

Vandens tekėjimo mikrokanale tyrimas dalelių vizualizacijos metodu

Paulius Vilkinis,

Nerijus Pedišius,

Mantas Valantinavičius

*Lietuvos energetikos institutas,
Šiluminių įrengimų tyrimo
ir bandymų laboratorija,
Breslaujos g. 3 LT-44403 Kaunas
El. paštas Paulius.Vilkinis@lei.lt*

Straipsnyje aprašomas mikrosrautų vizualizacijos (μ PIV) metodas, taikomas mikrokanaluose išmatuoti skysčio tekėjimo greitį. Taip pat pristatoma naudojama eksperimentinė įranga, metodo veikimo principai ir gautų dalelių vaizdų apdorojimo metodai. Atlikti skysčio tekėjimo greičio kvadrato skerspjūvio mikrokanale matavimai esant skirtingoms Reinoldso skaičiaus vertėms ir atkurtas trimatis tekėjimo profilis mikrokanale. Analogiškas tekėjimas mikrokanale buvo sumodeliuotas naudojantis *Ansys Fluent* programine įranga. Palyginus teorinius ir eksperimentinius greičio profilius, nustatyta, kad μ PIV suteikia itin tikslią informaciją apie greičio pasiskirstymą kanalo ašyje, tačiau matavimo paklaidos labai išauga atliekant matavimus arti kanalo sienelių.

Raktažodžiai: mikrosrautų vizualizacijos sistema, tekėjimo greičio profilis, tekėjimas mikrokanale

ĮVADAS

Įvestų į srautą dalelių vizualizacija – optinis metodas, leidžiantis išmatuoti skysčių ir dujų tekėjimo greitį įvairaus dydžio kanaluose arba sudėtingose sistemose pagal indikacinių dalelių, esančių fluide, poslinkį. Šis metodas vis plačiau taikomas atliekant fundamentinio ir taikomojo pobūdžio tyrimus, siekiant kurti ir tobulinti įvairias pramonines technologijas ir produktus bei išsamiau pažinti gyvuose organizmuose vykstančius procesus. Ypač plačiai šis metodas pradėtas taikyti tiriant srautų dinamiką mikrokanaluose ir įvairiose mikrosistemose [1], kai kiti metodai negali būti taikomi.

Priimta laikyti, kad įprastinių kanalų hidraulinis skersmuo $d > 5$ mm, mažų nuo 5 mm iki 1 mm, mikrokanalų < 1 mm ir nanokanalų nm eilės. Apsiribojus tik tekėjimais mikrokanaluose (skersmuo < 1 mm), reikia paminėti keletą pastaraisiais metais atliktų darbų, susietų su šiuo dar-

be keliamais uždaviniais. G. Silva ir G. Puccetti [2, 3] atliko skysčio laminarinio tekėjimo tiesiame mikrokanale tyrimus. Jie atkūrė trimatį skysčio tekėjimo profilį iš daugelio dvimačių profilių, išmatuotų skirtinguose kanalo aukščiuose. Gauti rezultatai buvo palyginti su teoriniais skaičiais, skirtumai tarp eksperimentinių ir teorinių rezultatų siekė apie 4 %. Nustatyta, kad matavimo paklaidos priklauso nuo matavimo atstumo iki kanalo sienelės ir kanalo formos, taip pat didelės paklaidas lemia kanalo geometrijos netobulumai, kuriuos sunku įvertinti teoriniais skaičiais. C. D. Meinhart [4] atliktuose laminarinio skysčio tekėjimo stačiakampiam mikrokanale matavimuose nesutapimas tarp eksperimentinių ir teorinių rezultatų siekia tik 2 %. Šio metodo matavimų tikslumą taip pat įvertino H. Wang [5], atlikęs matavimus skirtingo kraštinės ilgio kvadratinio skerspjūvio mikrokanaluose esant skirtingam Re_d skaičiui, ir S. Devasenathipathy [6] – stačiakampio formos skerspjūvio kanaluose. Šie rezultatai

gerai sutapo su teoriniais skaičiavimais. Taip pat nagrinėtas metodas, leidžiantis įvertinti mikrokanalo matmenis ir formą, pasinaudojant matavimų, taikant μ PIV, rezultatais [2, 3].

E. Tolouei [7] šiuo metodu atliko matavimus arti mikrokanalo sienelės, prie kurios pritvirtintas trombas. Detalūs matavimai kartu su biologinėmis žiniomis apie trombocitų sulipimą leidžia įvertinti trombo poveikį vietiniam srautui bei paties trombo geometriją. C. Completo [8] atliko matavimus su neniutoniniu skysčiu, turinčiu analogiškas kraujui klampos savybes. Darbe parodyta, kad μ PIV metodas leidžia atlikti matavimus ir su neniutoniniu skysčiu mikrokanaluose bei ištirti tekėjimo dinamiką. Be to, gauti rezultatai leidžia įvertinti kraujo tekėjimą ir krešulių formavimąsi prie sienelių.

Taikydami μ PIV metodą, T. Fu, F. Houshamand ir V. Steijn darbuose [9–13] tyrinėjo burbulų formavimąsi ir subliūškimą įvairios geometrijos mikrokanaluose tekant dviejų fazių ir vienos fazės skirtingiems skysčiams. Matavimais įvertinti skysčio tekėjimo greičiai ir jo pokyčiai aplink besiformuojančius burbulus, taip pat burbulų susiformavimo, jų tarpusavio atsiskyrimo ir subliūškimo dinamika.

B. Moghater [14], pasinaudodamas μ PIV, tyrė skysčių maišymąsi mikoreaktoriuje, kurį sudarė centrinis vamzdelis su jo gale įrengta skylėta pertvara. Toks mikoreaktorius naudojamas dalinės metano oksidacijos reakcijoms vykdyti, kurių metu išgaunamas vandenilis bei šiluma. Sūkurių susidarymas už pertvaros tirtas keičiant centrinio vamzdžio ir pertvaros skylių skersmenį bei skysčio tekėjimo greitį. Vanduo maišytas su glicerinu, siekiant gauti rezultatus, artimus vykstant realiai reakcijai. Matavimo metu skysčio tekėjimo greitis siekė $\sim 0,3$ m/s. Sūkurių susidarymas mikrokanale tekant dviejų fazių nesimaišantiems skysčiams nagrinėtas C. M. Balan darbuose [15].

Šių ir kitų sričių darbų analizė rodo, kad srautų dinamikos mikrokanaluose ir mikrosistemose tyrimai ir taikymas sparčiai plėtojami, nes praktikoje, procesų vyksmui vis labiau kryptant į jų intensyvumą ir objektų mastelio mažinimą, iškyla daug spręstinių uždavinių. Nors eksperimentiniai tyrimai teikia daug naudingos informacijos, labai svarbiu uždaviniu išlieka gaunamų matavimo mikrokanaluose rezultatų tikslumo ir patikimumo pagrindimas, kanalo formos ir sienelės šurkštu-

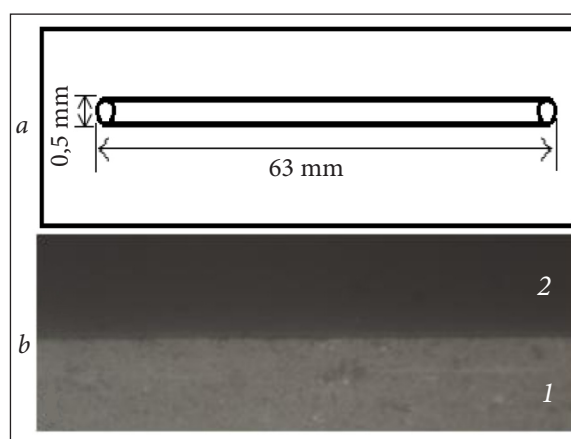
mo elementų įtakos tekėjimo režimo pokyčiams nustatymas, įprastinių skaičiavimo modelių taikymo įvertinimas. Todėl šiame darbe eksperimentiškai tiriama greičio pasiskirstymas lygiame kvadrato skerspjūvio mikrokanale, kurio aukštis ir plotis yra $0,5 \text{ mm} \pm 20 \text{ }\mu\text{m}$, matavimo rezultatai palyginami su skaitinio modeliavimo rezultatais.

