

Rubensova trubice

J. Vít *, J. Petru**

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*vitjakub@fjfi.cvut.cz, **petru.jan@centrum.cz

Abstrakt

Rubensova trubice umožňuje jednoduchým, názorným a velmi efektním způsobem demonstrovat stojaté zvukové vlnění. Kromě pobavení publika jsme se zaměřili také na podstatu pozorovaných jevů z hlediska molekulové úrovně.

1 Zvuk

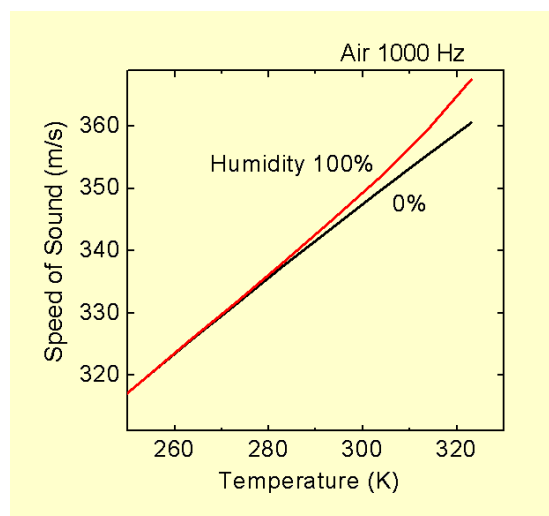
Pohybujeme-li tělesem v pružném prostředí, vzniká rozruch. Při pomalém pohybu je téměř okamžitě vyhlazen obtékáním prostředí kolem tělesa. Ovšem při menších periodách vznikají "zhuštěniny", které se dále šíří prostředím do všech stran podle Huygensova principu. Co s sebou tedy nese zvuková vlna? Změnu tlaku, respektive hustoty šířící se pohybem molekul v prostředí, a tedy i nějaké jejich zrychlení. Z toho můžeme soudit, že bude alespoň řádově podobná střední kvadratické rychlosti molekul (ve vzduchu je to přibližně 1/2 střední molekulové rychlosti). Protože v daném místě vždy dojde k velmi krátkému stlačení plynu, dochází k adiabatickému ději. Nárůst teploty při zvuku 60 dB je v místě s nejvyšší rychlostí molekul pouze 0,2°C, což se může jevit zanedbatelně. Ovšem bereme-li v potaz fakt, že změna tlaku je stotisíckrát až miliardkrát menší než standardní atmosférický tlak, tak nám zanedbání tohoto děje způsobí 18 % chybu při výpočtu rychlosti zvuku. K tomuto špatnému výsledku se dobral I. Newton, jelikož ještě nebyla rozvinuta termodynamika. Pro samotné šíření zvuku je podstatné, aby vzdálenost tlakového maxima od minima (1/2 vlnové délky) byla nesrovnatelně větší než střední volná dráha molekul. Kdyby tomu tak nebylo, molekuly by se přemísťovaly z maxim do minim s vysokou pravděpodobností, že se cestou nepotkají s částicí, již by předaly svou kinetickou energii, a zvukový vzruch by velmi rychle zanikal.

2 Rychlost zvuku

Rychlost zvuku je nejvíce závislá na teplotě, tzn. na střední kvadratické rychlosti molekul. Je to logické – neboť zvukový vzruch se šíří pohybem molekul a ten je přímo úměrný teplotě. Naopak vůbec nezávisí na frekvenci či intenzitě a na tlaku jen velmi málo. Závislost na teplotě a vlhkosti ukazuje následující graf (Obrázek 1). Rychlost zvuku za atmosférického

tlaku (v závislosti na teplotě):

$$v = 331,4 + 0,6t[^\circ\text{C}] \text{ m/s}$$



Obr. 1 Závislost rychlosti zvuku na teplotě a vlhkosti [2]

3 Historie pokusu

Již roku 1858 kalifornský profesor John Le Conte experimentálně prokázal, že plameny reagují na zvuk. Německý fyzik Karl Rudolf Koenig demonstroval změny tlaku v plynu hořícím manometrem roku 1862. Další německý fyzik August von Kundt roku 1866 vytvořil stojaté vlnění v trubici naplněné semínky. Ty odskáčou z kmiten pohybu molekul vzduchu do uzlů. Konečně jejich krajan Heinrich Rubens demonstruje roku 1904 stojaté zvukové vlnění pomocí trubice s plynem. Úplné teoretické odvození jevu ale přednesli až v roce 1979 harvardští vědci George W. Ficken a Francis C. Stephenson.

