

Skysčio ir dujų srautų dinamikos kanaluose tyrimai tūrio, debito ir greičio matavimų tikslumui didinti

Antanas Pedišius,

Jurij Tonkonogij,

Nerijus Pedišius,

Gediminas Zygmantas,

Arūnas Stankevičius,

Andrius Tonkonogovas,

Agnė Bertašienė,

Eugenijus Maslauskas,

Paulius Vilkinis

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

Straipsnyje pateikiama apžvalga pagrindinių mokslinių tyrimų ir eksperimentinės plėtos darbų, kuriuos nuo 2006 iki 2016 m. vykdė Lietuvos energetikos instituto Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorija. Pagrindiniai moksliniai dujų ir skysčių dinamikos tyrimai buvo nukreipti į dujų ir skysčių tūrio, debito ir greičio matavimo tikslumo priklausomumą nuo srauto pulsacijų, kinematinės klampos ir tekėjimo režimo pokyčių. Nustatyti universalūs tachometrinių matuoklių dinaminių paklaidų dėsniniai, esant įvairiems srauto trukdžiams, panaudoti srautų matavimo neapibrėžtims vertinti. Šie dėsniniai taip pat panaudoti kuriant ir tobulinant pagal Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliojimus keturis valstybinius oro (dujų) greičio vieneto ir oro (dujų), vandens ir naftos produktų tūrio bei debito vienetų etalonus. Etalonų matavimo ir kalibravimo galimybes įvertintos remiantis tarptautine praktika, patvirtintos, visuotinai pripažintos ir paskelbtos Tarptautinio svorsčių ir matų biuro (BIPM) sveatinėje. Išplėtotą techninę tyrimų ir bandymų bazę bei ūkio ir mokslo subjektams teikiamos paslaugos sukūrė reikiamas sąlygas matavimų infrastruktūrai Lietuvoje tinkamai funkcionuoti ir užtikrinti praktikoje naudojamų, gaminamų bei tiekiamų į rinką dujų ir skysčių srautų matavimo priemonių atitiktis reikalavimams vertinimams.

Taip pat pateikiami pradiniai perspektyvių srautų dinamikos mikrokanaluose su struktūrizuotais paviršiais tyrimų rezultatai ir taikymai naudojant dalelių sraute vizualizavimo metodą.

Raktažodžiai: debitas, tūrio ir debito matavimai, tachoetriniai matuokliai, pulsuojantis srautas, kintamoji dujų ir skysčių klampa, dinaminė paklaida, srautų etalonai

ĮVADAS

Per pastarąjį dešimtį metų veiklos laikotarpį (2006–2016 m.) instituto Šiluminių įrengimų tyrimo laboratorija vykdė MTEP patvirtintos mokslo krypties „Šiluminės fizikos, dujų ir skysčių dinamikos ir metrologijos tyrimai“ darbus, sutelkdama pagrindinį dėmesį į dujų ir skysčių dinamikos sudėtingos geometrijos kanaluose tyrimus, susietus su pertekantių srautų tūrio, debito ir greičio matavimo tikslumą trikdančiais veiksniais.

Mokslinės ir praktinės žinios apie skysčių ir dujų tekėjimo dinamiką yra labai svarbus aspektas

sprendžiant esamus ir perspektyvius mokslinius bei taikomuosius uždavinius, susijusius su masės ir šilumos pernašos procesų intensyvinimu, energijos konversijos efektyvumo didinimu ir emisijų mažinimu bei energetinių išteklių apskaitos tikslumo užtikrinimu, plėtojant tarptautinius prekių ir paslaugų mainus, ūkio raidą ir gamintojų konkurencingumo didinimą bei šalies rinkos apsaugą nuo netinkamų gaminių ir paslaugų. Energetinių išteklių matavimo tikslumas pastaruoju metu įgavo dar daugiau svarbos dėl jų poreikio ir kainų didėjimo, reikalavimų kuo efektyviau juos panaudoti ir nuolat augančio jų vaidmens tarptautiniuose prekių mainuose.

Todėl visos Europos šalys yra įsteigusios ir plėtoja nacionalinius matavimų institutus, kurie daugiausia ir padeda šalių matavimų ir atitikties vertinimo infrastruktūroms tinkamai funkcionuoti. Šie nacionaliniai subjektai yra nariai regioninės metrologinės EURAMET organizacijos, kurios paskirtis – kartu su kitomis analogiškėmis regioninėmis organizacijomis (SIM (Inter-American Metrology System), AFRIMETS (Intra-Africa Metrology System), APMP (Asia Pacific Metrology Programme) ir COOMET (Euro-Asian Cooperation of NMIs)) patikimai užtikrinti šalių bendradarbiavimą matavimų siečiai ne tik Europoje, bet ir pasauliniu mastu. Tuo tikslu nacionaliniai matavimų institutai vykdo mokslinius ir eksperimentinės plėtros darbus, bendradarbiauja tarpusavyje atlikdami tarptautinius matavimų palyginimus ir jungtinius projektus, kurių bendras tikslas – užtikrinti šalyse matavimų lygį, o mokslo ir ūkio subjektams – paslaugas, atitinkančias pasiektą aukščiausią techninį ir mokslinį lygį.

Lietuvos energetikos institutas, vykdydamas Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliojimus ir atsižvelgdamas į bendruosius Europos Sąjungos šalių ūkio ir mokslo funkcionavimo ir plėtros principus, pavedė Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijai vykdyti paskirtojo instituto funkcijas – sukurti keturis valstybinius etalonus oro (dujų) greičio, debito ir tūrio bei vandens ir naftos produktų debito ir tūrio vienetų vertėms atkurti, užtikrinti šių dydžių matavimų sietį su Europos šalių nacionalinių matavimo institutų teikiamomis pamatinėmis vertėmis, atstovauti Lietuvai EURAMET techniniame komitete *Srautai* ir periodiškai patvirtinti veiklos rezultatus EURAMET techniniame komitete *Kokybė*.

Kadangi srautų etalonų labai svarbią dalį sudaro aerodinaminiai ir hidrodinaminiai įrenginiai oro bei skysčių srautams sukurti ir juos tinkamai valdyti, pastarieji iš esmės buvo konstruojami, gaminami, tiriami ir įteisinami naudojant daugiausia vidinius instituto išteklius ir, kur tinkama, Lietuvos verslo subjektų paslaugas. Todėl daug dėmesio buvo skiriama moksliniams srautų dinamikos matuoklių kanaluose tyrimams ir inovatyvios matavimų įrangos diegimo plėtrai. Ekonomiškumo požiūriu tai buvo ir išlieka efektyviausiu būdu sukurti ir tobulinti valstybinių etalonų techninę bazę bei lanksčiai derinti jos galimybes, atsižvelgus į Lietuvos ūkio ir mokslo poreikius bei tarptautinius

matavimų lygmens pokyčius. Jau iki 2006 m. buvo sukurta ir įteisinta etalonų techninė bazė ir jos kalibravimo bei matavimo galimybės [1, 2].

Toliau šiame straipsnyje apibendrinami per pastarąjį dešimtmetį laboratorijos atliktų mokslinių tyrimų ir etalonų matavimo galimybių gerinimo darbų rezultatai siekiant priartinti sukurtų etaloninių įrenginių matavimo galimybes prie pagrindinių Europos šalių nacionalinių institutų galimybių lygmens. Taip pat pateikiama trumpa informacija apie veiklos pripažinimą ir vertinimą, taikomųjų darbų ir paslaugų teikiamas apimtis, svarbą bei perspektyvas.

PAGRINDINIAI SRAUTŲ DINAMIKOS MOKSLINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Tyrimo objektai ir tikslai

Svarbiausi rezultatai gauti tiriant mechaninių matuoklių su besisukančiais rotoriais (toliau – tachometriniai matuokliai) matavimo rezultatų priklausomumą nuo hidrodinaminių trukdžių, sukeliama matuojamojo srauto pulsacijų, ir skysčių bei dujų fizikinės klampos pokyčių, kurias lemia skysčio rūšis arba dujų slėgis. Nepaisant naujų tekančių skysčių ir dujų kiekio, debito ir greičio matavimo metodų tyrimų ir taikymų plėtros, mechaniniai matuokliai su besisukančiais rotoriais dėl jų aukšto tikslumo ir patikimumo yra dažniausiai naudojami praktikoje šioms dydžiams matuoti, o jų teikiami duomenys teisiškai pripažįstami.

Turbininiai matuokliai plačiai naudojami dideliems suslėgtų dujų debitams matuoti. Tačiau ilgą laiką šie matuokliai buvo kalibruojami esant atmosferos slėgiui. Dujų tankio didėjimas kylant dujų slėgiui gerokai mažina dujų kinetinę klampą ir sudaro keblumą taikant kalibravimo rezultatus, gautus laboratorijoje esant atmosferos slėgiui eksploatacijoje esant atmosferos slėgiui. Nors pastaruojų metu jau keliose šalyse veikia įrenginiai matuokliams kalibruoti tekant darbinių parametrų dujoms, bet ši procedūra ir įrenginiai yra sudėtingi ir brangūs. Todėl buvo tiriami įprastinio tipo vardinio dydžio DN400, 250 ir 150 bei 1,2; 0,75 ir 0,45 m ilgio turbininiai skaitikliai, turintys prieš rotorių skirtingų parametrų žiedinius įtekėjimo ruožus. Esant nuo 0,61 iki 3,5 MPa padidintam dujų slėgiui, šie dujų matuokliai buvo bandomi ir kalibruojami užsienio laboratorijose (Pigsar arba Karlsruhe, Vokietija; Force, Danija).

Sukieji kameriniai matuokliai (toliau – kameriniai) su slankiomis mentėmis labai plačiai naudojami skystojo kuro debitui ir kiekiui matuoti. Jų matavimo neapibrėžtis lemia skysčio pertekėjimai per plyšius tarp rotoriaus menčių, kurios sudaro atskiras kameras, ir korpuso. Pagrindinis šių matuoklių trūkumas – didelis jautris skysčio tekėjimo režimui ir skysčio tankio, klampos priklausomumas nuo skysčio rūšies, jo temperatūros ir slėgio. Kameriniai matuokliai buvo tiriama 4 skirtingų skysčių srautuose kintant jų tankiui nuo 719 iki 838 kg/m³ ir kinetinei klampai atitinkamai nuo 0,67 · 10⁻⁶ iki 5,5 · 10⁻⁶ m²/s.

Ne mažiau svarbios matuoklių veikimo principo įtakos matuojant mažus vandens srautus ir jais pernešamus šilumos kiekius. Todėl šioje srityje buvo atliekami tyrimai su vienasraučiais ir daugiasraučiais turbininiais, kameriniais ir ultragarsiniais bei magnetoindukciniais (elektromagnetiniais) mažų debitų matuokliais modeliuojant eksploatacijos metu atsirandančius trukdžius ir tiekimo / vartojimo nestabilumus.