TYRIMŲ ĮRANGA IR METODAI

Eksperimentinė įranga

Eksperimentai atlikti mikrokanale, kuris pagamintas iš trijų $0,5 \text{ mm}$ storio optiškai skaidrių lydyto kvarco plokštelių, termiškai sujungtų tarpusavyje. Dvi plokštelės sudaro kvadrato formos skerspjūvio kanalo viršutinę ir apatinę sieneles. Vidurinėje plokštelėje esantis $0,5 \text{ mm}$ pločio plyšys sudaro kanalo šonines sieneles. Gamintojo deklaruota kanalo aukščio (h) ir pločio (b) nustatymo neapibrėžtis $20 \text{ }\mu\text{m}$. Kanalo ilgis $L = 63 \text{ mm}$. Kanalo galuose viršutinėje plokštelėje išgręžtos 1 mm skersmens skylės, kuriose tvirtinamos jungtys skysčiui įtekėti ir ištekėti. Matavimai atliekami 40 mm atstumu ($x/h = 80$) nuo įtekėjimo ir laikoma, kad tekėjimas šioje vietoje yra visiškai nusistovėjęs.

Tiriamąjo kanalo schema ir jo šoninio paviršiaus vaizdas per mikroskopą pateikti 1 pav.



1 pav. Tiriamao mikrokanalo schema (a) ir šoninės sienelės vaizdas (b): 1 – kanalas; 2 – kanalo sienelė

Ištyrus mikrokanalo formą mikroskopu, padaryta išvada, kad kanalo kampai statūs ir jo sienelių paviršiai lygūs visame kanalo ilgyje. Gamintojo

deklaruojamas kanalo sienelių šiurkštumas lygus $0,2 \mu\text{m}$, t. y. nedidesnis nei įvedamų į srautą indikacinių dalelių skersmuo $1 \mu\text{m}$.

Skysčio tekėjimo greičio pasiskirstymas buvo tiriamas taikant erdvinį srauto apšvietimą lazeriu ir registruojant sraute esančių indikacinių dalelių poslinkį. Galutinis matavimų rezultatas – greičio vektorių laukas, gautas padarius tam tikru dažniu indikacinių dalelių nuotraukas.

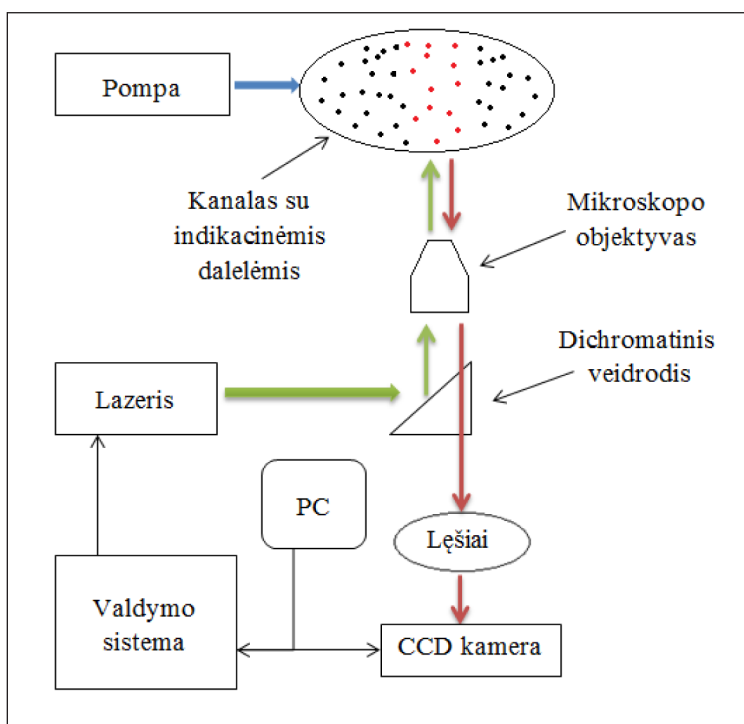
Dalelių greitis apskaičiuojamas pagal dalelių poslinkį Δx ir laiką Δt tarp padarytų nuotraukų.

Matavimams naudota (2 pav.) μPIV sistema, susidedanti iš impulsinio neodimiu legiruoto itrio aliuminio granato (Nd:YAG) lazerio (*Dantec Dynamics*), lazerio valdymo sistemos LPU 450 (*Dantec Dynamics*), 2048×2048 taškų raiškos *FlowSense* EO CCD kameros (*Dantec Dynamics*), sumontuotos ant invertuoto Leica DM ILM mikroskopo (*Leica Microsystems*). Papildomai prie mikroskopo gali būti prijungiamas 35 W halogeninė nuolatinės šviesos lempa (*Leica Microsystems*). Vandens srautas tiriamajame kanale sukuriama programuojama švirkštų pompa Aladdin AL4000 (*World Precision Instruments*) naudojant iki dviejų nuo $0,5 \mu\text{l}$ iki 60 ml talpos švirkštus. Su šia pompa tiriamajame kanale buvo sukuriamas

debitas nuo $0,05 \text{ ml/min}$ tik $18,07 \text{ ml/min}$, Reynoldso skaičius (Re_d), apskaičiuotas pagal kanalo hidraulinį skersmenį (d) ir vidutinį greitį (\bar{v}), kito nuo 1,7 iki 600. Vandens srauto greičiui matuoti į vandenį įvestos fluorescencinės $1,0 \mu\text{m}$ skersmens dalelės (*Invitrogen*), kurių tankis artimas vandens tankiui ir jų dydis pakankamai didelis, kad būtų išvengta Brauno judėjimo įtakos ir gautas stiprus fluorescencinis signalas [16].

Šioje sistemoje daromos dvigubo kadro nuotraukos [17]. Nd:YAG lazeris išspinduliuoja monochromatinės (532 nm bangos ilgio) šviesos impulsą, kurio trukmė 4 ns . Per 500 ns pirmasis kadras perkeliamas į CCD kamerą. Po laiko Δt išspinduliuojamas antrasis lazerio impulsas ir padaromas antrasis kadras. Tada abu kadrai, kaip viena dviejų kadrų nuotrauka, persiunčiami į kompiuterį analizuoti.

Kaip matyti iš 2 pav., išspinduliuota lazerio šviesa keliauja į mikroskopą, kur 90° kampu yra atspindima dichromatinio veidrodžio, esančio mikroskopo viduje. Dichromatinis veidrodis pasižymi savybe iš vienos pusės praleisti visą lazerio išspinduliuotą šviesą, o kita kryptimi – tik ilgesnio nei lazerio išspinduliuotą bangos ilgio šviesą. Pirmiausia, lazerio šviesa praleidžiama per šį



2 pav. Tyrimams naudotos μPIV sistemos schema

veidrodį ir keliauja per mikroskopo objektyvą, už kurio apšviečia norimą tiriamo mikrokanalo vietą. Vandenyje įmaišytos fluorescencinės dalelės sužadintos monochromatine (šiuo atveju 532 nm ilgio) lazerio šviesa. Sužadinti atomai greitai relaxuoja ir dėl energetinių nuostolių sužadimo būsenoje išspinduliuoja didesnio bangos ilgio (575 nm) šviesą [19]. Fluorescencinis signalas iš fluído tekėjimą atkartojančių indikacinių dalelių ir atspindžių nuo mikrokanalo sienų surenkamas objektyvo ir vėl keliauja per dichromatinį veidrodį. Dabar pro veidrodį praleidžiama tik ilgesnė nei lazerio bangos ilgis šviesa. Taip išfiltruojami triukšmą sukeliantys atspindžiai. Galiausiai CCD kamera įrašo signalą, ir nuotraukos gali būti apdorojamos.

Vienas pagrindinių dydžių, apibūdinančių per objektyvą matomą objektą, yra fokusavimo gylis δ , nurodantis atstumą tarp objekto plokštumos ir objektyvo, kuriame objektas išlieka vis dar sufokusuotas [20]:

$$\delta = \lambda \frac{\sqrt{n^2 - NA^2}}{NA^2}; \quad (1)$$

λ – bangos ilgis; n – lūžio rodiklis terpėje (oras) tarp objektyvo lęšio ir mikrokanalo plokštelės; NA – skaitinė apertūra.

Fokusavimo gylis skiriasi į objektą žiūrint per okuliarą ir per šalia mikroskopo įrengtą kamerą. Fokusavimo gylis CCD kamrai apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\delta_v = \frac{\lambda n}{NA^2} + \frac{np_x}{MNA}; \quad (2)$$

p_x – kameros pikselio dydis; M – objektyvo didinimas.

