

## Tsunami na talíři

RENATA HOLUBOVÁ

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

U příležitosti prvního výročí pohromy v podobě ničivé vlny tsunami, která postihla 26. prosince 2004 jihovýchodní Asii, si připomeneme některé fyzikální pohledy na tento jev a možnosti jeho názorné demonstrace ve výuce fyziky.

Tsunami (z japonského „vlna na pobřeží“) je jednou z živelných katastrof, které doprovázejí život na naší planetě. Tsunami bývají vyvolány zemětřesením nebo vulkanickou činností na volném moři. K vyvolání vln tsunami je potřeba zemětřesení o velikosti nejméně 7,5 stupně Richterovy škály.

V roce 1935 vyvinul americký seismolog *Charles Francis* Richter (1900–1985) postup k hodnocení energie zemětřesení, která se vyjadřuje tzv. magnitudou. Jako měřítko si vzal výchylku fiktivního seismografu, který je umístěn ve vzdálenosti 100 km od epicentra zemětřesení. Skutečná zemětřesení se přepočítávají na tuto standardní situaci. Richterova stupnice není lineární, ale logaritmická se základem 10. Každý vyšší stupeň odpovídá 10násobně silnějšímu zemětřesení (např. stupeň 4 je 100krát silnější než stupeň 2). Richterova stupnice je shora neomezená, ale vyšší stupeň než 10 není reálný. Při síle 100 by se uvolnila energie, která by roztříštila zeměkouli.

Nejvyšší hodnota naměřená na Richterově stupnici je 9,5 (zemětřesení 1960 u pobřeží Chile). Zemětřesení 26. 12. 2004 mělo magnitudu 9,0 a bylo pátým nejsilnějším zemětřesením.

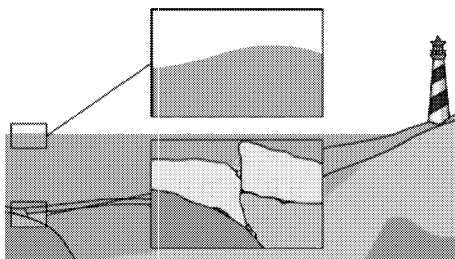
Vlna vznikající na volném moři vlivem zemětřesení se šíří podle zákonů o šíření vlnění. Amplituda vznikající vlny je malá (dm až desítky dm), nedochází k proudění vody (transportu vody). Oceánem se šíří vlna (mění

se výška hladiny – vrch a důl) a energie obsažená ve vlně. Rychlost šíření vlny závisí na hloubce  $h$  moře podle vztahu

$$v = \sqrt{gh}.$$

|                                              |       |       |     |    |
|----------------------------------------------|-------|-------|-----|----|
| Hloubka moře (m)                             | 6 000 | 2 000 | 200 | 20 |
| Rychlost ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 800   | 500   | 150 | 50 |

Když se vlna dostane k pobřeží, část energie vlny se přemění na vnitřní tření vody, tření vody o dno, tření o břeh – dochází k přeměnám energie v teplo; většina energie však zůstává i nadále ve vlně. Čím víc se vlna zpomalí, tím větší část energie se přemění na potenciální energii – což se projeví zvětšením výšky vlny a kinetická energie se projeví jako silný proud vodní masy směrem do vnitrozemí (obr. 1).



Obr. 1

Když se vlna blíží k pobřeží, jako první dosáhne břehu důl vlny. Tento jev registrujeme tak, že i voda z pobřeží steče do důlu vlny, moře ustoupí od pobřeží (mnoho desítek metrů až km). Teprve po určité době (podle vlnové délky vlny je časový odstup až několik minut) se k pobřeží dostane vrch vlny – v mělké vodě se mění rychlost vlny, velikost amplitudy (výška vlny), vlivem tření dojde k proudění.

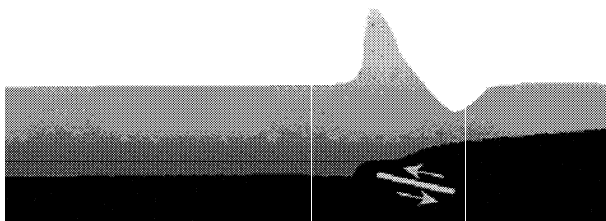
Zákony vlnění, kterými se řídí vznik a šíření ničivých vln tsunami, lze velice jednoduše modelovat. Stačí si vzít talíř s vodou, mapu světa a můžeme začít experimentovat.

## Tsunami na talíři

*Pomůcky:* 1 talíř s plochým dnem bez dekoru, 1 kapátko, 1 slámka, 1 kancelářská sponka, mletý pepř nebo curry, voda, jar, pravítko, fix, mapa Asie

Postup:

Na talíři budeme modelovat průběh ničivého tsunami ze dne 26. 12. 2004, které se do dějin zapsalo jako jedna z nejničivějších živelných pohrom. V uvedený den se v blízkosti Sumatry mořské dno zvedlo v délce asi 1 000 km (vlivem posunu Indické desky pod desku Barmskou) až o 20 m. Vlnová délka vzniklé vlny byla asi 125 km až 250 km a vlna se šířila rychlostí  $800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (obr. 2).



Obr. 2

Model vytvoříme tak, že postavíme talíř na stůl a nalijeme do něj vodu. Hladina vody by měla mít výšku 5 mm. Výšku hladiny odměříme pomocí pravítka. Voda v talíři představuje část Indického oceánu mezi Sumatrou a Srí Lankou. Fixem můžeme na okraj talíře označit polohu Sumatry a Srí Lanky.

V prvním kroku je třeba stanovit měřítko našeho modelu. Z mapy odečteme vzdálenost mezi Sumatrou a Srí Lankou. Potom změříme rozměry našeho modelového moře. Vypočítáme měřítko našeho modelu.

