

Dujų klamos įtakos turbininiams debito matuokliams tyrimas

Eugenijus Maslauskas,

Antanas Pedišius,

Jurij Tonkonogij

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

Atliktas dujų klamos pokyčių kintant jų slėgiui poveikio turbininiams debito matuokliams tyrimo rezultatų apibendrinimas, palygintos turbininių matuoklių matavimo paklaidos aukšto ($p > 0,6$ MPa) ir žemo (atmosferos) slėgio kalibravimo įrenginiuose. Parodyta, kad pagal turbininių matuoklių paklaidų kitimo pobūdį esant atmosferos slėgiui galima numatyti paklaidų pokyčių dėsningumus, padidėjus slėgiui. Nustatyta, kad esant atmosferos slėgiui ir $Re_D \leq 2 \cdot 10^5$ tirtų matuoklių paklaidų sklaida ribose (+3–1,5) %, padidinus slėgį sumažėja iki $\pm (0,3–0,5)$ %. Esant $Re_D > 10^6$ paklaidos priartėja prie tam tikros asimptotinės vertės. Tyrimo išvados gali būti panaudotos įvertinant dujų turbininių matuoklių kalibravimo aukšto slėgio įrenginiuose tikslingumą.

Raktažodžiai: turbininiai dujų debito matuokliai, matavimo paklaidos, klampa, slėgis

ĮVADAS

Labai svarbią vietą skysčių ir dujų matavimuose užima tachometriniai matuokliai, kurių srauto jutiklis yra besisukantis rotorius su įvairios formos sparnuote arba mentėmis, arba velenais. Turbininiai debito matuokliai – vienas iš tachometrinių matuoklių porūšių. Turbininiuose matuokliuose srauto kinetinė energija ($mv^2/2$) verčiama į rotoriaus (sparnuotės) sukimosi energiją, kuri idealiu atveju yra tiesiogiai proporcinga tūrio debitui. Kameriniuose matuokliuose besisukančios mentės arba velenai suformuoja kameras, iš kurių tam tikro tūrio skysčio arba dujų porcijos periodiškai išstumiamos ir todėl pratekantis tūris yra proporcingas rotoriaus apskukų ir kamerų skaičiui.

Nors šio tipo matuoklių veikimo principai yra skirtingi, jų matavimo paklaidas lemia dauguma panašių veiksnių, dėl kurių jie labai jautrūs klamos pokyčiams, kuriuos dujoms daugiausia lemia slėgis.

Nagrinėjant pasipriešinimo sukimuisi momento dydį, kuris glaudžiai susietas su pratekėjimais per plyšius kame-

riniame matuoklyje, matyti, kad šis momentas proporcingas dinaminei klampai ir atvirkščiai proporcingas plyšio tarp menčių arba velenų ir korpuso aukščiui. Kaip rodo supaprastinto skaitinio modeliavimo analizė [1], toks modelis ne visiškai atitinka realius pratekėjimus. Didelę įtaką gali turėti sudėtinga besisukančioje kameroje esančio skysčio tūrio sąveika su nejudančia korpuso sienele. Ši sąveika gali lemti bendruosius slėgio nuostolius matuoklyje ir taip pat srauto pratekėjimo pro plyšį sąlygas bei pasipriešinimo dėsningumus. Taip pat tekėjimą plyšyje gali veikti srauto pulsacijos, kurios būdingos kameriniams matuokliams, ir išcentrinės jėgos.

Iš dalies turbininiame matuoklyje pratekėjimus lemia besisukančios sparnuotės sąveika su korpuso sienele. Sparnuotės sukima veikia stabdančios jėgos, kurias sukelia mechaninė ir hidrodinaminė trintis. Mechaninė trintis daugiausiai priklauso nuo trinties rotoriaus guoliuose ir nuo rodmenų įtaiso mechanizmo veikimo. Hidrodinaminių jėgų poveikis yra daug sudėtingesnis ir priklauso nuo Re_D skaičiaus, greičio pasiskirstymo prieš rotorių, srauto ati-

trūkimo nuo sparnuotės reiškinių ir sparnuotės stabdymo jėgų, susiformuojančių plyšyje tarp sparnuotės ir korpuso.

Turbininių matuoklių matavimo paklaidų kitimo dėsniumai įvairios klamos skysčiuose ir dujose yra nemažai tyrinėti. Vienas svarbesnių tokio tyrimo rezultatų yra vadinamosios „universalios klamos priklausomybės“ patvirtinimas [2–5]:

$$K = F\left(\frac{f}{v}\right); \quad (1)$$

čia K – koeficientas (dar vadinamas matuoklio faktoriumi), nustatantis srauto jutiklio impulsų skaičių, tenkantį pratekančio fluideo tūrio vienetui; f – impulsų dažnis; v – kinematinė klampa.

