

## Akustinio signalo perdavimo į dujas modeliavimas

L. Jakevičius, A. Vladišauskas

Kauno technologijos universitetas

Prof. K.Baršausko ultragarso mokslo institutas

Studentų g. 50-136, 3031 Kaunas

El.paštas: leja@tef.ktu.lt

### Įvadas

Šiuolaikiniuose technologiniuose procesuose dažnai tenka matuoti vamzdynais transportuojamų dujinių produktų debitą, judėjimo greitį ir kitus parametrus. Šiems tikslams skysčiuose sėkmingai taikomi akustiniai matavimo metodai. Juos taikant dujų srautams matuoti, iškyla problema perduoti akustinius signalus matavimo kanale. Tai nulemia didelio akustinių varžų  $\rho c$  skirtumo tarp kietos (pvz. pjezokeramikos CTS-19  $\rho_p c_p = Z_p = 30 \cdot 10^6$  kg/(m<sup>2</sup>s)) ir dujinės ( $\rho_d c_d = 10^2 \dots 5 \cdot 10^2$  kg/(m<sup>2</sup>s)) aplinkos. Dėl to akustinės energijos perdavimas iš kietos aplinkos į dujinę, palyginti su energijos perdavimu į vandenį, sumažėja apie 60 dB. Dėl šios priežasties dujų srautų matavimui praktiškai tinka tik invaziniai matavimo metodai (1a pav.). Bet ir čia susiduriama su problemomis:

a) pjezokeitiklių tvirtinimo ertmėse ir jų aplinkoje, judant dujų srautui, susiformuoja sūkuriai,

b) matavimo kanale tarp pjezokeitiklių darbinį paviršių atsiranda daugkartiniai atspindžiai.

Visa tai dar labiau apsunkina akustinių matavimo metodų naudojimą dujų srautų kontrolei. Todėl, siekiant sėkmingai taikyti akustinius matavimo metodus dujų srautų kontrolei, reikia ieškoti būdų padidinti akustinio signalo perdavimo koeficientą matavimo kanale bei sumažinti išvardytųjų faktorių įtaką. Vienas šios problemos sprendimo kelių gali būti pjezokeitiklių tvirtinimo nišų užpildymas specialiomis akustinio suderinimo medžiagomis (1b pav.), kurios padėtų pagerinti akustinio signalo perdavimo koeficientą. Toks nišų užpildymas taip

pat padėtų išvengti minėtųjų invazinių akustinių matavimo metodų trūkumų.

### Teorinis modeliavimas

Sakykime kad plokštuma  $z=0$  skiria dvi aplinkas. Šių aplinkų tankiai yra  $\rho$  ir  $\rho'$ , o akustinių signalų sklaidimo greičiai jose atitinkamai –  $c$  ir  $c'$ . Tegul iš pirmos aplinkos į plokštumą  $z=0$  kampu  $\alpha$  krinta plokščia harmoninė akustinė banga (2 pav.), kurios sukeliama akustinis slėgis  $p$  aprašomas lygtimi

$$p = p_a e^{(ikx \sin \alpha + ikz \cos \alpha)}; \quad (1)$$

čia  $p_a$  – akustinio slėgio amplitudė;  $k$  – bangos skaičius,  $x$  ir  $z$  – koordinatės.

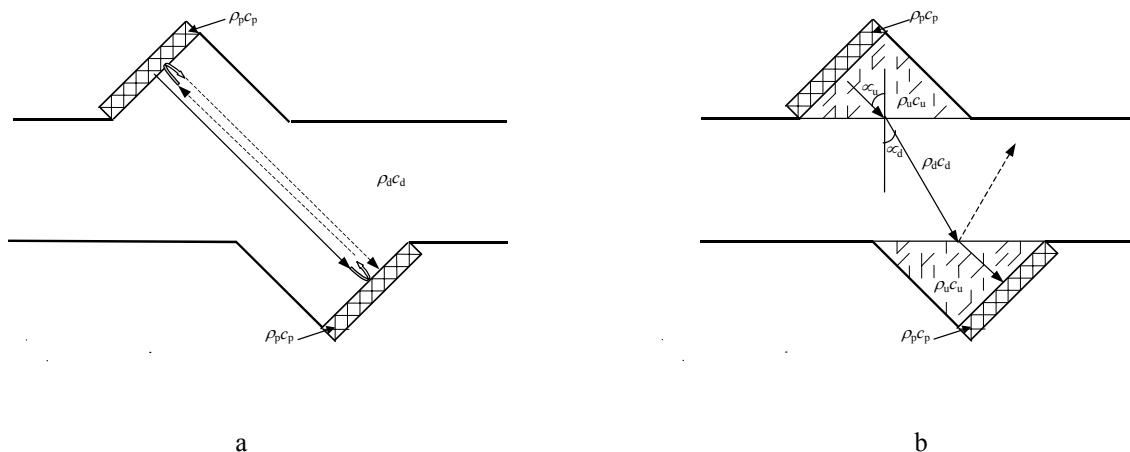
Aplinkų riboje krintanti banga suskils į dvi plokščias harmonines bangas: atsispindėjusią ir perėjusią į antrąją aplinką, kurių sukeliama akustiniai slėgiai aprašomi lygtimis

