

Dvifazio vienkomponenčio ir dvikomponenčio stratifikuoto srauto pasvirusiame kanale eksperimentinis ir skaitinis tyrimas pastovaus garingumo sąlygomis

Mindaugas Valinčius,

Marijus Šeporaitis,

Raimondas Pabarčius,

Egidijus Babilas

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

Straipsnyje pristatomi atlikti eksperimentiniai ir skaitiniai dvifazio vienkomponenčio ir dvikomponenčio srauto horizontaliame stačiakampiame ($1200 \times 100 \times 20$) kanale tyrimai. Pagrindinis čia pristatomo darbo tikslas buvo eksperimentiškai nustatyti kanalo pasvirimo kampą, kurio reikia išlaikyti vienodą garingumą visame kanale, esant tam tikram dujų greičiui, taip pat nustatyti, ar programų paketas RELAP5 tinkamas šiam uždaviniui. Tam buvo palyginti eksperimentiniai rezultatai su skaitinių tyrimų rezultatais bei kitų autorių duomenimis. Tyrimai atlikti su dvikomponenčiu oro–vandens srautu bei vienkomponenčiu garo–vandens srautu. Garo–vandens srauto atvejai buvo du – su kondensacija ir be kondensacijos. Dujų greitis kanalo įtekėjime kito nuo 4 m/s iki 15 m/s. Tyrimai parodė, kad programų paketas RELAP5 yra tinkamas tik tam tikrame intervale vienkomponenčiam srautui modeliuoti. Norint pakartoti eksperimentinius tyrimus, reikia programų paketą pritaikyti šiam nagrinėjamam uždaviniui.

Raktažodžiai: stratifikuotas dvifazis srautas, kondensacija, horizontalus stačiakampis kanalas, pasviręs kanalas, tarpfazinė trintis, RELAP5 modeliavimas

1. ĮVADAS

Kondensacija dvifaziame sraute yra labai svarbus procesas moksliniu ir praktiniu požiūriu. Tarp fazių gali nebūti pusiausvyros, todėl šilumos, momento ir masės mainai tarp fazių komplikuoja sprendžiamą problemą. Kondensacijos pliūpsnis yra labai greitas kondensacijos padidėjimas, sukeliantis vietinius slėgio skirtumus. Šitie skirtumai gali būti gana dideli ir sukelti avarijas, kai sugadinamas komponentas arba net visa sistema. Šis reiškinys dar vadinamas kondensacijos hidrauliniu smūgiu, ir dauguma kitų mokslininkų tyrinėjimų buvo skirta nustatyti, kaip jo išvengti [1, 2]. Tačiau gauti slėgio pokyčiai gali būti panaudoti mechaniniam darbui atlikti. Prieš kuriant šiluminę-hidraulinę sistemą, patikimai veikiančią tokiu principu, reikia iširti patį fizikinį reiškinį ir jo atsiradimo bei vystymosi sąlygas.

Lietuvos energetikos institute (LEI) atliekama dvifazio srauto stačiakampiame kanale tyrimų studija [3, 4]. Ši studija yra pagrindinės tyrimų programos dalis, kurios tikslas – sukurti kondensacijos pliūpsnio principu veikiančią šiluminę-hidraulinę sistemą, taip pat pagrįsti jos veikimą. Pagrindinės tyrimų programos pirmojoje stadijoje buvo tiriamas, ar kondensacijos pliūpsnis gali įvykti kontroliuojamai. Šiuo tikslu buvo sukurtas eksperimentinis stendas, pavadintas „pulseriu“ [5, 6], ir jame buvo atlikti eksperimentai. Buvo nustatyta, kad kondensacijos pliūpsnis gali įvykti kontroliuojamai, tačiau iškilo daug klausimų (pvz., ar kondensacija turi įtakos tarpfaziniam paviršiu?), kuriuos reikia atsakyti plėtojant šiluminę-hidraulinę sistemą.

Antrojoje (einamojoje) stadijoje bus iširta kondensacijos įtaka tarpfazinio paviršiaus stabilumui. Svarbiausias mechanizmas, kuris lemia kondensacijos pliūpsnį, yra garo ir vandens tarpfazinio paviršiaus stabilumo sutrikdymas. Buvo iškelta hipotezė, kad kondensacija turi įtakos tarpfaziniam paviršiu. Tai yra esant horizontaliai stratifikuotam dvifaziam vienkomponenčiam (garas–vandeniu) srautui ir vykstant kondensacijai, tarpfazinio paviršiaus nestabilumas atsiranda esant mažesniams dujų greičiams, nei kai kondensacijos nėra (priimant, kad kitos sąlygos tokios pačios). Tyrimams sukonstruotame eksperimentiniame stende [3, 4] buvo atlikti eksperimentai.