Jako příklad uvedu měřítko modelu  $M = 1 : 10\,000\,000$ . To znamená, že vzdálenost 1 mm v našem modelu odpovídá ve skutečném moři vzdálenosti 10 km. Hloubka „moře“ v našem modelu je 5 mm. Odpovídá tato hloubka skutečnosti? Podle mapy lze odhadnout, že hloubka oceánu leží v rozmezí 4 000 m až 5 000 m. Budeme uvažovat hloubku 5 000 m, kterou označíme  $h$ . Pomocí stanoveného měřítka vypočteme hloubku vody, která by měla být v talíři:  $5\,000 : 10\,000\,000$ , tzn.  $0,0005 \text{ m} = 0,5 \text{ mm}$

Aby byl model správný, musela by hloubka vody v talíři být jen půl milimetru, hloubka v našem talíři je půl centimetru. Správnou hloubku vody v modelu nelze realizovat, tak malé množství vody nelze na talíř vlivem povrchového napětí vody nalít. Měřítka našeho modelu opravíme:  $h_M = 5 \text{ mm}$  (hloubka modelu), tj. náš model je 10ti-násobně větší.

### *Vznik tsunami*

Vlivem podmořského zemětřesení dojde k tomu, že v místě, kde dříve bylo moře, se objeví pevnina – moře je jakoby vyzdvíženo, nad epicentrem se vytvoří hora vody. Kolik této vody bylo v případě zemětřesení 26. 12. 2004?

Předpokládejme délku zlomu 500 km, jeho šířku 10 km a zvýšení dna 20 m.

Výpočet objemu vody:

$$V = 0,02 \text{ km} \times 10 \text{ km} \times 500 \text{ km} = 100 \text{ km}^3 = 100\,000\,000\,000 \text{ m}^3 = 100\,000\,000\,000\,000 \text{ litrů}$$

$$\text{Model: } V_M = 100\,000\,000\,000 \text{ m}^3 / (10\,000\,000)^3 = 0,000\,000\,000\,1 \text{ m}^3 = 0,1 \text{ mm}^3$$

Tsunami – vlnu v našem talíři lze vytvořit pomocí kapátka – na vodní hladinu necháme kápnout kapku vody. Tím vytvoříme tsunami pomocí hory vody klouzající na hladinu. Kapku necháme padat z výšky 15 až 20 cm. Výška padající kapky ovlivní tvar vlny.

Tsunami na talíři lze vytvořit i tak, že budeme foukat přes slámku pod hladinu (jako sopka). Aby proud vyfouknutého vzduchu nebyl příliš silný, stlačíme konec slámky a sepneme jej kancelářskou sponkou. Zahnutý stlačený konec slámky musí být pod hladinou, zbytek slámky trčí vzhůru. Snažíme se vyfouknout 1 bublinu, která stoupá vzhůru a vytvoří vlnu.

Vlnová délka skutečné vlny na moři je asi  $\lambda = 100 \text{ km}$ . Jak velká je vlnová délka vln v našem modelu?

Výpočet vlnové délky vln v modelu:

$$\lambda_M = 100 \text{ km} : 10\,000\,000 = 1 \text{ cm}, \quad \lambda_M = 1 \text{ cm}$$

Takovou délku lze přibližně měřit pravítkem.

### *Jak vysoká je vlna na moři?*

Hora vody měla objem  $V = 100 \text{ km}^3$ . Z tohoto bodu se vlna šíří všemi směry. Ve vzdálenosti 1 000 km se kruh zvětší na průměr 2 000 km. Vzhledem k tomu, že vlnová délka  $\lambda = 100 \text{ km}$ , můžeme si představit, že vytlačený objem vody se roztáhl na horu o délce 50 km (ve směru pohybu) a je

následován 50 km širokým důlem. (Jedná se o zjednodušení, většinou jsou pozorovány 1 až 3 po sobě následující vrchy vln). Vrch vlny je vzhledem ke kolmici na směr šíření široce roztažen – podle obvodu kruhu. Obvod kruhu  $V = 2\pi r H \lambda / 2 = \pi r H \lambda$ , kde  $r$  je vzdálenost od epicentra,  $H$  rozdíl výšek vrch-důl vlny. Odtud

$$H = \frac{V}{r\pi\lambda}.$$

Výpočet:

$$H = \frac{100 \text{ km}^3}{1\,000 \text{ km} \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ km}} = 0,000\,3 \text{ km} = 0,3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

Model:  $H_M = 0,3 \text{ m} / 10\,000\,000 = 0,000\,03 \text{ mm} = 30 \text{ nm}$

Výška vlny v našem modelu je nepozorovatelná.

Výška vlny na volném moři, jehož hloubka je 5 000 m, ve vzdálenosti 1 000 km od epicentra je 30 cm. Loď na širém moři vlnu vůbec nezaznamená. Loď by vlnu nezaznamenala, ani kdyby byla 10krát vyšší, neboť je velmi široká.

*Modelová situace* – kolik vody je vytlačeno, jak vysoká je vlna?

Padající kapky mají objem asi  $V_M = 10 \text{ mm}^3$ , tzn. že kapka má průměr asi  $d = 2,7 \text{ mm}$ .

Náš model neodpovídá skutečnosti. Je mnohem silnější – místo  $V = 10 \text{ mm}^3$  by podle měřítka modelu mělo být vytlačeno  $V = 0,1 \text{ mm}^3$  vody. Toto množství by bylo nepozorovatelné.

Jak vysoká je vlna na okraji talíře, kde je zakreslena Srí Lanka, tj. asi 10 cm od vystupující bubliny?

V modelu  $H_M = 0,000\,03 \text{ mm}$ .

Náše zvětšení  $H_{M+} = 7 \text{ mm}^3 / (100 \text{ mm} \times 3,14 \times 10 \text{ mm}) = 0,002 \text{ mm}$ .

Abychom vlnu pozorovali, musíme vytvářet super vlny – kapeme z větší výšky, tzn. že potenciální energie kapky je větší, tím vytvoříme větší vlnu (kapeme-li blízko povrchu vodní hladiny – vlna je slabá, nedosáhne okraje talíře).