Tokia priklausomybė, nors apibendrinančių funkcijų yra pasiūlyta ir daugiau [6, 7], gerai nusako turbininio matuoklio kalibravimo skirtingos klamos skysčiuose rezultatus. Klamos poveikis pasireiškia srityje, kurioje išlieka didelė mechaninės trinties ir trinties dėl skysčio klamos įtaka. Taip pat nustatyta, kad skysčio kinematinė klampai pasiekus $16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir toliau didėjant artėjama prie universalios priklausomybės, kuri reiškia, kad tokį dėsniumą lemia trintis dėl klamos, kuri tampa daug didesnė už mechaninę trintį. Tik sukamajam momentui pasiekus tam tikrą vertę, klamos įtaka išnyksta. Šis reiškinys fizikiniu požiūriu gali būti siejamas su tekėjimo perėjimu į didelių Re_D sritį su šiam tekėjimo režimui būdingais dėsniumais. Reikia taip pat pastebėti, kad yra tam tikri artėjimo prie asimptotinės vertės požymiai, kurie reikštų sukamųjų ir stabdančių jėgų augimo tempų susilyginimą. Taigi analizė rodo, kad yra nemaži pasiekimai, leidžiantys siekti rezultatų apibendrinimų, bet dėl tekėjimo sudėtingumo trūksta duomenų, susietų su tekėjimo struktūros pasikeitimų ir režimų įtakos tyrimais.

Kadangi turbininiai matuokliai plačiai naudojami dideliems suslėgtų gamtinių dujų debitams matuoti, nemažėja išsamesnių mokslinių žinių poreikis apie turbininių matuoklių matavimo paklaidų kitimo dėsniumus kintant dujų slėgiui. Šie matuokliai ilgą laiką buvo kalibruojami esant atmosferos slėgiui, nors matuodavo smarkiai suslėgtas dujas, pratekančias dujotakiais. Dujų tankio didėjimas didinant slėgį labai mažina dujų kinematinę klampą ir perstumia procesą į didelių Re_D sritį. Turbininių matuoklių kalibravimas esant darbinėms sąlygoms pareikalauja sudėtingų ir daug išlaidų reikalaujančių įrenginių, kurių šiuo metu yra mažai ir poveikio dėsniumai nėra pakankamai ištirti. Bandoma taikyti kitas dujas ir pasitelkti Reinoldso analogijos principus [8] siekiant tyrimo rezultatų apibendrinimo ir turbininių matuoklių kalibravimo procedūrų supaprastinimo.

Šio tyrimo pagrindinis tikslas – ištirti didelių pratekančių oro (dujų) srautų matavimų turbininiais matuokliais paklaidas kintant Re_D skaičiui dėl srauto greičio ir kinematinės klamos, kurios pokyčius lemia dujų slėgis.

TYRIMO METODIKA

Įvairių tipų didelio pralaidumo turbininių dujų matuoklių rodmenų pokyčiai matuojant pratekančius debitus ir esant atmosferos slėgiui bei darbiniam slėgiui buvo tiriami ir analizuojami tokia tvarka:

- iš pradžių matavimo paklaidos esant atmosferos slėgiui buvo tiriamos etaloniniame įrenginyje [9] esant oro debitams nuo $100 \text{ m}^3/\text{h}$ iki $9\,700 \text{ m}^3/\text{h}$, matavimo neapibrėžtims $\pm (0,25-0,30) \%$. Pamatinių turbininių matuoklių, įrengtų etaloniniame įrenginyje, tarptautinė metrologinė sietis buvo palaikoma kalibruojant juos PTB (Vokietija) nacionalinėje laboratorijoje su neapibrėžtimis $\pm (0,12-0,15) \%$ esant atmosferos slėgiui bei patvirtinama tarplaboratoriniais matavimų palyginimais [10, 11];

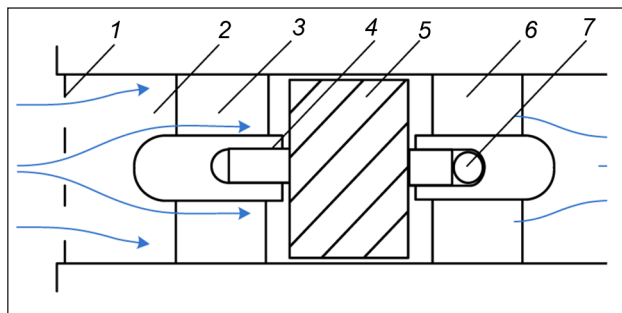
- po to matuokliai buvo kalibruojami laboratorijose (Pigsar arba Karlsruhe, Vokietija; Force, Danija), turinčiose padidinto iki $3,5 \text{ MPa}$ slėgio įrenginius;

- aukšto slėgio įrenginiuose kalibruotas matuoklis buvo gražinamas į laboratoriją ir atliekami 1-oje įtraukoje nurodyti veiksmai.

