



Výfučení: Fyzika potápění

Úvod

Letošní třetí Výfučení se zaměří na téma, které není moc známé, nicméně je rozhodně velice zajímavé – *fyzika potápění*. Ačkoli jsme na konci listopadu a zimní radovánky jsou v plném proudu, věříme, že není na škodu si připomenout teplé dny tímto tropickým sportem, ve kterém se skrývá spousta fascinujících fyzikálních témat.

Vzduch

Vzduch patří mezi věci, které nejvíce ovlivňují průběh potápěčova ponoru. Jak jistě z biologie víte, k životu potřebujeme pomocí dýchání ze vzduchu získávat plynný kyslík, který se následně váže na hemoglobin v naší krvi a je rozváděn do tkání po celém těle člověka. Jelikož ale vzduchu pod vodou moc nenajdeme, musí si potápěči nosit vlastní. Nejčastěji ho přepravují stlačený pod tlakem cca 200 bar¹ ve dvanácti nebo dvacetilitrových lahvích.

Stlačený vzduch

Možná se právě zamýšlíte nad tím, proč si potápěči pod vodu nevezmou jen čistý kyslík a „plývají“ kapacitou svých lahví na skladování ostatních složek vzduchu. Odpověď je celkem jednoduchá – kyslík je ve velkých koncentracích pro naše tělo toxický, zejména pak postihuje plíce a centrální nervovou soustavu. Kdyby si potápěči pod vodu vzali čistý kyslík, jejich ponor by skončil velmi rychle.

Samozřejmě i dýchání stlačeného vzduchu má své nevýhody. Tou hlavní je převážně dusík, který při tvoří cca 78 % vzduchu. Plyny, a tedy i dusík, se při vyšších tlacích rychleji a snáz rozpouští v tělních tekutinách (tuto skutečnost popisuje tzv. *Henryho zákon*). Hlavním rizikem tohoto jevu je, že pokud se v našem těle rozpustí moc velké množství dusíku, při vystoupení z vody a tedy i snížení tlaku se vyloučí z tělních tekutin v podobě bublinek, což nám může poškodit měkké tkáně. Takovým poškozením říkáme *dekompresní nemoc*.

Abychom této situaci předešli, nesmíme překročit kritické množství rozpuštěného dusíku v těle. Nadbytečné množství je třeba během výstupu z hloubky dostatečně pomalu vyloučit. Tato skutečnost limituje čas, který můžeme v dané hloubce, resp. při daném tlaku pod vodou strávit. Většina ponorů rekreačních potápěčů je tzv. *bezdekompresní*, tedy využívají první možnost, jak předejít dekompresní nemoci – tráví v dané hloubce jen tak krátký čas, při kterém se v jejich těle nerozpustí vysoké množství dusíku. Právě z těchto důvodů je jedním z nejdůležitějších aspektů plánování ponorů jasné stanovení hloubek a časů, které v těchto hloubkách strávíme.

Vzduch jako ideální plyn

Podívejme se na trochu fyziky, kterou lze při počítání se stlačeným vzduchem využít. Jako první zmíníme Daltonův zákon parciálních tlaků. Ten říká, že celkový tlak p směsi několika

¹Bar je mezi potápěči nejčastěji používanou jednotkou tlaku, protože přibližně odpovídá atmosférickému tlaku (1 bar = 100 000 Pa), což zjednodušuje počítání. Na definici bar se můžete podívat například zde [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bar_\(jednotka\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bar_(jednotka)).

plynů odpovídá součtu parciálních tlaků² těchto plynů ($p_1, p_2, p_3, \dots$), tedy součtu tlaků jednotlivých složek. To lze matematicky zapsat jako $p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$

Dále se při počítání se vzduchem vyplatí jej považovat za ideální plyn³, pro který platí stavová rovnice

$$pV = nRT,$$

kde p je tlak plynu, V jeho objem, n látkové množství plynu, $R \doteq 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ značí molární plynovou konstantu a T je teplota plynu v kelvinech.