Energie vln tsunami odpovídá potenciální energii, kterou voda získá nad epicentrem, když je dno náhle vyzdviženo. Tato energie se přemění v energii vlny. Potenciální energie se mění na kinetickou – zvýšení vlny proti tíhové síle a boční pohyb vody. Přeměny energie se šíří jako vlna. Voda zůstává tam, kde je.

*Jak rychle se pohybuje voda v modelu?*

Rychlost pohybu vlny odhadneme. Víme, že uplyne asi 1 s, když vyslovíme slovo „jednadvacet“. Nahlas vyslovujeme „jednadvacet“ a očima sledujeme vlnu až za okraj talíře, dokud slovo nedozní. Pravítkem odměříme vzdálenost (je to asi 30 cm). Uběhne-li vlna vzdálenost 20 cm nebo 40 cm, je její rychlost  $v = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  až  $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pro výpočet rychlosti vlny platí vztah

$$v = \sqrt{gh}$$

$$\begin{aligned} v_M &= \sqrt{gh_M} = \sqrt{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,005 \text{ m}} = \\ &= \sqrt{0,004905 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Velikost rychlosti vln tsunami v Indickém oceánu:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{gh} = \sqrt{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 5\,000 \text{ m}} = \\ &= \sqrt{49\,050 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

To znamená, že rychlost vln odpovídá rychlosti letadla.

*Kolik času uběhne mezi dvěma vrchy vlny, která nadzvedne loď?*

$$T = \lambda/v = 100\,000 \text{ m} / 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 500 \text{ s} = 8 \text{ min}$$

Jaká doba uplyne mezi zemětřesením a dopadem vlny na pobřeží Srí Lanky?

$$v = \frac{s}{t}, \quad s = 1\,500 \text{ km}, \quad t = \frac{s}{v} = \frac{1\,500 \text{ km}}{700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}} \approx 2 \text{ h}$$

*Tsunami na pobřeží*

Na modelový oceán rozptýlíme loď, naplaveniny, které budou představovat zrníčka pepře. Skutečná loď má délku až 300 m, jak velké musejí být loď v našem modelu?

$$D_M = 300 \text{ m} : 10\,000\,000 = 0,00003 \text{ m} = 0,03 \text{ mm} = 30 \text{ } \mu\text{m}.$$

Má-li lidský vlas průměr 100  $\mu\text{m}$ , znamená to, že loď v modelu musí být představována jemným prachem.

Pobřeží musíme upravit tak, aby tam moře naléhalo ploše. Voda na talíři neteče vlivem povrchového napětí stejnoměrně. Změnu povrchového napětí

docílíme potřením okraje talíře saponátem. Jeden okraj talíře podložíme tak, aby ležel šikmo. „Srí Lanka“ je nyní tak vysoko, že voda v talíři končí na jeho rovném dnu. Hloubka se mění od 5 mm až na 0. Talíř poprášíme pepřem, vyvoláme tsunami na hluboké vodě a pozorujeme, jak se pohybují zrníčka na vodě, pobřeží, souši, i ta, která byla pod vodou. Zrníčka před plochým pobřežím se pohybují asi 1 mm tam a zpět – skutečná loď by se tedy pohybovala 10 km tam a zpět. Ve skutečnosti není pohyb lodí tak velký, my však máme model zvětšený – vytváříme supertsunami.

### *Zpomalení vlny na pobřeží*

Hloubka moře u pobřeží se mění z hodnoty 5 000 m na 10 m.

$$v_p = \sqrt{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Při pobřeží jsou sousední vrchy vln tlačeny k sobě, vlna se zvedá, aby vodní masa odsunutá nad epicentrem, mohla zůstat v pohybu.

Změna vlnové délky

$$\lambda_p = \lambda \frac{v_p}{v} = 100 \text{ km} \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 5 \text{ km},$$

kde  $\lambda$  a  $v$  jsou hodnoty pro hloubku 5 000 m.

Výška vlny: objem vody se nemění, výška vlny roste nepřímou úměrně k vlnové délce:

$$H_p = H\lambda/\lambda_p = 0,3 \text{ m} \times 100 \text{ km}/5 \text{ km} = 6 \text{ m}$$

Perioda mezi dvěma vlnami: vychýlení vody na pobřeží je vyvoláno změnou polohy vlny na moři – ve stejném rytmu, během několika minut docházejí vlny na pobřeží, to je možné jen při zkrácení jejich vlnové délky.

V hloubce 10 mm objem vody v čase mezi vrchem a dolem vlny působí jako kinetická energie v kanálu širokém 10 m.

### *Kolik litrů vody se pohybuje na každém metru pobřeží?*

$2500 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 15\,000 \text{ m}^3$  na 1 m pobřeží, tj. 15 milionů litrů vody na 1 m pobřeží. Podobný výsledek dostaneme, když vodu vytlačenou v epicentru roztáhneme na kruh o poloměru 1 000 km:

$$100 \text{ km}^3 / (2 \times 3,14 \times 1\,000 \text{ km}) = 0,016 \text{ km}^2 = 16\,000 \text{ m}^3 / 1 \text{ m délky}$$

Pochopení fyziky vln tsunami není dosud propracováno pro všechny fáze – od vzniku, šíření vln, až po jejich dopad na pobřeží. Nejlépe propracovaná

je teorie vzniku a šíření vln. Vzhledem k vlnové délce vln a hloubce vody v místě, kde tsunami vzniká, lze aplikovat teorii lineárního vlnění. Podle této teorie lze říci, že čím je voda hlubší a vlnová délka vln větší, tím větší rychlostí se vlnění šíří. Na pobřeží, kde dochází k odrazu vln a překrývání vln dopadajících a odražených a vzhledem k velké výšce vlny, nelze již tsunami modelovat lineárním vlněním.

## Literatura

- [1] <http://www.schulphysik.de/tsunami.html>
- [2] HowStuffWorks – How tsunami works
- [3] *Gonzalez, F. I.*: Tsunami! Scientific American.com, May 18, 1999.