Fokusavimo gylis labai priklauso nuo objektyvo skaitinės apertūros ir jai didėjant fokusavimo gylis greitai mažėja. Kadangi apšviečiamas visas mikrokanalu tekančio skysčio tūris tiriamoje vietoje, skaičiuojamoji koreliacinė funkcija priklauso ne tik nuo dalelių, esančių sufokusuotoje plokštumoje, bet ir nuo aukštesnėje ir žemesnėje plokštumose esančių dalelių, generuojančių fluorescencinį signalą. Šios nesufokusuotos dalelės sukelia foninį triukšmą ir sumažina signalo / triukšmo santykį [21]. Atstumas nuo sufokusuotos plokštumos iki plokštumos, kurioje esančios dalelės nebedaro jokios įtakos koreliacijos funkcijai, va-

dinamas matavimo plokštumos storiu [22], kuris gali būti išreikštas dviguba koreliacijos gylio z_{corr} verte $2z_{\text{corr}}$:

$$2z_{\text{corr}} = 2 \left[\frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\frac{d_p^2 \left(\frac{n}{NA} \right)^2 - 1}{4} + \frac{1,49(M+1)^2 \lambda^2 \left[\left(\frac{n}{NA} \right)^2 - 1 \right]^2}{4M^2} \right] \right]^{0,5}; \quad (3)$$

$\varepsilon = 0,01$ – svorio funkcija; kiti žymėjimai kaip (1) ir (2) formulėse.

Koreliacijos gylis labiausiai priklauso nuo objektyvo skaitinės apertūros ir dalelių dydžio. Taigi, matavimo metu norint gauti didelę skiriamąją gebą reikia naudoti galingo didinimo objektyvus su didele skaitine apertūra arba mažo skersmens fluorescencines daleles. Reikia atkreipti dėmesį, kad naudojant mažesnio didinimo ir skaitinės apertūros objektyvus, apskaičiuotas tekėjimo greitis yra vidurkis indikacinių dalelių greičių visame matuojamame tūryje. Todėl matavimams naudojant nedidelio didinimo ir atitinkamai mažos skaitinės apertūros objektyvus, išmatuotas greitis skiriasi nuo tikrosios jo vertės.

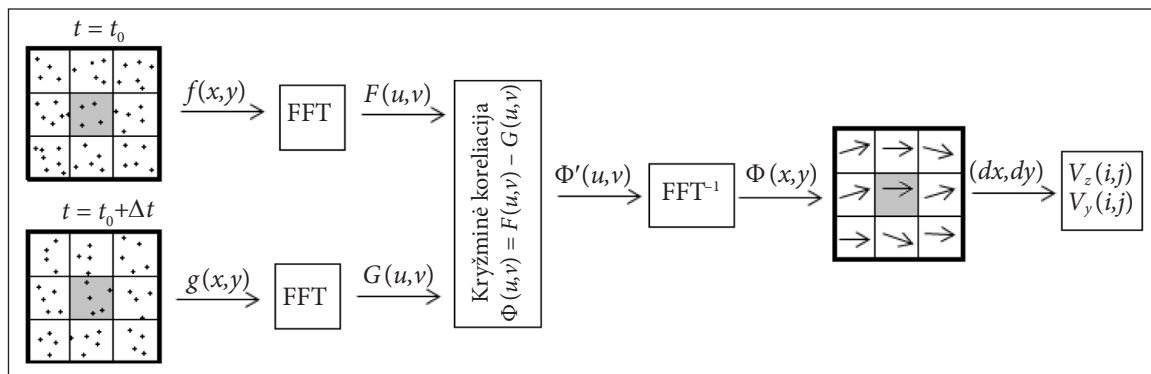
1 lentelėje pateiktos naudojamų objektyvų charakteristikos, fokusavimo gylis ir matavimo plokštumos storis, kai $n = 1$, $d_p = 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,535 \mu\text{m}$, $p_x = 7,4 \mu\text{m}$.

1 lentelė. Optinės naudojamų objektyvų charakteristikos, fokusavimo gylis ir matavimo plokštumos storis

Didinimas	Skaitinė apertūra NA	Fokusavimo gylis δ_v , μm	Matavimo plokštumos storis $2z_{\text{corr}}$, μm
5	0,12	50,5	167,3
10	0,25	11,8	35,2
20	0,40	4,4	13,8
40	0,55	2,2	6,6
63	0,70	1,3	3,7

Matavimo rezultatų apdorojimas

Vaidų intensyvumo funkcijoms analizuoti taikoma greitoji Furjė transformacija ir skaičiuojama kryžminė koreliacija (3 pav.). Gautai funkcijai



3 pav. Principinė koreliacijos skaičiavimo schema

taikoma atvirkštinė Furjė transformacija ir rezultatas vaizduojamas greičio vektorių lauku bei greičio komponentėmis.

Tačiau yra tam tikri apdorojimo ypatumai, nes siekiant išvengti didelio foninio triukšmo [4] į srautą įvedama santykinai maža indikacinių dalelių koncentracija, tai lemia mažą indikacinių dalelių atvaizdų tankį nuotraukoje. Todėl, analizuojant nuotraukas, visos nuotraukos plotas uždengiamas tinkleliu su vienodo ploto langais. Greičio vektoriai skaičiuojami kiekviename šių plotų atskirai. Jų matmenys turi būti maži siekiant pakankamos erdvinės skiriamosios gebos, bet pakankamai dideli norint apimti pakankamą kiekį indikacinių dalelių ir gauti patikimą koreliaciją [19]. Norint išlaikyti didelę skiriamąją gebą ir gauti gerą koreliacinį signalą (pagal signalo / triukšmo santykį), naudojamas vaizdų sutapatinimas, kai vaizdai iš keleto nuotraukų arba vienos dviejų kadrų nuotraukos suklojami į vieną nuotrauką [4]. Taip tinklelio langeliuose gaunama didesnė dalelių atvaizdų koncentracija, leidžianti gauti didesnę signalo / triukšmo santykį.

Taigi, užuot skaičiavus kiekvienos individualios dalelės poslinkį tarp dviejų kadrų, įvertinamas bendras visų tinklelio lange esančių dalelių poslinkis. Šis poslinkis, pagal kurį įvertinamas dalelių srauto greitis, skaičiuojamas kryžminės koreliacijos metodu [17, 19, 22–24].

Koreliacijos funkcija tarp dviejų tinklelio langų ($p \times q$ dydžio) esant tarpusavio poslinkiui (x, y) :

$$\Phi(x, y) = \sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q f(x, y) \cdot g(x + m, y + n); \quad (4)$$

p ir q – tinklelio langų matmenys x ir y kryptimis; $f(x, y)$ ir $g(x, y)$ – vaizdų intensyvumo funkcijos pirmame ir antrame kadruose; m ir n – poslinkio koordinatės.

Visame poslinkio intervale sukuriama kryžminės koreliacijos plokštuma, kurioje didžiausia funkcijos vertė nurodo poslinkį tarp dalelių [23]. Mažesnės funkcijos vertės, pasiskirsčiusios šioje plokštumoje, atsiranda dėl foninio triukšmo ir dalelių vaizdų neatitikties [19]. Jei indikacinių dalelių tankis tinklelio lange yra nepakankamas arba foninis triukšmas per didelis, pikas, atitinkantis tikrąjį dalelės postūmį, gali tapti mažesnis už triukšmo vertes, bus generuojami klaidingi vektoriai. Esant stacionariam ir laminariniam tekėjimui, greičio vektorių laukas laikui bėgant nekinta, o dalelių poslinkį atvaizduojantis $\Phi(x, y)$ pikas visuomet yra toje pačioje vietoje. Triukšmo generuojami pikai pasižymi nevienodu intensyvumu ir skirtingų atvaizdų porų padėtimi. Todėl atlikus daug matavimų ir išvedus koreliacijos funkcijų vidurkį iš visų atvaizdų porų, pagrindinis dalelių poslinkį atvaizduojantis pikas išliks toje pačioje vietoje, o atsitiktinai pasiskirstę pikai įgaus vertes, lygias 0. Vidutinės koreliacijos funkcijos vertė skaičiuojama kaip daugelio kryžminės koreliacijos funkcijų vidurkis [19]:

$$\Phi_{\text{average}}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi(x, y); \quad (5)$$

N – matavimų skaičius.

Skaitinis tekėjimo modeliavimas

Skaitinis 3D modeliavimas buvo atliekamas Re_d nuo 1 iki 600 naudojant *Ansys Fluent* programą

ir taikant laminarinį tekėjimo modelį. Skaitinių modeliavimų buvo siekiama patikrinti skaitinio modeliavimo rezultatų patikimumą palyginus skaičiavimo rezultatus su žinomais duomenimis apie greičio pasiskirstymo dėsningumą priklausomumą nuo tekėjimo režimo ir kanalo formos bei su eksperimentiniais greičio profilių matavimais mikrokanale.