Principinė tirtų turbininių matuoklių schema pateikta 1 pav., pagrindiniai parametrai – lentelėje.

Kaip matyti iš 1 pav., prieš rotorių esanti priekinė guoliavietė su laikikliais suformuoja žiedinį su išilginėmis pertvaromis kanalą, kurio aukščiai, atsižvelgus į matuoklio dydį, pateikti lentelėje. Tekėjimas šiame žiediniame kanale lemia atitekančio prie rotoriaus srauto greičių pasiskirstymą. Todėl svarbu, kad Re_D , nustatyto pagal įtekėjimo vamzdžio skersmenį (D), reikšmės visais atvejais buvo apytikriai 2 kartus didesnės nei $Re_{D_{\text{dek}}}$, įvertinto pagal žiedinio kanalo ekvivalentinį skersmenį. Bet to, dviem atvejais (lentelės 5 ir 7 punktai) žiedinis kanalas prasidėdavo ne nuo srauto tiesintuvo įtekėjimo į matuoklį, bet nuo prailginto korpuso priekinės dalies vidurio.

Tyrimuose nebuvo keliamas tikslas tyrimo rezultatus susieti su matuoklio konstrukcijos ypatumais, bet buvo siekiama nustatyti paklaidų dėsniumų pokyčių priežastis siekiant pagrįsti galimybes prognozuoti matuoklių



1 pav. Tekėjimo turbininiame matuoklyje schema: 1 – srauto tiesintuvas; 2 – žiedinis kanalas; 3 – priekinė guoliavietė ir laikiklis; 4 – ašelė; 5 – rotorius su sparnuote; 6 – galinė guoliavietė ir laikiklis; 7 – atraminis guolis

Lentelė. Turbininių matuoklių būdingiausi parametrai

Eil. Nr.	Tipas	Kiekis, vnt.	Dydis / skersmuo / ilgis / žiedinio kanalo aukštis, mm	Debitas esant atmosferos ir padidintam slėgiui, m ³ /h	Kinematinė klampa esant atmosferos ir padidintam slėgiui, m ² /s	Slėgis
1	A	2	G6500, DN400, 1200, 56	500–9 700 500–7 000	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $0,460 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,4 ir (2,0...2,1) MPa
2	A	2	G650, DN150, 450, 15,5	50–1 000 49–994	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $0,463 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,47 MPa
3	A	1	G650, DN150, 450, 15,5	53–1 001 50–1 000	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $0,463 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,5 MPa
4	B	2	G2500, DN250, 750, 33,5	200–4 000 130–4 000	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $0,507 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,1 MPa
5	B-L*	2	G2500, DN250, 900, 33,5	200–4 000 200–4 200	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $(0,507-0,523) \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,1 ir 3,05 MPa
6	C	2	G1000, DN150, 450, 17,3	80–1 600 80–1 600	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $2,74 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 0,61 MPa
7	B-L*	1	G1600, DN250, 750, 33,5	132–2 510 132–2 510	$15,4 \cdot 10^{-6}$ $4,40 \cdot 10^{-6}$	Atmosferos 3,5 MPa

Pastaba: *matuoklio korpusas prailgintas, žiedinio kanalo prieš rotorų ilgis trumpesnis, jo pradžia nutolinta nuo įtekėjimo įrengto srauto tiesintuvo, kai kituose matuokliuose žiedinis kanalas prasideda nuo srauto tiesintuvo įtekėjime.

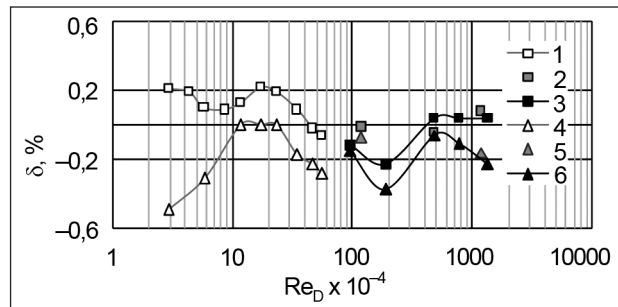
matavimo tikslumą eksploatacijos sąlygomis, kai labai pakinta dujų slėgis ir kinematinė klampa.

