

20. HÄÄLELAINNE PIKKUSE JA HÄÄLE KIIRUSE MÄÄRAMINE GAASIS.
SUHTE c_p/c_v MÄÄRAMINE.

Teoreetiline sissejuhatus.

Heli kujutab endast perioodiliselt muutuvate elastsete deformatsioonide (surve ja venituse, tihendus ja hõrendus) levimist aines. Seega on heli lainetusprotsess, teda iseloomustavad lainepikkus, sagedus, laine levimise kiirus jt. lainetusprotsessidele omased suurused.

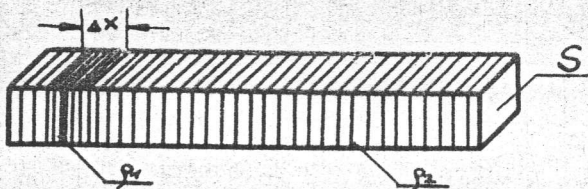
Laine levimiskiiruse arvutamiseks võib vaadelda üksiku elastse impulsi levimist aines. Elastsest ainest varva ühele otsale mõjuva väga lühiajalise varva telje sihilise jõu mõjul nihkuvad varva otsmised kihid, seal asuvad aineosakesed saavad teatud kiiruse; varva otsas tekib kitsas kokkusurutud (või väljavenitatud, olenevalt jõu mõjumise suunast) kiht. Tekkivate elastsusjõudude toimel peatuvad äärmised kihid ja hakkavad liikuma järgnevad - osakeste nihete, kiiruste ja deformatsiooni impulss levib edasi piki varba.

Vaatleme konkreetset surve impulssi.

Olgu deformeeritud kihi paksus Δx , varva ristlõike pindala S (joon. 1). Varva aine tihedus deformeerimata osas olgu ρ , deformeeritud osas aga ρ' . Liikuva tihenduse mass

$$\Delta m = \Delta \rho S \Delta x,$$

kus $\Delta \rho = \rho' - \rho$ - "tihenduse tihedus".



Joon. 1.

Liikumise hulk, mida impulss kannab:

$$\Delta(mv) = v \cdot \Delta m = Sv \Delta \rho \Delta x,$$

kus v - impulsi levimise kiirus. Mitte väga suurte deformatsioonide korral tiheduse muutus $\Delta \rho$ ("tihenduse tihedus") on võrdeline suhtelise pikenemisega - deformatsiooniga

$$\varepsilon = \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x} :$$

$$\Delta \rho = \varepsilon \rho$$

Siit

$$\Delta(mv) = Sv \varepsilon \rho \Delta x.$$

Liikumise hulga muutumise kiirus on teatavasti võrdne mõjuva jõuga, seega

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \quad (1)$$

$$= Sv \varepsilon \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} = S \varepsilon \rho v^2.$$

Hooke'i seadusest

$$F = \varepsilon ES.$$

$$\varepsilon ES = S \varepsilon \rho v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

Seega elastse impulsi levimise kiirus tahkes aines on määratud aine elastsusmooduli ja tihedusega, ei olene deformatsiooni suurusest (mitte eriti suurte deformatsioonide korral, kui kehtib veel Hooke'i seadus ja eeldus $\Delta \rho = \varepsilon \rho$).

Tihenduse impulsi levimisel gaasis ilmneb aga impulsi levimiskiiruse otsene sõltuvus gaasi tihedusest impulsis. Ainult nõrkade impulsside (mitte eriti tugevate helide) korral, kus tiheduse muutuse impulsis võib arvestamata jätta, on heli levimise kiirus igale gaasile omane suurus ja oleneb gaasi temperatuurist.

Tehes läbi eelnevaga analoogilise tuletuskäigu, saame:

$$v^2 = \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \quad (3)$$

(kuna $F = S \Delta p$, kus Δp - rõhu muutus impulsis, $\frac{d(mv)}{dt} = S \Delta \rho v^2$). $\frac{\Delta p}{\Delta \rho} \approx \frac{dp}{d\rho}$ arvutamiseks tuleb lähtuda sellest, et kiirus impulsis toimuv kokkusurumine on adiabaatiline ja allub võrrandile

$$pV^\alpha = \text{const},$$

kus $\alpha = \frac{c_p}{c_v}$ - gaasi isobaarilise ja isokoorilise erisoojuse suhe.