$$\tilde{p} = V p_a e^{(ikx \sin \alpha + ikz \cos \alpha)}, \quad (2)$$

$$p' = W p_a e^{(ik'x \sin \alpha' + ik'z \cos \alpha')}; \quad (3)$$

čia  $\tilde{p}$  ir  $p'$  – atitinkamai atsispindėjusios ir perėjusios bangos slėgiai;  $V$  – bangos atspindžio koeficientas;  $W$  – bangos perėjimo koeficientas.

Iš bendrosios akustikos [1,2,3] žinoma, kad, akustinei bangai einant iš vienos skystos ar dujinės aplinkos į kitą dujinę ar skystą aplinką, perėjusios ir krintančios bangos akustinių slėgių santykis (toliau vadinsime akustinio



1 pav. Invazinis akustinis dujų srauto greičio matavimo kanalas: a) keitiklių tvirtinimo nišos atviros; b) užpildytos akustinio suderinimo medžiaga

signalu perėjimo koeficientu) dažniausiai išreiškiamas šia lygtimi:

$$W = \frac{2\rho'c'/\cos\alpha'}{\rho'c'/\cos\alpha' + \rho c/\cos\alpha} \quad (4)$$

Naudodamiesi (4) lygtimi surasime pilnutinį akustinio signalo perėjimo koeficientą matavimo kanalui ir išanalizuosime galimybes padidinti santykį signalas – triukšmas. Paprastai akustinio perėjimo koeficientas matavimo kanalui pjezokeramika – oras – pjezokeramika yra  $5,5 \cdot 10^{-5}$ . Kitom dujoms gali būti dar mažesnis. Pvz., metanui tesiekia  $4,2 \cdot 10^{-5}$ . Be to, elektroakustinių keitiklių tvirtinimo ertmėse ir jų aplinkoje susiformavę sūkuriai bei daugkartiniai atspindžiai matavimo kanale šį santykį dar labiau sumažina.

Sakykime, kad nišą, esančią tarp elektroakustinio keitiklio darbinio paviršiaus ir tiriamo ruožo, užpildome skysčiu ar kompozicine žele ir nuo tiriamo ruožo atskiriame plona plėvele ar tinkleliu. Tuomet akustinis signalas, iki patekdamas į tiriamą ruožą, turės pereiti dvi skiriamąsias aplinkų ribas: a) pjezokeramika – nišos užpildas; ir b) nišos užpildas – tiriamosios dujos (2 pav.). Pirmoji riba yra tarp kieto (pjezokeramika) ir skysto (nišos užpildas) kūno. Tačiau pjezoelemento spinduliuojama akustinė banga yra statmena į šių aplinkų skiriamąją ribą. Todėl šių aplinkų riboje generuojamos tik išilginės akustinės bangos. Tai šioms aplinkoms akustinį bangų perėjimo koeficientą taip pat galima apskaičiuoti taikant algoritmą (4). Tokiu atveju akustinio signalo perėjimo koeficientas iš pjezoelemento į tiriamąjį ruožą užpildančias dujas yra šis:

$$W_{pd} = W_{pu}W_{ud}; \quad (5)$$

čia  $W_{pu}$  ir  $W_{ud}$  – atitinkamai pjezokeramika – užpildas ir užpildas - dujos aplinkų ribų perėjimo akustiniai koeficientai. Į (5) lygtį įrašę (4) formulę ir panaudoję Snelijaus dėsnį, gauname:

$$W_{pd} = \frac{4\rho_u c_u}{(\rho_p c_p + \rho_u c_u) \left( 1 + \frac{\rho_u c_u \cos\alpha_d}{\rho_d \sqrt{c_d^2 - c_u^2 \sin^2\alpha_d}} \right)}; \quad (6)$$

