

Gamtinių dujų srautų matavimų tyrimai ir jų praktinis taikymas

Antanas Pedišius,

Jurijus Tonkonogij,

Arūnas Stankevičius

*Lietuvos energetikos institutas,
Šiluminių įrengimų tyrimo ir
bandymo laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,
el. paštas jurij@mail.lei.lt*

Pateikti dujų tūrio ir debito vienetų atkūrimo bei gamtinių dujų apskaitos srityse tyrimų rezultatai. Ištirta skysčio plėvelės, besiformuojančios ant etaloninio įrenginio varpo paviršių, dinamika. Išanalizuota plėvelės storio pokyčio įtaka oro tūrio matavimo neapibrėžčiai. Išnagrinėti dujų kiekio tikslumą sąlygojantys veiksniai – pereinamieji procesai turbininiuose skaitikliuose bei su jais susijusios dinaminės paklaidos, rezonansiniai reiškiniai rotaciniuose skaitikliuose, taip pat dujų slėgio poveikis matavimo paklaidoms. Atlikti gamtinių dujų tiekimo ir vartojimo balanso tyrimai, kurie leido prognozuoti ir normuoti neregistruojamą dujų kiekį.

Raktažodžiai: varpo tipo etaloninis įrenginys, turbininiai bei rotaciniai dujų skaitikliai, pereinamieji procesai, rezonansiniai reiškiniai, dujų slėgio poveikis skaitiklių paklaidoms, gamtinių dujų tiekimo ir vartojimo balansas

1. ĮVADAS

Per pastaruosius 15 metų Lietuvos ekonomika ir jos bazinė grandis – energetika patyrė esminius kokybinius ir kiekybinius pokyčius. Energetikoje vis labiau ryškėja stiprėjanti jos priklausomybė nuo veiksnių, susijusių su kuro tiekimo nestabilumais ir nuolat didėjančiomis jo kainomis. Todėl kartu didėja reikalavimai tiekiamo ir vartojamo kuro kiekio matavimo tikslumo didinimui ir matavimo sistemų tobulinimui.

Šiame straipsnyje apsiribojama gamtinių dujų (toliau – dujos), kurių vartojimas šiuo laikotarpiu dėl daugelio pranašumų smarkiai plečiasi, matavimo aspektų ir esamos padėties Lietuvoje nagrinėjimu.

Ryšium su Lietuvos ekonomikos persitvarkymu veikti rinkos sąlygomis dujų vartojimas nukrito nuo 6 mlrd. m³ 1993 m. iki 2,5 mlrd. m³ 2001 m. ir po to pradėjo laipsniškai augti iki 3 mlrd. m³ 2005 m. Tuo pačiu metu apskaitai naudojamų matavimo priemonių (toliau – MP) skaičius kito dar didesniais tempais. Tai ypač buvo juntama buitiniame ir dalinai komunaliniame sektoriuose, kur jų kiekis išaugo nuo palyginti labai nedidelio kiekio iki 550 000 vnt. 2000 m. ir dabar jau sudaro apie 650 000 vnt. Pramonės ir energetikos sektoriuje vartojamos dujos visuomet buvo apskaitomos, bet vyravo senos kartos MP, tarp kurių buvo daug matavimo sistemų su skirtuminio slėgio įtaisais – diafragmomis. Diafragmos nebuvo deramai aprūpintos reikiama tikslumo skirtuminio slėgio matuokliais ir, o tai ne mažiau svarbu, dujų tūrio perskaičiavimo įtaisais – kompiuteriais–korektoriais, kurie galėtų tiksliai registruoti dujų parametrų kitimus, perskaičiuoti dujų vartojimą norminėmis sąlygomis ir kaupti šiuos duomenis atsiskaitymams.

Taigi iškilo daugelis uždavinių:

- pakeisti seno tipo matuoklius naujais;
- įrengti matavimo sistemas ar paprasčiausius skaitiklius ten, kur apskaita nebuvo vykdoma;
- suformuoti metrologinio aprūpinimo infrastruktūrą, kurios bazine grandimi būtų dujų tūrio ir debito (srauto) etalonai, kuriais būtų galima atkurti pamatines tūrio ir debito vertes ir garantuoti jų sietį su kitų Europos šalių metrologinių institucijų atkuriamomis vertėmis;
- užtikrinti patikimą atkurtų ir patvirtintos sieties verčių perdavimą darbiniais etalonams ir darbiniais matuokliams;
- organizuoti tyrimų bazę hidrodinaminių ir šiluminių veiksnių įtakos tyrimams;
- ištirti Lietuvos dujų tiekimo ir vartojimo balansą siekiant nustatyti svarbiausius veiksnius, kurie lemia balanso nuokrypius;
- laiku reaguoti į vis didėjančius poreikius kuo tiksliau matuoti kintančios sudėties ir parametrų dujas.

Kaip matyti, tai nėra vien paprasti ūkiniai ir techniniai uždaviniai, bet šių uždavinių turinys gerokai glaudžiai siejasi su moksliniais tyrimais ir eksperimentine plėtra, nukreipta sudėtingų etaloninių aerodinaminių įrenginių konstravimui ir jų veikimo tikslumo ir patikimumo užtikrinimui.

Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad iki šiol moksliniuose tyrimuose bei praktiniuose dujų tūrio ir debito MP bandymuose ir kalibravimuose darbine terpe buvo naudojamas oras. Šiuo metu siekiant didinti matavimo tikslumą, ypač matuojant dujų srautus magistraliniuose dujotiekiuose ar stambių dujų vartotojų matavimo sistemose, pereinama prie realių dujų naudojimo, esant

realiems dujų parametrams eksperimentiniuose ir bandymų bei kalibravimo įrenginiuose. Pastarieji klausimai ir išskylančios problemos taip pat aptariamos toliau šiame straipsnyje.

2. PAMATINIŲ DUJŲ TŪRIO IR DEBITO VERČIŲ ATKŪRIMAS

2.1. Tyrimų ir taikomųjų darbų raida

Ligšiolinę mokslinių ir taikomųjų darbų nagrinėjamoje srityje raidą lėmė keletas vyriausybinių ir mokslinių institucijų inicijuotų programų, iš dalies remiamų Lietuvos mokslo ir studijų fondo, bei ministerijų užsakomųjų darbų [1–4] keliami uždaviniai. Todėl Lietuvos energetikos institute Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje buvo sukurti etaloniniai aerodinaminiai įrenginiai, skirti pamatinėms dujų tūrio ir debito vertėms atkurti. Labai pažangūs ir ekonomiškai pateisinami šių darbų ypatumai buvo:

- realių Lietuvos dujų tiekimo ir vartojimo infrastruktūros poreikių įvertinimas;
- esamos techninės bazės ir personalo kvalifikacijos uždaviniams spręsti pritaikymas;
- ekonomiškai pagrįstas skiriamų ribotų finansinių lėšų panaudojimas.