TYRIMO REZULTATAI

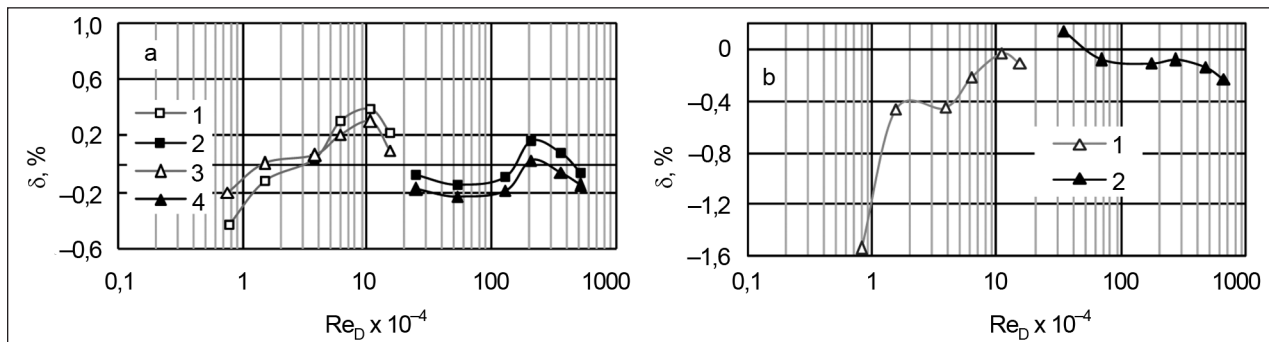
Toliau pateikiama turbininių matuoklių paklaidų kitimo dėsningumą pokyčių analizė, lyginami matavimai esant atmosferos ir padidintam slėgiui. Tyrimo rezultatai pateikti 2–5 pav.

2 ir 3 pav. pateikti A tipo 2 dydžių matuoklių, kuriuose srautas prieš darbo ratą prateka per ilgą žiedinį plyšį su išilginėmis pertvaromis, kurios apriboja srauto sukimąsi. Žiedinis plyšys prasideda nuo pat matuoklio įtekėjimo. Matyti, kad šių matuoklių paklaidos esant atmosferos slėgiui ir padidintam slėgiui kinta siaurose ribose. Paklaidos pikas esant atmosferos slėgiui pasiekiamas kintant Re_D ribose nuo 10^5 iki $2 \cdot 10^5$. Iki šios Re_D paklaidos didėjant debitui slenka link teigiamų verčių kiek banguotai, bet jų kitime aiškiai matomas pikas. Matuoklio po ilgios eksploatacijos (4b pav.)

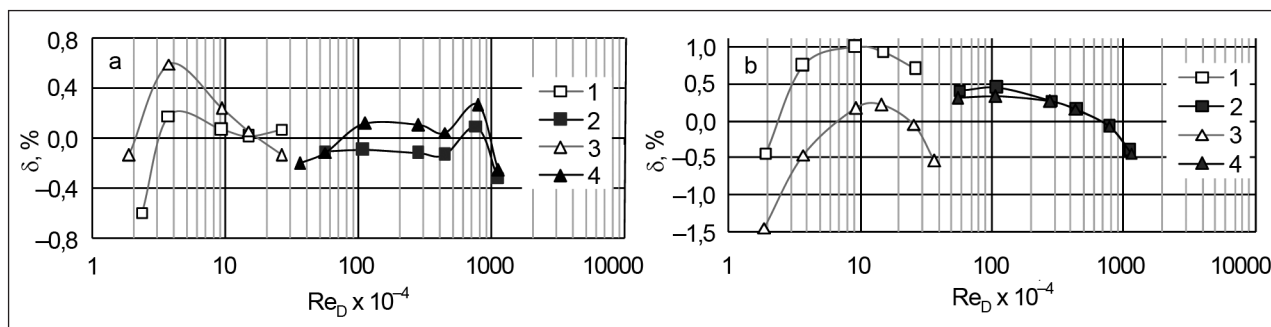
paklaidų kreivė esant mažiems debitams ir Re_D labai paslinkusi link neigiamų verčių, kas rodo išaugusią mechaninę trintį dėl dėvėjimosi. Tačiau Re_D padidėjus iki 10^5 , paklaidos priartėja prie 0. Padidinus slėgį iki (2–3,5) MPa, paklaidų kitimas, atsižvelgus į tai, kad labai padidėjo Re_D



2 pav. Turbininių matuoklių DN 400 (lentelės 1 punktą) paklaidų priklausomybė nuo Re_D ; 1; 4 – atmosferos slėgis; 2; 5 ir 3; 6 – atitinkamai 3,4 ir (2,0–2,1) MPa slėgis



3 pav. Turbininių matuoklių DN 150 (lentelės 2 ir 3 punktai) paklaidų priklausomybė nuo Re_D ; mažai eksploatuotų a) 1; 3 – atmosferos slėgis; 2; 4 – 3,4 MPa slėgis; b) po ilgalaikės eksploatacijos: 1 – atmosferos slėgis; 2 – 3,5 MPa slėgis



4 pav. Skirtingo ilgio turbininių matuoklių DN 250 (lentelės 4 ir 5 punktai) paklaidų priklausomybė nuo Re_D : 1; 3 – atmosferos slėgis; 2; 4 – 3,1 MPa slėgis; a) įprastinio ilgio; b) padidinto ilgio

vertės, sumažėjo iki $\pm 0,20\%$, o bendras jų lygmuo tapo artimas paklaidoms, nustatytoms esant atmosferos slėgiui ir $Re_D \approx 2 \cdot 10^5$.