Ideální plyny mohou podléhat tzv. *termodynamickým dějům*, tj. procesům, při kterých se mění některé veličiny popisující stav plynu (teplota, tlak, objem...). Jedním z termodynamických dějů je např. *izochorický* děj, při němž se u daného množství plynu mění teplota společně s tlakem, zatímco objem zůstává stejný. Pokud tedy ve stavové rovnici budeme nahlížet na látkové množství a na objem jako na konstanty ($n = \text{konst}$, $V = \text{konst}$), obdržíme tzv. *Charlesův zákon* popisující izochorický děj jako

$$\frac{p}{T} = \text{konst} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2},$$

kde tentokrát p_1 a p_2 značí tlak plynu na začátku a na konci děje, podobně T_1 a T_2 značí počáteční a koncovou teplotu plynu. Obdobně můžeme pro *izobarický* děj zachovávající stálý tlak odvodit *Gay-Lussacův zákon*

$$\frac{V}{T} = \text{konst} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

A pro *izotermický*, což je děj při konstantní teplotě, platí *Boyleův–Mariottův zákon* ve tvaru $pV = \text{konst}$.

V ideálním plynu mohou probíhat i jiné děje, tyto tři jsou však z hlediska potápečské fyziky nejdůležitější. Pokud se chcete dozvědět více o ideálním plynu a dějích, které v něm mohou probíhat, doporučujeme přečíst si Výfučení 1. série 13. ročníku⁴.

Nejspíše jste si všimli, že v mnohých zákonech popisujících plyn hraje klíčovou roli jeho tlak. V potápečské fyzice nás nejvíce zajímá tlak dýchaného vzduchu, který je díky rovnováze tlaků mezi okolím a dýchacím ústrojím roven okolnímu tlaku v dané hloubce pod vodou. Můžeme si jednoduše spočítat, že tlak vzduchu na hladině (atmosférický tlak) je cca 1 bar a s přibývajícím hloubkou se po každých 10 m zvýší o přibližně 1 bar.⁵ Např. tlak ve 20 m pod hladinou by byl cca 1 bar + 20 m / (10 m) · 1 bar = 3 bar.

Archimédův zákon

Jedním z nejznámějších zákonů týkajících se tekutin (kapalin a plynů) je Archimédův zákon. Ten říká, že „*Těleso ponořené do tekutiny je nadlehčováno vztlakovou silou, která je rovna tíze tekutiny stejného objemu, jako ponořená část tělesa.*“ To je důvod, proč se všechno ve vodě zdá lehčí – může za to vztlaková síla, kterou spočítáme jako

$$F_{vz} = V \rho_k g,$$

²Parciální tlak je takový tlak, který by měl daný plyn, kdyby při stejné teplotě sám zaujímal objem, který zaujímá směs plynů.

³Ideální plyn je zjednodušený model reálného plynu; zanedbává velikost částic, přeměny kinetické energie při jejich srážkách na jiné formy energie a všechny ostatní interakce mezi částicemi.

⁴https://vyfuk.org/_media/ulohy/r13/s1/vyfuceni1.pdf

⁵K výsledku dojdeme využitím vztahu $p = h\rho g$ pro hydrostatický tlak způsobený tíhou vodního sloupce výšky $h = 10 \text{ m}$ o hustotě $\rho \doteq 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, kde $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ je tíhové zrychlení.

kde V je objem tělesa, ρ_k hustota kapaliny a g tíhové zrychlení.

Když tedy chceme spočítat výslednou sílu působící na předmět ve vodě, musíme od tíhové síly $F_G = mg$, kde $m = \rho_t V$ je hmotnost tělesa o hustotě ρ_t , odečíst vztlakovou sílu

$$F = F_G - F_{vz} = Vg(\rho_t - \rho_k)$$

Potápěči často potřebují překonat vztlakovou sílu, aby se vůbec mohli ponořit. Toho lze nejjednodušeji docílit zvýšením jejich hmotnosti při co nejmenším zvětšení objemu. Tento problém se řeší pomocí olověných opasků. Olovo je ideální, protože má velmi vysokou hustotu (přibližně $11\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), což znamená, že i malý objem olova má velkou hmotnost a umožňuje efektivní kompenzaci vztlaku.

