

## Temperatūros įtaka ultragarso bangų sklidimui neinvazinio srauto matuoklio akustiniame kanale

A. Vladišauskas

Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 50, LT-3031 Kaunas, Lietuva

### Įvadas

Ultragarsiniai neinvaziniai skysčių lygio, savybių ir jų dinamikos uždaroje sistemoje tyrimo metodai plačiai taikomi šiuolaikinėje technologijoje [1-5]. Tokie tyrimai yra ekologiškai švarūs, o matavimų tikslumas ir galimybės atitinka šiuolaikiniam prietaisams keliamus reikalavimus. Be to, tai vieninteliai šios paskirties matavimo prietaisai, kuriuos galima panaudoti kaip portatyvius matuoklius, o papildomai pritaikius kitų fizikinių dydžių matavimo kanalus (pavyzdžiui, temperatūros matavimą) galima analizuoti energetikos sistemų darbą.

Neinvaziniai skysčių dinaminiai parametrai matavimai netrikdo skysčio srauto profilio ultragarso spindulio sklidimo aplinkoje; pjezokeitiklius galima pritvirtinti prie išorinės vamzdžio sienelės, nesunku parinkti matavimo ir keitiklių vietą. Keičiant keitiklių padėtį, sukant juos apie vamzdį, galima gauti informaciją apie dinaminiai parametrai pasiskirstymą vamzdžio viduje. Ultragarsiniai neinvaziniai srauto matuokliai nesukelia vamzdinyuose slėgio nuostolių. Prietaisų gedimai ar metrologinė patikra neverčia stabdyti technologinį procesą ar atjungti šildymo įrenginį. Tačiau šie metodai turi savų trūkumų. Visų pirma, tai riboti ultragarso spindulio nukreipimo į srautą kampai. Antra, sudėtingas akustinis kanalas, kuriame ultragarso bangos sklinda įvairiais kampais skirtingų akustinių varžų aplinkoje. Dažnai ultragarso bangos transformuojamos. Jeigu šiais principais veikiantys matavimo prietaisai yra skirti darbui temperatūrų diapazone (šiluminės energijos apskaita, technologiniai ar cheminiai procesai), tai keičiantis akustinio kanalo medžiagų savybėms, keisis ultragarso bangų sklidimo parametrai.

Darbo tikslas - rasti ultragarso greičio ir slopinimo priklausomybes nuo temperatūros akustinio kanalo elementuose.

### Akustinio kanalo modelis

Akustinio kanalo modelio schema temperatūrų įtakai banginiams procesams nagrinėti parodyta 1 pav. Kanala sudaro du kampiniai pjezokeitikliai P1 ir P2, vamzdis pripildytas skysčio, ir sluoksnis kontaktinio skysčio tarp pjezokeitiklių ir išorinio vamzdžio paviršiaus, reikalingas ultragarso bangų perėjimui užtikrinti. Pjezokeitikliai išdėstyti priešingose vamzdžio pusėse taip, kad jų akustinės ašys po daugkartinių lūžių, sutampa. Temperatūrai keičiantis, keičiasi ultragarso greičio ir slopinimo koeficientas akustinio kanalo elementuose bei ultragarso spindulio lūžio kampas dviejų skirtingų greičių riboje. Be to, dėl šiluminio plėtimosi keičiasi akustinio

kanalo geometriniai parametrai. Pjezokeitikliai ir kontaktinis skystis gali būti keičiami, ieškant mažiau nuo temperatūros priklausomų charakteristikų ar parametru.

### Akustinio kanalo elementų analizė

Panagrinėsime ultragarso bangų sklidimo procesus atskiruose akustinio kanalo elementuose. Ultragarso bangų sklidimo kampinio pjezokeitiklio prizmėje trukmė

$$\tau_p = \frac{s}{c_p(T) \cdot \cos \alpha}, \quad (1)$$

čia:  $s$  – atstumas nuo pjezoelemento centro iki vamzdžio sienelės,  $c_p(T)$  – ultragarso greitis prizmėje,  $\alpha$  – kampas tarp ultragarso bangų sklidimo krypties ir vamzdžio paviršiaus normalės.