# Postav si sám – Záhadný dvojkužel

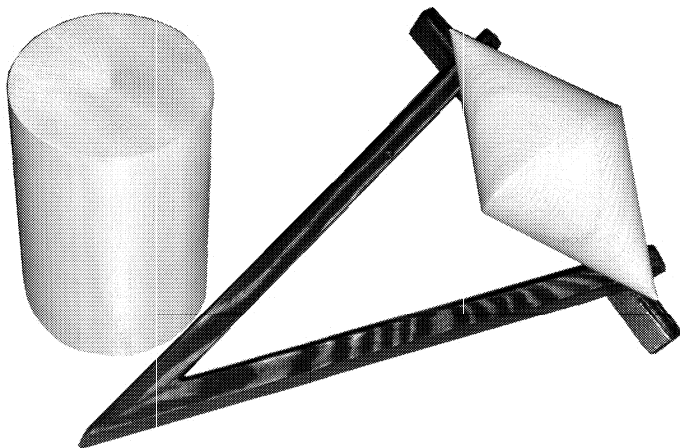
MIROSLAV PANOŠ

Gymnázium J. Vrchlického, Klatovy

Učitel položí na laťkovou nakloněnou rovinu válec a on se kutálí dolů – nic překvapivého. Teď na stejnou dráhu položí dvojkužel – světe div se – JEDE NAHORU!

Školní pomůcka „záhadný kužel“ (obr. 1) je typická pomůcka, která nadchne široké divácké okolí. Cena 500 – 600 Kč je však za dřevěný dvojkužel a tři šikovně spojené laťky poněkud vysoká. Pokud však své studenty nechcete o ukázkou této pomůcky ochudit, máte dvě možnosti: Sehnat sponzora, který nákup uhradí, nebo si pomůcku postavit z toho, co se ve škole najde. Tento článek by Vám měl pomoci pokud zvolíte variantu druhou. Pokud si chcete tuto pomůcku vyrobit, bylo by asi nejlepší začít tím, že si někde odměříte pomůcku již hotovou a vyrobíte přesnou kopii. To se mi však nepodařilo, tak jsem musel pomůcku navrhnout celou sám. Inspirací mi byla jen fotografie z nabídkového katalogu pomůcek a papírový model, který jsem si slepil pro ověřování svých fyzikálních závěrů.

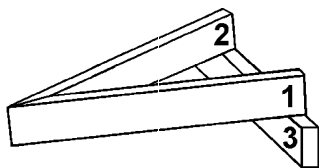




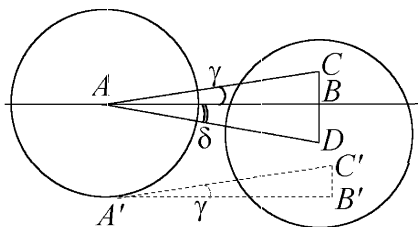
Obr. 1

### Návrh pomůcky

Předpokládejme, že máme vyrobený dvojkůžel známých rozměrů a laťku, ze které chceme vyrobit nakloněnou rovinu pro pohyb dvojkůžele. Nejjednodušší možnost, jak sestavit tuto laťkovou dráhu vidíme na obr. 2.



Obr. 2



Obr. 3

Naším úkolem je ze známých parametrů ( $s$ ,  $d$  – rozměry kůželu a  $v$  – výška laťky – obr. 4) získat parametry hledané ( $L$  – délka použitých laťek 1 a 2, a – šířka laťkové dráhy v nejvyšším místě – obr. 5). Podíváme-li se blíže na pohyb dvojkůžele po nakloněné rovině a rozkreslíme si pohyb jeho těžiště, získáme obr. 3.

Trojúhelník  $A'B'C'$  představuje lačkovou dráhu, po které se dvojkužel pohybuje. Úsečka  $AC$  je dráhou těžiště, pokud by se dvojkužel „nepropadal“ lačkovou dráhou. Trojúhelníky  $ABC$  a  $A'B'C'$  jsou tedy shodné. Úsečka  $BD$  je snížení těžiště oproti vodorovnému směru – příčina pohybu dvojkužele po nakloněné dráze.

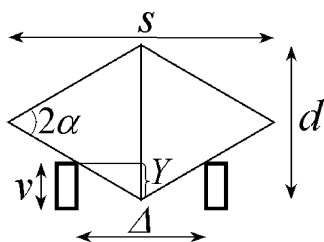
Pro následující výpočty a úvahy si délky jednotlivých úseček označme následujícím způsobem:  $|AC| = l$ ,  $|AB| = l'$  (průmět  $l$  do podložky),  $|BC| = v$  (výška nakloněné dráhy – též výška použitých latěk),  $|BD| = y$  (propad těžiště oproti vodorovnému směru),  $|CD| = Y$  (propad těžiště oproti směru nakloněné dráhy).

Aby se dvojkužel pohyboval směrem „nahoru“ po nakloněné rovině, musí jeho těžiště klesat. Tedy  $y > 0$ , neboli  $Y > v$ .

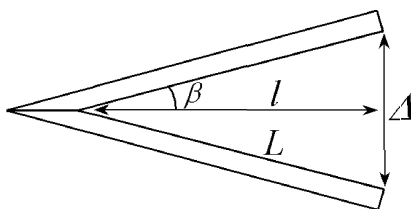
Vyjádříme-li si snížení polohy těžiště  $Y$  z parametrů dvojkužele (obr. 4), získáme podmínku

$$Y = \frac{d\Delta}{2s}, \quad (1)$$

kde  $d$  je průměr dvojkužele,  $s$  jeho šířka a  $\Delta$  je šířka lačkové dráhy v nejvyšším místě dráhy.



