# Tarpfazinio paviršiaus trinties dvifazėje tėkmėje nustatymas 3. Tarpfazinės trinties, esant kondensacijai, skaičiavimas vienfaziu FLUENT 3D modeliu

# Stasys Gasiūnas,

# Marijus Šeporaitis,

# **Egidijus Babilas**

Branduolinių įrenginių saugos laboratorija, Lietuvos energetikos institutas, Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas El. paštas: stasys@mail.lei.lt Pristatomi Lietuvos energetikos institute atliekamų horizontalios dvifazės besikondensuojančios tėkmės eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo FLUENT programų paketu rezultatai. Eksperimentiškai buvo išmatuoti garo greičio profiliai ir vandens bei garo temperatūros, pagal kurias apskaičiuotas kondensuojamo garo srautas į vandens paviršių. Apskaičiuotas kondensuojamo garo srautas panaudotas FLUENT modelyje. Modeliuojama tik garo fazė, o kondensacija imituojama per pusiau pralaidžią apatinę sienelę. Palyginami eksperimentiškai išmatuoti ir FLUENT 6.3 sumodeliuoti garo greičio profiliai. Skaitiniu modeliu gautas tangentinių įtempių tarpfaziniame paviršiuje priklausomumas nuo kondensuojamo garo srauto. Šis priklausomumas rodo, kad kondensacija paveikia tangentinius įtempius tarpfaziniame paviršiuje.

Raktažodžiai: dvifazis tekėjimas, stratifikuotas garo–vandens tekėjimas, kondensacija, horizontalus kanalas, garo greičio profilis, tangentiniai įtempiai tarpfaziniame paviršiuje

# 1. ĮVADAS

Skirtingų teorijų ir skaitinių modelių įvairovė nesuteikia vientisos ir sisteminės besikondensuojančio dvifazio tekėjimo modeliavimo galimybės ne tik dėl procesų sudėtingumo, bet ir dėl eksperimentinių tyrimų stokos. Kondensacijos įtaka horizontalaus laisvo tarpfazinio paviršiaus nestabilumo pasireiškimui išsamiai netyrinėta. Apibūdinant tiesioginę kondensaciją ant stratifikuoto horizontalaus tarpfazinio paviršiaus reikia pabrėžti, kad tai kintanti ir tarpusavyje sąveikaujanti dviejų fazių sistema. Tarpusavio sąveika sukelia susijusius pakitimus – masės, šilumos ir judesio kiekio mainai veikia tekėjimo režimą, kuris, savo ruožtu, veikia pačius mainus. Lietuvos energetikos institute vykdomi staigaus kondensacinio pliūpsnio tyrimai. Tyrimo rezultatai [1] veda prie įžvalgos, kad kondensacija turi didelę įtaką garo-vandens tarpfazinio paviršiaus stabilumui. Siekiant patikrinti šią prielaidą, Lietuvos energetikos institute sukonstruotas specialus eksperimentinis stendas bei sukurtas jo skaitinis (vienfazis su kondensacijos imitavimu) modelis FLUENT 3D programiniu paketu. Pagrindiniai šiame darbe nagrinėjami klausimai yra du - kaip kondensacija veikia garo greičio profilį prie vandens paviršiaus ir koks tarpfazinės šlyties priklausomumas nuo kondensacijos intensyvumo?

## 2. EKSPERIMENTINIS STENDAS

Eksperimentiniai matavimai atlikti horizontaliame stačiakampiame kanale. Kanalas pagamintas iš nerūdijančio plieno, kurio šonuose įstatyti skaidrūs stiklai. Kanalo vidiniai matmenys: ilgis 1 200 mm, aukštis 100 mm, plotis 20 mm. Siekiant sumažinti šilumos nuostolius į aplinką ir vidinių sienelių rasojimą, eksperimentinis ruožas apšiltintas šilumine izoliacija. Principinė eksperimentinio stendo schema parodyta 1 paveiksle.

