DEMONSTRACE VOLNÉHO PÁDU V TECHNICKO-HISTORICKÉM MEZIOBOROVÉM POJETÍ

KORYTÁŘ Jindřich – KROTKÝ Jan – HONZÍK Lukáš, CZ

Resumé

Článek je věnován studiu volného pádu ze dvou hledisek, teoretického a prakticky-experimentálního. Na volném pádu je demonstrován zákon zachování energie, zejména s ohledem pro výuku na ZŠ a SŠ. Jedná se o klíčový zákon, na kterém jsou kromě jiného postaveny veškeré energetické přeměny. Volný pád, nemusí být jen typicky fyzikální téma. Celá řada starých i nových vynálezů těží z tohoto fyzikálního principu. Jedním z nich je i gilotina. Toto jednoduché technické řešení v podobě popravčího nástroje umožňuje implementovat nejen celou řadu technologických postupů, ale také pomocí školních měřicích systémů množství různých fyzikálních měření.

Klíčová slova: výukové pomůcky, volný pád, gilotina

DEMONSTRATING FREE FALL – A TECHNICAL AND HISTORICAL INTERDISCIPLINARY APPROACH

Abstract

The article is devoted to the study of free fall from two points of view, the theoretical and the practical and experimental. By free fall is demonstrated the law of conservation of energy, especially with regard to teaching in primary, secondary and high schools. That is a key law, a base for all energy transformations and much more. Free fall may not be just a typically physical topic. There are many of the old or new inventions profiting from the physical law. One of them is a guillotine. Such a simple technical solution in the form of an executing tool allows you to implement not just a number of technological processes, but also large numbers of various physical measurements using school measuring systems.

Key words: teaching aids, free fall, guillotine

Úvod

Za první přínosný přístup k zákonu o zachování energie můžeme považovat experimenty Gottfrieda Wilhelma Leibnize, který v roce 1688 zkoumal pružné srážky kulečnickových koulí. Dnešní úplný zákon zachování energie (nejen mechanické) se začal řešit při praktickém problému spočívajícím ve vrtání dělových hlavní. Vztah mezi teplem vznikajícím při obrábění a vynaloženou prací formuloval Benjamin Thomson v roce 1798. Bohužel musíme přeskočit vzhledem k rozsahu článku velice zajímavou historii, které je věnovaná různá odborná literatura (Pickover, 2015; Bajer, 2007). Jmenujme alespoň některé osobnosti, které významnou formou přispěly k tvorbě 1. termodynamického zákona jako jsou Benjamin Thomson, Joseph Louis Gay-Lussac, Pierre Louis Dulong, Julius Robert Mayer, James Prescott Joule, Hermann von Helmholtz, William John Macquorn Rankine, Rudolf Clausius. Konečná formulace 1. věty termodynamické v roce 1851 je spojena s lordem Kelvinem (původně William Thomson). Správnost uvedené věty je neustále prověřovaná návrhy různých důmyslných zařízení, snažících se zatím marně porušit uvedenou větu. Všeobecně jsou známy pod společným názvem perpetuum mobile 1. druhu. K němu je nutné připojit i 2. termodynamický zákon vytvořený Rudolfem Clausiem a Ludwigem Boltzmannem. Clausius vyšel z Carnotových prací a formuloval své tvrzení v roce 1850. Opět i zde jsou tendence k jeho zpochybnění buď v myšlenkových nebo fyzických konstrukcích různých zařízení. (Pickover, 2015)

1 Formulace zákona

Jedním z nejdůležitějších objevů vedoucích k zákonu zachování energie byl objev fyzika Jamese Joula z roku 1843. Jmenovaný pozorný učenec zjistil, že gravitační energie padajícího tělesa uvádějící do rotačního pohybu vodní mlýnek, je rovna tepelné energii, kterou získá voda zahřívána třením o lopatky mlýnu. Jedná se o nevratný děj. Opačně to nelze realizovat. Zahříváním vody neroztočíme lopatky mlýnu. Pohyb molekul bude totiž náhodný. Na základě uvedeného a dalších experimentů můžeme slovně formulovat 1. termodynamický zákon ve znění: *Celková energie δQ , kterou při zahřívání dodáváme, se rozdělí na část, kde vzroste vnitřní energie dU částic (např. molekul) mající kinetický a potenciální charakter. Druhá část vede na vykonání práce δA tělesem v okolním systému.* (Pickover, 2015) Matematická formulace v diferenciálním tvaru je

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

kde zvláštní symbol δ je neúplný diferenciál. Upozorňuje na důležitost integrační cesty.