4 pav. pateikti B tipo matuokliai: vienas (a) yra įprastinės konstrukcijos su žiediniu kanalu, prasidedančiu nuo įtekėjimo; antras (b) – prailgintas ir prieš žiedinį kanalą yra laisva erdvė, kuri, kaip matyti iš rezultatų, iš esmės pakeičia paklaidų kitimo pobūdį. Labai padidėja paklaidų kitimo ribos: vienam nuo +1,0 iki $-0,5\%$, kitam nuo +0,25 iki $-1,5\%$. Paklaidos piko sritis labai išsiplečia, o tai reiškia, kad perėjimas į didelių Re_D sritį vyksta sulėtintai ir tolygiai. Padidinus slėgį, paklaidos kinta analogiškai jų kitimui anksčiau pateiktuose pavyzdžiuose (3 ir 4 pav.).

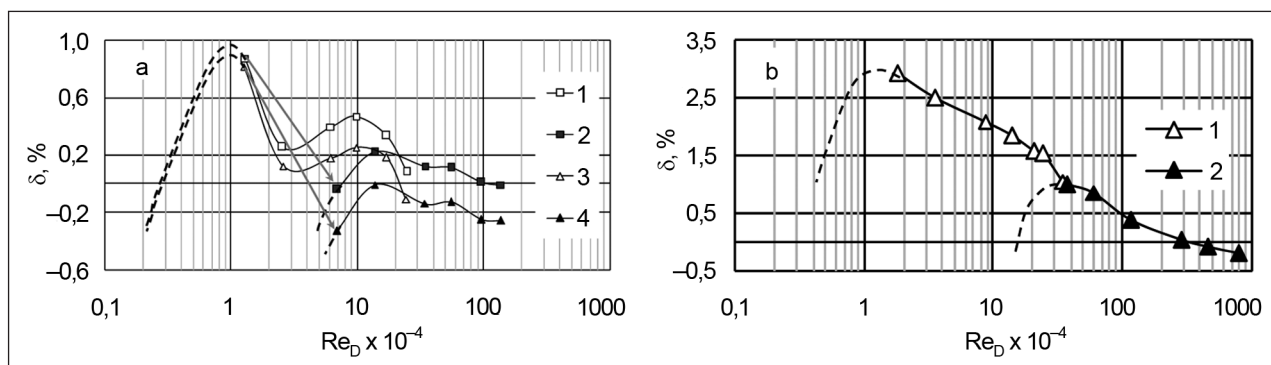
5 pav. pateiktas turbininių matuoklių paklaidų kitimas tais atvejais, kai mažų Re_D srityje paklaidų pikas pasiekiamas esant Re_D , mažesniems kaip 10^4 . Šie rezultatai verti išsamesnės analizės dėl kitokių paklaidų kitimo dėsningumų nei 2–4 pav.

Pirma, pagrindinis paklaidos pikas, pažymėtas punktyru, yra srityje, kurioje $Re_D \leq 10^4$. Tai gali sukelti tik maža mechaninė trintis ir aukštas sukamųjų jėgų augimo tempas dėl greičio pasiskirstymo žiediniame plyšyje prieš sparnuotę ypatumų, ankstyvam pereinamajam tekėjimo režimui būdingų srauto pulsacijų [12] ir pulsacijų, susietų su srauto

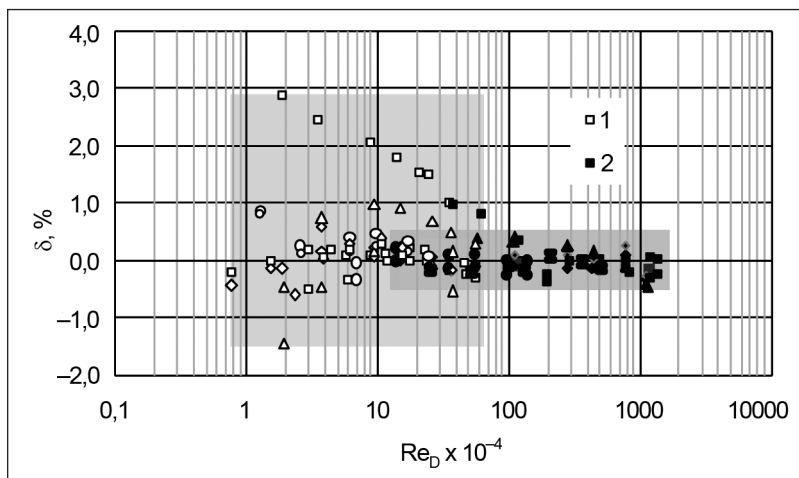
atitrūkimo ir rezonanso reiškiniais aptekant besisukančią rotoriaus sparnuotę. Visi šie veiksniai didina sukamąjį momentą ir greitina priartėjimą prie pikinės paklaidos reikšmės, kuri reiškia, kad susilygina sukamųjų ir pasipriešinimo jėgų momentai. Pastarųjų jėgų didėjimą didėjant debitui, sparnuotės apskams ir Re_D gali lemti tik hidrodinaminių jėgų sukeltos srauto turbulizacijos esant dar palyginti mažiems Re_D . Kadangi tai vyksta mažų Re_D srityje ir srauto struktūra joje jautri įvairiems trikdžiams, Re_D artėjant link $\sim 10^5$ gali formuotis antras paklaidos pikas (3, 4 ir 5a pav.) arba jo gali nebūti (5b pav.), jei srautas labai turbulizuotas.