Garas tiekiamas įvadiniu vamzdžiu, kurio skersmuo 27 mm. Pratekėjęs stačiakampį kanalą, jis laisvai išteka į aplinką. Siekiant sumažinti sūkurius, prieš kanalą įrengtas keraminis korys, sudarytas iš 850 tėkmei lygiagrečių kvadratinių kanaliukų, kurių plotis 1 mm, ilgis 95 mm. Šis korys kanalo pradžioje suformuoja beveik stačiakampį garo greičio profilį. Garo srautas reguliuojamas elektromechaninę pavarą turinčia sklende (4) pagal sūkurinio srauto matuoklio "Endress + Hausero" (3) rodmenis. Vandens lygį (25 mm) palaiko kanalo gale esantis laiptelis. Kanalo priekyje tiekiamas šaltas vanduo, kurio srautas reguliuojamas sklende pagal elektromagnetinio vandens srauto matuoklio ISOIL (7) rodmenis. Garo, vandens ir sienelių temperatūros kanale matuojamos naudojant 11 chromelio–aliumelio termoporų



#### 1 pav. Eksperimentinis stendas.

1 – stačiakampis kanalas (plotis 0,02 m, aukštis 0,1 m, ilgis 1,2 m); 2 – korys; 3 – sūkurinis srauto matuoklis (su slėgio keitikliu ir termopora); 4 – reguliuojantis vožtuvas su servopavara; 5 – tiesioginio veikimo reguliuojantis uždarantysis vožtuvas; 6 – oro šildytuvas; 7 – elektromagnetinis vandens srauto matuoklis; 8 – dinaminio dujų slėgio matuoklis; 9 – termoporos vandenyje; 10 – termoporos dujose; 11 – termoporos ant korpuso; V-1 – oro / garo tiekimo sklendė; V-2 – vandens tiekimo sklendė; V-3 – drenažo sklendė

(9-11). Garo greitis matuojamas kanalo pabaigoje, 1 m atstumu nuo kanalo pradžios  $(x/d_{ekv} = 31)$ . Matuojama naudojant Pito–Prandtlio vamzdelį, kuris sujungtas su elektroniniu skirtuminio slėgio matuokliu "Fuji Electric FCX-AII" (8). Matuojama pagal vertikalią skerspjūvio ašį nuo viršutinės kanalo sienelės iki vandens paviršiaus. Matavimo taškų žingsnis kinta nuo 0,5 mm (prie sienelės ir prie vandens) iki 4 mm (vidurinėje skerspjūvio dalyje). Eksperimentai atlikti garui į kanalą įtekant 4, 6 ir 8 m/s greičiu, jo temperatūrai esant 100–108 °C, kuri kiekviename iš eksperimentų išlaikyta 1 °C tikslumu.

Tame pačiame skerspjūvyje (kanalo pabaigoje) išmatuotos ir vandens temperatūros, naudojant 5-ias vertikaliai išdėstytas termoporas. Vanduo tiektas 10, 50, 100 l/h srautu, o vidutinis apskaičiuotas vandens greitis kanale atitinkamai 0,005, 0,027, 0,055 m/s.

# **3. SKAITINIS MODELIS**

Šiame darbe naudotas FLUENT-6 skaičiuojamosios hidrodinamikos programų paketas [2], plačiai taikomas fluido tėkmėms ir šilumos perdavimui sudėtingose sistemose modeliuoti.

Tekant garui virš vandens paviršiaus didesniu kaip 4 m/s greičiu, jo paviršiuje sukeliamos bangos. Taigi apatinė kanalo sienelė tampa nebelygi ir keičia paviršiaus formą bei plotą. Dėl vandens paviršiaus nepastovumo negalime sukurti skaitiniam modeliui šio paviršiaus formos. Programos kūrėjai nėra atlikę palyginamųjų skaičiavimų tekėjimo atvejui, kai bangos vandens paviršiuje sukeliamos dėl virš jo tekančių dujų. Todėl, siekdami nustatyti tarpfazinę trintį, naudojame trimatį vienfazės dujų tėkmės modelį.

# Modelio tinklelis ir ribinės sąlygos

FLUENT programų paketu sukurtas horizontalaus stačiakampio kanalo modelio tinklelis pavaizduotas 2 paveiksle.