4 Podstata pokusu

Rubensova trubice představuje poměrně jednoduché řešení problému, jak demonstračně zobrazit nikoliv akustickou výchylku, ale akustický tlak stojatého vlnění. Jedná se o lineární plynový hořák tvořený tenkostěnnou, zpravidla kovovou trubkou s řadou malých otvorů (průměru 1,5 mm) vyvrtaných v plášti v pravidelných rozestupech asi 1 cm podél trubice. Na jedné straně trubice je laditelný zdroj vlnění, druhý konec je uzavřen. Do trubice přivádíme pod velmi malým tlakem hořlavý plyn (propan butan), který dává svítivý plamen. Naladíme-li zdroj na rezonanční frekvenci, původně stejně vysoké plamínky změní v pravidelných úsecích svoji výšku.

5 Náš postup

Nejprve jsme pořídili železnou trubici s těmito parametry: délka = 130 cm, průměr = 3,5 cm, tloušťka stěny = 1,5 mm. Do této trubky jsme nechali navrtat po celé délce a v jedné přímce díry s průměrem 1,5 mm vzdálené 1 cm od sebe – tedy cca 130 děr. Poté jsme pořídili reproduktorový set s celkovým výkonem 15 W, který se skládal z výškových a basových reproduktorů. Potřebovali jsme reproduktor stejného průměru jako trubka, a to splňoval právě výškový. Problém nastal s jeho přichycením: Bylo potřeba najít materiál, přes který by se zvuk přenesl bez ztrát do trubice. Ideální se nakonec ukázala tenká průhledná igelitová blána. Reproduktor jsme pak museli napevno připevnit izolepou. Na druhý konec jsme přivedli propan-butan pomocí hadice. Zarážku tvořilo plastové víčko od nápoje.

Jednotlivé pokusy musely probíhat v uzavřené místnosti bez průvanu. Plameny jsou totiž velmi citlivé na vítr. Poté co jsme vyřešili především přívod zvuku do trubice, jsme mohli pozorovat první výsledky: Při některých frekvencích plameny zřetelně změnily svoji výšku – a to v konstantních polohách, čímž jsme prokázali stojaté vlnění. Při hudbě byl efekt mnohem výraznější – plameny, původně několika centimetrové, nabývaly až desetinásobku původní výšky.

6 Bezpečnostní rizika

Bez přivedení zvuku hoří plameny ve směru toku plynu, tedy vzhůru. Při proměnlivém akustickém tlaku uvnitř trubice by se ovšem mohlo stát, že by tlak v trubici byl nižší než

v okolí. V takovém případě bude vzduch nasáván do trubice a plamen by mohl vzniknout uvnitř trubice. Logicky by následoval výbuch, přičemž by tlaková vlna odstranila těsnění na koncích trubice. Proto jsou prostory za konci trubice potenciálně nebezpečné. Nutno podotknout, že takovéto riziko v našem případě nehrozilo, nevytvořili jsme totiž dostatečnou energii, aby byl tlak v trubici výrazně nižší než v okolí. Navíc jsme riziku předcházeli dostatečným přísunem plynu.

Z vysokého množství plynu ale plynula další rizika. Velmi vysoké nároky jsou na těsnění na koncích trubice. V místě, kde byl plyn přiváděn, se problém nevyskytl. Naopak bylo důležité velmi pečlivě utěsnit reproduktor. Jelikož jsme použili hořlavý materiál – izolepu, snadno nám přeskočil plamen vycházející z trubice na ni.

7 Vylepšená aparatura

Po úspěšném prvním pokusu jsme se rozhodli pořídit trubici větší. Naším záměrem bylo zvýšit bezpečnost i názornost. Trubice měla délku 2 m, průměr 6,5 cm – přesně tolik, kolik basový reproduktor.

