

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM 1

Úloha č.: X.

Název: Rychlost šíření zvuku

Vypracoval: Mária Šoltésová stud. sk. F – 16 dne 26.04.2005

Odevzdal dne: vráceno:

Odevzdal dne: vráceno:

Odevzdal dne:

Posuzoval: dne výsledek klasifikace

Připomínky:

Pracovní úloha:

1. Určte rychlost šíření pozdĺžnych zvukových vln v mosadznej tyči metódou Kundtovej trubice. Z nameranej rýchlosti zvuku stanovte modul pružnosti v ťahu E materiálu tyče.
2. Zmerajte rýchlosť zvuku vo vzduchu a v oxide uhličitom pomocou uzavretého rezonátoru. Výsledky meraní spracujte metódou lineárnej regresie a graficky znázornite.

3. Vypočítajte Poissonovu konštantu κ oxidu uhličitého z nameranej rýchlosti zvuku.

Teoretická časť:

Rýchlosť šírenia vzduchu súvisí s dvoma ďalšími akustickými veličinami, vlnovou dĺžkou λ a frekvenciou f , podľa vzťahu

$$c = \lambda f. \quad (1)$$

Ak zmeriame λ a f , môžeme zistiť, akou rýchlosťou sa šíri zvuk v danom prostredí.

Kundtova trubica

Táto metóda je založená na zviditeľnení dĺžky zvukovej vlny λ vo vzduchu pri stojatom vlnení. Pri tomto type vlnenia sa vytvoria uzly a kmitne, pričom vzdialenosť najbližších uzlov (kmitní) je rovná polovici vlnovej dĺžky. Vzduch je napustený do vodorovnej sklenej trubice, na dne ktorej je nasypáný korkový prášok. Zvukové stojaté vlny budíme pomocou tyče zo skúmaného materiálu, ktorá má na konci korkový piest zasunutý do trubice tak, aby sa jej nedotýkal. Ak je dĺžka trubice vhodne nastavená, prášok vytvorí obrazce znázorňujúce polohu kmitní a uzlov. Frekvencia tyče závisí od jej upevnenia. Ak upevníme tyč v prostriedku, má v tomto mieste uzol a vlnová dĺžka základného tónu λ_1 je dvojnásobkom dĺžky tyče l

$$\lambda_1 = 2l. \quad (2)$$

Ak sa šíri akustická vlna dvoma prostrediami, zachováva svoju frekvenciu. Pre prechod vlnenia z tyče do vzduchu v trubici teda môžeme napísať vzťah

$$\frac{c_1}{\lambda_1} = \frac{c_2}{\lambda_2} \quad (3)$$

kde c_1 je rýchlosť zvuku v tyči, c_2 je rýchlosť zvuku v plyne a λ_2 je vlnová dĺžka zvuku v plyne, ktorú určíme z vytvorených obrazcov. Vlnová dĺžka λ_2 je dvojnásobkom vzdialenosti kmitní d

$$\lambda_2 = 2d. \quad (4)$$

Použitie vzťahu (3) predpokladá znalosť rýchlosti šírenia zvuku vo vzduchu. Podľa vzťahov z [1] určíme rýchlosť vzduchu pri teplote t pri suchom vzduchu ako

$$c = (331,5 + 0,61t) \text{ m.s}^{-1} \quad (5)$$

Pri 50% vlhkosti vzduchu v okolí 20°C je rýchlosť určená vzorcom

$$c = (331,5 + 0,63(t - 20^\circ\text{C})) \text{ m.s}^{-1} \quad (6)$$

Ak určíme rýchlosť zvuku vo vzduchu c_2 , dosadením (1) a (2) do (3) určíme rýchlosť zvuku v tyči c_1 ako

$$c_1 = \frac{l}{d} c_2. \quad (7)$$

Modul pružnosti tyče určíme ako

$$E = c_1^2 \rho \quad (8)$$

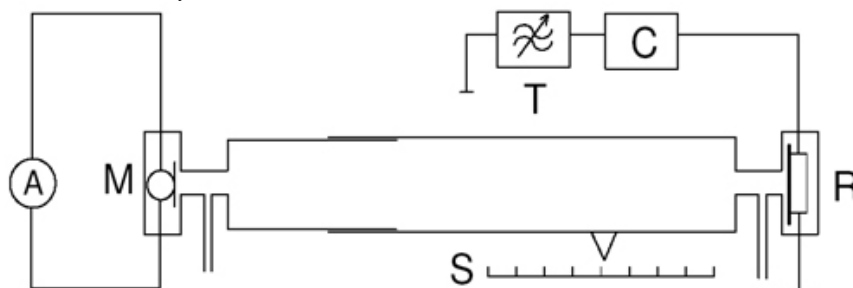
kde ρ je hustota materiálu tyče.

