

Tarpfazinio paviršiaus trinties įtakos greičių laukui dvifazėje nesikondensuojančioje tėkmėje tyrimas

Stasys Gasiūnas,

Raimondas Pabarčius,

Marijus Šeporaitis

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

Straipsnyje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai tekant orui horizontaliame stačiakampiame kanale ($h/a = 1,16$) vidutiniu 4–8 m/s greičiu ($Re = 14710–29410$). Darbe pateikiami oro greičio profiliai, išmatuoti jam tekant kanale virš vandens ir tekant kanale be vandens. Matavimai be vandens atlikti su lygia ir su pašiurkštinta apatine kanalo sienele.

Tyrimų rezultatų analizė parodė, kad tekant orui kanalu virš banguojančio vandens paviršiaus greičio profilis tampa nesimetrišku. Jo deformaciją sąlygoja padidėjusi trintis, kai vandens paviršiuje atsiranda bangos bei antriniai oro tekėjimai.

Raktažodžiai: stratifikuotas dvifazis tekėjimas, horizontalus kanalas, oro–vandens tėkmė, tarpfazinė trintis

1. ĮVADAS

Tiriant dvifazes tėkmes labai svarbi tarpfazinio paviršiaus elgsena, taip pat kiti fazių kaitos aspektai. Todėl analitiškai aprašyti šilumos ir masės mainus yra sudėtinga dėl daugelio priklausomų parametrų (turbulencija, priklausomybė nuo laiko, netiesiškumas, erdvinis pasiskirstymas). Skaitiniuose tekėjimo modeliuose naudojamos koreliacijos tinka tik konkrečiam įrenginiui ar procesui. Universalus fizikinis kondensacijos proceso modelis dar nėra sukurtas. Siekiant praplėsti žinias apie dvifazį tekėjimą Lietuvos energetikos institute atliekami eksperimentiniai dvifazinio tekėjimo tyrimai. Eksperimentai vykdomi Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje sukurtame stende [1] siekiant nustatyti kondensacijos įtaką tarpfazinio paviršiaus stabilumui. Šiame darbe pateiktas vienas pirmųjų tyrimo etapų, t. y. nesikondensuojančios dvifazės tėkmės tyrimų rezultatai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti stratifikuotoje dvikomponentėje dvifazėje tėkmėje oras–vanduo. Abiejų fazių tarpfazinis paviršius laisvai besideformuojantis. Akivaizdu, kad esant atskirų fazių tekmių greičių skirtumui atsiranda tarpfazinė trintis. Dvikomponentės dvifazės tėkmės atveju tarpfazinę trintį veikia ne tik greičio skirtumas tarp šių skirtingos klampos fluidų, bet ir nelygus vandens paviršius. Susidarančių vandens paviršiaus bangų aukštis proporcingas oro tekėjimo greičiui [1]. Pirmi oro greičio matavimai eksperimentiniame stende, kurio pagrindinė dalis yra horizontalus stačiakampis kanalas, pateikti darbe [2]. Rezultatai parodė, kad trinties skirtumai tarp oro–vandens ir oro–sielės turi įtakos greičio profiliams – jie tampa nesimetriški. Todėl siekiant padidinti matavimų tikslumą, eksperimentinis stendas buvo patobulintas (1 pav.). Kanalo pradžioje buvo

įstatyta tolygiau oro srauto sukurius slopinantis ir stačiakampį greičio profilį formuojantis korys. Siekiant eliminuoti eksperimentinio kanalo viršutinės sienelės nelygumą, kanalo viršuje įstatyta papildoma plokštė. Dėl to sumažėjo kanalo aukštis ($h/a = 1,16$).

Tyrimo metu naudotas horizontalaus kanalo trimatis skaitinis modelis, sukurtas FLUENT programiniu paketu [3]. Jo pagalba modeliuota oro tėkmė kanale be vandens (tarp kietų sienelių).

Šiame darbe pateikiami oro greičio profilio stačiakampiame horizontaliame kanale matavimai, atlikti vienfazėje oro tėkmėje ir oro tėkmėje virš laisvo vandens paviršiaus.

