Rubensova trubice

JAROSLAV REICHL, JAKUB DVOŘÁK
Střední průmyslová škola sdělovací techniky, Panská 3, Praha

V příspěvku je popsána konstrukce přístroje, který je vhodný jako ukázka stlačitelnosti plynu vlivem akustických vln, demonstrace stojatého vlnění, šíření zvuku v plynu, … Přístroj vznikl na základě přípravy žáka Jakuba Dvořáka na splnění praktického domácího úkolu z fyziky.

Úvod

Při své výuce fyziky se snažím nejen předat žákům příslušné znalosti a dovednosti z fyziky, ale také se v nich snažím pěstovat respekt i lásku k tomuto pro mnohé ne příliš oblíbenému předmětu. Proto do svých hodin zařazuji řadu experimentů, problémových úloh, motivačních úloh, úlohy inspirované každodenním životem, …, aby si žáci uvědomili, že je fyzika skutečně provází každý den a pomáhá jim s vysvětlením těchto jevů.

Kromě aktivit, které pro žáky připravuji já, zařazuji i aktivity, které si připravují i sami žáci. Mezi takové aktivity patří i praktické domácí úlohy.

Praktické domácí úkoly

Praktické domácí úlohy zadávám žákům druhých ročníků technického lycea. Zadání těchto úkolů má dva hlavní cíle. Prvním je zopakování si látky z prvního ročníků, prohloubení poznatků získaných jak teoretickým studiem fyziky, tak praktickým experimentováním či proměřováním hodnot fyzikálních veličin. Současně si někteří žáci vyzkouší i dosud nevyzkoušené dovednosti při konstrukci jednoduchých experimentálních zařízení, shánění vhodného materiálu k jejich výrobě, … Proto volím praktické úlohy, aby se žáci museli nad vybraným fyzikálním jevem zamyslet hlouběji a přistoupit k jeho realizaci jinak, než že se naučí jeden vztah a jednu definici fyzikálního zákona. Natolik se ale v té době už se žáky vzájemně známe, že vědí, že by takový způsob prezentace fyziky u mne neprošel!

Druhým cílem, se kterým tyto úkoly zadávám, je možnost vyzkoušet si prezentovat svůj nápad, svojí pomůcku, svojí variantu experimentu před ostatními spolužáky i učitelem. A ač by se mohlo zdát, že spolužáci se nebudou příliš ptát a nebudou hledat chyby v prezentovaném experimentu, velmi často právě od nich přicházejí takové dotazy, které donutí prezentujícího žáka se hluboce zamyslet a hledat všechny relevantní souvislosti. A tato dovednost - rychle se zorientovat v položeném dotazu, rychle vymyslet vhodnou a pokud možno správnou odpověď, rychle reagovat na výtku či nesrovnalost v předvedeném experimentu - bude velmi potřebná při ucházení se o nové pracovní místo, žádání o finanční příspěvek na svůj výzkum, prezentaci dosažených výsledků a podobně.

Řada žáků pak odchází zpět na své místo ve třídě se slovy: „Tedy nemáte to jednoduché, pane učiteli.“ A ani tento efekt není od věci, pokud si žáci uvědomí, že některými svými dotazy či poznámkami mohou učitele (na pár okamžiků) vyvést z předem připravené hodiny.

Tyto praktické domácí úkoly zadávám žákům na počátku školního roku a oni je pak přibližně od začátku října prezentují ostatním. Každou hodinu (resp. hodinu věnovanou cvičením z fyziky) je prezentován jeden domácí úkol.

V nabízeném seznam úkolů jsou standardní experimenty, které měli možnost žáci vidět v prvním ročníku v hodinách fyziky, některé jednodušší konstrukce strojů či měřících přístrojů, sada experimentů s jedním typem pomůcky (PET láhve, kompaktní disky, injekční stříkačky, …) či úkol dle vlastního námětu. Ty je třeba ale předem konzultovat se mnou, abych posoudil relevantnost námětu.

