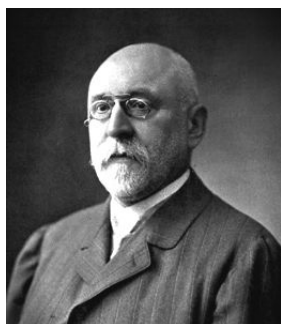


Historie fyziky ve Strouhalově Akustice nalezená

IVO VOLF – KATEŘINA VONDŘEJCOVÁ

Přírodovědecká fakulta UHK, Hradec Králové



Čeněk Strouhal

Malý počet vyučovacích hodin, věnovaných fyzikálnímu učivu, a snaha co nejstručněji žákům vysvětlit podstatu a užitečné použití fyzikálních poznatků vede často k tomu, že zapomínáme při výuce sdělovat základní informace, které se týkají vývoje poznatků. Tím vzniká často v žácích nesprávný dojem, že fyzikální poznání je velmi jednoduše získatelné, že v učebnicích jsou výsledky většinou přímé cesty od konkrétního pozorování k teorii a potom zase zpět k praktickým aplikacím. Historické motivace, jež vedou k pochopení, proč se lidé problémy začali zabývat,

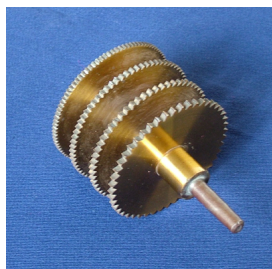
jak volili hypotézy a museli je potvrzovat nebo odmítat, jsou potom pro učitele fyziky jakýmsi nadbytečným materiálem, které je nejlépe vynechat, aby zbyl čas také na opakování a zkoušení.

I když v poslední době vyšlo několik prací z historie fyziky od *I. Krause*, které upozorňují čtenáře na to, že fyzikální poznání je součástí kulturního dědictví lidstva a má tedy výchovný vliv na žáky základních a středních škol, a to nejen v oblasti fyziky a techniky, ale při řešení problémů vůbec, nedostaly se tyto práce ještě na jednotlivé školy. Na druhé straně mají velký vliv na učitele i práce, které před řadou let byly považovány za zdroj poznávání pro učitele středních a vysokých škol. Jedním z takových pramenů jsou vysokoškolské učebnice fyziky, které na začátku minulého století zpracoval Čeněk Strouhal, přední experimentální fyzik.

Historická poznámka: Čeněk (Vincent) Strouhal se narodil 10. dubna 1850 v Seči u Chrudimi, maturoval v Hradci Králové v roce 1869 a vystudoval filosofickou fakultu Univerzity Karlovy, poté se stal od roku 1875 asistentem ve Würtzburgu, kde se v roce 1878 habilitoval. V roce 1882 se stal profesorem geologického ústavu v New Yorku, ale brzy byl povolán na jako profesor experimentální fyziky na tehdy právě oddělené české univerzitě v Praze. Ve vědecké komunitě se stal známým svými pracemi z akustiky. V letech 1903/4 byl rektorem Univerzity Karlovy. Velmi známé jsou jeho učebnice pro vysokoškolské studenty Mechanika (1901), Akustika (1902), Thermika (1908) a Optika (1919), které vydala Jednota českých matematiků v Praze. Předností těchto učebnic jsou především historické motivace, jež doprovázejí velmi odborný, ale srozumitelný výklad. Strouhal zemřel 23. ledna 1922 v Praze.

Na Strouhalových vysokoškolských učebnicích fyziky nejvíce oceňujeme nejen styl výkladu, ale zejména historická východiska, která doprovázejí tento výklad a umožňují čtenáři, aby se nechal konfrontovat s minulostí na základě konkrétních údajů. Proti nám měl Čeněk Strouhal výhodu v tom, že byl přece jen o sto let blíže minulosti, než jsou dnešní čtenáři. Historické údaje nám umožňují vycházet z konkrétních motivací, které mohou být zdrojem informací pro nové fyzikální úlohy. Dnes jsme vybrali Strouhalovu Akustiku; důvodem je skutečnost, že akustické jevy nás dennodenně provázejí životem, pomocí sluchu získáváme značné procento informací, ale o zvuku, akustických jevech a konkrétně o hudební akustice se dnešním žákům na základních a středních školách dostává poznatků velmi málo.

