

Tarpfazinės sąveikos ir kondensacijos tyrimai

Marijus Šeporaitis,

Mindaugas Valinčius,

Stasys Gasiūnas,

Darius Laurinavičius,

Raimondas Pabarčius,

Algirdas Kaliatka,

Kazys Almenas

Straipsnyje apžvelgiami 2005–2015 m. vykdyti skaitiniai ir natūriniai tyrimai besikondensuojančio dvifazio tekėjimo srityje. Pristatoma sukurta šiluminės-hidraulinės schemos koncepcija, kurioje šilumnešis cirkuliuoja varomas kondensacijos, eksperimentinis standas, naudoti tyrimų metodai ir pasiekti rezultatai. Kombinuojant eksperimentų duomenis su skaitinio tyrimo rezultatais ištirta kondensacijos intensyvumo įtaka tarpfazinei trinčiai. Nagrinėjant turbulencijos struktūrą stačiakampiame eksperimentiniame kanale, optinės termografijos ir matematinės vaizdų analizės metodais aptiktas turbulencijos susižadinimo dvifazėje besikondensuojančioje tėkmėje reiškinys.

Raktažodžiai: kondensatas, turbulencija, dviejų fazių srautas, tarpfazinė sąveika

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

ĮVADAS

Stratifikuotas horizontalus besikondensuojantis dvifazis tekėjimas vyksta įvairiuose energijos gamybos, konversijos ir transportavimo bei chemijos technologiniuose įrenginiuose. Todėl dvifazis tekėjimas ir kondensacija jau daug metų yra plačiai tyrinėjami. Tačiau dėl tarpfazinės sąveikos sukiamų procesų sudėtingumo šis tekėjimo režimas nėra ištirtas iki pakankamo fundamentinio supratimo, o potencialiai panaudotinos tarpfazinės sąveikos ypatybės laikomos nepageidaujamais ir vengtiniais reiškiniais. Pritaikius pažangesnius matavimo metodus atsiveria naujos galimybės gilinti žinias apie tarpfazinę sąveiką ir reiškinius, kuriuos ji sukelia besikondensuojančiame dvifaziame tekėjime. Modeliuojant besikondensuojantį dvifazį tekėjimą, naudojamų korelacių pataisos koeficientų kitimo ribų platumas, vandens atveju, kelia daug abejonių jų naudingumu. Molekulinė dinamika net ir gana tolimoje perspektyvoje negalės būti praktiškai pritaikoma, tačiau

baigtinių skirtumų metodai, jau naudojami dvifaziam tekėjimui modeliuoti, turi tokią perspektyvą. Korektiškas tarpfazinės sąveikos su faziniais virsmis sprendimas yra didžiausias modernių Skaičiuojamosios fluidų dinamikos (CFD) programų paketų kūrėjų siekiamumas.

Lietuvos energetikos institute (LEI) tarpfazinės sąveikos ir kondensacijos tyrimai vykdomi nuo 1999 metų. Šiame straipsnyje apžvelgiami per pastaruosius dešimt metų atlikti eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Gauti rezultatai aktualūs tiek fundamentiniu, tiek praktiniu CFD vystymo ir panaudojimo plėtros aspektais. 2005–2015 m. buvo rengiamos keturios disertacijos: „Nesikondensuojančio ir besikondensuojančio tekėjimų parametrų skaitinis tyrimas“ (Stasys Gasiūnas, 2003–2007); „Dvifazio tekėjimo ypatybių panaudojimo pasyvioms aušinimo sistemoms tyrimas“ (Mindaugas Valinčius, 2005–2009); „Kondensacijos ir tarpfazinio paviršiaus nestabilumo ryšio tyrimas“ (Darius Laurinavičius, 2009–2013); „Vietinių reiškinų tarpfaziniame garo-vandens

paviršiuje tyrimas vykstant kondensacijai“ (Mindaugas Drūlia, 2013–2017). Šiuo laikotarpiu buvo vykdomi keturi biudžetiniai darbai: „Kondensacijos pliūpsnio tyrimas esant dvifazės sistemos nestabilumui“ (2005); „Kondensacijos įtakos tarpfazinio paviršiaus stabilumui tyrimas“ (2008); „Besikondensuojančio dvifazio tekėjimo eksperimentinis ir skaitinis tyrimas“ (2011); „Besikondensuojančios dvifazės tėkmės greičių lauko tyrimas horizontaliame stačiakampiame kanale“ (2014). Tyrimų rezultatai plačiai publikuoti: 7 straipsniai *Thomson Reuters* duomenų bazėje *Web of Science Core Collection* referuojamuose leidiniuose, 10 straipsnių mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse, 1 straipsnis kituose moksliniuose periodiniuose leidiniuose, 18 pranešimų konferencijose, iš kurių 9 tarptautinės; monografija „Evaporation/condensation of water. Unresolved issues. I. Phase change at low pressures, laminar conditions“ (Kazys Almenas, 2014).

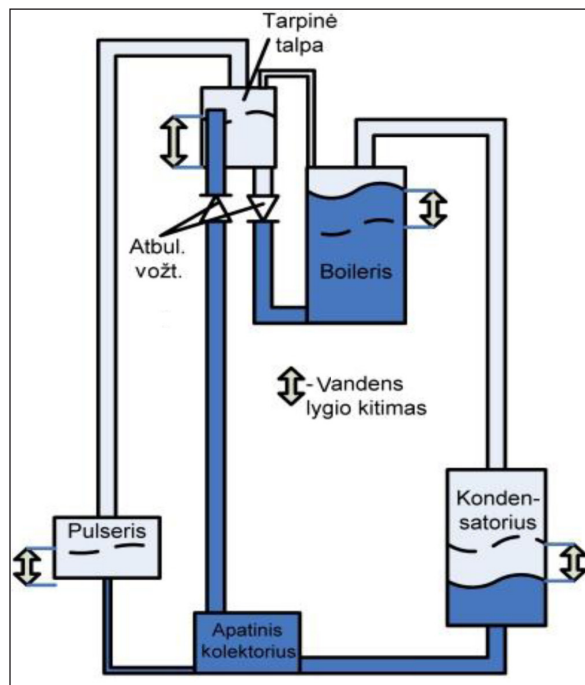
KONDENSACIJOS PLIŪPSNIŲ ŠILUMINĖ HIDRAULINĖ SISTEMA

Faziniai virsmai, kondensacija ir garavimas (virimas) – tai procesai, kurie pasireiškia daugelyje pramonės sričių: naftos, chemijos pramonėje, jie neatsiejami šiluminėse ir branduolinėse jėgainėse. Šie procesai yra sudėtiniai, netiesiniai ir norint spręsti kylančias aktualias problemas reikia atlikti sudėtingus ir išsamius tyrimus. Staigios kondensacijos sukeliama tekėjimai ir specifiniai reiškiniai gana plačiai nagrinėjami [1–6]. Tačiau pagrindinis šios krypties tyrimų uždavinys buvo nustatyti kondensacijos pasireiškimo ir jos sukeltamų reiškinų (skysčio tekėjimo, hidraulinio smūgio) sąlygas. Paprastai hidraulinio smūgio poveikis hidraulinei sistemai yra nepageidautinas, todėl siekiant saugiai eksploatuoti pramonės objektus mokslininkai pirmiausia nagrinėjo staigios kondensacijos sukeltą hidraulinio smūgio priežastis ir kaip jų išvengti. Tuo tarpu LEI mokslininkai pateikė kitokį šiluminės energijos transformavimo į mechaninį darbą būdą ir naują požiūrį į staigios kondensacijos reiškinio taikymą pramoniniame objekte. Ankstesniuose LEI tyrimuose buvo įrodyta, kad kondensacijos pliūpsnis gali būti sukeltas dirbtinai. Planuojant tolesnius tyrimus keltas tikslas – sukurti šiluminės

hidraulinės sistemos, kurioje vanduo cirkuliuoja dėl kondensacijos pliūpsnių, koncepciją ir pagrįsti sistemos veikimą ne tik avariniam aušinimui, bet ir normaliam darbo režimui.