Prieš konstruojant realią sistemą, naudinga sumodeliuoti jos veikimą naudojantis programų paketu. Tai leidžia nustatyti silpnąsias sistemos vietas ir optimizuoti ją be didelių investicijų. LEI turi sukauptą didelę patirtį modeliuojant programų paketu RELAP5, kuris naudojamas sudėtingų sistemų modeliavimui. Dvifazės sistemos modeliavimui naudojant RELAP5, reikia įsitikinti, kad šis programų paketas yra tinkamas nagrinėjamam uždaviniui. Tarpfazinė trintis dėl greičių skirtumo yra pagrindinė tarpfazinio paviršiaus nestabilumo priežastis. Todėl svarbu nustatyti šio programų paketo galimybes apskaičiuoti šią trintį. Tam buvo atlikti analogiški eksperimentai ir skaitiniai tyrimai bei palyginti jų rezultatai. Šiame straipsnyje pateiktas tarpfazinės sąveikos eksperimentų rezultatų palyginimas su modeliavimo rezultatais, gautais naudojant RELAP5 mod3.3 [7] programų paketą. Taip pat rezultatai buvo palyginti su kitų autorių duomenimis. Daugumoje darbų, kuriuose pristatomi dvifazio

srauto horizontaliame kanale tyrimai, į vandens lygio kitimą neatsižvelgiama ir aptikti tik Wallis ir Dobson [8] darbai, kur pateikiami tokių tyrimų rezultatai. Detalesnė jų rezultatų analizė pateikta 5 skyriuje.

2. EKSPERIMENTAI

2.1. Eksperimentinis stendas

Eksperimentinio stendo schema pateikta 1 pav. Pagrindinė dalis yra stačiakampis 1,2 m ilgio, 0,02 m pločio ir 0,1 m aukščio kanalas (1). Kanalo šonuose įrengti skaidrūs langai procesų vizualiam stebėjimui. Visas eksperimentinis stendas izoliuotas, siekiant apriboti šilumos mainus su aplinka. Bandymai gali būti atliekami tiek vienkomponenčiu, tiek dvikomponenčiu srautu.

2.2. Tyrimų eiga

Eksperimentai buvo atlikti su dviejų tipų dujomis – garu ir oru. Eksperimentai su garu taip pat buvo dviejų tipų – su kondensacija ir be jos. Skysčio fazė visada buvo vanduo. Prieš atliekant eksperimentus, kanalas buvo nustatomas į horizontalią padėtį. Kanalas buvo užpildomas vandeniu iki reikiamo lygmens (t. y. 25 mm, garingumas kanale $\alpha = 0,75$). Tuomet tam tikru greičiu buvo pradėdamos tiekti dujos. Atliekant eksperimentus su garu, tam tikrą laiką kanalu buvo leidžiamas garo srautas, kad kanalo korpusas sušiltų ir būtų pasiektos stacionarios pradinės sąlygos.

Dėl tarpfazinės trinties vanduo yra stumiamas ir jo lygis kanalo gale tampa aukštesnis. Norint palaikyti pastovų garingumą per visą kanalo ilgį ši trinties jėga kompensuojama panaudojant vandens sunkio jėgą. Tai yra kanalas pakreipiamas taip, kad vandens lygis vėl taptų vienodas. Kuo didesnis fazių srauto greičių skirtumas, tuo stipresnė tarpfazinė sąveika ir didesnis kanalo pasvirimo kampas yra reikalingas tam kompensuoti. Iš pasvirimo kampo apskaičiuota sunkio jėga yra netiesioginis tarpfazinės trinties rodiklis. Pasvirimo kampai buvo maži, todėl buvo matuota, kiek nuleidžiama kanalo priekinė dalis, o pasvirimo kampas apskaičiuotas naudojantis trigonometrinėmis formulėmis.

Eksperimentai su oro–vandens dvifaziu srautu buvo atlikti aplinkos sąlygomis, t. y. $t_v = t_a = \sim 13$ °C. Priverstinė vandens cirkuliacija nebuvo inicijuota (tik vidinė cirkuliacija kanale), o oro greitis kito nuo 4 iki 10 m/s. Esant didesniems oro greičiams vis dar buvo galima atlikti eksperimentus, bet dėl didelių bangų buvo sudėtinga vizualiai integruoti realiaame laike ir nustatyti tikrąjį vandens lygį kanale. Ypač kanalo pabaigoje, kur bangos buvo didžiausios. Esant mažesniems dujų greičiams nei 4 m/s fazių sąveika buvo per maža, kad sukeltų nestabilumus, ir tarpfazinis paviršius išliko lygus.

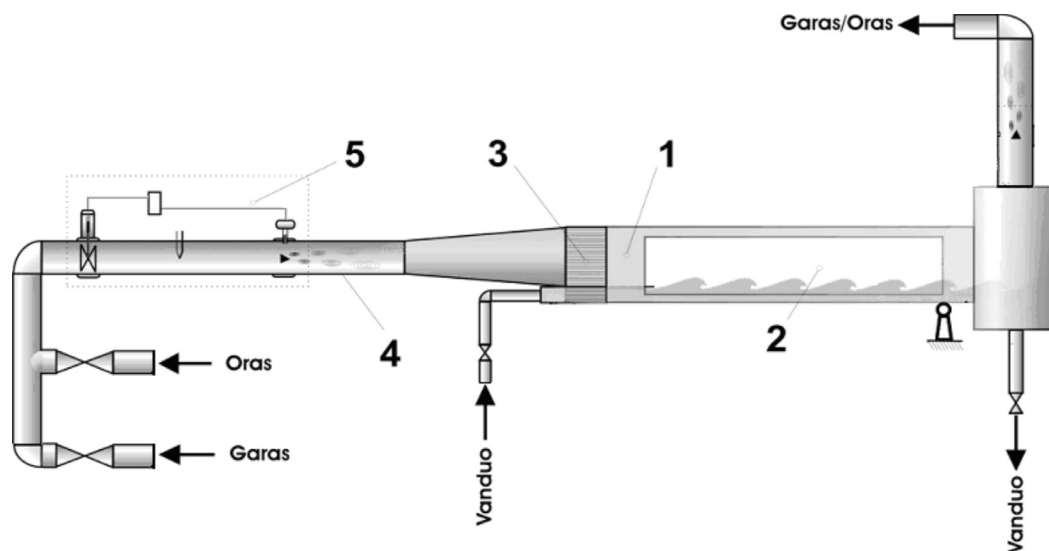
Eksperimentai vandens–garo dvifaziame sraute be kondensacijos buvo atlikti taip pat vandeniui netekant kanale (tik vidinė cirkuliacija kanale). Garų temperatūra buvo $t_g = 103$ – 108 °C, vandens temperatūra buvo $t_v = 99$ °C. Garo greitis kito nuo 4 iki 13 m/s.

