FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ ELEMENTÁRNÍCH PRINCIPŮ RAKETOVÉHO MOTORU VE VÝUCE TECHNIKY A PRAKTICKÝCH ČINNOSTÍ

TVARŮŽKA Václav, CZ

Resumé

Tento článek popisuje zkušenosti s uplatněním tématu „elementární lihové rakety“ jako tématu pro výuku práce s plasty v kontextu s výukou fyzikálních principů funkce reaktivních raketových motorů. Považujeme za důležité, aby žáci při výuce techniky byly integrovány znalosti nejen praktické realizace práce s papírem, plasty a dalšími materiály, ale rovněž byly do výuky přirozeně začleňovány i teoretické principy fyziky, včetně výpočtů a kvalifikovaných odhadů energetických ztrát, účinnosti a dalších fyzikálních veličin. Praktický a experimentální námět pro výuku umožňuje praktické experimentování a dokazování platnosti elementárních principů fyziky. Tento námět byl ověřen v prostředí základních škol.

Klíčová slova: raketa, etanol, energie, plasty, výhřevnost, bezpečnost.

PHYSICAL MODELLING OF ELEMENTARY PRINCIPLES OF THE ROCKET ENGINE IN TECHNOLOGICAL EDUCATION AND PRACTICAL ACTIVITIES

Abstract

This paper deals with experience with application of the "elementary alcohol rocket" as a topic for education of work with plastics in the context of the reactive rocket engines physical principles. During the technological education, we find important to integrate not only practical realisation of the paper, plastics and other material work but also theoretical principles of physics, calculations including, estimation of energetic loses, effectiveness and other physical quantities. Practical and experimental topic for education enables practical experiments and proving the elementary physical principles validity. This topic was verified in the environment of elementary schools.

Key words: Rocket, ethanol, energy, plastics, calorific value, safety

Úvod

Současný pedagogický diskurz týkající se obsahu výuky techniky je vymezen několika mezními přístupy. Jeden z nich je orientován na výuku praktických činností s materiálem, na výuku technologie se zaměřením na pracovní postupy práci s nářadím a materiály. Druhým přístupem je přístup teoretický, kdy je výuka orientována na teorii norem, funkce a ovládání technologických artefaktů. Dalším přístupem je orientace na počítačem podporovanou výuku. Jedním z výrazných faktorů, které jsou veřejností a médií propagovány je soustavný požadavek na „zábavnost“ vyučování. Učitelé stojí před otázkou, jak fenomén „zábavnosti“ vyvážit s legitimním požadavkem na moderní výuku, důrazem na rozvoj kritického myšlení, celkovou modernizaci obsahu vzdělávání a požadavky zlepšení kvality výuky přírodovědných a technických předmětů.

Jednou z cest jak tyto problémy řešit je výběr vhodných témat, které jsou svou podstatou „zábavné“, mají velký motivační potenciál a zcela přirozeně disponují možností odborného přírodovědného výkladu s možností vlastního experimentování.

Kvalitní výuka předmětu Praktické činnosti je podmíněna nejen odbornými kompetencemi učitelů v oblasti didaktiky a přírodních věd, ale také odbornými kompetencemi v obsluze strojů, nářadí

a dalších technologií. Zdokonalování znalostí učitelů není záležitost pouze studia na vysoké škole, ale jedná se o proces získávání zkušeností v dlouhodobém horizontu v oblasti praktického obrábění materiálu, zlepšování úrovně jemné motoriky a poznávání vlastností.

Předmět Praktické činnosti rozvíjí především myšlení člověka a sekundárním produktem je multiplikace v dalších oblastech našich životních hodnot. Tento předmět je předmětem, který integruje znalosti fyziky, matematiky, chemie, přírodovědy a dalších oborů. Integrace znalostí z těchto oborů se dají definovat jako technologická gramotnost, neboť se jedná o celistvé pojetí myšlení a činností člověka. Je zřejmé, že tento termín je převzat z oblasti „čtení psaní a chápání textu“. Významový posun do oblasti techniky lze znázornit či „namodelovat“ pojmovým integračním vzorcem, který však nelze kvantitativně vyčíslit.

$$TG = \int_*^+ F \times M \times Ch \times IT \times T \times dT + C$$

TG – technická gramotnost, F – fyzika, M – matematika, Ch – chemie, IT informační technologie, T – technika, dT – praktická a aplikační proměnná.