čia  $\rho_p$  – pjezokeramikos tankis;  $c_p$  – akustinių bangų sklidimo greitis pjezokeramikoje;  $\rho_u, c_u$  – atitinkami užpildo ir  $\rho_d, c_d$  – tiriamą ruožą užpildančių dujų parametrai;  $\alpha_d$  – kampas tarp akustinio signalo sklidimo krypties tiriamą ruožą užpildančiose dujose ir normalės ribai užpildas - dujos. Analogiškai surandama ir akustinio signalo perėjimo koeficientas priešinga kryptimi (iš tiriamąjį ruožą užpildančių dujų į pjezoelementą):

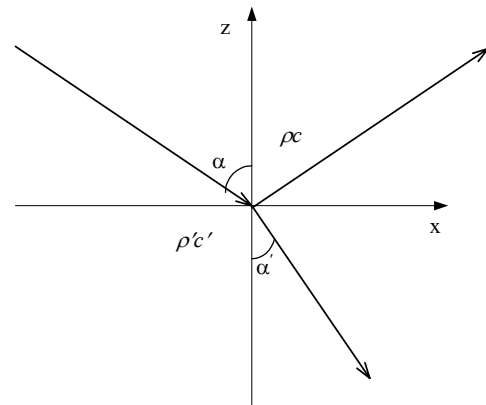
$$W_{dp} = \frac{4\rho_p c_p}{(\rho_p c_p + \rho_u c_u) \left( 1 + \frac{\rho_d \sqrt{c_d^2 - c_u^2 \sin^2\alpha_d}}{\rho_u c_u \cos\alpha_d} \right)} \quad (7)$$

Pilnutinis matavimo kanalo akustinio signalo perėjimo koeficientas  $W_{pp}$  nuo siunčiančiojo iki priimančiojo pjezokeitiklių yra

$$W_{pp} = W_{pd}W_{dp} \quad (8)$$

Tai į (8) formulę įrašę (6) ir (7) išraiškas, gauname:

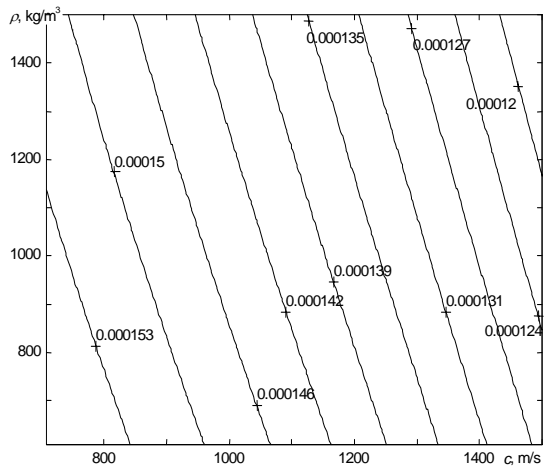
$$W_{pp} = \frac{16\rho_u^2 c_u^2 \rho_p c_p \rho_d \sqrt{c_d^2 - c_u^2 \sin^2\alpha_d} \cos\alpha_d}{(\rho_p c_p + \rho_u c_u)^2 \left( \rho_u c_u \cos\alpha_d + \rho_d \sqrt{c_d^2 - c_u^2 \sin^2\alpha_d} \right)^2} \quad (9)$$



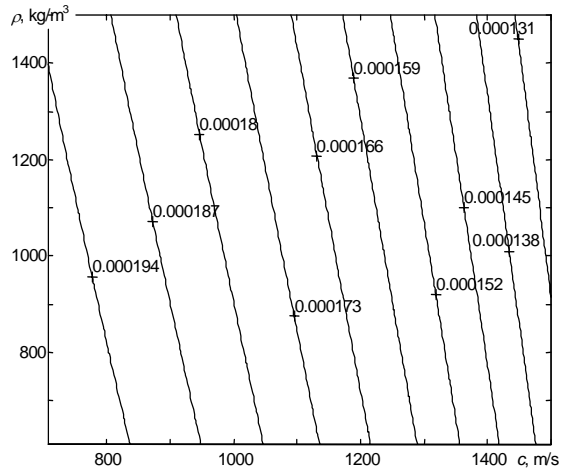
2 pav. Akustinio signalo perėjimas per dviejų aplinkų ribą

Dabar išanalizuokime, kokią įtaką akustinio signalo perdavimui turi elektroakustinių keitiklių tvirtinimo ertmės užpildančios medžiagos fizinės savybės. Tuo tikslu, naudodamiesi algoritmu (9), atlikime kompiuterinį modeliavimą, kuris padės įvertinti šios medžiagos tankio ir akustinių signalo sklidimo greičio joje įtaką akustinio signalo perdavimo koeficientui matavimo kanale.