Po určitých komplikacích došlo k formulaci 2. zákona termodynamiky vytvořeného Rudolfem Clausiem ve znění: *„Není možné cyklickým procesem přenášet teplo δQ z chladnějšího tělesa na teplejší, aniž se při tom změní jisté množství práce na teplo.“* (Obdržálek, 2015) Zákon je v současnosti formulován pro vratné děje v diferenciálním tvaru

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (2)$$

kde podíl $1/T$ je integrační faktor vytvářející z neúplného diferenciálu δQ úplný diferenciál dS umožňující relativně snadnou integraci. Pochopitelně nemůžeme zapomenout na formulaci výše zmíněného Ludwiga Boltzmannova z roku 1877 využívající statistického popisu chování molekul, reprezentovaného mírou neuspořádanosti S . Vztah můžeme formulovat

$$S = k \ln W, \quad (3)$$

kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ je Boltzmannova konstanta, W je počet všech mikrostavů popisujících daný makrostav. T je termodynamická teplota.

Uvedený vztah propojuje termodynamiku s molekulovou fyzikou. Slovní formulace může znít například takto: *Systém spěje ke konečnému stavu s maximální entropií.* Praktickou demonstrací je maximální promísení např. kapičky inkoustu ve vodě. Na závěr je třeba zmínit pro úplnost alespoň jednu z formulací 3. termodynamického zákona: *Teplotu absolutní nuly $T = 0\text{K}$ nelze dosáhnout konečným počtem kroků.* (Obdržálek, 2015)

Všechny tři zmiňované termodynamické zákony jsou v podstatě zákony vesmíru. My se ovšem budeme pro jednoduchost zabývat pouze mechanickým zákonem zachování energie aplikovaným na volný pád ve vakuu.

2 Volný pád

Ve 4. století př. n. l. si Aristotelés ze Stageiry vysvětloval pohyb šípů změnou hustoty před a za šípem. Hustější vzduch za šípem postrkoval šíp vpřed. Aristotelés tvrdil, že větší tělesa padají k zemi rychleji než tělesa menších rozměrů. Dále vyvozoval, že rychlost pádu závisí na složení tělesa. Takže kovová tělesa padají rychleji než dřevěná. Všechny tyto názory spolu s aristotelovskou logikou převzala katolická církev a vytvořila z nich dlouhotrvající dogmata. (Bajer, 2007)

Tyto dogmatické názory začal vyvracet na konci 16. století Galileo Galilei na základě svých vlastních experimentů. Např. pouštěl koule s různou strukturou z ochozu šikmé věže v Pise. Ukazoval tím stejný okamžik dopadu různě velkých koulí. V podstatě stanovil vztahy pro volný pád těles.

G. Galilei prováděl časté nápadité experimenty, které potvrzovaly či vyvracely předchozí spíše filosofické úvahy. Jeho výsledky u vrcholných církevních představitelů vyvolávaly značnou nelibost. (Bajer, 2007)

Tíhové zrychlení $g = 9,799\text{m/s}^2$ do vztahů týkajících se volného pádu dodal Christian Huygens v roce 1678. Naměřil ho pomocí kyvadla umístěného v Paříži. V dnešní době má při zeměpisné šířce 45° a při hladině moře hodnotu $g = 9,80665\text{m/s}^2$. Je potřebné určitě zmínit ještě Isaaca Newtona, který v roce 1685 formuloval zákon všeobecné gravitace. Spojil do té doby rozdílné fyzikální jevy, pohyb planet kolem Slunce a volný pád těles na Zemi. Básnické vyjádření je „sjednocení jevů pod a nad Lunou“. (Bajer, 2007)

Při budování své Obecné teorie relativity využil problematiku volného pádu např. výtahové klece i slavný Albert Einstein. Bylo z ní odvozeno mnoho zajímavých poznatků. Mezi ně patří např. gravitační vlny, které zřejmě byly nedávno experimentálně ověřeny. Bohužel dodnes nevíme, jestli má gravitace mikroskopickou strukturu v podobě interakčních elementárních částic zvaných gravitony. Existují určité příznivé teoretické signály hypotetických přístupů teorie strun.