Eksperimentai vandens–garo dvifaziame sraute su kondensacija buvo atlikti esant vandens srautui per kanalą $0,050$ m³/h. Vandens pratekėjimo kanalu greitis neturi įtakos tarpfazinio paviršiaus stabilumui, kadangi yra labai mažas ($\sim 0,027$ m/s), palyginus su dujų greičiu, bet srautas yra būtinas kondensacijai palaikyti. Kondensacijos srautas nebuvo apskaičiuotas, nes kol kas eksperimentiniame stende nesumontuota reikalinga įranga. Ateityje numatoma patobulinti eksperimentinį stendą, kad būtų galima apskaičiuoti kondensacijos srautą. Vandens temperatūra kito išilgai kanalo dėl šilumos ir kondensato srauto į vandenį. Garo greitis įtekėjime kito nuo 4 iki 15 m/s.

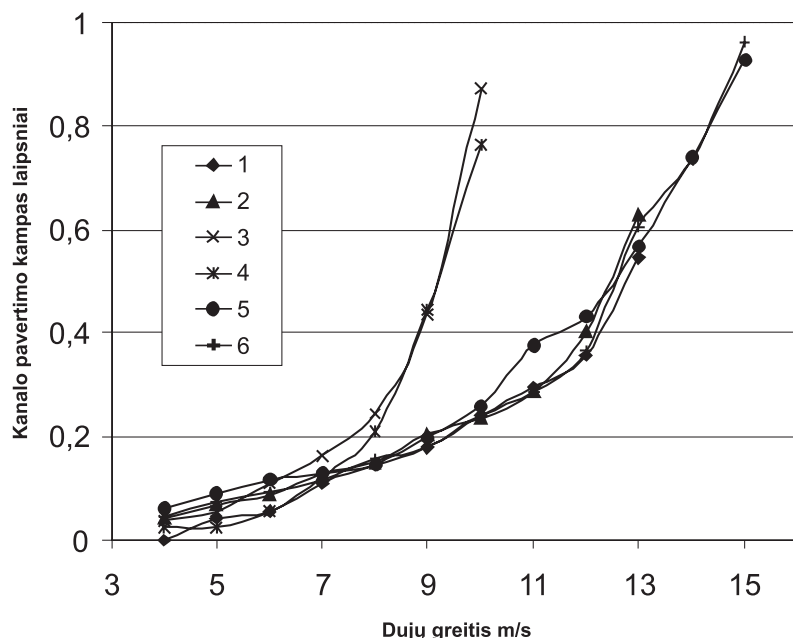
2.3. Eksperimentų rezultatai

Eksperimentų rezultatai, gauti atlikus šiuos tyrimus, parodyti 2 pav. Jame matyti, kokio pasvirimo kampo reikia, siekiant palaikyti vienodą vandens lygį visame kanale. Kaip matyti, eksperimentų su oru ir garu rezultatai ženkliai skiriasi. Tai todėl, kad oro tankis yra apytiksliai 2 kartus didesnis negu garų tankis. O esant tam pačiam srauto greičiui dinaminis slėgis tiesiogiai proporcingas tankiui.

Eksperimentų rezultatų, gautų tekant garo–vandens dvifaziame srautui su kondensacija ir be jos, skirtumas yra labai mažas.



1 pav. Eksperimentinis stendas. 1 – stačiakampis kanalas; 2 – langai; 3 – korpus srauto išlyginimui; 4 – įtekėjimo vamzdis; 5 – srauto matavimas-kontrolė



2 pav. Eksperimentiniai rezultatai. Kanalo pakreipimo kampo priklausomumas nuo dujų greičio. 1, 2 – garo–vandens srautas be kondensacijos exp1/exp2; 3, 4 – oro–vandens srautas exp1/exp2; 5, 6 – garo–vandens srautas su kondensacija exp1/exp2



3 pav. Garo–vandens tarpfazinis paviršius. Be kondensacijos (a) ir su kondensacija (b). Garo greitis įtekėjime – 10 m/s

Skirtumas yra mažas šių rezultatų atžvilgiu, bet ne tarp procesų. 3 pav. parodytos tarpfazinio paviršiaus nuotraukos kiekvienu atveju (su kondensacija ir be jos) tekant venkomponentiam dvifaziam srautui eksperimentiniame kanale (nuotraukose matyti kanalo dalis nuo įtekėjimo iki kanalo vidurio). Kaip matyti, kondensacijos veikiamas paviršius pradeda banguoti arčiau įtekėjimo nei tuo atveju, kai kondensacijos nėra. Dėl garų kondensacijos mažėja jų tekėjimo greitis. Atitinkamai silpnėja ir fazių sąveika. Kadangi vidutinė vandens temperatūra yra mažesnė dėl į kanalą tiekiamo šalto vandens, todėl vandens klampis ir stabilumas yra didesni. Tačiau suminė fazių sąveika (atsveriamą pasvirimo kampą) išlieka labai panaši (2 pav.), nors ir vykstant kondensacijai, suminė tarpfazinė trintis yra mažesnė, o vandens klampis didesnis. Teigiama kondensacijos įtaka tarpfazinio paviršiaus nestabilumui yra akivaizdi (3 pav.), nes abiem atvejais garų įtekėjimo į kanalą greitis yra vienodas. Šis vertinimas tik kokybinis – t. y. nustatyta, kad kondensacija turi teigiamą įtaką paviršiaus nestabilumui. Nei kondensacijos srautas, nei tarpfazinė trintis ar vandens klampis šiame darbe kiekybiškai nebuvo įvertinti.