Spręsdama iškeltą uždavinį LEI mokslininkų grupė sukūrė sistemos schemą, kurioje kontroliuojamo kondensacijos pliūpsnio reiškinys panaudotas šiluminės energijos transformavimui į darbą. Šiluminės-hidraulinės sistemos koncepcinė schema (1 pav.) susideda iš kontūro, kurio boileriulyje vanduo verda, o kondensatoriuje garas kondensuojasi. Sistemos darbui užtikrinti vanduo iš kondensatoriaus pumpuojamas į boilerį. Vietoje boilerio gali būti bet koks šilumą vandeniu perduodantis įrenginys, kurį avarijos atveju būtina patikimai aušinti. Tokia pasiūlyta koncepcinė sistema galėtų būti panaudota ne tik avariniam aušinimui, kai nutrūksta energijos tiekimas iš išorės bei sustoja cirkuliaciniai siurbiai, bet ir normaliam darbo režimui su pasyvia šilumnešio cirkuliacija. Tai ypač aktualu šiluminėje ar branduolinėje jėgainėje.

Ciklo pradžioje boileris beveik visiškai užpildytas vandeniu, o kondensatorius beveik tuščias. Tokios būsenos sistema veikia efektyviausiai dėl maksimaliai išnaudojamų šilumos perdavimo paviršių boileriulyje ir kondensatoriuje. Boileriulyje



1 pav. Šiluminės-hidraulinės sistemos koncepcinė schema

kaitinamas vanduo verda ir susidaro garas. Garas teka į kondensatorių ir jame kondensuojasi. Kadangi nėra priverstinės cirkuliacijos, t. y. siurblių, boileryje vandens lygis mažėja, o kondensatoriuje – didėja. Lygiagrečiai boilerio-kondensatoriaus kontūrai prijungtas papildomas įrenginys – „pulseris“, kuriame vandens lygis kinta kartu su vandens lygiu kondensatoriuje. Į pulserį įtekant šaltam vandeniui ir pakilus jo lygiui, analogiškai eksperimentų metu tyrinėtam atvejui (ankstesni LEI darbai [7]), įvyksta kondensacijos pliūpsnis. Jam įvykus, pulseryje susidaro žemo slėgio zona, link kurios dėl slėgio perkryčio teka garas ir vanduo. Tačiau vandens tiekimo į pulserį vamzdis yra labai mažo diametro, todėl srautas ribotas. Pagrindinis kelias atstatyti slėgių pusiausvyrą – vanduo turi tekėti iš apatinio kolektoriaus į tarpinę viršutinę talpą. Viršutinės talpos paskirtis – sumažinti slėgį, kai boileryje vis dar yra vandens. Atvamzdžio iš boilerio į tarpinę talpą reikia, kad tarp jų susilyginus slėgiams vanduo sutekėtų į boilerį. Šis atvamzdis taip pat yra labai mažo skersmens, todėl kondensacijos pliūpsnio metu garo srautas apribotas. Vandens tėkmės į boilerį linijoje įmontuotas atbulinis vožtuvas, neleidžiantis kondensacijos pliūpsnio metu vandeniui tekėti iš boilerio į tarpinę talpą. Taigi, proceso metu boileris vėl pripildytas vandens, kondensatorius beveik tuščias, o pulseryje esantis vanduo grįžta į kontūrą, ir ciklas kartojasi.

Kondensacijos pliūpsnio reiškinį vienmačiu programų paketu, koks yra RELAP5, prognozuoti labai sudėtinga [8]. Norint modeliuoti šiluminės-hidraulinės sistemos, kurioje vyksta kondensacijos pliūpsniai, veikimą, programų paketas

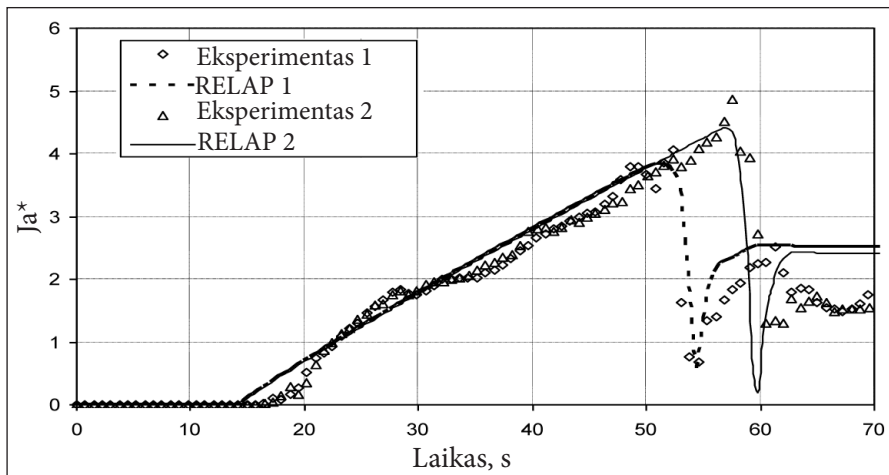
buvo modifikuotas ir trikdys (kondensacijos pliūpsnis) sukeltas dirbtinai pagal eksperimentinio matavimo duomenis [9]. Nors į RELAP5 „įdėtas“ kondensacijos pliūpsnio modelis ir nėra universalus, tačiau juo galima kondensacijos pliūpsnį atkartoti ir panaudoti modeliuojant visos šiluminės-hidraulinės sistemos veikimą, kai pats pradinis įvykis žinomas iš anksto. Tai leidžia nustatyti sistemos parametrų kitimą bėgant laikui, iš kurių galima spręsti apie sistemos būsenas, pereinamuosius procesus, efektyvumą ir darbo ciklą.

Efektyviai veikiančiame pulseryje norimo slėgio perkryčio kondensacijos pliūpsniai turi įvykti esant tam tikroms sąlygoms, t. y. kai suteka pakankamas peraušinto vandens kiekis. LEI mokslininkų parinktas ir tyrimuose buvo taikomas modifikuotas Jacobs'o kriterijus Ja^* :

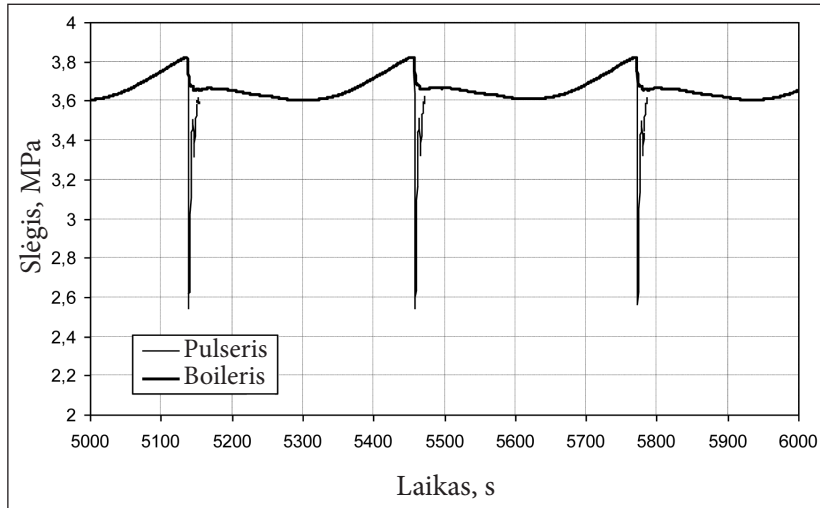
$$Ja^* = \frac{m_f(t) \cdot c_{p,f} \cdot (T^s(t) - T_f(t))}{m_g \cdot h_{fg}}; \quad (1)$$

čia: $m_f(t)$ – peraušinto vandens, esančio tūryje, masė, $c_{p,f}$ – savitoji skysčio šiluma esant pastoviam slėgiui, $T^s(t)$, $T_f(t)$ – soties ir vidutinės temperatūros, priklausomos nuo laiko, m_g – pradinė garo masė, h_{fg} – kondensacijos šiluma.

Ja^* yra šiluminės nepusiausviroi kiekybinis parametras, nusakantis dvifazės tėkmės kondensacijos potencialą. Skaičiuojant šį parametą buvo vertinamas įleidžiamo vandens kiekis bei garo kiekis pulseryje ir vamzdyje iki pulserio. Gautas geras rezultatų sutapimas (2 pav.) įrodo, kad eksperimentinių matavimų ir skaitinio tyrimo sąlygos buvo ekvivalencijos.



