

Riešenie: Intenzita zvukového prahu referenčného tónu je  $i_0^* = 10^{-16}$  watt/cm<sup>2</sup>.

Zo vzorca  $i = \frac{P_c^2}{sc}$ , vyplýva, že druhá mocnina hľadaného efektívneho pretlaku

$$P_c^2 = isc = 10^{-16} \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} \cdot 0,001293 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 10^{-9} \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2} \cdot 0,001293 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 33140 \frac{\text{cm}}{\text{s}},$$

$$P_c = 2 \cdot 10^{-4} \text{ dyn/cm}^2$$

Podľa vzorcov (1) amplitúda príslušnej akustickej výchylky je len

$$u_0 = \frac{P_c}{\pi scv \sqrt{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 1,3 \cdot 331 \cdot 1000 \cdot 1,4} \text{ m} \doteq 10^{-9} \text{ cm}$$

a amplitúda akustickej rýchlosti

$$v_0 = \omega u_0 = 2\pi\nu u_0 = 6,28 \cdot 1000 \cdot 10^{-8} \text{ cms}^{-1} \doteq * \cdot 10^{-5} \text{ cms}^{-1}$$

**Úloha 2.** O koľko decibelov sa zvýši hladina intenzity zvuku, keď sa jeho fyzikálna intenzita zvýši 5-krát?

Hladina intenzity zvuku je daná vzorcom  $s = \log \frac{i}{i_0^*}$ , kde  $i_0^*$  je intenzita zvukového prahu referenčného tónu. Ak je  $i_2 = 5i_1$ , je

$$s_2 - s_1 = \log \frac{i_2}{i_0^*} - \log \frac{i_1}{i_0^*} = \log \frac{i_2}{i_1} = \log 5 = 0,7 = 0,7 \text{ bel} = 7 \text{ dB}$$

**Úloha 3.** Koľkokrát sa musí zmenšiť fyzikálna intenzita referenčného tónu, ktorého hladina hlasitosti je 30 Ph, aby sa stal nepočuvateľným?

Hladina hlasitosti referenčného tónu je daná vzorcom  $h = 10 \log \frac{i}{i_0^*}$  podľa ktorého

$$\frac{i}{i_0^*} = 10^{h/10} = 10^3 = 1000$$

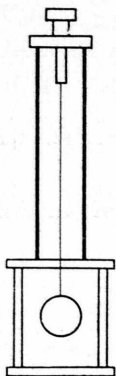
**9.3. Detektory a prístroje na meranie intenzity zvuku.** Z výsledkov úlohy riešenej na konci predchádzajúceho článku vyplýva, že ľudské ucho je neobvyčajne citlivým detektorom zvuku. Je súčasne aj jeho analyzátorom, lebo citlivo rozlišuje zvuky podľa ich frekvencií. Fyzikálne detektory zvuku možno rozdeliť do štyroch skupín podľa toho, či reagujú na akustickú výchylku  $u$ , akustickú rýchlosť  $v$ , striedavý akustický pretlak  $P$  alebo na jeho priemernú hodnotu  $P^*$ .

Zariadenia založené na akustickej výchylke, ktorá je vždy veľmi malá, nemajú praktický význam. K nim patrí mikroskop, pomocou ktorého pozorujeme častice napr. cigaretového dymu, ktoré pôsobením vnútorného trenia sledujú pohyb elementov vodiča zvuku. Keď vo vzduchu obsahujúcom cigaretový dym nie je zvukové vlnenie, pri vhodne bočnom osvetlení častice dymu sa objavujú v zornom poli mikroskopu ako nepokojné svietiace bodky (Brow-

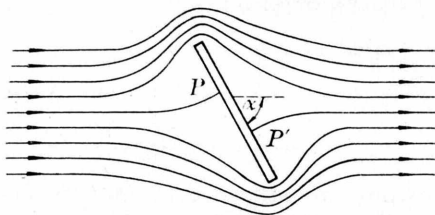
nov pohyb, pozri čl. 10.4). Keď je však vzduch prežiarený zvukom s dostatočne veľkou intenzitou, v zornom poli mikroskopu vidíme navzájom rovnobežné svietiace úsečky tým dlhšie, čím väčšia je intenzita zvuku.