3. PAKLAIDOS

Atlikus eksperimentinius tyrimus buvo įvertintos galimos paklaidos.

Paklaidų šaltiniai. Atliekant eksperimentus, paklaidos atsirado dėl 3 pagrindinių priežasčių:

1. Stebėjimo paklaida – tai paklaida dėl netiksliai vizualiai nustatyto vandens lygio kanale. Ši paklaida neturi tikslų ribų. Paklaida egzistuoja net ir esant lygiam tarpfaziniam paviršiumi, o atsiradus bangoms, ji dar padidėja. Vizualaus stebėjimo paklaidos kitimo ribos buvo priimtos, remiantis autorių nuomone, ir buvo nustatytos: $\pm 0,5$ mm esant mažiausiam matuojamam dujų greičiui (t. y. 4 m/s visais atvejais) ir ± 1 mm esant didžiausiam matuojamam greičiui (atsižvelgus į tai, ar tai yra oras (10 m/s), garas su kondensacija (15 m/s) ar be kondensacijos (13 m/s)). Priimta, kad paklaida didėja tiesiškai.

2. Srauto matavimo paklaida – tai paklaida, kylanti dėl matavimo prietaiso tikslumo bei reikšmių užrašymo, turinti tiesioginę įtaką dujų greičio matavimui. Prietaiso tikslumas ± 1 %. Eksperimentų metu dujų srautas pulsavo $\pm 0,2$ m³/h, ir tai, įvertinus 0,0015 m² pratekėjimo skerspjūvį kanale, sudarė $\pm 0,037$ m/s.

3. Kanalo pavertimo kampo matavimo paklaida. Kadangi šis kampas buvo netiesiogiai matuojamas slankmačiu, t. y. matuojant kanalo pradžios pakėlimą / nuleidimą milimetrais, matavimo paklaida buvo prilyginta slankmačio paklaidai $\pm 0,1$ mm ir perskaičiuota į kampo paklaidą.

Kitos paklaidos, pvz., tankio, temperatūros, slėgio svyravimai, autorių nuomone, neturi reikšmingos įtakos rezultatų tikslumui, todėl nebuvo vertinamos. Paklaidų intervalai paveiksluose pateikti punktyrinėmis linijomis.

4. SKAITINIAI TYRIMAI

4.1. Modelio aprašymas

Skaitiniai tyrimai buvo atlikti naudojant programų paketą RELAP5 mod 3.3 [7]. Šis programų paketas vystomas daugiau kaip 30 metų, jis – vienas patikimiausių programų paketų modeliuojant šiluminius-hidraulinius procesus branduoliniuose reaktoriuose. Kiekvienas geriausio įverčio programų paketas (tarp jų ir RELAP5) turi būti taikomas tikrai toms sąlygoms, kurioms buvo patikrintas eksperimentiškai. Jei nėra atlikti patikrinamieji skaičiavimai – tai turi būti atlikta. Svarbiausias skirtumas tarp mūsų eksperimentų ir standartinio RELAP5 modeliavimo yra tai, kad RELAP5 naudoja apvalaus skerspjuvio – vamzdžio modelį. Eksperimentinis kanalas yra stačiakampis. Į tai buvo būtina atsižvelgti norint gauti pagrįstus rezultatus. Kaip parodė tolesnė gautų rezultatų analizė, skerspjuvio forma yra labai svarbi esant dvifaziam stratifikuotam tekėjimui. Todėl modelyje buvo modifikuotas tarpfazinio paviršiaus ploto skaičiavimas, t. y. buvo įvesta ir skaičiavimo metu priimama pastovi jo vertė. Ši prielaida teisinga, nes stačiakampiame kanale horizontalaus stratifikuoto lygaus tarpfazinio paviršiaus plotas nekinta keičiantis skysčio lygiui.

Skaitinio modelio schema parodyta 4 pav. Svarbiausias komponentas yra kanalas (162), kuris buvo modeliuojamas kaip vamzdis. Laikoma, kad nėra jokių šilumos nuostolių į aplinką ir sienelės neturi jokios įtakos šilumos perdavimo procesui.

