

Stratifikuoto dvifazio tekėjimo modeliavimas RELAP5 palaikant stabilų vandens lygį pasvirusiame kanale

Mindaugas Valinčius,

Marijus Šeporaitis,

Raimondas Pabarčius

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

Pateikiami dvifazio oro–vandens tekėjimo horizontaliame stačiakampiame kanale ($1200 \times 100 \times 50$) eksperimentinių tyrimų bei modeliavimo RELAP5 programų paketu rezultatai. Pristatomo darbo tikslas – nustatyti kanalo pasvirimo kampą, kuris reikalingas išlaikyti vienodą vandens lygį kanale, kai oro greitis jame kinta nuo 4 iki 10 m/s. Eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad išmatuotas kanalo pasvirimo kampas gerai atitinka teorinius bei kitų autorių gautus rezultatus. Siekiant geresnio RELAP5 modeliavimo rezultatų sutapimo su eksperimentiniais duomenimis, reikėtų papildomai pritaikyti patį programų paketą ir/ar tobulinti modelį, atsižvelgiant į eksperimentinio kanalo formą, tyrinėjamo proceso specifiką.

Raktažodžiai: stratifikuotas dvifazis tekėjimas, horizontalus stačiakampis kanalas, pasviręs kanalas, oro–vandens tėkmė, tarpfazinė trintis, RELAP5 modeliavimas

1. ĮVADAS

Tiek kondensacijos, tiek dvifazio tekėjimo procesų metu vykstantys reiškiniai yra ypač aktualūs moksliniu ir praktiniu požiūriais. Šių reiškinų tarpusavio sąveika, lemianti procesų eigą, vis dar nėra pakankamai ištyrinėta. Skirtingų teorijų ir skaitinių modelių įvairovė nesuteikia vientisos sisteminės besikondensuojančio dvifazio tekėjimo modeliavimo galimybės ne tik dėl procesų sudėtingumo, bet ir dėl eksperimentinių tyrimų stokos. Literatūroje publikuotuose darbuose pateikiami atskiri nesikondensuojančio [1–5] ir labai reti besikondensuojančio [6, 7] horizontalaus dvifazio tekėjimo tyrinėjimai. Tačiau kondensacijos įtaka horizontalaus laisvo tarpfazinio paviršiaus nestabilumo pasireiškimui išsamiai netyrinėta. Lietuvos energetikos institute (LEI), Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje, tiriant kondensacijos pliūpsnių susidarymo sąlygas [8, 9] buvo nustatyta, kad jie įvyksta dėl Kelvino–Helmholtz tarpfazinio paviršiaus nestabilumo, atsirandančio tarpusavyje sąveikaujant garo ir vandens tėkmėms. Nagrinėjant horizontalaus laisvo tarpfazinio paviršiaus nestabilumą iškelta hipotezė, kad kondensacija gali turėti reikšmingos įtakos jo atsiradimui.

Šiuo metu LEI atliekami besikondensuojančio stratifikuoto tekėjimo kanale tyrimai [10]. Šių tyrimų tikslas – iširti, ar kondensacija turi įtakos tarpfazinio paviršiaus stabilumui ir kokia ši įtaka. Darbų eigoje numatyta atlikti nesikondensuojančio (oras–vanduo) ir besikondensuojančio (garas–vanduo) dvifazių tekėjimų eksperimentus. Eksperimentinių duomenų palyginimas leis nustatyti skirtumus ir įvertinti kondensacijos įtaką tarpfazinio paviršiaus stabilumui. Skaitiniam proceso tyrimui numatyta naudoti modifikuotą RELAP5 programų paketo versiją. Modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas leis identifikuoti, kokius procesus reikia vertinti papildomai, nusakant kondensacijos pliūpsnio susidarymo šilumines-hidraulinės sąlygas, modeliuojant besikondensuojantį dvifazį tekėjimą.

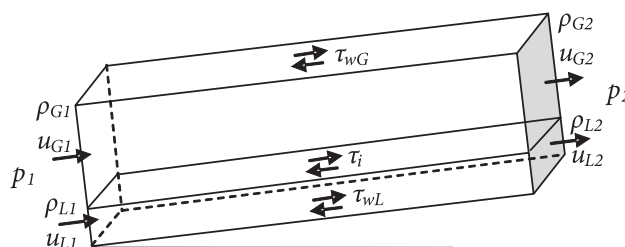
mines-hidraulinės sąlygas, modeliuojant besikondensuojantį dvifazį tekėjimą.

