

2.2 Měření rychlosti zvuku pomocí Kundtovy trubice

Prostudujte



BROŽ, J. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: SPN, 1983, čl. 2.6.3, 2.6.3.1;

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika, část 2 – Mechanika - Termodynamika*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2000.

Princip měření

Rychlost šíření zvukových vln závisí na látkových konstantách a druhu (resp. tvaru) prostředí, kterým se vlna šíří. V pevných látkách závisí rychlost též na tom, šíří-li se daným prostředím vlny příčné nebo podélné. Pro rychlost v šíření zvuku v plynech (v plynech vznikají pouze podélné vlny) a kapalinách ve volném prostoru platí rovnice

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1)$$

ve které ρ je hustota kapaliny, K je modul objemové pružnosti, $K = -V \frac{dp}{dV}$, V značí měrný objem, p tlak.

Stlačování a rozpínání plynu při průchodu akustické vlny je děj velmi rychlý, při kterém nedochází k výměně tepla s okolím. Proto můžeme předpokládat, že šíření zvuku je děj adiabatický. Z rovnice (1) dostáváme užitím vztahu $K = -V \frac{dp}{dV}$ a Poissonovy rovnice $pV^\chi = \text{konst.}$ pro rychlost v výraz

$$v = \sqrt{\chi \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\chi \frac{RT}{\mu}}, \quad (2)$$

kde χ je Poissonova konstanta, p tlak plynu, R plynová konstanta, T teplota v kelvinech a μ molární hmotnost plynu.

Pro rychlost podélných zvukových vln v pružné tyči platí

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

kde E je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) a ρ je hustota tyče.

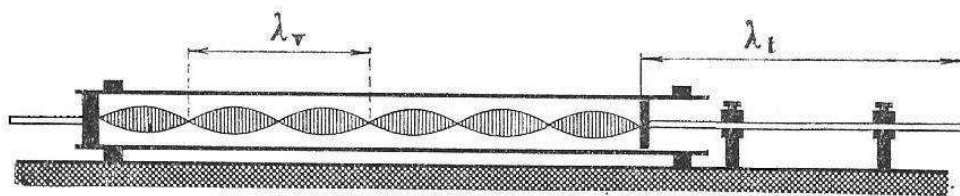
Pomocí rovnice (2) a (3) můžeme z naměřených hodnot rychlosti zvuku určit konstanty prostředí χ a E .

Experimentálně nejjednodušší způsob jak určit rychlost zvuku je změřením jeho vlnové délky a frekvence. Mezi rychlostí zvukové vlny v , její vlnovou délkou λ a jejím kmitočtem f platí vztah

$$v = \lambda \cdot f. \quad (4)$$

Změříme-li λ a f , můžeme z tohoto vztahu vypočítat podle rovnice (4) rychlost zvuku v daném prostředí. Vlnovou délku zvukové vlny pak můžeme zjišťovat různými způsoby.

Nejpohodlněji a nejnázorněji lze měřit vlnové délky na stojatých vlnách. Pomocí *Kundtovy trubice* lze v plynech zviditelnit uzly a kmitny pomocí lehkého sypkého prášku, např. korkové drti (viz obr. 2.1). Délku zvukové vlny lze potom přímo měřit na vzniklých obrazcích tvořených práškem, protože vzdálenost dvou uzlů nebo kmiten je $\frac{\lambda}{2}$.