Siekiant padidinti tikslumą, komponentai gali būti skaidomi į segmentus, t. y. vietoje vieno kontrolinio tūrio sudaromi keli mažesni. Komponentas (140) yra dujų šaltinis, komponentas (110) yra vandens šaltinis (tuo atveju, jei reikalingas vandens srautas). Komponentas (173) yra pereinamasis tūris ir veikia kaip prailgintas kanalas. Komponentas (175) reguliuoja vandens lygį kanale, t. y. kai vandens lygis kanale (162) (7 segmente) tampa didesnis nei 0,025 m, vožtuvas (169) atsidaro ir išleidžia vandenį. Kai vandens lygis (162) komponente, 7 segmente, tampa mažesnis negu 0,025 m, vožtuvas (169) užsidaro. Komponentas (210) yra aplinka ir į ją yra laisvas ištekėjimas pro jungtį (205). Modeliuojant dvifazį srautą, pirmame komponento (162) (eksperimentinio kanalo įtekėjime) segmente visada apskaičiuoja-

mas mažesnis vandens lygis negu likusioje kanalo dalyje. Taip gaunama dėl to, jog iš vienfazio srauto režimo staiga pereinama į dvifazį. Todėl norint gauti tikslesnius rezultatus, modeliuose dažnai naudojami pereinamieji tūriai, kurie reikalingi tekėjimo sąlygoms nusistovėti, pereiti į kitą tekėjimo režimą. Modeliuojant dvifazį srautą be kondensacijos buvo priimta, kad tai yra pereinamasis tūris, ir vandens lygis buvo stebimas likusiuose segmentuose. Kai buvo pradėtas modeliuoti dvifazis srautas su kondensacija, pirmas segmentas negalėjo būti pašalintas, nes čia kondensacija yra intensyviausia. Todėl buvo apskaičiuojamas visų kanalo segmentų vandens lygio aritmetinis vidurkis.

5. REZULTATAI, JŲ PALYGINIMAS SU KITŲ AUTORIŲ REZULTATAIS

Panašų į mūsų, nesikondensuojančio oro–vandens dvifazio srauto atvejį nagrinėjo Wallis ir Dobson [8]. Jie atliko bandymus 1 colio (2,54 cm) kvadratiniam, 1,524 m ilgio kanale, esant įvairiam vandens lygiui. Jie taip pat matavo ir nustatė kanalo pasvirimo kampą, reikalingą išlaikyti pastoviam vandens lygiui kanale, ir pateikė rezultatus universaliose koordinatėse (5 pav.).

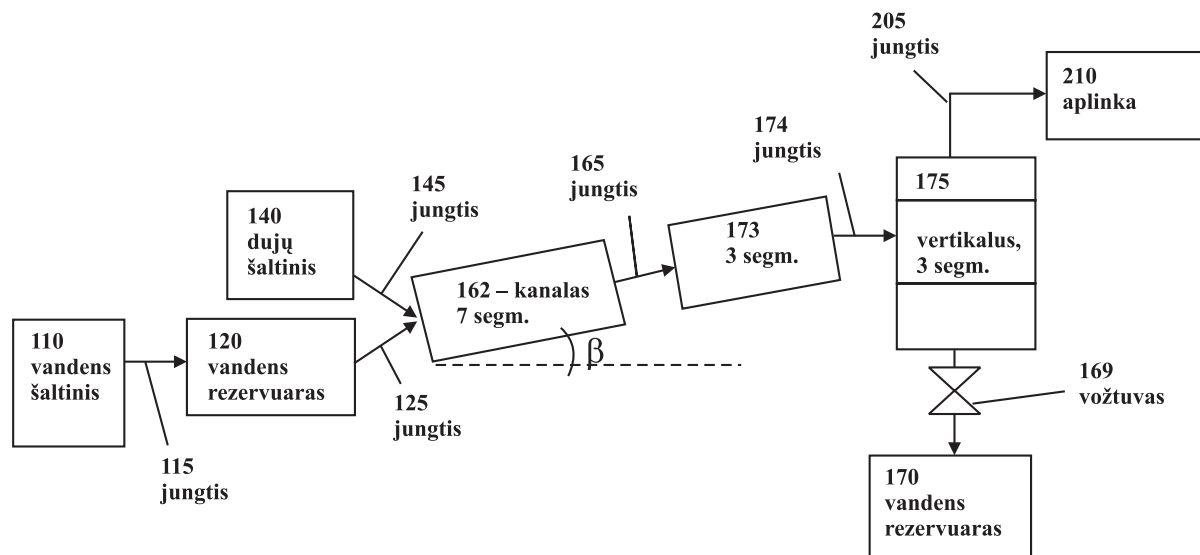
Apskaičiavus bemaž oro greitį j_a^* kanale, rezultatus galima taikyti ir kitokių matmenų kanalui. Bemažio oro greičio j_a^* formulė:

$$j_a^* = j_a \{ \rho_a / [gH(\rho_w - \rho_a)] \}^{1/2}; \quad (1)$$

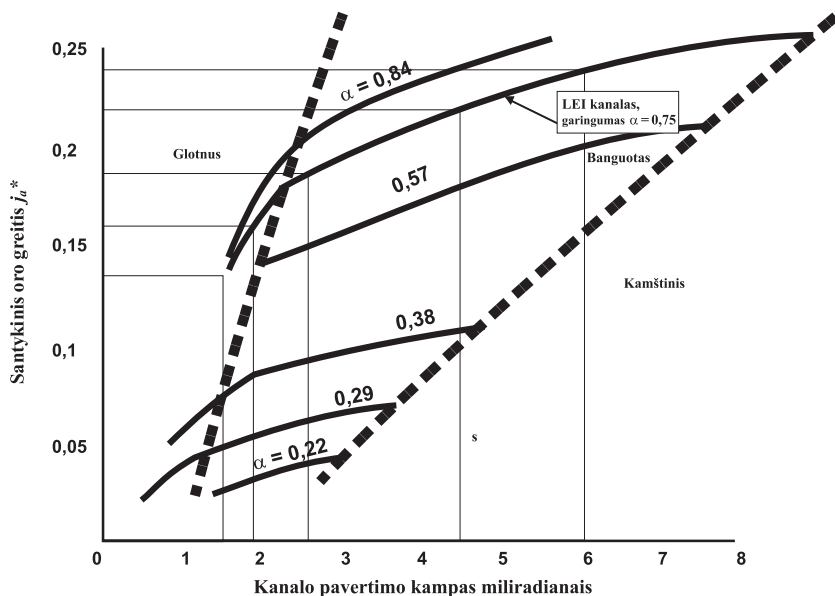
čia j_a – oro menamasis greitis, $j_a = \alpha \cdot u_a$, m/s, α – garingumas kanale, $\alpha = h_a / H$.