Žinant pjezoelemento skersmenį  $\Phi_p$  ir atstumą iki prizmės krašto  $l_0$ , galima rasti ultragarso bangų sklidimo kelią prizmėje pagal akustinę pjezokeitiklio ašį

$$l_p = (0,5\Phi_p + l_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Kadangi

$$l_p = \frac{s}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

iš (1), (2) ir (3) gauname:

$$\tau_p = \frac{(0,5\Phi_p + l_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{c_p(T)}. \quad (4)$$

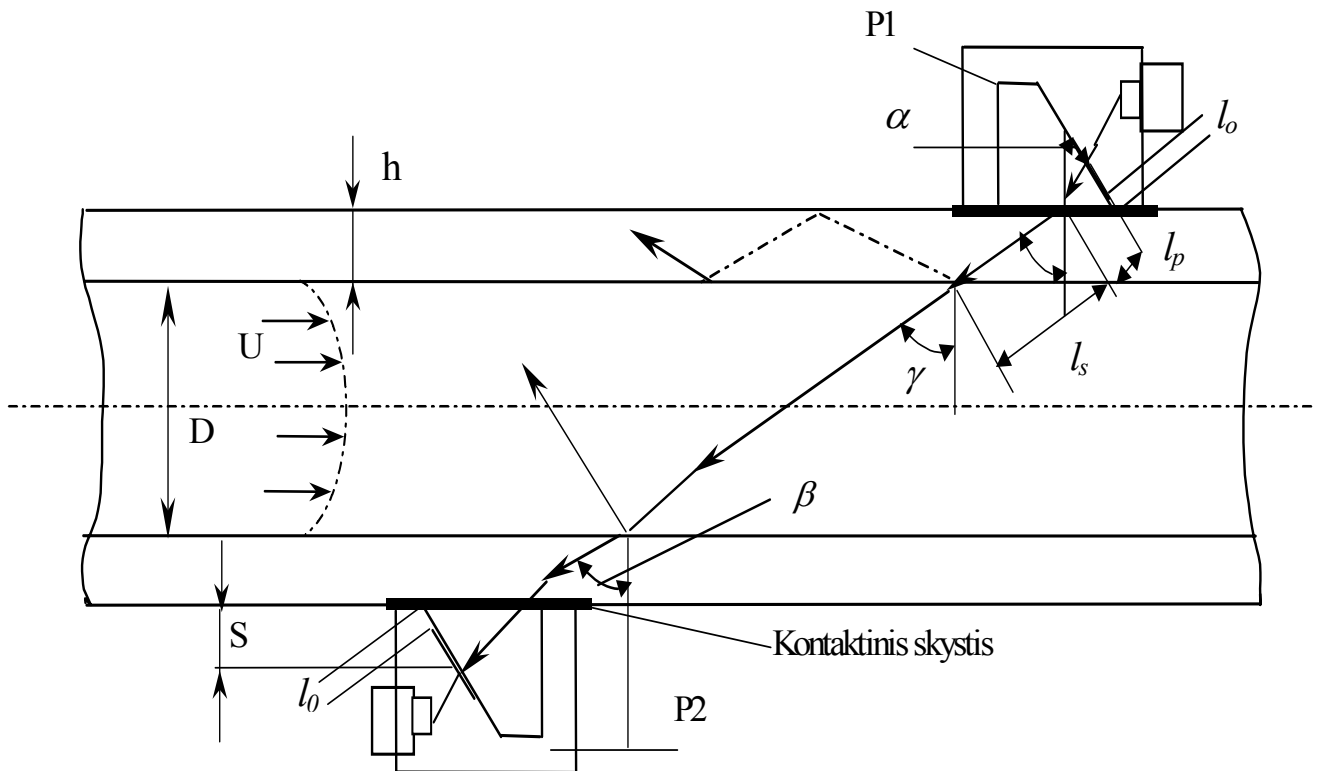
Keičiantis temperatūrai, keičiasi sklidimo trukmė

$$\tau \pm \Delta \tau = \frac{(0,5\Phi_p + l_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{c_p(T) \pm \Delta c_p(T)}, \quad (5)$$

čia  $\Delta c_p(T)$  - ultragarso greičio temperatūrinis koeficientas.