Antra, jei mažų Re_D srityje po pagrindinio paklaidos piko pasipriešinimo jėgų augimo tempas tampa didesnis nei sukamųjų jėgų ir paklaida pradeda slinkti link didesnių neigiamų verčių, tai lemia tik turbulentinio maišymosi procesas. Dėl to toks paklaidos kitimo dėsningumas išsilaiko padidinus slėgį, kuris padidina oro (dujų) tankį ir sumažina kinematinę klampą (5 pav.). Pateiktą dėsningumą galima laikyti ribiniu, kai visame Re_D diapazone išsilaiko tolygus paklaidos kitimas, kurį lemia turbulencinis maišymasis, kurio įtaka yra svari netgi esant mažiems Re_D .

6 pav. pateiktas visų eksperimentinių rezultatų, gautų su įvairaus tipo ir dydžio matuokliais (lentelė) esant atmosferos ir padidintiems slėgiams.



5 pav. Skirtingo tipo ir dydžio turbininių matuoklių (lentelės 6 ir 7 punktai) paklaidų priklausomybė nuo Re_D : a) C tipo DN 150: 1; 3 – atmosferos slėgis; 2; 4 – 0,61 MPa slėgis; b) B tipo, padidinto ilgio, DN 250: 1 – atmosferos slėgis; 2 – 3,48 MPa slėgis



6 pav. Eksperimentinių rezultatų, gautų su įvairaus tipo ir dydžio matuokliais esant atmosferos ir padidintiems slėgiams, palyginimas: 1 – atmosferos slėgis; 2 – (0,61–3,5) MPa slėgis

Iš šio paveikslo matyti, kad didžiausia paklaidų sklaida nuo +3 % iki -1,5 % gauta esant atmosferos slėgiui ir mažiems Re_D . Padidinus slėgį ir Re_D iki $5 \cdot 10^5$ – 10^6 , sklaida sumažėja iki $\pm (0,3$ – $0,5)$ %. Pastarosios sklaidos ribos galioja net iki $Re_D \approx 10^5$ tais atvejais, kai rezultatų sklaida esant atmosferos slėgiui yra ne didesnė kaip ± 1 %.

Išsamiau analizuojant paklaidų kitimo dėsninumus galima daryti išvadą, kad pagal turbininių matuoklių paklaidų kitimo pobūdį esant atmosferos slėgiui galima ganėtinai tiksliai nusakyti paklaidų pokyčius, padidėjus slėgiui. Tokios prognozės patikimumui garantuoti būtina ištirti turbininio matuoklio matavimo paklaidos dėsninumus kuo platesniame Re_D diapazone (esant atmosferos slėgiui).

Labai svarbu žinoti paklaidų pobūdį esant $Re_D = 10^4$ – 10^5 , kurį veikia mechaninės trinties ir klamos jėgų trinties sudaromas pasipriešinimas, ir taip pat esant $Re_D \geq 2 \cdot 10^5$, kai tekėjimas tampa visiškai turbulenciniu. Idealiu atveju esant Re_D reikšmėms, užtikrinančioms turbulencinį tekėjimą, paklaida $\delta = (Q_m - Q_e)/Q_e \approx \text{const}$ tik tuo atveju, kai neregistruojami pratekėjimai ir sparnuotės sukimaš stabdančių jėgų poveikis kinta proporcingai sukimo momento pokyčiams. Tokiu atveju Reinoldso analogijos principas nustato, kad sukimo momento (taip pat Re_D) pokyčio poveikis nepriklauso nuo to, ar jis pakinta dėl debito kitimo esant atmosferos slėgiui arba tankio kitimo (pakitus slėgiui). Todėl matuoklio paklaidų pastovumas esant atmosferos slėgiui leidžia daryti prielaidą, kad toks pobūdis išliks ir esant dideliems slėgiams. Kitokių dėsninumų pokyčių galima laukti tik tuomet, kai atsiranda papildomi veiksniai, pvz., esant mažiems debitams ir mažiems Re_D , sistemoje su besisukančia sparnuote pasireiškia akivaizdi mechaninės ir klamos jėgų trinties įtaka.