2 pav. Ja^* kriterijaus kitimas pulseryje, vandens srautas 38,2 (1) ir 37,8 (2) g/s

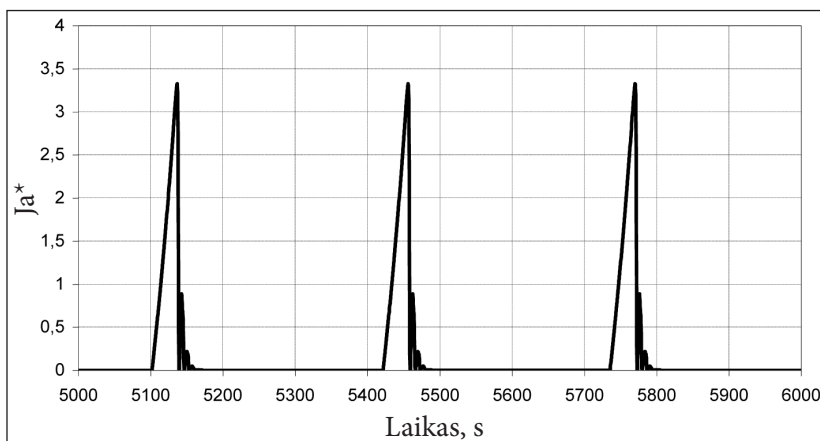


3 pav. Sistemos modeliavimo rezultatai. Slėgis pulseryje ir boilerio viršuje

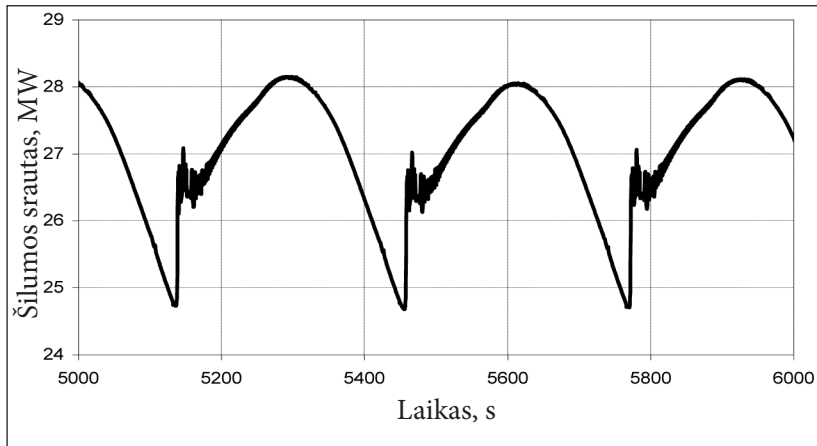
Siekiant patikrinti, ar gali vanduo cirkuluoti kontūre dėl vykstančių periodinių kondensacijos pliūpsnių, ir teoriškai patikrinti koncepcinės šiluminės hidraulinės schemos veikimą, atlikti skaitiniai tyrimai jau minėtu p. p. RELAP5. Kontūro geometrinės charakteristikos, kondensatorius ir boileris pasirinkti atitinkantys lengvojo vandens reaktoriaus realius įrenginius. Slėginiai indai kontūre išdėstyti pagal aukštį atsižvelgiant į Ignalinos AE specifiką, boilerio šildymo galia priimta 27 MW. Tokia galia lieka praėjus maždaug 1 parai po reaktoriaus sustabdymo, t. y. tada, kai reaktorius gali būti aušinamas vien tik natūralios cirkuliacijos būdu nenaudojant cirkuliacinių siurblių. Kadangi natūrali cirkuliacija nebuvo modeliuojama, į pulserį buvo įleidžiamas tokios temperatūros vanduo, kokios jis išteka iš kondensatoriaus.

Skaitinio tyrimo rezultatai rodo (3 pav.), kad proceso metu pulserio linijoje slėgis sumažėja, nors boileris yra beveik pilnas verdančio vandens. Jeigu pulseris būtų pajungtas be tarpinės talpos, jame slė-

gio nepavyktų sumažinti tol, kol neišgaruotų visas boileryje esantis vanduo, ir tokia šiluminė hidraulinė sistema su tuščiu boileriu veiktų neefektyviai, o galbūt ir pavojingai. Slėgis pulseryje kondensacijos pliūpsnio metu sumažėja net 1,2 MPa (nuo 3,8 iki 2,6 MPa), o pasiurbus vandens į tarpinę talpą nusistovi apie 3,6 MPa slėgis. Kylant vandens lygiui kondensatoriuje, jo efektyvumas mažėja, boileryje generuojama daugiau garo nei jo sukondensuojama, ir slėgis po truputį pradeda kilti. Toliau ciklas kartojasi. Šį cikliškumą labai gerai iliustruoja ir minėtas modifikuotas Ja^* kriterijus (4 pav.). Boileriye nuvedamas šilumos kiekis taip pat nėra nekintantis parametras (5 pav.). Boilerio efektyvumas priklauso nuo jame esančio vandens lygio – kuo daugiau vandens, tuo efektyvesnis šilumos nuvedimas, žemesnė sienelės temperatūra, o dėl didesnio temperatūrų skirtumo išorinis šaltinis gali atiduoti daugiau šilumos. Tai ir matyti – didžiausia nuvedama 28 MW galia tada, kai vandens lygis boileriye didžiausias (vidutinė 27 MW).



4 pav. Sistemos modeliavimo rezultatai. Kriterijus Ja^*



5 pav. Sistemos modeliavimo rezultatai. Šilumos srautas į boilerį iš išorės

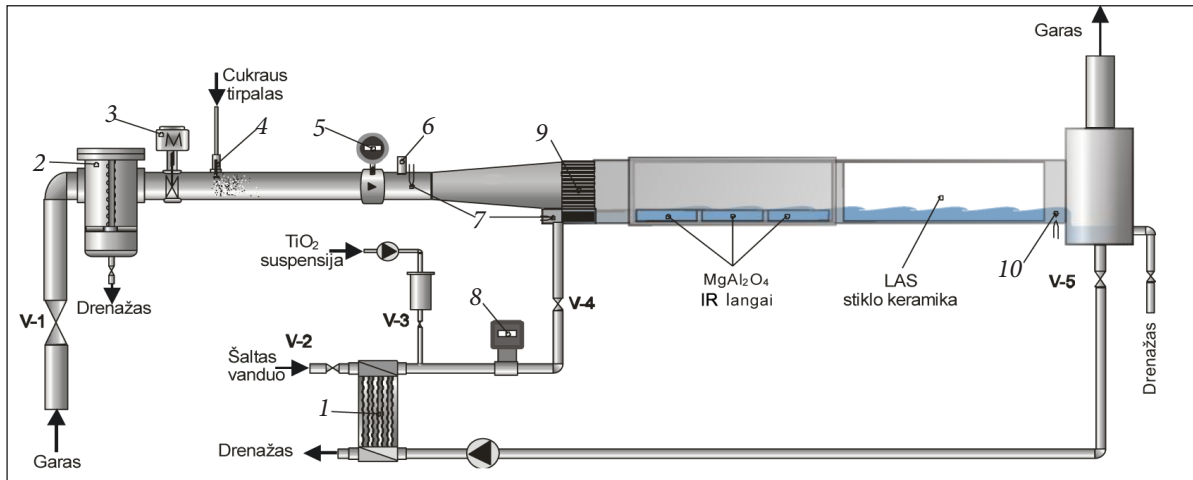
Koncepcijos patikros tyrimo rezultatai patvirtino, kad nagrinėta šiluminė hidraulinė sistema veikia kaip ir tikėtasi. Šis pavyzdys rodo, kaip ji gali būti pritaikyta branduolinėje jėgainėje ir atlikti pasyvaus aušinimo funkciją. Tokio tipo sistemos gali būti naudojamos ir kituose pramonės įrenginiuose, kur generuojama šiluminė energija ir reikia užtikrinti šilumnešio cirkuliaciją kontūre. Tokios sistemos privalumas sietinas su saugia eksploatacija, ji yra pasyvi, nenaudojama papildoma išorinė energija, nėra besisukančių dalių (kaip, pvz., siurbliuose). Vis dėlto siekiant pašalinti priimtas kai kurias griežtas kraštutines modeliavimo sąlygas (kondensacijos pliūpsnio prognozavimas, pradinis trikdys), reikėjo atlikti išsamius eksperimentinius tyrimus, taikyti pažangius modeliavimo, programinių paketų sujungimo metodus ir pan. Būtent kondensacijos pliūpsnio susidarymo sąlygoms ištirti ir buvo atliekami tolesni fundamentiniai eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Tyrimai buvo vykdomi trimis pagrindinėmis kryptimis:

- eksperimentinis garo sąveikos su vandeniu tyrimas stačiakampiame kanale;
- skaitinis garo srauto stačiakampiame kanale modeliavimas, siekiant nustatyti tarpfazinės šlyties įtampius;
- garo ir vandens paviršiaus sąveikos tyrimas, vizualizuojant sukeltą turbulenciją.