Při zadávání těchto úkolů zdůrazňuji, že za splnění úkolu budu považovat i předvedení mého experimentu, který žáci viděli minulý rok v hodinách fyziky. Stejně tak nabádám, aby neinvestovali velké finanční částky do svého zařízení, ale aby využili předměty a materiály, které mají doma a které by případně jinak vyhazovali.

I přes toto doporučení se občas najdou žáci, kteří je nedodrží.

Rubensova trubice

Námět

„Co byste řekl tomu, kdybych vyrobil Rubensovu trubici?“ zeptal se jednoho dne Jakub Dvořák ze třídy 15M naší školy. Neměl jsem nic proti, ale upozorňoval jsem na finanční náročnost, na technické problémy spojené se stavbou a na případné nebezpečí při práci s hořlavým plynem. Nic z toho Jakuba neodradilo. A natolik jsem ho již znal, že jsem ani neočekával, že mé námitky vezme. Znám ho nejen ze školy jako velmi schopného technika, který i když pracuje s vysokým elektrickým napětím či s nebezpečnými předměty je schopen tato nebezpečí vnímat a svou práci tomu uzpůsobit.

V termínu, kdy měl svůj experiment prezentovat, přišel do školy i se svým „grilem“, jak začali pomůcce poměrně trefně říkat jeho spolužáci.

Princip činnosti

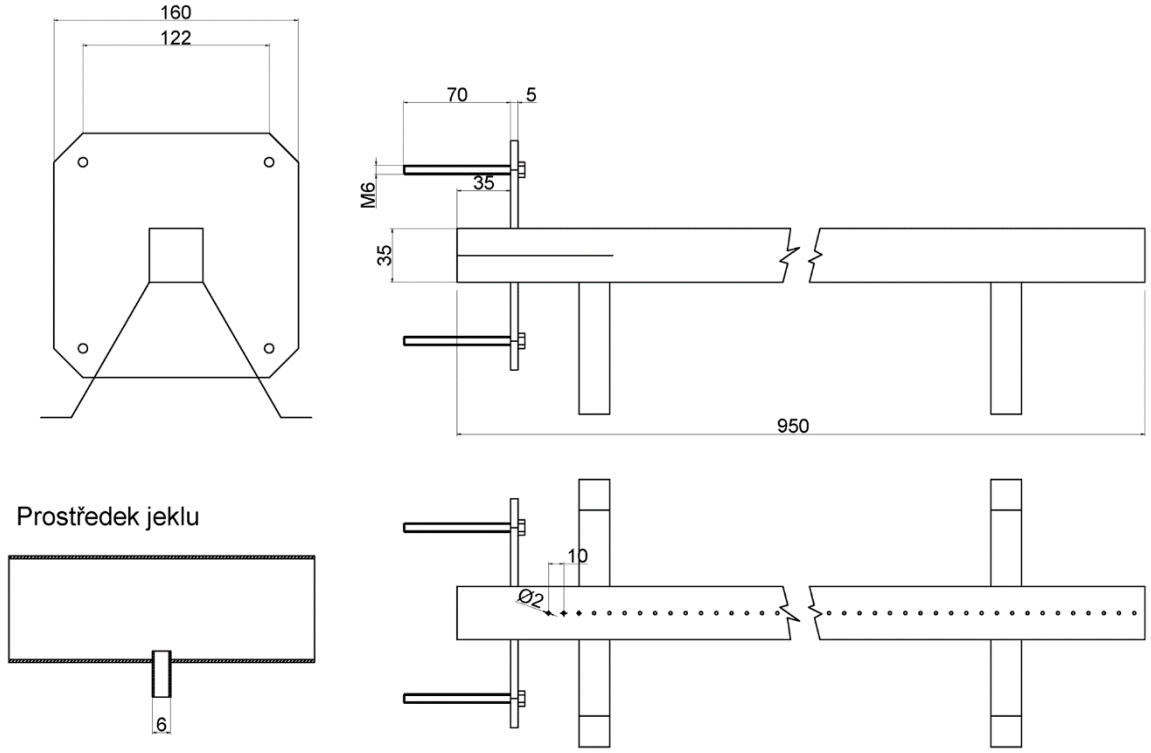
Trubici, pomocí níž lze vizualizovat stojaté zvukové vlnění, sestrojil poprvé německý fyzik Heinrich Rubens (1865 - 1922) jako pomůcku pro své přednášky na berlínské univerzitě. Jeho přístroj byl pravděpodobně inspirován Kundtovou trubicí, kterou vyrobil jeho učitel. Rubensova trubice je trubice, jejíž průřez může být kruhový, obdélníkový i čtvercový a v jejíž horní části jsou vyvrtány malé otvory. Trubice, která je z jedné strany uzavřena pevně a z druhé strany je uzavřena pružnou membránou, se naplní plynem a ke konci s pružnou membránou se přiloží zdroj zvuku (reproduktor, křičící člověk, …).

