

## Ultragarsinės dujų srautų greičio matavimo sistemos eksperimentinis tyrimas

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

### Įvadas

Šiuolaikiniame dujų ūkyje ir daugelyje technologinių procesų tenka matuoti vamzdynais tekančių dujų srautų greitį bei debitą. Šiems tikslams vis plačiau pradedami taikyti ultragarsiniai metodai, ypač impulsiniai laikiniai [1-4]. Kaip pažymėta darbuose [1-3], didžiausias impulsinių laikinių matavimo metodų trūkumas tas, kad priimto signalo amplitudė gali kisti tik griežtai apibrėžtose ribose. Kitu atveju signalai gali būti praleidžiami arba fiksuojami klaidingu laiko momentu. Darbo tikslas buvo apžvelgti kai kuriuos dujų srautų greičio matavimo ypatumus ir atskleisti naujas anksčiau mūsų aprašytos [3] sistemos galimybes.

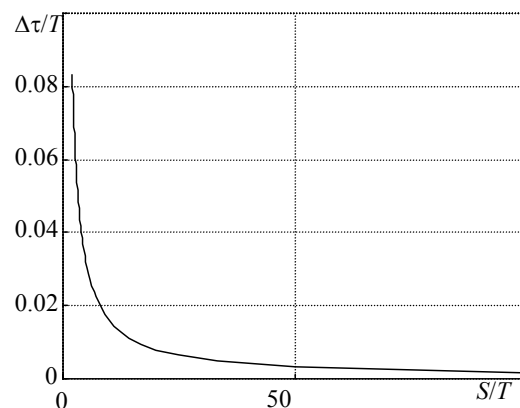
### Praktinės problemos

Dujų srautų greičio matavimas gali pasirodyti esąs gerokai paprastesnis už skysčių greičio matavimą, mat, esant tiems patiems vamzdyje tekančio srauto parametrams, dėl gerokai mažesnio garso greičio dujose akustiniai signalai jų srautą pereina 4...5 kartus lėčiau. Maždaug tiek pat kartų turėtų padidėti ir dujų srauto greičio matavimo tikslumas. Tačiau, kaip parodė tyrimai, praktikoje tai gana sunkiai pasiekama. Daugiausia sunkumų atsiranda dėl to, kad neįmanoma gerai suderinti elektroakustinių keitiklių ir dujų srauto akustinių varžų. Todėl, išspinduliuojant ir priimant akustinius signalus, prarandama nemaža signalo energijos dalis. Pvz., ultragarsinio keitiklio, kurio aktyvus paviršius padengtas plieno sluoksniu, į orą išspinduliuojamo akustinio signalo lygis sumažėja 34 dB [1]. Tiek pat sumažėja ir priimamų akustinių signalų lygis. Jeigu akustiniai signalai būtų išspinduliuojami ne į orą, o į vandenį, tai jie susilpnėtų tik 8 dB [1]. Be to, dujose akustinis signalas gerokai susilpnėja dėl absorbcijos ir srauto turbulentiškumo. Dėl šių priežasčių dujų srautų greičių negalima matuoti vamzdžio išorėje įtaisomais elektroakustiniais keitikliais. Matavimams dujų srautuose kol kas pritaikomi elektroakustiniai keitikliai, tiesiogiai ar per pereinamuosius sluoksnius kontaktuojantys su dujų srautu [1,2]. Siekiant sumažinti dujų srauto iškraipymus, elektroakustiniai keitikliai dažniausiai montuojami vamzdžio išorinėje pusėje esančiose nišose, sudarančiose 30...60° kampą su srauto judėjimo kryptimi. Bet ir taip įtaisant elektroakustinius keitikius negalima visiškai išvengti akustinių triukšmų, atsirandančių dėl sukurių, susidarančių elektroakustinių keitiklių sumontavimo vietose. Be elektroakustinių keitiklių aptekėjimo triukšmų ir paties srauto turbulentiškumuose generuojamų triukšmų, labai svarbūs yra ir triukšmai, atsirandantys dėl parazitinio