Obr. 2.1: Kundtova trubice

Trubice je na jednom konci uzavřena, na druhém je zdroj zvuku. Zdrojem zvuku může být tyč, kterou podélně rozkmitáme. Tyč upevníme na vyznačených ryskách, takže na ní vznikne jedna vlna. Na konci tyče, která je zasunuta do Kundtovy trubice, je upevněn lehký píst, který se nesmí dotýkat stěn trubice. Kundtova trubice je uzavřena i z druhé strany pístem (viz levý píst v obr. 2.1), kterým můžeme posunovat, a měnit vzdálenost obou pístů (a tím také velikost vzduchového sloupce). Změnou délky vzduchového sloupce tak můžeme dosáhnout podmínek vhodných pro vznik stojatých vln. Rezonance zvukových vln, při které se vytvoří nejzřetelnější práškový obrazec, nastane, když je délka trubice rovna celistvému násobku půlvln. Na obr. 2.1 jsou znázorněny kmitny a uzly rychlosti částic korku, kmitny a uzly akustického tlaku jsou oproti nim posunuty o čtvrtinu délky vlny. Na koncích trubice se vytvoří uzly rychlosti a kmitny tlaku. Korkový prášek nasypáný v trubici je působením zvukové vlny rozmetáván v místech kmiten rychlosti a zůstává v klidu v uzlech rychlosti.

Známe-li rychlost zvuku ve vzduchu, lze v uvedeném uspořádání měřit rychlost zvuku v tyči a modul pružnosti v tahu tyče. Kmitočet zvukové vlny v tyči souhlasí s kmitočtem zvuku v Kundtově trubici. Označíme-li v_t rychlost zvuku v tyči, λ_t délku zvukové vlny v tyči, v_v rychlost zvuku v plynu a λ_v délku zvukové vlny v plynu (v našem případě ve vzduchu), dostaneme z rovnosti frekvencí podle rovnice (4) vztah

$$\frac{v_t}{\lambda_t} = \frac{v_v}{\lambda_v}. \quad (5)$$

Změřením délky tyče stanovíme λ_t a proměřením obrazce v Kundtově trubici určíme λ_v .

Známe-li rychlost zvuku ve vzduchu v_v , vypočteme ze vztahu (5) hledanou rychlost zvuku v tyči v_t . Z rovnice (3) můžeme pro výpočet modulu pružnosti v tahu tyče získat výraz

$$E = v_t^2 \rho. \quad (6)$$

Úkoly

1. Změřte rychlost zvuku v ocelové a mosazné tyči.
2. Určete moduly pružnosti v tahu těchto tyčí

Postup měření

1. Korkový prášek rovnoměrně rozptýlte po trubici. Trubice nesmí být mokrá nebo vlhká, aby korkový prášek neulpíval na jejích stěnách. Korkového prášku používáme jen malé množství, vzniklé obrazce jsou potom zřetelnější.
2. Uvedení tyče do podélného kmitavého pohybu se provádí podélným třením střední části tyče. Při tření tyče je třeba dbát, aby se píst nedotýkal stěn trubice.
3. Měření s každou tyčí (ocelovou nebo mosaznou) proveďte nejméně pětkrát.
4. Pomocí vztahu (5) vypočtete rychlost zvuku v mosazné (resp. ocelové) tyči. Při výpočtech uvažujeme, že délka mosazné (resp. ocelové) tyče je 160 cm. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na teplotě podle vztahu

$$v = 331,5 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7)$$

kde t je teplota ve stupních Celsia.

5. Vypočtete průměrnou hodnotu rychlosti zvuku.
6. Určete chybu statistickou, chybu metody (chybu nepřímého měření), a z nich pak stanovte chybu výslednou. Do konečného výsledku (a do závěru protokolu) uveďte chybu výslednou a chybu relativní.
7. Podobně postupujte v případě modulu pružnosti v tahu. Zjištěné hodnoty porovnejte s hodnotami, které naleznete v tabulkách.

Poznámky



- Při proměřování obrazce v Kundtově trubici je z hlediska přesnosti měření nejvýhodnější proměřit vždy co nejdelší obrazec. Chyba použitého měřidla (dobře uvažte, jak velkou chybu měřidla budete uvažovat) se pak vydělí příslušným počtem vlnových délek λ_v .
- Pro opakování měření je vhodné znovu rozptýlit prášek po celé délce Kundtovy trubice a třením tyče znovu získat rezonanční obrazec.