Paskutinis veiksnys buvo beveik vienas svarbiausių ir lėmusių etalonų kūrimo strategiją, kurioje buvo tinkamai suderinti tarpusavyje esama srautų hidrodinaminių charakteristikų tyrimo patirtis, atliktų eksperimentinių ir teorinių poveikiųjų veiksnių tyrimų rezultatai ir konkretūs etaloninių aerodinaminių įrenginių konstravimo darbai.

Todėl dujų vertėms atkurti buvo pasirinkti keli metodai, atsižvelgus į realizuojamo debito intervalą ir, užbaigus pirmąjį darbų etapą, turime patvirtintą [5] valstybės etaloną, kurio metrologinės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Valstybės etalono metrologinės charakteristikos

Taikomas metodas	Debito ribos m ³ /h	Geriausia matavimo galimybė ±%
Tiesioginis tūrio matavimas varpo tipo įrenginyje	0,016 ¹ –16	0,13
Netiesioginis naudojant kritines tūtas	5,7–308	0,17
Netiesioginis naudojant pamatinius skaitiklius	308–1600 1600–6000 ²	0,25 0,30

Visuose įrenginiuose, kurių išsamūs aprašymai ir įteisinimui skirtų tyrimų rezultatai pateikti [6–9], darbine terpe naudojamas oras, kurio slėgis artimas atmosferos slėgiui, temperatūra $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Šios valstybės etalono charakteristikos buvo teigiamai įvertintos EUROMET organizacijos, patvirtintos Tarptautinio svorių ir matų biu-

ro vadovybės ir 2004 m. paskelbtos interneto svetainėje http://ksdb.bipm.org/appendixC/country_list.

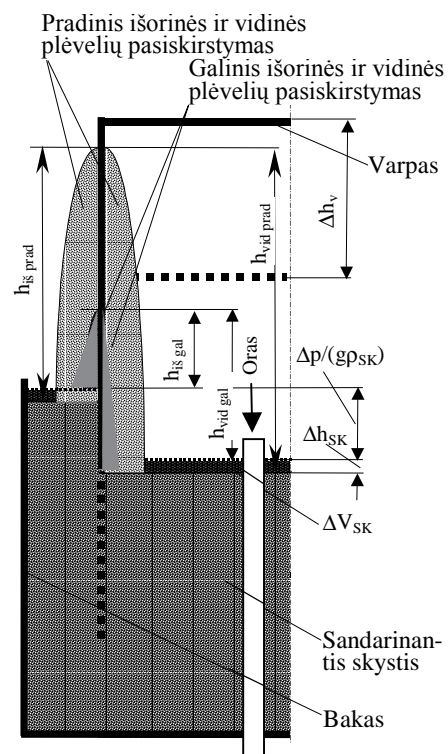
Tačiau tęsiant etalono tyrimus ir tobulinimus bei eksperimentinės plėtos darbus jau dabar varpo tipo įrenginio apatinė¹ matavimo riba sumažinta iki 0,005 m³/h, o įrenginio su pamatiniais skaitikliais viršutinė² matavimo riba padidinta iki 9700 m³/h esant tai pačiai geriausiai matavimo galimybei. Kaip rodo sukaupta patirtis, tokios etalono debito verčių ribos tenkina svarbiausius Lietuvos ūkio poreikius, bet tikslumo požiūriu dar atsilieka nuo Europos šalių vidurkio. Tai trukdo atlikti pilnaverčius tarptautinius lyginimus, patikimai garantuoti tarptautinę matavimo sietį ir negali tenkinti mokslinių tyrimų poreikių. Todėl greta techninių darbų, susijusių su kritinių tūtų įrenginio iki 1600 m³/h konstravimu, būtina tęsti jau pradėtus tyrimus reiškinį, lemiančių matavimo tikslumus varpo tipo etaloniniame įrenginyje ir įrenginiuose su pamatiniais turbininiais ir rotaciniais skaitikliais.

2.2. Tūrio ir debito verčių atkūrimo tyrimai

Svarbesnių tyrimų pareikalauja etaloninių dujų tūrio verčių atkūrimas taikant tiesioginius matavimo metodus, nes šiais metodais pasiekiamos mažiausios matavimo rezultatų neapibrėžtis. Tačiau turint tikslią pasiekti dujų tūrio matavimo neapibrėžtį, mažesnę nei $\pm 0,1\%$, būtina atlikti detalius poveikiųjų veiksnių įvertinimus [10].

Labai svarbus veiksnys, kuriam pastaruoju metu buvo skiriama daugiausia dėmesio, – skysčio plėvelės, besiformuojančios ant etalono įrenginio tūrio etalono paviršiu, dinamika.

1 paveiksle schematiškai parodytas etalono įrenginio pjūvis.



1 pav. Skysčio plėvelių ant varpo paviršiaus kitimo schema

Po iškeltu iš bako su sandarinančiu skysčiu varpu esantis oras, varpui besileidžiant žemyn, išstumia tam tikrą kiekį oro, kurio tūris apskaičiuojamas pagal jo poslinkį ir varpo geometrinius matmenis. Tačiau keliant varpą iš skysčio ant jo paviršių susiformuoja skysčio plėvelė, kurios storis visą laiką kinta. Kadangi skystis nuteka nuo paviršių atgal į baką, plėvelės įtaka pasireiškia dvejopai – plėvelė ant vidinio paviršiaus mažina varpo tūrį, bet nutekėdama atgal į baką nuo išorinio ir vidinio paviršių kelia jame skysčio lygį, kuris didina išstumto oro tūrį varpui besileidžiant žemyn. Tokiu būdu plėvelės storis, jeigu jo nevertinti kaip pataisos, didina matuojamo oro tūrio suminę neapibrėžtį. Papildomas išplėstinės oro tūrio neapibrėžties sandas $U(V)_{pl}$ dėl plėvelių nustatomas suvedus trijų tūrių balansą:

$$U(V)_{pl} = \Delta V_{sk} - (\Delta V_1 + \Delta V_2); \quad (1)$$

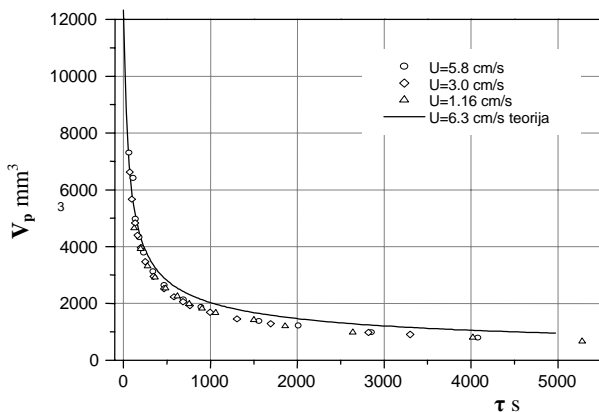
čia ΔV_{sk} – sandarinančiojo skysčio po varpą tūrio pokytis; ΔV_1 – plėvelės ant vidinio varpo paviršiaus dalies, kuri panardinama kartu su varpu, tūris; ΔV_2 – napanardinamos plėvelės dalies ant vidinio varpo paviršiaus tūrio sumažėjimas dėl plėvelės nutekėjimo.

