

Tajomstvá akustiky píšťal

FRANTIŠEK KUNDRACIK

Katedra experimentálnej fyziky, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzity Komenského v Bratislave

Úvod

O vzniku zvuku v píšťalách sa v škole žiaci veľa podrobností nedozvedia. Vysvetlenie sa obvykle obmedzí na opis stojatej zvukovej vlny v píšťale a dôležitosť ostrej hrany, do ktorej naráža prúd vzduchu. Cieľom tohto článku je podrobnejšie odpovedať na tri základné otázky, týkajúce sa vzniku zvuku v píšťalkách:

1. Prečo je taká dôležitá oblasť píšťaly v okolí hrany, a ako vlastne vzniká čistý a nepretržitý tón?
2. Ako možno silou fúkania a zakrývaním koncového otvoru ovplyvniť výšku tónu?
3. Prečo má fujara práve tri dierky a prečo sú obľúbené aj píšťaly so šiestimi dierkami?

1. Vznik súvislého tónu v píšťale

Tón píšťaly vzniká pri periodických odrazoch tlakovej vlny na koncoch trubice. Pri odraze od otvoreného konca (alebo od konca s okienkom), na rozdiel od uzavretého konca, sa vlna odrazí v protifáze a časť vlny opustí píšťalu. Na získanie trvalého tónu treba teda odrážajúcej sa vlne neustále dodávať energiu podobne, ako treba postrkováním dodávať energiu detskej hojdačke.

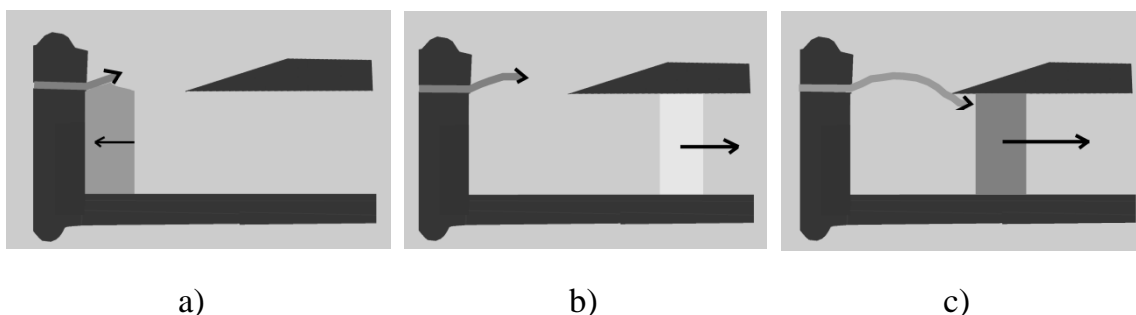
Na rozdiel od hojdačky, kde sú naše reflexy rýchlejšie než jej pohyb, pohyb zvukovej vlny je pre naše reflexy prirýchly. Dofukovanie vzduchu vo vhodnom okamihu preto treba zautomatizovať. Slúži na to zariadenie, ktoré sa nazýva hlásnička, alebo niekedy tiež poeticky „duša píšťaly“ (obrázok 1). Jej základom je tenký kanálik, ktorým fúkame tenký prúd vzduchu na ostrú hranu. Na nej sa prúd vzduchu vychýli nahor alebo nadol za vzniku víru. Pri vychýlení prúdu jedným smerom sa systém snaží dostať do rovnovážnej polohy a prúd vzduchu sa vráti späť do priameho smeru. V dôsledku zotrvačnosti však obvykle prejde až na opačnú stranu hrany. Smer vychýlenia prúdu vzduchu sa tak spontánne periodicky mení a ľahko ho možno ovplyvniť napríklad aj tlakom vzduchu v píšťale.



Obrázok 1 - Vľavo: rez hlásničkou zobcovej flauty. Vpravo: kanálikom fúkame prúd vzduchu na ostrú hranu za vzniku vírov.

