



Výfučtení: Archimedův zákon

Mnozí z vás již o Archimedově zákoně jistě slyšeli. Ostatní o něm brzy ve škole uslyší. Jedná se o poměrně důležitý princip mechaniky tekutin, který nám umožnil rozvinout lodní přepravu, zkonstruovat první vzducholod, vyvinout princip zanořování a vynořování ponorek a mnoho dalšího. Pro většinu běžné populace je ale Archimedův zákon jen prázdnou větou, kterou se ve škole naučí odříkat nazpaměť, a vlastně netuší, co ta věta znamená. Ikonickou větou, kterou ztvárnila i nejedna hudební skupina¹

„Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou, která je svou velikostí rovna tíze kapaliny tělesem vytlačené.“

nelze zapomenout. Pojďme si ji tedy rozebrat zblízka. Některé části vám možná budou na první pohled připadat až příliš podrobně vysvětlované, ale vězte, že přesné pochopení některých pojmů a vztahů může vést nejen k lepšímu pochopení Archimedova zákona, ale i dalších oblastí fyziky.

Těleso

Zde nejspíš problém nenajdeme. Těleso je pojem do jisté míry intuitivní. Jedná se o nějaký hmotný objekt. U tělesa můžeme popsat hmotnost, objem, rozměry, z čeho se skládá, skupenství...

Skupenství? Ano, těleso není jen pevné, tělesem může být i kapalina nebo plyn. Ty také mají hmotnost i objem a i pro ně platí Archimedův zákon, který rozebíráme v tomto Výfučtení.

A nemůžeme použít hmotný bod? V mechanice spoustu věcí zjednodušujeme jako hmotný bod... Ne, hmotný bod zde použít nemůžeme. Hmotný bod je model² tělesa, který nemá objem. A právě o objem nám, jak se dočtete později, u Archimedova zákona jde.

Ponořené do kapaliny

Tato část Archimedova zákona je rovněž značně intuitivní. Vezmeme těleso a umístíme ho do kapaliny. Je ovšem nutno podotknout, že těleso nemusí být ponořeno úplně, kousek může koukat nad hladinu. Rovněž nemusí těleso plovat, aby na něj působila vztlaková síla. I na kus železa hozený do vody vztlaková síla působí.

Nakonec je potřeba zmínit, že Archimedův zákon se netýká jen těles ponořených do kapalin, ale těles ponořených do *tekutin* obecně. Jaký je v tom rozdíl? Kapaliny jsou látky v kapalném skupenství, zatímco tekutiny jsou látky, které jsou tekuté, tj. kapaliny a plyny³. Vztlaková síla tedy působí i na vás ve vzduchu, jen ji necítíte, protože jste na ni zvyklí a současně není tak velká jako například ve vodě.

¹Například skupina TĚLESO https://youtu.be/7_0kSwYsL4E?feature=shared.

²Modelem rozumíme fyzikální popis něčeho, přičemž zanedbáme nepodstatné skutečnosti, aby bylo snazší s modelem pracovat.

³I plyny tečou! Na tomto videu je krásně vidět, jak páry bromu vytékají z kádinky a tečou po stole: <https://www.youtube.com/shorts/PxeGmRXp0aQ>.

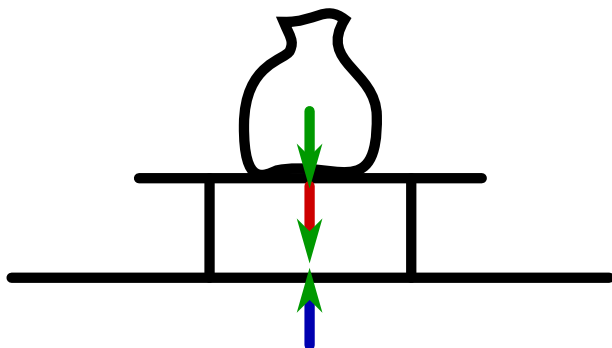
Tíha

Posledním podstatným pojmem, jehož význam mnohým není jasný, je *tíha*. Z názvu asi tušíme, že tíha nějakým způsobem závisí na tom, jak je těleso těžké. Jaký je ale rozdíl mezi tíhou, hmotností a tíhovou silou?

Hmotnost je vlastnost tělesa. Je závislá na hustotě látky, která těleso tvoří, a na objemu tělesa. Je to vlastnost tělesa, která se nemění, ať už budeme hmotnost určovat na Zemi, na Marsu nebo na Slunci. Například můžeme mít pytel brambor, který má hmotnost 50 kg.