Modeliavimo objekto geometrija ir tinklelio forma pateiktos 4 pav. Palyginimui su eksperimentais buvo modeliuojamas 0,25 mm² skerspjūvio ploto tiesus kanalas. Skaičiavimo modeliui patikrinti skaičiavimai atlikti keičiant kanalo formą (2 lentelė) ir palyginant greičio pasiskirstymą su esamais eksperimentiniais duomenimis [26].

Palyginimai atlikti nusistovėjusio laminarinio tekėjimo zonoje. Stačiakampio kanalo atveju panaudotas tinklelis, kurio stačiakampių elementų kraštinės ilgis lygus 0,02 mm. Skaičiavimo tinklelį iš viso sudarė 156 250 elementų ir 169 676 mazgai.

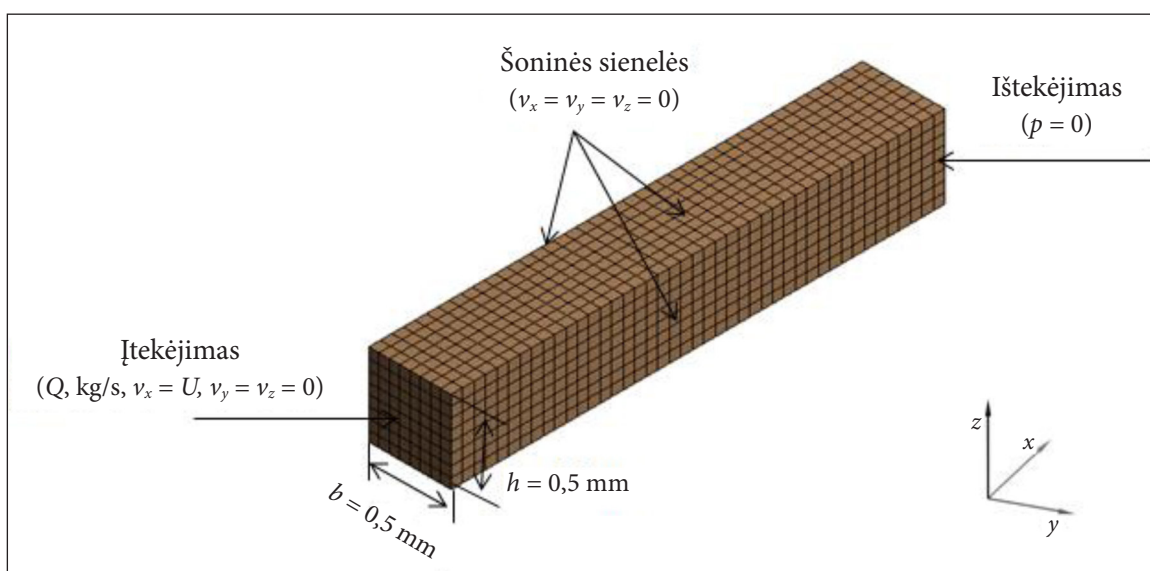
Kraštinės sąlygos kanalo įtekėjime greičio komponentės: $v_x = U$; $v_y = 0$ ir $v_z = 0$; ištekėjime – ištekėjimas (slėgis $p = 0$); kanalo sienelių paviršiuose $v_x = v_y = v_z = 0$. Vandens tankis ir klampa buvo imami iš lentelių, atsižvelgus į vandens temperatūrą. Skaičiuojama, kol vertinamojo dydžio skirtumas tarp dviejų iteracijų tampa mažesnis nei $1 \cdot 10^{-9}$.

REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Atliekant matavimus mikrokanaluose susiduriama su labai mažais skysčio tūrio debitais. Dėl patogumo ir siekiant intuityviau suvokti naudojamus dydžius, šiame darbe tūrio debitui aprašyti naudojamas ne SI sistemos vienetas cm³/s, bet ml/min ($1 \text{ cm}^3/\text{s} = 60 \text{ ml/min}$).

Debito ir greičio matavimų tikslumo įvertinimas

μPIV sistemos pompos sukuriama tūrio debito matavimo tikslumas įvertintas elektroninėmis svarstyklėmis, kurių viršutinė matavimo riba 80 g ir išplėstinė kalibravimo neapibrėžtis 0,02 mg, sveriant mikrokanalu pertekėjusio distiliuoto vandens masę ir gautą rezultatą palyginant su pompos debitmačio rodmenimis. Kalibravimas buvo atliekamas esant 7 skirtingoms debito vertėms nuo 0,015 iki 3 ml/min ir ties kiekviena verte atliekant pertekėjusio per 5 min. vandens masės matavimus. Matavimai buvo kartojami nuo 5 iki 10 kartų ir tūrio matavimo rezultatų pakartojamumas, įvertintas eksperimentinių standartinių vidurkių nuokrypiu, kito nurodytose debito ribose nuo 0,0003 iki 0,0468 ml/min. Tūrinis debitas buvo skaičiuojamas įvertinus distiliuoto vandens tankį pagal jo temperatūrą.



4 pav. Skaičiavimo objekto ir tinklelio geometrija

Debitmačio rodmenų Q_p ir apskaičiuoto debito Q_s verčių palyginimas pateiktas 5 pav. Analizė parodė, kad debitmačio rodmenų santykinis nuokrypis nuo debito vidutinių verčių, apskaičiuotų pagal pertekėjusio vandens masę, tiesiškai mažėjo nuo 3,4 iki 1,7 %. Šis tiesinis ryšys išsilaikė visame debitų intervale iki 18 ml/min (esant $Re_d = 600$), ir debitmačio rodmenys buvo koreguojami įvedant šią kalibravimo pataisą.

Išplėstinė tūrio debito matavimo neapibrėžtis įvertinta pagal rekomendacijas [25], skirtas skaičiuoti tūrio kalibravimo neapibrėžtį taikant svėrimo metodą. Tūrio skaičiavimo matematinė išraiška:

$$V_o = \frac{m}{\rho_w - \rho_o} \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_s} \right) + \Delta V_g + \Delta V_p; \quad (6)$$

m – pasverta vandens masė esant nustatytoms aplinkos sąlygoms; ρ_w – vandens tankis; ρ_o – oro tankis; ρ_s – svarsčių tankis; ΔV_g – vandens išgaravimo nuostoliai; ΔV_p – matavimo rezultatų pakartojamumas.

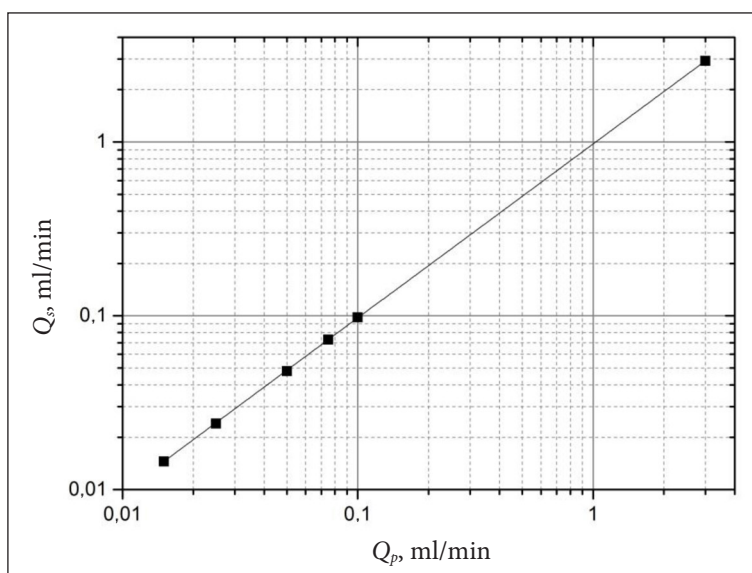
Atskirų suminės standartinės neapibrėžties sandų analizė parodė, kad suminę jos reikšmę iš esmės lemia matavimo rezultatų pakartojamumas, kurio skaitinė reikšmė yra bent 2 eilėmis didesnė nei svarstyklių kalibravimo ir vandens tankio įvertinimo neapibrėžtys. Todėl įvertinus tik pakartojamumo sandą, išplėstinė vandens tūrio neapibrėžtis, esant 95 % pasiklovimo lygme-

niui ir aprėpties koeficientui $k = 2$, kinta nuo 3,9 iki 0,6 %, debitui kintant nuo 0,015 iki 3 ml/min. Laiko matavimo neapibrėžties sando reikšmė taip pat yra labai maža, palyginti su tūrio įvertinimo neapibrėžtimi. Todėl debito skaičiavimo neapibrėžtis gali būti prilyginta tūrio įvertinimo neapibrėžčiai. Reikia pažymėti, kad santykinės neapibrėžties reikšmės, ypač esant mažiausiems debitams, gali būti žymiai sumažintos didinant pratekančio vandens kiekį ir matavimų skaičių. Todėl galima priimti, kad santykinė debito matavimo neapibrėžtis, įvertinus šiuos kalibravimo rezultatus, nėra didesnė nei 2 %.

