

# Kondensacijos šilumos nuvedimo nuo tarpfazinio paviršiaus į vandens gilumą tyrimas taikant termografinį metodą

---

**Darius Laurinavičius,**

**Marijus Šeporaitis,**

**Stasys Gasiūnas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduolinių įrenginių saugos laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas  
El. paštas: Darius.Laurinavicius@lei.lt*

Kondensacijos reiškinys yra plačiai tyrinėjamas jau daug metų. Tačiau dėl eksperimentinių duomenų fragmentiškumo bei plataus supaprastintų modelių taikymo pilnas kondensacijos reiškinio modelis nėra sukurtas. Tiek eksperimentiniai duomenys, tiek ir naudojami esami daliniai kondensacijos reiškinio modeliai yra gauti ir sukurti pirmiausia tenkinant praktinius pramonės poreikius – tyrėjų dėmesio sulaukė tik plačiausiai naudojami režimai. Kadangi fundamentiniai tyrimai yra labai sudėtingi, keliami tikslai dažniausiai apsiribojo technologinių procesų optimizavimu ir kitais praktiniais uždaviniais. Vienas tokių nepakankamai gerai ištirtų ir suprantamų režimų – stratifikuotas dvifazis tekėjimas su tiesioginės fazių sąveikos sukeliama tarpfazinio paviršiaus nestabilumu.

Straipsnyje pateikiami vandens temperatūros profilių matavimai, kai vanduo ir besikondensuojantis garas stratifikuotai kartu teka ta pačia kryptimi. Remiantis gautais rezultatais yra aprašomas šilumos perdavimas nuo tarpfazinio (kondensacijos) paviršiaus į vandens gilumą. Matavimai buvo atlikti  $x/h = 9,4, 14,8, 20,4$  ir  $39,2$  (166, 312, 458, 932 mm) atstumuose nuo kanalo pradžios, taikant vandens srauto netrikdantį termografinį metodą. Termografinis metodas leidžia su didele skiriamąja geba ir mažu  $\pm 2$  °C matavimo duomenų neapibrėžtumu išmatuoti vandens temperatūrą prie pat kanalo šoninės sienelės. Skirtingos tekėjimo sąlygos buvo sukuriamos kaitaliojant į kanalą įtekančių fazių greitį (vandens 0,014, 0,028 ir 0,056; o garo 6, 8, 10 ir 12 m/s). Tiekiamo vandens temperatūra į kanalą buvo 25 °C. Nustatyta, jog skirtinguose režimuose išmatuotų vertikalių vandens temperatūros profilių kitimas pagal aukštį nuo tarpfazinio paviršiaus iki kanalo dugno yra nevienodas ir netolygus. Tirtuoju atveju tekančio vandens sluoksnį galima suskirstyti į 4-ias zonas, kuriose pagal aukštį vandens temperatūra kinta skirtingai. Taip pat nustatyta, kad dėl „kondensacinio-turbulentinio sužadavimo“ mechaninė garo tėkmės įtaka vandens turbulencijai pasireiškia ne tik prie pat tarpfazinio paviršiaus (iki ~1 mm gylyje), bet ir gerokai giliau. Didinant tiekiamo garo greitį ir esant pastoviam vandens tekėjimo greičiui, kondensacinis-turbulentinis sužadinimas prasideda vis arčiau tiesioginio garo ir vandens kontakto pradžios.

**Raktažodžiai:** dvifazis tekėjimas, vandens temperatūros profiliai, turbulencija, termografija

---

## IVADAS

Eksploatuojant chemijos ir energetikos pramonės objektus, daugelyje jų yra naudojamos dujinės ir skystosios takiosios terpės. Tačiau dažnai pasitaiko, kad šiluminiuose-hidrauliniuose kontūruose garavimas ir kondensacija vyksta nepageidaujamose vietose arba ne taip, kaip buvo numatyta juos projektuojant. Kadangi kondensacijos intensyvumas labai priklauso nuo tekėjimo sąlygų, o jos vyksmas veikia patį tekėjimą. Šis teigiamas sąryšis lengvai sukelia ženklus vietinio slėgio pokyčius, taip padidinant hidraulinių smūgių tikimybę. Be galimos neigiamos įtakos technologinių procesų eigai, atsižvelgiant į suteiktą garo impulsą skysčiui ir sistemų atsparumą ciklinėms smūginėms apkrovoms, iškyla reali hidraulinių smūgių grėsmė, galinčių sukelti vamzdynų trūkius. Tad labai svarbu gerai suprasti kondensacijos metu vykstančių reiškinų ryšius.

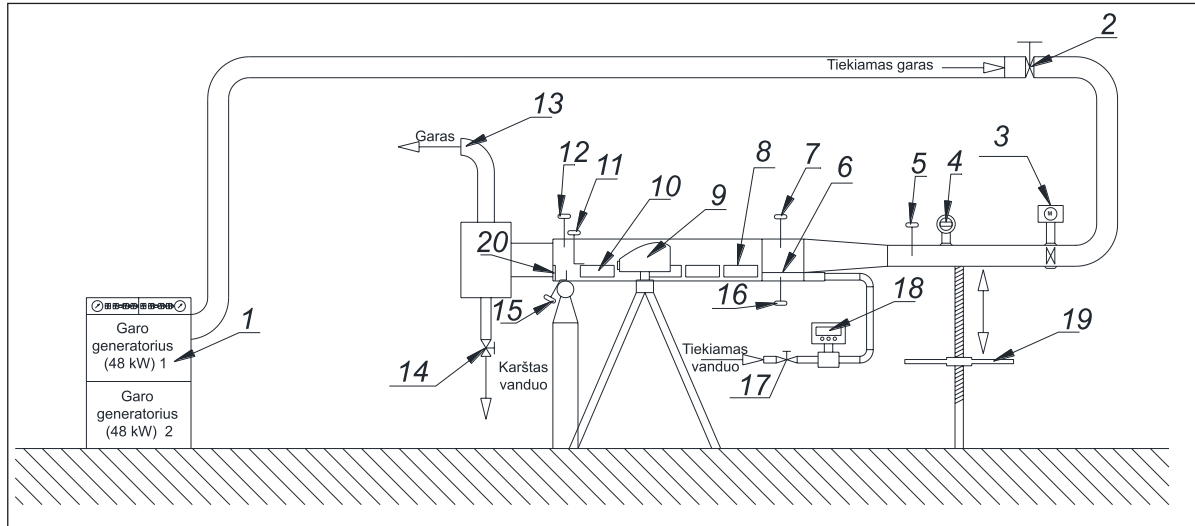
Analitinių vandens modelių gausa [1] dėl vandens ypatybių ir kondensacijos bei susijusių reiškinų kompleksinio uždavinio sudėtingumo neturi vieningos sistemos. Atskirais modeliais ar koreliacijomis patenkinamo tikslumo rezultatai gaunami tik siaurų kraštinių sąlygų intervaluose (ten, kur istoriškai susiklostęs stiprus inžinerinis poreikis). Plėtoti kondensacijos reiškinio teorinį modelį trukdo ne tiek eksperimentinių duomenų trūkumas, kiek jų fragmentiškumas. L. C. Ruspini [1] ir V. H. Gada [2] teigia, kad dvifazės tėkmės nestabilumų reiškinys yra ribotai ištirtas. Tyrimai atliekami atskirais, labai konkrečiais dvifazio (skystis / gasas) tekėjimo atvejais, esant gana griežtai apibrėžtomis kraštinėmis sąlygomis. Net ir naujausiomis CFD skaičiavimo programomis (pvz., Ansys CFX) modeliuoti stratifikuotą dvifazę tėkmę yra labai sudėtinga. Siekiant sukurti korektišką universalų, pereinamuosius reiškinus apimančią, o ne su siauromis tekėjimo sąlygomis susietų pusiau empirinių modelių taikymu paremtą, besikondensuojančio dvifazio tekėjimo sprendimą reikia daugiau išsamesnių ir tikslesnių tyrimų.