Zdroji zvuku mohou být v současné době různá technická zařízení, z nichž se line hlas řečníků, přenosy divadelních her, koncertů, doprovázejí televizní vysílání... Ve škole se žáci dozvídají o tom, že základem zvuku jsou různé periodické jevy, které se šíří vzduchem a jež mají požadovanou frekvenci, na kterou je citlivé lidské ucho, konkrétně mezi frekvencemi 16 Hz až 20 000 Hz. Málokdy se dostaneme ve školní výuce ke zdrojům zvuku, jako jsou sirény, na nichž lze dobře vyložit vztah mezi frekvencí dějů a výškou tónu. K výkladu potřebujeme ozubené kolečko, které roztočíme na odstředivém stroji a můžeme získat informaci o sirénách, konkrétně o siréně, kterou lékař a fyzik na College de France *Félix Savart* (1830); siréna se skládá z několika mosazných desek, umístěných na společné vodorovné ose, která prochází jejich středem (obr. 1). Na obvodu kruhových desek jsou vypilovány zuby, k nim se přiloží karton, jenž se uvede nárazy na ozubení do kmitavého pohybu. Např. zvolíme



Obr. 1 [1]



Obr. 2 [2]

čtyři desky s počtem zubů 80, 100, 120, 160, což lze vyjádřit poměrem 4 : 5 : 6 : 8; při vhodné frekvenci potom vznikají slyšitelné tóny.

Úloha 1: Na základě údaje o Savartově siréně určete, jakou frekvenci se musejí otáčet měděné desky, aby vzniklý nejnižší tón měl frekvenci 110 Hz, jakou frekvenci se budou desky otáčet, když nejvyšší tón dosáhne frekvence 440 Hz? Jakých frekvencí dosáhnou tóny přiložením kartonu k dalším dvěma ozubeným kolečkům? Jak se nazývají hudební intervaly, které je možno uslyšet přiložením kartonu postupně k jednotlivým otáčejícím se mosazným deskám?

Siréna Seebeckova, jejíž autor byl profesorem fyziky na univerzitě v Lipsku, *Friedrich W. A. Seebeck* (1805–1849), je vytvořena jedinou deskou, v níž jsou místo ozubení otvory, vyvrtané tak, že jejich vzdálenosti od středu rotujícího disku jsou stále podle (obr. 2). V soustředných kruzích můžeme vytvořit několik soustav otvorů, proti nimž se žene vzduch úzkou trubičkou; dochází tak k přerušování proudu vzduchu a následně k vytvoření tónů o určité frekvenci. Nejmenší čísla pro určení počtu otvorů na osmi soustředných kružnicích jsou 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48.

Úloha 2: Jakou frekvencí se musí otáčet mosazná deska s otvory, aby v pořadí šestý vzniklý tón měl frekvenci 440 Hz? Jaké frekvence bude vydávat siréna, když trubičku s proudícím vzduchem budeme přesunovat od středu základní desky až po okraj?

Akustika se zabývá nejen vznikem zvuku, ale otázkami stanovení rychlosti zvuku. Na základě pozorování bylo zjištěno odhadem, že rychlost zvuku je podle *P. M. Mersenna* (1588–1648) asi 448 m/s, což uvádí také *P. Gassendi* (1592–1655). Později v roce 1656 byla hodnota upřesněna

na 350 m/s. K odhadům se dostali pozorováním záblesku při výstřelu a okamžikem, kdy dospěl k pozorovateli zvuk způsobený tímto výstřelem.

Úloha 3: Vysvětlete postup, který se užíval v 17. století k odhadu rychlosti zvuku ve vzduchu. Pokuste se navrhnout obdobný experiment v dnešních podmínkách (abyste nemuseli střílet starou puškou) a vysvětlete, proč se pozorovatelé dostali k poměrně nepřesnému výsledku.