KONDENSACIJOS ĮTAKOS TARPFAZINEI SĄVEIKAI TYRIMAS

Daugelyje dvifazį stratifikuotą tekėjimą tyrusių eksperimentinių darbų buvo naudojami ilgi ir platus kanalai. Ilgais kanalais siekta gauti nusistovėjusį tekėjimą, platesni kanalai buvo naudojami siekiant

sumažinti šoninių sienelių įtaką. Tačiau tiriant kondensacijos reiškinius nusistovėjusio tekėjimo negali būti, todėl šiame tyrime LEI buvo naudojamas 1 m darbinio ilgio tarpfazinis paviršius, o siaurame kanale patogiau stebėti ir tirti reiškiniai, vykstančius tarpfaziniam paviršiui statmena kryptimi. Nestacionarus tekėjimo ir kondensacijos režimas bei siekis panaudoti termoviziją vandens temperatūros laukui registruoti nulėmė naudojamo eksperimentinio kanalo vidinius matmenis ($1,2 \times 0,02 \times 0,1$ m). Prieš tarpusavio kontaktą vandens ir garo tėkmės stabilizuojamos panaudojant iš daugybės lygiagrečių kanalėlių (skersmuo ~ 1 mm) sudarytą korinę prieškanalio struktūrą (6 pav. 9). Tokį stabilizavimo principą naudoja ir kiti tyrėjai [10]. Kanalo pradžioje garą nuo vandens skiria 160 mm ilgio horizontalus peilis, o už jo prasideda tiesioginė tarpfazinė sąveika. Slėgis kanale artimas atmosferiniam. Vandens ir garo įtekėjimo į kanalą ir ištekėjimo iš kanalo skerspjūviuose temperatūros matuojamos K tipo (Cr-Al) termopromis (6 pav. 7, 10). Vandens temperatūros laukas registruojamas termovizoriumi FLIR SC-5000. Eksperimentų metu garas į kanalą tiekiamas 4, 6 ir 8 m/s greičiai, jo temperatūra 102–107 °C, kiekvieno atskiro eksperimento metu ji buvo palaikoma 1 °C tikslumu. Garo greitis matuotas kanalo viduryje ir gale, 0,55 ir 1 m atstumu nuo kanalo pradžios, panaudojant Pito-Prandtliaus vamzdelį, sujungtą su elektroniniu skirtuminio slėgio matuokliu „Fuji Electric FCX-AII“. Skirtingų bandymų metu vandens vidutinis greitis kanale buvo 0,0014; 0,0028 arba 0,0056 m/s (debitas 0,025; 0,05 arba 0,1 m³/h), o jo pradinė temperatūra 25 arba 50 °C. Visų eksperimentų metu, esant skirtingiems vandens bei garo debitams ir siekiant išlaikyti vienodą 25 mm vandens lygį

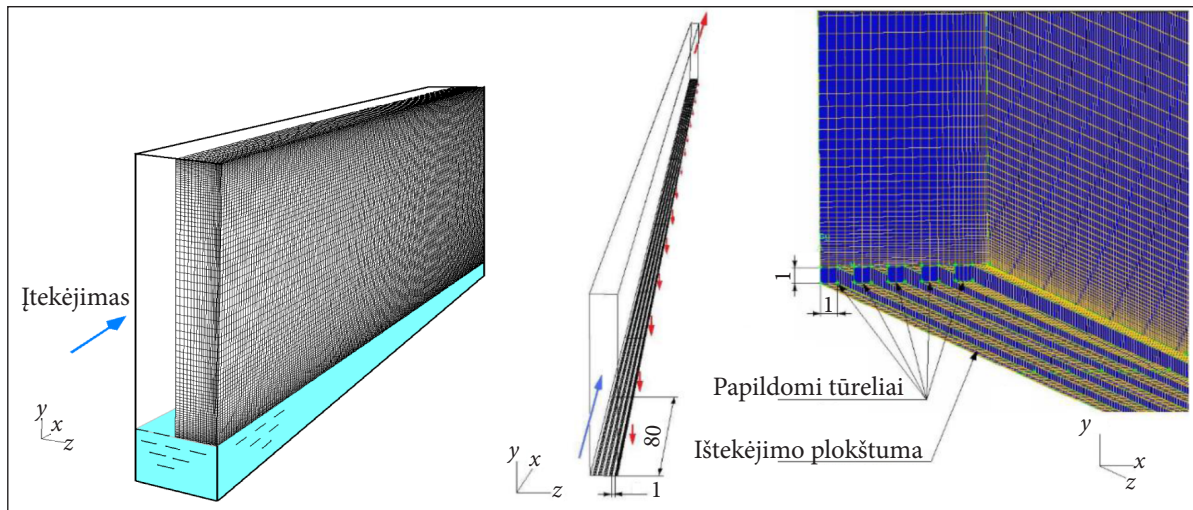


6 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – šilumokaitis; 2 – separatorius; 3 – vožtuvas su pavara; 4 – ultragarsis purkštukas; 5 – garo srautmetis; 6 – slėgmatis; 7 – termoporos; 8 – vandens srautmetis; 9 – prieškanalis; 10 – termoporių rinklė

visame kanalo ilgyje, buvo reguliuojamas kanalo posvyrio kampas.

Siekiant įvertinti tarpfazinę sąveiką, reikia nustatyti, kiek garas trikdo vandens paviršių bet kuriame tekėjimo skerspjūvyje. Tam reikia išmatuoti greičių profilius prie tarpfazinio paviršiaus. Techniškai racionalu tai atlikti tik keliuose vietose ir gautus duomenis panaudoti kuriant realybei adekvatų modelį. Tekant garui kanale virš šaltesnio vandens, vyksta garo kondensacija ant vandens paviršiaus. Šį procesą sumodeliuoti trimačiais programų paketais labai sudėtinga dėl kartu skaičiuojamų dviejų skirtingų fazių fluidų tekėjimo, vientisumo lygčių bei papildomai atsirandančių šilumos, masės ir momento perdavimo per tarpfazinį paviršių.

Deklaruojantys galimybę spręsti tokius uždavinius programiniai paketai intensyviai tobulinami, tačiau gaunami rezultatai skiriasi, dar nėra parengta universali patikima skaitinio modeliavimo metodika [11]. Tarpfazinės šlyties įtempiams nustatyti šiame tyrime buvo taikomas supaprastintas vienfazis trimatis skaitinis kanalo modelis (p. p. FLUENT). Supaprastinta modelio fizika kompensuojama sudėtingesne geometrija, t. y. priimta, kad garas išteka ne tik per pagrindinį ištekėjimą kanalo pabaigoje, bet ir per pusiau pralaidžią apatinę sienelę (išleidžiama 0–24 % garo). Ji kondensacijos metu imituoja tarpfazinį paviršių, per kurį nuvedama dalis garo tėkmės (garo kondensacija ant vandens paviršiaus). Ši, per apačią nuvedama dalis, apskaičiuota