2. EKSPERIMENTINIS STENDAS IR TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentai atlikti stende, kurio principinė schema pateikta 1 pav. Pagrindinė stendo dalis yra horizontalus stačiakampis kanalas. Jo ilgis 1200 mm, plotis 50 mm, aukštis 83 mm. Kanalas pagamintas iš aliuminio, jo šonuose sumontuoti skaidrūs stiklai. Viršutinė bei šoninės sienelės yra glotnios (paviršiaus šiurkštumas ne didesnis kaip 0,02 mm). Oras į kanalą tiekiamas įvadinio vamzdžiu, kurio vidinis skersmuo 50 mm. Kanalo pradžioje įmontuotas korys, sudarytas iš lygiagrečių oro tekmei kvadratinų kanaliukų. Kanaliukų koryje yra ~2400, jų plotis ~1 mm, ilgis 95 mm. Šio korio dėka kanalo įtekėjimo skerspjūvyje gaunamas stačiakampis greičio profilis. Eksperimentai atlikti į kanalą įleidus $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ vandens, jo lygis buvo išlaikomas 25 mm. Virš laisvai besideformuojančio vandens paviršiaus pučiamas oras laisvai išteka kanalo pabaigoje.

Įtekantis į kanalą oro kiekis nustatomas panaudojant diafragmą (1 pav.), esančią įvadiniame vamzdyje. Mikro-manometru prieš diafragmą ir už jos išmatuojamas slėgių perkritis. Žinant įvadinio vamzdžio skerspjūvio plotą bei oro tankį, apskaičiuojamas oro srautas. Į kanalą įtekančio oro srautas reguliuojamas sklende. Oro temperatūra matuojama chromelio ir aliumelio termopora, o greitis kanale matuojamas Pito vamzdeliu, sujungtu su elektroniniu skirtuminio slėgio matuokliu (Fuji Electric). Šio prietaiso rodmenys registruojami sujungta su asmeniniu kompiuteriu duomenų surinkimo sistema (Keithley). Pito vamzdeliu eksperimentų metu išmatuoti oro greičiai siekė 3–10 m/s.

Matavimai atlikti kanalo skerspjūvyje, nutolusiame 1040 mm nuo jo pradžios ($x/d_{\text{ekv}} = 19$). Matavimo taškai išsidėstę vertikaliroje linijoje, šio skerspjūvio centre. Jie pasirinkti 2 mm žingsniu, o prie sienelės šis žingsnis sumažintas iki 0,5 mm. Žinant pratekėjimo skerspjūvio plotą bei tankį, išmatuotasis slėgio profilis perskaičiuotas į greičio profilį pagal priklausomybę:

$$u(y) = \sqrt{\frac{2 \cdot dP(y)}{\rho}}; \quad (1)$$

čia u – greitis m/s; dP – statinio ir dinaminio slėgių skirtumas Pa; ρ – tankis kg/m^3 .

Eksperimentų metu vidutiniai oro tekėjimo greičiai kito intervale 4–8 m/s ir oro temperatūra buvo palaikoma 15°C . Eksperimentų metu kanale tekant orui virš vandens intensyviai garuoja vanduo. Papildomų taravimų metu nustatyta, kad vandens garavimas siekia 1 ml/min orui tekant kanale 4 m/s vidutiniu greičiu, tekant 6 m/s – 3,5 ml/min, o tekant 8 m/s – 6 ml/min. Eksperimentinių tyrimų metu vandens praradimas buvo kompensuojamas periodiniais papildymais pagal išankstinius taravimo rezultatus.

3. SKAITINIS MODELIS

Šiame darbe naudotas FLUENT-6 skaičiuojamosios hidrodinamikos programinis paketas [4], plačiai taikomas fluideo tėkmėms ir šilumos perdavimui sudėtingose sistemose modeliuoti. FLUENT programiniu paketu sukurtas kanalo modelis pavaizduotas 2 paveiksle pagal [3]. Šiame paveiksle pateikti viso kanalo vidinės ertmės kontūrai, o sudaryto vienfazio trimačio modelio skaičiavimo sritis išskirta pilka spalva. Ji sudalyta apytiksliai į 4×10^6 elementų. Siekiant sutaupyti skaičiavimo laiko, elementai prie sienelės sukurti smulkesni, o kanalo centre stambesni (3 pav.). Įtekėjime į kanalą numatyta 6 m/s greičio ir 15°C temperatūros atmosferos slėgio oro tėkmė su tolygiu pagal skerspjūvį greičio lauku. Modelyje panaudotas $k-\omega$ turbulencijos modelis. Šiuo turbulencijos modeliu apskaičiuojama ne tik turbulencinė tekėjimo sritis, bet ir laminarinė pasienio sritis (elementai prie sienelės turi būti susmulkinti iki $y^+ \leq 4-5$).