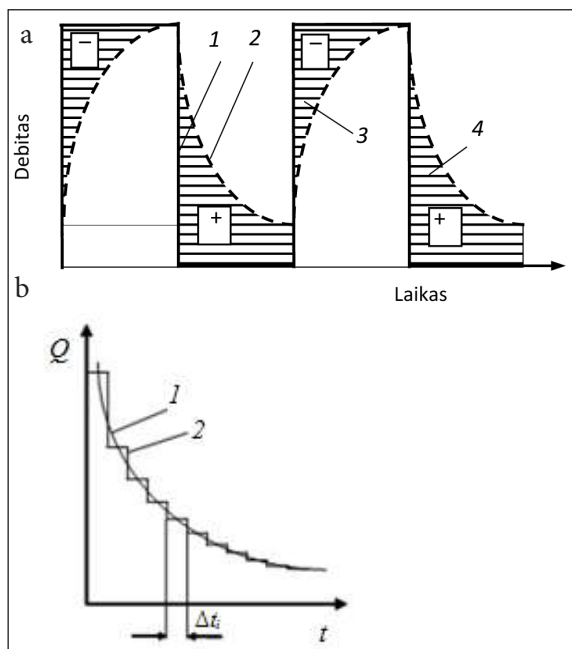
Tai, kad sudėtingos formos kanaluose srauto struktūra gerokai kinta, paskatino įsisavinti ir plėtoti perspektyvius eksperimentinius tyrimo metodus, pagrįstus dalelių srautuose vizualizavimu ir neinvazinių matavimo metodų taikymu.

Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo tyrimai buvo palyginami su tyrimais darbinėmis sąlygomis ir rezultatais, gautais kitose laboratorijose.

Tachometrinių debito matuoklių veikimas pulsuojančiame sraute

Universalus dinaminės paklaidos nustatymo metodas

Parengtas tachometrinių matuoklių inercijos laiko pastoviosios pagal atsaką į staigų debito pokytį įvertinimo metodas, skirtas įvertinti laiko pastoviosios priklausomumą nuo pradinio, galinio ir perteklinio rotoriaus sukimosi dažnio bei jų dinaminės paklaidos priklausomumą nuo debito kitimo dėsnio, pulsacijų dažnio ir amplitudės bei matuoklio savybių, lemiančių jo inertiškumą [3–5]. Dinaminės paklaidos, kuri atsiranda pulsuojančiame sraute dėl matuoklio rotoriaus inercijos, formavimosi schema pateikta 1a pav. Srautui pulsuojant, matuoklio rodmenys greičiau artėja prie tikrosios debito vertės pastarajam didėjant, negu jam ma-



1 pav. Dinaminės paklaidos formavimosi schema ir debito kitimo kreivės modeliavimas laiptuotu dėsniu: a) 1 – tikrasis debitas; 2 – debitas, atitinkantis matuoklio apsakus; 3 – neregistruojamas dujų kiekis; 4 – paviršinis registruojamas dujų kiekis; b) 1 – realus debito kitimas; 2 – modeliuojamas priklausomumas

žėjant. Todėl matuoklio dinaminė paklaida visada turi teigiamą ženklą.

Metodas tinka matuoklio dinaminei paklaidai įvertinti esant įvairiems sudėtingiems srauto pulsacijos dėsniams [6–8]. Tuo tikslu debito kitimo bėgant laikui kreivė pakeičiama laiptuotu dėsniu (1b pav.) ir kiekviename laiko žingsnyje Δt_i matuoklio rodmenims skaičiuoti taikoma eksperimentiškai nustatyta matuoklio atsako į stačiakampį debito pokytį lygtis. Metodas leidžia atsikvėpti iki šiol taikytos tradicinės matuoklio rotoriaus sukimosi diferencialios lygties su keliais sunkiai ir didele neapibrėžtimi nustatomais parametrais. Šių parametrų visuma pakeičiama vieninteliu parametru – rotoriaus sukimosi inercijos indeksu (τ), kartais vadinamu inercijos laiko pastoviąja, kuri gana lengvai nustatoma eksperimentiškai. Metodo taikymą riboja vienintelis reikalavimas – matuoklio rodmenų kitimo dėsnis turi būti reguliarus nuo pat proceso pradžios arba kitimo dėsnis turi būti žinomas visame jo kitimo intervale.

Matuoklio dinaminė paklaida pulsuojančiame sraute

$$\delta = (Q_{vid_{sk}} - Q_{vid}) / Q_{vid} \quad (1)$$

čia: $Q_{vid,sk} = (\sum Q_{sk_i})/n$ – vidutinis debitas pagal matuoklio rodmenis; $Q_{vid} = (\sum Q_i)/n$ – vidutinis tikrasis debitas laikotarpiu Δt_i .

Kiekvienu laikotarpiu debitas iš matuoklio rodmenų apskaičiuojamas pagal priklausomumą:

$$Q_{sk_i} = \omega_i / k_{imp}; \quad (2)$$

čia: k_{imp} – matuoklio impulso vertė imp/m^3 ; ω_i – matuoklio rotoriaus sukimosi dažnis i -tuoju laiko momentu, kuris gaunamas iš eksperimentiškai nustatyto priklausomumo:

$$\frac{\omega_{sk_{gal}} - \omega_{sk_{pr}}}{\omega_i - \omega_{v_i}} = -\frac{t_{gal} - t_{pr}}{\tau}; \quad (3)$$

čia: τ – laiko pastovioji; ω – sukimosi dažnis; t – laikas; indeksai *gal* ir *pr* – atitinkamai pulsacijos laikotarpio pabaigoje ir pradžioje.

Laiko pastovioji buvo nustatoma dviem metodais, laikant ją pastoviu dydžiu atsako metu, bet priklausanti nuo rotoriaus inercijos parametrų ir debito, arba laikant ją kintamuoju dydžiu [4, 9], apskaičiuojamu pagal priklausomumą:

$$\tau = -\frac{1}{a_1 + a_2 t + \dots + a_6 t^5}; \quad (4)$$

čia: a_i – polinomo koeficientai, gauti aproksimuojant tiriamojo matuoklio eksperimentiškai išmatuotus atsakus bėgant laikui; t – laikas.

Eksperimentiniai tachometrinių matuoklių tyrimai atlikti panaudojant specialiai šiuo tikslu sukurtą įrenginį, kuris įgalina imituoti staigų debito pokytį tiriamajame matuoklyje ir išmatuoti jo atsaką. Tyrimams panaudoti skirtingų tipų matuokliai: turbininis ir sukusis kamerinis debitmačiai bei kaušelinis vėjo greičio matuoklis [10].

Išanalizavus eksperimentinių tyrimų rezultatus nustatyta, kad matuoklių laiko pastovioji kinta atsako proceso metu, ir šis kitimas iš esmės yra netiesinis. Vidutinė laiko pastoviosios vertė yra didesnė tuo atveju, kai debito pokytis yra didėjantis, nei kai debito ar greičio pokytis yra mažėjantis. Laiko pastoviosios vertė pradeda didėti, kai galinė dažnio vertė artėja prie apatinės matuoklio matavimo ribos. Galinei debito vertei artėjant prie 0, laiko pastoviosios vertė pradeda augti eksponentiškai. Nustatyta, kad pradinė debito vertė neturi įtakos laiko pastovijai, ir visų trijų tipų

matuoklių inercijos laiko pastoviosios priklauso nuo galinio rotoriaus sukimosi dažnio vertės bei yra jam atvirkščiai proporcingos.

Turbininių dujų matuoklių dinaminė paklaida

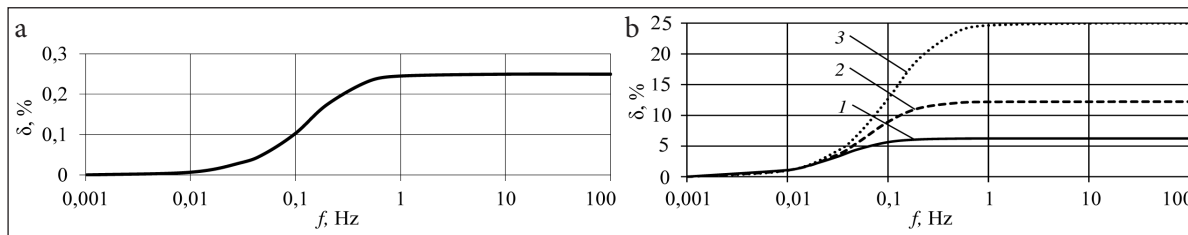
Turbininių matuoklių atsako ir dinaminės paklaidos tyrimai atlikti oro debitui pulsuojant pagal paprastus (stačiakampio, kosinuso bei trikampio), taip pat pagal sudėtingus (artimus pasitaikantiems praktikoje) dėsnius ir jų rezultatai apibendrinti [11] darbe. Nustatyta, kad visais atvejais, esant žemam (0,01–0,05) Hz dažniui, matuoklio inertiškumas praktiškai nepasireiškia, matuoklis spėja atsekti net staigų srauto pokytį ir jo rodmenys labai mažai skiriasi nuo tikrųjų debito verčių. Debito pulsacijos dažniui padidėjus iki 0,5 Hz, inertiškumas pasireiškia ženkliai, bet matuoklis reaguoja į debito kitimą esant net mažai amplitudei.

Dažniui padidėjus iki 1 Hz, matuoklis nespėja reaguoti į debito pokyčius, jo rodmenys praktiškai tampa pastovūs ir didesni už vidutinę pertekancio debito vertę.

Taigi, dažniui didėjant, dinaminė paklaida auga iki tam tikros ribinės vertės, kuri priklauso nuo srauto pulsacijų dėsnio ir nuo pulsacijos amplitudės. Iki 1 Hz pulsacijų dažnio matuoklių rodmenų kitimas visais atvejais artėja prie kosinuso dėsnio. Matuoklio rodmenų maksimumas ir minimumas yra pasislinkę bėgant laikui debito maksimumo ir minimumo atžvilgiu ir pasiekiami tada, kai matuoklio rodmuo yra lygus momentiniam tikrajam debitui. Esant stačiakampiam srauto pulsacijų dėsniai, matuoklio rodmenys kinta pagal sudėtingą eksponentinį dėsnį. Rodmenų maksimumas ir minimumas pasiekiami srauto staigaus kitimo momentu.

Nustatytas dinaminės paklaidos priklausomumas nuo srauto pulsacijų dažnio esant stačiakampiam dėsniai ir skirtingoms pulsacijų amplitudėms parodytas 2 pav. Analogiškai rezultatai gauti debitui pulsuojant pagal kitus nagrinėtus dėsnius.

Kamerinių dujų debito matuoklių atsako į srauto pulsacijas priklausomumai yra analogiški turbininių matuoklių atsako priklausomumams, tačiau šių matuoklių registruojamas debito kitimas seka jų rotoriaus apukų dažnio pokyčius, todėl matavimo paklaidas iš esmės lemia tik pertekėjimai pro plyšius tarp rotorių ir korpuso, kuriuos mažai veikia srauto pulsacijos.