Kampinių pjezokeitiklių prizmės gaminamos iš plastmasės. Ultragarso bangų nuostoliai plastmasėje ir šių medžiagų konstrukcinės galimybės padeda sumažinti pjezokeitiklių reverberacinius triukšmus. Tačiau temperatūros veikiamų plastmasių savybės kinta. Ultragarso greičio temperatūrinis koeficientas, slopinimo koeficientas ir plėtimosi koeficientas plastmasėje gerokai didesni negu metalų. 1 lentelėje pateikti plastmasių ultragarso greičio ir jų temperatūrinio koeficiento reikšmės. Reikia pažymėti, kad ultragarso greičiai to paties pavadinimo plastmasėje gali būti skirtingi. Tai priklauso nuo gamintojų.

Ultragarsiniuose matavimuose ir ultragarsinėje neardančiojoje kontrolėje plačiai naudojami kampiniai pjezokeitikliai, kurių prizmės pagamintos iš organinio stiklo, turinčio neigiamą ultragarso greičio temperatūrinį koeficientą išilginei bangai  $\Delta c(T) = -3 \text{ m}^\circ\text{C}$ .



1 pav. Neinvazinio srauto matuoklio akustinis kanalas

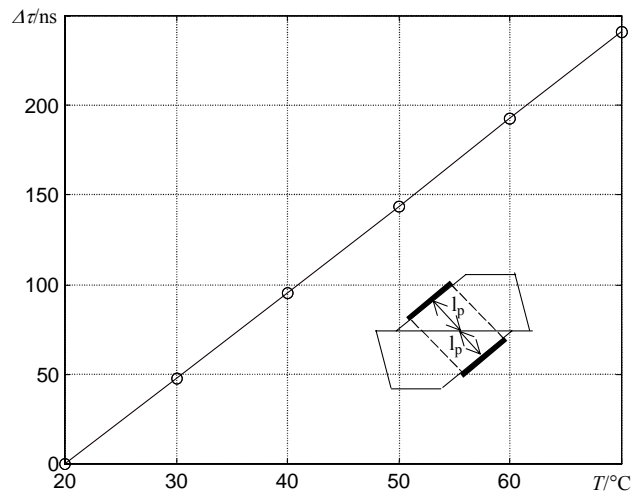
1 lentelė

Medžiaga	T°C	Ultragarso greitis, m/s	Ultragarso greičio temperatūrinis koeficientas m/s1
Polistirolas	20	2180	-1,7
Polietilenas	20	2480	-10
Kopolimeras etilenas-propilenas	20	2050	-8
Organinis stiklas	20	2820	-3
Epoksidinė derva ED-5	20	2620	-3.2
Nailonas	20	2650	-5,2
Aminoplastas	20	3000-3300	-3

Atsižvelgiant į tai, galima apskaičiuoti sklidimo trukmės pokytį:

$$\Delta\tau = \left[ \frac{(0,5\Phi_p + l_0) \cdot \text{tg}\alpha}{c_p(T) - \Delta c_p(T)} \right] - \tau. \quad (6)$$

2 pav. pateikti kampinio pjezokeitiklio, skirto šiluminės energijos apskaitai mažo skersmens vamzdžiams nuo D=50 mm iki D=300 mm, skaičiavimo rezultatai. Prizmės kampas  $\alpha=50^\circ$ , pjezoelemento skersmuo  $\Phi_p=15$  mm ir  $l_0=2$  mm. Kreivės statumas (4,8÷5,1) ns/°C parodo temperatūros įvertinimo svarbą matavimo rezultatams, jeigu nenaudojamos priemonės šiam reiškiniai eliminuoti.