Pirmasis šio tyrimo tikslas – atlikti vandens temperatūros laukų matavimus stačiakampiam kanale ta pačia kryptimi stratifikuotai tekant garui su vandeniu skirtingais fazių įtekėjimo greičių ir temperatūros deriniais. Antrasis – remiantis gautais vandens temperatūros profiliais ištirti ši-

lumos nuvedimo reiškinį nuo tarpfazinio (kondensacijos) paviršiaus į vandens gilumą. Vandens temperatūros laukui matuoti pritaikytas srauto netrikdantis optinės termografijos metodas. Juo galima santykinai tiksliai (neapibrėžtumas apie  $\pm 2$  °C) ir vienu metu išmatuoti vandens temperatūrą aprėpiant didelį matavimo taškų skaičių ( $\sim 80$  taškų/mm<sup>2</sup>). Šis metodas leidžia vizualiai stebėti vandens tėkmės susidarančius nestabilumus ar turbulencinius reiškinus. S. Ghosh [3] teigia, jog vizualus tekančio srauto stebėjimas yra vienas iš šiuo metu vis dar naudojamų vandens tėkmės tyrimo būdų. Tačiau matavimo metodo skvarba į vandenį apima tik ploną sluoksnį už optinio langų, t. y. gaunami temperatūros lauko dinamikos duomenys tik labai arti kanalo sienelės ( $\sim 30$  μm). Vandens temperatūros laukai išanalizuoti ir paaiškintos jų kitimo tendencijų priežastys.

## DARBO METODIKA

Eksperimentiniai kondensacijos ir tarpfazinio paviršiaus nestabilumo ryšio tyrimai buvo atliekami eksperimentiniame (stačiakampiam) kanale (1 pav.), kurio ilgis 1 000 mm, vidinis plotis 20 mm, aukštis 100 mm. Kanalas pagamintas iš nerūdijančio plieno. Kanalo viename šone įtaisyti 4 (100 × 25 × 2 mm) metalo keramikos Spinel ( $MgAl_2O_4$ ) stebėjimo langeliai (10). Langeliai įtaisyti  $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$  (166, 312, 458, 932 mm) atstumais nuo kanalo pradžios ir 4 mm aukštyje nuo kanalo dugno. Pro langelį galima matyti 21 mm vandens aukščio zoną (iš 25 mm). Šiame tyrime naudojamo laboratorinio termovizorius darbo diapazonas apima (3–5) μm bangų ilgį. Parenkant optinius langus svarbios buvo ne tik geros optinės savybės, bet ir atsparumas temperatūrai bei atsparumas temperatūros sukeliams mechaniniams įtempimams, kietumas, atsparumas įbrėžimams ir erozijai. Pasirinkta metalo keramika – Spinelis, naudojamas raketų šiluminio nutaikymo galvutėse [2] (>80 % optinis pralaidumas (0,5–4,5) μm bangos ilgio diapazone). Siekiant sumažinti šilumos nuostolius į aplinką, kanalas izoliuotas 100 mm storio akmens vatos sluoksniu. Eksperimentinių tyrimų metu gasas buvo tiekiamas iš 4 garo generatorių (1). Tiekiamo perkaitinto garo debitas į kanalą svyruoja nuo 2,02 iki 4,03 g/s, temperatūra – 120 °C. Į kanalą tekančis gasas tiekiamas per rankinio valdymo (2) ir



**1 pav.** Eksperimentinis stendas. 1 – garo generatoriai, 2 – tiekiamo garo rutulinė sklendė, 3 – garo debito valdymo sklendė, 4 – garo debito matuoklis, 5; 7; 11; 12; 15; 16 – K tipo termoporos, 6 – horizontalus peilis, 8 – Spinel IR optinis stebėjimo langas, 9 – infraraudonųjų spindulių (IR) kamera SC-5000, 10 – Optinis IR stebėjimo langelis (Spinel  $MgAl_2O_4$ ), 13 – garo ištekėjimas, 14 – vandens ištekėjimas, 17 – vandens debito rutulinė sklendė, 18 – vandens debito matuoklis, 19 – stačiakampio kanalo polinkio kampo reguliavimo įtaisas, 20 – vandens lygio reguliavimo slenkstis

elektrinę (3) sklendes. Rankinio valdymo sklendė buvo naudojama avariniam tiekiamo garo srauto sustabdymui. Elektrine sklende buvo reguliuojamas tiekiamo garo srautas į kanalą. Tiekiamo garo srautas matuotas Vortex tipo srauto matuokliu (4), garo temperatūra – K tipo (Cr-Al) termopora (5). Tiekiamo vandens srautas į kanalą matuotas naudojant elektromagnetinį srauto matuoklį (18), o reguliuojamas – naudojant mechaninę balansinę sklendę (17).

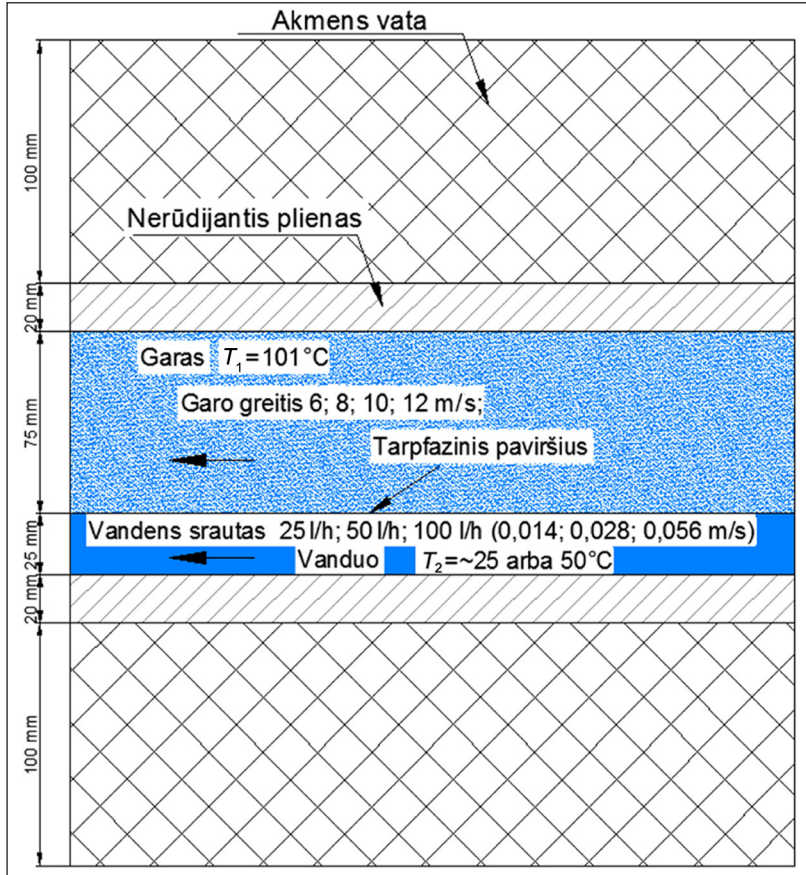
Prieš kanalą vandens ir garo debitas yra stabilizuojamas. Naudojant korinę struktūrą pašalinami vandens, garo sūkurių, o horizontaliu peiliu (6) suformuojamas lygus tarpfazinis paviršius. Korinės struktūros ilgis yra 95 mm, ji sudaryta iš daugybės lygiagrečių kanalėlių, kurių kiekvieno skersmuo ~1 mm. Iškart už korio, 25 mm aukštyje nuo kanalo dugno, garą nuo vandens skiria 190 mm ilgio horizontalus peilis, nuo kurio galo prasideda tiesioginė tarpfazinė sąveika. Tokį stabilizavimo principą taiko ir kiti tyrėjai [3]. Siekiant sumažinti garo ir vandens šilumos mainus dar prieš tiesioginį jų kontaktą, horizontalaus peilio apatinė, vandenyje esanti pusė, padengta izoliacine medžiaga. Vandens ir garo įtekėjimo į kanalą ir ištekėjimo iš kanalo skerspjūviuose temperatūros matuojamos K tipo (Cr-Al) termoporomis (7, 16, 12, 15). Vandens temperatūra kanalo gale matuo-

jama 5 termoporomis, kurios įtaisytos viena virš kitos kanalo centrinėje dalyje. Vanduo ir garas iš kanalo išteka vamzdžiais (13, 14). Eksperimentinių tyrimų metu, esant skirtingiems vandens ir garo greičiams, ir siekiant išlaikyti pastovų vandens lygį (25 mm) tiek kanalo pradžioje, tiek ir gale, polinkio kampo reguliavimo įtaisu (19) buvo nuolat reguliuojamas kanalo posvyrio kampas ir užtvaros aukštis (20). Temperatūros profilių matavimai kanale atlikti termovizoriumi SC-5000 (9) taikant termografijos metodą.