2 pav. Dinaminės paklaidos priklausomumas nuo srauto pulsacijų dažnio esant skirtingoms pulsacijų amplitudėms ($\Delta\bar{Q}$) ir stačiakampiam jos kitimo dėsnui, kai $\tau = 1,054$ s: a – $\Delta\bar{Q} = 0,05$; b – 1, 2, 3 – atitinkamai $\Delta\bar{Q} = 0,25; 0,35$ ir $0,5$

Kaušelinų anemometrų dinaminė paklaida

Kitaip nei turbininiai dujų debito matuokliai, mechaniniai oro greičio matuokliai veikia atviro lauko sąlygomis, dažnai esant stipriam turbulentiškumui, kurio vertė gali siekti kelias dešimtis procentų. Vėjo greičio pulsacijos susideda iš atskirų įvairių dažnių ir amplitudžių nepriklausomų trikampio formos impulsų. Siekiant sumodeliuoti tokias sudėtingos formos vėjo greičio pulsacijas būtina apibrėžti šiuos parametrus [10, 11]:

- minimalią v_{min} ir maksimalią v_{max} greičio vertes (amplitudes);

- vėjo greičio pulsacijų dažnį;

- koeficientą k_v ($k_v \geq 0$), kuris apibrėžia greičio pulsacijų amplitudės mažėjimo spartą (mažėjimas vyksta pagal aritmetinę progresiją) viename pulsacijos cikle. Kai $k_v = 0$, greičio amplitudės vertė pulsacijoje nekinta. Didėjant šio parametro vertei ($k_v > 0$), pulsacijų amplitudžių vertė pulsacijoje mažėja sparčiau;

- koeficientą k_t ($k_t \geq 0$), kuris apibrėžia greičio pulsacijų dažnio mažėjimo spartą (mažėjimas taip pat vyksta pagal aritmetinę progresiją) viename pulsacijos cikle. Kai $k_t = 0$, greičio pulsacijos dažnio vertė pulsacijoje nekinta. Didėjant šio parametro vertei ($k_t > 0$), pulsacijų dažnis pulsacijoje mažėja sparčiau;

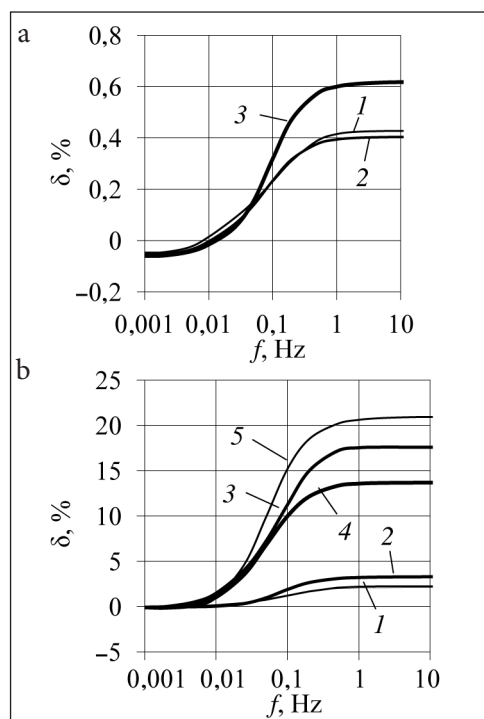
- pikų skaičių viename impulse.

Kaušelinio oro greičio matuoklio atsakui ir dinaminei paklaidai skaičiuoti panaudotas turbininiams matuokliams taikytas metodas, išskyrus tai, kad turbininiams matuokliams inercijos laiko pastovioji buvo priimama priklausanti tik nuo galinio debito arba galinio sukimosi dažnio. Greičio matuoklio atveju buvo vertinama ne tik galinio, bet ir perteklinio dažnio įtaka.

Esant mažiems $\leq 0,01$ Hz pulsacijų dažniams, kaušelinio oro greičio matuoklio inercija, kaip ir turbininių debito matuoklių atveju, nepasireiškia.

Padidėjus pulsacijų dažniui, matuoklis nebespėja sekti tikrąsias oro greičio vertes, ir jo rodmenys didėjant dažniui tampa pastovūs bėgant laikui, bet didesni nei vidutinė greičio vertė. Analogiški rezultatai gauti skirtingiems koeficientų k_v ir k_t deriniams, taip pat esant skirtingoms v_{max} ir v_{min} vertėms.

Dinaminės paklaidos ir matuoklio atsako skaitinio modeliavimo rezultatai pulsuojančiame sraute, esant parametrms $k_v = (0,1; 0,5; 1)$ bei $k_t = 0,5$, pateikti 3 pav. Parodytų priklausomumų pobūdis toks pat, kaip ir turbininių matuoklių atveju.



3 pav. Kaušelinio anemometro dinaminės paklaidos modeliavimo rezultatai, kai $k_t = 0,5$: a – $v_{max} = 5$ m/s ir $v_{min} = 3,5$ m/s; 1–3 – atitinkamai $k_v = 0,1; 0,5$ ir 1 ; b – $v_{max} = 10$ m/s; 1, 2 – atitinkamai $v_{min} = 7,5$ m/s, $k_v = 0,5$ ir 1 ; 3–5 – atitinkamai $v_{min} = 1$ m/s, $k_v = 0,1; 0,5$ ir 1

Matuoklio rodmenų santykinės svyravimo amplitudės kitimo pobūdis atitinka dinaminės paklaidos kitimo pobūdį, bet kitimų kryptys yra priešingos.

Tačiau kitaip nei turbininių debito matuoklių, dinaminės paklaidos ir nedimensinės amplitudės kreivės išsisklaido esant skirtingoms koeficiento k_v vertėms. Be to, atskiros kreivės susikerta. Tai paaiškinama vidutinio greičio įtaka inercijos laiko pastoviai. Kaušelinio oro greičio matuoklių atsako ir dinaminės paklaidos kitimo pobūdį lemia didžiausia ir mažiausia oro greičio vertės, jo pulsacijų dažnis ir pulsacijų dažnio bei amplitudės kitimo sparta. Nustatyta, kad greičio pulsacijų dažnio įtakos kaušeliniams ir turbininiams matuokliams yra analogiškos, tačiau esant mažesniems nei 0,01 Hz dažniams ir nereguliariam oro greičio pulsacijų dažnio ir amplitudės kitimui, kaušelinio matuoklių dinaminė paklaida tampa neigiama.

Tachometrinių srauto matuoklių veikimas kintant fluidų klampai

Kaip nurodyta skyriuje „Tyrimo objektai ir tikslai“, buvo tiriama kamerinių ir turbininių matuoklių matavimo rezultatų priklausomumas nuo skysčių ir dujų klampos siekiant nustatyti universalius paklaidų kitimą lemiančius parametrus.

Skysčio klampos įtaka kamerinių matuoklių paklaidoms

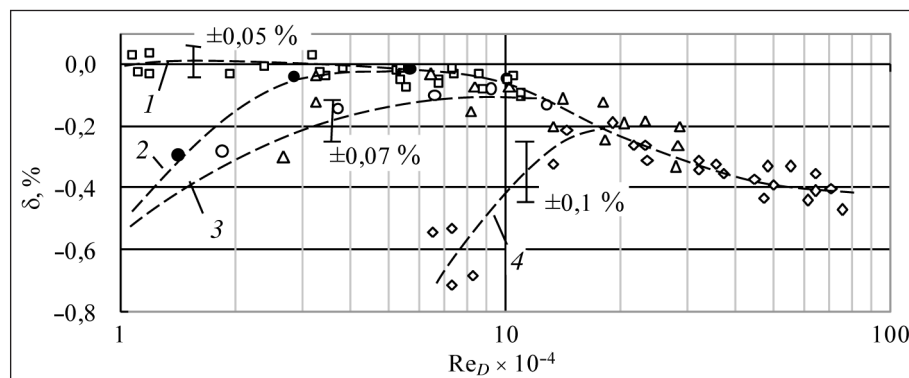
Nustatytas universalus kamerinių matuoklių paklaidų priklausomumas nuo Re_D , kuriame būdinguoju geometrinio parametru priimtas įtekėjimo angos skersmuo, pateiktas 4 pav. [12, 13].

Matyti, kad paklaidų kreivės turi dominuojantį piką, iki kurio paklaidos išsisklaido dėl mechaninės trinties ir hidrodinaminių jėgų, sukeltų skysčio klampos, poveikių.

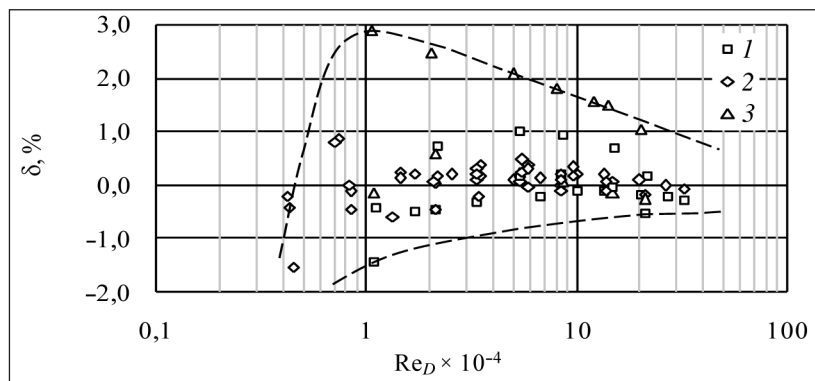
Didėjant skysčio debitui ir Re_D , paklaidos kinta neigiamų jų reikšmių link. Tai lemia didėjantis sukamųjų jėgų momentas, dėl kurio mechaninės trinties ir klampos jėgų stabdantis poveikis santykinai mažėja, kol pasiekiamas sukamųjų ir stabdančių jėgų pusiausvyra. Skysčio klampai mažėjant, paklaidų pikas slenka link didesnių Re_D reikšmių ir jo padėtis sutampa su esminiu slėgio nuostolių kitimo dėsninumu pokyčiu, kurį lemia tekėjimo matuoklio kanale perėjimas iš laminarinio režimo į turbulentinį. Vykstant turbulentiniam tekėjimui, paklaidų kitimas tampa universalus pobūdžio, ir paklaidos artėja prie tam tikros asimptotinės reikšmės, kai $Re_D \approx 10^6$. Pastarasis reiškinys rodo, kad esant tokiems Re_D tekėjimo struktūrą lemia turbulentinė klampa, ir matuoklių rotorius sukančiosios ir stabdančiosios jėgos artėja prie pusiausvyros.

