

# Tarpfazinio paviršiaus trinties dvifazėje tėkmėje nustatymas

## 2. Greičio profilio kitimas garui tekant kanale virš laisvo vandens paviršiaus

**Stasys Gasiūnas,**

**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, gauti horizontaliame stačiakampiam kanale (ilgis yra 1,2 m, aukštis 0,1 m ir plotis 0,02 m) tekant garui virš banguojančio vandens paviršiaus. Vandens lygis palaikomas 0,025 m. Garo greičio profiliai išmatuoti esant 4, 6 ir 8 m/s vidutiniam įtekėjimo greičiui ( $Re = 6000, 9000$  ir  $12000$ ). Greičio profiliai išmatuoti naudojant Pito vamzdelį 1 m atstumu nuo kanalo pradžios, esant skirtingam garo kondensacijos intensyvumui. Kondensacijos intensyvumas buvo keičiamas keičiant aušinančio vandens srautą.

Šis darbas susijęs su tarpfazinės trinties tyrimais dvifazėje besikondensuojančioje tėkmėje. Jų tikslas – nustatyti kondensacijos įtaką tarpfazinei trinciai.

**Raktažodžiai:** dvifazė tėkmė, stratifikuotas garo–vandens tekėjimas, kondensacija, horizontalus kanalas, garo greičio profilis

### 1. ĮVADAS

Lietuvos energetikos institute vykdomi staigaus kondensacinio pliūpsnio tyrimai [1]. Gilinant šio fenomeno vyksmą, atliekami dvifazės tėkmės eksperimentiniai tyrimai horizontaliame stačiakampiam kanale [2]. Pirmasis etapas buvo nesikondensuojančios dvifazės tėkmės eksperimentiniai tyrimai, atlikti stratifikuotoje dvikomponentėje dvifazėje tėkmėje oras–vanduo, o rezultatai pristatyti straipsniuose [3] ir [4]. Šiuo metu vykdomi besikondensuojančios dvifazės tėkmės tyrimai. Siekiama įvertinti tarpfazinę trintį ir kondensacijos įtaką tarpfazinio paviršiaus stabilumui. Šiame darbe pateikiami greičio profiliai nesikondensuojančioje ir besikondensuojančioje garo–vandens tėkmėje. Tolesniuose darbuose ketinama nustatyti tarpfazinę trintį. Tam numatoma panaudoti šiuos greičio profilius ir skaitinio FLUENT modelio skaičiavimo rezultatus.

### 2. EKSPERIMENTINIS STENDAS

Eksperimentai atliekami horizontaliame stačiakampiam kanale, kurio nuotrauka matyti 1 paveiksle.

Kanalas pagamintas iš nerūdijančio plieno, kurio šonuose įstatyti skaidrūs stiklai. Kanalo vidiniai matmenys: ilgis 1200 mm, aukštis 100 mm, plotis 20 mm (2 pav.). Siekiant sumažinti šilumos nuostolius į aplinką ir vidinių sienelių rasojimą, eksperimentinis ruožas apšiltintas šilumine izoliacija.

Sotusis garas tiekiamas įvadiniu vamzdiu, kurio skersmuo 27 mm, ir pratekėjęs stačiakampį kanalą laisvai išteka į aplinką. Siekiant sumažinti sukurius, prieš kanalą įrengtas keraminis korys, sudarytas iš 850 tėkmei lygiagrečių kvadratinių kanaliukų,

kurių plotis 1 mm, o ilgis 95 mm. Šis korys kanalo pradžioje suformuoja beveik stačiakampį garo greičio profilį. Garo srautas reguliuojamas elektromechaninę pavarą turinčia sklende pagal sukurinio srauto matuoklio „Endress + Hauser“ rodmenis. Vandens lygį 25 mm palaiko kanalo gale sumontuotas laiptelis. Vanduo aušinamas tiekiant šaltą vandenį į kanalo priekį, kurio srautas reguliuojamas sklende pagal elektromagnetinio vandens srauto matuoklio ISOIL rodmenis. Temperatūrų matavimams kanale naudojama 11 chromelio–aliumelio termoporų. Garo greitis matuojamas kanalo pabaigoje, 1 m atstume nuo kanalo pradžios ( $x/d_{ekv} = 31$ ). Matuojama naudojant Pito vamzdelį, kuris sujungtas su elektroniniu skirtuminio slėgio matuokliu „Fuji Electric FCX-AII“. Skirtuminio slėgio matuoklio tikslumas yra  $\pm 0,07\%$ , o matavimo ribos 0–150 Pa. Matuojama pagal vertikalų skerspjūvio ašį nuo viršutinės kanalo sienelės iki vandens paviršiaus. Matavimo taškų žingsnis kito nuo 0,5 mm prie paviršiaus iki 4 mm skerspjūvio vidurinėje dalyje. Pito vamzdeliu išmatuotas dinaminis slėgis perskaiciuojamas į greitį naudojant šią išraišką:

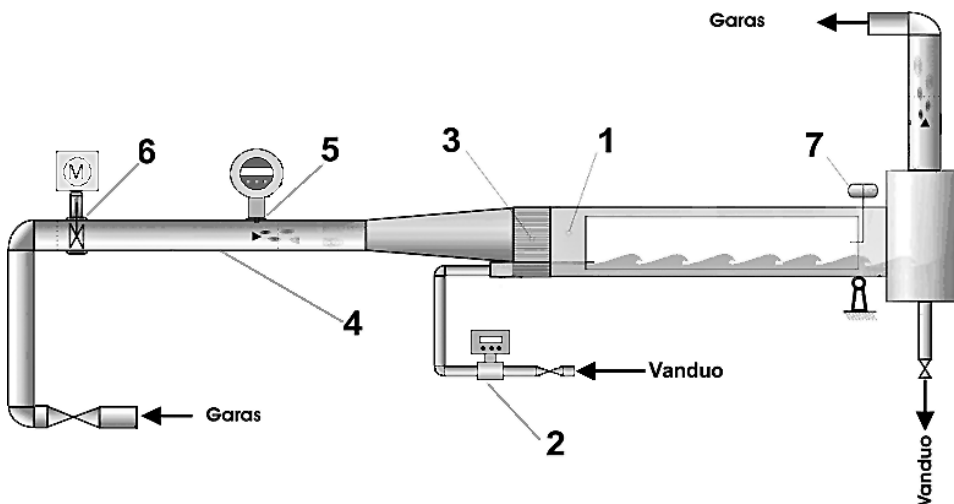
$$u(y) = \sqrt{\frac{2 \cdot dP(y)}{\rho}}$$

Eksperimentų metu garui įtekant 4, 6 ir 8 m/s greičiu, jo temperatūra kanalo gale buvo atitinkamai 104, 105 ir 109 °C.

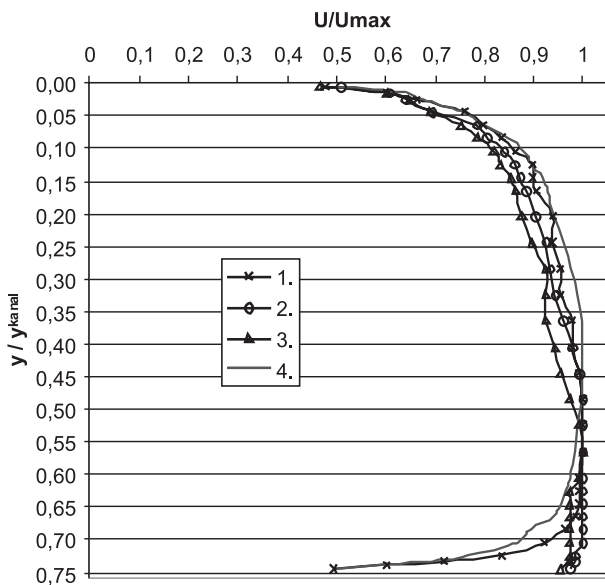
Tame pačiame skerspjūvyje išmatuotos ir vandens temperatūros, naudojant 5 vertikaliai išdėstytas termoporas. Vandens tiekimo srautas buvo atitinkamai 10, 50, 100 l/h, o vidutinis vandens greitis – 0,005, 0,027, 0,055 m/s.