3 Pád těles v praxi (experiment)

Jak už jsme v krátké a neúplné historické exkurzi naznačili, klíčovým dějem ve fyzice je volný pád. Stojí u základu fyziky jako takové a jsou na něm založeny i nejmodernější poznatky z astrofyziky. Proto je dobré věnovat této výuce na ZŠ a SŠ zvýšenou pozornost. Na katedře matematiky, fyziky a technické výchovy Západočeské univerzity v Plzni byla studenty vytvořena pod vedením Jana Krotkého kopie popravčího nástroje zvaného gilotina (obr. 1, a obr. 2) (Hnilicová, 2015). Nazvaná je podle jejího tvůrce francouzského doktora Gillotina. Vedle meče patří mezi základní způsoby dekapitace odsouzence. Stvořena byla za účelem **humanizace popravčího výkonu**. Byla nejvíce využívána za Velké francouzské revoluce v roce 1792 a v následujících krvavých letech. Jejími prvními oběťmi byl francouzský král (v té době již občan) Ludvík X VI. a jeho choť Marie Antoinetta. Později se rozšířila do dalších evropských zemí a jejich kolonií. Její charakteristický zvuk byl slyšet za druhé světové války i v neblaze proslulé věznici na Pankráci v Praze. Pod jejím „hladovým“ ostřím skončilo mnoho českých vlastenců.

Vlastní sekera váží zhruba 60 kg a pohybuje se v kovových kolejničkách. Oběť zasáhne mezi třetím a čtvrtým krčním obrátem. V průběhu let bylo zařízení modernizováno. Byly zde umístěny tlumící gumové segmenty. Vytahování sekyry značně ulehčila přidaná kladka.

Na věrném modelu lze nezapomenutelným experimentálním způsobem demonstrovat volný pád a provést patřičná měření jeho průběhu. Ultrazvukový senzor detekce pohybu Pasco označený PS 2103A vysílá ultrazvukový puls 50 krát za sekundu a je umístěn v horní pevné části smrtícího stroje. Senzor snímá okamžitou polohu sekyry vykonávající volný pád z naměřené výšky $h=0,82\text{ m}$. Data jsou přenášena přes A/D převodník do softwaru Pasco Data Studio, který je vyhodnotí a názorně graficky zobrazí. V grafu 1 jsou vyneseny experimentálně naměřené hodnoty rychlosti $v[\text{m/s}]$ v závislosti na výšce $h[\text{m}]$. Z grafu byla odečtena maximální dopadová rychlost v velikosti $3,68\text{ m/s}$ při dopadové výšce h o velikosti $0,813\text{ m}$.

Obr. 1 – Demonstrace volného pádu gilotinou (Hnilicová, 2015)

Obr. 2 – Montáž senzoru Pasco PS2103, detail vedení sekyry – využití 3D tisku

Graf 1 – Reálná rychlost sekery modelu gilotiny v závislosti na výšce h

4 Teoretický rozbor

Je možné zde provést poměrně jednoduchý teoretický výpočet dopadové rychlosti sekery pomocí zákona zachování mechanické energie

$$E_k + E_p = konst. \quad (4)$$

Do ní dosadíme známé vztahy pro kinetickou energii $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ a za potenciální energii dosadíme $E_p = mgh$, kde m je hmotnost sekery, g je tíhové zrychlení a v je hledaná dopadová rychlost, dopadová výška $h[m]$.

Obdržíme triviální relaci

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh. \quad (5)$$

Jednoduchou algebraickou úpravou získáme závislost rychlosti na dopadové výšce

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (6)$$

Po dosazení patřičné hodnoty dopadové výšky $h = 0,813$ charakterizující popravčí zařízení do vztahu (6) obdržíme

$$v = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,813} = 3,99 \text{ m/s} \quad (7)$$

Teoretický graf závislosti dopadové rychlosti $v[m/s]$ na výšce $h[m]$ můžeme vytvořit například v programu GeoGebra (graf 2). Na něm je vyznačen bod A znázorňující teoretickou hodnotu maximální dosažené rychlosti v při výšce h .

Graf 2 – Teoretický graf závislosti dopadové rychlosti $v[m/s]$ na výšce $h[m]$

Dalším jistě zajímavým výpočtem by byla síla dopadu sekery F . Opět aplikujeme zákon zachování energie v dolní poloze sekery.

$$E_k + A = konst, \quad (8)$$

kde E_k je v tomto případě maximální kinetická energie při dopadu, která se přemění na práci sekery A . Po dosazení základních formulek do vztahu (8)

$$\frac{1}{2}mv^2 = Fs, \quad (9)$$

opět v je rychlost sekery, m je hmotnost sekery, F je dopadová síla. Tentokrát s je brzdná dráha při dopadu. Následně obdržíme

$$F = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{s} \quad (10)$$

Bohužel získat velikost brzdné dráhy $s[m]$ není vůbec jednoduché. Jde o pružnou nebo nepružnou srážku? V tomto případě se už jedná o podstatně složitější výpočet, který je obtížné řešit nejen se žáky ZŠ, ale také se studenty škol středních.