Vandens tekėjimo greičio neapibrėžtis buvo skaičiuojama priimant pagal mikrokanalo gamintojo deklaraciją, kad stačiakampio skerspjūvio mikrokanalo sienelių matmens 0,5 mm išplėstinė neapibrėžtis sudaro 20 μm arba skerspjūvio ploto standartinė neapibrėžtis, priėmus stačiakampį skirstinio dėsnį, lygi 0,0071 mm^2 . Tada vidutinio greičio mikrokanale nustatymo dalijant debitą iš skerspjūvio ploto suminė standartinė neapibrėžtis:

$$u_v^2 = u_Q^2 \left(\frac{\partial v}{\partial Q} \frac{1}{A} \right)^2 + u_A^2 \left(\frac{\partial v}{\partial A} \frac{1}{A^2} Q \right)^2; \quad (7)$$

u – standartinės vidutinio greičio (\bar{v}), debito (Q) ir skerspjūvio ploto (A) neapibrėžtys; \bar{v} , Q ir A – atitinkamai greičio, debito ir skerspjūvio ploto įverčiai.



5 pav. Apskaičiuotų pagal pertekėjusio vandens masę Q_s tūrio debito verčių ir debitmačio rodmenų Q_p palyginimas

Analizė rodo, kad vidutinio greičio įvertinimo pagal debitmačio rodmenis neapibrėžtį lemia skerspjūvio ploto skaičiavimo neapibrėžtis, todėl jos išplėstinė santykinė reikšmė esant mažiausiam debitui nėra didesnė nei 5 %.

Srauto greičio kanale pasiskirstymo tyrimas

Atlikti vidutinio greičio vertinimai (poskyris „Eksperimentinė įranga“) buvo palyginti su tiesioginiais greičio matavimais pagal dalelių judėjimo vizualizavimo duomenis ir su greičio pasiskirstymo skaičiavimais.

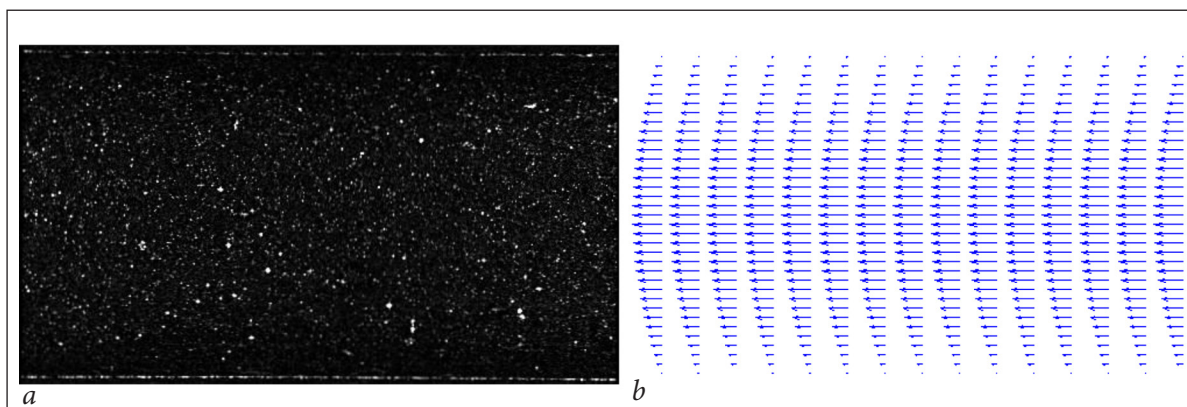
Greičio profiliai buvo matuojami skirtinguose mikrokanalo aukščiuose, debitui kintant nuo 0,05 ml/min, $Re_d = 1,7$ iki 18,07 ml/min, $Re_d = 600$. Kiekvienoje plokštumoje atlikta po 10 matavimų, kurių metu padaryta po 200 dviejų kadru nuotraukų ir iš jų skaičiuotas vidutinis greičio profilis. Laiko tarpas tarp dviejų vienos nuotraukos kadru 0,05 ml/min atveju 0,015 s ir 10 μ s esant 18,07 ml/min debitui. Antruoju atveju, atliekant matavimus prie sienelės, laiko tarpas tarp dviejų impulsų buvo padidintas iki 50 μ s. Matavimo metu buvo naudojamas maksimalus 15 Hz lazerio veikimo dažnis. Matavimams naudojamas 20x didinimo ir 0,4 skaitinės apertūros objektyvas, tada matavimo plokštumos storis lygus 13,8 μ m (1 lentelė).

Kiekvienai nuotraukai buvo taikomi filtrai, pašalinantys fono triukšmą. Pirmiausia nuotraukų fonas nustatomas pagal minimalias arba vidutines pustonių reikšmes, paskaičiuotas iš visos kadru serijos. Šios vertės buvo atimamos atskirai iš kiekvienos nuotraukos atitinkamų reikšmių. Taip pat buvo naudojamas „Tophat“ filtras, ku-

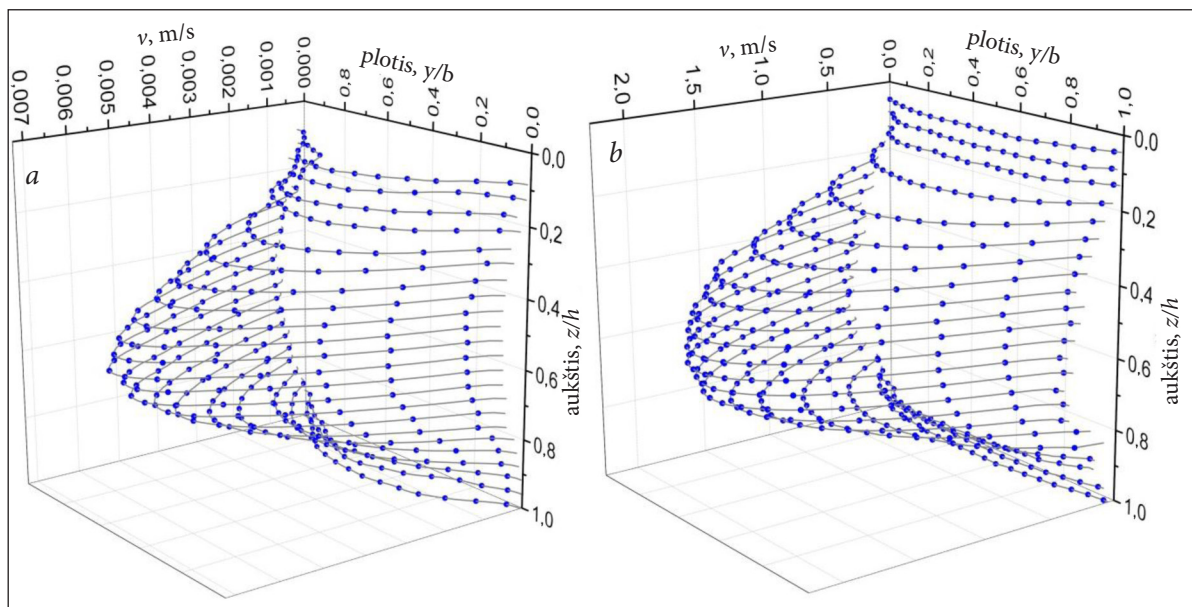
riuo šviesios dalelės išskiriamos tamsiame fone. Šį filtrą naudojant kartu su „High-pass“ filtru išryškunami dalelių kontūrai. Greičio vektorių laukas skaičiuojamas adaptyviosios koreliacijos metodu. Šiuo metodu parenkamas pirminis ir galutinis tinklelio dydžiai, su pirminiu tinkleliu skaičiuotos greičio vertės naudojamos kaip tarpiniai rezultatai kitai iteracijai su tankesniu tinkleliu, kol pasiekiamas galutinis tinklelio dydis. Esant nedideliems debitams, gali būti taikomas kryžminės koreliacijos metodas. Skaičiavimo metu galutinis tinklelio langelis pasirinktas 32×16 taškų dydžio ir naudojamas 50 % vertikalusis ir horizontalusis langelių persidengimas. Taip gaunamas 945 greičio vektorių laukas. Jei reikia, vektoriai gali būti suglotninami panaudojant slenkančio vidurkio principu veikiančius filtrus. Tai aktualu matavimams netoli mikrokanalo sienelių. Filtruoti indikacinių dalelių vaizdai mikrokanale ir greičių vektorių lauko pavyzdžiai pateikti 6 pav.