Nustatant integralinius plėvelės tūrius bet kuriuo laiko momentu, buvo naudojami eksperimentinių plėvelės storio matavimo ir teorinio modeliavimo rezultatai. Teorinis modeliavimas buvo pagrįstas Navje–Stokso lygčių sprendimu taikant plonai plėvelei tepimo teorijos artinius.

Kaip matyti 2 paveiksle, eksperimentiniai rezultatai patvirtina teorinius skaičiavimus ir rodo, kad plėvelės tūris gali ženkliai veikti tūrio matavimą, jeigu jos storis nėra vertinamas arba varpą iškėlus matavimas pradedamas, nesulaukus, kol skystis nutekės nuo varpo paviršių.

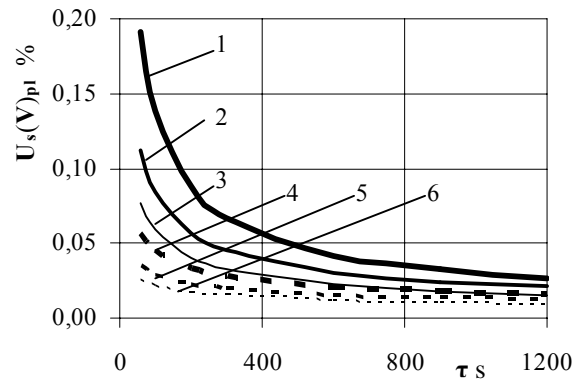
Skaičiavimai leido išanalizuoti plėvelės storio pokyčius priklausomai nuo skysčio savybių, varpo iškėlimo greičio ir aukščio bei laiko, reikiamo plėvelei suplonėti iki tam tikro storio, ir jų įtaką oro tūrio matavimo neapibrėžčiai.

Apibendrinti neapibrėžties $U(V)_{pl}$ ((1) lygtis) skaičiavimo rezultatai varpui, kurio skersmuo 0,63 m ir vi-



2 pav. Išmatuoto ir apskaičiuoto plėvelės tūrio priklausomybė nuo laiko, prabėgusio skirtingais greičiais (U) varpą iškėlus iš sandarinančiojo skysčio bako

sas poslinkis 1 m, priklausomai nuo išstumto oro tūrio ir varpo išlaikymo laiko viršuje prieš pradėdant matavimus, kai išstumiamo oro debitas 1 m³/h ir naudojamos 2 skysčio rūšys, pateikti 3 paveiksle.



3 pav. Išplėstinės oro tūrio neapibrėžties priklausomybė nuo varpo išlaikymo jį iškėlus laiko ir išstumiamo oro tūrio: 1, 2 ir 3 – skystis DC, tūris 0,1; 0,2; 0,3 m³; 4, 5, 6 – skystis TA/US, tūris 0,1; 0,2; 0,3 m³

Neapibrėžtis $U(V)_{pl}$ visada teigiama ir didėja, didinant skysčio klampą, mažinant varpo jį pakėlus išlaikymo laiką ir mažinant išstumto oro tūrį. Esant nepalankioms sąlygoms ji siekia 0,2%, palankiausiomis sąlygomis neapibrėžtis mažėja iki (0,01–0,02)%. Tai rodo, kad siekiant atkurti oro tūrio neapibrėžtį su maža neapibrėžtimi būtina išlaukti bent 20 min. iki skysčio plėvelės storis suplonės ir mažai keisis. Tuomet galima įvesti pataisą dėl plėvelės storio likučio, o tai dar labiau mažins oro tūrio vertės atkūrimo neapibrėžtį.

3. DUJŲ KIEKIO MATAVIMO TIKSLUMĄ SĄLYGOJANTYS VEIKSNIAI

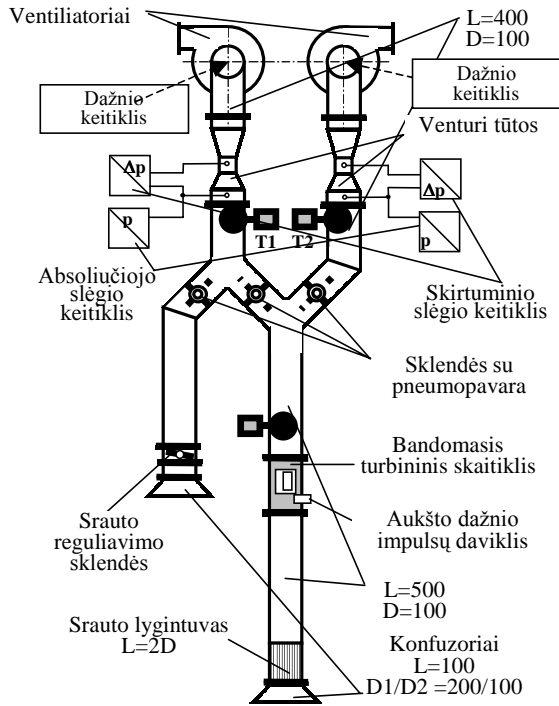
Pagrindiniai poveikiai, kurie pasireiškia etaloniniuose įrenginiuose atkuriant tūrio ir debito vertes ir jas perduodant nenutrūkstama sieties seka darbiniais matuokliams, dar stipriau išryškėja matuojant realius dujų srautus magistraliniuose ir skirstomuosiuose dujotiekiuose. Šie poveikiai yra:

- turbininiuose skaitikliuose pasireiškiančios trinties ir inercijos jėgos;
- rezonansiniai reiškiniai, susiję su slėgio pulsacijomis, kurias sukelia rotacinis skaitiklis, išstumdamas porcijomis pertekančias per jį dujas;
- dujų tankio ir klampos priklausomybė nuo dujų slėgio ir temperatūros.