Na akustickú rýchlosť reaguje ako detektor zvuku tzv. *citlivý plameň*. Plameň svietiplynu unikajúceho z rúrky s vnútorným priemerom asi 1 mm pod menším tlakom je pokojný. Keď tlak svietiplynu zväčšíme, následkom turbulencie prúdenia nie je plameň plynu pokojný a stáva sa až rozvetvený. Keď tlak svietiplynu nastavíme tak, že plameň je ešte pokojný, nápadne zmení svoj vzhľad, keď ho zasiahne zvuková vlna. O tom, že tento citlivý plameň reaguje na akustickú rýchlosť a nie na striedavý akustický pretlak, presvedčíme sa tak, keď ho dáme na rôzne miesta v stojatom vlnení, v ktorom — na rozdiel od postupujúceho vlnenia — kmitne tlaku a rýchlosti nie sú v totožných rovinách.

Na akustickej rýchlosti je založený aj *Rayleighov prístroj* na meranie intenzity zvuku (obr. 9.4). Jeho hlavnou súčiastkou je veľmi tenká a ľahká dosička s priemerom 5–10 mm, zavesená na jemnom pružnom vlákne. Vo vzduchu, ktorý je vo vlnivom pohybe, natáča sa do polohy kolmej na smer postupu vlnenia.



Obr. 9.4



Obr. 9.5

Jav vysvetľuje obr. 9.5, v ktorom sú zakreslené prúdnice, keď je tenká (teoreticky nekonečne tenká) doska v šikmej polohe v prúdiacom vzduchu. Z obrázku je zřejmé, že rýchlosť prúdenia vzduchu pri povrchu dosky je najmenšia v okolí bodov  $P$  a  $P'$ , v ktorých sa rovná nule. To však podľa Bernoulliho rovnice (7.4.1a) alebo rovnice (7.4.3) na str. 249 znamená, že v týchto miestach sú tlakové sily pôsobiace na dosku najväčšie. Skladajú sa v dvojicu, ktorá sa snaží pootočiť dosku do polohy kolmej na smer prúdenia. Z teórie obtekania pevných telies tekutinami vyplýva, že tento moment, ak na dosku pôsobí harmonické rovinné vlnenie, je

$$D = \frac{2}{3}sr^3v_0^2 \sin 2\alpha \quad (1)$$

kde  $s$  je merná hmotnosť vzduchu,  $r$  polomer dosky,  $v_0$  amplitúda akustickej rýchlosti a  $\alpha$  uhol zovretý smerom postupu vlnenia a normálou k doske alebo jej rovinou.

Rayleighov prístroj má pre akustiku zásadný význam, lebo umožňuje

experimentálne určiť amplitúdu akustickej rýchlosti  $v_0$  a tým, podľa druhého zo vzorcov (9.1.1), aj intenzitu zvuku. Je pochopiteľné, že prístroj je upotrebiteľný len vtedy, ak intenzita zvuku a jeho vlnová dĺžka sú dost veľké.

Ako detektory zvuku, použiteľné aj na meranie jeho intenzity, najčastejšie sa používajú prístroje reagujúce na striedavý akustický tlak (*mikrofony*) alebo na jeho priemernú hodnotu (*rádiometre*).

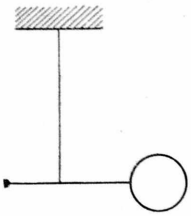
Každý mikrofón obsahuje membránu, ktorá sa pôsobením zvukového vlnenia dostáva do vynúteného kmitania. Tieto mechanické kmity sa rôznym spôsobom využívajú na budenie striedavého elektrického prúdu s rovnakou frekvenciou a zafarbením (*elektrodynamický* a *kapacitný mikrofón*) alebo na menenie intenzity jednosmerného prúdu idúceho [cez mikrofón z vonkajšieho zdroja (*uhlíkový mikrofón*).

Membrána elektrodynamického mikrofónu, podobne ako elektrodynamického reproduktora zvuku, je pevne spojená s cievkou, ktorá kmitá v radiálnom magnetickom poli silného permanentného magnetu. Tým sa v závitoch cievky indukujú striedavé elektrické prúdy. Membrána kapacitného mikrofónu tvorí jednu z dvoch dosák elektrického kondenzátora, ktorý je cez vhodne volený odpor pripojený na svorky galvanického článku. Kmitanie membrány je spojené so zmenami elektrickej kapacity kondenzátora. V dôsledku toho sa menia náboje jeho dosák, čo znamená vznik premenlivého prúdu v okruhu a tým aj meniaceho sa napätia na odpore vradeného do okruhu. Uhlíkový mikrofón obsahuje medzi svojou kovovou membránou a za ňou sa nachádzajúcou pevnou vodivou doskou hrubú uhlíkovú drvinu. Kmitaním membrány mení sa sila, ktorou sú zrnká uhlíka k sebe pritláčané a tým aj vnútorný elektrický odpor mikrofónu. Jeho zapojenie do okruhu zdroja jednosmerného elektrického prúdu môže byť podobné ako zapojenie kapacitného mikrofónu.