Et $V \sim \frac{1}{\rho}$, siis

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho^\alpha} &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha}, \\ p &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha} \rho^\alpha, \\ \frac{dp}{d\rho} &= \frac{p_0}{\rho_0^\alpha} \cdot \alpha \cdot \rho^{\alpha-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Siin p_0 ja ρ_0 on gaasi rõhk ja tihedus häirimata osas, p ja ρ aga tihenduses. Siit ongi näha, et impulsi levimise kiirus sõltub gaasi tihedusest tihenduses ρ . Ainult kui $\rho \approx \rho_0$ (väga väikesed deformatsioonid):

$$\frac{dp}{d\rho} = \alpha \frac{p_0}{\rho_0}. \quad (5)$$

ρ_0 võib arvutada gaasi oleku võrrandist

$$\begin{aligned} p_0 V &= \frac{m}{\mu} RT; \\ \rho_0 &= \frac{m}{V} = \frac{p_0 \mu}{RT}. \end{aligned}$$

$$v = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (6)$$

Käesoleva töö eesmärgiks on heli levimiskiiruse eksperimentaalne määramine gaasis kahel meetodil ja valemist (6) erisoojuste suhte leidmine.

A. Seisvate lainete meetod.

1. Tööülesanne.

Häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramine gaasis seisvate lainete meetodil. Gaasi erisoojuste suhte γ arvutamine.

2. Töövahendid.

Mikrofoni ja telefoniga varustatud muudetava pikkusega resonantsitoru, helisagedusgeneraator, ostsilloskoop, termomeeter (toatemperatuuri piirkonnas mõõtmiseks).

3. Meetodi teooria.

Heli levimiskiiruse eksperimentaalseks määramiseks aines võib kasutada seisvate lainete meetodit. Kui varva, mille pikkus on l , üht otsa perioodiliselt deformeerida (kokku suruda ja venitada) sinusoidaalselt muutuva jõuga, siis levib varvas sinusoidaalne tasapinnaline elastne laine, mis peegeldub varva teiselt otsalt; need kaks lainet interfereerudes moodustavad seisva laine. (Seisev laine võib üldiselt tekkida kahe mistahes sama sageduse ja võrdsete amplituudidega vastassuunalise tasalaine interfereerumisel.) Kui varva teine ots on kinnitatud (peegeldumine toimub tihedamalt keskkonnalt), siis muutub peegeldumisel osakeste nihete ja kiiruste laine faas π võrra. Levi-va ja peegeldunud laine võrrandid on vastavalt

$$y_1 = Y_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

$$y_2 = -Y_0 \sin \omega \left(t - \frac{2l-x}{v} \right).$$

Seisva laine võrrand

$$y = 2 Y_0 \sin \omega \frac{\ell - x}{v} \cos \omega \left(t - \frac{\ell}{v} \right). \quad (7)$$

Siin y (y_1, y_2) on võnkuva ainepunktide nihe tasakaaluasendist ajamomendil t ; x on selle ainepunktide kaugus varva otsast, kuhu on rakendatud sinusoidaalne jõud; Y_0 - leviva laine amplituud, v - laine levimise kiirus, ω - mõjuva jõu (ka laine) ringsagedus.

Seisvas laines võnkuvate ainepunktide amplituud ($Y = 2 Y_0 \sin \omega \frac{\ell - x}{v}$) muutub ruumis sinusoidaalselt. Esinevad punktid, mis üldse ei võngu (sõlmed), ja punktid, mis võnguvad maksimaalse amplituudiga (paisud). Sõlmpunktide koordinaadid saab arvutada tingimusest

$$\begin{aligned} \sin \omega \frac{\ell - x}{v} &= 0; \\ \omega \frac{\ell - x}{v} &= k\pi, \\ x &= \ell - \frac{k\pi v}{\omega} = \ell - k \frac{\lambda}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Siin λ on häälelaine pikkus. Samuti võib arvutada paisupunktide koordinaadid. On näha, et nii paisud kui sõlmed korduvad varvas iga poole lainepikkuse tagant:

$$x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda}{2}.$$

Kas seisva laine amplituud oleneb ka varva pikkusest ja kuidas käituvad varva otsad?

