0,000551804	0,000481949			
0,000572479	0,000520008	0,000454178			
0,00053683	0,000487626	0,000425896			
0,000500106	0,000454268	0,000396761			
0,000461683	0,000419367	0,000366278			
0,000420586	0,000382037	0,000333673			
0,000375115	0,000340733	0,000297599			
0,000321791	0,000292297	0,000255294			
0,000250906	0,000227909	0,000199057			

Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g=0,2$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, priešsrovis

0,996	0,997	0,998	0,996	0,997	0,998
kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$	λf	λf	λf
0,000509797	0,000463071	0,000404449	0,762465476	0,432766976	0,213041333
0,000482271	0,000438068	0,000382612	0,55272535	0,321950649	0,167909822
0,000454482	0,000412826	0,000360565	0,430035242	0,257127253	0,141509581
0,000426181	0,000387118	0,000338112	0,342985225	0,211134321	0,122778311
0,000397026	0,000360636	0,000314982	0,275463986	0,175459432	0,10824921
0,000366523	0,000332929	0,000290782	0,220295117	0,146310925	0,09637807
0,000333896	0,000303293	0,000264898	0,173650503	0,121666214	0,086341164
0,000297798	0,000270503	0,000236259	0,1332451	0,100317994	0,0776468
0,000255464	0,00023205	0,000202674	0,097605009	0,081487529	0,069977828
0,996	0,997	0,998			
α_i	α_i	α_i			
1495,625711	934,5586873	526,7441355			
1146,088491	734,9330863	438,8518857			
946,209761	622,8467638	392,4662527			
804,7885191	545,3997363	363,1291512			
693,8185764	486,5276672	343,6678688			

601,0403588	439,4659669	331,4439431
520,0728965	401,1510163	325,9411345
447,4348506	370,8575517	328,651201
382,0689417	351,1644203	345,2734535

Šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai eksperimentinio ruožo, kai $w_g = 0,25$ m/s, posvyrio kampas 45 laipsniai, prieššrovis

0,996	0,997	0,998	0,996	0,997	0,998
kai $\beta=0,0996$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0997$, tai $\delta_i=$	kai $\beta=0,0998$, tai $\delta_i=$	λf	λf	λf
0,000691882	0,000628467	0,000548907	0,494771859	0,276046313	0,129957268
0,000654525	0,000594534	0,00051927	0,355901832	0,202674247	0,10007546
0,00061681	0,000560276	0,000489349	0,274668074	0,15975434	0,082595723
0,0005784	0,000525386	0,000458876	0,217031805	0,129302181	0,070193652
0,000538833	0,000489445	0,000427485	0,172325642	0,105681651	0,060573859
0,000497435	0,000451842	0,000394642	0,135798047	0,086382274	0,052713915
0,000453155	0,000411621	0,000359512	0,104914405	0,070064882	0,046068428
0,000404163	0,000367119	0,000320644	0,078161778	0,055930115	0,040311844
0,000346709	0,000314931	0,000275063	0,054564289	0,043462366	0,035234178
0,000270336	0,000245558	0,000214472	0,033455615	0,032309585	0,030692051
0,996	0,997	0,998			
α_i	α_i	α_i			
715,1098094	439,2375133	236,7562312			
543,7559196	340,8961296	192,7234093			
445,303967	285,1351607	168,7870183			
375,2275773	246,1086875	152,9686049			
319,8129221	215,9212676	141,6982355			
272,9966358	191,1780947	133,5740652			
231,5198899	170,2171468	128,1414609			
193,3917753	152,3487888	125,7214367			
157,3776792	138,005925	128,0949124			