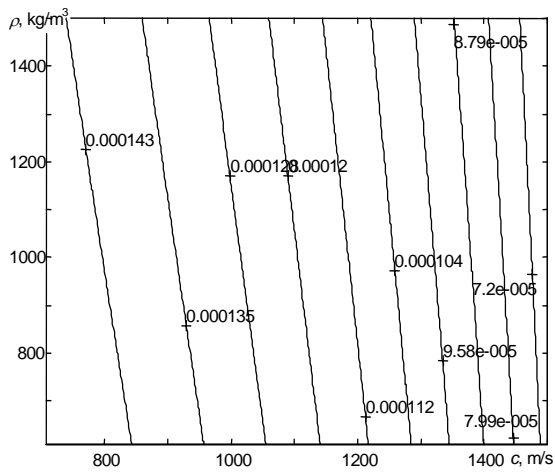
Apskaičiavimai atlikti, kai matavimo kanalas užpildytas metano dujomis (3 a, c, e pav.), ir oru (3. b, d, f pav.). Metano tankis  $\rho=0,72\text{kg/m}^3$  bei akustinių signalų sklidimo greitis jose  $c=430\text{m/s}$ . Oro atitinkami parametrai -  $\rho=1,2\text{kg/m}^3$  ir  $c=340\text{m/s}$ . Akustinio signalo perėjimo koeficientas apskaičiuotas, kai kampas  $\alpha$  tarp akustinio signalo sklidimo krypties matavimo kanalą užpildančiose dujose ir normalės vamzdžio sienelei yra  $10^\circ$  (3 a, b pav.),  $15^\circ$  (3 c, d pav.) ir  $20^\circ$  (3 e, f pav.). Elektroakustinių keitiklių tvirtinimo ertmės užpildančių medžiagų parametru kitimo diapazonai parinkti atsižvelgiant į realiai egzistuojančių medžiagų parametrus ( $c_u=700\dots1500\text{m/s}$ ,  $\rho_u=600\dots1500\text{kg/m}^3$ ). Pvz., panašius parametrus turi kai kurios silikoninės alyvos. Deja, šie parametrai gana tolimi nuo optimalių akustinio signalo matavimo kanalo perėjimo parametru. Tai lemia akustinio signalo matavimo kanalo perėjimo ypatumus. Akustinio signalo perėjimo koeficientas mažai priklauso nuo nišos užpildančios medžiagos tankio, ir ši priklausomybė mažėja didėjant akustinio signalo sklidimo kampui  $\alpha_d$  (3 e, f pav.). Tuo tarpu akustinio signalo sklidimo greitis  $c_u$  keitiklių nišas užpildančioje medžiagoje turi žymią įtaką matavimo kanalo akustinio perėjimo koeficientui. Mažėjant akustinio signalo sklidimo greičiu  $c_u$ , akustinio matavimo kanalo perėjimo koeficientas  $W_{pp}$  didėja. Ši priklausomybė tuo ryškesnė, kuo didesnė kampo  $\alpha_d$  reikšmė. Paties kampo  $\alpha_d$  didinimas akustinio signalo perėjimo koeficientą mažina.