Gautus tyrimo rezultatus numatyta panaudoti siekiant pagrindinio tikslo – pasyvios (nenaudojama išorės energija), atvirkščios natūraliai cirkuliacijai šiluminės-hidraulinės sistemos sukūrimo. Jos veikimas būtų pagrįstas staigios kondensacijos pliūpsnių sukuriama slėgio gradientais pačios sistemos viduje.

Šiame straipsnyje pristatomi tarpinio darbo etapo, kurio tikslas – iširti, kaip tarpfazinės trinties įtaką kompensuoti gravitacijos jėgų dėka, siekiant išlaikyti pastovų skysčio lygį visame eksperimentiniame kanale, rezultatai. Tai leistų eliminuoti skysčio lygio svyravimo įtaką vertinant kondensacijos įtaką tarpfaziniam stabilumui, t. y. išlaikant vienodą garo pratekėjimo skerspjuvį, būtų tiriama tik kondensacijos įtaka tarpfazinio paviršiaus stabilumui ir nereikėtų vertinti skerspjuvio kitimo įtakos. Tam buvo atlikti oro–vandens dvifazio stratifikuoto tekėjimo eksperimentai bei skaitinis tyrimas RELAP5 programų paketu.

2. TEORINIS PAGRINDAS IR KITŲ AUTORIŲ DARBAI

Dvifazio srauto tekėjimą galima aprašyti naudojant „dviejų fluidų“ modelį (1 pav.).



1 pav. Teorinio modelio schema

Modelyje judesio kiekio mainus tarp fazių nusako šios tvermės lygtys:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_G A_G u_G) &= \frac{\partial}{\partial z}(\rho_G A_G u_G^2) - \\ &- \rho_G A_G g \sin \alpha - \tau_{wG} S_G - \tau_i S_i - \frac{\partial p A_G}{dz}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_L A_L u_L) &= \frac{\partial}{\partial z}(\rho_L A_L u_L^2) - \\ &- \rho_L A_L g \sin \alpha - \tau_{wL} S_L + \tau_i S_i - \frac{\partial p A_L}{dz}; \end{aligned}$$

čia τ_{wG} , τ_{wL} ir τ_i – šlyties įtempimai atitinkamai tarp sienelės ir dujų, sienelės ir skysčio bei tarpfaziniame paviršiuje:

$$\tau_{wG} = f_G \frac{\rho_G u_G^2}{2}, \quad \tau_{wL} = f_L \frac{\rho_L u_L^2}{2}, \quad \tau_i = f_i \rho_G \frac{(u_G - u_L)^2}{2}. \quad (2)$$

Priimame, kad oro ir vandens greičiai, tankiai ir fazinis pasiskirstymas laiko atžvilgiu bei per visą kanalo ilgį nekinta. Taip pat priimame, kad $\tau_{wL} S_L \approx 0$, kadangi vanduo kanalu neteka. Iš (1) lygties gauname tokią lygčių sistemą:

$$\begin{aligned} -\rho_G A_G g \sin \alpha - \tau_{wG} S_G - \tau_i S_i - \frac{\partial p A_G}{dz} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow -\rho_G g \sin \alpha - \frac{\tau_{wG} S_G}{A_G} - \frac{\tau_i S_i}{A_G} - \frac{\partial p}{dz} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -\rho_L A_L g \sin \alpha + \tau_i S_i - \frac{\partial p A_L}{dz} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow -\rho_L g \sin \alpha + \frac{\tau_i S_i}{A_L} - \frac{\partial p}{dz} &= 0. \end{aligned}$$

Iš (3) lygčių sistemos gauname lygtį:

$$-\rho_G g \sin \alpha - \frac{\tau_{wG} S_G}{A_G} - \frac{\tau_i S_i}{A_G} + \rho_L g \sin \alpha - \frac{\tau_i S_i}{A_L} = 0. \quad (4)$$

Taigi kanalo pasvirimo kampas:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\frac{\tau_{wG} S_G + \tau_i S_i}{A_G} + \frac{\tau_i S_i}{A_L}}{g(\rho_L - \rho_G)} \right). \quad (5)$$

Lygtyse (2) naudojami nariai f_G ir f_i – trinties koeficientai tarp sienelės ir dujų bei tarpfaziniame paviršiuje. Jie apskaičiuojami naudojant darbe [7] pateiktą metodiką.