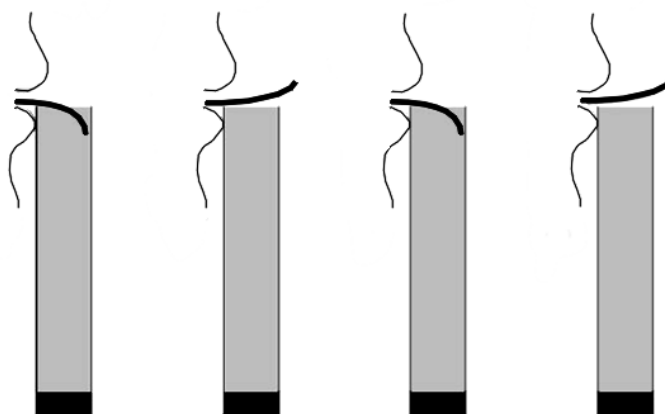
Mechanizmus dodávania energie v hlásničke je znázornený na obrázku 2. Keď sa zhustenie tlakovej vlny priblíži k hlásničke (obr. 2a), nárast tlaku spôsobí vychýlenie

průdu vzduchu smerom von z trubice. Prúd vzduchu smerujúci von postupne zmení svoj smer a vracia sa do rovnovážnej polohy (obr.2b). Tlaková vlna sa medzitým odrazila od konca trubice pri hlásničke. Hlásnička má otvor (okienko), preto môžeme koniec rúry pri hlásničke považovať za otvorený (vlna sa odrazí v protifáze). Po trubici sa teda od hlásničky späť šíri zriedenie vzduchu a o pol periódy neskôr aj zhustenie. V tom čase (obr. 2c) už vychýlený prúd dosiahol hranu a smeruje z vonkajšieho priestoru do trubice. Podklízne preto pod hranu a za vzniku víru „fúkne“ do odchádzajúceho zhustenia, čím ho zväčší. Na obrázku 2 kvôli prehľadnosti nie sú však víry nakreslené. Podobný dej prebieha aj pri príchode zriedenia vzduchu k hlásničke, len výchylky prúdu majú opačný smer a vír sa vytvorí na vonkajšej strane hrany (čím sa zriedenie ešte zväčší).



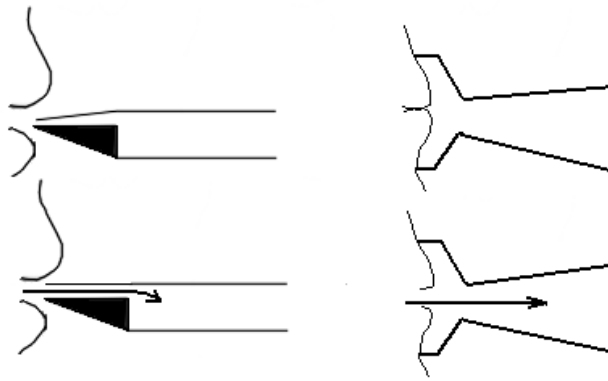
Obrázok 2 - Mechanizmus dodávania energie tlakovej vlny

Rovnaký mechanizmus (víry) využíva aj Pannova flauta (obrázok 3), čo je zrejme najjednoduchší typ píšťaly.



Obrázok 3 - Mechanizmus dodávania energie tlakovej vlny v Pannovej flaute

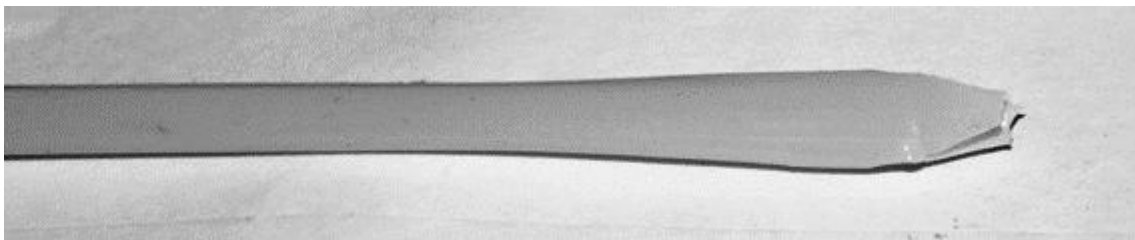
Ďalší veľmi často používaný princíp dodávania energie je privieranie/otváranie prívodu vzduchu. Na to sa používa jazýček (klarinet, saxofón) alebo ľudské pery (trúbka) – obrázok 4. Príchod zriedenia / zhustenia otvára / zatvára jazýček resp. zväčšuje / znižuje štrbinu medzi perami. Tým sa vzduch do trubice dofukuje vo vhodnom okamihu.