Turbininiams matuokliams būdingos šios paklaidų kitimo tendencijos ir jas lemiantys veiksniai:

- paklaidos didėjimas link teigiamų verčių didėjant debitui ir esant atmosferos slėgiui rodo, kad sukimo momento didėjimo tempas pralenkia stabdančių jėgų ir pratekėjimų didėjimo tempą. Tokį paklaidų kitimą esant mažiems Re_D

taip pat skatina tekėjimo režimui būdingo greičio profilio ir išilginių sūkurių susiformavimas. Negalima visiškai paneigti pradedančio formuotis atitrūkstamojo sparnuotės aptekėjimo reiškinių įtakos. Tokiu būdu stipri pereinamųjų reiškinių priklausomybė nuo įtekėjimo sąlygų gali būti priežastimi netolygaus paklaidos kitimo link pikinės vertės;

- paklaidos didėjimas link neigiamų verčių kintant debitui ir esant atmosferos slėgiui rodo, kad sukimo momento didėjimo tempas atsilieka nuo stabdančių jėgų ir pratekėjimų didėjimo tempo. Priežastis – perėjimas į didelių Re_D sritį, kurioje mechaninės trinties ir klamos jėgų trinties poveikis tampa mažas, palyginti su turbulencinio tekėjimo sukiamu pasipriešinimu. Atsižvelgiant į įtekėjimo sąlygas, kurias nustato žiedinio kanalo prieš sparnuotę ilgis ir aukštis, paklaidos pikas daugeliu atvejų yra srityje $Re_D \approx 5 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$. Kadangi atitekančio prie sparnuotės greičio pasiskirstymą ir jo struktūrą lemia žiedinis kanalas, apsprendžiančiu dydžiu žiediniam kanalui tikslingiau imti ekvivalentinį skersmenį $D_{\text{ekv}} = 4A/P = D_1 - D_2$ (čia: A – pratekėjimo skerspjūvis; P – šlapiasis perimetras);

- Re_D didėjant iki 10^6 paklaidos artėja prie pastovios vertės;

- padidėjus slėgiui ir tuo pačiu tankiui bei sukimo momentui, didžiausių paklaidos pokyčių reikia laukti tik mažų Re_D srityje, nes mažiausios neigiamos paklaidų vertės dėl tankio didėjimo turi pasislinkti link teigiamų verčių, o pikinė vertė turi mažėti dėl to, kad, padidėjus Re_D , greičiau pasiekiamas turbulencinis tekėjimo režimas ir auga pasipriešinimas. Kaip rodo eksperimentiniai rezultatai, labiausiai tikėtina paklaidos stabilizacija lygmenyje, pasiektame esant atmosferos slėgiui ir $Re_D \geq 2 \cdot 10^5$;

- visais atvejais, kai paklaidos pagrindinis pikas yra mažų Re_D srityje, netgi mažesnių kaip 10^4 , ir po jo paklaidos slenka banguotai arba labai tolygiai link neigiamų verčių, šis dėsninumas išsilaiko ir esant padidintam slėgiui. Tai rodo, kad tokiuose matuokliuose jau esant mažiems Re_D pasipriešinimą matuoklio apsuksams pradeda lemti itin turbulizuoto srauto savybės ir visiškai galioja Reinoldso analogija.

IŠVADOS

1. Nustatyti pagrindiniai fizikiniai veiksniai, lemiantys turbininių matuoklių paklaidų dėšningumus, atsižvelgus į dujų klamos kitimą kintant slėgiui, ir Re_D sritį. Esant $Re_D \geq 2 \cdot 10^6$ dėl stiprios srauto turbulizacijos paklaidos artėja prie pastovios asimptotinės reikšmės ir fizikinės klamos bei mechaninės trinties įtakos tampa nereikšmingos.

2. Didžiausia paklaidų sklaida ribose $(-1,5+3)$ % stebėta esant atmosferos slėgiui ir mažiems Re_D , padidinus slėgį ir Re_D iki $5 \cdot 10^5 - 10^6$, ji dėšningai sumažėja iki $\pm(0,3-0,5)$ %. Pastarosios ribos galioja net iki $Re_D = 10^5$ atvejais, kai rezultatų sklaida esant atmosferos slėgiui yra ne didesnė kaip ± 1 %.

3. Nustatyti dėšningumai leidžia numatyti turbininių matuoklių paklaidų pokyčius slėgiui padidėjus, kai žinomas paklaidų kitimo pobūdis esant atmosferos slėgiui, ir paklaidos reikšmę esant $Re_D \geq 2 \cdot 10^5$ bei pagrįstai svarstyti tikslingumą taikyti turbininiams matuokliams, įrengtiems dujotakiuose, kalibravimą esant darbiniam slėgiams.

PADĖKA

Autoriai dėkoja AB „Lietuvos dujos“ už suteiktą galimybę panaudoti analizei turbininių matuoklių kalibravimo rezultatus, gautus užsienio laboratorijų aukšto slėgio įrenginiuose.