Čia parodyti viso kanalo vidinės ertmės kontūrai, o sudaryto vienfazio trimačio modelio skaičiuojamoji sritis išskirta juodais langeliais. Ši sritis padalyta į  $2 \times 10^6$  elementų. Siekiant optimizuoti skaičiavimo technikos ir laiko išteklius, elementai prie sienelės sukurti smulkesni, o kanalo centre stambesni (2 pav.). Pagal *y* koordinatę sukurti 84 elementai, kurių dydis kinta nuo 0,2 mm prie sienelės iki 2,5 mm centre. Pagal *z* koordinatę sukurta 20 elementų, kurių dydis taip pat kinta nuo



2 pav. Modelio tinklelis

0,2 iki 1 mm. Pagal x koordinatę elementų dydis yra pastovus – 1 mm. Kadangi uždavinys yra simetriškas kanalo centrinės x-y plokštumos atžvilgiu, skaičiuojama tik pusė kanalo, naudojant veidrodinės simetrijos ribinę sąlygą. Todėl tinklelis yra 10 mm pločio (kanalo plotis 20 mm), 1 200 mm ilgio ir 75 mm aukščio. Pakankamas tinklelio smulkumas buvo nustatytas palyginimo būdu, kai panaudojus smulkesnį uždavinio tinklelį gaunamas mažas skaičiavimo rezultatų skirtumas.

Modelyje sienelės buvo numatytos hidrodinamiškai lygios, šilumos mainai su aplinka nevertinami, taigi energijos lygtis nesprendžiama.

Kadangi garo tėkmė turbulencinė (atitinkamai Re = 6 000, 9 000 ir 12 000), modeliuojant buvo naudojamas standartinis  $k-\omega$  turbulencijos modelis. Šis turbulencijos modelis pagrįstas Wilcox modeliu [3]. Jis pranašesnis už  $k-\varepsilon$  modelį, kai fluidų tėkmei yra svarbi pasienio sritis.

Skaičiavimai atlikti naudojant trimatį, viengubo tikslumo, stacionarų laiko atžvilgiu, slėgio gradientu paremtą sprendimo būdą.

## Modelio pradinės sąlygos

Įtekančio garo turbulencijos kinetinė energija k buvo numatyta 0 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, kadangi kanalo pradžioje įmontuotas korys, kuris sudarytas iš daugelio 1 mm pločio ir 95 mm ilgio stačiakampių kanaliukų. Korys panaikina didelius sūkurius ir suformuoja artimą stačiakampiam ištekančio iš jo garo greičio profilį. Sūkurių disipacijos laipsnis  $\omega$  įtekėjime buvo apskaičiuotas pagal empirines išraiškas, pateiktas FLUENT programiniame pakete:

$$w = \frac{k^{0.5}}{C_{\mu}^{0.25} \cdot l}; \quad k = \frac{3}{2} \cdot \left(\bar{u} \cdot \bar{I}\right)^{2};$$
(1)  
$$I = 0.16 \cdot (\text{Re})^{1/8}; \quad C\mu = 0.09; \quad l = 0.07 \cdot L; \quad L = D_{\mu};$$

čia *I* – turbulencijos intensyvumas %; *k* – turbulencijos kinetinė energija m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;  $\omega$  – turbulencijos disipacijos laipsnis s<sup>-1</sup>;  $C_{\mu}$  – dinaminės klampos koeficientas; *l* – turbulencijos ruožo ilgis mm;  $D_{eky}$  – ekvivalentinis kanalo skersmuo.

Kanalo pradžioje nustatoma 4, 6 ir 8 m/s greičio garo tėkmė su tolygiu pagal skerspjūvį greičio lauku. Tėkmė kanale yra turbulencinė, kadangi Reinoldso kriterijus atitinkamai 6000, 9000 ir 12000. Slėgis artimas atmosferos slėgiui. Taip pat numatomi tekančio garo tankis ir dinaminė klampa, kurie paimti iš elektroninės lentelės [4] pagal eksperimentų metu išmatuotas garo temperatūras ir slėgį (eksperimentuose taip pat atmosferos slėgis). Numatytas tankis  $\rho = 0,58-0,59$  kg/m<sup>3</sup>, o dinaminė klampa  $\mu = 1,256-1,232 \times 10^{-5}$  kg/(m · s).

#### Turbulencijos modelio modifikacija

Atlikus preliminarius skaičiavimus naudojant standartinį  $k-\omega$  turbulencijos modelį su standartiniais šio modelio koeficientais, nustatyta, kad greičio profiliai ženkliai skiriasi nuo eksperimentinių profilių. Standartiniai  $k-\omega$  turbulencijos modelio koeficientai:

$$\begin{array}{lll} \alpha_{\infty}^{*}=1; & \alpha_{\infty}=0.52; & \beta_{\infty}^{*}=0.09; & \beta_{I}=0.072; & R_{\beta}=8; \\ \zeta_{}^{*}=1.5; & M_{to}=0.25; & \Pr_{TKE}=2; & \Pr_{SDR}=2. \end{array}$$

Standartinis  $k-\omega$  turbulencijos modelis yra empirinis modelis, pagrįstas turbulencijos kinetinės energijos k ir sūkurių disipacijos  $\omega$  pernašos lygtimis, kurias galima rasti FLUENT 6.0 vartotojo vadove [5].