5 Diskuze nad výsledky

Při porovnání teoretických a experimentálních dat docházíme k závěru, že teoretický výpočet neodpovídá úplně experimentálnímu výsledku (graf 1). Důvodem je to, že jsme nezahrnuli ztrátovou energii tření probíhajícího mezi sekerou a vedením. Dále není zde uveden aerodynamický odpor dopadající sekery a odrazného plechu sekery. Sekera vzhledem k jejímu tvaru má vhodný jak aerodynamický koeficient, tak i nevýznamný čelní průřez. Bohužel odrazný plech má výraznou plochu.

6 Pedagogicko-psychologické aspekty

Vždy při provádění zdravotně nebezpečného experimentu musíme úzkostlivě dbát na bezpečnost. Bezprostředně hrozí fraktura nebo případná amputace prstů. Přestože je model zaopatřen zabezpečovací zařízením, doporučuje se provádět demonstraci výhradně učitelem v bezpečné vzdálenosti od přihlížejících.

Dalším diskutabilním aspektem doprovázejícím historický model popravčího zařízení je vhodnost zařízení pro výuku. Při jeho veřejné produkci (obr. 1) při akcích např. Věda a technika v ulicích 2015 v Plzni nebo Mezinárodní technická olympiáda 2015 v Plzni se našlo několik málo jedinců kritizující zmíněný aspekt. Na jedné straně lze očekávat, že studenti (žáci) na provedenou demonstraci zákona zachování energie hned tak nezapomenou. Na druhé straně je otázkou, do jaké míry (a komu) je vhodné ukazovat takováto existující zařízení. To vyvolává další otázky vhodnosti vyráběných hraček v podobě tanků, střelných a sečných zbraní a další vojenské techniky. V dnešním mediálně propojeném světě jsou neustále nejen mladí lidé vystavováni mnohdy přímo brutálním filmovým a počítačovým scénám. Je velmi náročné relevantně odpovědět, jaký to bude mít vliv na vývoj jejich osobnosti. Nemohou vzniknout různá patologická narušení? Pochopitelně zde hraje vliv genetika a okolní prostředí zprostředkované rodinou, společností s nezanedbatelnými ekonomickými faktory atd. Tyto vstupní faktory musíme správně identifikovat a podchytit pomocí relevantních psychologických studií.

Závěr

Konstrukce modelů historických artefaktů může být pro žáky velice zajímavá a napínavá. Velký myslitel Leonardo da Vinci žijící na přelomu 15. až 16. století zanášel údajně do svých plánů různé chyby ztěžující výrobu a montáž jeho konstrukcí. Zajímavá z hlediska výuky je možnost na modelech vyzkoušet základní fyzikální znalosti, jak je patrné z předchozího textu. Na katedře KMT ZČU v Plzni byl realizován např. i model Herónových vrat nebo vačkový mechanismus pohybu kladiva od Leonarda da Vinciho. V prvním případě je zde aplikovaná termodynamika a mechanika, ve druhém pak kinematický model vačkového mechanismu. Na základě zkušeností z výuky fyziky s pomocí těchto modelů lze říci, že se jedná o podstatně atraktivnější interdisciplinární přístup přesahující hranice samostatných odborných předmětů.

Literatura

1. HNILICOVÁ, K. *Funkční model gilotiny* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2015 [cit. 2016-03-22]. ISBN 978-80-261-0519-0. Dostupné z: http://www.olympiadatechniky.zcu.cz/@2015/Sbornik_OT2015_online/sekce/Hnilicova.pdf
2. PICKOVER, A. CLIFFORD *Kniha o fyzice*. Praha: Dokořán, 2015. ISBN 978-7363-609-880
3. BAJER, J. *Mechanika 1*, Olomouc: Chlup.net, 2007. ISBN 978-80-903958-0-0
4. OBDRŽÁLEK, J. *Termodynamika, molekulová fyzika a statistická fyzika*. Praha: MatfyzPress 2015. ISBN 978-80-7378-287-0

Kontaktní adresa:

Jindřich Korytář, Ing.,

Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, oddělení technické výchovy, Fakulta pedagogická ZČU, Klatovská 51, 306 14 Plzeň, ČR, tel.: 00420 377 636 501, e-mail: korytar@kmt.zcu.cz

Jan Krotký, Mgr. Ph.D.,

Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, oddělení technické výchovy, Fakulta pedagogická ZČU, Klatovská 51, 306 14 Plzeň, ČR, tel.: 00420 377 636 501, e-mail: conor@kmt.zcu.cz

Lukáš Honzík, PhDr. Ph.D.,

Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, oddělení matematiky, Fakulta pedagogická ZČU, Klatovská 51, 306 14 Plzeň, ČR, tel.: 00420 377 636 501, e-mail: luky21@kmt.zcu.cz