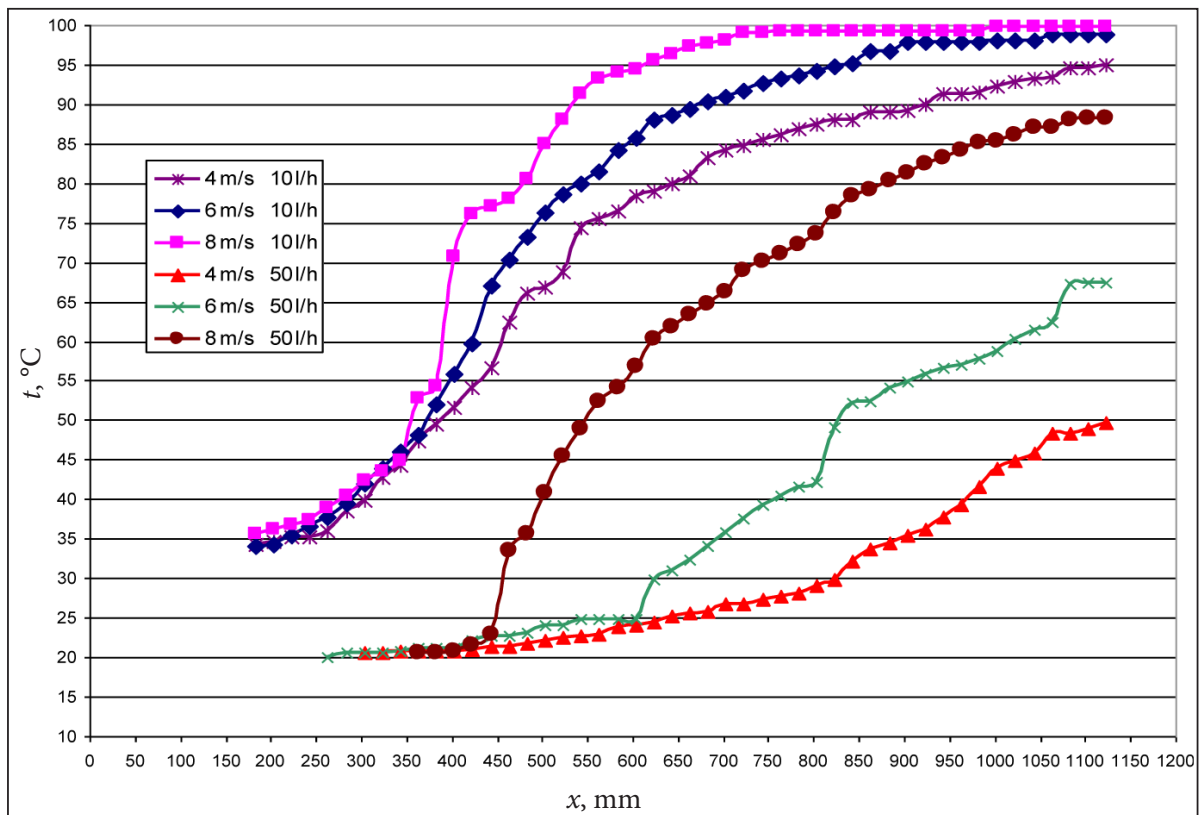
7 pav. Horizontalaus stačiakampio eksperimentinio kanalo skaitinis modelis (p/p FLUENT3D)

pagal natūrinių eksperimentų rezultatus, todėl modeliuojama garo tėkmė turėtų būti labai panaši į realiai virš vandens tekančią ir besikondensuojančią į jo paviršių. Tokia skaitinio modelio geometrija leido įvertinti garo tėkmės kitimą kanale. Kadangi garo tėkmė kanale turbulentinė ($Re = 6\ 000\text{--}12\ 000$), modeliuojant buvo taikytas standartinis $k\text{-}\omega$ turbulencijos modelis. Įtekėjimo turbulencijos kinetinė energija k ir sukurių disipacijos laipsnis ω įtekėjime buvo apskaičiuoti pagal empirines išraiškas, pateiktas p/p FLUENT. Matavimų ir skaičiavimų pagrindinės pradinės sąlygos apibrėžtos vienodais garo įtekėjimo greičio ir vandens tekėjimo srauto deriniais.

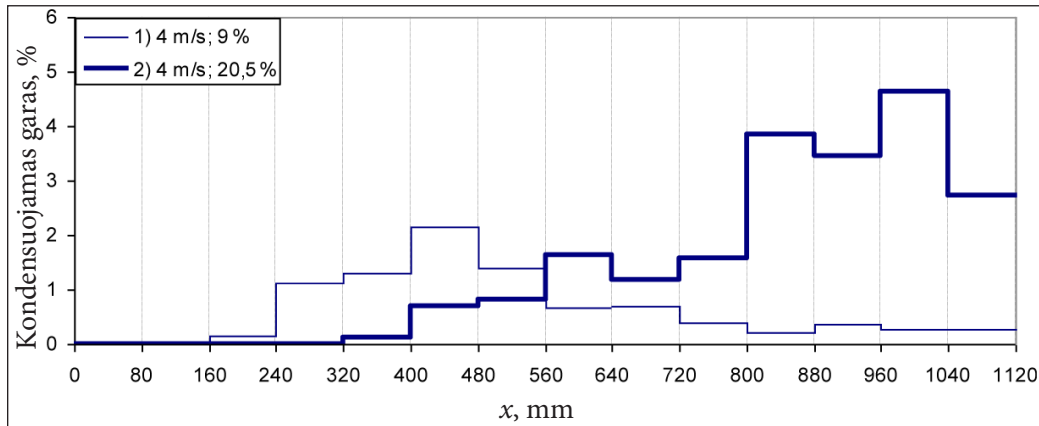
Kaip minėta, FLUENT3D modelyje garo ištekėjimas per apatinę pusiau pralaidžią sienelę priklauso nuo slėgio ir vyksta tolygiai per visą kanalo ilgį. Tačiau realybėje garas kondensuojasi ant vandens paviršiaus netolygiai pagal kanalo ilgį dėl kintančios vandens temperatūros, procesui taip pat įtakos turi šilumos pernešimo vandenyje ypatybės. Išmatuoti vidutinės vandens temperatūros profiliai (8 pav.) išilgai kanalo skirtingi, atsižvelgiant į garo įtekėjimo į kanalą greitį ir vandens tiekimo srautą.

Akivaizdu, kad esant 8 m/s garo įtekėjimo greičiui ir 50 l/h vandens tiekimo srautui ties 450 mm koordinate nuo įtekėjimo įvyksta kokybinis kondensacijos režimo pasikeitimas. Panašios vandens temperatūros profilio transformacijos matomos ir esant 8 m/s ir 10 l/h bei 6 m/s ir 50 l/h deriniams.

Pagal šiuos išilginius vandens temperatūros profilius apskaičiuoti kondensuojamo garo srautai. Vandens paviršių atstoja pusiau pralaidi modelio apatinė sienelė suskirstyta į 14 segmentų, kurių kiekvieno ilgis 80 mm (7 pav.), ir atskirai kiekvienam segmentui apskaičiuotas garo ištekėjimas, imituojantis kondensaciją (pvz., 9 pav.). Kondensuojamo išilgai kanalo garo srautas per iš dalies pralaidžią apatinę sienelę FLUENT modelyje, sąlygomis atitinkančiomis 10 l/h vandens debitą (0,005 m/s), pradeda mažėti dar nepasiekęs kanalo vidurio (9 pav. 1-a laužtė). Vanduo tiesiog pašyla ir nebelieka temperatūros skirtumo kondensacijai vyksti (žr. 8 pav.) Tačiau esant penkis kartus didesniai vandens srautui (9 pav. 2-a laužtė) kondensacijos intensyvumas didėja beveik iki pat kanalo pabaigos. Atrodo paradoksalu tai, kad nors garas perkaitintas, o vanduo peraušintas, nuo fazių kontakto



8 pav. Išmatuoti vidutinės vandens temperatūros profiliai pagal kanalo ilgį



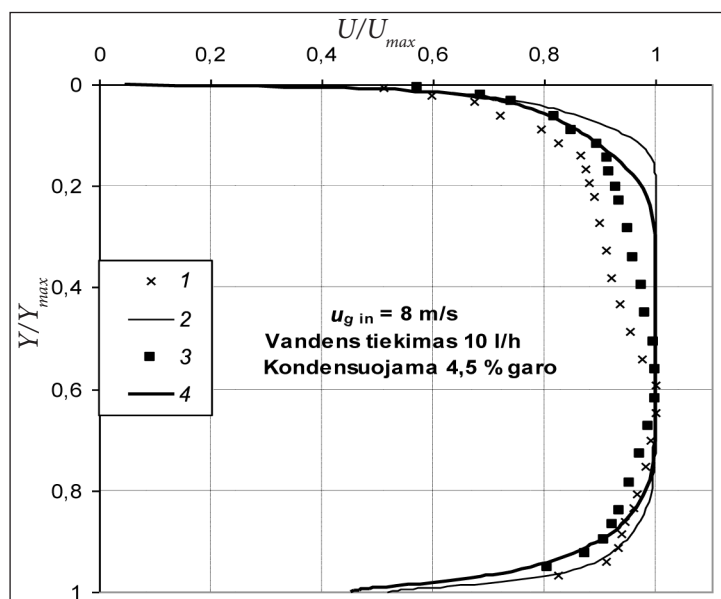
9 pav. Santykiniai FLUENT modelyje išvedami 4 m/s garo įtekės srautai, esant skirtingam suminiam santykiniam sukondensuojamo garo srautui 9 % (1) ir 20,5 % (2)

pradžios šilumos srautas ne mažėja, o didėja ir pasiekia maksimumą tik tam tikru atstumu. Tai paaiškinama tuo, kad po vandens paviršiumi susiformuoja didelis tankio, taip pat ir temperatūros, gradientas. Didėjant garo greičiui (visais nagrinėtais atvejais), kondensacijos intensyvumo pikas slenka kanalo pradžios link.