akustinio signalo perėjimo iš siuntiklio į imtuvą per elektroakustinių keitiklių tvirtinimo mazgus. Visi šie triukšmai blogina signalo ir triukšmo santykį imtuvo išėjime, o tuo pat metu ir srauto greičio matavimo tikslumą. Matuojant dujų srauto greitį impulsiniu metodu, akustinio signalo atėjimo momentas dažniausiai fiksuojamas signalui einant per nulinį lygį, kai jo amplitudė didesnė už slenkstinės įtampos amplitudę. Tuomet absoliučią signalo atėjimo momento fiksavimo paklaidą  $\Delta\tau$ , kuri gaunama naudojant idealų komparatorių, galima rasti naudojant algoritmą

$$\Delta\tau = \frac{\arcsin(N/S)}{2\pi f}, \quad (1)$$

kur  $N/S$  - dydis, atvirkščias signalo ir triukšmo santykiui;  $f$  - imtuvo priimto impulso užpildymo dažnis. Kaip matome, absoliuti akustinio signalo atėjimo momento fiksavimo paklaida yra atvirkščiai proporcinga priimamo signalo dažniui bei signalo ir triukšmo santykiui. Paėmus minėtos absoliučios paklaidos  $\Delta\tau$  santykį su zondavimo impulsą užpildančio signalo periodo  $T$  ilgiu, priklausomai nuo signalo ir triukšmo santykio gaunama



1 pav. Signalo atėjimo momento fiksavimo idealiu komparatoriumi paklaidos  $\Delta\tau$  santykio su zondavimo signalo periodo ilgiu  $T$  priklausomybė nuo signalo ir triukšmo santykio

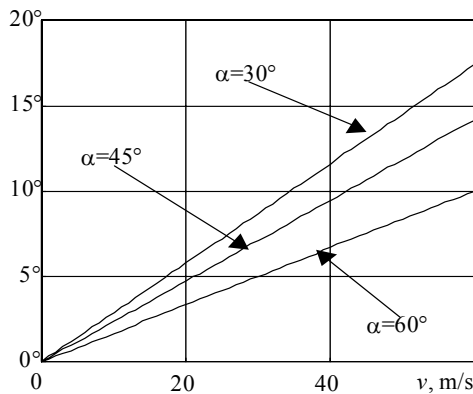
kreivė parodyta 1 pav.

Esant žinomiems zondavimo impulsą užpildančio signalo periodo ilgiui ir signalo ir triukšmo santykiui imtuvo išėjime, nesunku rasti ir absoliučias signalų sklaidimo prieš srautą ir srauto kryptimi trukmių paklaidas. Didėjant užpildančio signalo dažniui, minėtos paklaidos greitai mažėja, tačiau signalo slopinimas, didėjant dažniui, didėja pagal kvadratinį dėsnį, o signalo ir triukšmo santykis blogėja. Be to, didėjant signalo dažniui, siaurėja elektroakustinių keitiklių krypties diagramos, o didėjant

dujų srauto greičiams, signalai gali nebepatekti į priėmimo keitiklį. Reikiamas keitiklių kryptinės diagramos plotis priklausomai nuo numatomo matuoti srauto greičių diapazono randamas iš išraiškos

$$\varphi = 2 \arcsin(U_m \cos \alpha / c), \quad (2)$$

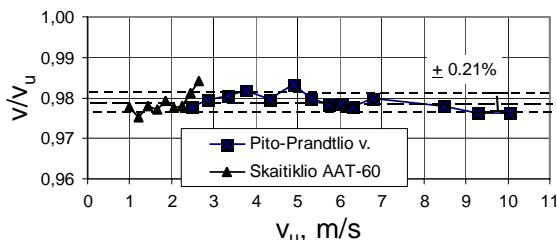
kur  $U_m$  - maksimalus srauto greitis;  $\alpha$  - kampas tarp statmens srauto judėjimo krypties ir srauto zondavimo krypties. Kaip pagal (2) išraišką apskaičiuotas ultragarsinio keitiklio kryptinės diagramos plotis priklauso nuo oro srauto greičio, kai garso greitis ore  $c=343$  m/s, parodyta 2 pav.