V 17. století se zabýval stanovením rychlosti zvuku ve vzduchu také *Isaac Newton*; dnes bychom vyjádřili jeho úvahy o rychlosti zvuku vztahem $c = \sqrt{p/\rho}$, kde p je tlak vzduchu a ρ hustota vzduchu za dané teploty. Vztah se zdá být rozměrově v pořádku, avšak výsledky výpočtů se od experimentálně zjištěných údajů značně liší.

Úloha 4: Stanovte rychlost zvuku pomocí Newtonova vztahu. Víte, že hustota vzduchu závisí na teplotě a na tlaku, tedy $\rho = M_m p/RT$, dále $T = T_0(1 + \gamma t)$, kde $\gamma = 1/(273 \text{ K}) = 0,00367 \text{ K}^{-1}$.

Nesoulad mezi teorií a pozorováním dal další popud experimentátorům, aby zpřesňovali své pokusně určené hodnoty pro rychlost zvuku ve vzduchu. *R. Boyle* určil kolem roku 1700 hodnotu 366 m/s, *Cassini*, *Huygens*, *Picard* a *Römer* ve stejné době 356 m/s, *Flamsteed* a *Halley* v letech 1708 a 1709 hodnotu 348 m/s. V roce 1738 bylo provedeno několik experimentů, kdy v okolí Paříže bylo vybráno několik pozorovacích stanic – na dvou, což byly pevnosti Montmartre a Montlhéry, byly dávány signály formou dělových výstřelů a na dalších místech (pařížská hvězdárna, Fontanay-aux-Roses, zámek Lay) se konala pozorování časová, aby se vyloučil vliv větru. Když byl výsledek přepočítán na teplotu 0 °C, vycházela hodnota 332,0 m/s. Pozorování se opakovala ještě v Jižní Americe (*De La Condamine* v Quito 1740 získal hodnotu 339 m/s, později 1744 v Cayenne na břehu mořském při poměrně vysoké teplotě získali hodnotu 357 m/s); výsledkem bylo, že Newtonem získaný vztah bude nutno ještě upravit, neboť výsledky se nikdy nedostaly pod hodnotu 330 m/s. Až v roce 1816 se úkolu ujal fyzik *P. Laplace*, který vyšel z myšlenky, že děje, spojené s šířením zvuku ve vzduchu, jsou povahy adiabatické, nikoli izotermické, a pro vznikající změny nebude platit vztah Boyleův-Mariottův, nýbrž Poissonův. Výsledný vztah potom získal tvar $c = \sqrt{\kappa p/\rho}$.

Úloha 5: Odhadněte, jaká je změna rychlosti zvuku spojená se změnou teploty o 1 °C.

Úloha 6: Podle upraveného vztahu určete rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, je-li známo, že pro vzduch $\kappa = 1,40$. Pokuste se úpravou vztahu s využitím informace v úloze 4 zjistit, jak závisí rychlost zvuku ve vzduchu na absolutní teplotě T .

Uvedme nyní informaci, týkající se měření rychlosti zvuku v noci dne 21. června 1822. Měření se konala na dvou stanicích – Villejuif a Montlhery, jejichž vzájemnou vzdálenost změřil *Arago* triangulací a získal hodnotu $18\,612,5\text{ m}$. Postup při experimentování byl následující: V jistém domluveném okamžiku vypálilo ránu dělo na první stanici, přesně po době 5 min vypálilo ránu dělo na druhé stanici, pět minut nato odpovědělo dělo na první stanici, pět minut nato ve druhé stanici a tak to pokračovalo, až počet ran dosáhl domluvené hodnoty. Aby se vyloučil vliv větru, byly doby zkombinovány, takže průměrná doba, za kterou urazil zvuk příslušnou trasu, byla $54,6\text{ s}$ při teplotě $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Úloha 7: Na základě provedených měření vypočtete střední hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu při dané teplotě. Víte-li, že rychlost zvuku se mění se změnou teploty o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ o hodnotu $0,61\text{ m/s}$, určete z daných hodnot rychlost zvuku při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Získané výsledky porovnejte s dnešními hodnotami.