Trinties koeficientas dujoms f_G , kai

$$\text{Re}_G = \frac{\rho_G u_G D_{\text{ekv.G}}}{\mu_G} > 2100, \text{ apskaičiuojamas:}$$

$$f_G = 0,046 \text{Re}_G^{-0,2}. \quad (6)$$

Trinties koeficientas tarpfaziniame paviršiuje:

$$\frac{f_i}{f_{SG}} = 1,76 \left(\frac{u_{SG}}{6} \right) + k_i; \quad (7)$$

čia konstanta $k_i = 2,7847 \log_{10}(\beta_L) + 7,8035$;

standartizuota tūrinė dalis esant dujų menamajam greičiui 6 m/s

$$(\beta_L)_r = \frac{u_{SL}}{u_{SL} + 6}, \quad (8)$$

trinties koeficientas menamojo dujų greičio atžvilgiu:

$$f_{SG} = 0,046 \text{Re}_{SG}^{-0,2}; \quad (9)$$

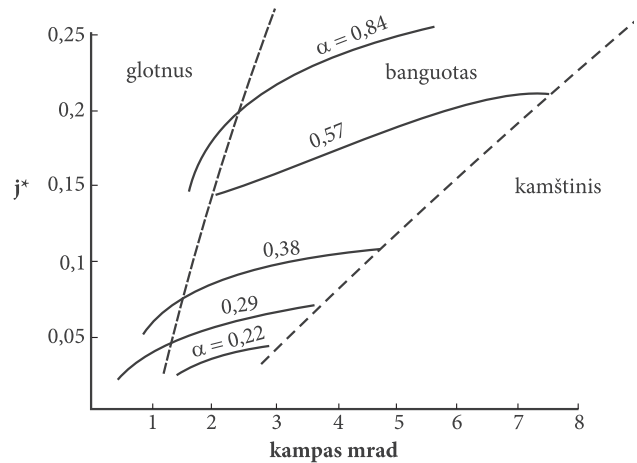
čia menamasis Reinoldso kriterijus $\text{Re}_{SG} = \frac{\rho_G u_{SG} D_{\text{ekv}}}{\mu_G}$, o menamasis dujų greitis $u_{SG} = u_G \alpha$.

Literatūroje publikuoti artimi Wallis ir Dobson [1] darbai, kuriuose autoriai eksperimentiškai matavo kanalo pasvirimo kampą. Kanalo plotis ir aukštis buvo lygūs 25,4 mm, kanalo ilgis 1,524 m. Vandens lygį autoriai matavo dviem mikrometrais, procesą stebėjo vizualiai. Kaip ir mūsų atveju, eksperimentų metu vanduo netekėjo ($u_L = 0$ m/s). Vandens lygis buvo reguliuojamas paverčiant kanalą. Autoriai taip pat pastebi, kad vandens lygis buvo matuojamas apytiksliai [1]. Gauti rezultatai parodyti 2 pav. Jie pateikti apibendrinta forma (universaliose koordinatėse j^*), todėl juos lengva taikyti ir kitokių matmenų kanalui. Bematis oro greitis j^* apskaičiuojamas taip:

$$j^* = j_G \{ \rho_G / [gH(\rho_L - \rho_G)] \}^{1/2}, \quad (10)$$

čia j_G – oro menamasis greitis:

$$j_G = \alpha \cdot u_G, \text{ m/s, } \alpha - \text{garingumas kanale, } \alpha = h_G / H.$$



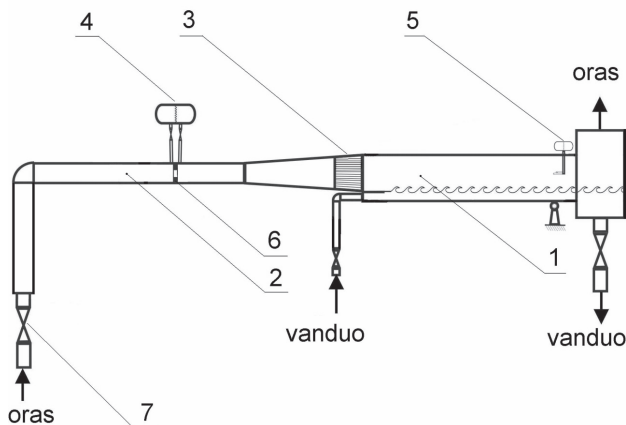
2 pav. Rezultatai gauti G. E. Wallis ir J. E. Dobson [1]

Kitų autorių darbuose [1–4] tyrinėtus tekėjimo režimų pokytis kintant dvifazio tekėjimo sąlygoms, tačiau kanalo pasvirimo kampo matavimų rezultatus pateikia tik Wallis ir Dobson [1].

3. EKSPERIMENTINIS ĮRENGINYS IR TYRIMŲ EIGA

Eksperimentai LEI buvo atliekami stačiakampiame horizontaliame kanale (3 pav.). Kanalo aukštis 100 mm, plotis 50 mm, ilgis 1200 mm. Jame įrengti skaidrūs stiklai vandens būsenai kanale stebėti. Tas pats eksperimentinis įrenginys buvo naudotas eksperimentinių tyrimų programos tyrimams, aprašytiems darbe [10].