Eksperimentinių tyrimų metu buvo atliekami matavimai esant skirtingiems vandens ir garo greičiams. 2 pav. pateikiamas eksperimentinio kanalo skerspjūvio vaizdas. Izoliuoto stačiakampio kanalo apatinėje dalyje teka vanduo, jo greitis ~0,014; ~0,028 ir ~0,056 m/s (debitas 25, 50, 100 l/h). Tiekiamo į kanalą vandens temperatūra siekė 25 °C. Virš vandens tiekiamas perkaitintas garas, jo temperatūra prieš įtekant į kanalą – ~120 °C, o kanalo gale (atsižvelgiant į vandens ir garo greičius) nukrisdavo iki ~101 °C. Vandens aukštis kanale buvo 25 mm.

Vandens temperatūros profilių matavimo eksperimento metu eiliškumas:

1. Nustatomas (-a) pastovus (-i):
  - a) į kanalą tiekiamo garo greitis – 6 m/s;
  - b) vandens debitas – 25 l/h (0,014 m/s);



2 pav. Eksperimentinio kanalo skerspjūvis

- c) vandens temperatūra – 25 °C;  
 d) vandens sluoksnio aukštis kanalo pradžioje ir pabaigoje – 25 mm.
2. Eksperimentiniai matavimai pradėti po 3 valandų, kai visa sistema tampa stacionarios būsenos.
  3. Vandens temperatūros profiliai (termovizoriumi) matuojami keturiuose kanalo vietose –  $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ .
  4. Matuojama vandens, garo temperatūra kanalo pradžioje ir pabaigoje.
  5. Nustatomas tiekiamas į kanalą vandens debitas – 50 l/h.
  6. Vykdomi darbai aprašyti 1 (c, d), 2, 3, 4 punktuose.
  7. Toliau atliekami analogiški vandens temperatūros matavimai esant 8, 10, 12 m/s garo greičiams pagal 1–6 punktuose pateiktą darbų sąrašą.

Kiekvieno režimo skirtingose kanalo vietose vandens temperatūros matavimai termovizoriumi buvo vykdomi 30 s (50 kadrai per sekundę dažniu). Vieno matavimo metu gaunama 1 500 kadrų, kurių vandens temperatūros profilių atskirų taškų reikšmės buvo suvidurkintos.

Naudojant gautų vandens profilių atskirų taškų vidutines temperatūras skaičiuojamos vidutinės vandens sluoksnio temperatūros skirtingose kanalo vietose ( $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ ) ir esant skirtingoms vandens įtekėjimo temperatūroms (25 ir 50 °C).

Pagal vidutinę vandens temperatūrą skirtingose kanalo vietose nustatomos Reinoldso (toliau Re) kriterijaus reikšmės (Lentelė) daugeliu atvejų rodo laminarinį tekėjimo režimą ir tik kelios pereinamąjį ( $2300 < Re < 4000$ ). Tačiau realus (vizualiai stebint vandens tekėjimą) dėl vandens greitinimo, įkaitinimo prie tarpfazinio paviršiaus tekėjimas yra pereinamasis ir turbulentinis.

Atliekant Re kriterijaus skaičiavimus buvo priimta, kad vandens greitis visame kanale yra vienodas ir lygus įtekėjimo greičiui į kanalą. Re kriterijaus skaičiavimai buvo atliekami taip:

$$Re = \frac{w_f D_{h,f}}{\nu_f}, \quad (1)$$

čia:  $w_f$  – vandens vidutinis greitis kanalo pradžioje (m/s);  $\nu_f$  – kinematinė klampa ( $m^2/s$ );  $\nu_f = f(t)$ ,  $t$  – temperatūra (°C).

Lentelė. Reikšmės vandenyje esant skirtingoms vandens įtekėjimo temperatūroms ir skirtingiems atstumams  $x$  nuo įtekėjimo

Garo greitis m/s	Vandens greitis m/s	Vandens įtekėjimo temperatūra 25 °C			
		$x/h = 9,4$	$x/h = 14,8$	$x/h = 20,4$	$x/h = 39,2$
		Re			
6	0,014	527	558	674	1 010
6	0,028	1 040	1 072	1 099	1 578
6	0,056	2 089	2 207	2 283	2 158
8	0,014	497	587	898	1 041
8	0,028	998	1 034	1 230	1 912
8	0,056	2 019	2 051	2 181	2 715
10	0,014	514	852	9 87	1 039
10	0,028	1 033	1 220	1 648	2 044
10	0,056	1 999	2 190	2 662	3 561
12	0,014	615	952	1 025	1 039
12	0,028	1 606	1 611	1 870	2 079
12	0,056	1 753	2 581	3 106	3 825

Hidraulinis skersmuo [7]:

$$D_{h,f} = \frac{4A_{p,f}}{S_g + S_f}, \quad (2)$$

čia:  $A_{p,f}$  – vandens tėkmės skerspjūvio plotas ( $m^2$ );  $S_g$  – tarpfazinio vanduo / garas paviršiaus perimetras (m);  $S_f$  – paviršiaus vanduo / kanalo sienelė perimetras (m).

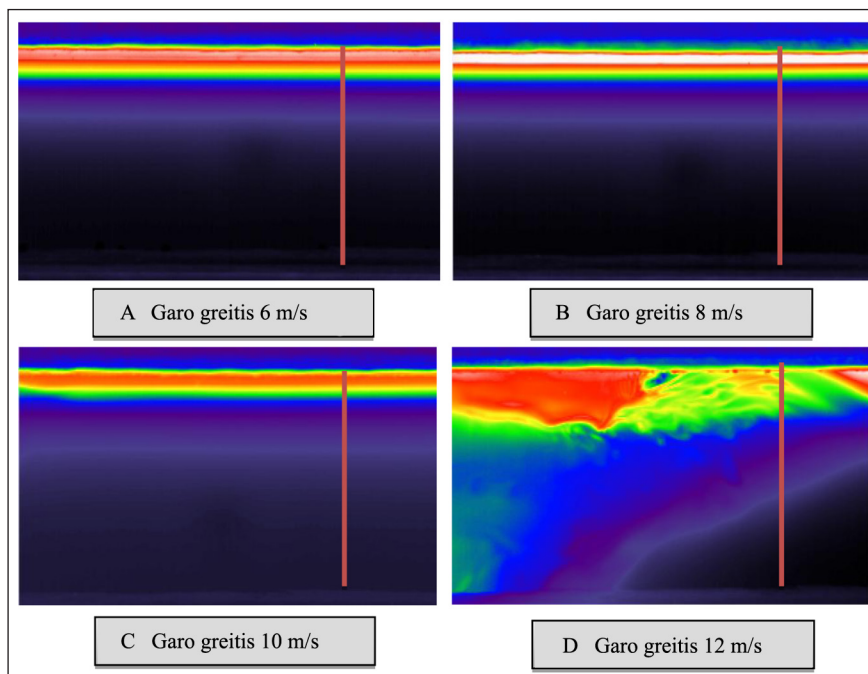
#### TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Vandens temperatūros profiliai esant skirtingiems vandens tiekiamo srauto ir garo įtekėjimo greičio deriniams buvo matuojami 4-iuose

nustatytuose kanalo skerspjūviuose. 3 pav. vertikalia (raudona) linija pažymėtas  $x/h = 9,4$  skerspjūvis, ties kuriuo buvo matuojamas vandens temperatūros profilis.

Vandens temperatūros profilių matavimo rezultatai pateikti 4, 8, 9 pav. (vandens įtekėjimo temperatūra 25 °C). Kiekviename paveiksle yra parodomi vandens temperatūros profiliai skirtingose kanalo vietose ir esant skirtingiems garo tekėjimo greičiams.

Esant skirtingam garo greičiui kanale, išmatuotų vandens temperatūros profilių kitimas nėra tolygus kaip būtų esant laminarinei vandens tekmei. Analizuojant visus išmatuotus vandens



3 pav. Šiluminės nuotraukos garui įtekant į kanalą 6, 8, 10 ir 12 m/s greičiu, kai vandens greitis 0,014 m/s, įtekancio vandens temperatūra 25 °C. Vertikali linija žymi vandens temperatūros profilių matavimo vietą ties  $x/h = 9,4$ . Vandens ir garo tekėjimo kryptis yra iš dešinės į kairę

temperatūros profilius (4, 8, 9 pav.) pagal aukštį nuo tarpfazinio paviršiaus iki kanalo apatinės sienelės, galima išvelgti iki 4-ių zonų, kurios susiformuoja vandens tūryje esant skirtingiems vandens ir garo tekėjimo debitams (greičiams). Šios zonos parodo vandens temperatūros kitimo greitį, t. y. koku greičiu kinta (didėja ar mažėja) temperatūra per vandens sluoksnio aukščio vienetą ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ). I tipo paviršinės zonos ribos yra  $\sim 0,85\text{--}1,00$  vandens sluoksnio aukščio. Šioje zonoje vandens temperatūra yra ne tik aukščiausia, bet ir labiausiai kintanti. Giliau prasideda II tipo zona ( $\sim 0,70\text{--}0,85$  vandens sluoksnio santykinio aukščio), kurioje vandens temperatūros kitimas lėtėja. III tipo zona išvelgtina  $\sim 0,50\text{--}0,70$  gylyje, o apačioje ( $\sim 0,25\text{--}0,50$ ) lieka IV tipo zona. Per III ir IV zonas temperatūros kitimas yra mažiausias. Kai kuriuose profiluose galima išskirti tik dvi zonas, tačiau pastarųjų temperatūra nenukrenta žemiau  $90^{\circ}\text{C}$ . Toks zonavimas parodo bendras tekėjimo charakteristikas, todėl skirtingus tekėjimo režimus aptarsime išsamiau.