Oro (dujų) klampos įtaka turbininių matuoklių paklaidoms

5 pav. pateiktos turbininių matuoklių paklaidos esant atmosferos slėgiui, atsižvelgiant į Re_{Dh} , kuriame būdinguoju geometrinio parametru priimtas žiedinio kanalo prieš matuoklio rotorius hidraulinis skersmuo [12, 14]. Galima daryti išankstinę prielaidą, kad rezultatų sklaidą pirmiausia lemia skirtingi matuoklių konstrukcijos tipai ir dydžiai. Be to, prie mažų Re_{Dh} , kurie pasiekiami



4 pav. Tiriamųjų kamerinių matuoklių paklaidų priklausomumas nuo Re_D skirtingos kinetinės klampos skysčiuose: DN100 matuoklis: 1 – dyzelinas ($\bar{v} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$); 3 – Exxsol D80 ir aviacinis žibalas ($\bar{v} = (2 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$); 4 – benzinai ($\bar{v} = 0,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$); DN65 matuoklis: 2 – Exxsol D80 žibalas ($\bar{v} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)



5 pav. Tiriamųjų turbininių matuoklių paklaidos esant atmosferos slėgiui ($\bar{v} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$):
1 – kreivės su vienu pagrindiniu pikų; 2 – su 2 pikais arba su netolygiu artėjimu prie pagrindinio piko; 3 – be pagrindinio piko

esant atmosferos slėgiui, paklaidų kitimą smarkiai veikia rotorų sukimašis stabdančiosios mechaninės trinties ir klamos jėgos, santykinai mažas sukimo momentas, žiedinio įtekėjimo kanalo forma ir matmenys, kurie lemia atitekančio srauto greičio pasiskirstymą, taip pat kiti veiksniai, susiję su matuoklio konstrukcijos keitimais kalibravimo kreivėms linearizuoti. Tirtųjų turbininių matuoklių paklaida siekia nuo 1,5 iki 3 %, esant atmosferos slėgiui ir atitinkamai mažiems Re_{Dh} .

Tačiau ši sklaida sumažėja iki $\pm 0,5$ %, kai Re_{Dh} padidėja iki $\sim 4 \cdot 10^5$. Trumpai tai galima paaiškinti, kaip ir kamerinių matuoklių atveju, Re_{Dh} poslinkiu link didesnių jo verčių, kurioms esant mažėja veiksmų, reikšmingų prie mažų Re_{Dh} , poveikis ir išsilygina likusių veiksmų poveikis, kai artėjama didelių link Re_{Dh} .

Analizė rodo, kad ši paklaidų sklaida yra dėsninga [15]. Tuo tikslu 6 pav. pateikti normalizuotų paklaidų priklausomumai nuo parametro Re_{Dh}/k :

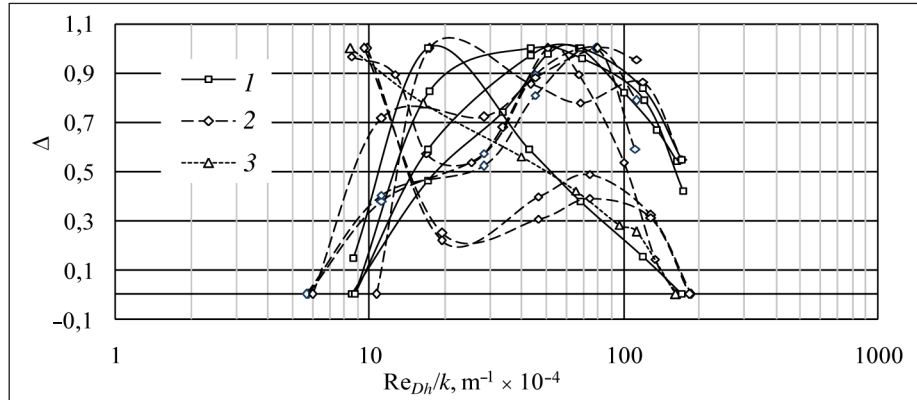
$$\Delta = \frac{(\delta - \delta_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})} = \left(\frac{Re_{Dh}}{k} \right); \quad (5)$$

čia: δ_{min} , δ_{max} – mažiausia ir didžiausia matuoklio paklaida, %; k – koeficientas, m.

Pastaba. Šiuo atveju k koeficientas įvestas siekiant suartinti skirtingo dydžio matuoklių paklaidų kreives, nes vienas Re_{Dh} neįvertina, kad turbininis matuoklis turi besisukantį rotorų ir sukamasis momentas priklauso nuo menčių aukščio ir jų nuotolio nuo rotoriaus ašies bei kitų veiksnių. Pirmajam priartėjimui prie apibendrintos kreivės priimta, kad k yra lygus atstumui nuo mentės centro iki rotoriaus ašies.

6 pav. matome, kad galima išskirti mažiausiai 3 skirtingas paklaidų kreivių formas. Pirmasis paklaidų tipas (1) turi vieną pagrindinį piką $Re_{Dh}/k = (5-8) \cdot 10^5$ zonoje. Kaip skysčių kamerinių matuoklių atveju, pagrindinis pikas dalija matuoklio matavimo intervalą į 2 dalis – pirmoje dalyje matuoklis veikia esant mažiems Re_{Dh} , ir jam įtakos turi visi anksčiau nurodyti veiksniai. Kai $Re_{Dh}/k > 8 \cdot 10^5$, matuoklis veikia esant turbulentiniam tekėjimo režimui ir nepriklausomai nuo skysčio fizikinės klamos bei mechaninių veiksnių. Todėl paklaidų kreivės įgauna panašumą.

Antrajam paklaidų tipui (2) būdingas pirmasis paklaidų pikas, esantis mažesnių $Re_{Dh}/k \leq 2 \cdot 10^5$ zonoje. Jo atsiradimą lemia srauto turbulizacija įtekėjime arba matuoklių konstruktorių taikomos priemonės sumažinti stabdančiųjų mechaninių ir klamos jėgų poveikį, padidinti sukamąjį momentą išnaudojant greičio pasiskirstymo ypatumus pradiniame žiediniame kanale prieš matuoklio rotorų, kuriame vyksta pereinamasis tekėjimo režimas. Greičio ir jo pulsacijų kitimo dėsningumai pereinamuosiuose tekėjimo režimuose buvo nagrinėjami darbuose [16, 17] ir iš dalies patvirtina daromas prielaidas. Be to, tokioje sudėtingoje sistemoje negalima atmesti ženklos srauto atitrūkimo nuo menčių ir su tuo susietų rezonansinių reiškinių įtakos. Visi šie poveikiai gali būti traktuojami kaip hidrodinaminiai srauto trukdžiai, kurie sukelia srauto turbulizavimą ir paklaidų piko atsiradimą esant mažiems Re_{Dh}/k . Kadangi tai atsitinka mažų Re_{Dh}/k zonoje, visiškai išsivystęs turbulentinis tekėjimas nesusidaro. Banguotas paklaidų kitimas prieš pagrindinį paklaidų piką parodo išliekantį srauto jautrį įvairiems trukdžiams. Pagrindinis paklaidų



6 pav. Turbininių matuoklių normalizuotų paklaidų kitimo kreivių palyginimas: 1 – paklaidų kreivės su vienu pagrindiniu piku; 2 – su 2 pikais arba su netolygiu artėjimu prie pagrindinio piko; 3 – be pagrindinio piko

pikas gali susidaryti arba jis gali būti sunkiai pastebimas, jei srautas smarkiai turbulizuotas.

Trečiajam paklaidų tipui (3) būdingi pastarieji požymiai, kai paklaidų kitimo kreivė išlaiko išvystytam turbulentiniam tekėjimui būdingą formą, kol pasiekama pagrindinio paklaidos piko zona.

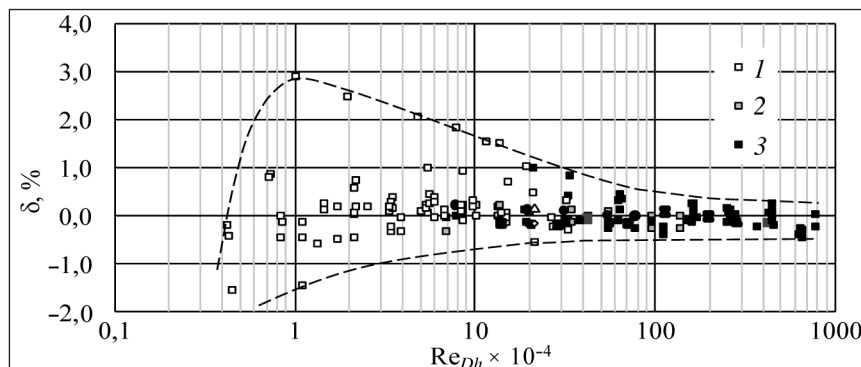
Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad paklaidų kreivės lūžių taškai yra tiesiogiai susieti su esminiais sukamųjų ir stabdančiųjų jėgų santykio pokyčiais ir yra apibrėžtose vietose: pagrindinis pikas $Re_{Dh}/k = (5-8) \cdot 10^5$ zonoje; pirmas pikas arba minimumas – $(1-3) \cdot 10^5$ zonoje. Paklaidų kreivių tarp lūžio taškų polinkis taip pat yra ganėtinai informatyvus. Taigi analizuojant paklaidų kreivių formą galima numatyti matuoklio veikimo režimą ir padidinto srauto slėgio poveikį matuoklio paklaidoms.

7 pav. pateiktas turbininių matuoklių paklaidų priklausomumų palyginimas esant atmosferos ir padidintam slėgiui. Matyti, kad padidinus slėgį

turbininio matuoklio paklaidos priartėja prie lygmens, būdingo jų lygiui, kai atmosferos slėgis ir $Re_{Dh} \sim 4 \cdot 10^5$ (žr. 5 pav.). Tai rodo, kad didėjant slėgiui didžiausias paklaidų pokytis vyksta esant mažiems Re_{Dh} , nes matuoklio mažiausios neigiamos paklaidos dėl srauto tankio ir sukamojo momento didėjimo pakinta link teigiamų jų verčių, o pikinė vertė mažėja, nes padidėjus Re_{Dh} turbulentinis tekėjimo režimas pasiekiamas greičiau.

Jei esant atmosferos slėgiui paklaidų kitimas atitinka jų kitimo pobūdį prie turbulentinio tekėjimo režimo, tokia pat paklaidų kitimo tendencija išlieka padidėjus slėgiui. Tai patvirtina, kad tokiu atveju visame intervale galioja panašumo pagal Re_{Dh} principas, nes paveiklųjų veiksnių įtaka turbulentine režime išnyksta.

Apibendrinant gautus rezultatus galima daryti išvadą, kad pagal turbininio matuoklio paklaidų kreives, nustatytas esant atmosferos slėgiui, galima



7 pav. Tiriamųjų turbininių matuoklių paklaidų esant atmosferos ir padidintam slėgiui palyginimas: 1 – atmosferos slėgis, $\bar{v} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 2 – slėgis 0,61 MPa, $\bar{v} = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 3 – slėgis 3,5 MPa, $\bar{v} = 0,46 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

pakankamu tikslumu prognozuoti paklaidų pokyčius matuokliui veikiant, kai slėgis yra padidintas. Siekiant užtikrinti tokios prognozės patikimumą, būtina kalibruojant nustatyti matuoklio paklaidų kreivę, kai atmosferos slėgis yra kiek galima platesniame Re_{Dh} intervale. Labai svarbu tai atlikti esant mažiems Re_{Dh} ir $Re_{Dh} > 10^5$, kai tekėjimas pereina į turbulentinį režimą, ir paklaidos pradeda artėti prie nuolatinės asimptotinės vertės, kuri beveik nekinta didėjant slėgiui. Šie rezultatai gerai koreliuoja su priklausomumu tarp matuoklio faktoriaus K , išreiškiančio apskukų impulsui tenkantį pertekėjusio skysčio tūrį, ir parametro $(Hz/(v))^{-1}$.