On näha, et kinnitatud otsas ($x = \ell$) on sõlmpunkt. Teise otsa võnkeamplituud on määratud aga mõjuva (sundiva) jõuga. Kui varva pikkus on selline, et sellesse otsa peaks tulema näiteks seisva laine pais ($\ell = k \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}$), siis aineosakeste maksimaalne võnkeamplituud varvas ongi määratud võnkeamplituudiga selles otsas. Mida lähemal asub aga varva see ots sõlmpunktile ($\ell \approx k \frac{\lambda}{2}$), seda suurem on võnkeamplituud paisudes. Kui $\ell = k \frac{\lambda}{2}$ ja varva mõlemas otsas on sõlmpunkt, siis on paisukohtades antud sundiva jõu jaoks maksimaalne võnkeamplituud (see kasvaks lõpmatult, kui oleks ideaalne keskkond, kus võnkumised ei

sumbu). Amplituudi suurenemise põhjuseks on ka asjaolu, et korduvalt peegeldunud lained on kõik samas faasis ja tugevad üksteist - sellise pikkusega varb resoneerib antud sagedusele.

Eelnevast selgub lihtne meetod häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramiseks gaasides. Tõepoolest, tekitades mõlemast otsast suletud, muudetava pikkusega gaasisambas kindla sagedusega häälelained (sulgedes metallitoru ühe otsa näit. telefoni membraaniga), võib leida mitu samba pikkust, mille juures gaasisambas resoneerib antud sagedusega. Kahe sellise, teineteisest kõige vähem erineva samba pikkuse vahe on $\frac{\lambda}{2}$. Hääle kiiruse saab leida valemist

$$v = \lambda f. \quad (9)$$

Valemist (6) saab leida ka gaasi erisoojuste suhte γ , määranud eelnevalt temperatuuri.

4. Katseseadme kirjeldus.

Häälelaine pikkuse mõõtmiseks antud katses kasutame spetsiaalset muudetava pikkusega resonantsitoru (joon. 2). Toru ühest otsast juhitakse väikese torukese kaudu sisse heli telefoni T membraanilt, teine ots on suletud mikrofooni M membraaniga. Resonantsitoru ise koosneb kahest pisut erinevate diameetritega torust; peenem toru käib jämedama sisse. Kahe stutseri kaudu saab juhtida torust läbi uuri-tava gaasi voolu; õhu korral stutsereid ei kasutata.



Joon. 2.

Peenemale torule on peale kantud millimeeterskaala, mis võimaldab mõõta otseselt samba kahe resoneeriva pikkuse erinevust, mõõtmata samba enda pikkust. Skaala on valmistatud metallmõõtjoonlaudadele esitatavatele nõuete kohaselt.

Heli tekitatakse telefoniga, mida ergutatakse helisagedusgeneraatoriga. Resonantsi kindlakstegemiseks kasutatakse mikrofoni, mis muudab keskkonna (gaasi) elastsed võnkumised elektrilisteks võnkumisteks (vahelduvpingeks). Resonantsi olukorras tekib maksimaalse amplituudiga vahelduvpinge. Mikrofonis tekkinud vahelduvpinget mõõdetakse ostsilloskoobi abil.

Helisagedusgeneraatori ja ostsilloskoobiga tutvumiseks tuleb kasutada riistade tehnilisi juhendeid.