Siekiant gauti kuo artimesnį išmatuotajam apskaičiuotą greičio profilį, buvo keičiami paeiliui  $\alpha_{\infty}^*, \alpha_{\infty}, \beta_i$  ir  $\beta_{\infty}^*$  modelio koeficientai. Tačiau didžiausias greičio profilių panašumas, gautas pakeitus tik vieną iš koeficientų, –  $\beta_{\infty}^*$ . Jis buvo sumažintas du kartus, t. y.  $\beta_{\infty}^* = 0,045$ .

Kondensacijos imitavimas FLUENT skaitiniame modelyje Tekant garui kanale ant šaltesnio vandens paviršiaus kondensuojasi garas. Šį procesą sumodeliuoti trimačiais programų paketais labai sudėtinga dėl greta skaičiuojamų dviejų skirtingų fazių fluidų tekėjimo, vientisumo lygčių bei papildomai atsirandančių šilumos, masės ir momento perdavimo per tarpfazini paviršių. Korektiškai tokį uždavinį sprendžiančių programinių paketų šiuo metu nėra. Kaip minėta, tyrimo eigoje buvo taikomas vienfazis trimatis skaitinis tekėjimo kanale modelis. Sudarytu modeliu neskaičiuojami šilumos mainai ir nevertinami šilumos mainai su aplinka. Modelyje įtraukti pakeitimai, leidžiantys dalį garo srauto nukreipti per pusiau pralaidžią apatinę kanalo sienelę. Ji imituoja tarpfazinį paviršių, kai vyksta kondensacija (dalis kanale tekančio garo prarandama). Apatinė pusiau pralaidi modelio sienelė sudaryta iš grotelių principu sudėliotų 1 mm pločio ir 1 200 mm ilgio kietų sienelių bei 1 mm pločio ir 1 200 mm ilgio ištekėjimo plokštumų. Ji parodyta 3 paveiksle.

Naudojant tokį modelį, nukreipiamo garo dalis per apatinę sienelę yra viena pradinių uždavinio sąlygų. Atliktuose skaičiavimuose nukreipiamo per apatinę pusiau pralaidžią sienelę garo dalis sudarė 0–23 %. Kitas garo srautas išteka per kanalo gale esančią ištekėjimo plokštumą, kuri lygiagreti įtekėjimo plokštumai.

# 4. MODELIAVIMO REZULTATŲ IR EKSPERIMENTŲ PALYGINIMAS

Eksperimentų metu buvo atlikti garo greičio profilio matavimai 1 000 mm ( $x/d_{ekv} = 31$ ) nuo kanalo pradžios nutolusiame skerspjūvyje. Slėgis kanale buvo artimas atmosferos slėgiui.



3 pav. Pusiau pralaidi modelio apatinė sienelė

U <sub>aver</sub> m/s	V' <sub>vand</sub> l/h	<i>V′<sub>gar</sub></i> m³/h	t <sub>gar</sub> °C	t <sub>vand1</sub> °C	t <sub>vand2</sub> °C	∆t °C	G' <sub>kond</sub> g/s	G" kond %
4	10	21,6	101,5	25	90,5	65,5	0,34	9,5
4	50	21,6	105	11,65	27	15,35	0,40	11,2
4	100	21,6	101,6	9	23,5	14,5	0,76	21,2
6	10	32,4	105,4	23,2	97	73,8	0,38	7,2
6	50	32,4	105,6	12,5	51,06	38,56	1,00	18,7
6	100	32,4	100	9,7	27,6	17,9	0,93	17,4
8	10	43,2	107	31	99,8	68,8	0,36	5,0
8	50	43,2	107	20,5	82,7	62,2	1,62	22,6
8	100	43,2	107	17	49,4	32,4	1,67	23,3