Gautieji 24 dvimačiai parabolės formos greičio profiliai leido sudaryti trimačius tekėjimo vaizdus (7 pav.), kurie rodo, kad centrinėje mikrokanalo dalyje profiliai yra parabolės formos, būdingos laminariniam nusistovėjusiam tekėjimui (8 pav.). Matyti, kad didėjant Re_d , profiliai plokštėja ir labiau priartėja prie parabolės. Didesnį jų nuokrypį nuo parabolės, esant mažoms Re_d reikšmėms, galėjo lemti dar nevisiškai pasiektas nusistovėjęs laminarinis tekėjimas mikrokanale.

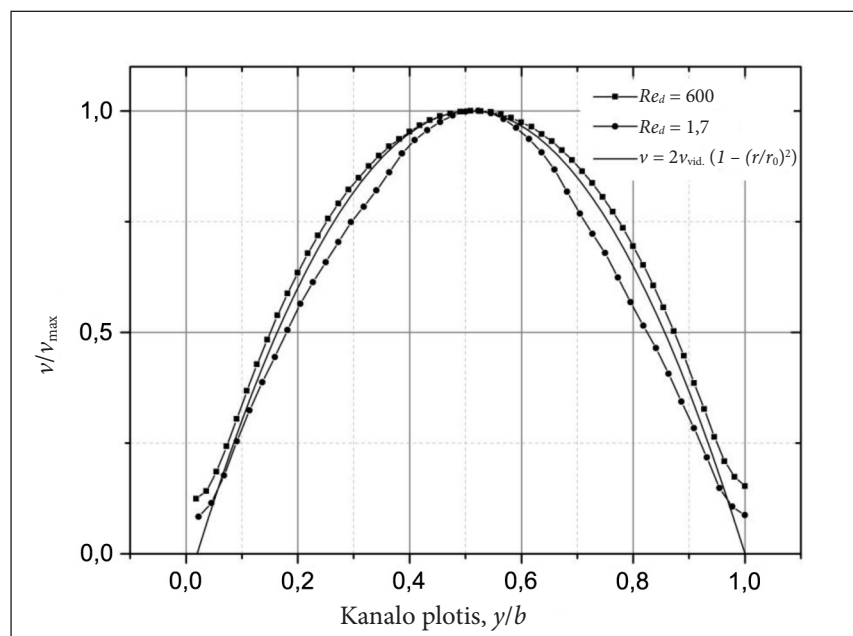
9 ir 10 pav. pateiktas eksperimentinių ir teorinių greičio profilių palyginimas rodo, kad apskritai geras eksperimentinių ir teorinių greičio profilių sutapimas pasiekiamas didžiojoje mikrokanalo



6 pav. Indikacinių dalelių mikrokanale atvaizdai (a) ir greičio vektorių laukas (b), kai $Re_d = 1,7$



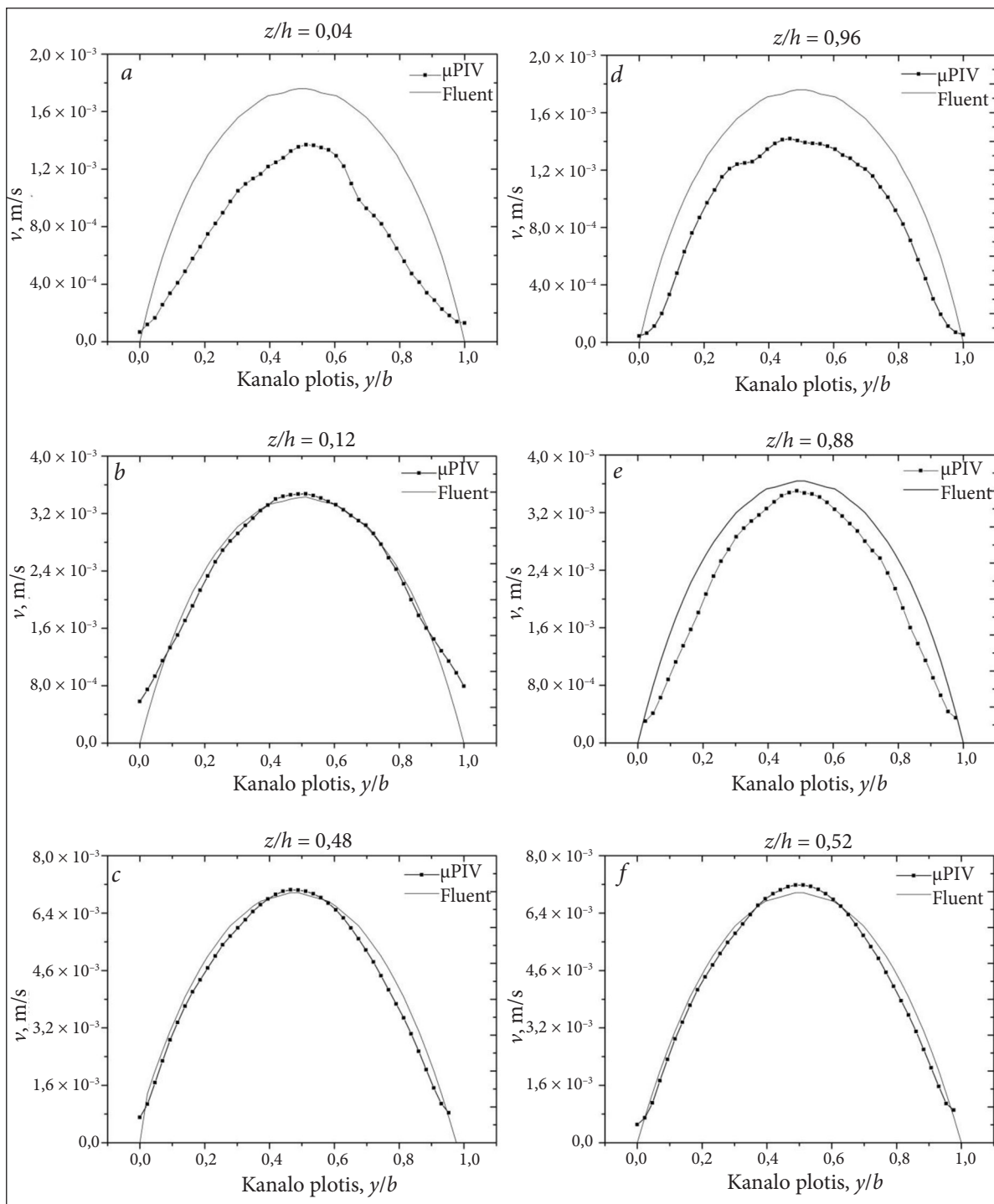
7 pav. Eksperimentiniai trimačiai greičio profilių mikrokanale vaizdai: a) $Re_d = 1,7$; b) $Re_d = 600$



8 pav. Eksperimentinių greičio profilių mikrokanalo ašies plokštumoje, esant $Re_d = 1,7$ ir 600, palyginimas su greičio pasiskirstymu, būdingu laminariniam nusistovėjusiam tekėjimui

dalyje, išskyrus plonus sluoksnius prie sienelės. Esant atstumams nuo sienelės 20 μm arba $z/h = 0,04$ ir $z/h = 0,96$ eksperimentiniai greičio profiliai skiriasi nuo teorinių tiek savo forma, tiek vertėmis. Tokių eksperimentinių ir teorinių greičio profilių neatitikimą arti sienelių gali lemti kelios priežastys.