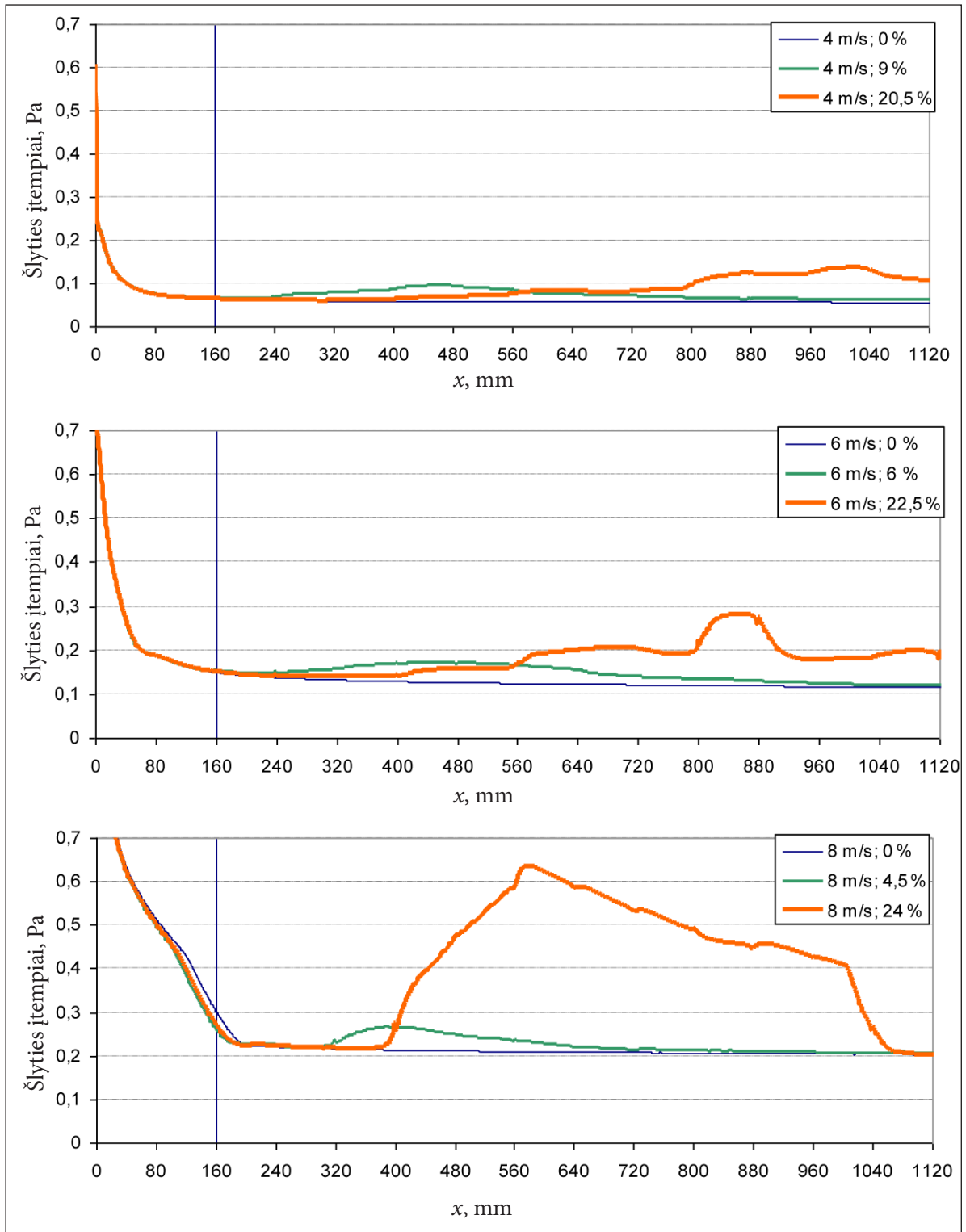
Kondensacija garo greičio profilio maksimumą perslenka arčiau kondensacijos paviršiaus ir suplonina hidrodinaminį pasienio sluoksnį. Į skaitinį modelį įvedus eksperimentiškai nustatytą išilginį sukondensuojamo garo srauto profilį (pvz., 9 pav.), o tada apskaičiuotus garo greičio profilius prie kondensacijos paviršiaus kontroliniuose taškuose sutapdinus su išmatuotaisiais (pvz., 10 pav.), gauti tarpfazinės šlyties įtempių profiliai (11 pav.).

10 pav. pateiktame sutapdintų greičio profilių pavyzdyje matomi neatitikimai rodo modelio neadekvatumą realiam eksperimentui. Tačiau apačioje (prie tarpfazinio paviršiaus) rezultatų atitikimo lygis pakankamas įvertinti tarpfazinę šlytį.

Iš natūrinių eksperimentų duomenų sumodeliuoti tarpfazinės šlyties įtempių profiliai leidžia įvertinti ir palyginti kondensacijos intensyvumo daromą įtaką. Nagrinėjant 11 pav. pateiktus modeliavimo rezultatus reikia turėti omenyje, kad kondensaciją imituojantis ištekėjimas per apatinę modelio sienelę pradedamas nuo 160 mm. 11 pav. aiškiai matyti, kad *kondensacijos intensyvumo didėjimas gerokai stiprina tarpfazinę sąveiką*. Esant 8 m/s garo įtekėjimo



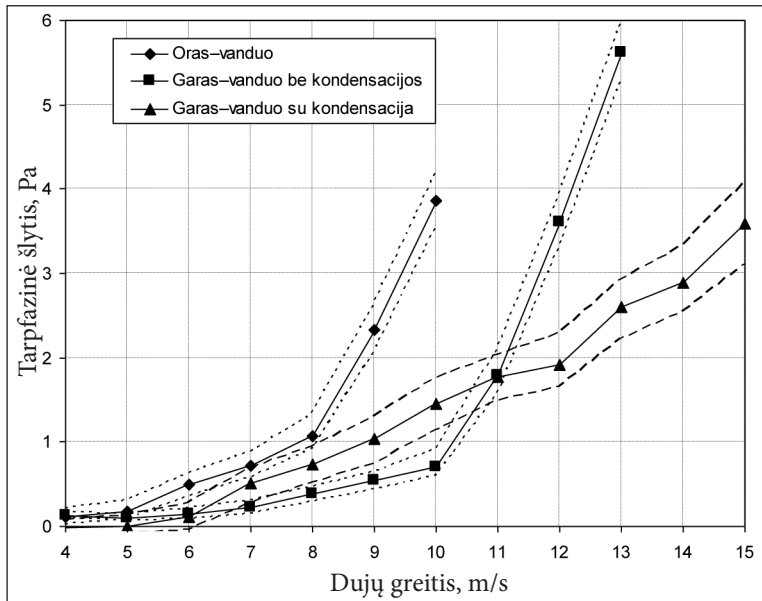
10 pav. Garo greičio profiliai kanale skirtingu atstumu nuo kanalo pradžios. 1 – matavimas 0,55 m, 2 – FLUENT 0,55 m, 3 – matavimas 1 m, 4 – FLUENT 1 m