2 pav. Ryšys tarp ultragarsinio keitiklio kryptinės diagramos pločio ir oro srauto greičio, kai kampas tarp statmens srautui ir srauto zondavimo krypties  $\alpha$

### Ekspirimentinis tyrimas

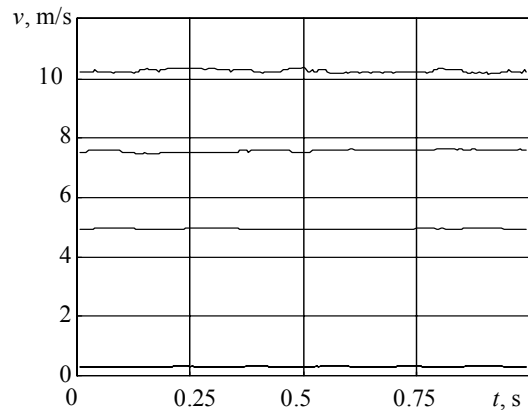
Ekspirimentiška matavimo sistema buvo tiriama Lietuvos energetikos instituto (LEI) Šiluminių įrenginių tyrimo ir bandymų laboratorijoje. Bandymams panaudotas stendas, kur oro srautas buvo sukuriamas 0,4 m skersmens vamzdyje. Srautui išlyginti ir stabilizuoti panaudota konfuzorių sistema. Srauto greitis buvo matuojamas ultragarsine matavimo sistema [3] ir pamatiniu dujų skaitikliu AAT 60, kalibruotu PTB (Vokietija) (kalibravimo neapibrėžtis  $\pm 0,15\%$ ), Pito ir Prandtlio vamzdeliu, kalibruotu Sankt Peterburge (kalibravimo neapibrėžtis  $\pm 0,86\%$ ) ir termoanometru "Testo 435", kalibruotu Vokietijoje, kurio tikslumas  $\pm 0,01$  m/s greičių ruože 0...1,99;  $\pm 0,02$  m/s (2...4,9 m/s);  $\pm 0,04$  m/s (5...10 m/s). Matavimo rezultatai parodyti 3 pav.



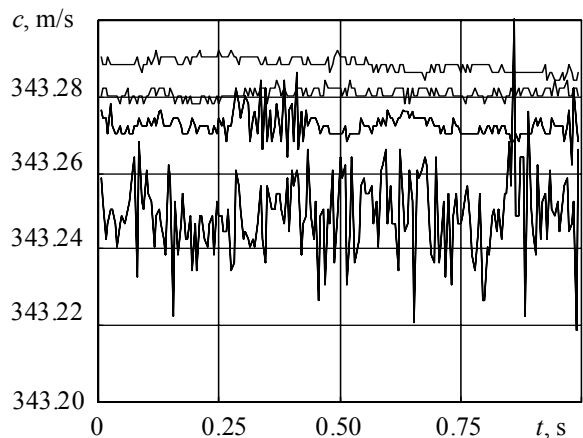
3 pav. Srauto greičio verčių, gautų matuojant pamatiniu skaitikliu AAT-60 ir Pito ir Prandtlio vamzdeliu, santykis su ultragarsiniu metodu gautomis srauto greičio vertėmis

Kaip matome 3 paveiksle, ultragarsiniu metodu išmatuotas srauto greitis buvo apie 2% didesnis negu išmatuotas kitais metodais. Tai susiję su prielaida, kad, matuojant ultragarsiniu metodu, oro srauto profilis vamzdyje yra visiškai plokščias. Tyrimai rodo, kad ir naudojant konfuzorines srauto išlyginimo sistemas, srauto profilis nėra visiškai plokščias ir srauto greičio algoritme, matuojant ultragarsiniu metodu, būtina naudoti pataisos koeficientus, įvertinančius srauto profilio pasikeitimus. Srauto greičiai buvo matuojami greičių ruože nuo 0 iki 10 m/s.

Siekiant įvertinti sistemos darbo stabilumą ir gautų rezultatų patikimumą kartu su srauto greičiu buvo matuojamas ir garso greitis oro sraute. Matavimų rezultatai parodyti 4 pav., a, b.



a)

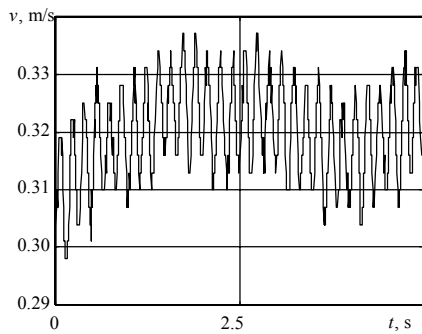


b)