8 pav. pateiktas kamerinių (a) ir turbininių (b) matuoklių paklaidų skysčių ir oro (dujų) srautuose palyginimas. Matyti, kad nežiūrint į kamerinių ir turbininių matuoklių matavimo principų skirtumus, panašumas pagal Re skysčių ir dujoms tekant turbulentiškai tachometrinių matuoklių kanaluose išlieka. Tam tikri skirtumai gali būti paaiškinami neadekvačiu būdingojo geometrinio dydžio Re skaičiuję parinkimu dėl sudėtingos kanalų geometrijos ir skirtingos rotorijų formos bei jų sąveikos su matuoklio korpuso sienelėmis. Tačiau stebimas priklausomumų panašumas leidžia daryti išvadą, kad smarkiai turbulizuotame sraute atitrūkimo ir išcentrinų jėgų poveikiai suvienodėja, o didelio mastelio turbulentiškių trukdžių poveikis tekėjimui arti sienelės yra silpnas.

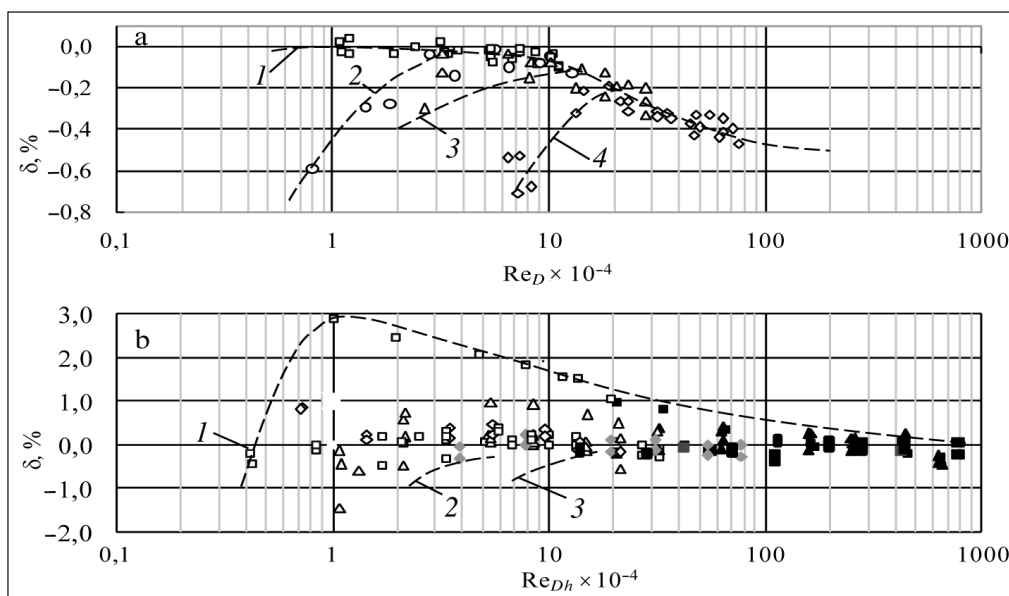
Skyriuose „Tachometrinių debito matuoklių veikimas pulsuojančiame sraute“ ir „Tachometrinių srauto matuoklių veikimas kintant fluidų klampai“ pateikti tyrimo rezultatai buvo panaudoti kuriant oro (dujų), vandens, naftos ir naftos produktų tūrio bei debito valstybinius etalonus, taip pat užtikrinant šių dydžių matavimų Lietuvoje sietį su Europos šalių nacionalinių institutų teikiamais matavimų tikslumais.

Kiti vykdyti MTEP darbai ir jų rezultatyvumas

Kuriant etalonų techninę bazę ir atsižvelgus į kiekvienos matavimo srities ypatumus buvo taip pat atlikti kiti reikšmingi srautų dinamikos tyrimai ir jų rezultatų tiesioginiai taikymai:

- įvairios klampos plėvelių ant vertikalios cilindrinio paviršiaus tekėjimo dinamikos tyrimai [18, 19], padėję sukurti varpo tipo etaloną oro (dujų) tūrio ir debito nuo 0,016 iki 16 m³/h vertėms su neapibrėžtimi iki 0,13 % atkurti, kurio analogai vėliau pagaminti ir įdiegti penkiose Lietuvos dujų ūkio laboratorijose ir dviejose Moldovos dujų ūkio laboratorijose;

- kritinių tūtų veikimo dinamikos tyrimai, pagal kuriuos sukurtas etalonas oro (dujų) tūrio ir debito nuo 5,7 iki 308 m³/h vienetams su neapibrėžtimi 0,16 % atkurti, kurio vienas analogas pagamintas ir įdiegtas Lietuvos dujų ūkyje, o kitas Maskvos (Rusija) dujų matuoklių gamykloje;



8 pav. Kamerinių ir turbininių matuoklių paklaidų kreivių palyginimas, atsižvelgus į Re_D ir Re_{Dh} ; a – kamerinis matuoklis; 1, 2, 3 ir 4 žymėjimai tokie pat, kaip 4 pav.; b – turbininis matuoklis; 1, 2 ir 3 žymėjimai kaip ir 5 pav.

- įvairių greičio matuoklių aptekėjimo ir tekėjimo siaurėjančiose tūpose ir kanaluose kintant tekėjimo režimams dinamikos tyrimai [20, 21]. Jie padėjo sukurti etaloną oro (dujų) greičio nuo 0,05 iki 60 m/s vertėms su neapibrėžtimi (8,0–0,45) % atkurti, kuris laipsniškai buvo tobulinamas įdiegiant neinvazinius ultragarsį ir lazerinį greičio matuoklius;

- įvairių tipų (vienasraučių ir daugiasraučių turbininių, kamerinių, ultragarsinių bei magnetoindukcinių) mažų debitų matuoklių matavimo tikslumo veikiant įvairiems trukdžiams tyrimai [22–24], kurie įgalino nustatyti vandens ir šilumos tiekimo / vartojimo ne balanso priežastis bei pateikti rekomendacijas apskaitai gerinti.

Tekėjimo mikrokanaluose su struktūrizuotais paviršiais tyrimų plėtra

Tyrimų plėtrą paskatino šie veiksniai:

- poreikis ir galimybė išsamiau ištirti sudėtingų tekėjimų, kurie vyksta sudėtingos formos kanaluose ir kuriuos lydi srauto atitrūkimo reiškiniai, struktūrą;

- struktūrizuoto paviršiaus įdubos / kavernos gali būti tinkamu modeliu tirti tekėjimo išsišakojimo (bifurkacijos) procesus ir sūkurinių struktūrų tarpusavio sąveikos mechanizmą;

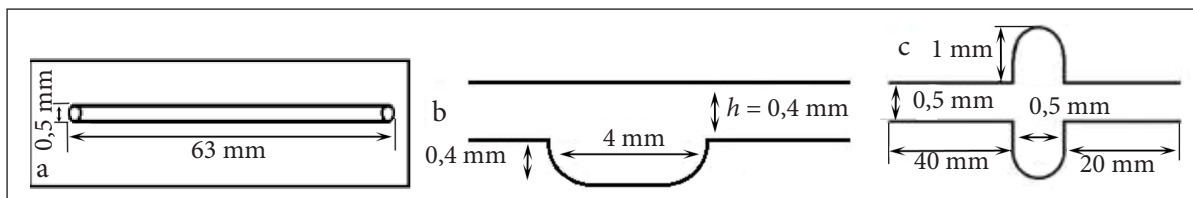
- srauto tyrimai mažo skersmens sudėtingos formos kanaluose teikia žinių apie srauto dinamiką ir tekėjimo struktūrą, kurios gali būti taikomos sprendžiant inžinerines problemas, susijusias su srautų maišymosi intensyvinimu mikroreaktoruose ir mikroelektromechaninėse sistemose bei mažuose šilumokaičiuose. Taip pat visiškai realus šio metodo ir rezultatų taikymas tiriant kraujo tekėjimo dinamiką širdies ir kraujagyslių sistemoje, trombozės ir aneurizmų susidarymo kraujagyslėse problemas.

Eksperimentiniai tyrimai atliekami naudojant įsisavintą dalelių sraute vizualizacijos sistemą. Iki šiol eksperimentai vykdyti stačiakampio (artimo

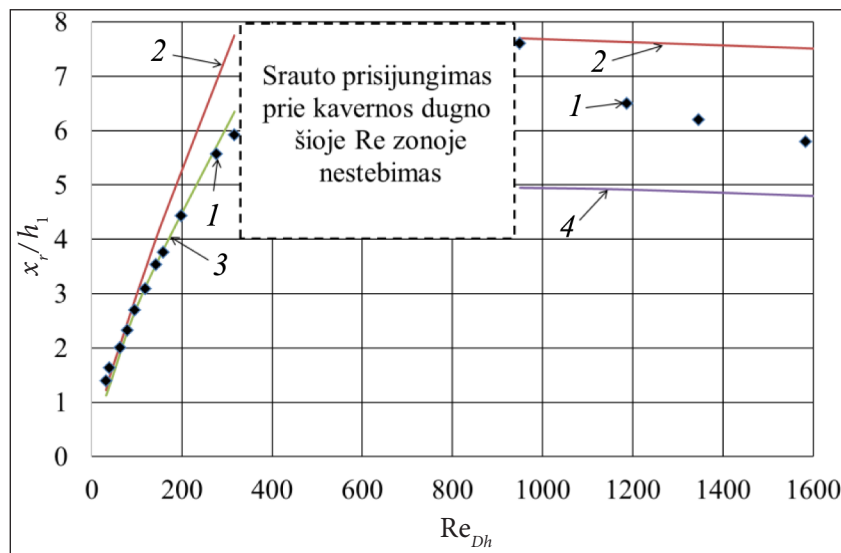
kvadratum) skerspjūvio kanaluose, kurio sienelės lygios arba jose suformuotos pereinamojo ir atvirojo tipų kavernos, kaip parodyta 9 pav. [12, 13].

Tiesiame kvadratinio skerspjūvio kanale (9a pav.) atliktais greičio pasiskirstymo tyrimais [25] patvirtinta metodo teikiamų rezultatų koreliacija su žinomais dėsningumais, susietais su pradinio ruožo ilgiais ir greičio pasiskirstymu kintant tekėjimo režimui nuo laminarinio iki turbulentinio, bei įtekio geometrija. Nustatyta, kad tekėjimo dinamika tokio skersmens kanaluose iš esmės atitinka dėsningumus, stebimus įprastinio dydžio kanaluose, ir skaitinio modeliavimo rezultatus, taikant turbulentiškumo modelį, pagrįstą Reinoldso įtempimų lygtimi.