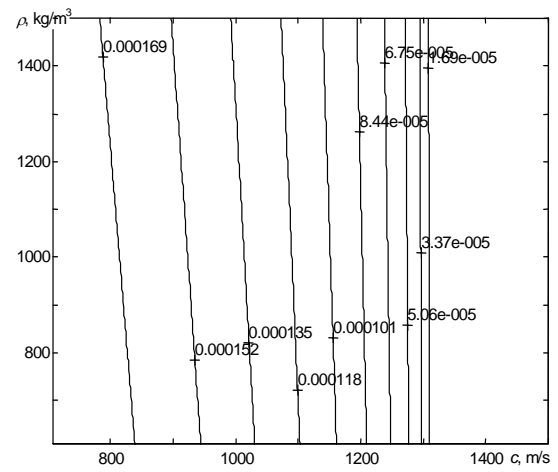
a



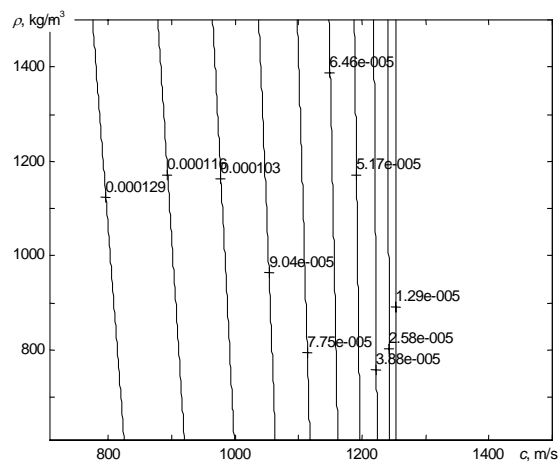
b



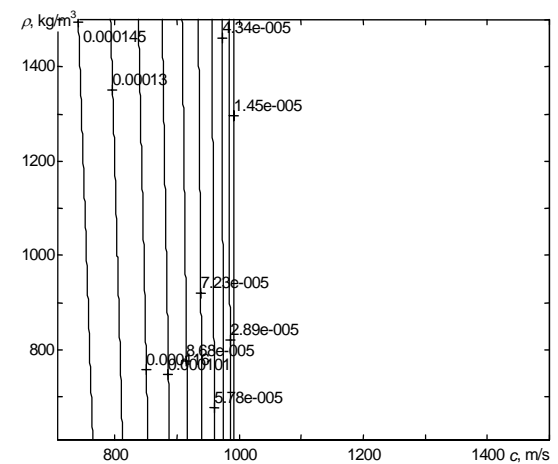
c



d



e



f

3 pav. Matavimo kanalo akustinio signalo perėjimo koeficiento priklausomybė nuo elektroakustinių keitiklių tvirtinimo nišas užpildančios medžiagos tankio ir akustinių signalų greičio joje

Gauti modeliavimo rezultatai rodo, kad, atitinkamai parinkus elektroakustinių keitiklių tvirtinimo nišas užpildančią medžiagą, palyginti su įprastiniais matavimo kanalais (1 a pav.), akustinio signalo perdavimo koeficientą galima padidinti apie keturis kartus. Be to, šiame matavimo kanale išvengiama pjezokeitiklių tvirtinimo ertmėse ir jų aplinkoje atsirandančių sūkurių bei daugkartinių atspindžių tarp pjezokeitiklių darbinių paviršių.

### Išvados

Užpildant elektroakustinių keitiklių tvirtinimo ertmes medžiagomis, turinčiomis mažą akustinę varžą, akustinio signalo perėjimo koeficientą matavimo kanale galima padidinti apie 4 kartus. Didžiausias akustinio signalo perėjimo koeficientas gaunamas esant mažoms kampo  $\alpha_d$  reikšmėms. Perėjimo koeficientą galima padidinti parinkus keitiklių tvirtinimo nišų užpildymo medžiagas, kuriose akustinių signalų greitis  $c_u$  yra mažas. Šių medžiagų tankis  $\rho_u$  akustinio signalo perėjimo koeficientui lemiamos įtakos neturi. Be to, tokiame matavimo kanale išvengiama

akustinio signalo reverberacijų ir dujų srauto iškreipymo matavimo kanale.

### Literatūra

1. **Lependin L. F.** Akustika. Moskva: Vysšaja škola, 1978. 448p. (rusų k.).
2. **Isakovič M. A.** Bendroji akustika. Moskva: Nauka, 1973. 496 p. (rusų k.).
3. **Brechovskich L. M.** Bangos sluoksniuotose aplinkose. Moskva, 1957. 502 p. (rusų k.).

L.Jakevičius, A.Vladišuskas

### Simulation of transmission of acoustic signal to gas

#### Summary

The transmission of acoustic signal to gas through a filling of the transducers recess were calculated. The calculation evaluated the change speed of ultrasound in the range from 600 m/s to 1500 m/s and density range from 600 kg/m<sup>3</sup> to 1500 kg/m<sup>3</sup>. A load of the filling was: air and methan.

Pateikta spaudai: 2000 10 02

DOI: 10.5755/j01.u.36.3.7986