Jestliže uvážíme pohyb vzduchu, pak nejvýraznější změny nastanou, bude-li se zvuku šířit po větru (celková rychlost zvuku c se změní na $c+v$, kde v je rychlost větru) po dobu t_1 , nebo proti větru (rychlost zvuku bude $c-v$) po dobu t_2 ; potom vhodně vyloučíme vliv větru a získáme dobu šíření zvuku za bezvětří po dobu t . Potom platí $ct = (c+v)t_1 = (c-v)t_2$. Po úpravách vztahu získáme hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu za bezvětří. Pokusy o změření rychlosti zvuku se pak opakovaly ještě 27. a 28. června 1823 na pláni Utrechtské; vzájemná vzdálenost pozorovacích stanic byla $17\,669,3\text{ m}$ a průměrná hodnota změřených dob (mezi optickým a akustickým signálem) při teplotě $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla 52 s .

Úloha 8: Vypočtete, k jaké hodnotě rychlosti zvuku ve vzduchu se dopracovala skupina vědců po měření na pláni Utrechtské.

Při stanovení rychlosti zvuku v kovech se vychází ze vztahu $c = \sqrt{E/\rho}$, kde E je Youngův modul pružnosti a ρ je hustota látky.

Úloha 9: Určete rychlost zvuku ve vybraných kovech – ocel, hliník, mosaz. . . Příslušné hodnoty modulu pružnosti a hustoty najdete v tabulkách nebo na internetu.

Úloha 10: Ve Strouhalově Akustice najdeme i řešení problému, jenž autor nazývá Newtonův: Jak lze z doby dopadu kamene do propasti stanovit hloubku této propasti. Předpokládáme, že znáte vztahy pro řešení kvadratické rovnice. Pokuste se vypočítat z doby t , která se skládá z doby volného pádu t_1 a doby návratu zvukového signálu vzniklého při dopadu kamene t_2 , kde $t = t_1 + t_2$, určit hloubku propasti. Úlohu řešte analyticky na základě řešení kvadratické rovnice. Jak se bude lišit výsledek výpočtu v létě při rychlosti zvuku 340 m/s a v zimě při rychlosti 328 m/s?

Poté, co byla zjištěna rychlost zvuku ve vodě a dosáhlo se souladu měření a teorie, pokusili se o přímé měření rychlosti zvuku ve vodě v roce 1827 *J. D. Colladon* a *Ch. Sturm* na Ženevském jezeře v místě, kde jezero dosahuje největší šířky 13,487 km, a to mezi městy Rolle a Thonon. Při měření byl dáván akustický signál úderem na zvon, do vody ponořený, optický zapálením střelného prachu. Důležité bylo zajištění současnosti mezi oběma signály, jež byla zajištěna pákovým zařízením – v okamžiku, kdy kladivo udeřila na zvon, byla zapálena hromádka prachu a způsobila záblesk. Druhým problémem bylo stanovení okamžiku, kdy dorazil akustický signál. To bylo provedeno velkým naslouchátkem, jehož širší otvor byl uzavřen membránou a užší byl vložen do zvukovodu ucha. Opoždění zvukového signálu oproti optickému se měřilo několikrát a výsledky se zpřůměrovaly. Toto opoždění dosáhlo v průměru hodnoty 9,4 s.

Úloha 11: Na základě uvedených informací zjistěte střední hodnotu rychlosti zvuku ve vodě při daném měření. Porovnejte získanou rychlost s rychlostí zvuku 340 m/s.

Kvůli úplnosti uvedeme ještě vztah pro rychlost zvuku v pevných látkách: $c = \sqrt{E/\rho}$, kde E je Youngův modul pružnosti a ρ hustota látky.

Úloha 12: Jestliže víte, že hustota oceli je 7800 kg/m^3 a modul pružnosti $2,2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ určete rychlost zvukového signálu v ocelovém materiálu. Porovnejte získanou rychlost s rychlostí zvuku ve vzduchu (340 m/s).

Literatura

- [1] *Strouhal, Č.:* Akustika. Jednota českých matematiků, Praha 1902.

Zdroje vyobrazení

- [1] <http://www.istitutomontani.it/museo/file/visstrimento.php?codice=639>
[2] <http://www.fgfontana.eu/museo-virtuale/fisica/facu/antepime/mini-facu117.jpg>