1 pav. Eksperimentinio stendo nuotrauka



2 pav. Eksperimentinis stendas. 1 – stačiakampis kanalas, 2 – elektromagnetinis vandens srauto matuoklis, 3 – korys, 4 – įvadinis vamzdis, 5 – sukurinis garo srauto matuoklis, 6 – garo srauto reguliavimo vožtuvas su servopavara, 7 – Pito vamzdelis



3 pav. Garo greičio profiliai esant  $U_{vid} = 4$  m/s garo įtekėjimo greičiui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h

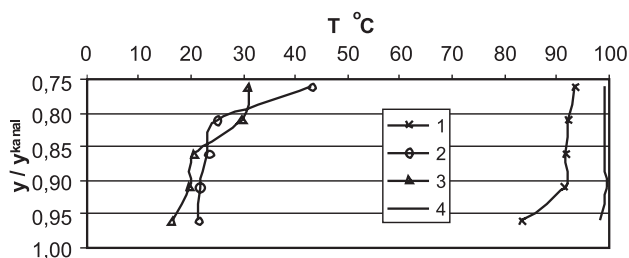
### 3. REZULTATAI

Eksperimentiniai tyrimai atlikti kanale garui tekan virš laisvo banguojančio vandens paviršiaus. Garo greičio profiliai kanale išmatuoti esant 4, 6 ir 8 m/s vidutiniams įtekėjimo greičiams, kai Reinoldso kriterijus atitinkamai 6000, 9000 ir 12000. Matavimai atlikti 1000 mm ( $x/d_{ekv} = 31$ ) nuo kanalo pradžios nutolusiame skerspjūvyje. Slėgis kanale buvo artimas atmosferos slėgiui.

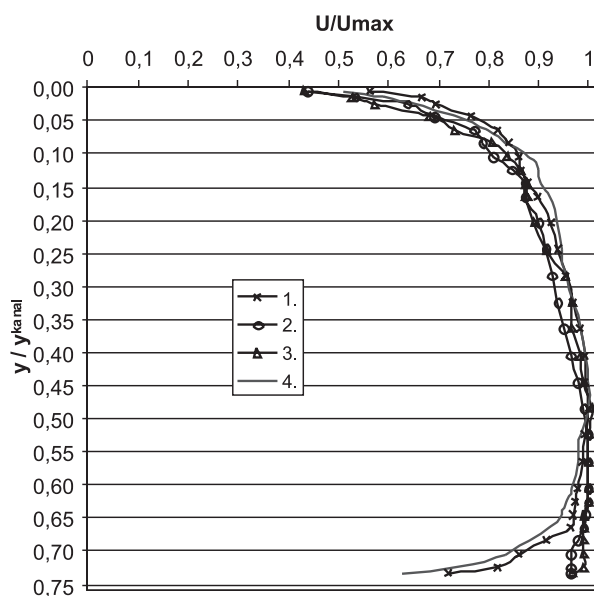
3 pav. pateikti išmatuoti greičio profiliai esant 4 m/s vidutiniam garo tekėjimo greičiui. Y ašyje 0 atitinka kanalo viršutinę sienelę, o 0,75 – vandens paviršių.

Vandens srautas: 1 – 10 l/h; 2 – 50 l/h; 3 – 100 l/h; 4 – 0 l/h.

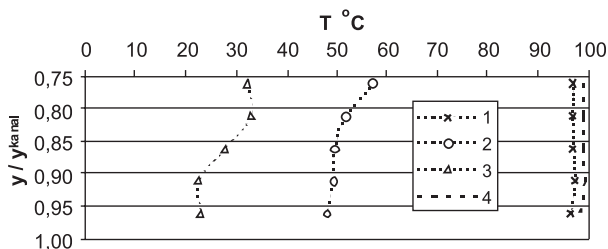
Pirmasis profilis (3 pav.) išmatuotas esant 10 l/h šalto vandens tiekimo srautui, antrasis – 50 l/h ir trečiasis – 100 l/h. Tiekiamo šalto vandens temperatūra buvo 9–12 °C. Ketvirtasis profilis išmatuotas, kai aušinantis vanduo netiekiamas į kanalą, tačiau jo lygis išlaikomas toks pat, o jo temperatūra yra artima garo temperatūrai (4 pav. 4 kreivė). 4 pav. pateiktos vandens temperatūros, išmatuotos skerspjūvyje, nutolusiame 1000 mm nuo kanalo pradžios. Čia y ašyje 0,75 atitinka vandens paviršių



4 pav. Vandens temperatūros esant  $U_{vid} = 4$  m/s garo įtekėjimo greičiui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h