Vlivem šíření zvuku plynem v trubici se plyn postupně zřeďuje a zahušťuje - zvuk se v trubici šíří ve formě podélného vlnění. Je-li trubice na opačné straně, než je umístěn zdroj zvuku, pevně uzavřena, vlnění se od tohoto pevného konce odrazí a uvnitř trubice tak postupně vznikne stojaté vlnění. Vlivem stojatého vlnění se bude periodicky měnit tlak plynu v místech trubice, která odpovídají kmitnám a uzlům stojatého vlnění i bodům mezi těmito dvěma typy význačných bodů.

Pokud plyn, který uniká z otvorů vyvrtaných v horní části trubice, zapálíme, výška plamene bude odpovídat tlaku plynu v místě pod příslušným otvorem. Tím ale výška plamene bude určovat rozložení kmiten a uzlů (a dalších typů bodů, v nichž má vlnění obecně různou amplitudu). Změnou frekvence zvuku, který do trubice přichází, se bude měnit rozložení kmiten a uzlů a tím i výška plamenů nad jednotlivými otvory v trubici.

Výroba konkrétního typu trubice

Stavba Rubensovy trubice zabrala Jakubovi přibližně týden. Během stavby se nesetkal se žádnými většími problémy. To bylo dáno zejména tím, že si Jakub před samotnou výrobou vytvořil výkres celé sestavy (viz obr. 1), kterého se po celou dobu výroby přesně držel. Na základě výkresu bylo proto i relativně snadné vybrat a nakoupit vhodné materiály na stavbu celé trubice.



Obr. 1: Nákres pomůcky

Jako hlavní díl byl použit hliníkový jekl s délkou 95 cm. Ač se Jakub inspiroval návody na stavbu Rubensovy trubice umístěnými na internetu (např. [1]), nikde nebyl návod kompletní se všemi potřebnými údaji a rozměry jednotlivých dílů. Proto musel řadu rozměrů (např. průměry otvorů, kterými z trubice uniká plyn a pak hoří) odhadnout. Všechny potřebné rozměry byly naštěstí zvoleny natolik dobře, že se podařilo přístroj vyrobit funkční napoprvé bez nutnosti dodatečných změn. Jediný problém nastal při vrtání velmi malých otvorů o průměru 1 mm. I když Jakub používal stojanovou vrtačku, tenký vrták se často lámal; nicméně nakonec se podařilo vyvrtat všech 59 otvorů.