11 pav. FLUENT modelių apskaičiuoti šlyties įtempiai išilgai kanalo esant skirtingoms garo įtekmei ir santykinei jos kondensacijai

greičiui ir 24 % santykinei jo kondensacijai, tarpfazinės šlyties įtempimų pikas daugiau nei keturis kartus didesnis, palyginti su įtempiais nesant kondensacijos. Kita svarbi pastaba yra ta, kad

didžiausio kondensacijos intensyvumo, taip pat ir tarpfazinės šlyties buvo tikimasi fazijų kontakto pradžios vietoje, nes kanalo pradžioje yra didžiausias vidutinis garo ir vandens temperatūrų



12 pav. Pagal slėgio nuostolius apskaičiuoti tarpfazinio paviršiaus šlyties įtempiai

skirtumas. Toliau vykstant kondensacijai ir mažėjant temperatūros skirtumui kondensacija turėtų slopti asimptotiškai. Tačiau, nagrinėjant 11 pav., tik 8 m/s 4,5 % režimo atvejis į tai panašus. Visais kitais atvejais rezultatai aiškiai rodo, kad vidutinio temperatūros skirtumo tarp fazių įtaka yra nustelbiama kitų reiškinų, kurie aptariami kituose skyriuose, sąveikos.

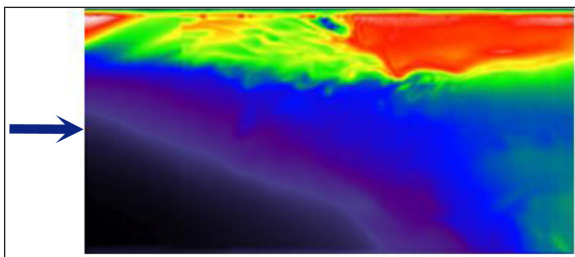
Lygiagrečiai šiam FLUENT modeliavimui buvo vykdomi statinio slėgio nuostolių tyrimai, esant skirtingiems dvifazio tekėjimo deriniams. Statinio slėgio nuostoliai susidaro dėl trinties į sienelės ir vandens paviršių. Pašalinus trinties į kietas sienelės dedamąją, apskaičiuotas vidutinės tarpfazinės trinties priklausomumas nuo garo tekėjimo greičio ir kondensacijos. Palyginus 12 pav. ir 11 pav. rezultatus gautas geras vidutinių tarpfazinio paviršiaus šlyties įtempį atitikimas patvirtina abiejų metodų patikimumą.

Kai virš vandens teka oras, jo greičiui esant apie 4 m/s, pradeda formuotis kapiliarinis bangavimas. Garo tankis dvigubai mažesnis nei oro, todėl bangavimas prasideda ties 6 m/s. 12 pav. matoma, kad būtent toje zonoje, besikondensuojančio tekėjimo tarpfazinės šlyties įtempiai viršija nesikondensuojančio. Tai įrodo, jog kondensacija šiame intervale (tirtuose režimuose 6–11 m/s) turi įtakos tarpfazinio paviršiaus stabilumui ir jį mažina. Tai yra svarbi išvada, nurodanti, kad *kondensacijos pliūpsnio eiga priklauso nuo nestabilumų, kylančių tarpfaziniame paviršiuje.*

TURBULENCIJOS SUSIŽADINIMO VIZUALIZACIJA

Paaikėjus, kad, skirtingai nei tikėtasi, kondensacijos intensyvumo kitimas išilgai termiškai nepusiausviro dvifazio tekėjimo nėra asimptotinis, reikėjo ištirti to priežastis. Termografija, kuri sėkmingai taikoma vandens temperatūrai matuoti tiriant dvifazį tekėjimą [12, 13], buvo pasirinkta dėl didelės temperatūros lauko skiriamosios gebos ir aukšto matavimo dažnio. Skirtinguose skerspjūviuose ir esant skirtingiems garo greičio bei vandens debito deriniams termovizoriumi buvo registruojama temperatūros lauko kaita. Pagal sudarytą ir patikrintą vandens temperatūros matavimo metodiką dvimačiai temperatūros laukai buvo išmatuoti 90 matavimo taškų į 1 mm² skyra. Temperatūros lauko matavimo dažnis buvo 50 Hz. Analizuojant rezultatus atkreiptas dėmesys į intensyvios turbulencijos suaktyvėjimo zoną, kurios pasireiškimo vieta priklauso nuo garo / vandens tekėjimo greičio ir temperatūros skirtumų. Kartu tekėdami garas ir vanduo sąveikauja, todėl svarbiausias nagrinėjamo dvifazio besikondensuojančio tekėjimo parametras yra garo ir vandens greičių skirtumas. Tarpfazinis paviršius veikiamas tarpfazinės trinties jėga, kuri priklauso nuo vietinio tarpfazinio greičio. Vykstant kondensacijai, vandens paviršius garo tekmei tampa „pralaidžia sienele“. Todėl esant pastoviam vidutiniam fazių greičių skirtumui vietinė

jo reikšmė prie tarpfazinio paviršiaus gali kisti priklausomai nuo kondensacijos intensyvumo. Dėl tarpfazinės sąveikos pasroviui besikeičiančių sąlygų vietinis tarpfazinis greitis iš pradžių mažėja, kadangi gerokai greičiau tekantis garas dėl trinties ir stabdomas, ir tekėjimo kryptimi stumia bei „šiauria“ vandens paviršių. Tarpfazinio paviršiaus greitis išilgai kanalo nuolat didėja (įgreitindamas ir po paviršiumi esantį vandenį), todėl vietinis tarpfazinis greitis toliau mažėja. Suintensyvėjusi kondensacija padidina garo greitį prie pat vandens paviršiaus. Kondensacijai slopstant, kartu mažėja ir vietinis tarpfazinis greitis. Termonuotraukoje (13 pav.) gerai matoma šių procesų sukulto turbulencijos suaktyvėjimo vandenyje zona.



13 pav. Turbulencijos suaktyvėjimo zonos šiluminė nuotrauka (vidutinis vandens greitis 0,014 m/s, įtekančio vandens temperatūra 25 °C, garo įtekėjimo greitis 12 m/s)

Nagrinėjant tyrimo rezultatus, vaizdinę informaciją ir atlikus vykstančių procesų tarpusavio ryšių analizę sudaryta galima turbulenciją sužadinančios tarpfazinės sąveikos seka:

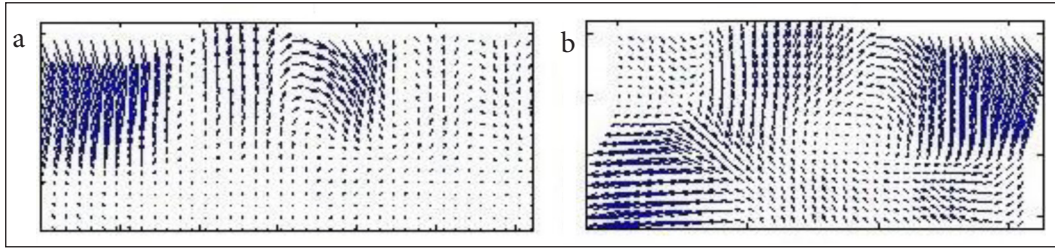
- kylant vandens temperatūrai mažėja jo klampa ir tankis;
- veikiant Archimedo jėgai karštas mažesnio tankio vanduo laikosi prie paviršiaus ir po juo susiformuoja plona, labai didelio temperatūros gradiento zona;
- šiame sluoksnyje vis kylant temperatūrai mažėja klampa ir Re didėja sparčiau, palyginti su giliau ir mažesniu greičiu tekančiu šaltesniu vandeniu. Dėl to po tarpfaziniu paviršiumi ploname sluoksnyje prasideda turbulencija;
- 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 (kaip

matyti 10 pav.) ir dar didesne jėga stumia tarpfazinį paviršių;

- dėl vandens pagreitėjimo prie paviršiaus ir vienodo lygio per visą kanalo ilgį palaikymo (žr. 6 pav.) vandens tekėjimas apačioje lėtėja, sustoja ar netgi keičia kryptį į priešingą;
- tarpfazinis paviršius destabilizuojamas ir vandens sūkuriai pasroviui didėja, kol pasiekia apatinę kanalo sienelę.