Mikrokanale su pereinamojo tipo kavernomis [26] (kavernos ilgio ir gylio santykis $L/h_1 \approx 10$) (9b pav.), nustatyti tekėjimo režimai, kuriems esant atitrūkęs nuo atbulinės kavernos sienelės srautas prisijungia prie kavernos dugno ir suformuoja recirkuliacinio tekėjimo zoną, kurios ilgis beveik tiesiškai didėja didėjant Re_{Dh} (10 pav.). Pasiekus kavernos vidurį prisijungiantis srautas dėl priekinės kavernos sienelės poveikio atkeliamas nuo dugno, ir kaverną užpildo lėtos cirkuliacijos kontūras. Pasiekus turbulentinį tekėjimo režimą, dėl padidėjusio turbulentinio maišymosi vėl stebimas prisijungimas prie kavernos dugno, bet recirkuliacinio tekėjimo zonos struktūra iš esmės pakinta. Vykstant turbulentiniam tekėjimui kanalu, recirkuliacinėje zonoje stebimi 2 pagrindiniai sūkuriai, kurių vienas prie atbulinės sienelės ir kitas tarp šio sūkurio ir prisijungimo taško. Šie sūkuriai didėdami pasiekia kavernos viršų ir atitrūksta. Toks procesas periodiškai pasikartoja iš naujo. Tai patvirtina teoriniai sprendiniai bėgant laikui. Kaip matyti 10 pav., eksperimentiškai nustatytas vidutinis recirkuliacinės zonos ilgio kitimas gerai koreliuoja su skaitinio modeliavimo, naudojant Spallart-Almaras ir Reinoldso įtempimų (RSM) modelius turbulentiniam maišymuisi



9 pav. Tiriamųjų mikrokanalų schemas: a – tiesus kanalas; b – kanalas su pereinamojo tipo kavernomis; c – kanalas su atvirojo tipo kavernomis



10 pav. Recirkuliacinės zonos ilgio ir kaveros gylio santykio priklausomumas pereinamojo tipo kavernoje nuo Re_{Dh} : 1 – eksperimentiniai rezultatai; 2, 3 ir 4 – skaitinis modeliavimas taikant atitinkamai Spallart-Almaras, RSM ir SST k- ω modelius

įvertinti, rezultatais. Turbulentiniame tekėjimo režime patenkinamus rezultatus teikia RSM ir šlyties įtempimų pernašos (SST k- ω) modeliai. Šioje srityje reikia papildomų tyrimų, bet bendroji recirkuliacinės zonos ilgio stabilizacijos tendencija akivaizdi.

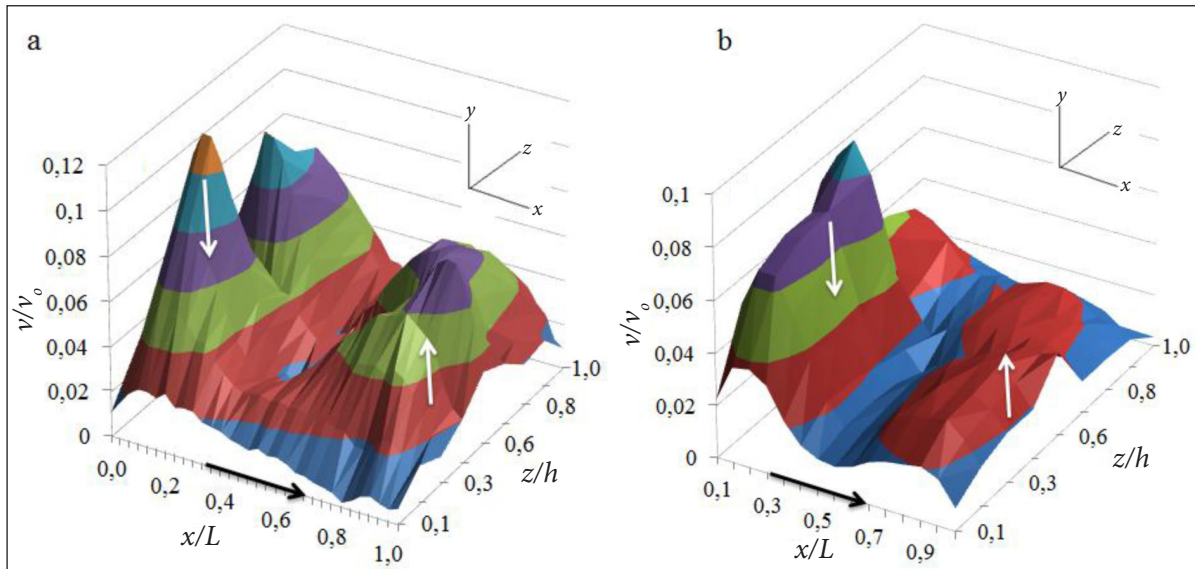
Atvirojo tipo kavernoje ($L/h \approx 1$) (9c pav.) nustatyta sudėtingesnė sūkurinių struktūra [26]. Pagal 2D matavimus ašinėje kaveros plokštumoje stebimas pagrindinis sūkurys ties kaveros viršum ir priešingos sukimosi krypties antrinis sūkurys kaveros dugne. Pastarasis išryškėja tik didėjant Re_{Dh} . Be to, kintant Re_{Dh} didžiausio greičio zonos keičia vietą pagal pagrindinio sūkurio perimetrą. Tai rodo, kad tokio tipo kavernoje susiformuoja skersiniai pertekėjimai, o srauto struktūra yra trimatė.

11 pav. pateikti tikrojo greičio (v) plokštumoje, einančioje per pagrindinio sūkurio centrą, ir vidutinio greičio kanale (v_o) santykių (v/v_o) reikšmės atsižvelgiant į atstumą nuo kaveros atbulinės sienelės (x/L) ir atstumą nuo jos šoninės sienelės (z/h_1). Tikrasis greitis (v) apskaičiuotas pagal greičio komponentes x ir y kryptimis. Juoda rodyklė rodo tekėjimo kanale kryptį; baltos rodyklės – ties kaveros atbuline sienele tekėjimo kryptį link kaveros viršaus ir atvirkščiai – ties priekine kaveros sienele – kaveros dugno link.

Greičio minimumas ties $x/L \approx (0,3-0,4)$ skersine z/h_1 kryptimi rodo pagrindinio sūkurio kavernoje centro padėtį. Tačiau greičio minimumas ties $z/h_1 \approx 0,5$ ašine x/L kryptimi rodo tekėjimo kavernoje išsišakojimą (bifurkaciją) į dvi dalis, turinčias savo greičio pikus, kurių padėtis priklauso nuo Re_{Dh} . Galima daryti prielaidą, kad tokiai sistemai susiformuoti padeda sąveika tarp kanalo kampuose susiformavusių antrinių sūkurinių tekėjimų ir sūkurinio tekėjimo kavernoje.

Jei kanale esant stacionariam tekėjimui išsišakojimas ryškėja laipsniškai tik didėjant Re_{Dh} , pulsuojančiame sraute ir kai $Re_{Dh} = 100$ (11a pav.) jau aiškiai stebimas. Tai reiškia, kad srauto kanale turbulentiškumas pagreitina tekėjimo kavernoje išsišakojimą ir skersinių pertekėjimų atsiradimą.

Šie rezultatai rodo, kad kaverna gali būti naudinga modeliu nagrinėjant ir analizuojant sūkurinių formavimąsi ir jų sąveikas bei ieškant praktinių uždavinių sprendimų. Įvertinant gautų rezultatų aktualumą ir galimą platų pritaikymą įvairiose inžinerinėse srityse, tyrimai, sprendžiant mikrosrautų dinamikos uždavinius, laboratorijoje bus ir toliau tęsiami, gilinantis į srauto atitrūkimo valdymo būdus, pasinaudojant aktyviais bei pasyviais metodais, taip pat ir toliau nagrinėjant tekėjimo struktūrą ir dinamiką aptekant struktūrizuotus paviršius bei kliūtis.



11 pav. Erdvinis greičio profilis per pirminio sūkurių centrą kanale esant pulsuojančiam sinuso formos tekėjimo 40 Hz dažniui, kai Re: a – 100; b – 1 000

TAIKOMŲJŲ DARBŲ REZULTATAI

Skysčių ir dujų srautų matavimo etalonų bazės plėtra ir įteisinimas

Jau 2002 m. laboratorija, vykdydama Lietuvos Respublikos Vyriausybės įgaliojimus sukurti ir išlaikyti valstybinius skysčių ir dujų srautų etalonus, tapo regioninės metrologinės EURAMET organizacijos techninio komiteto *Srautai* nariu ir pateikė pradinis valstybinių etalonų prototipų geriausias matavimo galimybes, nustatyta tvarka pradėjo laipsniškai tobulinti sukurtus etalonus ir siekti tarptautinio pripažinimo. 2005 m. sukurtų 2 etalonų ir 2 prototipų geriausias matavimo galimybes buvo teigiamai įvertintos EURAMET ekspertų, o kokybės vadybos sistema ir pradiniai veiklos rezultatai buvo patvirtinti EURAMET techninio komiteto *Kokybė* forume Stambule (Turkija). Visa

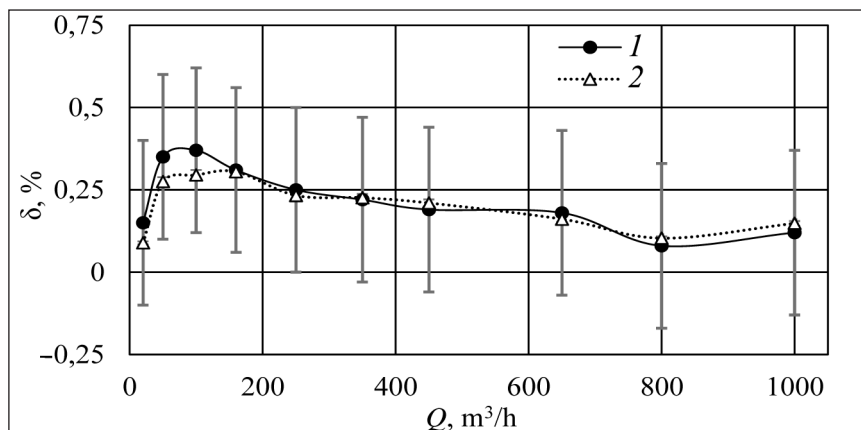
tai reiškė, kad laboratorija įvykdė pagrindinius reikalavimus, keliamus EURAMET organizacijos asocijuotiems paskirtiesiems institutams, vykduojantiems ES įgaliotų institucijų nustatytus reikalavimus tarptautinei matavimų siečiai užtikrinti srautų matavimo srityje. Pradiniame etape daug reikšmės pripažinimui turėjo atlikti tyrimo darbai ir skelbtos mokslinės publikacijos. Taip pirmą kartą skysčių ir dujų tūrio, debito ir greičio matavimo galimybes buvo paskelbtos Tarptautinio svorsčių ir matų biuro (BIPM) svetainėje <http://kcdb.bipm.org/appendixC/M/LT/M_LF>.

2008 ir 2014 m. Lietuvos Respublikos Vyriausybė pakartotinai patvirtino 4 valstybinių etalonų sudėtį ir jų gerinamas charakteristikas, kurios prieš tai buvo teigiamai įvertintos regioninių metrologinių organizacijų EURAMET, AFRIMETS ir APMP ekspertų. 1 lentelėje pateikti 2016 m.