Tíhová síla je síla, která na dané těleso působí v tíhovém poli jiného tělesa. Tím jiným tělesem může být třeba Země (nebo i Mars a Slunce). Tíhové pole Země je oblast, ve které Země gravitační silou působí na okolní tělesa.⁴ Tíhová síla je tedy síla, kterou působí Země na těleso. Na náš pytel brambor o hmotnosti 50 kg tedy působí Země tíhovou silou přibližně 500 N.

Když ale zmiňovaný pytel brambor bude stát na stole, tlačí nějakou silou (konkrétně o velikosti 500 N) i pytel brambor na stůl. To je právě *tíha*. Tíha se od tíhové síly liší tím, kdo na co působí. Tíhou působí těleso, které je taženo tíhovou silou, na těleso, na kterém leží. Ale pozor, tíha má stejný směr jako tíhová síla. Je potřeba si neplést tíhu se silou, kterou podle 3. Newtonova zákona přitahuje zmiňovaný pytel brambor Zemi.



Obrázek 1: Pytel brambor na stole: Zeleně tíhová síla, červeně tíha, modře síla, kterou podle 3. Newtonova zákona přitahuje pytel Zemi.

Pro zajímavost: ono nadlehčování vztlakovou silou, o kterém Archimedův zákon hovoří, mění právě tíhu ponořeného tělesa. Tíha je síla, kterou těleso tahá za siloměr, tedy zmenšení tíhy – nadlehčení – je důvod, proč siloměr pro pytel brambor ponořený ve vodě ukazuje méně.

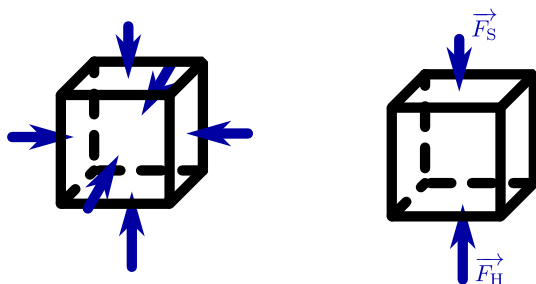
Kapalina tělesem vytlačená

Ve škole jste si nejspíše říkali, že takto označujeme kapalinu, která by vytekla z plného vědra po ponoření tělesa. Co když ale vědro nebude plné? Stále těleso nějakou kapalinu vytlačilo? Ano, vytlačilo. Ve vědru se zvedla hladina. Objem kapaliny, který vystoupal okolo tělesa, ale není kapalina tělesem vytlačená. A co teprve loď v moři? Tam se hladina viditelně nezvedá. Z těchto důvodů se můžete setkat i s formulací „kapalina v díře po tělese“. Je to kapalina, která

⁴Pro zájemce: Je rozdíl i mezi tíhovým a gravitačním polem. Tíhové uvažuje ještě odstředivou sílu způsobenou rotací Země, zatímco gravitační ne. Pro potřeby Výfučení jsou v nich ale tak malé rozdíly, že je můžeme brát jako jeden pojem.

by se vešla do díry, kdybyste ono uvažované vědro s tělesem „zamrazili“ a těleso vyndali. Po tělese zbude díra, do které se vejde právě objem „kapaliny tělesem vytlačené“.

Abychom se dozvěděli, kde se ta kapalina tělesem vytlačená bere, Archimedův zákon si odvodíme.⁵ Představte si krychli a ponořte ji celou do vody. Vaše krychle neplove, ani neleží na dně. Jistě víte, že na vrchní stěnu krychle působí tlaková síla – tíha kapaliny nad vrchní stěnou krychle. Jelikož ale kapalina nemá pevnou strukturu, její tlaková síla působí do všech směrů, tedy i na boční stěny a spodní stěnu krychle. Síly můžete vidět znázorněné na obrázku 2. Pro zvýšení přehlednosti obrázku jsme působiště síly neumístili na stěny krychle (kde se správně nachází), ale tak, aby „šipka síly“ ukazovala na stěnu, na kterou působí.