Prieš pradėdant eksperimentus, nustatoma horizontali kanalo padėtis. Ant stebėjimo stiklų vidinės pusės buvo pažymėtas



3 pav. Eksperimentinis stendas. 1 – horizontalus kanalas; 2 – įvadinis vamzdis; 3 – korys; 4 – mikromanometras; 5 – Pito vamzdelis; 6 – diafragma; 7 – oro kiekio reguliavimo sklendė

reikiamas vandens lygis (25 mm). Atliekant eksperimentus, vandens lygis buvo matuojamas kanalo pradžioje ir jo pabaigoje stebint vizualiai. Tekant oro srautui virš vandens susidaro trinties jėgos, dėl kurių vanduo „sustumiamas“ iš kanalo priekio į galą. Taigi kanalo pradžioje vandens lygis mažesnis, o pabaigoje – didesnis. Kol oro tekėjimo virš vandens greitis yra nedidelis, to nepastebime, tačiau jam pasiekus 4 m/s, šis skirtumas žymus. Kanalo pabaigoje ir pradžioje atsiradus vandens lygio skirtumui, kanalas buvo paverčiamas taip, kad vandens lygis būtų vienodas. Tuomet fiksuojamas kanalo pavertimo kampas. Vandens tekėjimas apsiribojo tik cirkuliacija kanalo viduje, o 25 mm vandens lygis buvo išlaikomas pastovus. Vandens ir oro temperatūra – 20°C.

Kadangi matuojamas kanalo pavertimas, reikalingas suvienodinti vandens lygį, labai nedidelis, eksperimentų metu kanalo pradžios nuleidimas buvo matuojamas slankmačiu, o kanalo pasvirimo kampas apskaičiuojamas pasinaudojus trigonometrinėmis formulėmis. Slankmačio matavimo paklaida $\Delta h = 0,1$ mm, atstumas tarp kanalo įtvirtintojo ir pakeliamojo taško – $L = 995$ mm. Taigi kanalo pavertimo kampo paklaida laipsniais dėl pakėlimo aukščio matavimo:

$$\Delta = \arctg \frac{\Delta h}{L} = \pm 0,00575^\circ.$$

Nustatant reikalingą kanalo pavertimo kampą būtina įvertinti ir stebėjimo paklaidą. Priimta, kad ji lygi $\pm 0,5$ mm (t. y. vandens lygio skirtumas per visą kanalo ilgį ± 1 mm), kol vandens paviršius yra lygus, ir oro greitis yra ne didesnis nei 4 m/s. Priimta, kad paklaida tolygiai didėja iki ± 1 mm, kol pasiekiamas didžiausias (10 m/s) oro greitis, t. y. kai vandens bangavimas suintensyvėja. Taigi bendra pasvirimo kampo nustatymo paklaida yra $\pm 0,039$ – $0,063$ laipsnio, kai oro greitis kanale kinta nuo 4 iki 10 m/s.

Nustatant kanalo pavertimo kampo priklausomybę nuo oro greičio, reikia vertinti ir oro greičio matavimo paklaidas. Jos kyla dėl dviejų priežasčių: oro srautą matuojančios diafragmos paklaidos bei mikromanometro duomenų. Kadangi oro srautas nuolat turi būti reguliuojamas, mikromanometro nuskaitymo tikslumas priimtas ± 3 mm, nors reglamentuotas prietaiso tikslumas ± 1 mm. Taravimo metu nustatyta diafragmos matavimo paklaida $\pm 3\%$. Taigi bendra oro greičio nustatymo paklaida yra $\pm 0,20$ – $0,43$ m/s matavimo ribose nuo 4 iki 10 m/s.

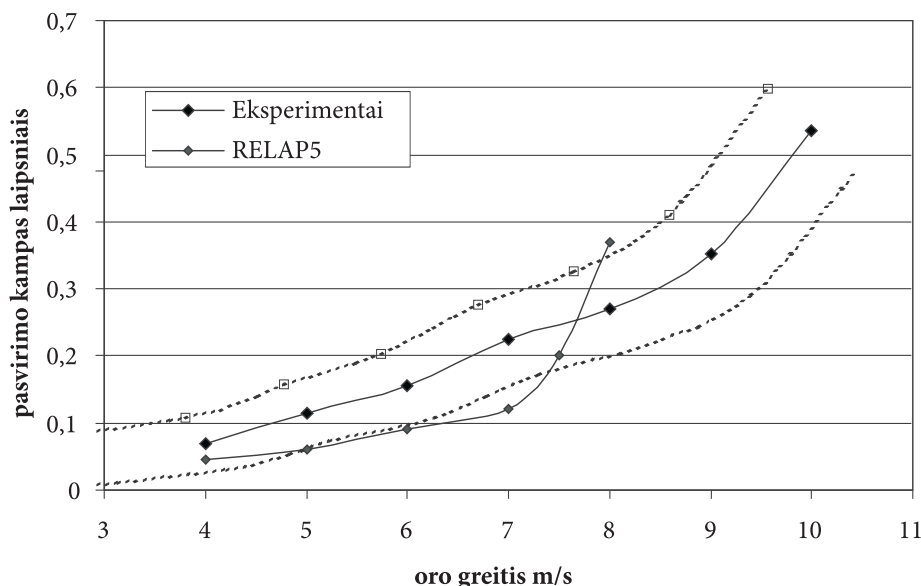
Matavimų rezultatai bei nustatytos paklaidų ribos (punktų linijos) parodyti 4 pav.