Větší náčiní však skýtal vyšší rizika. Objem plynu v trubici několikanásobně vzrostl, po skončení pokusu se dostávalo velké množství do okolí. Aby u konce trubice nedocházelo k přeskoku plamene na těsnění, 5 cm od konce jsme díry nevrtali. Ovšem poté co izolepa vlivem tepla vypověděla funkčnost, začal vycházet velký plamen z konce trubice, který postihl i reproduktor. Plamen pak hořel z konce trubice po dobu půl minuty.

8 Akustický tlak

Specifikum experimentu spočívá v prolínání 2 různých veličin – akustické výchylky a akustického tlaku. Tyto veličiny jsou při stojatém vlnění v uzavřené trubici o čtvrtinu periody posunuty, viz [\[3\]](#).

Experiment má ukázat okamžitou výchylku akustického tlaku. V těch místech, kde je tlak nejvyšší, bychom očekávali nejvyšší plameny a naopak. To by ale znamenalo, že v kmitnách akustického tlaku budou plameny oscilovat s frekvencí zvuku. V části periody by tak mohl být vzduch nasáván do trubice. Takovéto kmity bychom nemohli běžně pozorovat, výška plamenů by se jevila konstantní. Přesto ale můžeme určit tento stav jednoduše – jako důkaz poslouží skutečnost, že na koncích trubice zpozorujeme maxima plamenů.

9 Interpretace experimentu

Přes výše zmíněné předpoklady jsme při harmonickém zvuku pozorovali na koncích trubice minimální výšku plamenů. Existují totiž dvě různé interpretace experimentu – první totiž platí pouze za předpokladu vysokého akustického tlaku a nízkého tlaku připouštěného plynu. Pokud je naopak akustický tlak plynu nízký, projeví se více výchylka kmitajících molekul – tam, kde bude nejvyšší, bude i největší rychlost molekul podél stěny a také proud částic vycházejících ven. Maxima jsme tedy pozorovali v uzlu akustického tlaku.

Hmotnostní průtok plynu je vyjádřen rovnicí

$$Q_m = \sqrt{(p_{\text{plyn}} + p_{\text{zvuk}} \sin(\omega t))2\rho},$$

kde ρ je hustota plynu. Je zřejmé, že tlak připouštěného plynu je konstantní, zatímco akustický tlak osciluje. Pro případ, že by byl vzduch z okolí nasáván (výraz pod odmocninou by nabyl záporných hodnot), je třeba rovnici rozvinout pomocí Taylorova rozvoje a vyjádřit závislost střední hodnoty hmotnostního průtoku plynu:

$$\langle Q_m \rangle \approx A \sqrt{2\rho p_{\text{plyn}}} \left(1 - \frac{1}{16} \left(\frac{p_{\text{zvuk}}}{p_{\text{plyn}}} \right)^2 \right)$$

Byl ponechán pouze lineární a kvadratický člen, rovnice je pouze přibližnou aproximací skutečnosti. Nicméně je zřejmé, při jakých hodnotách tlaků bude tok plynu nulový či záporný.



Obr. 1 Příklad Rubensovy trubice s vysoce intenzivním zdrojem zvuku. V určitých místech je vzduch z okolí nasáván do trubice[4].

10 Závěr

Zdařil se nám původní cíl – pozorovat zvukové vlny pomocí plamenů vycházejících z trubice. Problémy se vyskytly s těsněním, kvalita provedení je též závislá na sebemenším průvanu. Kvůli slabé intenzitě zvuku a dalším neznámým parametrům jsme při harmonických zvucích dosáhli jen slabých výchylek. Naopak při hudbě bylo provedení vysoce efektní. Ač vypadá experiment na pohled jednoduše, teoretické odvození mnohé překvapí.

Reference

- [1] R. Feynman, *Feynmanovy přednášky z fyziky*, Fragment, Praha, 2000, str. 635-645
- [2] <http://www.phy.mtu.edu/~suits/SpeedofSound.html>
- [3] Walter Fendt, Stojaté podélné vlnění, http://www.walter-fendt.de/ph14cz/stlwaves_cz.htm
- [4] <http://www.fysikbasen.dk/English.php?page=Vis&id=6>
- [5] P. Konečný, Rubensova trubice, http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_12/12_02_Konecny.html
- [6] J. Zahradníček, Rubensova trubice, http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/121286/CasPestMatFys_048-1919-2_8.pdf