5. Töö käik.

1. Ühendame telefoni helisagedusgeneraatoriga. Mikrofon ühendame ostsilloskoobi Y-telje sisendklappidega. Lülime mõlemad aparaadid võrku, laseme soojeneda 5 - 10 minutit. Reguleerime telefonile antava pinge küllalt suureks, nii et heli on üle toa selgesti kuulda. Seejärel reguleerime ostsilloskoobi laotusgeneraatori sageduse ja sünkronisatsiooni amplituudi parajaks, nii et ekraanil tekiks 5 - 10 sinusoidi täisperioodi. Vähendame helitugevust miinimumini (et mitte segada teisi ruumisviibijaid), nii et sinusoid ekraanil oleks siiski vähemalt ca 5 cm amplituudiga.

2. Lainepikkuse määramiseks tuleb leida gaasisamba pikkuste vahe kahe resonantsiolukorra puhul. Resonantsiolukorra määrame, hinnates vahelduvpinge amplituudi maksimumi ostsilloskoobi ekraanil silma järgi. Et see maksimum ei ole toru pikkuse muutmisel mitte eriti teravalt väljenduv, tekib skaalal helitugevuse maksimumile vastava näidu määramisel juhuslikku laadi viga. Selle hindamiseks peame määrama lainepikkuse vähemalt 5 korral. Selleks on aga jälle mitu võimalust - võib määrata skaala näidud antud sagedusega heli korral kõikvõimalikes resonantsiolukordades, võib aga korraldata katset ka 2 resonantsiolukorra puhul mitu korda. Sobi-

vaima meetodi valikul tuleb lähtuda mõõtmistulemuse piirvea miinimumi nõudest.

3. Määratud lainepikkuse vähemalt 5 erineva sageduse korral ja gaasi temperatuuri t , arvutame hääle kiiruse v_t sellel temperatuuril. Arvutame hääle kiiruse 0°C juures valemist

$$v_0 = \frac{v_t}{1 + 0,004 t}.$$

Arvutame erisoojuste suhte α .

B. Interferentsimeetod.

1. Tööülesanne.

Häälelaine pikkuse ja hääle kiiruse määramine gaasis interferentsimeetodil. Gaasi erisoojuste suhte α määramine.

2. Töövahendid.

Mikrofoni ja telefoniga varustatud Quincke toru, helisagedusgeneraator, ostsilloskoop, termomeeter.

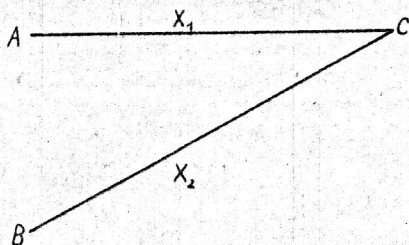
3. Meetodi teooria ja katseseadme kirjeldus.

Kahe või mitme ühesuguse sagedusega lainetuse liitumist keskkonnas nimetatakse interferentsiks. Liitugu punktidest A ja B väljunud lainetused punktis C (joon. 3). Kui osakeste võnkumised mõlemas laines on samasihilised ja lainelikkad koherentsed, siis punkti C võnkeoleku saame liidetavate võnkumiste algebralisel liitmisel.

$$y = y_1 + y_2,$$

kus

$$y_1 = a_1 \sin \omega \left(t - \frac{x_1}{v} \right),$$
$$y_2 = a_2 \sin \omega \left(t - \frac{x_2}{v} \right).$$



Joon. 3.

Liitvõnkumiste amplituudi jaoks saame avaldise

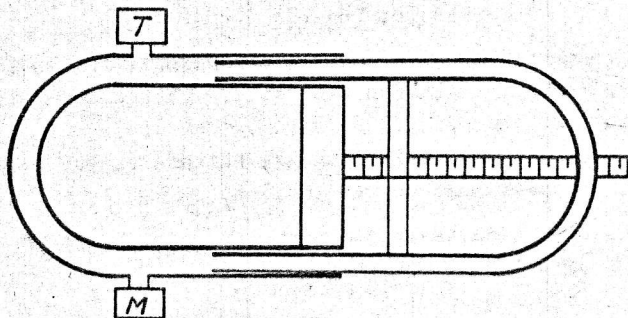
$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos 2\pi \frac{x_1 - x_2}{\lambda}}$$

Võnkumine toimub minimaalse amplituudiga, kui

$$x_1 - x_2 = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (10)$$

See valem ongi aluseks lainepikkuse määramisel.