Uzavretý rezonátor

Na meranie vlnových dĺžok zvuku môžeme použiť vlnový rezonátor, znázornený na obrázku 1. Skladá sa z dvoch súosých trubíc ktoré je možné do seba zasúvať a tým meniť dĺžku rezonátora, ktorú odčítame zo stupnice S . Na jednom konci rezonátora je umiestnený zdroj zvuku (reproduktor) R napojený na tónový generátor T regulovateľnej frekvencie, ktorú

určíme pomocou čítača C . Na druhom konci je mikrofón M , ktorý slúži na snímanie zvuku. Pri vhodnom nastavení dĺžky rezonátora dochádza k rezonančnému zosilneniu zvuku, čo sa prejaví na mikroampérmetri A pripojenom k mikrofónu.

Obr.1: Uzavretý rezonátor



Vlnovú dĺžku môžeme merať dvoma spôsobmi:

1. metóda:

Ponecháme pevnú dĺžku generátora l_r a meníme frekvenciu zdroja zvuku. Rezonancia nastáva pri frekvenciách f_k , ktorým odpovedajúca vlnová dĺžka λ_k vyhovuje podmienke

$$l_r = k \frac{\lambda_k}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

Za λ_k dosadíme zo vzťahu (1) a rýchlosť zvuku potom určíme podľa vzťahu

$$c = \frac{2l_r f_k}{k}. \quad (10)$$

2. metóda:

Ponecháme frekvenciu f zvuku konštantnú a určíme dve rôzne dĺžky rezonátora pri najbližších rezonanciách l_1 a l_2 , ich odpovedá polovici vlnovej dĺžky λ . Rýchlosť zvuku určíme ako

$$c = 2(l_2 - l_1)f. \quad (11)$$

Poissonovu konštantu κ oxidu uhličitého určíme dosadením stavovej rovnice ideálneho plynu do Laplaceovej rovnice uvedenej v [1]:

$$c_{CO_2} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{k \frac{RT}{m}} \quad (12)$$

kde μ je molová hmotnosť plynu, R je molová plynová konštantna, T je termodynamická teplota, ako

$$k = \frac{c_{CO_2}^2 m}{RT}. \quad (13)$$

Použitá pomôcky a prístroje:

Kundtova trubica, mosadzná tyč, RC generátor Tesla, mikroampérmeter Metra, tlaková fľaša CO₂, balónik, korková drť, kalafuna, plst'

merací prístroj	najmenší dielik
mikroampérmeter	*
tónový generátor	*
teplomer	0,1 °C
čítač frekvencie	1 Hz
dĺžkové meradlo rezonátora	1 mm
pásmové meradlo	1 mm

* Nie je podstatné pre dané meranie

Postup:

Kundtova trubica

1. Kundtovu trubicu umiestnime do vodorovnej polohy, na dno trubice rovnomerne rozmiestnime korkový prášok.
2. Mosadznú tyč upevníme v polovici tak, aby sa piest na konci tyče nedotýkal trubice.
3. Tyč rozozvučíme trením plst'ou, na korkovom prášku sa objavia obrazce znázorňujúce polohu kmitní.
4. Pásmovým meradlom zmeriame polohy jednotlivých kmitní.

Uzavretý rezonátor

1. Nastavíme rezonátor na pevnú dĺžku, na tónovom generátore meníme frekvencie a na mikroampérmetri sledujeme, kedy dôjde k maximálnemu zosilneniu. Pre každý stav rezonancie odčítame hodnotu frekvencie z čítača.
2. Meriame frekvencie v rozpätí zhruba od 200 Hz do 2500 Hz, je dôležité začať s frekvenciou, pre ktorú sa v rezonátore nachádza práve jedna polvlna. Túto frekvenciu odhadneme pred začatím merania.
3. Nastavíme dĺžku rezonátoru l_1 , pre túto dĺžku nastavíme frekvenciu, pre ktorú nastáva rezonancia. Túto frekvenciu volíme tak, aby sme zmenou dĺžku rezonátora dosiahli v rámci stupnice dĺžku l_2 , pri ktorej opäť nastane rezonancia.
4. Bod 1. a 2. opakujeme po napustení oxidu uhličitého do rezonátora. Bod 3. pre oxid uhličitý neopakujeme, pretože pri zmene dĺžku rezonátora sa do trubice môže dostať vzduch.