Įvertintos matavimo paklaidos ir nustatytas neapibrėžties intervalas leido maksimaliai tiksliai atlikti tyrimą naudojant minėtas matavimo priemones.

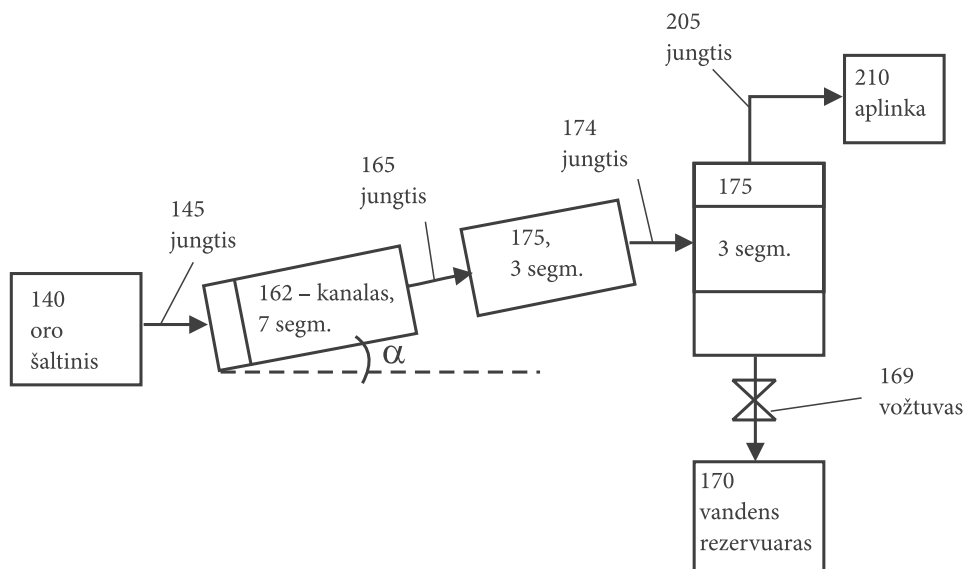
4. EKSPERIMENTINIO ĮRENGINIO RELAP5 SKAITINIS MODELIS SU PASVIRISIU STAČIAKAMPIU KANALU

Eksperimentų metu vykstantiems procesams modeliuoti buvo sudarytas eksperimentinio stendo modelis. Modelio schema parodyta 5 pav. Tai schematiškai pavaizduota RELAP5 įvesties duomenų byla.

Modeliavimui pasirinktas programų paketas RELAP5, kuris jau kelis dešimtmečius naudojamas šiluminių-hidraulinių procesų modeliavimui [11]. Deja, RELAP5 programų paketas skirtas praktiškai išskirtinai vamzdžiams, todėl modeliuojant stačia-



4 pav. Eksperimentiškai gauta kanalo pasvirimo kampo (reikalingo išlaikyti vienodą vandens lygį) priklausomybė nuo oro greičio kanale, paklaidų ribos bei modeliavimo RELAP5 programų paketu rezultatai



5 pav. RELAP5 kanalo modelio schema

kampį kanalą, reikia į tai atkreipti dėmesį. Kitaip nei vamzdyje, stačiakampiame kanale tekant stratifikuotam ir nebanguotam dvifaziam skysčio–dujų srautui, tarpfazinio paviršiaus plotas visuomet pastovus, jis lygus kanalo pločio ir ilgio sandaugai. Vamzdyje tarpfazinis paviršiaus plotas priklauso nuo skysčio lygio. Šiame darbe nagrinėjamo reiškinio pagrindinis veiksnys – tarpfazinė trintis, todėl tarpfazinio paviršiaus plotas yra vienas svarbiausių parametru. Atlikto eksperimento modeliavimui buvo modifikuota RELAP5 programa, numatant pastovų nebanguoto srauto tarpfazinio paviršiaus plotą.