#### Lentelė. Apskaičiuoti garo kondensacijos srautai

Išmatuoti greičio profiliai buvo pateikti antrajame šios serijos straipsnyje [6]. Matavimai atlikti tiek nesikondensuojančioje, tiek besikondensuojančioje garo-vandens tėkmėje. Besikondensuojančioje garo-vandens tėkmėje garo kondensacijos srauto kitimas priklausė nuo garo itekėjimo greičio (4,6 ir 8 m/s) ir nuo tiekiamo šalto vandens srauto (0, 10, 50 ir 100 l/h). Kai šaltas vanduo netiekiamas į kanalą (vandens tiekimo srautas 0 l/h), vandens lygis kanale buvo išlaikytas kaip ir kitų matavimų metu, tačiau vandens temperatūra buvo artima garo temperatūrai, todėl garas ant vandens paviršiaus beveik nesikondensavo. Toliau pateikti apskaičiuoti garo kondensacijos srautai pagal eksperimentų metu išmatuotas vandens ir garo temperatūras. Garo temperatūra matuojama kanalo priekyje ir gale imontuotomis termoporomis. Vandens temperatūra buvo matuojama kanalo pradžioje (viena termopora) bei kanalo gale (5 vertikaliai išdėstytos termoporos). Ju rodmenys buvo vidurkinami. Pagal išmatuotų vandens temperatūrų skirtumą apskaičiuojamas garo kondensacijos srautas. Daroma prielaida, kad vanduo, tekėdamas kanale, pašyla tik dėl sąlyčio su garu. Tada garo šilumos srautas į vandenį apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$q = (h_{v2} - h_{v1}) \cdot \frac{V'_{vand}}{1\,000 \cdot 3\,600} \cdot \rho_{vand}\left(\frac{kJ}{s}\right);\tag{2}$$

garo kondensacijos srautas

$$G'_{kond} = \frac{q}{h''} \cdot 1000 \left(\frac{g}{s}\right); \tag{3}$$

santykinis garo kondensacijos srautas

$$G_{kond}^{\prime\prime} = \frac{V_{kond}^{\prime}}{V_{gar}^{\prime}} (\%); \tag{4}$$

čia  $h_{v_1}$  – vandens entalpija kanalo pradžioje kJ/kg;

 $h_{\!_{\nu 2}}$ – vandens entalpija kanalo gale kJ/kg;

 $V'_{vand}$  – išmatuotas tūrinis tiekiamo vandens srautas l/h;

 $\rho_{vand}$  – vandens tankis kanale kg/m<sup>3</sup>; h" – kanale tekančio garo entalpija kJ/kg;

 $V'_{kond}$  – kondensato tūrinis srautas m<sup>3</sup>/h;  $V'_{gar}$  – išmatuotas garo tiekimo srautas m<sup>3</sup>/h.

Apskaičiuoti kondensuojamo garo srautai ir vandens temperatūros, atsižvelgus į vidutinį garo įtekėjimo greitį  $U_{vid}$ ir aušinančio vandens tiekimo srautą  $V'_{vand}$  pateikti lentelėje.

Apskaičiuoti kondensuojamo garo srautai panaudojami skaitiniame modeliavime FLUENT programų paketu. Sukurtame FLUENT modelyje šis apskaičiuotas santykinis kondensuojamo garo srautas nukreipiamas per pusiau pralaidžia apatinę sienelę. Daugiausia srauto modelyje išteka per kanalo pabaigoje esančią ištekėjimo plokštumą (lygiagreti įtekėjimo plokštumai). Modeliavimo ir matavimo rezultatų palyginimas pateiktas 4-7 paveiksluose. Palyginti garo greičio profiliai esant vidutiniam 6 m/s garo įtekėjimo greičiui kanale. Ašyje y 0 atitinka kanalo viršutinę sienelę, o 1 - vandens paviršių. Pateiktuose paveiksluose matyti, kad FLUENT 3D modeliu pavyko pakankamai gerai sumodeliuoti garo greičio profilių pasienio sritis esant skirtingiems kondensuojamo garo srautams.

## 5. REZULTATŲ APTARIMAS

Sukurtas kondensaciją imituojantis skaitinis modelis, kuriuo apskaičiuojami tangentiniai įtempiai ant apatinės pusiau pralaidžios sienelės. Šiuos tangentinius įtempius prilyginame šlyties įtempiams tarpfaziniame garo-vandens paviršiuje. Parodyti (8 pav.) kondensacijos imitavimo modeliu apskaičiuoti tangentiniai pusiau pralaidžios sienelės įtempiai, priklausantys nuo kondensuojamo garo srauto. Pateikti rezultatai gauti 1 m atstumu nuo kanalo pradžios.