Nyní si uvedme něco málo z potápěčské praxe. Je důležité uvědomit si rozdíl mezi sladkou a slanou vodou. Pokud se potápíme ve sladké vodě s určitou hmotností závaží, ve slané vodě tato hmotnost nebude stačit. Slaná voda má vyšší hustotu, což znamená větší vztlak. Proto si do slané vody musíme vzít olova více. Ale s množstvím závaží je potřeba zacházet opatrně, nechceme se totiž ani přetížít.

Abys si potápěči vyzkoušeli, jak jsou vyvážení, před prvním ponorem na daném místě si udělají tzv. *vyvažovací ponor*. Většinou se dělá v hloubce 5 metrů, kde musíme při nádechu mírně stoupat a při výdechu lehce klesat. Hlavním ukazatelem je to, že potápěč začne na hladině klesat až s úplně vyfouknutým žaketem⁶. Příliš mnoho závaží může způsobit přetížení. Jak víme z Boyleova–Mariottova zákona, čím hlouběji se ponoříme, tím více se objem plynu v žaketu, a tedy i vztlak, sníží. Proto když se přetížíme a už v malé hloubce se musíme vyvažovat pomocí žaketu, nemuseli bychom se pak z větší hloubky vynořit.

Zvuk

Zvuk je vlastně šíření malých změn tlaku prostředí, z nichž část naše uši dokáží zaznamenat. Abychom pochopili chování zvuku pod vodou, je nezbytné si uvědomit rozdíly mezi šířením zvuku ve vzduchu a ve vodě. Voda jako prostředí má zcela odlišné fyzikální vlastnosti, které ovlivňují naše vnímání zvuku (jak ho slyšíme, odkud přichází, z jaké dálky se může šířit). Pro potápěče je proto důležité znát tyto základní principy, aby se lépe orientovali a dokázali na zvukové podněty bezpečně a efektivně reagovat.

Rychlost zvuku

Voda má skoro tisíckrát vyšší hustotu než vzduch. Její molekuly jsou přitom zhruba o třetinu lehčí než biatomické molekuly dusíku, se kterými se můžeme potkat ve vzduchu. Molekuly vody to tedy od sebe nemají tak daleko, proto když se jedna rozkmitá, narazí na ostatní dřív (lokálně zvýší tlak). Následně dojde k předání části jejich energie a další molekuly vody poté změnu tlaku stejným způsobem přenáší dál. Závislost změny tlaku v tekutině na její hustotě, resp. objemu popisuje objemový modul pružnosti K , který je pro vodu při teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ přibližně $2,2 \cdot 10^9\text{ Pa}$. Dosazením do vzorce níže zjistíme rychlost zvuku v kapalině

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}.$$

⁶Žaket je potápěčská vesta sloužící k regulaci vztlaku tím, že při do-, resp. vyfouknutí zvětšuje, resp. zmenšuje svůj objem.

Pro vodu vychází přibližně $1\,490\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čili zhruba čtyřnásobek rychlosti zvuku ve vzduchu, která se při podobných teplotách udává okolo $343\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Šíření zvuku

Jak jsme si ukázali, voda je rychlejší a díky vyšší hustotě také lepším přenašečem zvuku než vzduch. Při šíření změny tlaku mezi molekulami vody proto v realitě dochází k menším ztrátám energie, tudíž vyslaný vzruch dorazí dál. Lidské smysly uzpůsobené suchozemským podmínkám poté zdrojům zvuků ve vodě připisují kratší vzdálenosti. To se může vymstít například při potápění v blízkosti lodí, když potřebujeme vědět, kde se nachází.