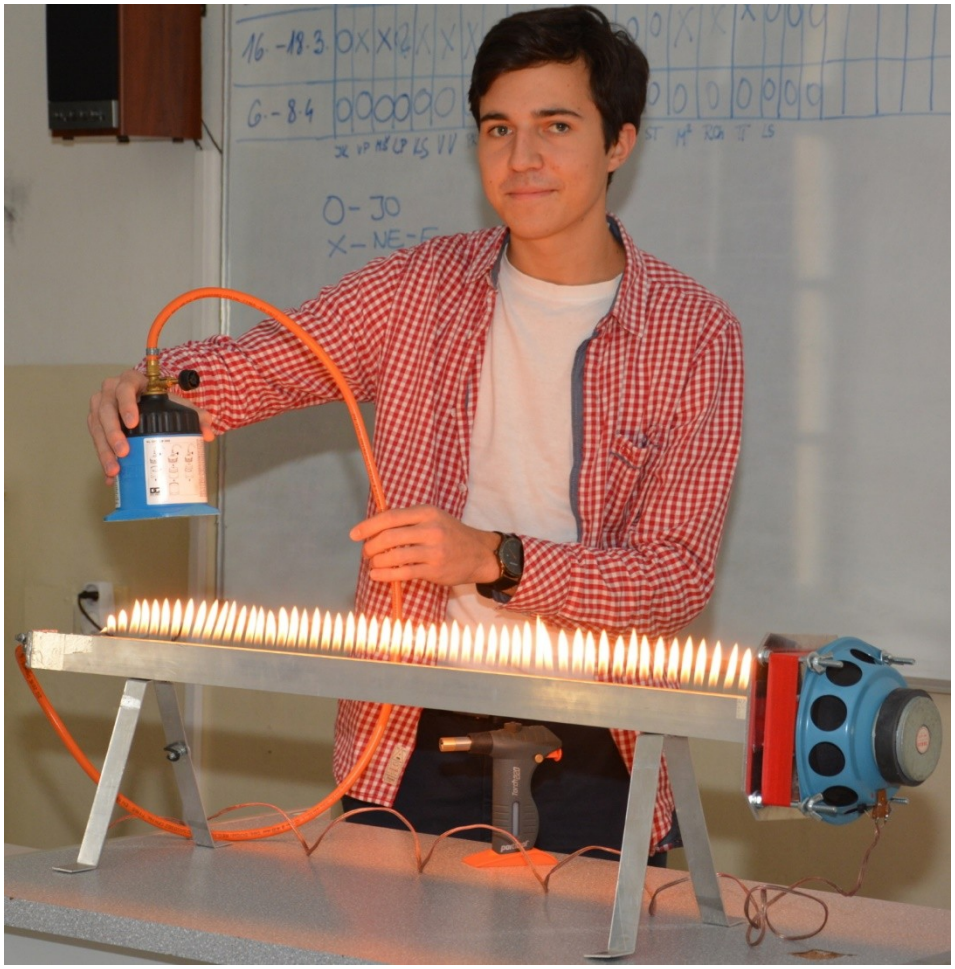
Další problém, který bylo nutné speciálně řešit, byl problém s membránou. Pro správnou činnost Rubensovy trubice je velmi důležité, aby membrána byla velmi pružná (snadný přenos zvuku do vnitřního prostoru trubice), ale současně i velmi pevná (zamezuje unikání plynu a větším změnám objemu plynu v trubici). Jako nejlepší způsob se nakonec osvědčil klasický pouťový balónek. Pro zvýšení bezpečnosti celé aparatury Jakub použil dva tyto balónky; tím předešel nežádoucímu úniku plynu a nežádoucí explozi směsi propan-butanu a vzduchu. Vzhledem k tomu, že podél celé délky trubice hoří unikající plyn, celá trubka se nežádoucím způsobem zahřívá. Při delším experimentování s trubicí se proto i použitá membrána může ohřát natolik, že se roztaví. Aby Jakub předešel nejen roztavení membrány, ale také poničení reproduktoru umístěnému v její blízkosti, použil hliníkový plát přidělaný kolmo na použitý jekl, který tvoří tělo aparatury. Tento dodatečný hliníkový plát funguje velmi

dobře jako pasivní chlazení. Současně je na trubici umístěn senzor teploty, pomocí něhož může obsluha kontrolovat aktuální teplotu hliníkové trubice a v případě jejího výrazného zvýšení experimentování ukončit.

Jako zdroj plynu do trubice je použita běžně dostupná propan-butanová bomba se 190 g plynu. Její výstupní ventil se připojí k hadici, která je spojena s trubkou aparatury, a tato trubka se plynem napustí. Před vlastním experimentem je nutno několik minut počkat, aby se plyn rozmístil rovnoměrně po celém objemu trubky. Pro zajištění dostatečného tlaku plynu v zakoupené plynové bombě vymyslel Jakub jednoduchý způsob: bombu s plynem ponoří do kbelíku s teplou vodou. Plyn se v bombě zahřeje a při téměř neměnném objemu bomby zvýší svůj tlak. Do trubice, nad kterou následně plyn odhořívá, je tak plyn z bomby vháněn plynuleji.