Modeliavimo rezultatai rodo, kad tangentiniai įtempiai ženkliai padidėja naudojant kondensaciją imituojantį modelį. Esant 4, 6 ir 8 m/s garo įtekėjimo greičiui tangentiniai įtempiai dėl kondensacijos padidėja atitinkamai 80, 65 ir 55 %.

Panaudotas FLUENT modelis turi keleta neatsakytu klausimų. Kai kurie iš jų gali būti reikšmingi vertinant modeliavimo rezultatus. FLUENT modelyje garo ištekėjimas per apatinę pusiau pralaidžią sienelę priklauso nuo slėgio ir yra tolygus per visa kanalo ilgį. Tačiau realybėje garas kondensuojasi ant vandens paviršiaus netolygiai pagal kanalo ilgį dėl kintančios vandens temperatūros. Todėl kitas etapas yra išmatuoti vandens temperatūrą išilgai kanalo ir gauti kondensuojamo garo srauto priklausomuma išilgai kanalo, kaip rodo 9 paveikslo 3 kreivė.

Itakos gali turėti ir pusiau pralaidžios apatinės sienelės modelis, kuris susideda iš siaurų, 1 mm pločio ir 1 200 mm ilgio ištekėjimo angų, tarp kurių patalpintos tokių pat matmenų



**4 pav.** Išmatuoti ir sumodeliuoti garo greičio profiliai esant 0 l/h vandens tiekimui ir  $G''_{lood} = 0$  % apskaičiuotai santykinei garo kondensacijai



**5 pav.** Išmatuoti ir sumodeliuoti garo greičio profiliai esant 10 l/h vandens tiekimui ir  $G''_{kond} = 7$  % apskaičiuotai santykinei garo kondensacijai



**6 pav.** Išmatuoti ir sumodeliuoti garo greičio profiliai esant 50 l/h vandens tiekimui ir  $G''_{kond} = 18$  % apskaičiuotai santykinei garo kondensacijai



**7 pav.** Išmatuoti ir sumodeliuoti garo greičio profiliai esant 100 l/h vandens tiekimui ir  $G''_{kond} = 17$  % apskaičiuotai santykinei garo kondensacijai



8 pav. FLUENT modeliu apskaičiuoti tangentiniai įtempiai, priklausantys nuo kondensuojamo garo srauto



**9 pav.** Kondensuojamo garo srautas išilgai kanalo. 1 – sumodeliuota FLUENT; 2 – vidutinė (integralinė) vertė pagal eksperimentą; 3 – hipotetinė

	•	١	1	1	1	ı	1	ł	ł	ł	I	ł	1	1	1	1	1	1	1	L.	i	1	Ŧ	1	1	ı	1
	,	•			,	ł	1	ł	ı	ı	ł	ı	1	1	ı	ı	$\cdot$	ĩ	ſ	ī	1	ţ	1	ı	1	ı	- 1
	•	,		0	ı	4	ŧ	i	ı	1	t	1	ı	1	1	1	Ŧ	1	1	F	ı	ł	1	i.	i	4	- (
	•	U,	• •		1	1	1	ı	ı	I	1	1	1	1	ŧ	ı	1	ı	1	4	1	ı	1	ı.	I,	ı	
1	•	4	• •	1	1	1	1	ł	ı	1	1	1	1	1	1	ı	1	ı	4	1	1	ı	1	1	1	ł	- 1
	•	•	• •	1	ł	ł	1	1	1	1	ı	ı	ł	ł	ı	1	1	ŧ	1	ı	1	I	1	1	1	ı	
1			• •	1	ı	ł	ı	1	1	ı	ł	ı	4	1	1	1	ł	1	1	1	1	1	1	1	1	1	- 1
,	•	•	1	ł	ł	ł	ı	ı	ł	ł	ł	ı	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	• 1	1	1	1	1	ı	1	l	ı	ı	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ı	1	1	1	- 1
		• •	1	1	1	1	ı	ı	4	ı	1	ı	ı	1	1	1	1	1	1	4	4	ı	1	1	1	ı	- 1
	٠	• •	1	1	1	1	1	ı	4	ŧ	ł	t	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	- 1
	٠	1	1	ı	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	1	1	4	4	1	1	1	1	1	1	1
	•	1.4	11	ı	1	ı	1	1	1	1	1	1	t	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1
	•	1	1.1	ł	ı	ı	1	L	1	1	t	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	,	1 1	1	ł	1	1	1	1	1	I,	1	ı	1	1	1	1	1	- 1	1		1	1	4	1	1	1	
	•	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ı	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1
	1	11	L I	1	1	Į.	1	1	٤.	1	1	1	1	1	1	1	1	- 1	4	1	1	-1,	1	1	1	1	1
-			1	ł	1	12	1	2			2	?	t	4.	1		- {	1	-		· ?	1			5	1	
	`	Y.																									
		Į	X	( -2	Z				G	Gr	ei	čio	s١	/ek	tor	iai	Uy,	U.	z			FL	UEN	Г 6.3	Fel (3d, j	o 26, obns	2009 , skw)