Výsledky meraní:

Podmienky experimentu:

teplota v miestnosti: $(25,1 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

atmosférický tlak: $(985,2 \pm 0,1)\text{hPa}$

vlhkosť vzduchu: $(35 \pm 5)\%$

Kundtova trubica

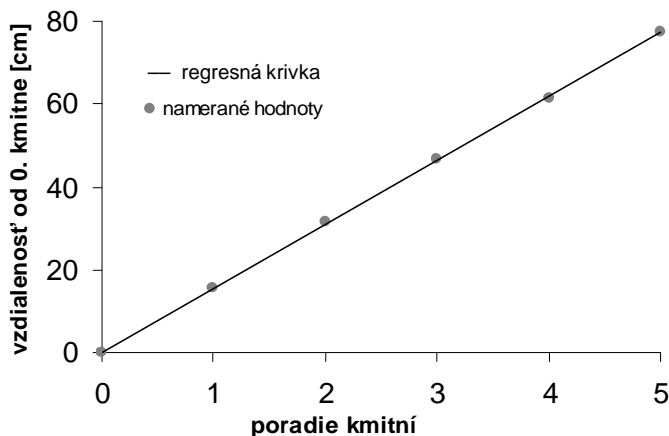
Pásmovým meradlom sme zmerali dĺžku tyče ako $l = (148,0 \pm 0,3)\text{cm}$. Chyba merania je odhadnutá. Na výpočet rýchlosti zvuku v miestnosti použijeme vzťah (6), pretože pri našom experimente nebol vzduch suchý. Rýchlosť vzduchu c_2 vo vzduchu určíme ako $c_2 = 347,57 \pm 0,06\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, chyba bola odhadnutá a chyby určenia teploty. Odmerali sme polohy

kmitní podľa obrazcov vytvorených v Kundtovej trubici. Namerané hodnoty sú v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka 1: namerané hodnoty polohy kmitní

poradie kmitní n	0	1	2	3	4	5
poloha kmitní [cm]	13,0	28,5	44,5	59,4	74,5	90,5
vzdialenosť od nulte kmitne y [cm]	0	15,5	31,5	46,5	61,5	77,5

Graf 1: Namerané hodnoty polôh kmitní preložené regresnou krivkou.



Ak vyjadríme polohy kmitní ako vzdialenosti od počiatkovej (nulte) kmitne, dostaneme lineárny vzťah

$$y = dn \quad (14)$$

kde y označuje vzdialenosť n -tej kmitne od počiatkovej (nulte) kmitne. Parameter d – vzdialenosť kmitní, určíme lineárnou regresiou ako $d = (15,5 \pm 0,3)\text{cm}$. Chyba je odhadnutá vzhľadom k tomu, že z niektorých obrazcov sa nedalo s väčšou presnosťou určiť, kde leží kmitňa. Chyba určená lineárnou regresiou je oproti tejto chybe zanedbateľná. Podľa vzťahu (7) určíme ako

$$c_1 = (3320 \pm 60)\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ s relatívnou chybou } h_{c_1} = 2\% .$$

Modul pružnosti mozadze určíme podľa vzťahu (8), ako hustotu mosadze použijeme hodnotu z [2] $r = (8600 \pm 100)\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Potom modul pružnosti je

$$E = (9,5 \pm 0,4)10^{10}\text{Pa}.$$

Uzavretý rezonátor

1. metóda:

Dĺžku rezonátora sme určili na stupnici ako $l_r = (83,0 \pm 0,5)\text{cm}$. Merali sme rezonančné frekvencie pre vzduch a pre oxid uhličitý, na začiatku merania sme nastavili frekvenciu tak, aby sa v trubici vytvorila práve jedna polvlna. Na to nám poslužil počiatkový odhad, pre vzduch $f_1 \approx 200\text{Hz}$ a pre CO_2 $f_1 \approx 160\text{Hz}$. Namerané hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 2: namerané rezonančné frekvencie pre vzduch a CO₂

k	1	2	3	4	5	6	7
f_k (vzduch)	203	414	618	825	1026	1235	1440
f_k (CO ₂)	161	326	484	646	805	985	1130
k	8	9	10	11	12	13	
f_k (vzduch)	1640	1849	2056	2260	2464	2672	
f_k (CO ₂)	1289	1452	1615	1773	1933	2079	

Hodnota k udáva počet polvln, ktoré sa nachádzajú v rezonátore pri danej frekvencii.