Koherentsete lainete tekitamiseks, milles osakeste võnkumised oleksid samasihilised, võib kasutada Quincke toru (joon. 4). Ühe painutatud metalltoru otsad käivad vabalt teise toru otste sisse; torud koos moodustavad suletud ringkanali. Väiksema diameetriga toru saab teise seest rohkem või vähem välja tõmmata (tromboonisarnane süsteem), nihke suurus asendist, kus see toru on kõige sügavamal, on millimeeterskaala abil mõõdetav.



Joon. 4.

Telefonist T tulev helivoog jaguneb kaheks koherentseks laineks, mis, läbinud ringkanali erinevad harud, interfereeruvad, andes mikrofoni M kohal interferentsi maksimumi, miinimumi või mingi osakeste vahepealse amplituudiga võnkeoleku. Olgu süsteem ehitatud nii, et väljatõmmatava toru kõige sügavamas asendis, mis vastab skaala nullnäidu-

le, on ringkanali mõlema haru pikkused võrdsed. Siis on lainete käiguvahe selles asendis 0 ja mikrofoni kohal on interferentsi maksimum. Esimese miinimumi saamiseks peab siis kanali üht haru pikendama $\frac{\lambda}{2}$ võrra. On selge, et kui selleks tuleb toru pikkuse A_1 võrra välja tõmmata, kehtib seos:

$$2 A_1 = \frac{\lambda}{2},$$

millest

$$v = 4 A_1 f,$$

kus $f = \frac{v}{\lambda}$ on heli sagedus. Üldiselt, n -nda miinimumi saamiseks vajalik nihe A_n on seotud lainepikkusega:

$$A_n = (2n-1) \frac{\lambda}{4} \quad (11)$$

ja kiirusega

$$v = \frac{4}{2n-1} A_1 f. \quad (12)$$

4. Töö käik.

1. Kontrollime, kas skaala nullseisule vastab interferentsi maksimum (kuidas seda teha?). Kui see on nii, võime kasutada valemeid (11) ja (12). Kui see aga ei ole nii, tuleb lainepikkus arvutada skaala näitude vahest kahe maksimumi või miinimumi korral (kuidas?).

2. Mõõtmised teeme juhendi osas A toodud juhiste kohaselt. Arvutame λ , v_t , v_0 ja α .

G. Lisaküsimusi ja -ülesandeid.

1. Selgitada elastse impulsi peegeldumist tihedamalt ja hõredamalt keskkonnalt (vastavalt varva, õhusamba jne. kinnitatud ja lahtiselt otsalt). Faasimuutused nihete, kiiruste ja deformatsioonide impulsis.

2. Näidata, et võrdus $\Delta g = \epsilon g$ kehtib väikeste deformatsioonide korral. Selleks arvutada $\Delta g = g' - g$ tihenduse pikkuse Δx ja $\Delta(\Delta x)$ kaudu.

3. Tuletada seisva laine võrrand lahtise otsaga varva jaoks, leida tingimus varva pikkuse jaoks, millal saabub resonants.

4. Kas mikrofoni membraani tuleb vaadelda kui liikumatut tükki, mis suleb õhusamba otsa, või on ta oma vetruvuse tõttu vaadeldav õhu suhtes hõredama keskkonnana, s.o. kas siis, kui mikrofoni tekib maksimaalne pinge, on membraani kehal sõlm või pais? Teha see kindlaks eksperimentaalselt.

5. Madalatel sagedustel osutub pingeõvera kuja ostsilloskoobil moonutatatuks. Kas on see helisagedusgeneraatori, ostsilloskoobi, telefoni või mikrofoni viga?

D. Kirjandus.

1. С. Э. Хайкин. Физические основы механики. М., изд. I-M, 1963, стр. 490-500, 592-601, 693-705, 727-731, 741-747.