Iki  $x = 0$  vanduo su garu neturi tiesioginio kontakto. Nuo  $x = 0$  kondensuojantis garui į vandens paviršių perduodama fazinio virsmo šiluma ir soties temperatūros kondensato masė. Į kanalą tiekiamas garas yra truputį perkaitintas (temperatūra  $\sim 120^{\circ}\text{C}$ ) ir labai mažai kondensuojasi ant sienelių, tačiau kondensacijai ant vandens paviršiaus šis perkaitinimas įtakos beveik neturi [4]. Ženklios įtakos pradinei kondensacijai neturi ir pradinio fazių temperatūrų skirtumo dydis, nes, vos pradėjęs sąveikauti su garu, laminariškai tekančio vandens paviršius iškart pasiekia sotinio temperatūrą. Kadangi į kanalą tiekiamame gare beveik nėra kondensaciją ribojančių nesikondensuojančių dujų, t. y. dvifazio tekėjimo šiluminę nepusiausvirą palaiko prastas šilumos nuvedimas nuo vandens paviršiaus į gilumą. Taigi, svarbiausias nagrinėjamo dvifazio besikondensuojančio tekėjimo pirminis parametras lieka garo ir vandens įtekėjimo į kanalą greičių skirtumas. Greičiau tekantis garas pirmiausia mechaniškai trikdo vandens paviršių, o gravitacija, klampa ir paviršiaus įtempis jį stabilizuoja. Gravitacinės bangos slopina paviršiaus įtempis, o kapiliarines labiausiai slopina klampa. Vandens paviršiaus įtempis labai priklauso nuo temperatūros, tačiau viso tarpfazinio paviršiaus kanale temperatūra yra arti soties. Todėl kondensacijos atveju paviršiaus įtempis nelaiko-

mas kintamuoju, tačiau klampa iškart po paviršiumi ir giliau kinta iki  $\sim 3,5$  karto. Būtent klamos sumažėjimas ir „paleidžia“ visą vietinių tarpfazinės sąveikos reiškinių su teigiamais grįžtamaisiais ryšiais kaskadą *turbulencija > kondensacijos intensyvumas > tarpfazinis greitis*. Kartu tekėdami garas ir vanduo abipusiai sąveikauja. Nuo pat tiesioginės sąveikos pradžios ( $x = 0$ ) atsiradęs tarpfazinis paviršius yra veikiamas tarpfazinės trinties jėga, kurios stiprumas priklauso nuo vietinio tarpfazinio greičio bei kitų parametrų ir vykstant kondensacijai vandens paviršius garo tėkmei tampa iš dalies pralaidžia sienele. Todėl esant pastoviam vidutiniam fazių greičių skirtumui, vietinė vandens paviršiaus greičio reikšmė prie tarpfazinio paviršiaus gali kisti atsižvelgiant į kondensacijos intensyvumą. Dėl tarpfazinės sąveikos pasroviui besikeičiančių (nuo pradinių garo ir vandens įtekėjimo į kanalą) sąlygų vietinis tarpfazinis greitis (angl. *slip velocity*) iš pradžių mažėja, nes gerokai greičiau tekantis garas dėl trinties stabdomas ir pats tekėjimo kryptimi „velka“ vandens paviršių. Tarpfazinio paviršiaus greitis išilgai kanalo nuolat didėja įgreitindamas ir po paviršiumi esantį vandenį, todėl vietinis tarpfazinis greitis turėtų mažėti toliau. Suintensyvėjusi kondensacija padidina garo greitį prie pat vandens paviršiaus, ir vietinis tarpfazinis greitis padidėja, o kondensacijai nuslopus vėl sumažėja [8]. Šiluminėje nuotraukoje 3 pav. esant  $12\text{ m/s}$  garo tekėjimo greičiui matoma suaktyvėjusios turbulencijos zona (pažymėtina, kad turbulencija po tarpfaziniu paviršiumi prasideda anksčiau nei jo bangavimas). Atsižvelgiant į aptartus vykstančių procesų tarpusavio ryšius, turbulenciją sužadinanti tarpfazinės sąveikos seka turėtų būti tokia:

1. Kylant vandens temperatūrai mažėja jo klampa ir tankis.
2. Veikiant Archimedo jėgai karštas mažesnio tankio vanduo laikosi prie paviršiaus ir po juo susiformuoja plona temperatūros gradiento zona (I zona).
3. Šiame sluoksnyje vis kylant temperatūrai mažėja klampa ir  $Re$  didėja sparčiau, palyginti su giliau ir mažesniu greičiu tekančiu šaltesniu vandeniu. Po tarpfaziniu paviršiumi įvyksta turbulencijos sužadinimas.
4. Mažiau klampus paviršinis vanduo vis labiau įgreitinamas virš jo tekančio garo. Turbulencija plinta gilyn ir, atnaujindama paviršių

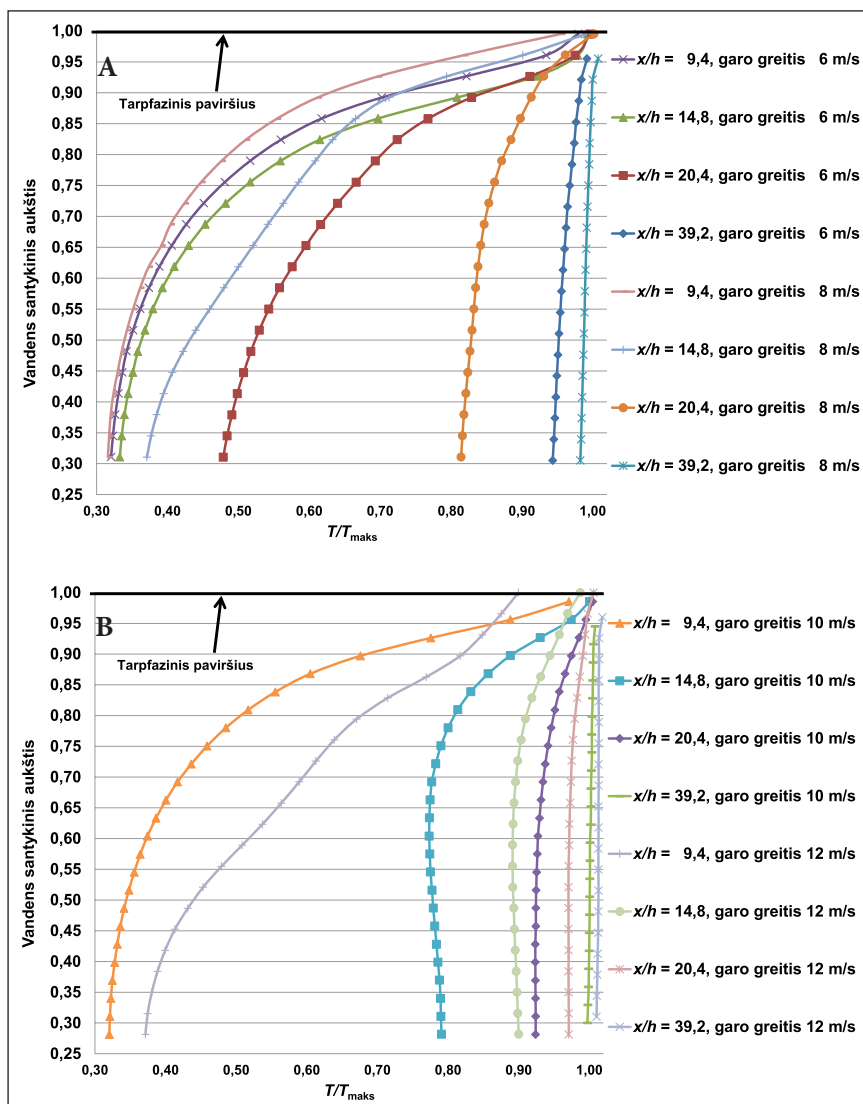
(angl. *surface renewal*) šaltesniu vandeniu, intensyvina kondensaciją.