Předmět „technika“ by měl mít potenciál integrovat znalosti technologií, fyziky, matematiky, chemie, přírodovědy a jejich funkční uplatnění. Člen „dT“ je možno považovat za praktickou činnostní složku praktických činností experimentálních, tvořivých, dovednostních, včetně znalostí procedurálních. Meze tohoto integrálu jsou určeny jako cesta životem od narození až do samého závěru.

1 Raketový motor jako elementární experiment.

Téma demonstrace spalovacího elementárního raketového motoru prostřednictvím láhve s polyethylentereftalátu (PET) je běžně používaná jako demonstrační experiment. Jeho základní složení spočívá v nasycení vysušené PET láhve výbušnou směsí plynu s následným zapálením provrtaným otvorem průměru cca 6 mm ve víčku, který slouží jako tryska. Palivem je nejčastěji denaturovaný líh, benzín, nebo směs lehkých alkoholů. Zážeh lze provést zapalovačem nebo dřevěnou zapálenou špejlí. Hořící plyny svou reaktivní expanzí předají hybnost raketě.

V prostředí Internetu lze nalézt množství různorodých technických realizací většinou prováděné v horizontální trajektorii. Samotná realizace pokusu vyžaduje zkušenost, nebo znalost přesných parametrů chemické reakce. Proto doporučujeme před demonstrací žákům, si vždy experiment vyzkoušet Efektivní výbuch směsi paliva se vzduchem vyžaduje přesnou koncentraci par a jejich homogenní rozptýlení v objemu lahve. Experimenty a metodické témata k vysvětlení principu modelů raket jsou popsány rovněž v motivačních experimentech NASA, (NASA Glenn Research Center. The Beginner's Guide to Aeronautics (2015).

Pro účely výuky techniky a rozvoj manuální zručnosti práce s materiály jsme provedli inovaci konstrukce rakety. Lze využít jakoukoli láhev z polyethylentereftalátu (PET). Jako materiál k výrobě aerodynamické špičky rakety lze použít papír. K výrobě tří stabilizačních křidélek, které zároveň plní funkci „stojanu“ rakety jsme použili 3mm extrudovaný polystyrén. Tento technický prvek lze rovněž alternovat třemi papírovými kornouty.

Při výrobě raketového motoru potřebujeme vysušenou PET lahev, akumulátorovou vrtačku, vrták průměr 5 mm. Tavnou pistoli, list A4 barevného papíru, Extrudovaný polystyrén XPS, nůžky, případně řezací odlamovací nože. Rakety vyrobené žáky základní školy dokumentuje obrázek 1.

Obrázek 1 – Rakety na ethanol (foto autor)

2 Stanovení množství paliva

Množství paliva je limitováno množstvím kyslíku v lahvi a koncentrací a rovnoměrným nasycením výbušných ethanolových par v lahvi při daném tlaku a teplotě. Vzduch obsahuje přibližně 20% kyslíku. Při použití PET lahve o objemu 1,5 l. je množství kyslíků určeno objemem 300 cm³.

Pomocí vyhledávače najdeme vzorec a informace a denaturovaného „technického“ lihu. „technický líh“ svými příměsmi brání jejímu zneužití v potravinářství. Vzhledem didaktickému charakteru pokusů, můžeme mnoho faktorů, které mají vliv, zanedbat a idealizovat. Pro naše výpočty vlivy jiných látek zanedbáme a budeme počítat pouze s hlavními daty uvedenými v technickém listu. Pro výklad žákům, je vhodnější idealizovat ethanol jeho prostým vzorcem CH₃CH₂OH. Samozřejmě, že vnímáme složitost tohoto vzorce pro žáky základní školy, nicméně vždy záleží na osobnosti učitele, jak dokáže využít schopnost popularizace těchto odborných témat. Je nutno zdůraznit, že nemá smysl dávat více paliva, než je množství kyslíku v objemu lahve.

Přímá reakce s kyslíkem může probíhat velmi bouřlivě jako hoření, při kterém se ethanol oxiduje až na oxid uhličitý a vodu za vývoje značného množství tepla viz následující rovnice.