Ši grįžtamaisiais ryšiais susijusių procesų visuma paaiškina pradžioje silpnos kondensacijos eksponentinį išaugimą ir turbulencijos suintensyvėjimą. Šio reiškinio aktyviausios fazės – turbulencijos susižadavimo vieta kanale priklauso nuo garo ir vandens greičio derinio. Tačiau kondensacijos intensyvumo ir tarpfazinės sąveikos eksponentinį augimą sustabdo vandens šilimas. Toliau tekant kanalu garo-vandens šiluminė nepusiausvira sparčiai mažta ir, nuslopus kondensacijai, tarpfazinio paviršiaus šlytis vėl sumažėja (žr. 11 pav.). Kanalo gale vanduo jau yra pašilęs, o vandens maišymosi intensyvumas ir sūkurių dydis yra nepalyginamai mažesni nei turbulencijos suaktyvėjimo zonoje. Šių įžvalgų, paremtų tyrimo rezultatais, dėka gauta labai svarbi išvada, kad *dvifazės tėkmės kondensacijos potencialas Ja^* tiesiškai priklauso nuo vandens debito ir temperatūros, tačiau turbulencijos susižadimui šių vandens parametrų įtaka nėra tiesinė. Jų gana plataus intervalo kitimas nedaro reikšmingos įtakos turbulencijai, be to, abu turi ir priešingas, iš dalies vienas kitą kompensuojančias, įtakas.*

Tyrimo metu šiluminiai 2D laukai prie kanalo sienelės buvo fiksuojami didelės skyros ir dažnio termovizine kamera. Kadangi vandenyje vyrauja šilumos perdavimas konvekcija, tai kintant išmatuotam temperatūros laukui tuo pačiu fiksuojamas ir greičių laukas. Vizualiai stebint termovizoriumi nufilmuoto tekėjimo temperatūros lauko kitimą aiškiai matomi sūkuriai, pagal kuriuos galima nustatyti tekėjimo režimą. Norint objektyviai įvertinti tekėjimo struktūrą, reikia matematinio šiluminių vaizdų apdorojimo ir tekėjimo struktūros įvertinimo. Šiluminiams vaizdams analizuoti pritaikytas kombinuotas vietinio-bendrojo (*CLG combined local-global*) [14] metodas, fiksuojantis tiek tankius, tiek glotnius greičių laukus, ir leidžiantis aptikti vandens tėkmės turbulenciją. Tai aiškiai matoma nagrinėjant vandens turbulencijos vektorinius laukus, kai vyksta garo tėkmės sukelta vandens turbulencija po paviršiumi (14a pav.). Tai patvirtina



14 pav. Vandens tekėjimo greičio vektoriniai laukai: a – turbulencija prie vandens paviršiaus, b – visą vandens skerspjūvį apėmusi turbulencija

iškeltą hipotezę, kad kai įkaitęs ir mažiau klampus paviršinis vanduo vis labiau įgreitinamas virš jo tekančio garo, turbulencija plinta gilyn ir, atnaujindama paviršių šaltesniu vandeniu, intensyvina kondensaciją. Vandens aukštį apimantys dideli sukūriai užfiksuoti, kai vyksta intensyvios, visą vandens skerspjūvį apimančios, turbulencijos sužadimas (14b pav.).

IŠVADOS

Kondensacijos pliūpsniais varomos šiluminės hidraulinės sistemos koncepcija gali būti pritaikyta branduolinėse jėgainėse, ji tinkama išpildyti pasyvaus aušinimo funkciją. Tokia sistema gali būti taikoma ir kituose pramonės įrenginiuose, kur generuojama šiluminė energija ir reikia priverstinės cirkuliacijos kontūre. Tokios sistemos privalumas sietinas su saugia eksploatacija, nes ji yra pasyvi, jai nereikia papildomos išorinės energijos. Tačiau tam, kad ši koncepcinė sistema veiktų, reikia išsamiai ištirti kondensacinio pliūpsnio reiškinį ir nustatyti jo susidarymo sąlygas. Tuo tikslu buvo atliekami eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai, leidžiantys daryti tokias išvadas:

1. Kondensacijos intensyvumo didėjimas gerokai stiprina tarpfazinę sąveiką, ir kondensacijos pliūpsnio eiga priklauso nuo nestabilumų, kylančių tarpfaziniame paviršiuje.

2. Dvifazės tėkmės kondensacijos potencialas Ja^* tiesiškai priklauso nuo vandens debito ir temperatūros, tačiau turbulencijai susižadinti šių vandens parametrų įtaka nėra tiesinė. Jų gana plataus intervalo kitimas nedaro reikšmingos įtakos turbulencijai, be to, abu veiksniai turi ir priešingas, iš dalies vienas kitą kompensuojančias, įtakas.

3. Atlikti tyrimai parodo, kad vandens turbulencija gali būti apskaičiuojama ir vizualizuojama

tekėjimo šiluminių vaizdų seką apdorojant kombinuotu vietinio-bendrojo Optinio srauto analizės metodu. Apibendrinus vektorinius vandens greičių laukus, šie duomenys gali būti panaudoti dvifazio besikondensuojančio tekėjimo turbulencijos intensyvumui prognozuoti.

Gauta 2016 06 30
Priimta 2016 09 09

Literatūra

1. Block J. A. Condensation-driven fluid motions. *International Journal of Multiphase Flow*. 1980. Vol. 6. No. 1–2. P. 113–129.
2. Štrubel J. L., Tiselj I. Condensation of the steam in the horizontal steam line during cold water flooding. *International Conference Nuclear Energy for New Europe 2006, September 2006, Portorož, Slovenia*. P. 18–21.
3. Kryukov A. P., Yastrebov A. K. Vapor condensation at sudden contact with cold liquid in non-equilibrium conditions. *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference IHTC14-22625*. 2010.
4. Hughes E. D., Duffey R. B. Direct contact condensation and momentum-transfer in turbulent separated flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 1991. Vol. 17(5). P. 599–619.
5. Khan A., Haq U. N., Chughtai I. R., Shah A., Sanaullah K. Experimental investigation of the interface between steam and water two phase flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 521–532
6. Louahlia-Gualous H., Mecheri B. Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube. *Applied Thermal Engineering*. 2007. P. 1225–1235.

7. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Investigation of condensation implosion event. *Heat Transfer Research*. 2004. Vol. 35. Iss. 78. P. 531–548.
8. RELAP5/MOD3.3 code manual.
9. Almenas K., Pabarčius R., Šeporaitis M. Design and tests of a device for the generation of controlled condensation implosion events. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. Iss. 3. P. 32–41.
10. 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, Vol. 2, Washington, DC, USA. Inc.* Paper IHTC14-22986. P. 227–234.
11. Bestion D. The difficult challenge of a two-phase CFD modelling for all flow regimes. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, Vol. 279. P. 116–125.
12. Hetsroni G., et al. Infrared temperature measurements in micro-channel and micro-fluid systems. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Vol. 20. P. 853–868.
13. Kim T. H., et al. Measurements of two phase flow and heat transfer parameters using infrared thermometry. *International Journal of Multiphase Flow*. 2012. Vol. 40. P. 56–57.
14. Jara W. J., Cerda M., Delpiano J., Hartel S. An implementation of combined local-global optical flow. *Image Processing on Line*. 2015. Vol. 5. P. 139–158.

Marijus Šeporaitis, Mindaugas Valinčius,
Stasys Gasiūnas, Darius Laurinavičius, Raimondas
Pabarčius, Algirdas Kaliatka, Kazys Almenas

INVESTIGATION OF INTERFACIAL INTERACTION AND CONDENSATION

Summary

An overview of the numerical and experimental investigations of condensation of two-phase flow performed in 2005–2015 is presented in the article. The concept of thermal hydraulic scheme, in which coolant circulates driven by condensation, as well as the experimental facility, employed investigation methods and obtained results are presented. The influence of condensation intensity on interfacial shear was investigated combining experimental data and numerical results. The examination of the turbulence structure in the experimental rectangular channel using optical methods of thermography and mathematical image analysis revealed the phenomenon of the turbulence self-excitation in condensing two-phase flow.

Keywords: condensation, turbulence, two-phase flow, interfacial interaction