Obr. 4



Obr. 5

Aby dvojkužel nenarazil svým obvodem o desku stolu dříve, než dojde na kolec dráhu, musí být celkové snížení jeho těžiště  $Y$  menší než výška dvou latěk (jedna tvoří dráhu, druhou je na konci dráha podepřena – viz obr. 2). Z toho docházíme k podmínce pro maximální šířku lačkové dráhy  $\Delta$ :

$$\frac{2vs}{d} < \Delta < \frac{4vs}{d} \quad (2)$$

Hodnotu  $\Delta$  tedy můžeme libovolně stanovit v daném rozmezí. Všimněte si, že v této podmínce se vůbec nevyskytuje délka dráhy  $l$ , což by se zprvu

mohlo zdát překvapivé. Uvědomme si však, že změnou délky dráhy  $l$  se zmenšuje nejen úhel  $\delta$  (snížení těžiště – obr. 3) ale i úhel  $\gamma$  (úhel nakloněné roviny). Kromě podmínky (2) je však třeba uvážit, že dvojkužel by neměl na konci lačkovou dráhou propadnout, tedy  $\Delta < s$ .

Nyní se podíváme na podmínku pro délku dráhy  $l$  a úhel snížení těžiště  $\delta$ . Z hodnoty  $l$  již pak získáme  $L$  délku lačky pro stavbu dráhy.

Z obr. 3 plyne

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{y}{l'},$$

kde  $l' = \sqrt{l^2 + v^2}$  a  $y = Y - v$ .

Dosazením a úpravou získáme podmínku pro  $l$ , kde  $\operatorname{tg} \delta$  bude hrát roli parametru:

$$l = \sqrt{\left(\frac{d\Delta - 2vs}{2s \operatorname{tg} \delta}\right)^2 - v^2} \quad (3)$$

Úhel  $\delta$  určuje, jak svižně se bude dvojkužel na lačkové dráze pohybovat. Z délky  $l$  lze podle obr. 5 spočítat vnitřní délku lačky  $L$  a tím i další potřebné parametry.

Z úvah o pravoúhlém trojúhelníku získáme pro vnitřní délku lačky  $L$  vztah

$$L = \frac{\Delta}{2 \sin \beta},$$

kde úhel  $\beta$  získáme z výrazu  $\frac{\Delta}{2l} = \operatorname{tg} \beta$ .

Ukažme si platnost těchto úvah a vzorců pro případ prezentovaný na výkresu (obr. 6). Pochopitelně díky obecné platnosti úvah a výpočtů lze rozměry modifikovat podle Vám dostupného materiálu, takže lze vyrobit pomůcku téměř libovolných rozměrů.

Máme-li dvojkužel o rozměrech  $d = 100$  mm,  $s = 200$  mm a lačku  $15 \times 25$  mm, plyne z (2)  $100 < \Delta < 200$ . S přihlédnutím k podmínce (3) a celkovému řešení pomůcky volíme vnitřní vzdálenost latěk  $\Delta = 150$  mm.

Pro podmínku (3) potřebujeme zvolit úhel  $\delta$ , který charakterizuje zrychlení pohybu dvojkužele po nakloněné rovině. Tvar této podmínky ukazuje, že je lepší zvolit přímo hodnotu  $\operatorname{tg} \delta$ . Zde jsem zvolil  $\operatorname{tg} \delta = 0,04$  (tj.  $\delta \approx 2,3^\circ$ ), tím získáme  $l \approx 310$  mm. Pro celkové rozměry ramen lačkové dráhy z toho plyne  $L = 320$  mm a vnější délka lačky přibližně 380 mm. Tím jsme získali potřebné důležité rozměry a můžeme se pustit do stavby.

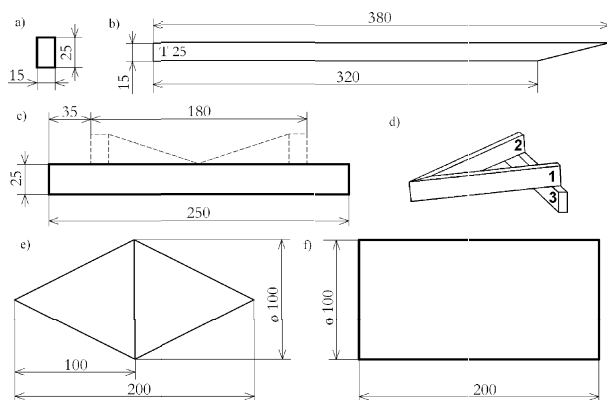
## Stavba pomůcky

Většinu materiálu najdeme v dílně školního údržbáře, či jiného kutila ať již z řad učitelů nebo studentů. Problematickým místem je výroba dvojkužele. Potřebný špalík na výrobu jsem nakonec vyřešil slepením několika bukových odřezků z prkýnek, které jsem jako nepoužitelný odpad dostal od truhláře. K slepení posloužilo epoxidové lepidlo. Skutečným „zlatým hřebem“ však bylo soustružení dvojkužele. Nešlo tak ani o opracování výrobku, jako o jeho uchycení do soustruhu. Pokud budete dvojkužel soustružit ve vrtačkovém stojanu KOMBI, je asi nejlepší vyrobit dvojkužel bez špiček a ty pak rašplí a pilníkem dotvarovat v ruce. Máte-li štěstí, narazíte na šikovného soustružníka, který si s tím poradí pomocí jednoduchých přípravků a dokáže vysoustružit dvojkužel celý.

Zbývá pomůcku doplnit o válec, který po lačkové dráze jezdí dolů. Buď jej opět vysoustružíme, nebo použijeme jakoukoliv kulatinu, lepší je však průměr srovnatelný s kuzelem.

Laťky nakloněné dráhy jsou lepeny tepelnou lepicí pistolí, jejíž hustá lepicí hmota může sloužit i jako tmel. K povrchové úpravě byl použit bezbarvý a lazurovací lak. Povrchy však lze nechat i bez nátěru. Ať se do výroby této pomůcky pustíte jakýmkoliv způsobem, odměnou Vaší snahy bude roztomilá fyzikální „hračka“, která nadchne každého.