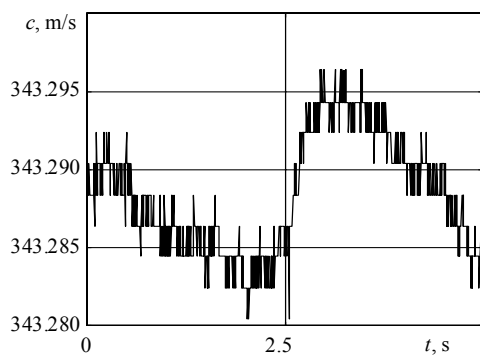
4 pav. Oro srauto greičio (a) ir sraute išmatuoto garso greičio (b) 1 s trukmės (200 matavimų) laikinės realizacijos

Kaip matome iš pateiktų rezultatų, išmatuotų srauto greičio verčių sklaida srauto greičio vidutinės vertės atžvilgiu buvo mažesnės negu  $\pm 1\%$ . Išmatuotų garso greičio verčių sklaida, gauta matuojant garso greitį oro sraute, kurio greitis kito nuo 0,32 iki 10,25 m/s, tesudarė mažiau negu  $\pm 0,018\%$  jo vidutinės vertės. Be to, per laiko tarpą, kol buvo atlikti visi keturi eksperimentai, vidutinė garso greičio vertė pasikeitė apie 0,04 m/s. Tai, mūsų nuomone ir atsižvelgiant į literatūroje [4,5] pateiktus duomenis, susiję su srauto temperatūros pasikeitimu apie  $0,07$  °C, kadangi eksperimentų metu nebuvo galima

palaikyti srauto temperatūrą pastovią. Temperatūra laboratorijoje buvo matuojama  $\pm 0,1$  °C tikslumu. Maži srauto greičiai (apie 0,32 m/s) pulsavo 6 Hz dažniu (5 pav., a). Minėtas srauto greičio pulsacijas, mūsų



a)



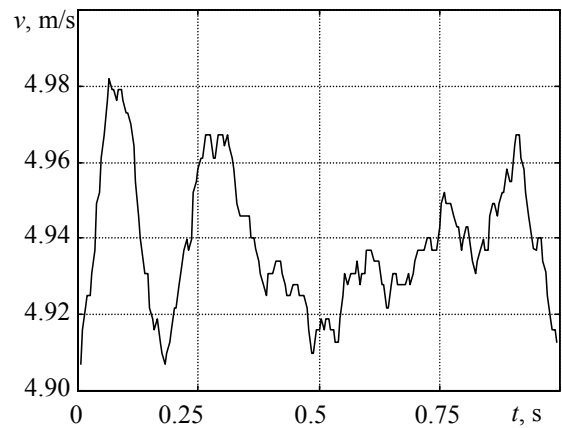
b)

5 pav. Srauto greičio (a) ir jame išmatuoto garso greičio pulsacijų (b) 5 s trukmės laikinės priklausomybės.

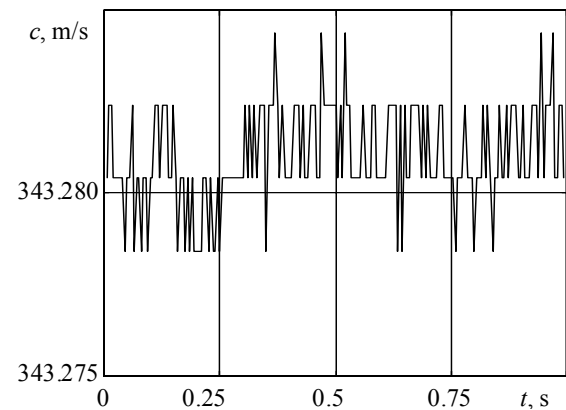
nuomone, sukėlė srautą sukuriančio sraigto mentelių sukimosi dažnis. To pat eksperimento metu užfiksuotos neryškios (apie  $\pm 7$  mm/s) garso greičio pulsacijos.