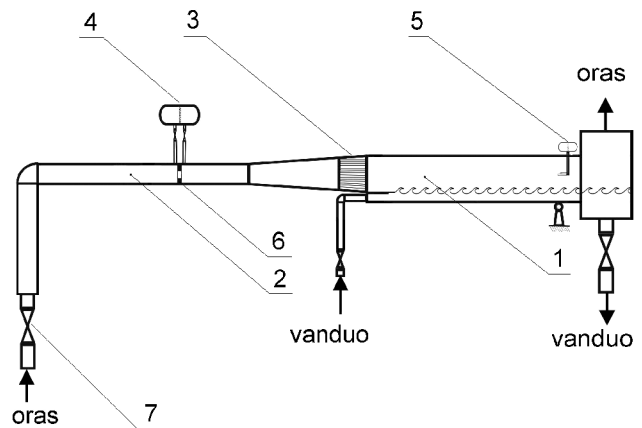
Pasitelkus šį skaitinį modelį ateityje tikimasi nustatyti tarpfazinę trintį tarp oro ir vandens. Tai ketinama atlikti trinties koeficientą tarp oro ir apatinės kanalo sie-

nelės skaitiniame modelyje parinkinėjant taip, kad apskaičiuoti greičio profiliai atitiktų eksperimentinius.

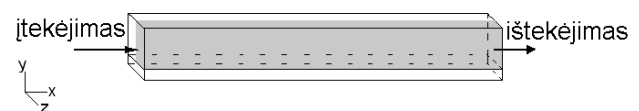
Šiame tyrimų etape skaitinis modelis naudotas greičio profilio palyginimui su eksperimentiniu profiliu, išmatuotu oro tėkmėje be vandens (tarp kietų sienelių).

4. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

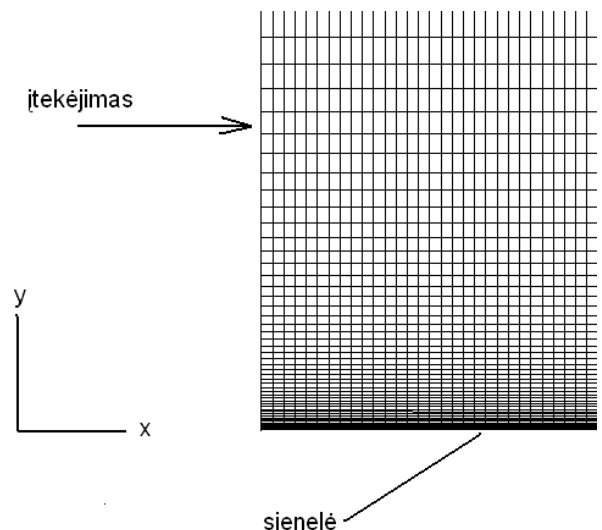
Eksperimentiniai tyrimai atlikti kanale orui tekant virš laisvo banguojančio vandens paviršiaus. Oro greičio profiliai išmatuoti esant 4, 6 ir 8 m/s vidutiniams oro tekėjimo greičiams kanale, kai Reinoldso kriterijus yra atitinkamai 14710, 22060 ir 29410. Matavimai atlikti 1040 mm ($x/d_{\text{ekv}} = 19$) nuo kanalo pradžios nutolusiame