## Technický výkres (obr. 6)



Obr. 6

a) profil použité latky, b) rameno nakloněné roviny, c) základna nakloněné roviny, d) sesazení nakloněné roviny a základny, e) dvojkužel pro výše uvedenou základnu, f) válec navržený pro daný kužel

# Úlohy pro 47. ročník fyzikální olympiády

## KATEGORIE E, F

Kategorie E fyzikální olympiády je určena pro žáky 9. ročníků základních škol, čtvrtých ročníků osmiletých gymnázií a druhých ročníků šestiletých gymnázií, kategorie F fyzikální olympiády je určena žákům ročníků o rok nižších (8. ročníky ZŠ, 3. ročníky osmiletých a 1. ročníky šestiletých gymnázií).

Protože existuje příliš velká různorodost v učebních programech podle schválených vyučovacích programů, rozhodl ÚVFO při svém březnovém zasedání zadat pro tyto dvě kategorie společně 16 úloh, z nichž učitel fyziky vybere a vyznačí sedm úloh pro každou kategorii podle učiva, které bude ve škole probráno a procvičeno do konce března.

Pro vyšší kola soutěže (okresní, oblastní kolo) je nutné stanovit některá závazná témata.

*Kat. F:* Mechanika (pohyby, síly, práce, výkon, energie), Hydromechanika (statika a dynamika kapalin, aerostatika), Termika (výměna tepla, teplo a práce, změny skupenství), Optika (jen paprsková optika – geometrická řešení).

*Kat. E:* K výše uvedeným závazným tématům připojíme: Elektřina (kondenzátory, stejnosměrný proud, obvody, účinky proudu).

### EF 1. Sousední stanice

Dvě sousední stanice na železniční trati jsou od sebe vzdáleny přesně 4,0 km a elektrický vlak projede tuto vzdálenost za dobu 5,0 min. Vlak se pohybuje tak, že první třetinu celkové doby jízdy se rovnoměrně zrychluje, třetinu doby jede nejvyšší získanou rychlostí a třetinu doby rovnoměrně zpomaluje, až se zastaví.

a) Urči průměrnou rychlost vlaku na trati mezi stanicemi.

- b) Načrtni graf  $v(t)$ .
- c) Po jaké dráze jede vlak rovnoměrně, po jaké dráze se zrychluje a po jaké zpomaluje?

## EF 2. Vlak projíždí

Kolem výpraviho stojícího na začátku nástupiště projel vlak o délce 250 m za 20 s.

- a) Za jak dlouho projede tento vlak podél nástupiště o délce 150 m?
- b) Jak dlouho míjel toto nástupiště cestující, sedící u okna ve 2. kupé třetího vagónu?
- c) V okamžiku, kdy konec vlaku minul konec nástupiště, zpozoroval strojvůdce „červenou“ na trati, ihned začal rovnoměrně brzdít a zastavil za dobu 50 s. Jak daleko byl strojvedoucí od výpraviho v okamžiku zastavení vlaku?

## EF 3. Zkouška motoru

Při zkoušce motoru se automechanik rozjížděl s automobilem rovnoměrně zrychleně ( $v \sim t$ ) a během 20 s dosáhl nejvyšší rychlosti. Touto rychlostí jel po dobu 40 s a urazil dráhu 1 200 m, pak začal brzdít a rovnoměrně zpomalně zastavoval po dobu 60 s.

- a) Načrtni graf rychlosti v závislosti na čase  $v(t)$ .
- b) Jakou největší rychlostí se automobil pohyboval?
- c) Po jaké dráze se automobil rozjížděl a po jaké dráze se zastavoval?
- d) Jaké průměrné rychlosti dosáhl automobil na zkušební trase?

## EF 4. Na dálnici

Po dálnici jel v automobilu neukázněný řidič stálou rychlostí 162 km/h, když náhle míjel hlídku dálniční policie, stojící u odpočívadla. Během následujících 40 s snížil rychlost na 126 km/h. Hlídka vyrazila 10 s po průjezdu řidiče a během 20 s získal její vůz rychlost 144 km/h, a touto rychlostí jel dále.

- a) Nakresli do téhož grafu  $v(t)$  pohyb obou automobilů.
- b) Dohoní hlídka silniční policie neukázněného řidiče ještě před výjezdem z dálnice ve vzdálenosti 8,0 km?

## EF 5. Osobní výtah

Klec osobního výtahu ve čtrnáctiposchodovém obytném domě má hmotnost 150 kg. Uveze tři dospělé osoby o celkové hmotnosti 250 kg. Ze sklepa až do nejvyššího podlaží urazí klec dráhu 45 m za dobu 90 s. Někdy jede výtah prázdný, jindy se třemi osobami.

- a) Jakou silou je napínáno lano, je-li výtah v klidu nebo pohybuje-li se rovnoměrně?
- b) Mění se tahová síla v laně při rozjíždění či zastavování?
- c) Jak se změní polohová energie klece a jakou práci vykoná elektromotor?
- d) Jaký je výkon elektromotoru pro zajištění provozu výtahu?
- e) Urči užitečnou i celkovou práci i motoru výtahu. Jaký je užitečný výkon?
- f) Navrhni, jakým způsobem lze zmenšit náklady na provoz výtahu.

## EF 6. Hydroelektrárna

O hydroelektrárně na řece Volha u města Volgograd víme, že má nejvyšší výkon 2 540 MW, řeka má střední objemový tok  $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ . Energie vodního toku lze využít na 60 %. Jak vysoko musí být hladina přehrady nad vstupem vody do turbín?

## EF 7. Skříňka s knihami

Skříňka s knihami má těžiště přibližně ve středu svého kolmého vodorovného řezu; hmotnost této skříňky je 240 kg. Skříňka stojí na čtyřech nožkách, každá se dotýká podlahy rovnou ploškou, obsah dotykové plošky o obsahu každé nožky  $4\text{ cm}^2$  a do podlahové krytiny se vytlačily důlky. Dana tvrdila, že by bylo lepší pod každou z nožek dát plechovou podložku o obsahu  $15\text{ cm}^2$ , Anička by nohy odstranila vůbec a po kratších stranách skříňky by dala lišty o rozměrech  $40\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ . Tatínek Mirek potom rozhodl, že dá lišty o šířce 2 cm podél celého obvodu podstavy o rozměrech  $120\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ . Zjisti, jak se tyto úpravy projeví postupně na tlakové síle působící na podlahu a na tlaku v místě dotyku linolea s nábytkem. Urči poměr tlaku v nové situaci a tlaku původního.