Ak si uvedomíme, že vzťah (9) možno napísať v tvare

$$f_k = ak \quad (15)$$

kde $a = \frac{c}{2l_r}$ je konštanta, môžeme na výpočet rýchlosti vzduchu použiť metódu najmenších štvorcov. Rýchlosť vzduchu potom určíme ako

$$c = 2l_r a \quad (16)$$

Pre vzduch je táto konštanta $a_{vz} = (205,5 \pm 0,1) \text{ Hz}$ a pre oxid uhličitý je $a_{vz} = (161,4 \pm 0,2) \text{ Hz}$. Odchýlka hodnôt je určená metódou najmenších štvorcov. Rýchlosť zvuku vo vzduchu a v oxide uhličitom potom určíme podľa (16) ako

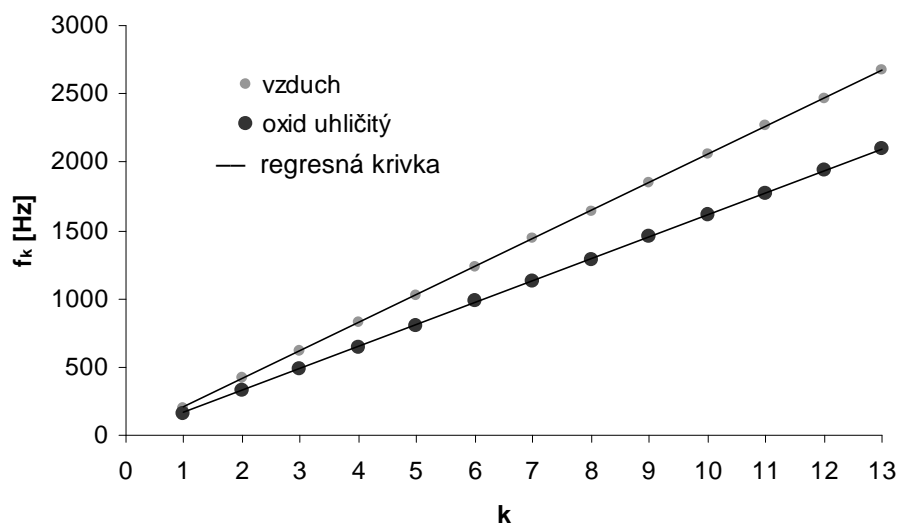
$$c_{vz} = (341 \pm 2) \text{ m.s}^{-1} \text{ s relatívnou chybou } h_{c_{vz}} = 1\% ,$$

$$c_{CO_2} = (268 \pm 2) \text{ m.s}^{-1} \text{ s relatívnou chybou } h_{c_{CO_2}} = 1\% ,$$

odchýlka je určená ako chyba prenesená z veličín vystupujúcich vo vzťahu (16). Závislosti f_k na k sú vynesené v grafe 2.

Prístrojovú chybu určenia frekvencie uvažujeme ako 2 Hz, ak túto chybu spojíme s chybou zistenou lineárnou regresiou, dostanem pre chybu frekvencie vzduchu hodnotu $s_{fvz} = 3 \text{ Hz}$, pre oxid uhličitý $s_{fCO_2} = 6 \text{ Hz}$.

Graf 2: Závislosť rezonančnej frekvencie f_k na počte polvln k pre vzduch a CO₂



Veľkosť bodov zodpovedá celkovej chybe určenia frekvencie σ_{fvz}

2. metóda

Druhou metódou sme určovali rýchlosť zvuku vo vzduchu, pre meranie rýchlosti v CO₂ je nepoužiteľná. Nastavili sme dĺžku rezonátora na $l_1 = (70,0 \pm 0,5)$ cm a našli sme pre túto dĺžku rezonančnú frekvenciu $f = (1220 \pm 2)$ Hz, pri ktorej sme predpokladali, že v rozsahu stupnice rezonátora sa bude vyskytovať dĺžka l_2 , pri ktorej opäť nastane rezonancia. Postupnou zmenou dĺžky rezonátora sme našli najbližšiu takú dĺžku $l_2 = (84,3 \pm 0,5)$ cm. Podľa vzťahu (11) potom určíme rýchlosť zvuku vo vzduchu ako

$$c = (342 \pm 12) \text{ m.s}^{-1} \text{ s relatívnou chybou } h_c = 3\% ,$$

chyba je určená prenesením chýb z veličín vo vzťahu (11).