Tikėtina, kad jos susijusios su prasidedančiu srauto profilio nestabilumu mažų srauto greičių ( $v < 0,5$  m/s) ruože, todėl sustiprėja srauto pulsacijos skersine kryptimi. Vidutiniam srauto greičiui padidėjus iki 5...10 m/s, srauto greičio pulsacijos mažai padidėjo (5,6,7,8 pav.), tačiau jose padaugėjo 30...100 Hz dažnio dedamųjų. Mažos srauto greičio pulsacijos, tesudarančios apie  $\pm 0,1$  m/s, kai vidutinis srauto greitis siekia 10 m/s, rodo palyginti didelį srauto stabilumą ir gana gerą ultragarsinės srauto greičio matavimo sistemos atsparumą srauto sukeliams trukdžiams.

Oro sraute išmatuotos garso greičio verčių pulsacijos, didėjant srauto greičiui, didėja. Srauto greičiui padidėjus iki 5 m/s, jos būna  $\pm 2...3$  mm/s, o oro srauto greičiui esant 10 m/s, pulsacijos jau siekia  $\pm 10...20$  mm/s (5a, 6a, 7a, 8a pav.). Būtina pažymėti, kad esant oro srauto greičiui 4...5 m/s, išmatuotų pavienių garso greičio verčių sklaida siekia tik keletą milimetrų. Tai susiję ne tik su srauto turbulentinėmis pulsacijomis, bet ir su signalų vėlinimo sraute laikų diskretizavimo 50 MHz dažnio laiko žymėmis. Dėl praėjimo laikų diskretizavimo atskirų pavienių garso greičio verčių kitimas vidutinės vertės atžvilgiu gaunamas diskretinis, o diskretizavimo žingsnis sudaro apie 2 mm/s.



a)



b)

6 pav. Oro srauto greičio (a) ir jame išmatuoto garso greičio (b) 200 matavimų (1 s trukmės) laikinė priklausomybė, kai vidutinis srauto greitis  $V = 4,94$  m/s

Matuojant srauto greitį  $45^\circ$  kampu įmontuotais ultragarsiniais keitikliais, dėl minėtos priežasties atskirų srauto greičio verčių diskretizavimo žingsnis padidėja iki 3 mm/s.

Pirmieji standiniai ultragarsinės matavimo sistemos bandymai parodė, kad, siekiant geriau atskleisti sukurtos sistemos galimybes mažų srauto greičių matavimo srityje (iki 0,5 m/s), būtina padidinti LEI bandymų stendo sukuriama srauto stabilumą, o akustinių signalų sklaidimo trukmių diskretizavimo dažnį padidinti iki 100 MHz. Mažų srauto greičių srityje tai leistų gerokai sumažinti akustinių signalų sklaidimo laikų diskretizavimo paklaidas, kurios dabą yra vyraujančios.

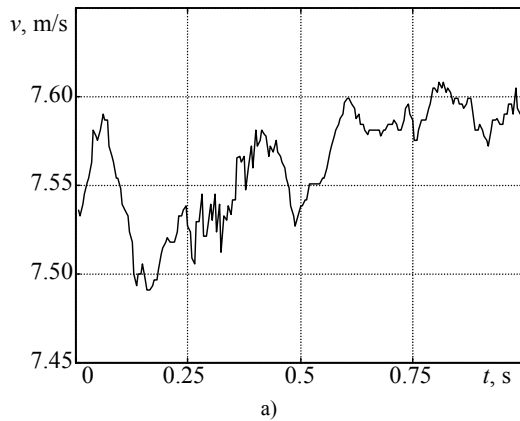
## Išvados

Siekiant panaudoti visas ultragarsinės srautų greičio matavimo sistemos galimybes, būtina visame matuojamų greičių diapazone ištirti srautų greičio profilius ir juos įvertinti ultragarsiniu metodu matuojant dujų srautų greitį ir debitą.

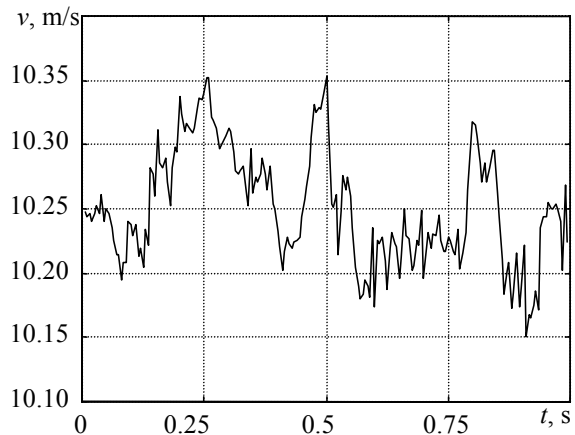
Mažinant srauto ir garso absoliučių verčių matavimo paklaidas, būtina sukurti metodikas, kurios leistų kiek galima tiksliau nustatyti matavimo kanalo geometrinius parametrus ir parazitinio signalų vėlinimą akustinėse ir elektrinėse grandinėse.