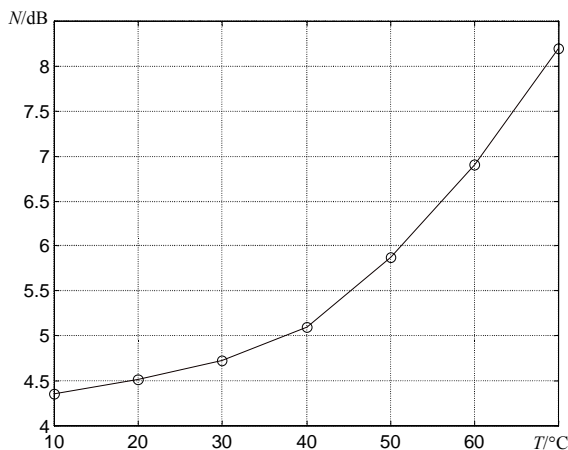
2 pav. Ultragarso sklidimo trukmės pokytio temperatūrinė priklausomybė

Iš (4) išplaukia, kad ultragarso bangų sklidimo kelias prizmėje priklauso nuo kampo, pjezoelemento dydžio ir jo tvirtinimo vietos. Didinant kampą, didėja ultragarso spindulio patekimo į srautą kampas, tačiau, padidėjus ultragarso bangų sklidimo keliui prizmėje, padidėja ultragarso signalo nuostoliai. Juos galima apskaičiuoti iš formulės

$$N = \eta_p(T)(0,5\Phi_p + l_0) \cdot \text{tg}\alpha, \quad (7)$$

$\eta_p$  - ultragarso slopinimo koeficientas, kuris priklauso nuo prizmės medžiagos, dažnio ir temperatūros.

Matavimo prietaisų akustiniuose kanaluose pageidaujama, kad ultragarso bangų sklidimo kelias prizmėje būtų kuo trumpesnis, taip pat, kad prizmės medžiagos slopinimo koeficiento temperatūrinis koeficientas būtų kuo mažesnis. 3 pav. yra parodyta ultragarso bangų nuostolių organinio stiklo prizmėje kreivė (parametrai nurodyti anksčiau) esant 2,5 MHz dažniui.



3 pav. Ultragarso bangų nuostoliai prizmėje

Nuostoliai apskaičiuoti vienai prizmei, o akustinį kanalą sudaro du pjezokeitikliai, todėl nuostoliai padvigubėja. Kylant temperatūrai ultragarso bangų slopinimo temperatūrinis koeficientas padidina nuostolius nuo kelių dešimtųjų decibelo dešimčiai laipsnių iki vieno decibelo (60-70)°C temperatūrai.

Ultragarso bangų slopinimo ir greičių temperatūriniai koeficientai kontaktinio skysčio sluoksnyje nesukelia didesnių banginio proceso absoliutinių verčių pokyčių dėl mažo sluoksnio storio (10÷70 mikronų).

Ultragarso bangų sklidimo vamzdžio sienelėje trukmė priklauso nuo sienelės storio  $h$ , ultragarso greičio  $c_s(T)$  ir ultragarso spindulio lūžio kampo  $\beta(T)$ :

$$\tau_s = \frac{h}{c_s(T) \cdot \cos \beta(T)}. \quad (8)$$

Kampas  $\beta(T)$  apskaičiuojamas iš formulės

$$\beta(T) = \arcsin \left[ \frac{c_s + \Delta c_s (T - T_0)}{c_p + \Delta c_p (T - T_0)} \sin \alpha \right]. \quad (9)$$