- Intensyvėjant kondensacijai vietinis virš vandens paviršiaus tekančio garo greitis didėja [8] ir dar didesne jėga stumia tarpfazinį paviršių.
- Vandenyje susiformuoja ne tik temperatūros, bet ir tekėjimo greičio gradientas. Dėl pagreitėjimo prie paviršiaus vanduo apačioje pradeda judėti lėčiau ir net tekėti atgal.
- Augantys sūkuriukai destabilizuoja tarpfazinį paviršių ir „užgriebia“ vis gilesnius vandens sluoksnius.

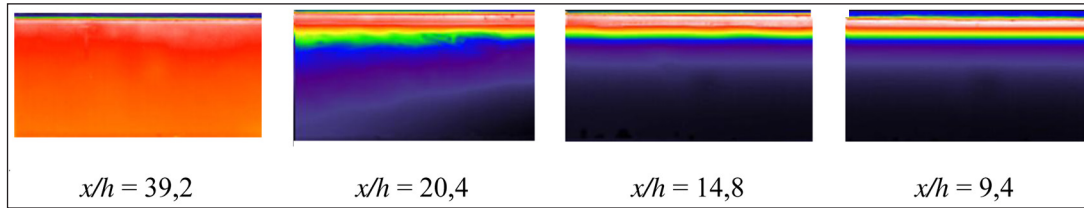
Aptarta grįžtamais teigiamais ryšiais susijusių procesų visuma paaiškina pradžioje lėto kondensacijos proceso eksponentinį išaugimą. Šio reiškinio aktyviausios fazės (gerai matomos 3 pav.) pradžia kanale priklauso nuo garo ir vandens

greičių derinio. Tačiau kondensacijos intensyvumo ir tarpfazinės sąveikos eksponentinį augimą staiga sustabdo vandens šilimas. Toliau tekant kanalu garo–vandens šiluminė nepusiausvira sparčiai mažta ir, nuslopus kondensacijai, tarpfazinio paviršiaus šlytis vėl sumažėja [8]. Kanalo pabaigoje (pvz., 4A ir 5A pav.  $x/h = 39,2$ , garo greitis 6 m/s, vandens 0,014 m/s) vandens temperatūros gradientas likęs labai mažas, bet jo pakanka, kad termovizoriumi vis dar būtų galima registruoti maišymąsi ir sūkurius. Tačiau matomas vandens maišymosi intensyvumas ir sūkurių dydis yra nepalyginamai mažesni nei aktyvaus turbulencijos sužadavimo zonoje.

Turbulencijos sužadimas su kondensacijos intensyvumo piku prasideda ne iškart už  $x = 0$ , o palengva plėtojasi pasroviui. Todėl norint pamatyti, kaip šiluminė nepusiausvirinė dvifazė tėkmė



4 pav. Vandens temperatūros profiliai esant pastoviam vandens greičiui 0,014 m/s, vandens įtekėjimo temperatūrai 25 °C ir skirtingam atstumui nuo kanalo pradžios ( $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ ) bei garo greičiui A (6; 8 m/s), B (10; 12 m/s)



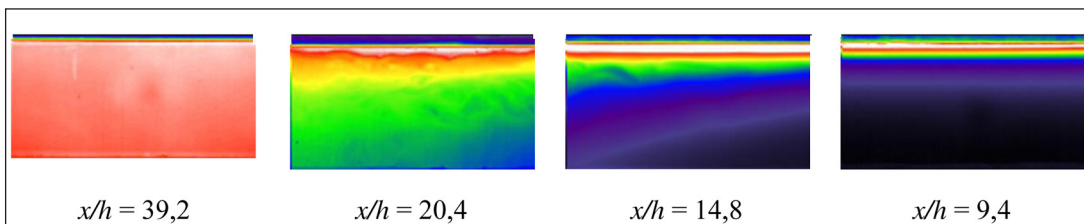
5 pav. Šiluminės nuotraukos esant 0,14 m/s vandens ir 6 m/s garo įtekėjimo greičiams, kai vandens įtekėjimo temperatūra 25 °C, trijose kanalo vietose  $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ . Tekėjimo kryptis yra iš dešinės į kairę

sužadina turbulenciją vandenyje, verta apžvelgti režimą, kai aktyviausia sužadavimo fazė vyksta toli nuo kanalo pradžios. 5 pav. pateiktos skirtingu atstumu nuo kanalo pradžios padarytos šiluminės nuotraukos, esant 6 m/s garo ir 0,014 m/s vandens (25 °C) įtekėjimo į kanalą greičiams. Matoma, kad vandens tėkmė išliko laminari iki  $x/h = 20,4$  kanalo vietos. Dėl vidutinės vandens temperatūros padidėjimo skaičiuota  $Re$  pakilo iki 600, tačiau nuo  $x/h = 20,4$  prie tarpfazinio paviršiaus vietiškai pradėjo formuotis sūkuriai, ir vidutinė vandens temperatūra taip pat pradėjo sparčiai kilti (4A pav.). Tėkmės turbulencijos sužadimas prasidėjęs ties  $x/h = 20,4$ , ties  $x/h = 39,2$  jau yra nuslopęs. Ties  $x/h = 39,2$  prie apatinės sienelės vizualiai stebimas matomas lėtas atbulinis tekėjimas. Jis atsiranda dėl slenkstelio įtaisyto kanalo gale. Slenkstelio pagalba yra palaikomas vandens aukštis kanale. Taigi, kai garo tėkmė įgreitina arti paviršiaus tekantį vandenį, kartu išauga ir vietinis vandens debito tankis. Kadangi bendrasis vandens debitas yra vienodas bet kuriame kanalo skerspjūvyje, tai didėjant vietiniam vandens debitui prie paviršiaus mažėja vietinis debitas apačioje. Dar toliau didėjant vandens greičiui prie tarpfazinio paviršiaus, prie apatinės sienelės greitis mažėja iki nulio ir galiausiai tampa neigiamas. Tokiu būdu pradeda formuotis vandens sluoksnyje vidinis cirkuliacijos ratas. Kitaip sakant, vanduo viršutinėje vandens sluoksnio pu-

sėje teka ištekėjimo kryptimi (link kanalo galo), o ties dugnu – atvirščiai.

Tarpfazinės sąveikos sukeltos vidinės (vandens) cirkuliacijos rato pradžia (kanale) turėtų sutapti su turbulencijos sužadavimo aktyviausia faze. Cirkuliacijos rato pradžioje vanduo iš dugno kyla aukštyn ir dėl anksčiau aprašytų procesų įvyksta vandens tėkmės turbulencijos sužadimas. Šis grįžtamasis tekėjimas yra vienas iš tarpfazinės sąveikos dalyvių, grįžtamaisiais ryšiais susijęs su kitais veiksniais. Kol kas trūksta duomenų atsakyti į klausimą, ar pašalinus grįžtamo tekėjimo susidarymo galimybę turbulencijos sužadimas vis tiek vyktų. Norint ištirti, reikėtų gerokai padidinti vandens bendrąjį vandens srautą, plečiant vandens pratekėjimo skerspjūvį ar / ir greitį. Tam reikia pakeisti eksperimentinio kanalo konstrukciją. Esamų galimybių ribose (0,014–0,056) m/s didinant vandens greitį ir esant pastoviam garo įtekėjimo į kanalą greičiui, turbulencijos sužadavimo pradžia slenka tolyn nuo kanalo pradžios. Garo greičio padidinimas priešingai – turbulencijos sužadimą labai smarkiai perslenka arčiau kanalo pradžios (5 ir 6 pav).

Pavyzdžiui, kai garas į kanalą įteka 8 m/s (vanduo 0,014 m/s, 25 °C) iki  $x/h = 9,4$  vandens tėkmė išlieka visiškai laminarinė (6 pav.). Ties  $x/h = 14,8$  prasideda turbulencijos sužadimas. Suintensyvėja šilumos perdavimas nuo tarpfazinio paviršiaus į vandens gilumą.