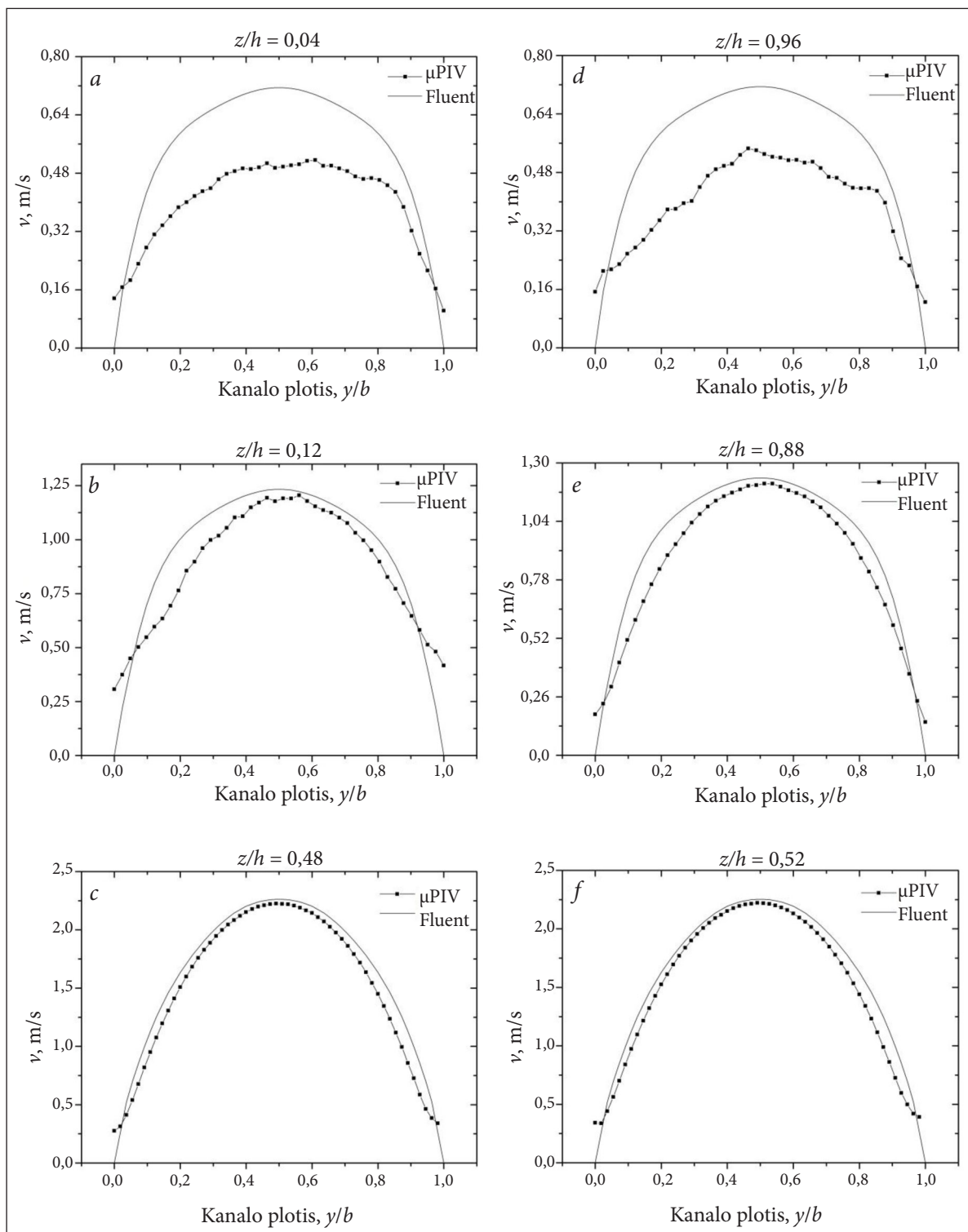
Pirma, arti sienos greičio pasiskirstymą veikia kanalo sienelių šiurkštumas ir nelygumai [27]. Teorinių skaičiavimų modelyje šie efektai nebuvo vertinami, nes, kaip nurodyta poskyryje „Eksperimentinė įranga“, mikrokanalas buvo lygus, kampai statūs, o sienelių šiurkštumas – tik 0,2 μm . Taip pat yra žinoma, kad stačiakampio



9 pav. Eksperimentinių (μ PIV) ir teorinių (Fluent) greičio profilių prie apatinės (*a*, *b*) ir viršutinės (*d*, *e*) mikrokanalo sienelių bei jo centrinėje dalyje (*c*, *f*) palyginimas, kai $Re_d = 1,7$

skerspjuvio kanaluose, esant laminariniam tekėjimui, kanalo kampuose formuojasi antriniai tekėjimai, kurie padidina greitį kampinėse zonose, bet sumažina greitį tarp padidinto greičio zonų. Būtent šis reiškinys lemia mažesnius pasipriešinimo

nuostolius kvadrato skerspjuvio kanale, palyginti su apvalaus skerspjuvio kanalu [26]. Todėl iškyla klausimas, ar skaičiavimo modelis pakankamai tiksliai įvertina antrinių tekėjimų įtaką greičio pasiskirstymui prie sienelių. Būtina taip pat vertinti



10 pav. Eksperimentinių (μ PIV) ir teorinių (Fluent) greičio profilių prie apatinės (*a*, *b*) ir viršutinės (*d*, *e*) mikrokanalo sienelių bei jo centrinėje dalyje (*c*, *f*) palyginimas, kai $Re_d = 600$

tai, kad perėjimą iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį mikrokanaluose gali spartinti jo skerspjūvio forma [28].

Antra, matavimo rezultatai gali būti iškraipomi, jei matavimo plokštumos storis bus didesnis nei atstumas tarp matavimo plokštumos ir kanalo

sienelės. Todėl galima fokusavimo gylio ir matavimo plokštumos storio įtaka matavimo rezultams bei tam tikras dalelių judesio trajektorijos prie sienelės neapibrėžtumas [7, 29, 30].

Atlikta rezultatų ir kitų autorių tyrimų [2–3] analizė leidžia daryti tam tikras išvadas apie labiausiai patikimus teorinius ir eksperimentinius rezultatus, kurie negali būti nesutapimų priežastimis. Eksperimento metu buvo išmatuoti greičiai 24 plokštumose, nutolusiose tik 20 μm viena nuo kitos ir nuo sienelės. Kadangi matavimo plokštumų poslinkių reikšmių suma prilygo bendram kanalo aukščiui ($0,5 \pm 0,02$) mm, galima daryti išvadą, kad matavimo plokštumos nustatomos su neapibrėžtimi, artima kanalo gamybos tikslumui.

Kanalo formos poveikio greičio pasiskirstymui teoriniai skaičiavimai parodė, kad greičio profilių forma kinta taip, kaip parodyta 2 lentelėje, t. y. apvalaus skerspjūvio kanalui vidutinio ir maksimalaus greičio ašyje santykis lygus 0,5, kvadrato formos kanalui – 0,47, kas atitinka tokio kanalo trinties pasipriešinimo koeficiento sumažėjimą, palyginti su apvalaus kanalo pasipriešinimu; stačiakampio formos kanalui šis santykis tampa didesnis nei apvalaus kanalo, kas rodo greičio profilių užsipildymo ir pasipriešinimo didėjimą. Šie skaičiavimo rezultatai sutampa su žinomais kitų autorių rezultatais [26].

Eksperimentinės vidutinio greičio, skaičiuoto pagal debitmačio rodmenis, ir maksimalaus greičio ašyje, išmatuoto μPIV sistema, reikšmės esant kelioms debito vertėms pateiktos 3 lentelėje.

Iš 3 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad vidutinio ir maksimalaus greičių santykis Re_d kintant nuo 1 iki 10 yra $0,47 \pm 0,03$, t. y. mažesnis nei apvalaus kanalo. Tai reiškia, kad kvadrato formos kanale greičio profilis yra mažiau užsipildęs, o prie sienelės greičio gradientas mažesnis. Pasitvirtina gera matavimo ir skaičiavimo rezultatų tarpusavio koreliacija didžiojoje mikrokanalo skerspjūvio dalyje ir koreliacija su kitais žinomais greičio pasiskirstymo laminariame tekėjime rezultatais, tai leidžia daryti išvadą, kad įsisavintas matavimo metodas teikia patikimą informaciją apie srauto dinamiką mikrokanaluose. Tačiau būtina atkreipti dėmesį į teorinių ir eksperimentinių rezultatų skirtumus arti kanalo sienelių, kai fokusavimo plokštumos atstumas nuo sienelės jau priartėja prie dvigubo μPIV matavimo plokštumos storio (1 lentelė) reikšmės. Analogiškas matavimo problemas arti sienelės taip pat nurodo ir kiti tyrėjai [3]. Vyksa priemonių paieškos, kaip tobulinti matavimo metodą [29–30], nustatyti hidrodinaminių trukdžių pasireiškimo ypatumus mikrokanaluose [27–28].

2 lentelė. Greičių santykis ir pasipriešinimo koeficientas $\lambda = C/Re_d$ skirtingos formos kanaluose

Kanalo skerspjūvis	Apvalus	Kvadratas, $b = h$	Stačiakampis, $b/h = 2$	Stačiakampis, $b/h = 10$	Stačiakampis, $b/h = 200$
$\bar{v}/v_{\max}, Re_d = 1,7$	0,5	0,47	0,49	0,62	0,67*
$\bar{v}/v_{\max}, Re_d = 600$	0,56	0,58	0,62	0,64	0,67
$C = \lambda \cdot Re_d$ [26]	64	56,9	62,1	84,6	96**

Pastaba: * 0,67 teorinis santykis kanalui be kampinių efektų (esant $b/h = 200$ kanalas pakankamai plokščias); ** 96 teorinis santykis žiediniam kanalui, kurio vidinio ir išorinio cilindrinio paviršių spindulių santykis r_1/r_2 artėja prie 1. Šiam santykiui kintant nuo 0,6 iki 1, C kinta tik nuo 95,5 iki 96.