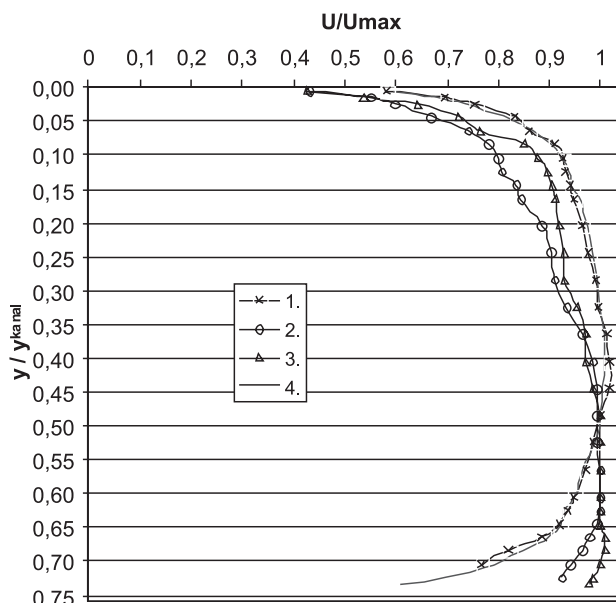
5 pav. Garo greičio profiliai esant  $U_{vid} = 6$  m/s garo įtekėjimo greičiui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h



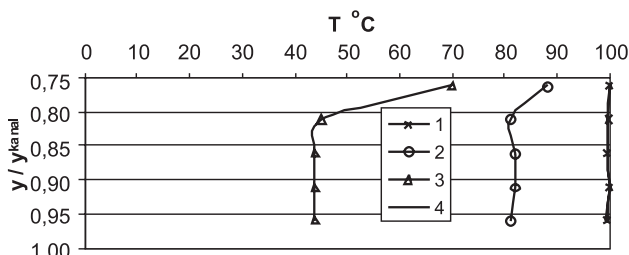
6 pav. Vandens temperatūros esant  $U_{vid} = 6$  m/s garo srautui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h

kanale, o 1 – kanalo dugną. Tarpusavyje palyginus temperatūros profilius, aiškiai pastebimas vandens pašilimas dėl garo kondensacijos ant vandens paviršiaus.

Palyginus pirmą greičio profilį (vandens srautas 10 l/h) su ketvirtu greičio profiliu (vandens srautas 0 l/h) 3 pav., pastebimas nedidelis pirmojo greičio profilio maksimumo srities pasislinkimas link vandens paviršiaus. Šiuo atveju vandens temperatūra nedaug žemesnė už garo temperatūrą (4 pav. 1 kreivė) ir garo kondensacija ant vandens paviršiaus nedidelė. Akivaizdus greičio maksimumo srities pasislinkimas pastebimas antrajame (vandens srautas 50 l/h) ir trečiajame (vandens srautas 100 l/h) profiluose. Šiais atvejais vandens temperatūros gerokai žemesnės už garo (4 pav. 2 ir 3 kreivės). Padidinus šalto vandens tiekimo srautą, padidėja garo kondensacijos intensyvumas ant



7 pav. Garo greičio profiliai esant  $U_{vid} = 8$  m/s garo įtekėjimo greičiui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h



8 pav. Išmatuotos vandens temperatūros esant  $U_{vid} = 8$  m/s garo įtekėjimo greičiui: 1 – tiekiamo vandens srautas 10 l/h, 2 – 50 l/h, 3 – 100 l/h, 4 – 0 l/h

vandens paviršiaus. Tai keičia garo tekėjimo greičio profilį, kurio maksimumo sritis slenkasi link tarpfazinio paviršiaus. Kuo intensyvesnė garo kondensacija ant vandens paviršiaus, tuo prie jo didesnis tampa garo tekėjimo greitis.

5 ir 6 paveiksluose pateikti garo greičio profiliai ir vandens temperatūros, išmatuoti garui į kanalą įtekant 6 m/s vidutiniu greičiu, o 7 ir 8 paveiksluose – garo greičio profiliai ir vandens temperatūros, išmatuoti garui į kanalą įtekant 8 m/s vidutiniu greičiu. Čia matyti tos pačios greičio profilio persislinkimo dėl garo kondensacijos tendencijos.