Ještě hůře se pod vodou odhaduje směr, odkud nějaký signál přichází. Ve vzduchu jsme jej schopni rozlišovat na základě drobných rozdílů v čase a intenzitě zvuku mezi oběma ušima. Zvuk ve vodě se však šíří tak rychle, že menší odchylky nemáme šanci zaznamenat.

Světlo

I chování světla se pod vodou mění. Je to způsobeno kvůli fyzikálním jevům jako je lom, absorpce či rozptyl světla. Velkou roli hrají i vlastnosti vody, například čistota nebo vnitřní proudění.

Rychlost světla

Světlo se šíří jako vlnění.⁷ Rychlost světla ve vakuu odpovídá $c \doteq 300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Ostatními prostředím světlo prostupuje pomaleji. Světlu můžeme přiřadit tzv. *vlnovou délku*, tj. vzdálenost krajních bodů nejmenšího opakujícího se úseku vlny, na jejímž základě rozeznáváme barvy. Tuto vzdálenost světlo urazí za čas $T = 1/f$, kde f je frekvence (česky kmitočet) vyjadřující počet vln, které za 1 s projdou daným bodem. Frekvence f přímo souvisí s energií konkrétního záření, tudíž se díky zákonu zachování energie nemění. Můžeme psát

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f,$$

kde v je rychlost světla. Všimněme si, že čím pomaleji se světlo šíří, tím více se vlnová délka zkracuje.

Jak moc se světlo při vstupu do materiálu zpomalí, popisuje bezrozměrná materiálová veličina, index lomu světla:

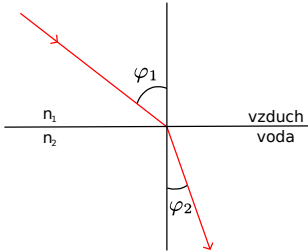
$$n = \frac{c}{v}.$$

Pro vodu je to přibližně $n_{\text{voda}} = 1,33$ a pro vzduch $n \doteq 1$.

Lom světla

Na rozhraní dvou různých prostředí dochází kvůli změně rychlosti světla k lomu. Indexy lomů světla dvou různách materiálů n_1 , n_2 dává do souvislosti s úhly φ_1 , φ_2 , které paprsek svírá s kolmicí na rozhraní materiálů před a po dopadu, Snellův zákon

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2.$$



Obrázek 1: Lom paprsku světla při přechodu mezi prostředími o různém indexu lomu

Proto se ponořené předměty zdají být větší a blíží hladiny. Pozor si musí dávat hlavně free diveři⁸, protože pozorovaná hloubka z hladiny se jeví jako menší, než jaká ve skutečnosti je.

Absorpce a rozptyl světla

Když světlo vstoupí do vody, část jeho energie pohltí molekuly vody. Různé vlnové délky světla molekuly absorbují různě ochotně – nejdříve přijmou červenou část spektra, následně postupně i barvy s kratšími vlnovými délkami. To způsobí, že ve větších hloubkách objekty osvětlené sluncem vypadají modře, ačkoli na vzduchu mají jiné barvy. To, v jakých hloubkách se nám ztratí jaká barva, je popsáno v tabulce 1.

barva	vlnová délka	hloubka
	nm	m
červená	625–800	5
oranžová	590–625	10
žlutá	565–590	30
zelená, azurová	500–565	50

Tabulka 1: Absorpce barev

Přibližně v 50 metrech se nám už ztratí všechny barvy. Když jsme tedy ve větších hloubkách, všechno je jen šedomodré. Potápěči proto často používají svítilny s bílým světlem (složeným z mnoha různých vlnových délek), aby pod vodou viděli předměty ve správných barvách.