6 pav. Šiluminės nuotraukos esant 0,14 m/s vandens ir 8 m/s garo įtekėjimo greičiams, kai vandens įtekėjimo temperatūra 25 °C, trijose kanalo vietose  $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ . Tekėjimo kryptis yra iš dešinės į kairę



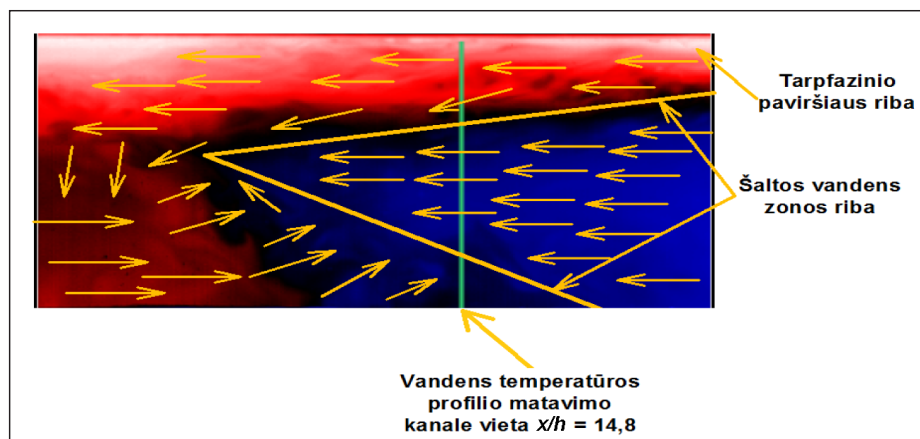
Ties  $x/h = 20,4$  šiluma vis dar efektyviai yra nuvedama į vandens gilumą. Ties  $x/h = 39,2$  per visą aukštį vanduo jau beveik pasiekia sotinimo temperatūrą (temperatūros lauke nebėra ženklų gradientų).

Garų įtekėmės greitį kanale padidinus iki 10 m/s (4B pav.), vandens temperatūros profilio reikšmės ties  $x/h = 9,4$  beveik sutampa su išmatuotomis temperatūros reikšmėmis esant 6 bei 8 m/s. Įvertinus vandens tekėjimo režimą buvo nustatyta, jog jis turėtų būti laminarinis. Tačiau vizualiniai vandens stebėjimai ir temperatūrinis laukas parodė, jog realus vandens tekėjimas yra pereinamajame ar turbulentiame režime.

Stebint ties  $x/d = 14,8$  nufilmuotą temperatūros lauko kitimą (7 pav. pateiktas vienas kadras) matomas sudėtingas turbulentiškas vandens tekėjimas su banguojančiu tarpfaziniu paviršiumi ir gerokai didesniu greičiu prie paviršiaus nei gilumoje. Vandens tēkmės nešamų prie paviršiaus generuojamų sukurių karšto vandens šuorai perneša šilumą gilumon į vandenį. O link paviršiaus išstumia didesnio tankio šalto vandens šuorus. Mažas 25 mm vandens gylis yra palankus. Be to, prie paviršiaus sugeneruoti dideli sukuriai artėjant prie dugno įgauna trimatį pavidalą – vyksta ir skersinis tekėjimas. Dėl didelio vandens greičio (prie paviršiaus) ir lygio palaikymo vykstanti vidinė vandens cirkuliacija kanale tam tikrame  $x/h$  intervale sukuria unikalias termohidromechanines sąlygas, kai atbulinė vandens tēkmė kanalo apačioje yra aukštesnės temperatūros nei ties viduriu. Tai gerai parodo išmatuotas temperatūros

profilis 4 ir 7 pav. ties  $x/h = 14,8$  (kai garų įtekėmės greitis 10 m/s). Prie tarpfazinio paviršiaus vandens temperatūra kaip ir ankstesniais atvejais kinta sparčiausiai; 0,95–0,70 lygyje temperatūra mažėja iki žemiausios; 0,70–0,25 lygyje temperatūra vėl kyla. Ties  $x/h = 20,4$  (garas 10 m/s) išmatuotame profilyje vandens temperatūra apačioje beveik visiškai vienoda iki pat 0,55 lygio. Iš to galima spręsti, kad vanduo ten teka turbulentiškai. Ties  $x/h = 39,2$  visas vanduo jau beveik pasiekia sotinimo temperatūrą.

Garų įtekėmės greitį padidinus iki 12 m/s, nors vidutinis  $Re$  rodo laminarinį tekėjimo režimą, tačiau vandens tekėjimas nuo  $x/d = 9,4$  per visą tekėjimo skerspjūvį yra turbulentiškas. Išmatuoti temperatūros profiliai aiškiai parodo tarpfazinio paviršiaus bangavimą ir sukurius, o apatinėje kanalo dalyje – ir atbulinį tekėjimą. Vidinės vandens cirkuliacijos rato pradžioje (kanale) padugne grįžtantis vanduo susiduria su laminariškai įtekančiu šaltu vandeniu. Besimaišydamos priešpriešinės srovės kyla link tarpfazinio paviršiaus. Tarp į viršų kylančių susidūrusių priešpriešinių vandens srovių riboje temperatūros skirtumas siekia iki 10 °C. Ties  $x/h = 9,4$  vandens temperatūra prie paviršiaus yra apie 10 °C mažesnė negu prieš tai aptartų profilių (6, 8 ir 10 m/s garų įtekėmės), nors kondensacija intensyviausia ir vandeniui perduodamas šilumos srautas didžiausias. Ties  $x/d = 14,8$  didžiausia temperatūra prie tarpfazinio paviršiaus yra artima soties, o gilumoje kinta mažai, tačiau žemiausia temperatūra yra ne apačioje, o jos profilis yra panašus į



7 pav. Filmuotos medžiagos fragmentas esant 10 m/s garų ir 0,014 m/s vandens įtekėjimo į kanalą greičiams  $x/h = 14,8$  skerspjūvyje. Vektorių kryptis rodo vyraujančią vandens tekėjimo kryptį, tačiau jų ilgis nėra proporcingas vandens tekėjimo greičiui.

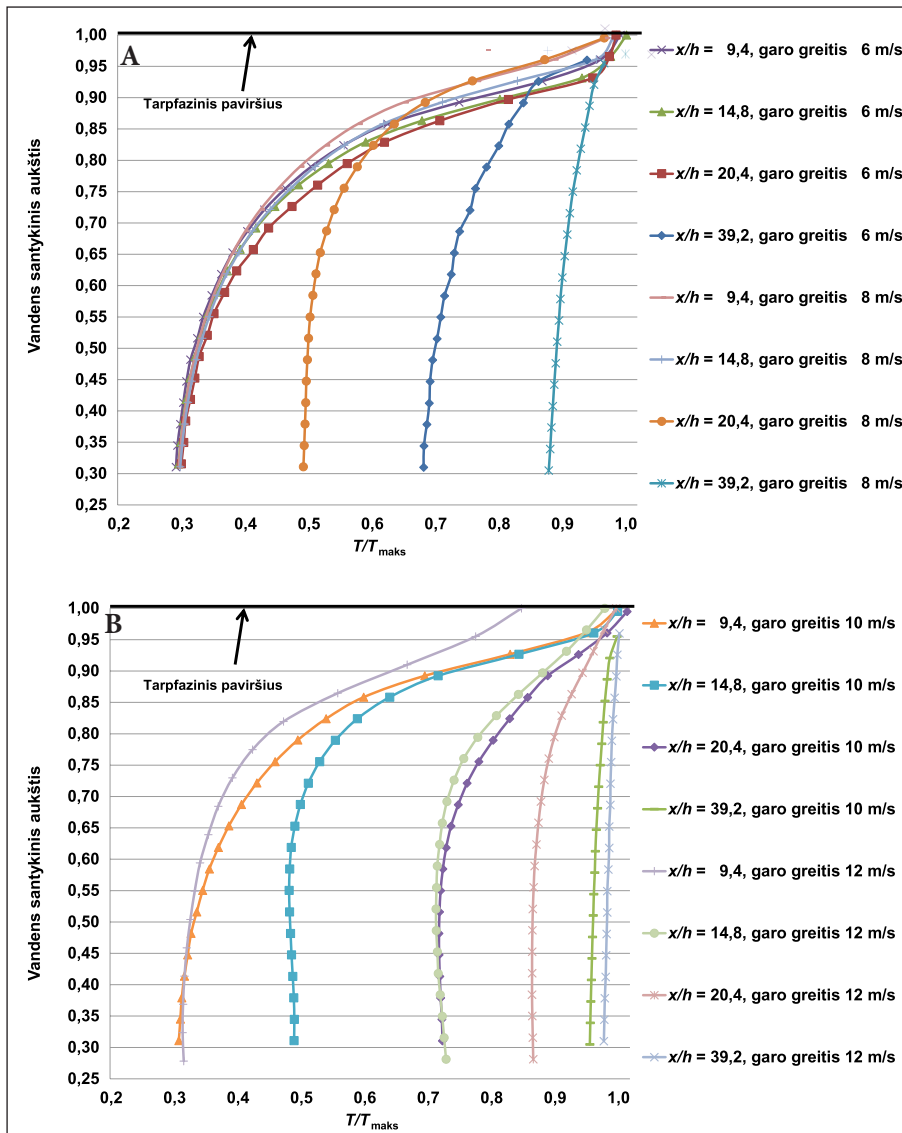
čia išmatuotą esant 10 m/s garo įtekmei. Abiem atvejais vandens tėkmės dinaminė struktūra panaši – dėl greito vandens tekėjimo prie tarpfazinio paviršiaus susidaro intensyvi turbulencija ir bangavimas, o kanalo apačioje vyksta atbulinis pulsuojančias tekėjimas. Ties  $x/d = 20,4$  vandens vidutinė temperatūra aukšta ir gradientai maži, tačiau temperatūros profilis ir tekėjimo struktūra išlieka analogiški. Ties  $x/h = 39,2$  vandens temperatūra per visą vandens sluoksnio aukštį pakilusi iki sočiai artimos.