Jeigu vamzdžio sienelės yra plieninės, tai ultragarso greitis mažai priklauso nuo temperatūros ir (9) formulę galima supaprastinti:

$$\beta(T) = \arcsin \left[ \frac{c_s \cdot \sin \alpha}{c_p + \Delta c_p (T - T_0)} \right]. \quad (10)$$

Kaip rodo skaičiavimo rezultatai (4 pav.), temperatūrai kylant nuo 10 iki 70°C, lūžio kampas padidėja nuo 63 iki 72,5°. Organinio stiklo prizmės kampas  $\alpha=50^\circ$ . Išilginės ultragarso bangos prizmėje transformuojasi į skersines bangas vamzdžio sienelėje. Dėl kampo lūžio padidėjimo pailgėja ultragarso bangų sklidimo kelias vamzdžio sienelėje.

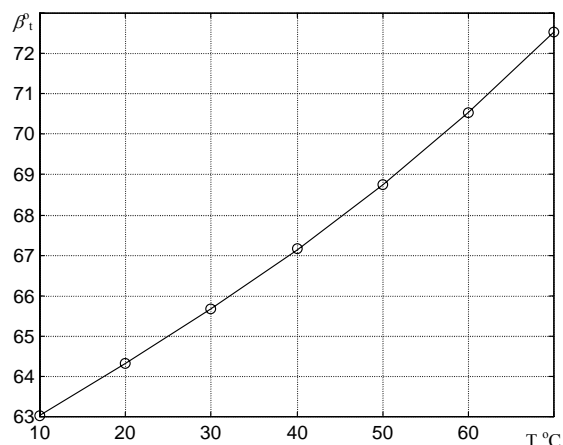
Iš 1 pav. randamas sklidimo kelias:

$$l_s(T) = h / \cos \beta(T) \quad (11)$$

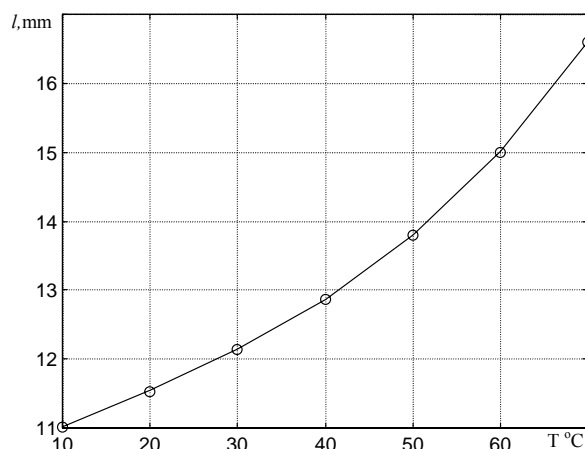
Arba, atsižvelgus į temperatūrų pokytį,

$$l_s(T) = \frac{h}{\cos \left\{ \arcsin \frac{c_s \sin \alpha}{c_p - \Delta c_p (T - T_0)} \right\}}. \quad (12)$$

Skaičiavimo rezultatai, kai vamzdžio sienelės storis  $h=5\text{mm}$  (5 pav.), rodo, kad ultragarso sklidimo kelio pailgėjimas žemose temperatūrose sudaro 0,5 mm dešimčiai laipsnių, o aukštesnėse temperatūrose daugiau kaip 1 mm dešimčiai laipsnių.



4 pav. Ultragarso spindulio lūžio kampo organinio stiklo ir plieno riboje priklausomybė nuo temperatūros

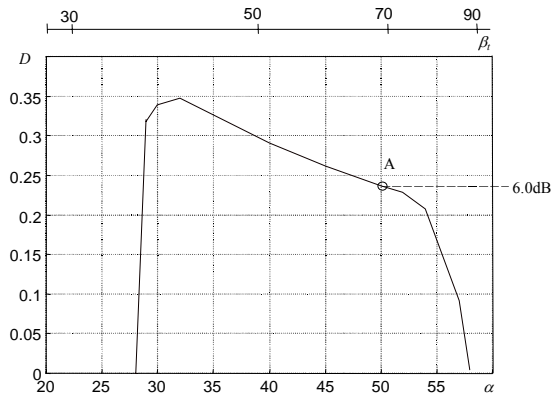


5 pav. Ultragarso bangų sklidimo kelio vamzdžio sienelėje priklausomybė nuo temperatūros