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



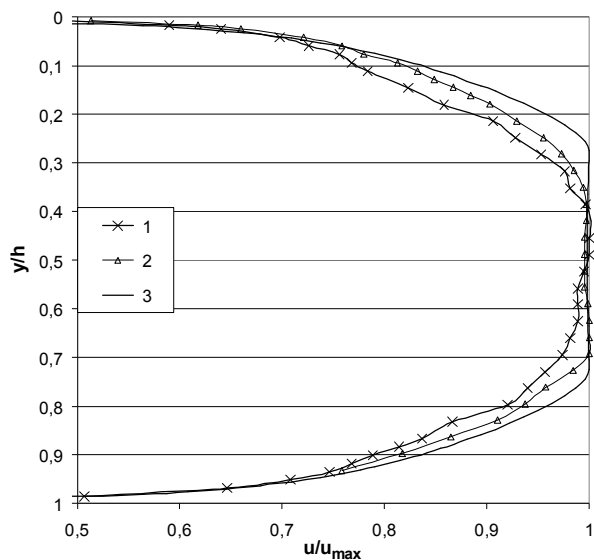
2 pav. Eksperimentinio kanalo bendras vaizdas



3 pav. Modelio tinklis (padidintas tinklio fragmentas)

skerspjūvyje. Šiame skerspjūvyje slėgis buvo artimas atmosferos slėgiui.

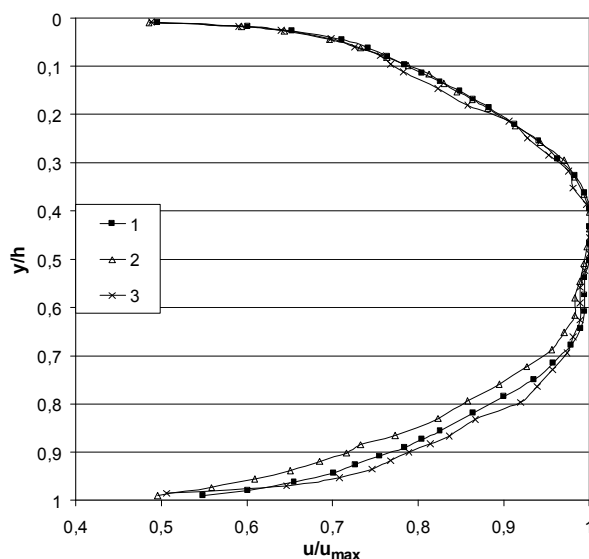
4 pav. pateikti išmatuoti greičio profiliai esant 6 m/s vidutiniam oro tekėjimo greičiui. Pirmasis profilis (1) gautas atlikus matavimus kanale be vandens tarp lygių, kietų (aliuminio) viršutinės ir apatinės kanalo sienelių. Apatinė kanalo sienelė pakelta į tokį aukštį, kurį sekančiuose matavimuose užims vandens paviršius. Antrasis profilis (2) išmatuotas, kai vietoje apatinės kanalo sienelės yra laisvas vandens paviršius. Šiuo atveju vandens lygis kanale 25 mm. Trečiasis profilis (3) apskaičiuotas trimačiu programiniu paketu FLUENT. Oro tėkmė modeliuota, kai kanale nėra vandens. Visais atvejais oro pratekėjimo skerspjūvis kanale išliko toks pat. Palyginus 1 ir 3 pro-



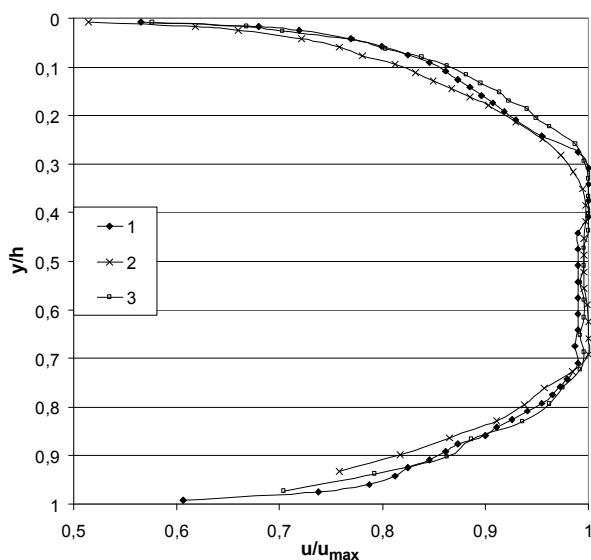
4 pav. Išmatuotų greičio profilių palyginimas su apskaičiuotu FLUENT programiniu paketu ($u_{\text{vid}} = 6 \text{ m/s}$): 1 – be vandens; 2 – oras–vanduo; 3 – FLUENT

filius matyti, kad apskaičiuotas greičio profilis ženkliai skiriasi nuo išmatuoto, kai kanalu teka vien oras. Išmatuotas profilis 1 išlieka beveik simetrišku. Lyginant 2 ir 3 profilius vizualiai pastebimas nedidelis išmatuoto greičio profilio 2 maksimumo srities pasislinkimas link vandens paviršiaus. Šis sulyginimas leido įsitikinti, kad FLUENT modelis turi būti tobulinamas.