Ištyrus 6, 8, 10 ir 12 m/s garo ir 0,014 m/s vandens (25 °C) įtekėjimo į kanalą greičių derinius, buvo gauti tokie rezultatai:

1. Turbulencijos sužadinimo atsiradimas ir vieta priklauso nuo garo ir vandens tekėjimo greičių skirtumo.

2. Didinant garo įtekės greitį turbulentinio sužadinimo zona artėja link fazių kontakto pradžios.

Padidinus tiekiamo vandens greitį du kartus nuo 0,014 iki 0,028 m/s (8A pav.), vandens tekėjimas esant 6 m/s garo įtekėjimo greičiui ties  $x/d = 9,4$  ir ties  $x/d = 14,8$  išliko laminarinis. Esant laminariniam tekėjimui šiluma gilesniems vandens sluoksniams perduodama tik laidumu, nes kitus šilumos perdavimo būdus riboja vandenį veikiančios gravitacinės jėgos, atsirandančios dėl vandens temperatūros, tankio bei klamos gradientų. Šiltesnis, mažesnės klamos ir mažesnio tankio vanduo teka tik ties tarpfaziniu paviršiumi. Tačiau tiekiamo vandens greičio padidinimas 2 kartus (nuo 0,014 iki 0,028 m/s) pastebimos įtakos šilumos perdavimui į gilesnius vandens sluoksnius neturi. Esant dvigubai didesniam vidutiniam

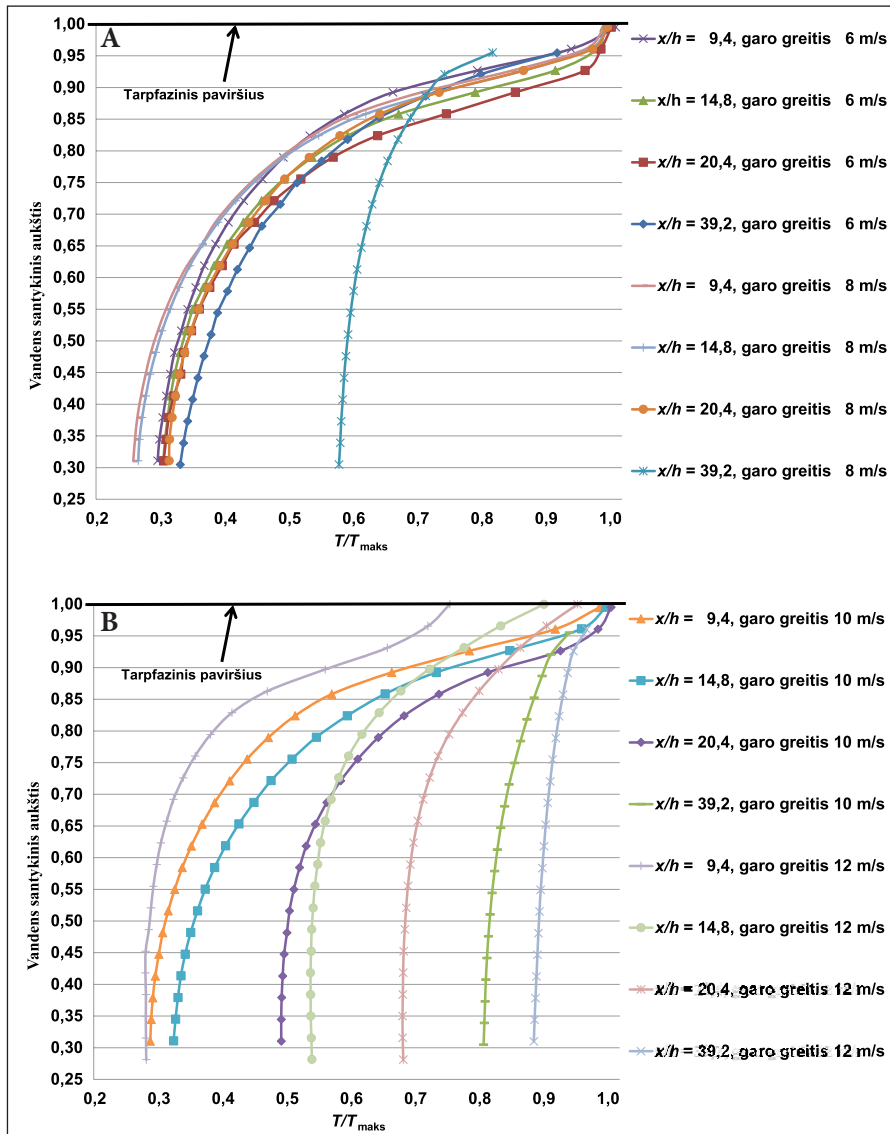


8 pav. Vandens temperatūros profiliai esant pastoviam vandens greičiui 0,028 m/s, vandens įtekėjimo temperatūrai 25 °C ir skirtingam atstumui nuo kanalo pradžios ( $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ ) bei garo greičiui A (6; 8 m/s), B (10; 12 m/s)

vandens tekėjimo greičiui tiek pat sutrumpėjo kondensacijos į elementarų skerspjūvio tūrėlių laikas. Todėl buvę maži vandens temperatūros profilių skirtumai ties  $x/d = 9,4$  ir  $14,8$  sumažėjo iki beveik visiško sutapimo (4A ir 8A pav.). Ties  $x/h = 20,4$  kyla silpnas tarpfazinio paviršiaus bangavimas. Temperatūros reikšmės kilsteli nedaug, tačiau čia prasidedantis turbulencijos sužadimas pasroviui plinta į vandens gilumą. Ties  $x/h = 39,2$  tarpfazinis paviršius banguoja stipriau nei ties  $20,4$ , arti dugno matoma stagnacija ir labai lėtas atbulinis tekėjimas. Temperatūros profilis  $0,95-1,00$  lygyje beveik toks pat, kaip ir prieš tai išmatuoti (ties  $x/h = 9,4, 14,8, 20,4$ ). Žemiau ( $0,25-0,95$ ) išmatuota temperatūra gerokai aukštesnė nei prieš tai buvusiuose skerspjūviuose. Tai rodo, kad turbulencija gilumoje su paviršiaus bangavimu išlaiko toki

pat didelį temperatūros gradientą prie paviršiaus, kondensacijos intensyvumas nemažėja, nors vidutinė vandens temperatūra kyla.

Padidinus garo įtekės greitį nuo 6 iki 8 m/s, vanduo ( $0,028$  m/s,  $25$  °C įtekė) ties  $x/h = 9,4$  teka laminariškai. Vandens temperatūros profilis sutampa su 6 m/s garo įtekės atveju. Toliau ties  $x/h = 14,8$  temperatūros profilis pakinta nežymiai. Vanduo gilumoje tebeteka laminariškai, tačiau paviršius protarpiais suvirpa (panašiai kaip ir esant 6 m/s garo įtekmei ties  $x/h = 20,4$ ). Šiuos pavienius virptelėjimus sukelia kondensato lašai, nutekantys nuo kanalo sienelės ir kartais sutrikdantys lygų tarpfazinį vandens ir garo paviršių prie sienelės. Tarp  $x/h = 14,8$  ir  $20,4$  vandenyje prasideda turbulencijos sužadimas. Turbulencija ties  $x/h = 20,4$  yra apėmusi visą vandens tekės gylį,



9 pav. Vandens temperatūros profiliai esant pastoviam vandens greičiui  $0,056$  m/s, vandens jėgimo temperatūrai  $25$  °C ir skirtingam atstumui nuo kanalo pradžios ( $x/h = 9,4; 14,8; 20,4; 39,2$ ) bei garo greičiui A (6; 8 m/s), B (10; 12 m/s)

generuojami dideli sūkuriai. Šiluma efektyviai nuvedama į vandens gilumą, todėl dugne vandens temperatūra pakilusi iki  $0,5 T/T_{maks}$ , o temperatūros gradientas iki  $0,5$  vandens aukščio kanale labai mažas. Palyginus ties  $x/h = 9,4; 14,8$  ir  $20,4$  išmatuotus vandens temperatūros profilius, matoma, kad  $0,9-1,0$  lygyje temperatūros sutampa, todėl ir šilumos nuvedimo nuo tarpfazinio paviršiaus į vandens gilumą intensyvumas išlieka pastovus.