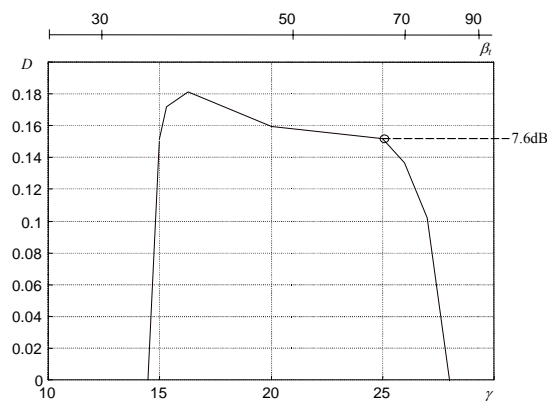
Dėl lūžio kampo padidėjimo ir sklidimo kelio pailgėjimo vamzdžio sienelėje išsiderina pjezokeitiklių aiškumas. Kuo storesnė vamzdžio sienelė, tuo didesnis pjezokeitiklio akustinės ašies poslinkis. Šį poslinkį būtina įvertinti, kai pjezokeitiklių tvirtinimo metu vamzdžio temperatūra skiriasi nuo temperatūros, kurioje atliekami matavimai. Atstumas tarp pjezokeitiklių yra suderinamas proporcingai temperatūrų skirtumui ir vamzdžio sienelės storiui.

Jeigu vamzdžių sienelės yra plastmasinės, tai ultragarso bangų nuostoliai įvertinami analoginiu būdu, kaip prizmei. Ultragarso bangų sklidimo kelias apskaičiuojamas iš (12) formulės. Vidinių nuostolių metaliniuose vamzdžiuose

galima neskaiciuoti, nes šiuo atveju didžiausius ultragarso nuostolius sudaro ribų perėjimo koeficientai. Kai prizmės kampas  $\alpha=50^\circ$ , perėjimo koeficiento reikšmė organinio stiklo ir plieno riboje atitinka tašką A, esant  $20^\circ\text{C}$  temperatūrai (6 pav.). Skersinių bangų lūžio kampas plieninio vamzdžio sienelėje  $\beta=64,2^\circ$ .



6 pav. Skersinių bangų organinio stiklo ir plieno ribos perėjimo koeficientas



7 pav. Skersinių bangų plieno ir vandens ribos perėjimo koeficientas

Ultragarso signalo nuostoliai  $-6$  dB. Temperatūrai kylant, didėja lūžio kampas  $\beta(T)$  ir taškas A pasislenka į dešinę. Dėl to sumažėja perėjimo koeficiento reikšmė. Analogiškai didėjant kampui  $\beta(T)$ , sumažėja ultragarso energijos perėjimo iš plieno į skystį koeficientas (7 pav.). Šiuo atveju perėjimo koeficiento reikšmė normaliomis darbo sąlygomis ( $T=20^\circ\text{C}$ ) atitinka tašką B (7 pav.). Lūžio kampas vandenyje  $\gamma=25$ , nuostoliai  $-7,6$  dB. Tačiau kai temperatūra artima  $70^\circ\text{C}$ , kampas  $\beta>72$  ir perėjimo koeficiento reikšmė gerokai sumažėja.

Ultragarso bangų sklaidimo trukmė skystyje

$$\tau_v = \frac{D}{c_v(T) \cdot \cos \gamma(T)}, \quad (13)$$

čia  $c_v(T)$  – ultragarso greitis skystyje,  $D$  – vidinis vamzdžio skersmuo.