## EF 8. Tepelná elektrárna

Tepelná elektrárna má pět turbín, každou o výkonu 110 MW. Spaluje méněkvalitní uhlí o výhřevnosti  $12\text{ MJ/kg}$ , účinnost spalování a následného využití tepla je 36 %.

- a) Urči denní spotřebu uhlí pro tuto elektrárnu.
- b) Odhadni, kolik uhlí uspoříme užitím atomové elektrárny o celkovém výkonu 2 200 MW.
- c) Při spalování uhlí vznikají plyny, popílek a zbytky (popel). Popiš, jak tepelná elektrárna přispívá k znečištění životního prostředí a ke globálnímu oteplování. K odpovědi prostuduj vhodnou literaturu anebo užij informací z internetu.

### EF 9. Rozmarná společnost

Na odpolední slavnosti chtěli účastníci nejprve kávu. Proto maminka dala do elektrické konvice 1,2 l vody teploty  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 4200\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Než konvice byla připojena k elektrické síti, změnili rozhodnutí a chtěli chlazený nápoj. A tak maminka přidala k vodě 150 g ledu o teplotě  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $l_t = 330\text{ kJ}/\text{kg}$ . Nakonec však přece jen chtěli kávu, proto maminka konvici s vodou i s ledem připojila k síti. O konvici víme, že má příkon  $P = 2000\text{ W}$ , účinnost využití tepla 85 %.

- Jak dlouho by trvalo původní zahřátí vody na teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
- Jakou výslednou teplotu by měla voda po roztátí ledu? Roztaje všechn led?
- Jak dlouho trvalo nakonec zahřátí vody s ledem na teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

### EF 10. Ultralehké letadlo

Ultralehké letadlo Global Flyer, s nímž Steve Fosset obletěl svět za méně než 80 h, má dolet za bezvětří 33 800 km, rychlost 440 km/h. Letadlo startovalo na letišti Salina (Kansas, USA) a mělo původně plánovanou trasu míst, nad nimiž mělo proletět: Montreal, Londýn, Paříž, Řím, Káhira, Manama (SAE), Karáčí, Kalkata, Šanghaj, Tokio, Honolulu, Los Angeles a zpět letiště Salina.

- Najdi všechna místa na mapách a vyznač do jedné mapy světa. Jaké měřítko má mapa a jak se podle mapy zjišťují skutečné vzdálenosti?
- Uveď délku trasy, kterou Fosset naplánoval; jak dlouho měl být na trase?
- Odhadni, jakou dráhu a za jak dlouho by Fosset urazil při cestě kolem světa, kdyby letěl po 38. rovnoběžce, kolem níž všechna místa přibližně leží?
- Jaký vliv na let letadla má oblast, kde vane západní vítr? Vysvětli alespoň slovně.

### EF 11. Cesta z kopce do kopce

Když jede automobil do mírného kopce stálou rychlostí 54 km/h, musí mít jeho motor výkon 20 kW pro udržení rovnoměrného pohybu. Když jede z téhož kopce dolů, má motor výkon jen 10 kW při stálé rychlosti 72 km/h. Jaký výkon musí mít motor automobilu, aby udržel jízdu automobilu po rovině stálou rychlostí 63 km/h? Předpokládejme, že odporová síla proti pohybu je ve všech případech stejná.



## EF 12. Atmosférický tlak

Když horolezci stoupají do hor, mění se jimi měřený tlak vzduchu s rostoucí výškou  $h$  podle vzorce  $p = p_0/e^{0,000125h}$ ,  $p_0 = 101,3$  kPa je tlak atmosférický v nulové nadmořské výšce.

- Tvrdí se, že ve výšce 5 500 m je atmosférický tlak poloviční než v nadmořské výšce nulové. Ověř toto tvrzení.
- Jaký je atmosférický tlak za oknem letadla Jumbo Jet, které letí ve výšce 11,0 km?
- Odhadni, jaký je atmosférický tlak na sedmitisícovce.
- Načrtni změny tlaku  $p(h)$  do grafu pro výšky od 0 m do 22 km. Ověř svůj odhad v c).

Poznámka: Hodnotu čísla  $e$  najdeš na svém kalkulátoru: na displeji ponech jedničku a zmáčkni  $e^x$ . Libovolnou hodnotu výrazu  $e^x$  zjistíš stejným postupem: na displej napíšeš číslo a zmáčkneš  $e^x$ . Na některých kalkulátorech musíš nejprve zmáčknout shift nebo  $2^{nd}$ .

Pamatuj: Kalkulátor je tvůj dobrý kamarád, ale musíš se s ním nejprve dobře seznámit.

## EF 13. Drátěný čtverec

Martina a Vlastík sestrojili na zahradě kolem záhonů drátěný čtverec  $ABCD$  s jednou úhlopříčkou  $AC$  tak, že do země do rohů zatloukli čtyři dřevěné tyčky o výšce 30 cm. Pak kolem tyček natáhli neizolovaný drát o průměru 0,4 mm. Délka strany čtverce byla 6,0 m, délka úhlopříčky  $AC$  byla 8,5 m. Drát, který použili, měl měrnou rezistivitu  $0,5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ , tedy drát o délce 1,0 m a průřezu  $1,0 \text{ mm}^2$  má odpor 0,50  $\Omega$ . Potom se rozhodli připojit vzniklou soustavu odporů ke zdroji o napětí 12,0 V a vytvořili tak zařízení podobné elektrickému ohradníku.

- Jaký elektrický odpor má každá se stran čtverce? Jaký elektrický odpor má úhlopříčka  $AC$ ? Výsledek zaokrouhli na desetiny ohmu.
- Jaký odpor má drátěný ohradník  $ABCD$  s jednou úhlopříčkou  $AC$ , připojí-li se zdroj k bodům  $AB$ ,  $AC$ ,  $AD$ ? Jaký proud by procházel přírodními měděnými vodiči, jejichž odpor nebudeme uvažovat?
- Jaký odpor má soustava drátů, jestliže elektrický zdroj připojili k bodům  $B$ ,  $D$ ?