Didinant srautų greičio matavimo tikslumą būtina iširti ir įvertinti matavimo sistemos nulinio dreifo (kai srauto

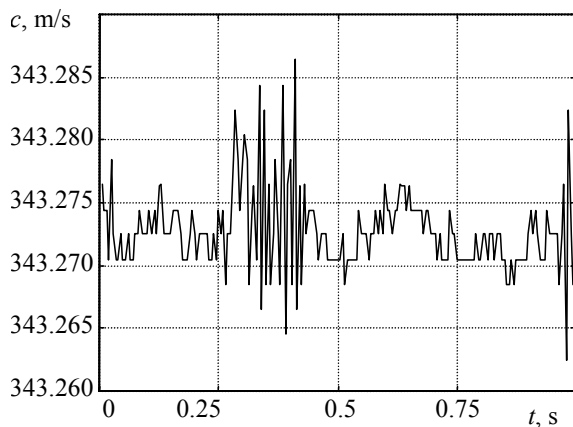
5. **Wong G. S. K., Embleton T. F. W.** Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature/ J.A.S.A. 77(5). 1985. P. 1710-



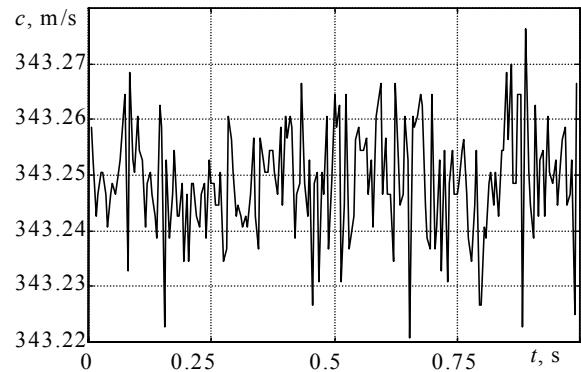
a)



a)



b)



b)

7 pav. Srauto greičio (a) ir jame išmatuoto garso greičio (b) 1 s trukmės laikinės priklausomybės

greitis  $v=0$ ) kitimą, kintant matavimo sąlygoms.

### Padėka

Dėkojame Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui už finansinę paramą ir LEI Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijos darbuotojams už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus.

### Literatūra

1. **Lynnworth T. C.** Ultrasonic Flowmeters// Physical Acoustics/ N. Y. Academic Pres. 1979. P.407-519.
2. **Lynnworth T. C.** Ultrasonic Measurements for Process Control./ N. Y. Academic Pres. 1989. 694 p.
3. **Butkus J., Jakevičius L., Tumšys O.** Srauto greičio matavimas panaudojant impulsinius signalus// Ultragarsas. Nr 2(30). 1998. P. 25-29.
4. **Wong G. S. K.** Speed of sound in standard air. J.A.S.A. 79(5). 1986. P. 1359-1366

8 pav. Oro srauto greičio (a) ir sraute išmatuoto garso greičio (b) pulsacijų laikinės priklausomybės, kai vidutinis srauto greitis  $v=10,25$  m/s

1712.

J. Butkus, L. Jakevičius, O. Tumšys

**An experimental investigation of the ultrasonic system for measurement velocity of gas flows**

### Summary

The algorithm for estimation of an error of fixing of the arrival moment of an acoustical signal is given depending on the frequency of the signal and the signal to noise ratio at an output of the receiver. The mathematical expression for calculation of the width of the directional pattern of ultrasonic transducer in accordance with the flow velocity is presented. The experimental results of measurements of flow velocity and speed of sound and also their pulsations in the air flow conduit of 0.5 m in diameter are presented. The possibilities of the measuring system to record velocity pulsations of a gas flow less than 5 mm/s and variations of the sound speed less than 2...3 mm/s, when the mean velocity of the air flow achieve 10 m/s, are shown.