Dnešné elektronické zosilňovače — elektrónkové alebo tranzistorové — umožňujú zväčšiť zmeny prúdov alebo napätí budených mikrofónom prakticky neohraničene. Hlavnou podmienkou dobrej funkcie každého mikrofónu je, aby mikrofón bol rovnako citlivý na zvuky rôznych frekvencií. Táto podmienka sa splní pri dostatočnom tlmení membrány mikrofónu, ak frekvencia jej vlastného kmitania nebude v intervale frekvencií, ktoré majú byť mikrofónom spracované.

Na meranie intenzity ultrazvuku sa používajú rádiometre. Využíva sa v nich tlak akustického žiarenia (čl. 8.6, str. 316) daný vzorcom (8.6.10), podľa ktorého tento tlak v prípade odrazu zvuku je  $P^* = (1 + \kappa) \frac{i}{c}$ , takže

$$i = \frac{cP^*}{1 + \kappa} \quad (2)$$



kde  $\kappa$  je Poissonova plynová konštanta a  $c$  rýchlosť zvuku. Princíp rádiometra vysvetľuje schematicky obr. 9.6. Na jemnom pružnom vlákne visí vodorovná priečka, ktorá na jednom konci nesie kruhovú dosku odrážajúcu na ňu dopadajúce akustické žiarenie. Tlak akustického žiarenia potočí priečku o uhol úmerný tomuto žiareniu.

Obr. 9.6

**9.4. Základy hudobnej akustiky.** Dva súčasne znejúce hudobné zvuky sa v hudobnej akustike volajú *dvojzvuk*. Zo skúsenosti vieme, že niektoré dvojzvuky sú pre normálny ľudský sluch lahodné (*súzvučné, konsonantné*), iné však neprijemné (*nesúzvučné, disonantné*). Správnu odpoveď na otázku, kedy sú dva tóny konsonantné a kedy disonantné, na podklade svojich pokusov o strunách našiel už Pythagoras v 6. storočí pred n. l. a ešte lepšie túto vec objasnil Euklides už okolo r. 300 pred n. l. Podľa neho dva konsonantné tóny sú schopné zlievať sa v jeden celok, a my s uspokojením poznávame, že takéto dva tóny patria k sebe, zatiaľ čo pri disonantných tónoch to nie je možné. Je zaujímavé, že na tomto veľmi starom poznatku, pravda, prehĺbenom a doplnenom, možno vybudovať celú hudobnú akustiku.

Správnosť Euklidovho názoru na konsonanciu a disonanciu tónov vyplýva z tejto jednoduchéj úvahy: O dvoch konsonantných tónoch dnes vieme, že ich frekvencie sú v pomere celých a malých čísel, nie väčších ako 6. Keď teda kmitočty dvoch tónov sú napríklad v pomere 4 : 3, tak to značí, že vždy na každé tri kmity hlbšieho tónu pripadajú práve štyri kmity tónu vyššieho, takže sa vlnenia obidvoch tónov skladajú vo výsledné vlnenie, ktorého perióda sa rovná trojnásobku periódy tónu hlbšieho a súčasne štvornásobku periódy tónu vyššieho. V súhlase s poznatkom Euklidovým toto pokojné spĺyvanie dvoch konsonantných tónov v nový periodický dej, ktorého perióda je v jednoduchom vzťahu k periódam obidvoch súčasne znejúcich tónov, je práve príčinou ich súzvučnosti.

O dvoch tónoch sa v hudobnej akustike hovorí aj to, že majú určitú výškovú odľahlosť, alebo že tvoria určitý *interval*, pričom za rovnaké sa pokladajú intervaly tvorené vždy dvoma a dvoma tónmi s rovnakými relatívnymi výškami (teda nie tónmi s rovnakým rozdielom abs. výšok). Rovnaké sú teda napríklad intervaly tvorené dvojicou tónov s frekvenciami 24 a 27 s<sup>-1</sup> aj dvojicou s frekvenciami 32 a 36 s<sup>-1</sup>, lebo  $36 : 32 = 27 : 24 = 9 : 8$ , hoci  $36 - 32 = 4$  a  $27 - 24 = 3$ . Pretože frekvencie všetkých vyšších harmonických tónov zvoleného základného tónu sú v pomere po sebe idúcich celých čísel, všetky *hudobné intervaly*, t. j. intervaly tvorené vždy dvoma viac alebo menej kon-