5 pav. pavaizduoti autorių gauti eksperimentai, kai $\alpha = 0,75$ ir oro greičiui kintant nuo 5 m/s ($j_a^* = 0,13$) iki 9 m/s ($j_a^* = 0,24$).

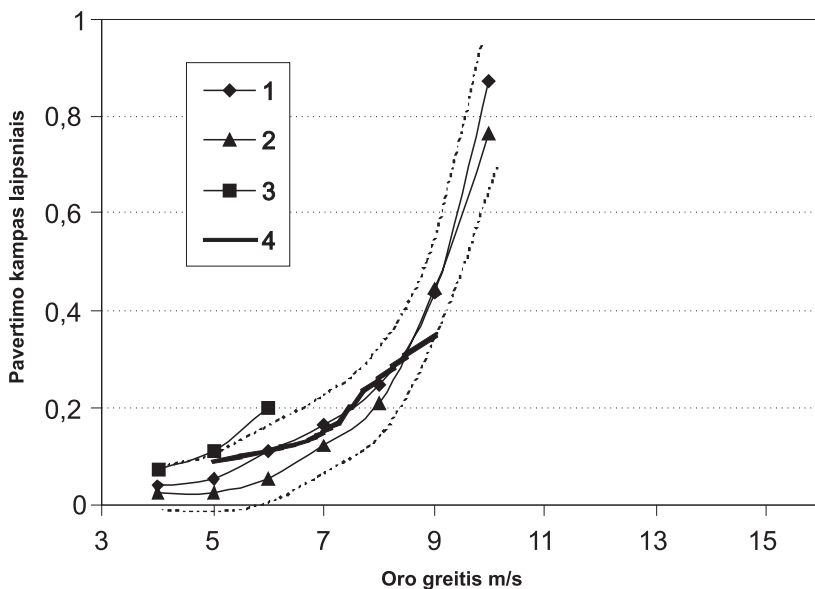
Skaitinių tyrimų, eksperimentinių duomenų bei Walliso ir Dobsono [8] rezultatų palyginimas parodytas 6, 7 ir 8 paveiksluose. Taip pat punktyrinėmis linijomis pažymėti mūsų eksperimentinių rezultatų paklaidų intervalai. Kaip matyti, oro–vandens dvifazio srauto modeliavimo rezultatai neatspindi nei eksperimentinių, nei Walliso ir Dobsono gautų rezultatų. Tuo tarpu Walliso ir Dobsono rezultatai patenka į mūsų eksperimentinių rezultatų paklaidų intervalą. Analizuojant 7, 8 pav.



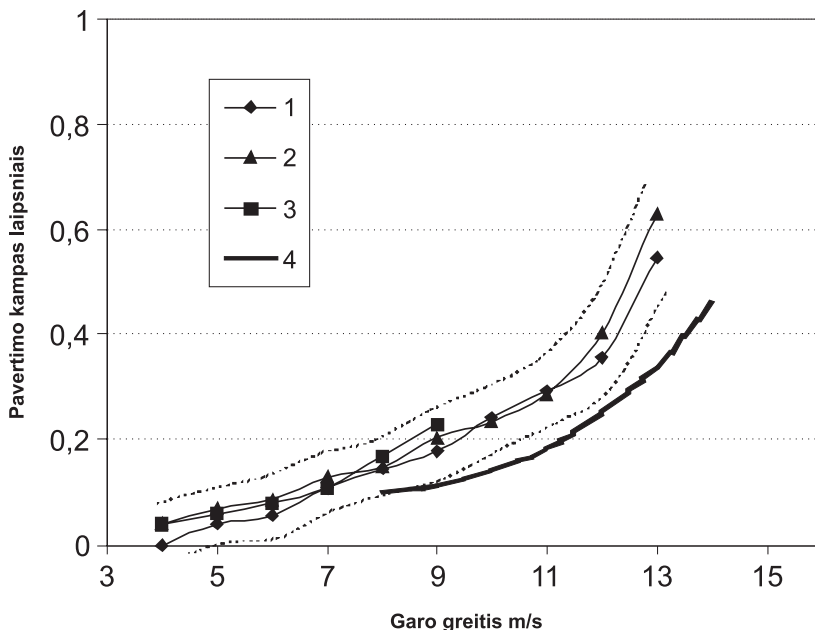
4 pav. Skaitinis eksperimentinio stendo modelis (RELAP5)