Obrázok 4 - Mechanizmus dodávania energie tlakovej vlny v klarinete (vľavo) a v trúbke (vpravo)

Uvedené princípy sa dajú veľmi ľahko demonštrovať. Na výrobu jednej trubice Pan-novej flauty postačí tenká rúrka a kúsok plastelíny. Ten použijeme ako zátku na jednej strane trubice. Dĺžku trubice nastavíme posúvaním zátky pomocou dreveného piestika. Po dosiahnutí správnej polohy zátky (výšky tónu) ju z oboch strán stlačíme, čím sa jej poloha zafixuje. Vhodné plastové trubky a okrúhle drevené tyčky nájdeme napríklad v obchodoch so stavebninami.

Princíp jazýčka možno demonštrovať pomocou kúska stonky púpavy, ktorého jeden koniec stlačíme. Stonka tam pukne a vytvorí dva blízke jazýčky. Je možné použiť aj plastovú slamku na pitie, ktorej jeden koniec z bokov šikmo zastrihneme, čím vzniknú dva jazýčky (obrázok 5). Jazýčky ešte nakoniec zubami pritlačíme k sebe, čím je píšťalka hotová.



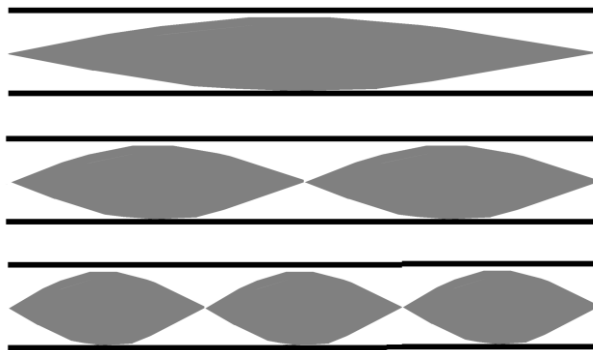
Obrázok 5 - Jazýčková píšťalka z plastovej slamky

Výšku tónu nastavíme zastrihnutím slamky na vhodnú dĺžku.

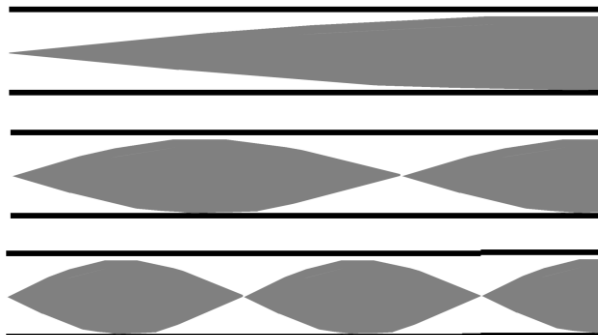
Výroba píšťaly s hlásničkou je komplikovanejšia a opísaná napríklad v [1]. Na demonštrovanie dodávania energie pomocou pier nám postačí asi 1m dlhá rúra s priemerom 3 - 4 cm (napríklad na odpadové potrubie alebo z vysávača). Získame tak nástroj podobný austrálskemu didgeridoo. Na dosiahnutie takej farby zvuku ako ma didgeridoo treba použiť hrubšiu rúru (asi 5 cm), pričom priemer jedného konca zmenšíme. Austrálski aborigéni používajú na zmenšenie priemeru rúry vosk, pri plastovej rúrke postačí ohriať ju a v zmäknutom stave vytvarovať.

2. Zmena výšky tónu silou fúkania

V predchádzajúcej časti sme vysvetlili vznik nepretržitého tónu pomocou dejov prebiehajúcich pri príchode maxima alebo minima tlakovej vlny k okraju trubice a hlásničke. V skutočnosti sa ale tlak mení od maxima k minimu a späť plynulo, vlny bežia nepretržite z jedného konca trubice na druhý a v trubici vzniknú stojaté vlny. V závislosti od frekvencie tónu sa teda v trubici môže nachádzať celá séria maxim a minim tlaku. Jediným obmedzením je, že na otvorenom konci trubice nemožno dosiahnuť zmenu tlaku (vzduch môže voľne vychádzať von a vchádzať dnu), musí sa tam nachádzať minimum zmien tlaku. Na uzavretom konci je to naopak – tam vzduch nemôže uniknúť a zmeny tlaku dosahujú svoje maximum (obrázky 6 a 7).