Pro řešení úloh si nakresli odpovídající elektrické schéma.

## EF 14. Valení

Válec o poloměru  $r = 2,5$  cm se valí po vodorovné rovině. Budeme sledovat při pohybu bod  $X$  na obvodu válce od okamžiku, kdy projde nejnížší

polohou na své trajektorii. Válec si znázorníme kruhem o poloměru  $r$ . Rovinu bude představovat přímka na dlouhém papíru, který získáme slepením dvou listů papíru A4 podél kratší strany. Na obvodu kruhu vystříhneme malý otvor pro umístění špičky tužky. Modelujeme valení válce po rovině opatrným odvalováním kruhu po přímce a zaznamenáváme co nejčastěji polohu bodu  $X$  na podložním papíru. Na papír se vejdou asi třiapůl otočky kruhu. Poté vzniklé body spojíme plynulou křivkou, která se jmenuje cykloida (kotála).

Na list papíru A3, který získáme ze dvou papírů formátu A4 slepením podél delší strany, znázorníme kružnici o poloměru  $R = 3r = 7,5$  cm a sestrojíme křivku, která vznikne při sledování bodu  $X$  vyznačeného na obvodu původního kruhu o poloměru  $r$  při odvalování kruhu *vně* a potom *uvnitř* nakreslené kružnice. Modelujeme tak valení menšího válce po válci o větším poloměru. Vzniklé body spojíme opět plynulou čarou.

Na druhou stranu papíru se pokusíme sestrojit stejným postupem trajektorie bodu  $X$  při pohybu původní kružnice po kružnici o poloměru  $R = 2r = 5,0$  cm i pro  $R = r = 2,5$  cm. Jak by dopadl pokus při volbě  $R = 4,0$  cm?

Upozornění: Konstrukce musíš provádět co nejpřesněji; je-li poloměr kružnice celistvým násobkem poloměru původního kruhu, co musí platit o jejich obvodech?

### EF 15. Jak pružný je míček?

V této úloze budeme potřebovat dostatečně elastický míček (tenisák, plnopryžový míček, tzv. hopík, míček pro stolní tenis), délkové měřítko (skládací nebo svinovací metr nebo alespoň dřevěnou tyčku o délce 150 cm s vyznačenými značkami po 5 cm). Míček umístíme do výšky  $h_0$  (sledujeme jeho dolní okraj) nad vodorovnou podložku (betonová podlaha, dlaždice, parkety aj.), uvolníme a budeme sledovat největší výšku  $h$ , do které po odrazu vystoupí.

- Provedeme několik pokusů s různými míčky a stejnou podložkou či se stejným míčkem, ale s různými podložkami a zapíšeme naměřené údaje do vhodné tabulky. Opakujeme vždy alespoň desetkrát pro různé počáteční výšky  $h_0$ .
- Porovnáme získané výsledky použitím veličiny  $k = h/h_0$ .
- Polohová energie míčku vzhledem k podložce je  $E_p = mgh$ , pohybovou energii určíme  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ . Určíme vztah pro výpočet rychlosti dopadu míčku, popř. rychlosti odrazu míčku od podložky, využijeme-li platnosti zákona zachování mechanické energie. Jak lze vysvětlit, že

počáteční a koncová výška míčku po odrazu od podložky se výrazně liší?

- d) Ve všech případech naměřených počátečních a koncových výšek polohy míčku určíme rychlost  $v_0$  dopadu a rychlost  $v$  odrazu míčku i jejich podíl  $k^* = v/v_0$ . Lze odhadnout, jak spolu souvisejí veličiny  $k$  a  $k^*$ ?
- e) Odhadněme, jak se mění výška poté, co míček koná po sobě následující odrazy. Výsledek úvahy zakresli do vhodného grafu.

### EF 16. Určujeme ohniskovou vzdálenost spojné čočky

Budeme potřebovat lupu nebo spojnou čočku (asi 4 až 5 dioptrií), délkové měřidlo a bílý papír, který bude sloužit jako stínítko pro zobrazování.

- a) Papír umístíme tak, aby byl kolmý na spojnici daného místa a vzdáleného zdroje světla (Slunce, žárovka, místní osvětlení). Zobrazíme tento zdroj světla pomocí lupy nebo čočky na stínítko. Odhadneme ohniskovou vzdálenost čočky a její optickou mohutnost. Použijeme-li jako světelný zdroj Slunce, nesmíme je zobrazovat dlouhou dobu. Jaké mohou být důsledky? **Nikdy se nedívej přes čočku na Slunce!**
- b) Jako zdroj můžeme použít svíčku (kalíšek) a budeme zobrazovat plamen svíčky na svislém stínítku. Zjistíme vzdálenost  $a$  předmětu, vzdálenost  $b$  obrazu od čočky. Jak potom určíme ohniskovou vzdálenost užití čočky? Vzdálenosti svíčky od čočky postupně měníme, abychom získali hodnověrnější údaje. **Při pokusu buď opatrný!**
- c) Jestliže vzdálenost čočky a stínítka bude stálá a dostatečně velká, potom můžeme umístit čočku do dvou různých poloh, v nichž se nám podaří získat ostrý obraz plamene. Nakreslíme k tomu obrázek a danou skutečnost vysvětlíme. Jak nyní lze určit ohniskovou vzdálenost čočky?

Při řešení experimentálních úloh nezapomeňte, že veličiny měříme s určitou nepřesností, že při měření téže veličiny tedy získáme vždy několik navzájem různých hodnot, z nichž je třeba stanovit aritmetický průměr a vypočítat (nebo alespoň hodnověrně odhadnout) neurčitost získaného výsledku. Výsledkem měření je potom nejen získaná průměrná hodnota, ale také meze, v nichž lze s největší pravděpodobností očekávat správnou hodnotu měření.

*Ivo Volf, ÚVFO*