3 lentelė. Eksperimentiniai vidutinio ir maksimalaus greičių santykiai

$Q_p, \text{ml/min}$	0,029	0,048	0,073	0,097	0,145	0,194	0,242	0,293	2,95	17,76
$\bar{v}, \text{mm/s}$	1,94	3,19	4,84	6,49	9,69	12,89	16,08	19,51	196,7	1183
$v_{\max}, \text{mm/s}$	4,36	7,20	10,40	13,00	20,80	27,60	33,40	39,6	391	2224
\bar{v}/v_{\max}	0,445	0,443	0,465	0,499	0,466	0,467	0,481	0,492	0,5	0,532
Re_d	1	1,67	2,5	3,3	5	6,7	8,4	10	100	600

Pastaba: lentelėje \bar{v} – vidutinis greitis, apskaičiuotas pagal debitmačio rodmenis (Q_p), įvertinus kalibravimo rezultatus ir mikrokanalo skerspjūvio plotą; v_{\max} – greitis mikrokanalo ašyje, išmatuotas μPIV sistema pagal dalelių judėjimo greitį.

IŠVADOS

Atliktų skysčio tekėjimo lygiame stačiakampio skerspjūvio mikrokanale tyrimų, taikant dalelių judėjimo sraute vizualizacijos metodą, rezultatai leidžia daryti tokias išvadas:

1. Metodas ir taikyta sistema leidžia išmatuoti greičio pasiskirstymus mikrokanale su 3 % nepibrėžtimi. Išmatuotas greičio pasiskirstymas didžiojoje mikrokanalo skerspjūvio dalyje gerai koreliuoja su teoriniais laminarinio tekėjimo sprendiniais ir eksperimentiniais debito matavimo bei žinomais makrokanalų formos poveikio greičio pasiskirstymui rezultatais.

2. Esant mažiems atstumams nuo mikrokanalo sienelės, kurie pagal dydį prilygsta matavimo plokštumos storio reikšmėms, greičio matavimo rezultatai nukrypsta nuo teorinių ir turi būti koreguojami. Apskritai ši sritis reikalauja atskirų išsamių tyrimų siekiant įvertinti dalelių, įvedamų į srautą, ir matavimo plokštumos storio įtakas matavimo tikslumui.

3. Nepakankami duomenys apie greičio matavimo tikslumą prie mikrokanalo sienelių, jų paviršių šiurkštumo parametrus ir geometriją neleidžia pagrįstai atsakyti į klausimus: ar tekėjimams mikrokanaluose būdingas paankstintas perėjimas į turbulentinį režimą, ar kanalo formos sukeliama antriniai tekėjimai turi padidintą poveikį greičio pasiskirstymui ir pernašos procesams prie sienelių; taip pat reikalauja matavimo metodikos tobulinimo.

Gauta 2015 05 15

Priimta 2015 06 26

Literatūra

- Santiago J. G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Beebe D. J., Adrian R. J. A particle image velocimetry system for microfluidics. *Experiments in Fluids*. 1998. Vol. 25. P. 316–319. *Experiments in Fluids*. 1999. Vol. 27. P. 414–419.
- Silva G., Leal N., Semiao V. Determination of microchannels geometric parameters using micro-PIV. *Chemical Engineering Research and Design*. 2009. Vol. 87. P. 298–306.
- Pucetti G., Pulvirenti B., Morini G.-L. Experimental determination of the 2D velocity laminar profile in glass microchannels using μ PIV. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 45. P. 538–547.
- Meinhart C. D., Wereley S. T., Santiago J. G. PIV measurements of a microchannel flow. *Experiments in Fluids*. 1999. Vol. 27. P. 414–419.
- Wang H., Wang Y. Measurement of water flow rate in microchannels based on the microfluidic particle image velocimetry. *Measurement*. 2009. Vol. 42. P. 119–126.
- Devasenathipathu S., Santiago J. G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Takehara K. Particle imaging techniques for microfabricated fluidic systems. *Experiments in Fluids*. 2003. Vol. 34. P. 504–514.
- Tolouei E., Fouras A., Carberry J. *In vitro* micro PIV measurements of velocity profiles near a wall. *Proceedings of 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV09, August 25–28, 2009, Melbourne, Victoria, Australia*.
- Completo C., Geraldine V., Semiao V. Rheological and dynamical characterization of blood analogue flows in a slit. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2014. Vol. 46. P. 17–28.
- Fu T., Ma Y., Funfschilling D., Li H. Z. Bubble formation and breakup mechanism in a microfluidic flow-focusing device. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64. P. 2392–2400.
- Fu T., Ma Y., Funfschilling D., Li H. Z. Dynamics of bubble breakup in a microfluidic T-junction divergence. *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. P. 4184–4195.
- Fu T., Wu Y., Ma Y., Li H. Z. Droplet formation and breakup dynamics in microfluidic flow-focusing devices: From dripping to jetting. *Chemical Engineering Science*. 2012. Vol. 84. P. 207–217.
- Houshmand F., Elcock D., Amitay M., Peles Y. Bubble formation from a micro-pillar in a microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. Vol. 59. P. 44–53.
- Steijn van V., Kreutzer M. T., Kleijn C. R. μ -PIV study of the formation of segmented flow in microfluidic T-junctions. *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62. P. 7505–7514.
- Moghtaderi B., Shames I., Djenidi L. Microfluidic characteristics of a multi-holed baffle plate micro-reactor. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2006. Vol. 27. P. 1069–1077.

15. Balan C. M., Broboana D., Balan C. Mixing process of immiscible fluids in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2010. Vol. 31. P. 1125–1133.
16. Mielnik M. M., Saetran R. L. Selective seeding for micro-PIV. *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41. P. 155–159.
17. Raffel M., Willert C. E., Wereley S. T., Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*. 2nd ed. 2007. 448 p.
18. <http://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/microfluidics/>
19. Mielnik M. M. *Micro-PIV and Its Application to Some Bio MEMS Related Microfluidic Flows*. PhD Thesis. Trondheim, Norway: Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
20. Koutsiaris G. A. Digital micro PIV (μ PIV) and velocity profiles *in vitro* and *in vivo*. In: Cavazzini G. (ed.). *The Particle Image Velocimetry – Characteristics, Limits and Possible Application*. InTech, 2012. 368 p.
21. Mielnik M. M., Saetran R. L. Micro particle image velocimetry – an overview. *Turbulence*. 2004. Vol. 10. P. 83–90.
22. Wereley S. T., Meinhart C. D. Recent advances in micro-particle image velocimetry. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 557–576.
23. Hagsater M. S. *Development of Micro-PIV Techniques for Application in Microfluidic Systems*. PhD Thesis. Department of Micro- and Nanotechnology, 2008.
24. Pust O. PIV: Direct cross-correlation compared with FFT-based cross-correlation. *Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2000*.
25. *Guidelines on the Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration. EURAMET/CG-19/V.01*. Calibration Guide. September 2009.
26. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. 7th edn. New York: McGraw-Hill, 1979.
27. Silva G., Leal N., Semiao V. Effect of wall roughness on fluid flow inside microchannel. *Proceedings of 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 7–10, 2008*.
28. Morini G. L. Laminar-to-turbulent flow transition in microchannels. *Microscale Thermophysical Engineering*. 2004. Vol. 8. P. 15–30.
29. Lima R., Wada S., Tsubota K., Yamaguchi T. Confocal micro-PIV measurements of three dimensional profiles of cell suspension flow in a square microchannel. *Measurement Science and Technology*. 2006. Vol. 17. P. 797–808.
30. Melling A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*. 1997. Vol. 8. P. 1406–1416.

Paulius Vilkinis, Nerijus Pedišius,
Mantas Valantinavičius

INVESTIGATION OF WATER FLOW IN MICROCHANNEL USING MICRO PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Summary

In this article the Micron-Resolution Particle Image Velocimetry (μ PIV) method for fluid velocity profile measurements is described. Used experimental equipment, measurement algorithms and particle image processing methods are presented in this article. Measurements in the square cross-section microchannel under the conditions of different Reynolds numbers are presented. The accuracy of μ PIV was validated by comparing experimental velocity profiles to ones simulated with the Ansys Fluent software. The good agreement between the measured and simulated velocity profiles was found in the central channel axis. Unfortunately, moving toward the walls, the difference between the theoretical and experimental velocity profiles grows up and reaches the maximum near channel walls.

Key words: Micron-Resolution Particle Image Velocimetry, velocity profile, flow in microchannel