3.1. Pereinamieji procesai turbininiuose skaitikliuose
Turbiniais skaitikliais matuojama iki 70% suvartojamo dujų kiekio. Dėl įvairių priežasčių dujų debitas dujotiekiuose visuomet kinta arba pulsuoja. Turbininio skaitiklio atsakas vėluoja dėl jo darbo rato inertiškumo. Debitui padidėjus skaitiklio rodmenys daug greičiau priartėja prie realios debito vertės, nei debitui sumažėjus.

Todėl pulsuojančiame dujų sraute turbininis dujų skaitiklis visuomet pradeda registruoti didesnius pertekančių per skaitiklį dujų kiekius ir tokiu būdu atsiranda teigiama skaitiklio paklaida.

Eksperimentiniai šio reiškinio tyrimai atliekami įrenginyje (4 pav.), kuriame modeliuojami staigūs dujų debito sumažėjimai nuo tam tikros pastovios pradinės vertės iki eilės mažesnių debito verčių ir atvirkščiai – debito padidėjimas nuo eilės verčių iki pradinės vertės.



4 pav. Eksperimentinio įrenginio turbininio skaitiklio inertiškumui tirti schema

Tyrimai [11, 12] parodė, kad pereinamieji procesai didinant debitą vyksta visa eile greičiau nei jį mažinant, nes abiem atvejais skaitiklio darbo rato inercijos momentas išlieka pastovus, bet sukimo jėgų momentas pirmuoju atveju yra daug didesnis.

Pereinamiesiems procesams aprašyti, esant pastoviams dujų parametrams, buvo panaudoti 3 būdingi nedimensiniai parametrai:

$$\Omega \equiv (\omega - \omega_2) / (\omega_1 - \omega_2), \quad (1)$$

$$Fo_t \equiv \tau (M_1/J)^{0,5}, \quad (2)$$

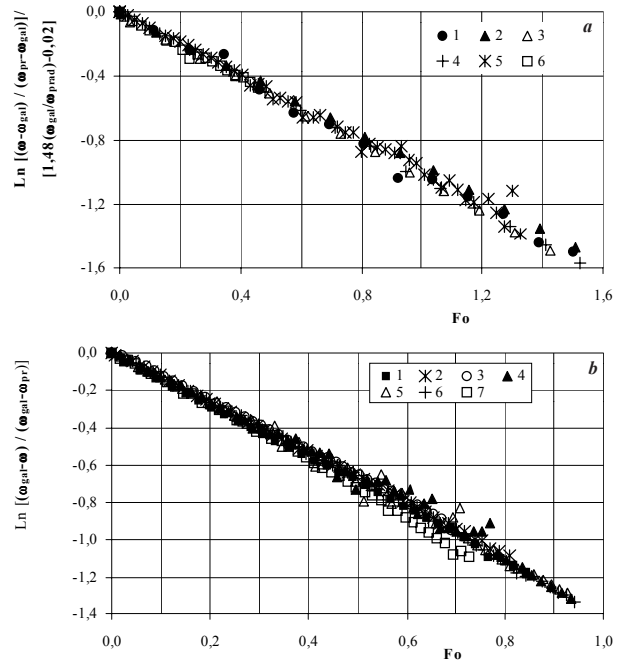
$$\Omega_{2/1} \equiv \omega_2 / \omega_1; \quad (3)$$

čia ω – skaitiklio darbo rato sukimosi dažnis; M – sukimo jėgų momentas; J – darbo rato inercijos jėgų momentas; τ – pereinamojo proceso laikas; indeksai 1 ir 2 žymi atitinkamai proceso pradžią ir pabaigą.

Šie parametrai, kurių pirmieji 2 yra kompleksai, buvo gauti taikant dimensijų analizės principus [13]. Tokiu būdu nedimensinis kompleksas Fo_t yra nedimensinio Furje kriterijaus, plačiai naudojamo sprendžiant ne-

stacionarius šilumos laidumo uždavinius, analogas. Jį galima vadinti nestacionarių sukimosi procesų Furje kriterijumi arba nedimensiniu šių procesų laiku. Komplexas Ω išreiškia nedimensinį santykinį sukimosi dažnį ir yra nedimensinės santykinės temperatūros šiluminiuose procesuose analogas.

Apibendrinus tokiu būdu eksperimentinius rezultatus, nustatytos konkrečios nedimensinio santykinio sukimosi dažnio priklausomybės nuo nedimensinio komplekso Fo_t ir santykio $\Omega_{2/1}$ (5 pav.).



5 pav. Apibendrintos sukimosi dažnio priklausomybės nuo pereinamojo proceso laiko staigiai mažinant debitą (a) nuo 400 m³/h atitinkamai iki 1–6 – 50, 100, 150, 200, 250 ir 300 m³/h ir didinant debitą (b) iki 400 m³/h atitinkamai nuo 1–7 – 0, 25, 50, 100, 150, 200 ir 300 m³/h

Matyti, kad analogija su nestacionaraus šilumos laidumo uždaviniais pasitvirtina. Vis dėlto didinant debitą santykio $\Omega_{2/1}$ įtaka beveik nepasireiškia, kai priešingu atveju jo įtaka tampa aiškiai matoma.

Nustatytos priklausomybės buvo toliau naudojamos skaitiklio tūrio matavimo paklaidoms, susijusioms su debito kitimu ir jo pulsacijomis, įvertinti. Ši paklaida buvo apskaičiuojama taikant baigtinių skirtumų metodą pagal formulę:

$$\delta = (Q_{sk}^* - Q_{vid}) / Q_{vid}; \quad (4)$$

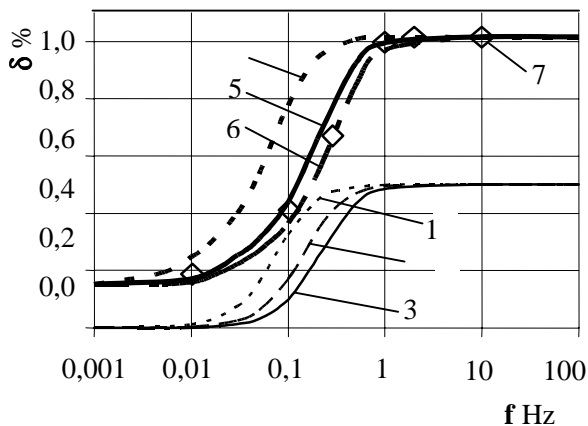
čia Q_{vid} – faktinis vidutinis debitas laiko intervale $\Delta\tau_o$, kuris lygus skaitiklio debito svyravimo periodui, apskaičiuojamas kaip $\Sigma Q_i/n$; Q_{sk}^* – vidutinis debitas pagal skaitiklio rodmenis $\Sigma Q_{ski}/n$.