Į sistemą tiekiamas tik oras, kurio šaltinis yra tūris 140. Oras nustatytu greičiu (įvesties duomenų byloje galime įvesti mums reikiamą oro greitį) tiekiamas pro jungtį 145 į vamzdį 162. Vamzdis 162 yra sudarytas iš 7 segmentų po 0,2 m, pirmasis segmentas laikomas pereinamuoju tūriu, o modeliuojamas eksperimentinis kanalas yra vamzdžio 162 segmentai 2–7. Vamzdis 173 yra pagalbinis, kad iškart už kanalo tekėjimo sąlygos labai nesikeistų. Vertikalus vamzdis 175 veikia kaip separatorius: bendras srautas iš vamzdžio 173 patenka į šio vamzdžio vidurį, tuomet oras išteka pro viršutinę dalį į tūrį 210, o vanduo išteka pro vožtuvą 169 į tūrį 170. Vožtuvas 169 atsidaro tik tuomet, kai vandens lygis kanalo gale yra didesnis nei 25 mm, o užsidaro, kai lygis kanalo gale tampa mažesnis nei 25 mm. Taigi tam tikru momentu pasiekiami pusiausvyra, kai lygis kanalo gale ~25 mm.

Kanale 162 patiekiami vandens, šiek tiek daugiau nei reikia palaikyti jame vandens lygį (25 mm), o kita komponentė – oras. Slėgis sistemoje 1,1 bar, tik ištekėjime šiek tiek mažesnis (210-ame tūryje slėgis yra 1,099 bar, o 170-ame tūryje – 1,0 bar). Tiek vandens, tiek oro temperatūra visoje sistemoje palaikoma 20°C. Kanalo pakreipimo kampas α yra parenkamas priartėjimo būdu, kad modeliuojamame kanale lygis būtų vienodas. Iš pradžių sistema paliekama nusistovėti 100 s, t. y. daugiau vandens suteka į žemiau esančią kanalą dalį, vamzdyje 175 vandens lygis taip pat truputį didesnis nei kanale, todėl šiek tiek jo suteka į kanalą. Pradėjus tiekti orą, jo srautas tolygiai per 100 s didėja iki reikiamo. Jei kanale lygis per aukštas, atsidaro vožtuvas 169 ir išleidžiamas vandens perteklius. Jeigu vandens lygis nevienodas visame kanale, keičiame kanalo pakreipimo kampą. Skaitinio tyrimo rezultatas – stabilus tekėjimo režimas orui te-

kant pasirinktu greičiu ir esant atitinkamam kanalo pasvirimo kampui. Modeliavimo rezultatai parodyti 4 pav. Kaip matyti, modeliavimo rezultatai gerai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis. Modeliuojant didesnių oro greičių tėkmes, pasiekama tokia riba, kad tekėjimo režimas kanale tampa nestabilus, o vandens lygis nepasiekia 25 mm. Ši riba yra, kai oro greitis ~8 m/s, o iš 4 pav. pateiktų rezultatų matyti, jog nuo 7 m/s kanalo pavertimas turi vis mažesnę įtaką. Tai leidžia daryti išvadą, kad RELAP5 modelis ir /arba modeliavimo programa dar turi būti tobulinami.

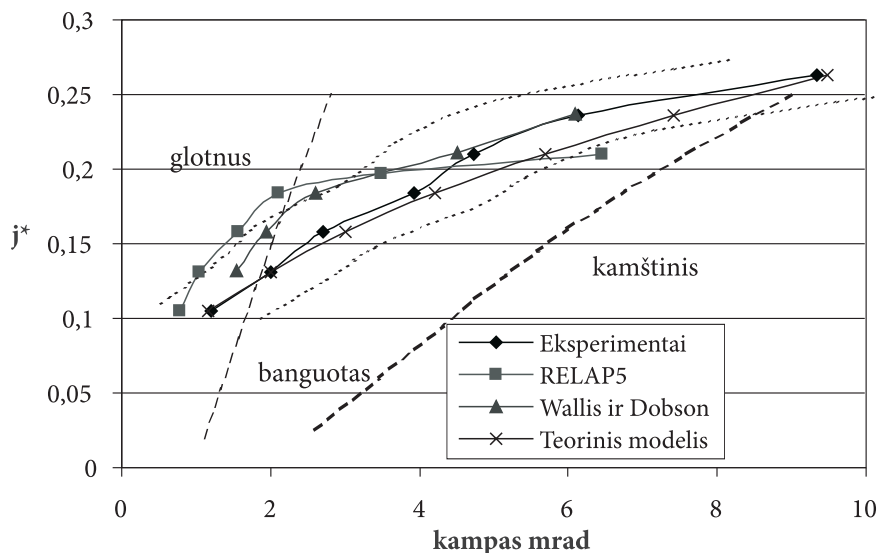
5. REZULTATŲ Palyginimas su kitų autorių duomenimis