Gauta 2013 01 24
Priimta 2013 02 22

Literatūra

1. Von Lavante E., Poggel S., Kaya H., Franz M. Numerical simulation of flow in rotor-casing gap of a rotary piston flow meter. *Proceedings of the 15th International Flow Measurement FLOMEKO Conference, Taipei, Taiwan, September 2010*.
2. Ranseth A. *Reynolds Number Calibration of Turbine Meters*. TransCanada Calibrations. Prieiga per internetą: www.cga.ca/events/documents/ransethalan.pdf
3. Tang P. W. *Getting the Best Measurement from Your Turbine Meters*. CsHm 2009 – Calgary, Canada: Canadian School of Hydrocarbons Measurement. 6 p. Prieiga per internetą: www.asgmt.com/default/papers/asgmt2010/docs/C3.pdf
4. Tang P. W. *Calibration of Turbine Gas Meter by Matching Reynolds Number and Density*. WGMSC 2009 – Salt Lake City. Prieiga per internetą: www.fortisbe.com/Natural-Gas/Business/Measurement/PublicationsAndPapers/Documer.
5. Pope J. G., Wright J. D., Johnson A. N., Moldover M. R. Extended Lee model for the turbine meter & calibration

with surrogate fluids. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2012. Vol. 24. P. 71–82.

6. Lee W. F. Z., Evans H. J. Density effects and Reynolds number effect on gas turbine flowmeters. *Journal of Basic Engineering*. 1965. Vol. 87. No. 4. P. 1043–1052.
7. De Jong S., v. d. Kam P. M. A. High pressure recalibration of turbine meters in flow measurement. *Proceedings of Flomeko'93 Seoul, Korea*.
8. Tang P. W. High-pressure calibration of gas turbine meters using the Reynolds number methods. Prieiga per internetą: www.asgmt.com/default/papers/asgmt2009/docs/050.pdf
9. Tonkonogij J., Pedišius A. Valstybinis oro tūrio ir srauto vienetų etalonas. Pamatinių skaitiklių įrenginys. *Matavimai*. 2005. Nr. 3(35). P. 30–34.
10. Mickan B., Valenta T. *Inter-laboratory Calibration Comparison of the Turbine Gas Meter G650*. EURAMET Project No. 862. Final Report – Draft B, March 1, 2007. 71 p.
11. Valenta T., Mickan B. *Inter-laboratory Calibration Comparison of the Turbine Gas Meter G6500*. EURAMET Project No. 1006. Final Report – Draft A, January 23, 2009. 77 p.
12. Bertašienė A. Oro greičio verčių atkūrimo ir perdavimo tyrimas kintant tekėjimo režimui. *Daktaro disertacija*. KTU-LEI, 2011. Kaunas. 116 p.

Eugenijus Maslauskas, Antanas Pedišius, Jurij Tonkonogij

INVESTIGATION OF GAS VISCOSITY INFLUENCE ON TURBINE FLOWMETERS

Summary

Generalization of gas viscosity influence on turbine gas flowmeters, caused by change of pressure, is performed by comparing results of turbine meters measurement errors in high ($p > 0.6$ MPa) and low (atmospheric) pressure calibration facilities. It is shown that the character of error changes with pressure increase can be foreknown, when the character of errors at low pressure is known. It was found that at atmospheric pressure and $Re_D \leq 2 \cdot 10^5$ the dispersion of turbine flowmeters errors is in the range $(+3 - -1.5)\%$, and by pressure increasing it decreases to $\pm (0.3-0.5)\%$. At $Re_D > 10^6$ errors are close to some asymptotic value. The study findings can be used for estimating expedience of gas turbine flowmeters calibration in high pressure facilities.

Key words: turbine gas flow meters, measurement errors, viscosity, pressure

Еугенијус Маслаускас, Антанас Педишюс, Юрий Тонконогий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ ГАЗА НА ТУРБИННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Резюме

Проведено обобщение результатов исследования воздействия изменения вязкости газа, вызванного изменением давления, на турбинные расходомеры, сравнивая погрешности их калибровки в калибровочных установках высокого ($p > 0,6$ МПа) и низкого (атмосферного) давления. Показано, что по характеру изменения погрешностей турбинных расходомеров при атмосферном давлении можно прогнозировать закономерности изменения погрешностей при повышенном давлении. Установлено, что диапазон рассеяния погрешностей расходомеров (+3– –1,5) % наблюдаемый при атмосферном давлении и $Re_D \leq 2 \cdot 10^5$, с увеличением давления снижается до $\pm (0,3–0,5)$ %. При $Re_D > 10^6$, погрешности приближаются к некоторому асимптотическому значению. Результаты исследования могут быть использованы для оценки целесообразности калибровки газовых турбинных расходомеров в установках высокого давления.

Ключевые слова: газовые турбинные расходомеры, погрешности измерений, вязкость, давление