#### 4. IŠVADOS

Iš eksperimentų metu išmatuotų garo tekėjimo greičio profilių ir garo bei vandens temperatūrų matyti, kad garui tekant virš vėsesnio vandens paviršiaus, keičiasi garo greičio profilis. Dalis kanalu tekančio garo yra sukondensuojama ant vėsesnio vandens paviršiaus ir tai keičia garo greičio profilio pasienio sritis tiek apačioje prie vandens, tiek viršuje prie sienelės. Kuo garo kondensacijos intensyvumas didesnis, tuo daugiau greičio profilio maksimumo sritis slenkasi link vandens paviršiaus. Darome prielaidą, kad tai vyksta dėl kondensacijos sukulto slėgio gradiento į vandens paviršių. Šis slėgio gradientas sukelia antrinį garo tekėjimą link vandens paviršiaus ir iškreipia ašinį greitį.

**Žymėjimai**

$U$  – greitis m/s,  
 $U_{max}$  – didžiausias greitis matavimo skerspjūvyje m/s,  
 $U_{vid}$  – vidutinis greitis m/s,  
 $x$  – horizontali (pagal tėkmę) koordinatė m,  
 $y$  – vertikali koordinatė m,  
 $d_{ekv}$  – kanalo ekvivalentinis skersmuo m,  
 $y_{kanal}$  – kanalo aukštis m,  
 $Re$  – Reinoldso kriterijus,  
 $dP$  – dinaminis slėgis Pa,  
 $\rho$  – tankis kg/m<sup>3</sup>.

Gauta 2009 03 16

Priimta 2009 05 11

**Literatūra**

1. Šeporaitis M., Pabarčius R., Almenas K. Study of controlled condensation implosion events // Proceedings of ICONE10 10th International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, Virginia (Washington DC), USA, 2002. P. 1–7.
2. Šeporaitis M., Pabarčius R., Almenas K. Eksperimentinis įrenginys tirti kondensacijos įtaką dvifaziam stratifikuotam tekėjimui // Energetika. 2005. Nr. 2. P. 1–7.
3. Gasiūnas S., Pabarčius R., Šeporaitis M. Tarpfazinio paviršiaus trinties įtakos greičių laukui dvifazėje nesikondensuojančioje tėkmėje tyrimas // Doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencijos „Jaunoji energetika“ pranešimų medžiaga. Kaunas: LEI, 2006.
4. Gasiūnas S., Pabarčius R., Šeporaitis M. Tarpfazinio paviršiaus trinties įtakos greičių laukui dvifazėje nesikondensuojančioje tėkmėje tyrimas // Energetika. 2007. Nr. 1. P. 23–27.

Stasys Gasiūnas, Marijus Šeporaitis

**ESTIMATION OF INTERFACIAL SHEAR  
 IN TWO-PHASE FLOW  
 2. CHANGE OF VELOCITY PROFILE WHEN STEAM  
 FLOWS OVER FREE WATER SURFACE IN HORIZONTAL  
 CHANNEL**

*Summary*

The paper presents experiments of steam–water flow in a rectangular channel (1.2 m long, 0.1 m high and 0.02 m wide). The water depth was kept at 0.025 m. The steam velocity profiles were measured when the average velocity of steam flow was 4, 6, and 8 m/s ( $Re = 6000, 9000,$  and 12000). The velocity profiles were measured at different steam condensation intensity using a Pitot tube at a distance of 1 m from the beginning of the channel. The condensation intensity was modified by the cooling water flow rate.

This work is associated with the research of interfacial shear in steam–water flow. The main purpose was determination of condensation impact on interfacial shear.

**Key words:** two-phase flow, stratified steam-water flow, condensation, horizontal channel, steam velocity profiles

Стасис Гасюнас, Мариус Шепорайтис

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТРЕНИЯ В  
 ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ  
 2. ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ПАРА,  
 ТЕКУЩЕГО НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ В  
 ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ**

*Резюме*

Представлены экспериментальные данные двухфазного потока пар–вода в горизонтальном прямоугольном канале (длина 1,2 м, высота 0,1 м и ширина 0,02 м). Уровень воды – 25 мм. Профили скорости течения пара измерены в потоке со скоростью пара 4, 6 и 8 м/с ( $Re = 6000, 9000$  и 12000). Профили скорости измерены с использованием трубки Пито на расстоянии 1 м от начала канала и при разной интенсивности конденсации пара над поверхностью воды. На интенсивность конденсации влияли изменением подачи холодной воды.

Эта работа связана с исследованием межфазного трения в потоке пар–вода. Цель исследования – определить влияние конденсации на межфазное трение.

**Ключевые слова:** двухфазный поток, стратифицированный поток пар–вода, конденсация, горизонтальный канал, профиль скорости пара