Apskaičiavus G. E. Wallis ir J. E. Dobson parametą j^* mūsų matmenų kanalui, buvo nustatytas reikiamas kanalo pasvirimo kampas esant tam tikram oro greičiui. Šie duomenys buvo palyginti su šiame straipsnyje aprašytais atliktų eksperimentų rezultatais (6 pav.). Koordinacių sistema parinkta kaip ir Wallis ir Dobson darbuose [1], rezultatai pateikti atvejui, kai garingumas kanale – 0,75. Kaip matyti, eksperimentų metu išmatuotas šiek tiek didesnis kanalo pasvirimo kampas, tačiau šis nesutapimas nėra didelis. Didžiausias 30% skirtumas gautas tik ties 7 m/s oro tekėjimo greičiu.

Lyginant gautus rezultatus su apskaičiuotais naudojant „dviejų fluidų“ modelį, reikia papildomų duomenų. Eksperimentų metu vanduo iš išorės į kanalą nebuvo tiekiamas, tačiau kanale jis nestovėjo vietoje – vandens paviršius judėjo tam tikru greičiu oro srauto kryptimi, o giluminiai vandens sluoksniai tekėjo priešinga kryptimi. Skaičiavimo formulėse (1–5) reikalingas vandens greitis u_L . Jis buvo eksperimentiškai išmatuotas vandens paviršiuje (lentelė).

Lentelė. Vandens tekėjimo greitis paviršiuje (eksperimentų duomenys)

Oro greitis m/s	Vandens greitis paviršiuje m/s
4	0,13
5	0,17
6	0,18
8	0,19
10	0,20



6 pav. Rezultatų palyginimas

Naudojant šias reikšmes, pagal pusiausvyros lygtis (1–5) buvo apskaičiuotas teorinis kanalo pasvirimo kampas. Gauti rezultatai parodyti 6 pav. Šie rezultatai palyginti su eksperimentų metu gautomis matavimo reikšmėmis, modeliavimo rezultatais (RELAP5) bei Wallis ir Dobson [1] duomenimis.

Kaip matyti, RELAP5 modeliavimo rezultatai artimiausi Wallis ir Dobson [1] gautiems rezultatams, tačiau nuo eksperimento ir apskaičiuotų, remiantis teoriniu modeliu, duomenų skiriasi beveik 2 kartus. Taip pat esant didesniems oro greičiams (daugiau kaip 7 m/s) RELAP5 modeliavimo rezultatų kitimo tendencija keičiasi.

Vandens „sustūmimas“ priklauso nuo tarpfazinės trinties koeficiento ir tarpfazinio paviršiaus ploto. Modifikuojant RELAP5 programų paketą, buvo pakeistas tik tarpfazinio paviršiaus ploto kitimo skaičiavimas, atsižvelgiant į stačiakampį kanalą. Trinties koeficiento ir kitų srauto tekėjimo savybių skaičiavimas išliko toks pat (pritaikytas vamzdžiams), ir tai galėjo sąlygoti RELAP5 skaičiavimo rezultatų bei eksperimentinių ir teorinių rezultatų skirtumus.

6. IŠVADOS IR APIBENDRINIMAS

1. Atlikus eksperimentinius dvifazio srauto tyrimus, nustatytas kanalo pasvirimo kampas, reikalingas išlaikyti pastovų vandens lygį visame kanale, atsižvelgus į oro tekėjimo greitį.

2. Sudarytas eksperimentinio stendo RELAP5 modelis, skaitinio tyrimo rezultatai palyginti su eksperimentiniais bei kitų autorių darbais, taip pat su teoriniais rezultatais. Rezultatų sutapimas – patenkinamas.

3. Esant didesniems oro greičiams nei 8 m/s reikiamo režimo sumodeliuoti nepavyko, kadangi tekėjimas tampa nestabilus ir vanduo išpučiamas iš kanalo. Skaitiniam tyrimui naudota modifikuota RELAP5 versija dar nepakankamai pritaikyta dvifazio tekėjimo stačiakampiame kanale atvejui, todėl ši modeliavimo programa ir / arba sudarytas modelis dar turi būti tobulinami.