Důkaz toho, že při hoření lihu vzniká voda lze prezentovat tím, že po vyhoření paliva se stěny PET lahve orosí kapkami vody.

Tabulka 1 – Tabulka chemických vazeb a energetických parametrů ethanolu (SSERC is a Company Limited by Guarantee) (<http://info.sserc.org.uk/chemistry-demonstrations/chemistry-demonstrations/3423-ethanol-rocket>)

Vazba	Energie (KJ mol ⁻¹)	Počet rozbitých vazeb	Energie vazby	Počet vazeb	Uvolněná energie	Celková uvolněná energie
C-H	99	5	495			
C-O	85,5	1	85,5			
O-H	111	1	111	6	666	
C=O	192			4	768	
O=O	119	3	357			
			1048,5		1434	385,5

Při běžné pokojové teplotě můžeme kyslík idealizovat a považovat za plyn s vlastnostmi ideálního plynu. Objem plynu $24\,000\text{ cm}^3\text{ mol}^{-1}$. Tudíž v láhvi je $300/24000\text{ mol kyslíku} = 0,0125\text{ mol}$. Teoreticky využitelná chemická energie reakce je

$$E = 385,5\text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \frac{0,0125\text{ mol}}{3} = 1,6\text{ KJ}$$

Tedy úplné spalování za předpokladu, že se veškerý ethanol odpaří, vyžaduje $0,0125/3\text{ mol ethanolu} = 0,0041\text{ mol}$. (To se rovná $0,24\text{ ml}$, takže další ethanol navíc je přebytečný za předpokladu, že se plně v lahvi vypaří.) Na základě praktických experimentů s množstvím technického ethanolu jsme určili ideální množství paliva na hodnotu $0,2\text{ g}$. Ethanol jsme do PET lahve vstříkli pomocí ručního rozprašovače, který zvětší odparnou plochu. Úplné odpaření docílíme mírným zahřátím lahve teplovzdušným fénem. Je přirozené, že při experimentu je nutno klást zvýšené požadavky na zachování BOZP a požární prevenci.

Výška výstupu rakety z PET lahve není vzhledem k svým hmotnostním a aerodynamickým parametrům velká. Experimenty jsme ověřili, že vzhledem k hmotnosti a průřezu tělesa rakety ve svislém směru je možné dosáhnout cca 15 m výšky bez zakřivení trajektorie.

Určení výšky výstupu můžeme provést pozorováním a odhadem k poměru ostatních objektů v okolí. Přesnější určení výšky u raket jiných konstrukcí je možné provést na základě použití jednoduchého kvadrantu a výpočtem z goniometrických funkcí, např. T. Benson (2014). Nejvyšší bod trajektorie můžeme rovněž určit letu rakety pomocí analýzy obrazového záznamu v prostředí grafických programů, viz obrázek 2.

Obrázek 2 – Zakreslení dosažené výšky a trajektorie rakety (foto autor)

3 Realizace experimentu a jeho analýza v grafickém programu

Prostý experiment v sobě integruje celé spektrum mezipředmětových vztahů, které níže popíšeme, a lze je včlenit do výuky technologie. Zdůraznění vzájemných vazeb, umožňuje efektivní překonání nežádoucích prekonceptů. Natočení videozáznamu startu rakety a jeho analýza v prostředí programu pro editaci videa, umožňuje snadné měření času a úseku letu trajektorie rakety. Raketa

dosáhne maximální rychlost v okamžiku, kdy spotřebuje veškeré palivo s okysličovadlem. Je nutno zdůraznit, že v případě naší lihové rakety se nejedná o standardní raketový motor s ustálenou distribucí paliva, ale o silový impuls viz graf 1.