Poissonova konštanta

Molová hmotnosť CO₂ je podľa údajov v [1] $m = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$, molová plynová konštanta je podľa [2] $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. Teplotu uvažujeme rovnakú ako teplota v miestnosti $T = 298,1 \pm 0,1 \text{ K}$. Ako rýchlosť zvuku v CO₂ použijeme nameranú hodnotu $c_{CO_2} = (268 \pm 0,2) \text{ m.s}^{-1}$. Zo vzťahu (13) potom určíme Poissonovu konštantu CO₂ ako

$$k = 1,28 \pm 0,01.$$

Chyba je určená prenesením chýb veličín zo vzťahu (13).

Diskusia:

Relatívna chyba určenia rýchlosti zvuku v mosadzi je 2%, na tejto chybe sa podieľa hlavne chyba určenia vzdialenosti kmitní d z obrazcov v kundtovej trubici. Chyba d určená lineárnou regresiou je zanedbateľná oproti chybe, ktorej sa dopúšťame pri odčítaní vzdialenosti vzhľadom k nepravidelnosti niektorých obrazcov. Modul pružnosti sme určili s relatívnou chybou 4%, ktorá je spôsobená faktom, že rýchlosť sa vo vzťahu (8) pre jeho výpočet vyskytuje v druhej mocnine. Tabuľková hodnota modulu pružnosti mosadze je podľa [2] $9,9 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, nami určená hodnota s ňou v rámci chyby zhoduje.

Hodnoty rýchlosti zvuku vo vzduchu a v oxide uhličitom sú namerané a pomerne malou relatívnou chybou 1%. Hodnoty frekvencie sa líšia od regresnej krivky v oboch prípadoch len málo, nepresnosť je spôsobená hlavne nepresnosťou určenia dĺžky rezonátora l_r . Hodnota pre vzduch c_{vz} sa nezhoduje s hodnotou určenou podľa vzťahu (6) ako $347,57 \text{ m.s}^{-1}$, čo môže byť spôsobené tým, že vlhkosť vzduchu nebola v našom prípade 50%. Odchýlka mohla byť spôsobená aj tým, že v rezonátore zostali zvyšky CO₂ po predošlom meraní. Podobne ani hodnota pre CO₂ c_{CO_2} sa nezhoduje s hodnotou udávanou v [1] ako 258 m.s^{-1} , čo môže byť spôsobené tým, že výmena vzduchu za CO₂ v rezonátore nemusela byť prevedená úplne. Tejto nezhode však netreba prikladať veľký význam, pretože hodnota udávaná v [1] je pre teplotu vzduchu 0°C.

Hodnota rýchlosti zvuku c nameraná druhou metódou je určená menej presne, s relatívnou chybou 3%, čo je spôsobené nepresnosťou v učení rozdielu $l_2 - l_1$. Hodnota určená podľa prvej metódy c sa zhoduje v rámci chyby s hodnotou c_{vz} určenou podľa prvej metódy, nezhoduje sa však s hodnotou $347,57 \text{ m.s}^{-1}$, čo opäť môže byť spôsobené tým, že vlhkosť vzduchu nebola v našom prípade 50%.

Poissonova konštanta pre oxid uhličitý bola určená s relatívnou chybou 4%, na čom sa podieľa fakt, že vo vzťahu (13) vystupuje rýchlosť zvuku v druhej mocnine. Od tabuľkovej hodnoty 1,3 z [2] sa nameraná hodnota mierne líši, čo vyplýva z toho, že aj nameraná hodnota rýchlosti zvuku sa s tabuľkovou hodnotou nezhoduje.

Záver:

Metódou kundtovej trubice sme určili rýchlosť šírenia zvukových vln v mosadzi ako $c_1 = (3320 \pm 60) \text{ m.s}^{-1}$, z tejto hodnoty sme určili modul pružnosti v ťahu mosadze ako $E = (9,5 \pm 0,4) 10^{10} \text{ Pa}$. Metódou uzavretého rezonátora sme pri konštantnej dĺžke určili rýchlosť zvuku vo vzduchu ako $c_{vz} = (341 \pm 2) \text{ m.s}^{-1}$ a rýchlosť zvuku v oxide uhličitom ako $c_{CO_2} = (268 \pm 2) \text{ m.s}^{-1}$. Pri konštantnej frekvencii sme určili rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu ako $c = (342 \pm 12) \text{ m.s}^{-1}$. Z nameranej rýchlosti šírenia zvuku v oxide uhličitom sme určili Poissonovu konštantu ako $k = 1,28 \pm 0,01$.

Literatúra:

- [1] D. Slavínská prom.fyz., CSc., I. Stulíková , CSc., P. Vostrý, CSc.: Fyzikální praktikum I., SPN Praha 1989
[2] J. Brož, V. Roskovec, M. Valouch, Fyzikální a matematické tabulky, SNTL, Praha 1980