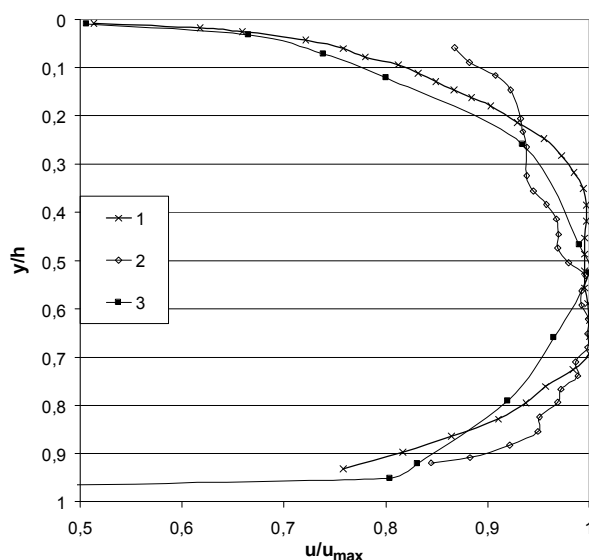
Siekiant įvertinti trinties su apatine kanalo sienele įtaką greičio profiliui, buvo atlikti papildomi matavimai kanalu tekant vien orui. Išmatuoti oro greičio profiliai, kai vietoje vandens paviršiaus patalpintas kietas netolygus šiurkštumo paviršius, sudarytas iš smulkių akmens grūdelių. Tam panaudotas švitrinis popierius. Šių paviršių šiurkštumo aukštis buvo 0,7 ir 1,5 mm. Matavimai



5 pav. Greičio profiliai, esant skirtingam apatinės sienelės šiurkštumui ($u_{\text{vid}} = 6 \text{ m/s}$). 1 – 0,7 mm šiurkštumas; 2 – 1,5 mm šiurkštumas; 3 – be vandens



6 pav. Išmatuoti greičio profiliai, esant 4, 6 ir 8 m/s vidutiniams oro tekėjimo greičiams oro–vandens tėkmėje. 1 – 4 m/s; 2 – 6 m/s; 3 – 8 m/s



7 pav. Išmatuotų greičio profilių palyginimas su kitų autorių duomenimis. 1 – mūsų duomenys, 6 m/s (oras–vanduo); 2 – Wongwis S. ir Kalinitchenko V. 2001 [6]; 3 – Paras ir kt. 1997 [7]

atlikti esant 6 m/s vidutiniam oro tekėjimo greičiui. Matavimo rezultatai pateikti 5 pav. Pirmasis pavaizduotas greičio profilis (1) išmatuotas esant 0,7 mm, o antrasis (2) – 1,5 mm apatinės sienelės šurkštumui. Palyginus šiuos profilius su anksčiau minėtu profiliu (3) oro tėkmėje be vandens pastebima, kad didinant apatinės kanalo sienelės šurkštumą plečiasi pasienio sritis prie šio paviršiaus. Kartu oro greičio profilio maksimumo sritis pastebimai tolsta nuo šurkštaus paviršiaus.