Absorpce světla ve vodě je hlavním důvodem, proč jsou hluboké oceány a jezera modré nebo zelené. Za barvu vody také zodpovídá rozptyl světla. Ten nastává, když se paprsky odráží od částic ve vodě. Záření s kratší vlnovou délkou může zasáhnout drobnější částice, proto se v čisté vodě rozptyluje nejvíce modré světlo, což rovněž přispívá k modrému vzhledu oceánů a jezer. V zakalených vodách s většími částicemi se hojně rozptylují také ostatní barvy, a proto vynikne zelená, hnědá nebo i žlutá.

⁷Což ostatně zvuk také, jejich povaha se ale liší; první je elektromagnetické a příčné, druhé mechanické a podélné.

⁸Free diving je potápění bez dýchacího přístroje.

Plánování ponoru

Každý potápeč by si měl svůj ponor nejprve naplánovat. Co přesně to znamená? Jak jsme v předchozích odstavcích naznačili, je velmi důležité si spočítat maximální dobu, kterou můžeme pod vodou strávit. V potápěčské terminologii hovoříme o *času na dně*.

Abychom vůbec mohli určit, jak dlouho můžeme pod vodou být, musíme zjistit, jaké množství vzduchu máme k dispozici. Jak už bylo řečeno, většinou se používají lahve o objemu $V_1 = 121$ (či 201) naplněné na tlak $p_1 = 200$ bar. Nás by však zajímalo, jaký objem by měl vzduch uvnitř za normálního tlaku $p_2 = 1$ bar. Teplota v plynové lahvi se po nějaké době stabilizuje na teplotu okolního prostředí, můžeme proto využít Boyleův–Mariottův zákon

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} = 121 \cdot 200 = 24001.$$

Dále chceme znát tzv. *hladinovou spotřebu*. Ta nám říká, kolik litrů vzduchu vydýcháme za jednu minutu na hladině. Nyní se potopme do určité hloubky. Vzduch, který dýcháme, musí mít stejný tlak jako okolí, jinak bychom si mohli vážně poškodit plíce, které by se vnější a vnitřní tlak snažily vyrovnat. Dechová frekvence a vdechnutý objem přitom zůstávají stejné, protože plíce mají omezenou objemovou kapacitu. Z toho důvodu spotřebujeme ve větších hloubkách větší množství vzduchu než dle hladinové spotřeby. Teplota plynu uvnitř potápěčské lahve se během ponoru výrazně nemění. Proto z Boyleova–Mariottova zákona plyne, že když máme na hladině spotřebu například $201 \cdot \text{min}^{-1}$, v 10 m budeme mít spotřebu $401 \cdot \text{min}^{-1}$ a s každým dalším barem navíc se hodnota o $201 \cdot \text{min}^{-1}$ navýší.

Když se tedy chceme potápnout do 10 m a víme, že v lahvi máme 2400 l vzduchu, pod vodou můžeme zůstat maximálně $t = 2400/40 \text{ min} = 60 \text{ min}$.

Je dobré počítat s nějakou rezervou. Po každém ponoru by nám v lahvi měl zbýt vzduch s tlakem alespoň 50 barů. Abychom se vyvarovali dekompresní nemoci, nesmíme překonat výstupovou rychlost $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Navíc když si plánujeme ponor do větších hloubek, kde překonáme nulový čas⁹, musíme počítat s dekompresními přestávkami. V jaké hloubce a jak dlouhou musíme danou přestávku udělat, najdeme v *dekompresních tabulkách*¹⁰, ovšem jakýkoliv ponor do 18 metrů je vždy v nulovém čase.

Závěr

V tomto Výfučení jsme objasnili spoustu zajímavých jevů týkajících se nejen fyziky, ale i méně známého světa potápění. Naučili jsme se, jak se správně vyvážit, jak si naplánovat ponor a jak se ve vodě neztratit, stejně jako na co si dávat pozor během ponoru.

Alena Mouchová
alena.mouchova@vyfuk.org

Vojtěch Kubrycht
vojtech.kubrycht@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁹Nulový čas je maximální doba, kterou může potápeč strávit pod vodou bez dekompresních zastávek.

¹⁰https://images.slideplayer.cz/42/11499218/slides/slide_5.jpg