**10 pav.** Greičio vektoriaus dedamosios (*Uy, Uz*) skersiniame pjūvyje

nepralaidžios sienelės. Per plačios ištekėjimo plokštumos ir sienelės gali sukurti antrinius garo tekėjimus, kurie galėtų turėti įtaką tangentinių įtempių rezultatams. Statmenos greičio vektoriaus dedamosios pasiskirstymas kanalo skerspjūvyje pavaizduotas 10 paveiksle.

#### Žymėjimai

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

Gauta 2010 04 20 Priimta 2010 07 12

### Literatūra

- 1. Almenas K., Pabarcius R., Seporaitis M. Design and tests of a device for the generation of controlled condensation implosion events. *Heat Transfer Engineering*. 2006. P. 27.
- 2. FLUENT 6.0 Code Manual. Fluent Inc., 2001.
- Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- 4. http://www.spiraxsarco.com/esc/SH\_Properties.aspx
- http://202.118.250.111:8080/fluent/Fluent60\_help/html/ ug/main\_pre.htm
- Gasiūnas S., Šeporaitis M. Tarpfazinio paviršiaus trinties dvifazėje tėkmėje nustatymas. 2. Greičio profilio kitimas garui tekant kanale virš laisvo vandens paviršiaus. *Energetika*. 2009. T. 55. Nr. 3. P. 154–157.

#### Stasys Gasiūnas, Marijus Šeporaitis, Egidijus Babilas

# ESTIMATION OF INTERFACIAL SHEAR IN TWO-PHASE FLOW

# 3. INTERPHASE SHEAR IN PRESENCE OF CONDEN-SATION, OBTAINED USING SINGLE PHASE FLUENT 3D MODEL

#### Summary

At the Lithuanian Energy Institute, an experimental program is in progress. This work presents experimental and modeling results using FLUENT 6.3 for a horizontal condensable two-phase flow. The steam velocity profiles and the temperatures of steam and water were measured during experiments. The steam condensation rate on water surface was estimated according to measured water temperatures. This condensation rate was an input parameter for the FLUENT model. Only the steam phase was modeled, whereas the condensation was simulated using a semi-permeable bottom wall. The FLUENT model was tuned by comparing its results with experimental data. Then the interphase shear stress dependence on condensation rate was obtained by modeling. This dependence showed that condensation influenced the interphase shear stresses.

Key words: two-phase flow, stratified steam-water flow, condensation, horizontal channel, velocity profiles of steam, interphase shear stress

Стасис Гасюнас, Мариюс Шепорайтис, Эгидиюс Бабилас

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТРЕНИЯ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

# 3. РАСЧЕТ МЕЖФАЗНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ВЛИЯНИИ КОНДЕНСАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОДНОФАЗНОЙ МОДЕЛИ FLUENT 3D

#### Резюме

Представлены результаты проводимых Литовским энергетическим институтом экспериментальных исследований и моделирования программным пакетом FLUENT горизонтального двухфазного конденсирующегося потока. Экспериментально были измерены профили скорости пара. Также измерены температуры пара и воды, по которым рассчитан поток пара, конденсирующегося на поверхности воды. Этот рассчитанный поток использован в модели FLUENT. Моделирована лишь фаза пара, а конденсация имитирована нижней полупроницаемой стенкой. Сравнены экспериментально измеренные и рассчитанные с помощью FLUENT профили скорости пара. Моделью FLUENT получены зависимости тангенциальных напряжений на межфазной поверхности от потока конденсируемого пара. Эта зависимость показывает, что конденсация влияет на тангенциальные напряжения межфазной поверхности.

Ключевые слова: двухфазный поток, стратифицированный поток пар-вода, конденсация, горизонтальный канал, профиль скорости пара, тангенциальные напряжения на межфазной поверхности