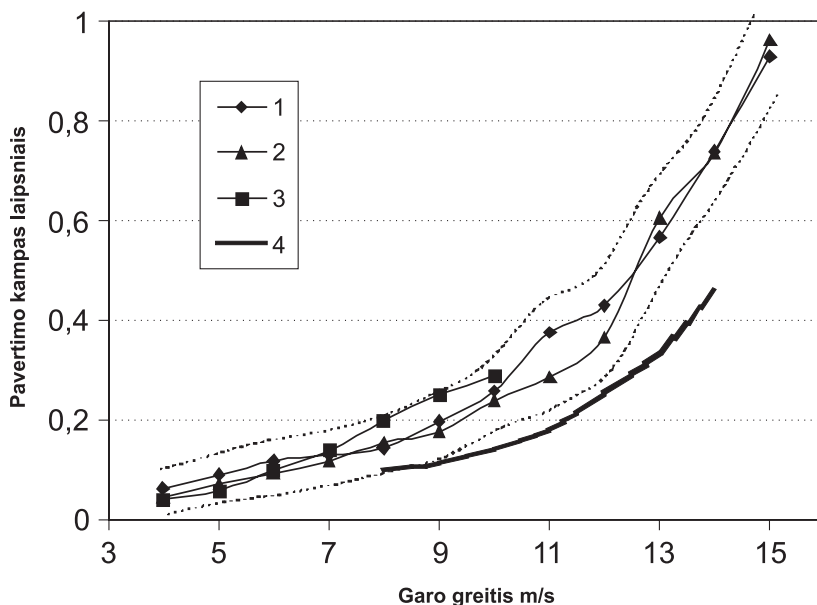
5 pav. Tyrimo rezultatai, gauti G. E. Walliso ir J. E. Dobsono [8] oro–vandens srauto atveju



6 pav. Oro–vandens dvifazio srauto modeliavimo ir eksperimentų rezultatai (kanalo pakreipimo kampo priklausomumas nuo dujų greičio). 1, 2 – eksperimentiniai rezultatai eksp1 / eksp2; 3 – modeliavimo rezultatai; 4 – Walliso ir Dobsono rezultatai, pritaikyti mūsų eksperimentiniam kanalui



7 pav. Garo–vandens dvifazio srauto be kondensacijos modeliavimo ir eksperimentų rezultatai (kanalo pakreipimo kampo priklausomumas nuo dujų greičio). 1, 2 – eksperimentiniai rezultatai eksp1 / eksp2; 3 – modeliavimo rezultatai; 4 – Walliso ir Dobsono rezultatai, pritaikyti mūsų eksperimentiniam kanalui



8 pav. Garo–vandens dvifazio srauto su kondensacija modeliavimo ir eksperimentų rezultatai (kanalo pakreipimo kampo priklausomumas nuo dujų greičio). 1, 2 – eksperimentiniai rezultatai eksp1 / eksp2; 3 – modeliavimo rezultatai; 4 – Walliso ir Dobsono rezultatai, pritaikyti mūsų eksperimentiniam kanalui

pateiktus rezultatus matyti, kad garo–vandens dvifaziam srautui Walliso ir Dobsono rezultatai netinka, o modeliavimo RELAP5 rezultatai gana neblogai atitinka eksperimentinius rezultatus.

Problema modeliuojant dvifazį srautą buvo tai, kad tomis pačiomis sąlygomis esant didesniems dujų greičiams, vandens lygis buvo mažesnis nei išmatuotas eksperimentų metu. Modeliavimo eigoje vanduo buvo išpučiamas iš kanalo bet kuriuo atveju, nesvarbu, koks buvo įvedamas pasvirimo kampas. Nepaisant įvestų į programą pakeitimų (tarpfaziniam paviršiaus plotui skaičiuoti), rezultatas buvo tas pats. Nustatyta, kad tarpfazinė trintis smarkiai priklauso nuo kanalo hidraulinio skersmens (įvesties parametras). Kuo mažesnis hidraulinis skersmuo – tuo didesnė mūsų sąlygomis trintis apskaičiuota. Iš tikrųjų, tarpfazinė trintis gali būti „reguliuojama“ keičiant vien šį parametą. Tačiau tai turi įtakos ir kitoms RELAP5 koreliacijoms, o šiems klausimams tyrinėti ir galutiniam sprendimui priimti reikia nuodugnesnio tyrimo. Tai nebuvo šio darbo tikslas. Šiuo atveju buvo naudojamas ekvivalentinis hidraulinis stačiakampio kanalo skersmuo ($4 \cdot \text{plotas} / \text{perimetras}$). Eksperimentų metu vandens lygis buvo išlaikomas 25 mm, kai modeliuojant tai buvo nepasiekama. Tačiau esant mažesniems dujų greičiams vandens–garo dvifaziame sraute, RELAP5 modeliavimo rezultatai beveik atitiko eksperimentų rezultatus.

6. IŠVADOS IR APIBENDRINIMAS

Atlikti dvifazio vienkomponenčio ir dvikomponenčio srauto eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Eksperimentiškai nustatytas kanalo pasvirimo kampas, reikalingas išlaikyti vienodą vandens lygį visame kanale. Eksperimentiniai rezultatai palyginti su skaičiavimų metu gautais rezultatais bei su kitų autorių duomenimis.

Eksperimentiškai atliktas kokybinis įvertinimas parodė, kad kondensacija mažina tarpfazinio paviršiaus stabilumą.