Graf 1 – Silový impuls raketových motorů grafu (zpracoval autor)

Další důležitou činností je zvážení hmotnosti modelu rakety před startem bez paliva, zvážení paliva a hmotnost rakety po přistání. Je určitým paradoxem, že hmotnost rakety po opadu na zem byla v mnohých experimentech nižší, než hmotnost rakety před startem bez paliva. Tento jev lze zdůvodnit deformací PET lahve vlivem teploty a zahřátím zbylého vzduchu v lahvi, který má nižší hustotu. Rovněž lze pozorovat vysrážení vodních par na stěně lahve. Tyto jevy však nelze pro svou nahodilost do výpočtu zahrnout. Pro zvážení těchto hmotností jsme použili digitální laboratorní váhu s přesností 0,1 g. Jako typický příklad jsme vybrali průměrné hodnoty. Hmotnost modelu rakety bez paliva činila $m_i = 42,8\text{g}$, s palivem $m_i = 43\text{g}$. Experimentálně jsme si ověřili, že pro největší účinnost paliva je nejvhodnější vstříknout do lahve rakety technický líh v rozmezí 0,2 – 0,3g pomocí ručního spreje.

Můžeme spočítat potenciální energii, kterou raketa získá při dosažení maximální výšky. Výšku výstupu rakety jsme určili na 7,8 m.

$$E_p = m_i g h$$

Popis vzorce: m_i – hmotnost rakety, g – tíhové zrychlení, h – dosažená výška.

Tento výpočet se však od reálných podmínek značně liší, neboť v něm nejsou zahrnuty energetické ztráty. Prosté dopravení tělesa rakety do výšky vyžaduje 2,29 J. Reálné vynesení tělesa raketovým motorem však zahrnuje energetické ztráty, proto je nutné se na problém podívat detailněji.

Pokud analyzujeme záznam zvukové stopy programu pro zpracování videa, můžeme v porovnání s nejvyšším dosaženým bodem přesně určit dobu výstupu rakety. Analýza zvukové stopy umožňuje s dostatečnou přesností určit dobu práce raketového motoru. Viz obrázek 3.

Nejvyšší rychlost získá raketa po vyhoření paliva. Typický test modelu lihové rakety nám trval $t = 0,32\text{ s}$, kdy raketa dosáhla výšky $s = 4,75\text{ m}$. Pokud předpokládáme, že počáteční rychlost modelu je nulová, pak s využitím vzorce $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ upravíme rovnici pro určení zrychlení $a = 2 s t^{-2}$. Po dosazení se zrychlení rakety vypočítá $a = 92,77\text{ ms}^{-2}$.

Obrázek 3 – Analýza práce elementárního raketového motoru v programu Filmora (foto autor)

S použitím stejných dat výše a využití definice zrychlení $a = \frac{dv}{dt}$ můžeme vypočítat rychlost.

$$v = at$$

$$v = 92,7 \cdot 0,32 = 29,69 \text{ ms}^{-1}$$

Výpočet kinetické energie rakety, která je potřebná ke zrychlení rakety:

$$E_k = \frac{1}{2} m_i v^2$$

Vyrobenou raketu zvážíme na digitální laboratorní váze, $m_i = 43 \text{ g} = 0,043 \text{ kg}$

$$E_k = \frac{1}{2} 0,043 \text{ kg} \cdot 29,692^2 \text{ ms}^{-1} = 18,95 \text{ J}$$

Téma modelu rakety můžeme použít k vysvětlení fyzikálních principů zákona zachování hybnosti. Soustava rakety je specifickým případem, neboť se jedná o soustavu s proměnnou hmotností. K tomuto výkladu lze přejít, pokud žák chápe princip zákona zachování hybnosti u soustav, kde hmotnost těles zůstává stálá.

Vzhledem k tomu, že spalováním paliva se stává raketa v letu lehčí, mění se průběžně její letová rychlost. Detailní výklad tohoto jevu patří k základům kosmonautiky a užití reaktivních motorů. Vysvětlení a odvození můžeme najít v klasických informačních zdrojích např. (Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., & Dub, P. (2013).

Vycházíme z II. momentové věty:

$$F = m_i \cdot a = R \cdot u \quad (\text{rovnice Měšcherského})$$

m_i – hmotnost rakety s palivem, a – zrychlení rakety, R – rychlost spotřeby paliva, u – relativní rychlost zplodin trysky motoru.