Experimenty

Ve stanoveném termínu Jakub svou Rubensovu trubici ve škole předvedl. Spolužáci byli fascinováni, co dokázal vyrobit, aniž vlastně tak sofistikovanou pomůcku vyrábět musel! Vysvětlil základní fyzikální princip činnosti aparatury (viz obr. 2), popsal její konstrukci a přistoupil k experimentům.



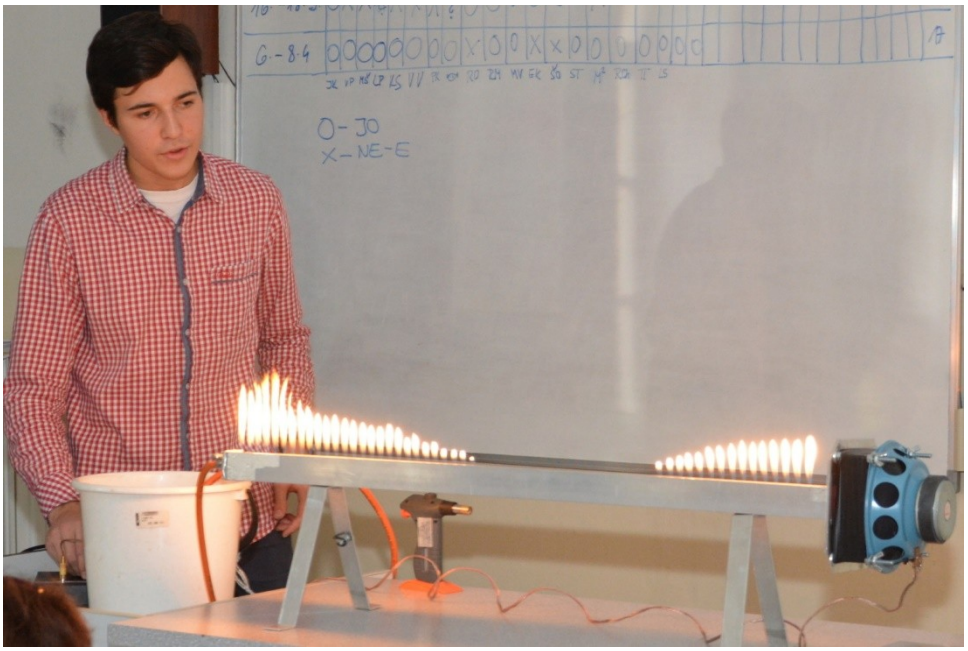
Obr. 2: Jakub Dvořák se svojí Rubensovou trubicí

V prvním kroku (po zapálení plynu unikajícího z trubice) předvedl změnu tvaru plamenů nad trubicí v závislosti na frekvenci zvuku, který do trubice pouštěl. Pro ten účel použil svůj mobilní telefon, ve kterém měl připraveny vhodné skladby.

Ve druhém kroku experimentu pak do trubice pouštěl zvuky definovaných frekvencí a ukazoval, jak se změní rozložení plamenů při použití zvuku s dvojnásobnou, poloviční, … frekvencí, než byl původně vybraný zvuk. Některé konfigurace plamenů zobrazují obr. 3 až obr. 5.

Obr. 3: Ukázka tvaru plamenů

Obr. 4: Ukázka tvaru plamenů



Obr. 5: Ukázka tvaru plamenů

Na základě proměření vzájemné vzdálenosti dvou sousedních uzlů (tato vzdálenost je rovna polovině vlnové délky daného zvukového vlnění) lze i určit velikost rychlosti šíření zvuku v použitém plynu. Abychom mohli tato měření porovnávat s tabulkovými hodnotami, bylo

by nutné opatřit trubici ještě vhodným senzorem tlaku plynu; velikost rychlosti šíření zvuku je na tlaku plynu totiž závislá.