Ultragarso spindulio lūžio kampas plieno ir vandens riboje:

$$\gamma(T) = \arcsin \left[ \frac{c_v + \Delta c_v (T - T_0) \sin \beta}{c_s} \right]. \quad (14)$$

Jeigu prizmės kampas  $\alpha=50^\circ$  ir vamzdžio sienelė plieninė, tai esant  $T=70^\circ\text{C}$ , lūžio kampo riba yra ties  $28$  laipsniais.

Ultragarso bangų sklaidimo akustiniame kanale trukmė nesant srauto

$$\tau = \frac{2s}{c_p(T) \cdot \cos \alpha} + \frac{2h}{c_s(T) \cos \beta(T)} + \frac{D}{c_v(T) \cdot \cos \gamma(T)}. \quad (15)$$

Esant srautui,

$$\tau_\alpha = \frac{2s}{c_p(T) \cdot \cos \alpha} + \frac{2h}{c_s(T) \cdot \cos \beta(T)} + \frac{D}{c_v(T) \cos \gamma(T) \pm u(D) \sin \gamma(T)}, \quad (16)$$

čia  $u(D)$  – srauto greitis.

Iš visų ultragarso bangų sklaidimo ir lūžio parametrų akustiniame kanale nuo temperatūros nepriklauso prizmės kampo reikšmė. Vamzdžio skersmuo, sienelės storis, prizmės matmenys veikiant temperatūrai plečiasi. Jų parametrai gali būti paskaičiuoti iš šiluminio plėtimosi koeficiento.

## Išvados

Apskaičiuotos ultragarso bangų sklaidimo priklausomybės nuo temperatūros gali būti panaudotos neinvazinių matavimo metodų algoritmuose matavimo neapibrėžčiai sumažinti, kai matavimai atliekami temperatūrų diapazone nuo  $10$  iki  $70^\circ\text{C}$ .

Ultragarso bangų sklaidimo nuostolių priklausomybė nuo temperatūros parodo akustinių elementų medžiagų savybių ir konstrukcijos svarbą ultragarso signalo perdavimui.

Tvirtinant neinvazinius pjezokeitikius ant matavimo objekto ir prietaisą kalibrauojant, būtina įvertinti esamą objekto temperatūrą. Jei objekto (vamzdžio) temperatūra skiriasi nuo temperatūros, kurioje atliekami matavimai, atstumas tarp pjezokeitiklių suderinamas proporcingai temperatūrų skirtumui ir vamzdžio sienelės storiui.

## Literatūra

1. **Lynworth L. C.** Ultrasonic measurements for process control // N.Y. Academic Press. 1989.- 694 p.
2. **Funk B., Mitzkus A.** Acoustic transfer function of the clamp-on flowmeter // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. 1996. Vol. 43. No.4. – P. 569-574.
3. **Lynworth L.C.** Ultrasonic flowmeters/physical acoustics. New York: Academic Press. 1979. P.408-502.
4. **Vladišauskas A.** Neinvazinių ultragarsinių srauto matuoklių elektroakustinio kanalo banginių procesų analizė// Ultragarsas. Kaunas: Technologija, 1997. Nr.2(28). P. 20-22.
5. **Svensson B., Delsing J.** Application of ultrasonic clamp-on flow meters for in situ tests of billing meters in district heating systems // Flow measurement and instrumentation. 1998. No.9. P. 33-41.

A. Vladišauskas

## The influence of temperature on propagation of ultrasonic waves in acoustic channel of clamp-on meter

### Summary

The dependencies of the ultrasonic waves spread parameters upon temperature in acoustic channel are calculated. The calculation of an ultrasound speed and attenuation losses were carried out for principal elements of the acoustic channel. The results can be used in the algorithms of the flow rate meters.

Pateikta spaudai: 2000 06 12

DOI: 10.5755/j01.u.35.2.7976