Rychlost spotřeby paliva vypočítáme podle vzorce:

$$R = \frac{m_p}{t}, \text{ dosazením } R = \frac{0,0002 \text{ kg}}{0,32 \text{ s}} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

m_p - množství paliva, t – čas. Výraz Ru , nazýváme tahem raketového motoru T . Rychlost spalín s trysky rakety vypočítáme:

$$u = \frac{m_i \cdot a}{R}, \text{ vyčíslením; } u = \frac{0,043 \text{ kg} \cdot 92,77 \text{ ms}^{-2}}{9,375 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}} = 6382,5 \text{ ms}^{-1}$$

Pokud chceme vypočítat, jak se změní rychlost rakety po spálení paliva a jaká je výsledná rychlost rakety, lze velmi úspěšně využít Ciolkovského vztah:

$$v_f - v_i = u \cdot \ln \frac{m_i}{m_f} \quad v_f = 6382,5 \text{ ms}^{-1} \cdot \ln \frac{0,043 \text{ kg}}{0,0428 \text{ kg}} = 29,75 \text{ ms}^{-1}$$

I když se logaritmy neučí na základních školách, je tato funkce běžnou součástí kalkulátorů. Pokud nadaní žáci projeví zájem, není nutné jim v této činnosti používání funkce bránit. Naopak, žáci se v pravý čas seznámí s novou využitelnou funkcí, která má reálné uplatnění.

4 Další technické inovace

Další inovací je využití piezoelektrických, nebo indukčních zapalovačů, z nichž vyvedeme „jiskřiště“ pomocí vodičů tak, aby bylo možno zapálit výbušné páry přímo v nitru lahve. Využití tohoto principu umožňuje rozšíření znalostí žáků o zdroje elektrického proudu a systémy, které se běžně využívají v technice. Funkčně lze využít jakýkoli piezoelektrický zapalovací systém běžného zapalovače, který je koncipován jako systém pružinového úderníku, který narazí na piezoelektrický krystal. Ten při své deformaci vyprodukuje dostatečně vysoké napětí a vznikne jiskra, která zapálí plyn.

5 Závěr

Moderní společnost se nemůže rozvíjet bez uplatnění procedurálních tvořivých znalostí, tj. znalostí pracovních postupů, souvislostí a vazeb s jinými obory. K tomu, abychom dokázali vyrábět konkurenci schopné výrobky, je nutné nejen vyrábět rukama a ovládat řemesla, ale také disponovat znalostmi, které umožní výrobu zlevnit, zefektivnit inovovat. Musíme učit nejen znalosti pojmové, konceptuální, musíme učit rovněž znalosti procedurální. Jen tak budeme moci završit učení metakognitivními cíli a tvořivostí techniků. Pokud srovnáme výpočet finální rychlosti z analýzy zvukového a filmového záznamu s rychlostí Ciolkovského vztahu, dojdeme k zjištění, že jsou tyto hodnoty řádově blízké v mezích kvalifikovaného odhadu. Téma experimentů s ethanolovou raketou je velmi výhodné pro rozšíření výuky techniky o fyzikální principy reaktivních motorů.

Literatura

Benson, T. (2014). Ideal Rocket Equation. [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/rktpow.html>.
Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., & Dub, P. (2013). Fyzika (2., přeprac. vyd). Brno: VUTIUM.
Majer, Dušan. (2015). Raketové počítání snadno a rychle. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.kosmonautix.cz/2015/06/raketove-pocitani-snadno-a-rychle/>.

NASA Glenn Research Center. The Beginner's Guide to Aeronautics (2015). [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/bgmr.html>.
SSERC, Scottish Schools Education Research Centre (2013). [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <https://www.sserc.org.uk/subject-areas/chemistry/chemistry-resources/ethanol-rocket-2/>.
Učebnice chemie (2015). [cit. 2019-05-20] Dostupné z: <http://ucebnicechemie.wz.cz/index.php?sloucenina=ethanol>.
Zelina, M. (2016) Raketová rovnice. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.karlin.mff.cuni.cz/~tuma/Aplikace16/Prace/Raketova_rovnice.pdf.

Kontaktní adresa:

Václav Tvarůžka, Mgr. Ph.D.

Katedra technické a pracovní výchovy, Pedagogická fakulta OU, F. Šrámka. 3, Ostrava, ČR,
tel.: +420 553 46 2621, e-mail: vaclav.tvaruzka@osu.cz.