6 pav. pateikti išmatuoti oro greičio profiliai oro–vandens tėkmėje, esant 4, 6 ir 8 m/s vidutiniams oro greičiams kanale. Orui tekant 4 m/s vidutiniu greičiu kanale virš vandens, jo paviršius išlieka lygus ir išmatuotas jo greičio profilis (1) yra simetriškas. Orui tekant virš vandens 6 m/s vidutiniu greičiu kanale, jis vandens paviršiuje sukelia iki 5 mm aukščio bangas. Bangų aukščiu laikome pilną vandens lygio svyravimą. Kadangi oru aptekamas paviršius yra nelygus, padidėja trinties ir turbulizuojamas pasienio sluoksnis plečiasi. Apatinėje kanalo dalyje besiplečiant pasienio sluoksniui, greičio profilio (2) maksimumo sritis slenkasi link viršutinės kanalo sienelės. Tačiau šiam greičio profilio persislinkimui priešingai veikia susidarantys virš vandens paviršiaus antriniai oro tekėjimai [5]. Dėl šoninių sienelių įtakos vandens lygis kanalo centre yra aukštesnis ir orui aptekant tokį paviršių greičio profilis pasislenka link jo. Esant 6 m/s vidutiniam oro tekėjimo greičiui kanale vizualiai nustatyta, kad greičio maksimumo sritis pasislenka link vandens paviršiaus (poslinkis sudaro 2,7%, lyginant su simetriniu profiliu). Išplaukia išvada, kad esant 6 m/s vidutiniam oro tekėjimo greičiui, susidarantys antriniai tekėjimai greičio profilį veikia labiau negu padidėjusi trintis.

Esant 8 m/s vidutiniam oro srautui kanale vandens paviršiuje sukeliama 10 mm bangos. Vizualiai nustatytas greičio profilio (3) maksimumo srities pasislinkimas link viršutinės kanalo sienelės (poslinkis sudaro 1,2% lyginant su simetriniu profiliu). Tai paaiškinama tuo, kad dėl didelių bangų atsiradimo padidėjusios trinties įtaka prie vandens paviršiaus yra didesnė už antrinių tekėjimų įtaką greičio profiliui.

7 pav. pateiktas kanale išmatuoto oro greičio profilio palyginimas su kitų autorių panašių matmenų eksperimentiniuose ruožuose atliktų matavimų rezultatais. Pirmoji kreivė – tai jau minėtas greičio profilis, išmatuotas kanale orui tekant 6 m/s vidutiniu greičiu virš laisvai banguojančio vandens paviršiaus. Antrasis profilis – tai Wongwises ir Kalinitchenko [6] eksperimentiniai rezultatai stačiakampiame 54 mm aukščio bei pločio ir 2200 mm ilgio kvadratiniam kanale, kai vandens lygis 20 mm. Matavimai atlikti skerspjūvyje $x/d_{ekv} = 33$, didžiausias greitis kanale siekė 7,2 m/s.

Trečiasis 7 pav. pateiktas profilis – Paras ir kt. [7] rezultatai 50,8 mm skersmens vamzdyje. Matavimai atlikti išsivysčiusio tekėjimo srityje, orui tekant vidutiniu 6 m/s greičiu. Palyginus šiuos tris profilius, matyti, kad kitų autorių greičio profilių maksimumo sritis taip pat pasislinkusi link vandens paviršiaus. Paras ir kt. [7] atveju pasislinkimas link vandens paviršiaus nėra ženklus, tačiau Wongwises

ir Kalinitchenko [6] atliktuose matavimuose šis pasislinkimas daug didesnis.

5. IŠVADOS

Atlikus oro greičio matavimus horizontaliame kanale (stratifikuotoje oro–vandens tėkmėje bei oro tėkmėje su pašurkštintu apatiniu paviršiumi, kai $Re = 14710, 22060$ ir 29410), galima padaryti šias išvadas:

1. Dėl trinties skirtumo tarp oro–vandens ir oro–sienelės (tekėjimas be vandens) oro greičio profilis tampa nesimetrišku.

2. Didinant apatinės kanalo sienelės šurkštumą, plečiasi pasienio sritis prie šio paviršiaus ir greičio profilio maksimumas tolsta nuo jo.

3. Stratifikuotoje oro–vandens tėkmėje oro greičio profilį veikia tarpfazinė trintis ir antriniai oro tekėjimai. Šie du poveikiai sąlygoja greičio profilio deformaciją ir veikia vienas prieš kitą. Esant 6 m/s vidutinio greičio oro tėkmei virš banguojančio vandens paviršiaus, didesnę įtaką greičio profiliui turi antriniai tekėjimai, todėl pastebimas profilio maksimumo pasislinkimas link vandens paviršiaus. Esant 8 m/s vidutinei oro tėkmei didesnę įtaką jo profiliui turi tarpfazinė trintis, todėl pastebimas profilio pasislinkimas tolyn nuo vandens paviršiaus.