Apskaičiuojant buvo siekiama nustatyti skaitiklio sukimosi dažnio kitimo dėsninę laiko intervale $\Delta\tau_o$. Tuo tikslu šis debito svyravimo periodas buvo suskirstomas į pakankamai didelį kiekį laiko tarpinių, kurių

kiekviename galinė dažnio vertė buvo apskaičiuojama pagal pradinę dažnio vertę panaudojant eksperimentiškai nustatytas ir 5 paveiksle pateiktas priklausomybes. Sukimosi dažnis, atitinkantis faktinį debitą pasirinktame laiko tarpsnyje, buvo apskaičiuojamas kaip debito, apskaičiuoto pagal pasirinktą jo kitimo dėsnį $Q_i = f(\tau)$, ir skaitiklio išėjimo impulso vertės sandauga. Faktinis debitas pagal skaitiklio rodmenis Q_{ski} buvo apskaičiuojamas kaip dažnio ir skaitiklio išėjimo impulso vertės santykis. Nedimensinio komplekso Fo_1 ir santykio $\Omega_{2/1}$ vertės buvo apskaičiuojamos pagal (2) ir (3) priklausomybes, taikomas atitinkamiems laiko tarpams.

Buvo nagrinėjami bent 3 debito kitimo dėsniai: kosinusas, stačiakampis ir trikampis keičiant dažnį nuo 0,001 iki 100 Hz, santykinę amplitudę $\Delta Q = (Q_{max} - Q_{min}) / 2Q_{vid}$ nuo 1 iki 10%. Taip pat buvo bandoma įvertinti skaitiklio guolių būklę, keičiant pateiktų priklausomybių atitinkamus narius.

6 paveiksle parodyti apibendrinti skaitiklio paklaidų, susijusių su debito svyravimais, dėsniniai, kai santykinė amplitudė sudarė 10%. Kitoms amplitudės vėrtėms rezultatai analogiški. Esant dažniams iki 0,01 Hz šios paklaidos artimos nuliui. Didinant dažnį, paklaidos didėja iki tam tikros ribinės vertės, kuri priklauso nuo debito svyravimo amplitudės ir jo dėsnio. Dažnis, kuriam esant pasiekama ribinė paklaidos vertė, artimas 1 Hz ir kiek tai didėja kintant debito svyravimo nuo stačiakampio link kosinusinio ir trikampiio dėsningu.



6 pav. Skaitiklio paklaidos priklausomybė nuo debito svyravimo dažnio esant dažnio amplitudei 10% ir kosinuso bei stačiakampiam dėsningumui: 1, 2, 3 – atitinkamai inertiškumo rodiklis 0,4, 0,95 ir 1,4 s^{-1} ; 4, 5 ir 6 – 0,4, 1,4 ir 2 s^{-1} ; 7 – rezultatai stačiakampiam dėsningumui [14]

Pateikti duomenys rodo, kad paklaidos gali smarkiai priklausyti nuo debito svyravimo, kurį gali sukelti srauto atitrūkimai ir nekokybiški ar blogai sureguliuoti slėgio regulatoriai. Su šia problema susiduriama ir etaloniuose aerodinaminuose įrenginiuose, kuriuose debito svyravimo šaltiniu gali būti oro slėgiklių sukeltos pulsacijos, srauto atitrūkimai ir nuosekliai jungiami kalibravimui skirtingo tipo skaitikliai, pvz., turbininis ir rotacinis ar sūkurinis skaitikliai.

3.2. Rezonansiniai reiškiniai rotaciniuose skaitikliuose
Rotaciniai kameriniai dujų skaitikliai dažniausiai naudojami gamtinių dujų apskaitai, kai dujų debitai yra viduriniai ir siekia iki 250 m^3/h . Lietuvoje šiais skaitikliais matuojama iki 10% viso dujų vartojimo ir šis skaičius turi tendenciją didėti. Kai kuriais atvejais jie naudojami kaip darbiniai etalonai vykdant darbinių skaitiklių periodines priežiūras ir patikras.

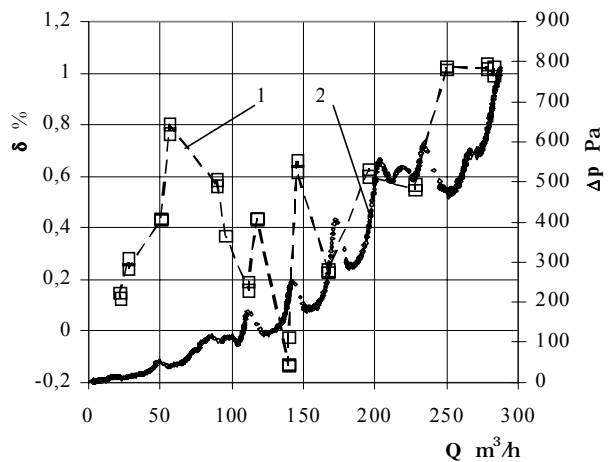
Veikiant rotaciniam skaitikliui, dėl jo konstrukcijos ypatumų atsiranda srauto bei slėgio pulsacijų, kurių dažnis proporcingas debitui arba rotoriaus apskams. Tai lemia, kad slėgio pulsacijų ir pulsacijų nuosavo dujų tūrio kameroje bei stovinčių bangų, susidarančių dėl slėgio bangų atspindžio, vykstanti superpozicija sukelia rezonanso smailių amplitudinėje dažnio charakteristikoje Δp atsiradimą.

Žinoma, kad skaitiklių paklaidų kreivės pobūdis gali periodiškai smarkiai kisti dėl rezonansinių reiškinų, tačiau nėra jokių kiekybinių jų poveikio, kuris gali priklausyti nuo instaliavimo sąlygų ir veikimo režimo, vertinimų ir pasiūlymų šiam poveikiui pašalinti.

Tyrimai [15] parodė, kad rezonansinių reiškinų atsiradimą palydi skirtuminio slėgio skaitiklyje padidėjimas, kuris sukelia dujų pertekėjimus pro tarpus tarp skaitiklio rotorių ir korpuso bei padidintą neigiamą skaitiklio paklaidą.