1 lentelė. Lietuvos energetikos instituto valstybinių etalonų ribos ir išplėstinės neapibrėžtys

Eil. Nr.	Valstybinio etalono pavadinimas	Matavimo ribos	Išplėstinė neapibrėžtis
1.	Oro (dujų) greičio vieneto	nuo 0,05 iki 60 m/s	nuo 8,0 iki 0,45 %
2.	Oro (dujų) tūrio ir debito vieneto	nuo 0,016 iki 9700 m ³ /h * nuo 0,0003 iki 0,016 m ³ /h	nuo 0,13 iki 0,30 % * nuo 0,31 iki 0,13 %
3.	Skysčių (vandens) tūrio ir debito vieneto	nuo 0,01 iki 100 m ³ /h	nuo 0,054 iki 0,082 %
4.	Skysčių (naftos ir naftos produktų) tūrio ir debito vieneto	nuo 1 iki 120 m ³ /h	nuo 0,040 iki 0,065 %

* – išplėtimas mažų debitų nuo 0,0003 iki 0,016 m³/h srityje rengiamas pateikti EURAMET siekiant tarptautinio pripažinimo.



12 pav. 2014–2015 m. tarptautinio palyginimo dujų tūrio esant debitams nuo 20 iki 1 000 m³/h matavimo srityje: 1 – LEI rezultatai; 2 – pamatinė palyginimo kreivė

Lietuvos energetikos institute esančių valstybinių etalonų charakteristikos.

2010 ir 2016 m. laboratorijos veikla teigiamai įvertinta naujai ir pripažinta EURAMET techninio komiteto *Kokybė* išplėstiniuose posėdžiuose Briuselyje (Belgija) ir Sarajeve (Bosnija ir Hercegovina).

Tarptautiniai palyginimai

Laboratorija visą laiką sėkmingai vykdė vieną pagrindinių reikalavimų – periodiškai patvirtinti pasiektas matavimo ir kalibravimo galimybes dalyvaujant tarptautiniuose matavimų palyginimuose. Toliau pateikiami keli pastarųjų palyginimų oro (dujų) ir skysčių (vandens) tūrio, debito ir greičio matavimų srityje pavyzdžiai, kurie parodo Lietuvos valstybinių etalonų veikimo ir matavimų sieties Lietuvoje užtikrinimo lygmenis.

12 pav. pateiktas palyginimas pagal EURAMET projektą Nr. 1296 [27], kuriame dalyvavo 13 Europos šalių nacionaliniai institutai. Palyginimui vertinti taikyta EURAMET pripažinta metodika, kiekvieno dalyvio rezultatų normalizuoto nuokrypio (En) nuo pamatinės vertės dydis turėjo būti mažesnis nei 1.

12 pav. matyti, kad laboratorijos matavimo rezultatai tiksliai atkartoja pamatinius rezultatus. Jei vertintume skirtumą ne vizualiai, bet pagal En dydį, jis kito nuo 0,02 iki 0,30, vidutinė jo vertė prilygo 0,13.

2015–2016 m. vykdytame EURAMET Nr. 1333 projekte [28], kai buvo palyginami 2 objektai-skaitikliai G2500 ir G6500, LEI laboratorijos normalizuoto nuokrypio En reikšmės buvo tokios, kaip parodyta 2 lentelėje. Lyginant pirmąjį objektą dalyvavo 9 šalių nacionaliniai institutai, antrąjį – 7.

Vandens tūrio ir debito matavimo, esant debitams nuo 1 iki 20 m³/h ir vandens temperatūrai 50 °C, palyginimuose pagal Nordtest/NIC projektą Nr. 01472 / EURAMET Nr. 863 dalyvaujant 10 ES šalių laboratorijų ir institutų, LEI laboratorijos rezultatų normalizuotas nuokrypis $En = (0,02–0,56)$, vidutinė reikšmė – 0,20. Analogiški rezultatai gauti palyginime pagal EURAMET projektą Nr. 1233 [29].

Oro greičio matavimų palyginimai pagal EURAMET projektus (M.FF-K3), 2007–2008 m.; Nr. 514, Nr. 1050, 2011–2012 m. ir Nr. 1225, 2015–2016 m. apima greičių intervalą nuo 0,05

2 lentelė. Palyginimuose pagal EURAMET projektą Nr. 1333 pasiektos En reikšmės

Debitas, m³/h	1000	2000	3000	4000	Skaitiklis G2500						
En	0,28	0,09	0,13	0,18	Vid. 0,17						
Debitas, m³/h	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	Skaitiklis G6500
En	0,12	0,21	0,21	0,13	0,07	0,06	0,08	0,06	0,00	0,02	Vid. 0,10

iki 40 m/s. Labai svarbu, kad pastarojo palygini-
mo intervale nuo 0,05 iki 1,0 m/s rezultatai [30]
labai gerai koreliavo su pamatiniu svertiniu vi-
durkiu, kas patvirtino pasiektą aukštą matavimų
tikslumą ir matavimo sąlygų stabilumą.

Rezultatų pripažinimas

Pagrindiniai pripažinimo rodikliai:

- laboratorijos darbuotojų grupė (habil. dr. Antanas Pedišius, dr. Jurij Tonkonogij, dr. Gediminas Zygmantas ir dr. Nerijus Pedišius) pelnė 2008 m. Lietuvos mokslo premiją už 1995–2007 m. mokslo darbų ciklą „Valstybės etalonų ir eksperimentinės įrangos komplekso skysčių, dujų ir šilumos kiekių vertėms atkurti ir jų matavimo priemonėms tirti ir bandyti sukūrimas“ taikomosios mokslinės veiklos (eksperimentinės plėtos) srityje;

- 2007–2015 m. laboratorijos darbuotojai apgynė 4 disertacijas [11, 12, 16, 19], kurių tematika glaudžiai siejasi su srautų dinamikos tyrimais matavimo sistemose, kuriose pasireiškia hidrodinaminių trukdžių, fizikinių savybių ir tekėjimo režimų pokyčių įtakos;

- 2011 ir 2015 m. modernizuoti ir įdiegti laboratorijos įrenginiai (pagrindiniai šių darbų vykdytojai – dr. J. Tonkonogij, dr. A. Stankevičius ir dr. A. Tonkonogovas) buvo įvertinti „Lietuvos metų gaminių 2012“ aukso medaliu – Kritinių tūtų įrenginys pagal sutartį Nr. 106596/12-1270.11.11 su AB „Lietuvos dujos“, įrengtas AB „Lietuvos dujos“ Centrinės kalibravimo ir bandymų laboratorijos Kauno laboratorijoje; aukso medaliu „Mašinų ir įrengimų pramonės“ grupėje „Lietuvos metų gaminių – 2015“ nominacijoje – apdovanotas laboratorijos sukurtas etaloninis varpo tipo įrenginys, skirtas oro / dujų skaitikliams ir srauto matuokliams kalibruoti, tikrinti ir bandyti.

Taikomosios paslaugos ūkio subjektams

Be paslaugų, kurias kaip etalonų laboratorija teikia Lietuvos ūkio ir mokslo subjektams kalibruodama matavimo priemonės, kitų laboratorijų darbinis etalonus ir įrenginius, laboratorija veikia kaip Lietuvos ūkio infrastruktūros dalis, teikianti Lietuvos subjektams akredituotas pagal LST EN ISO/IEC 17025 ir 17020 standartus ir notifikuotas pagal matavimo priemonių direktyvą 2004/22/EB paslaugas. Itin svarbi pastaroji veikla yra Lietuvos

ūkio subjektams, gaminantiems arba teikiantiems Lietuvos rinkai matavimo priemonės.

Nuo 2008 m., kai laboratorija tapo notifikuota įstaiga EB tipo tyrimo bandymams ir atitikties vertinimui atlikti, iki šios dienos laboratorija atliko 23 matavimo priemonių (vandens ir šilumos matuoklių, šilumos energijos skaičiuotuvių, temperatūros jutiklių, srauto jutiklių) tipo tyrimo bandymus pagal Europos Parlamento ir Tarybos direktyvos 2004/22/EB reikalavimus, išdavė ES tipo tyrimo sertifikatus. Laboratorijos užsakovai ne tik Lietuvos gamintojai (AB „Axis Industries“), bet ir užsienio: Danijos „Danfoss“, Vokietijos „Sensus GmbH“, Italijos „ISOIL Industria“, Lenkijos „Metron“. Per šį laiką dėl gamintojų atliktų prietaisų, kuriems laboratorija išdavė tyrimo sertifikatus, modifikacijų atlikta dvidešimties tipo tyrimo sertifikatų revizijų, kuriuos lydėjo papildomi bandymai ir tyrimai.

Be to, laboratorija, plėtodama mažų dujų ir skysčių srautų matavimo tyrimus, aktyviai dalyvavo taikomojo pobūdžio darbuose, susijusiuose su aktualiais ūkiui uždaviniais, pavyzdžiui, suskystintų dujų tiekimo sistemos įgyvendinimas.

IŠVADOS

Kryptingi moksliniai ir taikomieji skysčių bei dujų srautų dinamikos kanaluose tyrimai 2006–2016 m. leido pasiekti šių rezultatų:

1. Išsamiai ištirtas turbininių ir kamerinių matuoklių atsakas į įvairiais dėsniais pulsuojančią pertekantį srautą ir nustatytas tokių matuoklių dinaminis paklaidų priklausomumas nuo pulsacijų charakteristikų. Sukurtas eksperimentais pagrįstas skaitinio modeliavimo metodas leidžia, vadovaujantis matuoklio atsako į stačiakampį impulsą duomenimis, įvertinti matuoklio paklaidas esant sudėtingiems srauto pulsacijų dėsniams. Nustatyta, kad turbininiams matuokliams pulsacijų įtaka pasireiškia esant jų dažniui didesniai nei 0,1 Hz, o dažniui esant artimam 2 Hz pasiekiami ribinė dinaminės paklaidos vertė, kurios dydis priklauso nuo pulsacijų dėsnio ir jų amplitudės.

Tyrimo rezultatai praktikoje leidžia įvertinti netolygaus dujų vartojimo įtaką jų apskaitos tikslumui gamtinių dujų tiekimo sistemose ir technologiniuose procesuose, parinkti priemonės pulsacijų lygiui mažinti.

2. Eksperimentais dujų ir skysčių srautuose, kintant jų kinetinei klampai atitinkamai $(0,44 - 15) \cdot 10^{-6}$ ir $(0,67 - 5,5) \cdot 10^{-6}$ m²/s ribose, nustatytas universalus turbininių ir kamerinių matuoklių dinaminės paklaidos priklausomumas nuo Reinoldso skaičiaus, tekėjimui perėjus į turbulentinį režimą, ir jos artėjimas prie asimptotinio pastovaus lygmens, kai fizikinės klamos įtaka darosi itin maža. Šie tyrimo rezultatai turi svarbios reikšmės perkeliant matuoklių kalibravimo laboratorijoje rezultatus į eksploatacines sąlygas ir kontroliuojant bei prognozuojant galimus matuoklių paklaidų nuokrypius.