Pažymėjimai

- h – kanalo aukštis m;
- a – kanalo plotis m;
- x – atstumas nuo kanalo pradžios (ašinė koordinatė) m;
- y – skersinė koordinatė m;
- d_{ekv} – oro pratekėjimo ekvivalentinis skersmuo,
 $d_{ekv} = (4 \cdot A)/P$, m;
- A – oro pratekėjimo skerspjūvio plotas m^2 ;
- P – oro pratekėjimo skerspjūvio perimetras m;
- u – greitis m/s;
- dP – slėgių skirtumas Pa;
- ρ – tankis kg/m^3 ;
- y^+ – nedimensinė koordinatė;
- Re – Reinoldso skaičius.

Indeksai

- vid – vidutinis;
- max – didžiausias.

Gauta 2007 01 16
Parengta 2007 03 20

Literatūra

1. Šeporaitis M., Pabarčius R., Almenas K. Eksperimentinis įrenginys tirti kondensacijos įtaką dvifaziame stratifikuotam tekėjimui // Energetika. 2005. Nr. 2. P. 1–7.
2. Gasiūnas S. Vandens–oro tėkmės tarpfazinės trinties eksperimentinis ir skaitinis tyrimas // Lietuvos mokslas ir pramonė: Šilumos energetika ir technologijos. KTU konf. pranešimų medžiaga, 2005 vasario 3, 4. Kaunas: Technologija, 2005. P. 55–57.

3. Gasiūnas S. Eksperimentinio įrenginio – horizontalaus kanalo modeliavimas FLUENT programiniu paketu // LEI doktorantų kasmetinė-ataskaitinė konferencija 2004. Konferencijos pranešimų medžiaga, 2004 rugsėjo 30. Kaunas, 2004.
4. FLUENT 6.0 Code Manual, Fluent Inc., 2001.
5. Dykhno L. A., Williams L. R., Hanratty T. J. Maps of mean gas velocity for stratified flows with and without atomization // Int. J. Multiphase Flow. 1994. No. 20. P. 691–702.
6. Wongwises S., Kalinitchenko V. Mean velocity distributions in a horizontal air–water flow // Int. J. Multiphase Flow. 2002. No. 28. P. 167–174.
7. Paras S. V., Vlachos N. A., Karabelas A. J. LDA measurements of local velocities inside the gas phase in horizontal stratified atomization two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow. 1998. No. 24. P. 651–661.

Stasys Gasiūnas, Raimondas Pabarčius, Marijus Šeporaitis

INVESTIGATION OF INTERPHASE FRICTION INFLUENCE ON VELOCITY PROFILE IN TWO-PHASE NON-CONDENSABLE FLOW

S u m m a r y

Test results of flow velocity profiles in a horizontal rectangular channel ($h/a = 1.16$) are presented. The air velocity profiles were measured in stratified air–water flow and air flow without water in the channel when the average velocity of the air flow varied within 4–8 m/s ($Re = 14710–29410$). Measurements without water in the channel were taken with a rough

and with a smooth bottom wall of the experimental channel. Analysis of the test results shows that air velocity profiles become non-symmetric when air flows above a wavy water surface. It causes an increase of roughness on the interphase surface when waves and secondary flows appear.

Key words: stratified two-phase flow, horizontal channel, air–water flow, interphase friction

**Стасис Гасюнас, Раймондас Пабарčius,
Мариюс Шепорайтис**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖФАЗНОГО ТРЕНИЯ К ПРОФИЛЮ СКОРОСТИ В ДВУХФАЗНОМ НЕКОНДЕНСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Резюме

Представлены измеренные профили скорости воздуха в горизонтальном прямоугольном канале ($h/a = 1,16$). Измерения выполнены в стратифицированном двухфазном потоке воздух–вода и в потоке воздуха без воды в канале. Профили скорости воздуха измерены в потоке со скоростью воздуха 4–8 м/с ($Re = 14710–29410$). Эксперименты без воды выполнены с шероховатой и с гладкой нижней стенкой канала.

Анализ результатов эксперимента показал, что профиль скорости воздуха становится несимметричным, когда воздух течет сверх волнообразной поверхности воды. Деформацию профиля вызывает повышенное трение в межфазной поверхности при наличии волнения и вторичных течений.

Ключевые слова: стратифицированный двухфазный поток, горизонтальный канал, течение воздух–вода, межфазное трение