Na závěr pak Jakub využil můj zvučný hlas a požádal mě, zda bych se nepokusil na membránu zakřičet. Po několika nezdařených pokusech, kdy jsem hledal optimální vzdálenost od membrány, výšku křičeného tónu i intenzitu zvuku se podařilo: plameny nad trubicí vytvořily podobný vzor, jako předtím (viz obr. 6).

Obr. 6: Místo reproduktoru zvuk vytváří Jaroslav Reichl

Další využití pomůcky

Úspěšná prezentace pomůcky nezůstala jediná. Jakub vyrobenou pomůcku prezentoval při dalších příležitostech.

Seminář Heuréka pro střední školy

V rámci 8. semináře *Heuréky pro střední školy*, který pro zájemce z řad učitelů vedu, jsme se věnovali mechanickému kmitání a vlnění. Požádal jsem proto Jakuba, zda by vyrobenou pomůcku učitelům fyziky nepředvedl. Jakub souhlasil, a tak se v příslušný čas dostavil a učitelům nejen pomůcku převedl, ale byl schopen velmi fundovaně odpovídat na jejich dotazy týkající se jak prezentovaných fyzikálních jevů, tak konstrukce přístroje.

MatFyz FEAT

Začátkem roku 2017 se Jakub přihlásil do soutěže Matfyz FEAT (viz [3]), kterou pořádá pro nadané a šikovné žáky středních školy MFF UK Praha. Jakub se rozhodl v rámci této soutěže postavit delší trubici, na kterou dostal finanční příspěvek přímo z MFF UK Praha.

Nová trubice má délku 220 cm a konstrukčně je velmi podobná prvnímu modelu. Když Jakub tuto trubici na soutěži prezentoval, zjistil, že pro takto dlouhou trubici ani horká voda v kbelíku nedokáže zajistit dostatečný tlak plynu v bombě, aby plyn rovnoměrně naplnil tuto trubici. Ač experimenty neměly tak jednoznačný průběh jako s využitím kratší trubice, přesto porota soutěže Jakuba ocenila cenou za počin v inovativním technickém řešení problému.

Video pro portál Vím proč

Bez jakékoliv další pomoci pak Jakub natočil o problematice stojatého vlnění a jeho demonstraci pomocí Rubensovy trubice video [viz 4], které prezentoval jednak na pravidelné školní

akademii a následně jej zaslal začátkem roku 2018 na portál *Vím proč* [2]. Experimenty, které natočil, prováděl s původní (tedy kratší) variantou trubice.

Jakubovo video na portálu [2] získalo jedno z nejlepších ocenění návštěvníků serveru a odborná porota ho vyhodnotila jako nejlepší v dané kategorii. Jakub tak vyhrál věcnou cenu pro sebe a finanční příspěvek pro školu na nákup fyzikálních pomůcek. Věcnou cenu Jakubovi předali zástupci Nadace ČEZ, která soutěž sponzoruje, v červnu 2018.

Finanční prostředky škole budou poukázány až po schválení žádosti, kterou musela škola sepsat, představiteli Nadace ČEZ. Já, třídní učitelka i členové vedení školy Jakubovi výhru přáli a byli jsme rádi, že takového nadaného žáka ve škole máme. Trošku hořkou pachuť do výhry přinesla povinnost školy žádat o cenu, která škola na základě vyhodnocení poroty serveru [2] náleží, formou žádosti obsahující řadu dotazů, z nichž některé z nich může zodpovědět pouze ekonom či ředitel školy.

Literatura

[1] https://www.instructables.com/id/The-Rubens--Tube%253a-Soundwaves-in-Fire%21/, [citováno 20. 8. 2018]
[2] https://www.vimproc.cz/, [citováno 20. 8. 2018]
[3] http://matfyzfeat.mff.cuni.cz/, [citováno 20. 8. 2018]
[4] https://www.youtube.com/watch?v=TmbLOZCb60U&feature=youtu.be, [citováno 29. 8. 2018]