Eksperimentinių ir skaitinių tyrimų rezultatų palyginimas parodė, kad:

1) modeliuojant dvifazį stratifikuotą srautą, tarpfazinė trintis labai priklauso nuo hidraulinio skersmens, kuris yra įvesties parametras RELAP5 programų pakete. Kai modeliuojamas ka-

nalas nėra vamzdis, įvedus ekvivalentinį hidraulinį skersmenį, rezultatai gali būti klaidingi;

2) esant mažesniems dujų greičiams tarpfazinė trintis RELAP5 apskaičiuojama gerai, bet esant didesniems dujų greičiams RELAP5 apskaičiuoja didesnę nei eksperimentų metu nustatytą garingumą. Taigi net modifikavus tarpfazinio paviršiaus ploto skaičiavimą, skaičiavimo rezultatai ne visame dujų greičių intervale atitinka eksperimentinius rezultatus;

3) modelis netinkamas nagrinėjamam uždaviniui ir per didelis garingumas apskaičiuojamas oro–vandens sraute, kai dujų greitis didesnis kaip 6 m/s, garo–vandens sraute be kondensacijos – 9 m/s, garo–vandens sraute su kondensacija – 10 m/s.

Atlikti tyrimai parodė, kad norint gauti teisingus skaičiavimų rezultatus visame dujų greičių intervale, reikia patobulinti modelį bei programų paketą ir atlikti detalesnę tarpfazinės trintis skaičiavimo analizę.

Žymėjimai

- t – temperatūra °C,
- α – garingumas,
- β – kampas °,
- u – greitis m/s,
- j – menamasis greitis m/s,
- g – laisvojo kritimo pagreitis m/s^2 ,
- h – dujinės fazės užimamas kanalo aukštis m,
- H – visas kanalo aukštis m,
- ρ – tankis kg/m^3 .

Indeksai

- s – garas,
- v – vanduo,
- a – oras,
- g – dujos.

Literatūra

1. Bjorge R. W., Griffith P. Initiation of waterhammer in horizontal and nearly horizontal pipes containing steam and sub-cooled water // ASME Journal of Heat Transfer. 1984. Vol. 106. P. 835–839.
2. Griffith P. Screening reactor steam / water piping systems for water hammer // Rept. NUREG / CR-6519, U. S. NRC, 1997.
3. Šeporaitis M., Almenas K., Pabarčius R. Eksperimentinis įrenginys tirti kondensacijos įtaką dvifaziam stratifikuotam tekėjimui // Energetika. 2005. Nr. 2. P. 1–7.
4. Valinčius M., Šeporaitis M., Pabarčius R. Stratifikuoto dvifazio tekėjimo modeliavimas RELAP5 palaikant stabilų vandens lygį pasvirusiame kanale // Energetika. 2007. T. 53. Nr. 4. P. 52–57.
5. Šeporaitis M., Almenas K., Pabarčius R. Kondensacijos plūpsnio tyrimai: konstrukcinis pulserio kriterijus // Energetika. 2006. Nr. 3. P. 77–85.
6. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Investigation of condensation implosion event // Heat Transfer Research. Vol. 35. Iss. 78. P. 531–548.
7. RELAP5 / MOD3.3 code manual.
8. Wallis G. D., Dobson J. E. Onset of slugging in horizontal stratified air-water flow // International Journal of Multiphase. Flow. 1973. Vol. 1. P. 173.

Mindaugas Valinčius, Marijus Šeporaitis,
Raimondas Pabarčius, Egidijus Babilas

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF TWO-PHASE ONE AND TWO-COMPONENT STRATIFIED FLOW IN AN INCLINED CHANNEL IN CONSTANT VAPORIZATION CONDITIONS

Summary

Experimental study and modelling of one- and two-component fluid flow in a horizontal rectangular ($1200 \times 100 \times 20$) channel are presented. The main objective of the work was to determine experimentally the channel inclination angle needed to maintain a uniform water depth in the entire channel at some specific gas velocity, and to analyse whether

the RELAP5 code is suitable for this purpose. The experimental data were compared with modelling results and other authors' reports. The tests and modelling were performed with two-component air–water flow and one-component steam–water flow. The steam–water flow was either with or without condensation. Gas velocity at the inlet into the channel varied from 4 to 15 m/s. The study has showed that the RELAP5 code is suitable in a certain interval for one-component fluid modelling. To correspond to the experimental data, the code needs to be adapted.

Key words: stratified two-phase flow, condensation, horizontal rectangular channel, inclined channel, interface shear, RELAP5 modelling

Миндаугас Валинчюс, Мариус Шепорайтис,
Раймондас Пабарчюс, Егидиус Бабилас

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ОДНО- И ДВУХ-КОМПОНЕНТНОГО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОЙ ИСПАРЯЕМОСТИ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Резюме

В настоящей статье представлены экспериментальные исследование и моделирование одно- и двух-компонентного двухфазного потока в горизонтальном прямоугольном ($1200 \times 100 \times 20$) канале. Основная цель этой работы – экспериментально определить угол наклона канала, который необходим для поддержания равномерной глубины воды в канале, а также определить пригодность кода RELAP5 для этой задачи. Для этого экспериментальные данные были сопоставлены с результатами моделирования и результатами, полученными другими авторами. Эксперименты и моделирования были проведены в двухкомпонентном потоке воздух–вода и в однокомпонентном потоке пар–вода. Поток пар–вода был либо с конденсацией, либо без конденсации. Скорость газа на входе канала была от 4 м/с до 15 м/с. Исследование показало, что код RELAP5 пригоден для моделирования однокомпонентного потока в некотором интервале. Для соответствия экспериментальным данным код необходимо адаптировать.

Ключевые слова: стратифицированный двухфазный поток, конденсация, горизонтальный прямоугольный канал, склонный канал, межфазное трение, RELAP5 моделирование