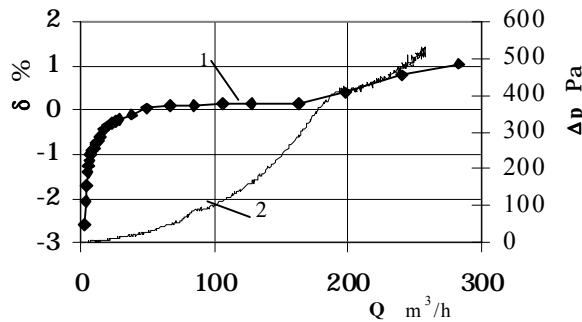
Nustatyta, kad amplitudinė dažninė Δp charakteristika smarkiai priklauso nuo skaitiklio konstrukcijos ir prie skaitiklio prijungtų vamzdžių geometrinių charakteristikų. Todėl jos gali smarkiai veikti skaitiklio paklaidas. 7 paveiksle parodyta slėgio charakteristikos ir skaitiklio paklaidos koreliacija, pasireišianti tuo, kad didėjant slėgiui paklaida taip pat didėja link neigiamų jos vėrcių.

Ryški rezonansinio reiškinio priklausomybė nuo skaitiklio įrengimo geometrijos trukdo nustatyti apibendrintus skaitiklio paklaidų dėsninumus. Esant tokiai sudėtingai situacijai, tikslingiausia naudoti technines priemones, kurios pašalina rezonansinius reiškinus. 8 paveiksle parodyta rotacinio skaitiklio skirtuminio slėgio ir paklaidos kitimas, kai prieš skaitiklį ir po jo yra



7 pav. Paklaidų ir skirtuminio slėgio kreivių palyginimas, kai skaitiklio įtekejime – lanksti jungtis DN80, L = 8 m: 1 – paklaida; 2 – skirtuminis slėgis

įrengti BURGESS MANNING PFO-3|C-8 tipo akustiniai filtrai [16]. Matyti, kad skaitiklio paklaidų ir skirtuminio slėgio kitimai yra švelnūs ir atitinka žinomus dėsningumus.



8 pav. Paklaidų ir skirtuminio slėgio kreivių palyginimas, kai skaitiklio įtekėjime ir ištekėjime įrengti akustiniai filtrai: 1 – paklaida; 2 – skirtuminis slėgis

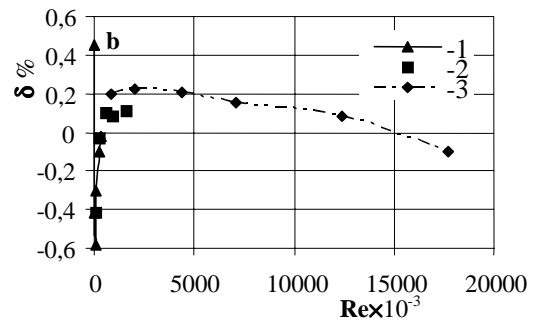
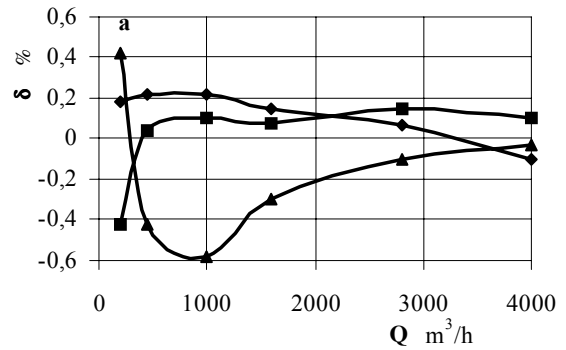
Tai rodo, kad etaloniniuose įrenginiuose akustiniai filtrai padeda sumažinti arba visiškai pašalina rezonansinius reiškinius ir rotaciniai skaitikliai gali būti naudojami etalonais. Akustinio filtro savybėmis pasižymi ir paprasti tėkmės lygintuvai, sudaryti iš vamzdelių pluošto. Todėl tikslinga ir rotacinius skaitiklius, kurie įrengiami dujotiekių vamzdynuose dujų apskaitai, aprūpinti tėkmės lygintuvais.

3.3. Dujų slėgio poveikis matavimo paklaidoms

Dujų slėgio poveikis matavimo paklaidoms yra susietas su dujų tankio ir klampos priklausomybe nuo dujų slėgio, kuris dujotiekiuose gali siekti iki 6 MPa. Paprastai skaitikliai įrengiami aukšto ar žemo slėgio dujotiekiuose ir juose esamas slėgio svyravimas ir jo sukelti tankio pokyčiai nėra svarbiausia problema. Svarbiausia yra tai, kad skaitiklių kalibravimas paprastai vykdomas įrenginiuose, kuriuose cirkuliuoja oras esant slėgiui, artimam atmosferos slėgiui. Tai reiškia, kad skaitiklis, kalibruotas tokiais sąlygomis ir po to įrengtas matuoti dujų vartojimą dujotiekyje, patenka į sąlygas, kuriose Reynoldso skaičius ($Re = \rho u D/\mu$; čia ρ – tankis, u – greitis, D – vamzdžio skersmuo, μ – dujų dinaminė klampa), sąlygojantis tekėjimo pobūdį, pakinta proporcingai dujų tankio padidėjimui. Taip pat papildomai veikia kiti silpnesni poveikiai, susieti su dujų spūdimu priklausomybe nuo jų sudėties.

Nesant galimybei eksperimentiškai iširti šių veiksnių poveikį dujų tūrio matavimo tikslumui, buvo apsiribota kituose tyrimo centruose atliktų tyrimų rezultatu analize. 9 paveiksle parodytas vieno tyrimo rezultatas, iš kurio matyti esminiai turbininio skaitiklio paklaidų pokyčiai, kai jis kalibruojamas esant darbiniam slėgiams ir realioms dujoms. Šis rezultatas taip pat patvirtina, kad lemiamu parametru tampa Reynoldso skaičius, kuris leidžia apibendrinti rezultatus.

Tačiau šis poveikis yra gana sudėtingas ir dėl turbininių skaitiklių, kurie geriau iširti ir naudojami esant dideliems slėgiams, galima daryti tokias išvadas:



9 pav. Slėgio poveikis turbininio dujų skaitiklio G2500 paklaidoms pagal [17]. *a*, *b* – paklaidų priklausomybė nuo debito Q ir Reynoldso skaičiaus Re : 1 – oras, 0,1 MP; 2 ir 3 – gamtinės dujos, 7,8 ir 61 bar

- dujų slėgis smarkiai veikia turbininių dujų skaitiklių paklaidas; keičiant slėgį ribose (1–60) bar, turbininių skaitiklių paklaidos gali kisti iki 3% ir daugiau;
- slėgis keičia ne tik dujų skaitiklio paklaidos vertę, bet ir paklaidų kreivės pobūdį;
- turbininių dujų skaitiklių paklaidų pokyčiai priklauso nuo skaitiklio konstrukcijos, pagaminimo kokybės ir techninės būklės;
- mažesnių skaitiklių paklaidų priklausomybė nuo slėgio yra didesnė, nei didelių skaitiklių;
- didėjant slėgiui ir Reynoldso skaičiui, slėgio poveikis mažėja.