Obrázek 2: Ponořená krychle s vyznačenými tlakovými silami (vlevo) a ponořená krychle s vyznačenou tlakovou silou působící na horní a spodní podstavu (vpravo)

Tlak podél bočních stěn krychle se s hloubkou mění. Vzhledem k tomu, že je však tlak na opačných bočních stěnách krychle (např. levé a pravé) v dané výšce vždy stejný, tak je stejná i celková tlaková síla, která na opačné boční stěny působí. Síly působí z protějších stran krychle, a tak se navzájem odečtou. Zajímat nás tedy budou jen síly působící na horní a dolní podstavu. Ty snadno vyjádříme pomocí tlaku v kapalině. Krychle má délku hrany a a je ponořená v kapalině o hustotě ρ tak, že její horní podstava se nachází v hloubce h . Na horní podstavu působí síla

$$F_H = p_H S = h\rho ga^2,$$

kde p_H je tlak působící na horní podstavu a S je plocha podstavy krychle. Analogicky pro spodní podstavu, která se nachází o a níž,

$$F_S = p_S S = (h + a)\rho ga^2.$$

Tyto dvě síly působí proti sobě, tedy abychom získali výslednou (vztlakovou) sílu F_{vz} působící na těleso, musíme je odečíst

$$F_{vz} = F_S - F_H = (h + a)\rho ga^2 - h\rho ga^2,$$

$$F_{vz} = h\rho ga^2 + a\rho ga^2 - h\rho ga^2,$$

$$F_{vz} = a\rho ga^2 = \rho ga^3.$$

⁵Odvození provedeme na konkrétním tělese. Pro obecné odvození nemáme matematický aparát – integrální počet. Na ten si budete muset počkat na vysokou školu.

Vidíme, že hloubka ponoru tělesa ve výsledku nakonec vůbec není. Nezáleží tedy na tom, kde v kapalině se těleso nachází. Na čem ale vztlaková síla závisí, je *hustota kapaliny* ρ , ve které se těleso nachází, *tíhové zrychlení* g , tedy kupříkladu na Měsíci by vztlaková síla působící na to samé těleso v té samé vodě měla jinou velikost, a ono a^3 . To je právě objem ponořené části tělesa, tedy i objem kapaliny, která by se do díry po tělese vešla, jinými slovy objem *kapaliny tělesem vytlačené*. No a tu její tíhu, o které mluví slavná větička z úvodu, vypočteme právě tak, že její objem vynásobíme její hustotou a tíhovým zrychlením.

Co teď s tím?

Ze zkušenosti víme, že těleso v kapalině může plovat, vznášet se (není na hladině ani u dna), nebo se potopit. Jak to souvisí se vztlakovou silou?

Pro plovoucí těleso platí, že vztlaková síla se rovná tíhové síle, která na těleso působí. Těleso, které plove na hladině, je v klidu, tedy podle 1. Newtonova zákona je součet sil na něj působících roven nule. Aby se tíhová síla působící na těleso rovnala vztlakové, musí se tíha kapaliny, kterou těleso vytlačilo, rovnat tíze tělesa. Můžeme tedy říct, že těleso, které plove, „vytlačí tolik, kolik samo váží“.

Těleso s vyšší hustotou, než má kapalina, se potápí, klesá ke dnu, tedy se pohybuje zrychleně dolů (než narazí na dno, které ho silou drží v klidu). Aby se pohybovalo zrychleně dolů, musí výslednice sil na něj působících směřovat dolů, tedy tíhová síla působící na těleso je vyšší než vztlaková. V takovém případě těleso „vytlačí méně, než váží“, protože může vytlačit maximálně svůj objem a objem kapaliny (s nižší hustotou než hustota tělesa) stejný jako objem tělesa bude vždy vážit méně. Můžeme tedy říct, že těleso, které se potopí, „vytlačí svůj objem“.

Nakonec těleso, které se v kapalině vznáší, má stejnou hustotu jako kapalina a uvnitř kapaliny je v klidu (nikam nestoupá ani neklesá). Takové těleso vytlačí svůj objem (protože je celé ponořené) a současně vytlačí tolik, kolik samo váží.

Tyhle úvahy nám můžou pomoci rychle řešit známé úlohy například o pirátském pokladu, kdy řešíme, zda se změní hloubka ponoru lodi, když piráti z lodi vyhodí poklad, nebo vysvětlit, proč kelímek po okraj naplněný vodou s ledem zůstane i po roztání ledu stále po okraj plný. Led vytlačí, kolik váží, tedy po kilogramu ledu zbude díra na kilogram vody. A kilogram ledu se rozpustí právě na ten kilogram vody, na který je v kelímku místo ledu prostor.

Na závěr otázka na zamyšlení: může loďka, která se tak tak na šířku a délku vejde do akvária, plovat ve zmiňovaném akváriu, když v něm původně bylo na výšku méně vody, než je hloubka ponoru loďky?

Soňa Husáková

sona.husakova@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/>.