Žymėjimai

α – garingumas kanale; kampas $^{\circ}$

τ – šlyties įtempimai Pa

$(\beta_L)_r$ – standartizuota tūrinė frakcija esant dujų menamajam greičiui 6 m/s

A – plotas m/s

D – skersmuo m

f – trinties koeficientas

g – laisvojo kritimo pagreitis m/s²

H – kanalo aukštis m

h_G – dujinės fazės užimamas kanalo aukštis m

j – menamasis greitis m/s

j^* – bematis oro greitis

k – konstanta

L – kanalo ilgis m

p – slėgis Pa

Re – Reinoldso skaičius

S – perimetras m

t – laikas s

U, u – greitis m/s

W – kanalo plotis m

x, y, z – koordinatės m

z – koordinatė m

ρ – tankis kg/m³

Indeksai

ekv. – ekvivalentinis

G – dujinė fazė

i – tarpfazinis paviršius

L – skysčio fazė

max – didžiausias

r – santykinis

S – menamasis (angl. superficial)

wG – sienelė-dujos

wL – sienelė-skystis

Literatūra

1. Wallis G. B., Dobson J. E. The onset of slugging in horizontal stratified air-water flow // Int. J. Multiphase Flow. 1973. Vol. 1. P. 173–193.
2. Taitel Y., Dukler A. E. A model for predicting flow-regime transitions in horizontal and near horizontal gas liquid flow // AIChE Journal. 1976. Vol. 22(1). P. 47–55.
3. Mandhane J. M., Gregory G. A., Aziz K. A. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes // Int. J. Multiphase Flow. 1974. Vol. 1. P. 537–551.
4. Baker O. Simultaneous flow of oil and gas // Oil Gas J. 1954. Vol. 53(12). P. 185–195.
5. Lorencez C., Nasr-Esfahany M., Kawaji M. Turbulence structure and prediction of interfacial heat and mass transfer in wavy-stratified flow // AIChE Journal. 1997. Vol. 43(6). P. 1426–1435.
6. Linehan J. H., Petrick M., El-Wakil M. M. The condensation of a saturated vapor on a subcooled film during stratified flow // AIChE Preprint 3. Presented at 11th National Heat Transfer Conference. Minneapolis. Minnesota. Aug. 3–6 1969.
7. Spedding P. L., Hand N. P. Prediction in stratified gas-liquid co-current flow in horizontal pipelines // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40. No. 8. P. 1923–1935.
8. Šeporaitis M., Almenas K., Pabarčius R. Kondensacijos pliūpsnio tyrimai: konstrukcinis pulserio kriterijus // Energetika. 2006. Nr. 3. P. 77–85.
9. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Investigation of condensation implosion event // Heat Transfer Research. 2004. Vol. 35, Iss. 78. P. 531–548.
10. Šeporaitis M., Almenas K., Pabarčius R. Eksperimentinis įrenginys tirti kondensacijos įtaką dvifaziam stratifikuotam tekėjimui // Energetika. 2005. Nr. 2. P. 1–7.
11. RELAP5/MOD3.3 code manual.
12. Munson B. R., Young D. F., Okiishi T. H. Fundamentals of Fluid Mechanics. 4th edition. John Wiley & Sons, 2002. P. 479.

**Mindaugas Valinčius, Marijus Šeporaitis,
Raimondas Pabarčius**

STRATIFIED TWO-PHASE FLOW MODELING USING RELAP5 CODE, MAINTAINING UNIFORM WATER LEVEL IN THE INCLINED CHANNEL

Summary

Experimental and RELAP5 modelling results of the two-phase air-water flow in a horizontal rectangular (1200 × 100 × 50) are presented. The aim of the work was to determine the channel inclination angle needed to maintain a uniform water depth in the channel when the air velocity varies from 4 to 10 m/s. Experimental results show that the measured inclination angle fairly meets the theoretical calculations and other authors' results. To achieve a better agreement between experimental and RELAP5 modelling results, additional adaptation of the software and / or the model is needed according to the shape of a rectangular channel and the specifics of the process.

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

**Миндаугас Валинчюс, Мариус Шепорайтис,
Раймондас Пабарчюс**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ КОДА RELAP5, ПОДДЕРЖИВАЮЩАЯ СТАБИЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Резюме

Представлены результаты проведенных экспериментов и RELAP5 моделирования двухфазного течения воздух-вода в горизонтальном прямоугольном (1200 × 100 × 50) канале. Цель работы – определить угол наклона канала, который необходим для поддержки однородной глубины воды в канале, когда скорость воздуха меняется от 4 до 10 м/с. Экспериментальные результаты показывают, что измеренный угол наклона хорошо совпадает с теоретическими вычислениями и результатами других авторов. Для достижения лучшего соглашения между результатами экспериментов и RELAP5 моделирования необходима дополнительная адаптация программного пакета и / или модели, принимая во внимание форму прямоугольного канала и специфических особенностей процесса.

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