Obrázok 6 - Rozloženie zmien tlaku v trubici s oboma koncami otvorenými



Obrázok 7 - Rozloženie zmien tlaku v trubici s jedným koncom uzatvoreným

Ak v píšťale istej dĺžky môžu vzniknúť stojaté vlny s rôznou frekvenciou, ako si píšťala vyberie, ktorá frekvencia sa vybudí? Bude to tá, ktorá pri odraze v hlásničke získa najviac energie od prúdu vzduchu z kanálíka. Už vieme, že doba prechodu vychýlenia prúdu od kanálíka po hranu je v optimálnom prípade rovná polperióde kmitov. Ak fúkame do kanálíka slabo, prúd vzduchu má malú rýchlosť, takže sa zosilní nízka frekvencia, napríklad zodpovedajúca situácii na obrázku 6 hore. Ak fúkneme silnejšie, napríklad dvojnásobným tlakom, rýchlosť prúdu sa zdvojnásobí a najviac sa zosilní vyššia frekvencia (obrázok 6 v strede). Pri ďalšom zvýšení sily fúkania sa postupne vybudia vyššie násobky najnižšej frekvencie.

Možnosti zmeny výšky tónu silou fúkania sú obmedzené. Napríklad dve frekvencie zodpovedajúce situácii na obrázku 6 hore a v strede sú v pomere 1:2, čo je ten istý tón, iba o oktávu posunutý (napríklad C1-C2). Preto sa ako základný tón píšťaly považuje tón zodpovedajúci situácii na obr. 6 v strede (napríklad C2). Ešte silnejším fúknutím získame situáciu na obr. 6 dolu, čo zodpovedá pomeru frekvencií (vzhľadom k základnému tónu) 2:3, čo zodpovedá kvinte (napríklad C2-G2). Zakrytím konca píšťalky získame aj iné pomery. Silnejším fúkaním do píšťalky získame pomerne veľké množstvo tónov, hoci nie všetky tóny stupnice. Jednoduché emotívne melódie však dajú zahrať aj na píšťalke bez dierok - koncovke.

3. Zmena výšky tónu dierkami

Na zahratie iných tónov, než umožňuje koncovka, treba píšťalky rôznych dĺžok. Skrátiť dĺžku píšťalky možno aj navrtaním dierok do trubice. Prstami potom odkryjeme vhodnú dierku (obrázok 8).



Obrázok 8 - Rez trojdierkovou píšťalkou

Už vieme, že silnejším fúknutím do píšťalky môžeme vybudíť kvintu (napríklad k tónu C2 je to G2). Chýbajú nám preto 3 ďalšie tóny: D2, E2 a F2. Ak teda urobíme do píšťalky 3 dierky na vhodnom mieste, pri slabšom fúkaní dokážeme zahrať 4 tóny: C2 (všetky dierky zakryté), D2 (spodná dierka odkrytá), E2 (dve spodné dierky odkryté) a F2 (všetky dierky odkryté). Potom opäť zakryjeme všetky dierky a fúkneme silnejšie. Tým sa vybudí vyšší násobný tón G2. Opätovným odkrývaním dierok zahráme ďalšie vyššie tóny. Na nájdenie správnej polohy dierok môžete použiť pomôcku [2].

Ďalšou možnosťou, ktorá umožňuje polohou dierok presnejšie doladiť aj vyššie tóny, je vyvrtanie šiestich dierok. Pri zakrytých všetkých dierkach zahráme základný tón (napríklad C2), potom postupným odkrývaním dierok tóny D2-E2-F2-G2-A2-H2. Nakoniec zakryjeme všetky dierky a fúkneme silnejšie, čím zahráme C3. Ďalším odkrývaním dierok môžeme zahrať aj vyššie tóny.

Záver

Pochopenie, ako fungujú píšťalky, by malo patriť k všeobecnému vzdelaniu, keďže píšťalky a fujara patria k nášmu kultúrnemu dedičstvu. Výroba jednoduchých píšťalok by zároveň mohla byť zaujímavou žiackou aktivitou.

Literatúra

- [1] Kundracik F.: *Tlakové vlny a ich rezonančné zosilnenie. Ako vlastne hrá koncovka a fujara?* Fyzikálne listy XVII (2012), č. 2-3, s. 11-18. ISSN 1337-7795.
- [2] <http://www.drp.fmph.uniba.sk/~kundracik/fujara.xls>