10 ir 12 m/s (8B pav.) garo įtekėjimas, kaip ir esant vandens įtekėjimui  $0,014$  m/s, sukelia vidinę vandens cirkuliaciją kanale, atspindinčią temperatūros profiliuose ne tik ties  $x/d = 14,8$ , bet ir ties  $x/d = 20,4$ .

9A pav. parodyta, kad padidinus dvigubai vandens srautą (įtekmės greitis  $0,056$  m/s),  $6$  m/s garo įtekmės atveju turbulencijos sužadinimas nepasireiškia. Ties visais keturiais  $x/h$  išmatuoti vandens temperatūros profiliai kinta nedaug, išlaikydami beveik vienodą formą. Tačiau padidinus garo įtekmę iki  $8$  m/s, turbulencija sužadinama intervale tarp  $x/h = 20,4$  ir  $39,2$ . Toliau didinant garo įtekmės greitį ( $10, 12$  m/s) turbulencijos sužadinimas prasideda vis arčiau kanalo pradžios, intensyvaus maišymosi intervalas plėtėja (kaip ir vandeniui įtekant  $0,0139$  bei  $0,028$  m/s greičiu), nes apima visą likusį kanalo ilgį (9B pav.). Ties  $x/h = 9,4; 14,8$  ir  $20,4$  (garas  $12$  m/s) bei  $x/d = 39,2$  (garas  $10$  m/s) prie pat vandens paviršiaus išmatuota vidutinė temperatūra yra žema dėl stipraus tarpfazinio paviršiaus bangavimo. Taigi, didinant tiekiamo garo greitį turbulencijos sužadinimas slenka į kanalo pradžią, o didinant tiekiamo vandens srautą – į kanalo pabaigą.

## IŠVADOS

Atlikus stratifikuoto dvifazio besikondensuojančio vienakrypčio tekėjimo uždarame stačiakampiam kanale vandens temperatūros laukų matavimus tėkmės netrikdančiu metodu, daromos šios išvados:

1. Vandens temperatūrų matavimo metodika įgalina vandens temperatūros profilius pasienio sluoksnyje matuoti didele raiška ( $80$  taškų  $1 \text{ mm}^2$ ).

2. Eksperimentiškai išmatavus vandens temperatūros profilius esant skirtingiems garo ir vandens tekėjimo greičiams nustatyta, kad šilu-

mos nuo tarpfazinio paviršiaus nuvedimas į vandens gilumą vyksta netolygiai. Tekantis vandens sluoksniis einant nuo laisvojo jo paviršiaus link apatinės sienelės gali turėti iki  $4$ -ių zonų, atsižvelgiant į temperatūros kitimo greitį.

3. Virš vandens greičiau tekantis besikondensuojantis garas pasroviui kaitina ir greitina vandenį prie paviršiaus. Nuo tam tikro pradinio garo greičio priklausančio atstumo iš pradžių laminariškai tekėjusiam vandenyje prasideda turbulencija (pvz., esant pastoviam tiekiamo vandens greičiui  $0,014$  m/s kanale, didinant tiekiamo garo greitį nuo  $6$  m/s iki  $12$  m/s, turbulencijos sužadinimo vieta pasislenka nuo  $x/h = \sim 28$  iki  $\sim 9,4$  skerspjūvio). Dėl tarpfazinės sąveikos teigiamo grįžtamojo ryšio vykstant garo kondensacijai intensyvi turbulencija greitai apima visą vandens skerspjūvį – įvyksta turbulencijos sužadinimas.

4. Turbulencijos sužadinimas priklauso nuo tiekiamo vandens ir garo greičių. Didinant tiekiamo garo greitį ir esant pastoviam vandens greičiui, turbulencijos sužadinimas slenka į kanalo pradžią. Didinant tiekiamo vandens greitį ir esant pastoviam garo greičiui, turbulencijos sužadinimas slenka į kanalo pabaigą.

Gauta 2014 06 27

Priimta 2014 12 29

## Literatūra

1. Ruspini L. C., Marcel P. M., Clausse A. Two phase flow instabilities: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 71. P. 521–548.
2. Gada V. H., Datta D., Sharma A. Analytical and numerical study for two phase stratified-flow in a plane channel subjected to different thermal boundary conditions. *International Journal of Thermal Sciences*. 2013. Vol. 71. P. 88–102.
3. Ghosh S., Pratihar D. K., Maiti B., Das P. K. Automatic classification of vertical counter-current two phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions. *International Journal of Multiphase Flow*. 2013. Vol. 52. P. 102–120.
4. Harris D. C. Durable  $3-5 \mu\text{m}$  transmitting infrared window materials. *Infrared Physics & Technology*. 1998. Vol. 39. P. 185–201.

5. Gupta D., Park Y. G., Jacobi A. M. An experimental study of condensate retention on the air side of flat tube heat exchangers. *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference, 8–13 August 2010, Washington, DC, USA*. Vol. 2. Inc. Paper IHTC14-22986. P. 227–234.
6. Celata G. P., Cumo M., Farello G. E., Focardi G. Direct contact condensation of superheated steam on water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987. Vol. 30. Issue 3. P. 449–458.
7. Lee K., Chu I. C., Yu O. S., No H. C. Interfacial condensation for countercurrent steam-water stratified wavy flow in a horizontal circular pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 3121–3129.
8. Gasiūnas S., Šeporaitis M., Čėsna B., Valinčius M., Pabarčius R., Laurinavičius D. Interfacial shear of co-current steam–water flow estimation – II. Enhanced single-phase fluent model in conjunction with measured profiles of steam velocity and longitudinal water temperature. *Heat Transfer Research*. 2012. Vol. 43. Issue 5. P. 425–442.

Darius Laurinavičius, Marijus Šeporaitis,  
Stasys Gasiūnas

#### INVESTIGATION OF HEAT REMOVAL FROM THE INTERFACE AREA TO WATER BULK APPLYING A THERMOGRAPHY METHOD

##### *Summary*

Condensation is a phenomenon widely studied for many years. However, the experimental data fragmentation and wide application of simplified theoretical models prevent the consolidation and development of the condensation phenomenon model corresponding to the known reality in all aspects. Both the experimental data and the models are obtained and developed in

order to meet the practical needs of the industry first and foremost – only the most widely used regimes have attracted researchers' attention. However, because fundamental research is very difficult the objectives were usually limited to the optimization of the processes, and other practical tasks. One of not adequately understood and analysed regime is stratified two-phase flow with surface instability induced by direct phase interaction in the interface.

This paper presents water temperature profiles measured in stratified co-current two-phase flow (steam–water) inside a short and narrow rectangular channel. Measurements were made at  $x/h = 9.4; 14.8; 20.4; 39.2$  (166, 312, 458, 932 mm) from the beginning of the channel, using a nonintrusive thermography method. The thermography method allows with high resolution and low data uncertainty ( $\pm 2$  °C) measuring the water temperature right at the channel sidewall. The different flow conditions were created in the channel by changing velocities of flowing phases (water 0.014, 0.028 and 0.056, and steam 6, 8, 10 and 12 m/s) and supply water temperature (25 °C). It was found that between different regimes the vertical temperature profiles measured from the interface to the bottom of the channel changed not equally and smoothly. In the tested case the water layer can be virtually divided into 4 zones by height where water temperature changes differently. It was also found that because of the 'condensation-turbulence self-induction' the steam flow momentum transfer to water turbulence occurred not only at the interface (depth of  $\sim 1$  mm) but reached much deeper. By increasing the velocity of steam and at a constant rate of water flow the starting points of 'condensation-turbulence self-induction' move closer to the beginning of direct vapour–water contact.

**Key words:** two phase flow, water temperature profiles, turbulence, thermography