3. Mokslinių tyrimo rezultatai panaudoti tobulinant sukurtus keturis valstybinius oro (dujų) greičio ir oro (dujų), vandens ir naftos produktų tūrio ir debito vienetų etalonus iki pripažinimo bei įteisinimo Tarptautinio svorsčių ir matų biuro (BIPM) administruojamoje regioninių metrologijos organizacijų sistemoje. Laboratorija sėkmingai vykdė EURAMET organizacijos, vienijančios Europos šalių nacionalinius matavimų institutus techniniame komitete *Srautai*, paskirtas funkcijas institutui, ir periodiškai nustatyta tvarka patvirtino savo veiklos rezultatus šios organizacijos techniniame komitete *Kokybė*.

Sukurti valstybiniai etalonai paskatino plėtoti tyrimų ir bandymų techninę bazę, tapti svarbia matavimų infrastruktūros Lietuvoje dalimi, užtikrinančia ne tik tarptautinę matavimų sietį, bet ir Lietuvos ūkyje naudojamų, gaminamų ir teikiamų rinkai srautų parametrų matavimo priemonių atitiktį direktyvų ir reglamentų reikalavimams. Šios veiklos sritys, atsižvelgus į Lietuvos ūkio ir mokslo poreikius, akredituotos ir, kur tinkama, notifikuotos toliau plėtoti.

Sukurtas skysčių ir dujų srautų tyrimų ir bandymų kompleksas, rezultatai įvertinti 2008 m. Lietuvos mokslo premija, etalonų analogai įdiegti Lietuvos ir užsienio laboratorijose bei įvertinti 2012 ir 2015 m. Lietuvos metų gaminių apdovanojimais.

4. Įsisavintas srautų mikrokanaluose tyrimo metodas, pagrįstas dalelių judėjimo sraute vizualizavimu, leidžiantis plėtoti naują mokslinių ir taikomųjų tyrimų mikrokanaluose su struktūrizuotais paviršiais kryptį. Nustatyti srauto atitrūkimo ir prisijungimo dėsningumai pereinamojo tipo kavernoze kintant tekėjimo mikrokanale režimui. Parodyta, kad atvirojo tipo kavernoze vyksta srauto išsiskyrimas (bifurkaciją) į dvi šakas, tarp kurių

vyksta sudėtinga sąveika, lydima skersinių pertekėjimų. Tai nauji rezultatai, leidžiantys spręsti tiek fundamentinius sūkurinių struktūrų sąveikos uždavinius, tiek ir taikomuosius uždavinius, susijusius su kavernų kanalų sienelėse sukeliama reiškiniais.

Gauta 2016 06 30

Priimta 2016 08 09

Literatūra

1. Pedišius A. Skysčių ir dujų srautų matavimai energetikoje. *Lietuvos mokslas. Lietuvos energetikos institutas* 50, 2006. 61 kn. P. 177–196.
2. Pedišius A., Tonkonogij J., Stankevičius A. Gamtinių dujų srautų tyrimai ir jų praktinis taikymas. *Energetika*. 2006. Nr. 3. P. 86–93.
3. Tonkonogij Yu. Analiz dinamicheskoi pogreshnosti turbinnykh schyotchikov gaza. *Materialy 23-ei mezhdunarodnoi konferentsii „Komercheskii uchyot energonositelei“*. 23–25 maya 2006 g., Sankt-Peterburg, 2006. P. 148–152.
4. Tonkonogij J., Pedišius A. Numerical simulation of the turbine gas meter behavior in the pulsating flow. *Journal of Heat Transfer*. 2008. Vol. 39. No. 7. P. 559–570.
5. Tonkonogij Yu., Pyadishyus A. Stankevichyus A., Krukovskii P. Dinamicheskaya pogreshnost' turbinnykh schyotchikov gaza v pul'siruyushchem potoke. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2008. T. 30. Nr. 4. S. 85–93.
6. Tonkonogij J., Pedišius A., Stankevičius A. The new semi-experimental method for simulation of turbine flow meters rotation in the transitional flow. *International Journal of Fluid and Thermal Engineering*. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 30–35.
7. Tonkonogovas A., Krukovskij P. Response and dynamic errors of turbine meter at complex flow pulsation patterns. *Industrial Heat Engineering*. 2010. Vol. 32(3). P. 99–104.
8. Tonkonogij J., Pedišius A., Stankevičius A., Tonkonogovas A. Dujų srauto pulsacijų įtaka nedidelės šiluminės elektrinės veikimui. *Energetika*. 2010. T. 56. Nr. 1. P. 19–24.
9. Tonkonogij J., Tonkonogovas A. Analysis of nonlinearity of the turbine gas meters time constant during step response. *Mechanika*. 2013. Vol. 19(5). P. 526–530.

10. Bertašienė A., Tonkonogovas A. Inertial properties of the tachometric air velocity meter and their influence on meter's dynamic error in pulsing flow. *Proceedings of the 8th International Conference of Young Scientists on Energy Issues CYSENI 2011, Kaunas, Lithuania, May 26–27, 2011*. Kaunas: LEI, 2011. P. 256–265.
11. Tonkonogovas A. *Pulsuojančio srauto poveikio matuoklių su besisukančiomis dalimis darbui tyrimas*: daktaro disertacija. Lietuvos energetikos institutas, 2015. 84 p.
12. Maslauskas E. *Tekėjimo režimų ir fizikinių savybių įtakos dujų ir skysčių mechaninių debito matuoklių charakteristikoms tyrimas*: daktaro disertacija. Lietuvos energetikos institutas, 2014. 79 p.
13. Maslauskas E., Pedišius N., Zygmantas G. Investigation of liquid viscosity influence on flow rate measurement by rotary vane meters. *Mechanika*. 2014. Vol. 20. P. 158–164.
14. Maslauskas E., Pedišius A., Tonkonogij J. Dujų klampos įtakos turbininiams debito matuokliams tyrimas. *Energetika*. 2013. T. 59. Nr. 1. P. 50–56.
15. Pedišius N., Zygmantas G., Maslauskas E. Influence of gas and liquid viscosity on turbine and positive displacement meters calibration. *Proceedings of the 17th International Congress of Metrology, September 21–24, 2015, Paris, France*. P. 6.
16. Bertašienė A. *Oro greičio verčių atkūrimo ir perdavimo tyrimas kintant tekėjimo režimui*: daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas – Lietuvos energetikos institutas. Kaunas, 2011. 95 p.
17. Pedišius A., Janušas V., Bertašienė A. Low air velocity measurement characteristics' variation due to flow regime. *World Congress of Science, Engineering and Technology (WCSET 2008), July 4–6, 2008, Paris, France*. P. 203–207.
18. Tonkonogij J., Stankevičius A., Pedišius A. Likusios ant ištraukiamo iš skysčio vertikalaus paviršiaus plėvelės tyrimas. *Energetika*. 2007. Nr. 1. P. 39–44.
19. Stankevičius A. *Hidrodinaminių veiksnių įtakos atkuriamoms oro tūrio ir srauto vertėms tyrimas*: daktaro disertacija. Lietuvos energetikos institutas. Kaunas, 2007. 90 p.
20. Bertašienė A., Daugėlė A., Janušas V. Investigation of practical application of laser Doppler anemometer. *Measurement*. 2006. No. 2. P. 5–10.
21. Bertašienė A., Janušas V. Different flow regimes and test facility constructions impact on a stable low air velocity value reproduction. *Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference "Recent Advances in Fluid Mechanics and Aerodynamics (FMA' 09)", August 20–22, 2009, Moscow, Russia*. P. 163–169.
22. Briliūtė I., Bončkus A., Zygmantas G. Influence of installation effects on the performance of residential water-meters. *The 7th International Conference: selected papers: May 22–23, 2008, Vilnius, Lithuania, Vol. 2*. Vilnius: Technika. P. 785–792.
23. Maslauskas E., Zygmantas G. Įrengimo sąlygų įtaka srauto matuoklių metrologinėms charakteristikoms. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Pastatų inžinerinės sistemos*. 2009. T. 1. Nr. 1. P. 49–51.
24. Zygmantas G., Briliūtė I. Performance of the residential water meters under different conditions of installation. *Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa*. 2009. No. 162. P. 283–287.
25. Vilkinis P., Pedišius N., Valantinavičius M. Vandens tekėjimo mikrokanale tyrimas dalelių vizualizacijos metodu. *Energetika*. 2015. T. 61. Nr. 2. P. 57–70.
26. Vilkinis P., Valantinavičius M., Pedišius N. Investigation of fluid flow structure in open type cavity under stationary and pulsatile flow conditions. *Energetika*. 2016. T. 62. Nr. 1–2. P. 37–44.
27. EURAMET project No. 1296. Inter-laboratory calibration comparison of the rotary piston gas meter G650. Final Report – Draft B. Coordinating Institute: T. Valenta, CMI, Czech Republic. December, 2015. P. 75.
28. EURAMET project No. 1333. Comparison of standards for low-pressure gas flow. Report – Draft A. Pilot institute: P. Lucas, G. Blom, VSL, The Netherlands. April, 2016. P. 32.
29. EURAMET project No. 1233. Intercomparison of water meter reference standard. Report – Draft A. Coordinating Institute: B. Ak-selli, TUBITAK UME, Turkey. February, 2013. P. 22.
30. EURAMET project No. 1225. Intercomparison of very low air speed standard facilities (0.05–1.0) m/s. Final Report – Draft B. Coordinating Institute: D. Pachinger, BEV/E+E, Austria. June, 2016. P. 21.

**Antanas Pedišius, Jurij Tonkonogij,
Nerijus Pedišius, Gediminas Zygmantas,
Arūnas Stankevičius, Andrius Tonkonogovas,
Agnė Bertašienė, Eugenijus Maslauskas,
Paulius Vilkinis**

**STUDY OF GAS AND LIQUID FLOW
DYNAMICS IN CHANNELS TOWARDS
INCREASE OF VOLUME, FLOWRATE AND
SPEED MEASUREMENT ACCURACY**

Summary

The article presents an overview of the main scientific research and development works, performed in the Laboratory of Heat Equipment Research and Resting during the period from 2006 to 2016. Scientific research of gas and liquid dynamics was essentially directed to dependence of accuracy of tachometric gas and liquid volume, flowrate and air velocity meter measurement on flow pulsation and fluid kinematic viscosity, as well as flow regime changes. The patterns of the universal meter dynamic error were estimated during various disturbances and used while assessing flow measurement uncertainty. These patterns were

also used, according to the rulings of the Government of the Republic of Lithuania, while implementing and improving four state air (gas) rate and air (gas), water and oil product volume and flowrate standards. The measurement and calibration capabilities of standards were supported by international comparisons, validated, universally recognized and published on the BIPM website.

A developed technical basis of research and testing, as well as the services provided to the economic and scientific subjects make up an important input into the proper functioning of measurement infrastructure in Lithuania as well as assure the conformity assessment of measurement instruments used in practice and manufactured or supplied in the market.

Initial results and applications of perspective research on the flow dynamics in a microchannel with structured surfaces, while using the particle image velocimetry method, are presented.

Keywords: flowrate, volume and flowrate measurement, tachometric meters, pulsatile flow, variable gas and liquid viscosity, dynamic error, flow standards