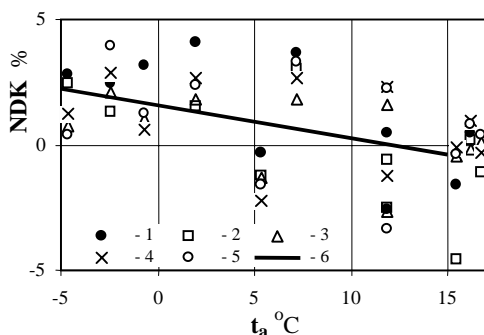
Dalis šių išvadų greičiausiai gali būti taikoma ir kitų tipų skaitikliams, nors nuodugnių tyrimų trūksta.

Kadangi daugelis Europos šalių laipsniškai pradeda atlikti skaitiklių kalibravimus specialiai sukonstruotuose įrenginiuose, kuriuose sukuriama sąlyga, atitinkanti realias skaitiklių veikimo sąlygas, buvo atliktas tyrimas tokių įrenginių konstrukcijų, sudėties, realizuojamų matavimo metodų ir galimybių bei poreikių įrengti aukšto slėgio įrenginį Lietuvoje, kuris aptarnautų ir gretimų šalių gamtinių dujų tiekimo ūkius [18].

4. GAMTINIŲ DUJŲ TIEKIMO–VARTOJIMO BALANSO TYRIMAI

Anksčiau aptartų uždavinių sprendimai daug prisidėjo prie dujų vartojimo apskaitos Lietuvos dujų ūkyje tobulinimo ir tikslinimo. Tiekimo–vartojimo balanso tyrimai

[19, 20] rodė, kad nors apskaitos būklė gerėjo, bet išlikdavo neigiamas balansas, t. y. buvo realizuojama (suvartojama), įskaitant vartojimą savo reikmėms ir natūralius nuostolius, mažiau nei buvo gaunama importuojant. Šie neregistruojami dujų kiekiai (NDK) 2000–2002 m. sudarė vidutiniškai visam dujų ūkiui 1–1,5% nuo gaunamų dujų kiekio. Siekiant tikslinti sudaryta skaičiavimo metodika NDK vertinimams, buvo atlikta visų AB „Lietuvos dujos“ filialų duomenų nuo 1998 iki 2002 metų apie NDK statistinė analizė laikotarpiui nuo 1998 iki 2002 metų [21]. Buvo nustatyta, kad NDK ir aplinkos temperatūrų pokyčiai labai koreliuoja. Aplinkos temperatūrai didėjant, NDK mažėja ir atvirkščiai. Be to, visais atvejais NDK ir temperatūros pikai yra persislinkę vienas kito atžvilgiu, o vasarą gaunamos netgi neigiamos NDK vertės. Pastarųjų faktų tikėtinausia priežastis – dujų apmokėjimo, pagal kurį dalinai vykdoma apskaita, vėlavimas. Todėl nustatant NDK normines vertes NDK pokyčiai buvo siejami su aplinkos temperatūra. Apdorojant nustatyta (10 pav.), kad NDK priklausomybė nuo temperatūros yra tiesinė. Priklausomybės nustatymo neapibrėžtis įvertinta dydžiu $\pm 0,42\%$.



10 pav. Dujų ūkio NDK priklausomybė nuo aplinkos temperatūros: 1, 2, 3, 4, 5 – 1998, 1999, 2000, 2001, 2002 m.; 6 – apksimacinė priklausomybė

Tikslinga toliau vykdyti NDK stebėjimus ir jų analizę, nes tai padeda atskleisti dujų nuostolių ar dujų apskaitos trūkumų priežastis.

4. IŠVADOS

1. Vykdamas LRV nutarimus ir bendradarbiaujant su AB „Lietuvos dujos“ sukurta dujų tiekimo ir paskirstymo ūkio metrologinio aprūpinimo sistemos techniniai ir teoriniai elementai, apimantys valstybės etaloną dujų tūrio ir debito vertėms atkurti, susieta su Europos šalių etalonais, įrenginius dujų apskaitai naudojamų matuoklių kalibravimams ir patikroms atlikti, metodus dujų tiekimo–vartojimo balanso analizei ir metodus bei įrangą moksliniams tyrimams vykdyti.

2. Siekiant sumažinti dujų tūrio atkūrimo neapibrėžtį etaloniniame varpo tipo įrenginyje iki verčių, mažesnių nei $\pm 0,1\%$, eksperimentiškai ir teoriškai ištirta skysto plėvelės ant vertikalios paviršiaus, modeliuojančio

įrenginio tūrio etaloną – varpą, dinamika ir jos įtaka matavimo tikslumui.

3. Pasiūlytas ir realizuotas metodas turbininių skaitiklių matuojamo dujų kiekio paklaidoms, susijusioms su tiekiamų dujų debito svyravimo dėsniniais, tirti. Šių paklaidų vertinimas svarbus ne tik matuojantis praktikoje suvartojamų dujų kiekius, bet ir atkuriant dujų tūrio ir debito vertes etaloniniuose įrenginiuose su pamatiniais turbininiais skaitikliais.

4. Nustatyta rezonansinių reiškinių įtaka matuojant dujų vartojimą rotaciniais skaitikliais ir būdai jai pašalinti.

5. Sukaupiti ir išanalizuoti duomenys apie dujų slėgio įtaką skaitiklių paklaidoms ir metodus bei Europos šalių įrenginių konstrukcijas, skirtas dujų skaitikliams kalibruoti esant darbiniais slėgiams ir realioms dujoms. Pateikti pasiūlymai dėl tokio įrenginio konstravimo sąlygų ir galimybių.

6. Statistiškai apdoroti dujų tiekimo–vartojimo balanso duomenys ir nustatyta keletas veiksnių, turinčių įtaką nebalanso atsiradimui. Nustatyta, kad neregistruojami dujų kiekiai tiesiškai priklauso nuo aplinkos temperatūros, ir pateikti siūlymai skaičiavimo metodikoms patikslinti.

Gauta 2006 07 31
Parengta 2006 09 25

Literatūra

1. Vandens, garų, dujų ir šilumos energijos apskaitos bei kiekio reguliavimo prietaisų ir sistemų kūrimas, gamyba ir įrengimas, jų metrologinio aprūpinimo organizavimas ir vykdymas: LEI mokslinio-taikomojo darbo ataskaita. Kaunas, 1993. 120 p.
2. Lietuvos energetinio ūkio ir fizikinių dydžių, susijusių su materialinių resursų apskaita, MAS dalies sudarymas: LEI mokslinio darbo „Nacionalinė metrologinio aprūpinimo programa. Sistemos išvystymo modelio projektas“, remiamo Lietuvos mokslo ir studijų fondo, ataskaita (Tema 3.1). Kaunas, 1998. 51 p.
3. Atitikties įvertinimo infrastruktūros (bandymo laboratorijų, sertifikacijos įstaigų) plėtros programa; pritarta Lietuvos Respublikos Vyriausybės (toliau – LRV) 2001 m. vasario 21 d. posėdyje (protokolas Nr. 9, 2 punktas).
4. Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2003 m. birželio 9 d. nutarimas Nr. 730 dėl LRV 1997 m. gegužės 27 d. nutarimo Nr. 518 „Dėl valstybės etalonų tvirtinimo, saugojimo ir naudojimo tvarkos bei matavimo vienetų valstybės etalonų ir valstybės laboratorijų, įgaliojamų kurti ir išlaikyti valstybės etalonus, sąrašų patvirtinimo“ pakeitimo // Valstybės žinios. 2003. Nr. 57-2540.
5. Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2002 m. balandžio 5 d. nutarimas Nr. 466 „Dėl matavimo vienetų valstybės etalonų patvirtinimo“ // Valstybės žinios. 2002. Nr. 38.
6. Pedišius A., Tonkonogij J. Etalonų skystųjų (dujų) srautų tūrio/debito ir greičio vertėms atkurti sandara // Matavimai. 1998. Nr. 3(8). P. 17–21.

7. Stankevičius A., Tonkonogij J., Pedišius A. Oro tūrio ir srauto vienetų valstybinis etalonas. Varpo tipo įrenginys // *Matavimai*. 2002. Nr. 3(23). P. 7–12.
8. Pedišius A., Tonkonogij J., Aidukas G. Oro tūrio ir srauto vienetų valstybinio lygmens etalonas. Kritinių tūčių įrenginys // *Matavimai*. 2001. Nr. 3(19). P. 13–17.
9. Tonkonogij J., Pedišius A. Oro tūrio ir srauto vienetų valstybinis etalonas. Pamatinių skaitiklių įrenginys // *Matavimai*. 2005. Nr. 3(35). P. 30–34.
10. Tonkonogij J., Stankevičius A., Pedišius A. Oro tūrio ir srauto vienetų atkūrimo etaloninių varpo tipo įrenginių nepibrėžtys. Analizė ir tobulinimas // *Matavimai*. 2003. Nr. 4(28). P. 7–10.
11. Tonkonogij J. Turbininių dujų skaitiklių pereinamųjų procesų apibendrinta analizė // XXIII tarptautinės konferencijos „Energijos nešėjų komercinė apskaita“ 2006 m. gegužės mėn. 23–25 d. medžiaga. P. 144–148.
12. Tonkonogij J. Turbininių dujų skaitiklių dinaminės paklaidos analizė // XXIII tarptautinės konferencijos „Energijos nešėjų komercinė apskaita“ 2006 m. gegužės mėn. 23–25 d. medžiaga. P. 148–153.
13. Гухман Г., Гухман А., Зайцев А. Обобщенный анализ. Москва: Факториал Пресс, 1998. 304 с.
14. Lehmann N. Dynamisches Verhalten von Turbinenradgaszahlern // *Das Gas und Wasserfach-GWF-131*. 1990. N 4 Gas Erdgas. S. 160–167.
15. Tonkonogij J., Pedišius A., Aidukas G. Resonance phenomena in the rotary gas meters and their influence on the meters' errors // *Industrial Heat Engineering*. 2001. Vol. 23. No. 4–5. P. 171–174.
16. Firmos Burgess-Manning biuletenis 20-1-2 „Dujų pulsacijų slopintuvai“.
17. Baker R. C. Turbine flowmeters: II. Theoretical and experimental published information // *Flow Meas. Instrum.* 1993. Vol. 4. No. 3, P. 123–144.
18. Gamtinių dujų suvartojimo technologinėms reikmėms dujų sistemose skaičiavimo metodikos tobulinimas ir aukšto slėgio įrenginio pramoninių dujų skaitiklių patikrai sukūrimo techninis-ekonominis pagrindimas. LEI mokslinio-taikomojo darbo ataskaita. Kaunas, 2005. 52 p.
19. Tonkonogij J., Pedišius A., Janulionis J. Gamtinių dujų tiekimo ir vartojimo balansas Lietuvos ūkyje // *Energetika*. 2002. Nr. 2. P. 29–35.
20. Tonkonogij J., Pedišius A., Janulionis J. Gamtinių dujų tiekimo bei vartojimo balansas Lietuvos ūkyje ir jo matematinis analizės modelis // *Energetika*. 2002. Nr. 3. P. 17–22.
21. Tonkonogij J., Pedišius A., Janulionis J. Neregistruojamo gamtinių dujų kiekio kitimo tyrimas // *Energetika*. 2005. Nr. 4. P. 42–45.

**Antanas Pedišius, Jurijus Tonkonogij,
Arūnas Stankevičius**

INVESTIGATIONS OF NATURAL GAS FLOW MEASUREMENT AND PRACTICAL USE OF THE RESULTS

Summary

Results of investigations in the field of natural gas volume and flow rate units and accounting are presented. The dynamics of the liquid film on the surface of the bell of a bell-type standard facility is studied. The influence of the film thickness on air volume uncertainty has been analyzed. Transitional processes in turbine meters and the related dynamic errors, resonance effects in rotary meters and gas pressure changes have been investigated as the factors that influence gas metering accuracy. Results of the monitoring and generalisations of of natural gas supply–consumption balance are presented. The results allow to forecast and normalize the unaccounted gas volume.

Key words: bell-type standard facility, turbine and rotary gas meter, transitional processes, resonance effects, influence of gas pressure on meter errors, natural gas supply–consumption balance

**Антанас Пядишюс, Юрий Тонконогий,
Арунас Станкявичюс**

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Резюме

Представлены результаты исследований в области единиц объема и расхода потоков газа и учета природного газа. Изучена динамика жидкой пленки на поверхности колокола эталонной колокольной установки. Проанализировано влияние изменения толщины пленки на неопределенность объема газа. Исследованы переходные процессы в турбинных счетчиках, связанная с ними динамическая погрешность, резонансные явления в ротационных счетчиках и изменение давления газа как факторы, влияющие на точность измерения газа. Исследование баланса поставки и потребления природного газа позволяет прогнозировать и нормировать незарегистрированное количество газа.

Ключевые слова: эталонная колокольная установка, турбинные и ротационные счетчики газа, переходные процессы, резонансные эффекты, влияние давления газа на погрешность счетчиков, баланс поставки и потребления природного газа