Fyzika je kolem nás (Hydrostatika a aerostatika)

Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku

Miroslava Jarešová – Ivo Volf

Obsah

Slovo úvodem

Prostředí, které nás obklopuje, je v převážné míře tvořeno tekutinami. Z fyziky už víte, že tekutiny je společný název pro kapaliny a plyny. Každý nějakým způsobem toto své okolí vnímá, ale ne každý si uvědomuje fyzikální podstatu jevů, se kterými se setkává …

Tato publikace je součástí cyklu „Fyzika je kolem nás“. Už názvu této publikace je vidět, čím se tento text bude zabývat: snažit se více vnímat své okolí z fyzikálního pohledu, a to nejen z pohledu současnosti. Nesmíme zapomínat také na minulost, která současnosti předcházela a díky níž a dalšímu vývoji jsou naše poznatky na takové úrovni, jak se je teď učíte a jak je vnímáte.

Když se řekne mechanika kapalin, většině z vás (vzhledem k tomu, že už máte za sebou několik let výuky fyziky) se vybaví hydrostatika a s ní spojený Pascalův a Archimédův zákon, hydrostatický tlak a další pojmy. Cílem této publikace je blíže se s těmito poznatky seznámit z pohledu jejich praktického využití v běžném životě a naučit se je více vnímat také po stránce fyzikální. Řekne-li se mechanika plynů, řada z vás si představí vzdušný obal Země, ale většina z vás už by asi neuměla popsat matematickou závislost tlaku tohoto vzdušného obalu na nadmořské výšce.

Jevů je samozřejmě více, než je popsáno v této publikaci. Další fyzikální poznatky se zaměřením na praktické využití je možno nalézt např. v [3], poznatky, ke kterým je už však třeba zvládnout základy vyšší matematiky, je možno nalézt např. v [1] a [2].

Přáli bychom si, aby vás práce s tímto studijním textem zaujala natolik, že sami začnete přemýšlet o dalších situacích, kde se s výše uvedenými jevy z hydrostatiky a aerostatiky můžete setkat.

Autoři

Několik slov o historii ...

V této části si něco řekneme o historii mechaniky kapalin, protože poznání historických souvislostí také ovlivňuje náš pohled na současnost. Vznik mechaniky kapalin má své kořeny v dávné době. Zkusme se na chvíli do této doby vrátit a postupně přejít až do současnosti.

Již od pradávna lidé usilovali o vysvětlení různých fyzikálních jevů a vlastností látek. K tomu se pokoušeli vytvářet jednoduché modely umožňující určitým způsobem tyto jevy vysvětlit. Nejstarší představy o složení látek pocházejí ze starověku, z období starověkého Řecka a Říma. Řecká filozofie vyrůstala v těsném spojení s přírodními vědami, výsledky hledání původu světa se snažili objasnit rozumem. Řekové se snažili nalézt pralátku (*arché*), z níž vznikl svět, a zákony jejího uspořádání. Tímto problémem se zabývala především trojice řeckých filozofů *Thalés*, *Anaximandros* a *Anaximenés*. Podle nejstaršího filozofa z této trojice – Thaléta, pochází veškerý hmotný svět z jediné pralátky – vody. Z vody všechno vzniklo a ve vodu se vše mění. Druhý z trojice výše uvedených filozofů Anaximandros považoval za základní pralátku něco neomezeného, věčného, neurčitého – tzv. *apeiron* (z řečtiny neomezeno, nekonečno). Z této pralátky vše pochází a vše do ní spěje. Od počátku jsou v ní obsaženy všechny čtyři živly (skupenství): voda (kapalina), Země (pevná látka), vzduch (plyn), oheň (plazma). Věci nevznikají proměnou těchto živlů, ale jako proces, při kterém se ze své původní jednoty v apeiru vylučují protiklady chladno a teplo, vlhko a sucho. Třetí z trojice filozofů Anaximenés byl Anaximandrovým žákem. Považoval za základní pralátku smyslově vnímatelný živel (podobně jako Thalés), v tomto případě to však nebyla voda, ale vzduch. Celý svět pak Anaximenés vykládá jako pohyb vzduchu způsobený zhušťováním a zřeďováním (oteplování). Vzduch se projevuje chladem a teplem, vlhkem a pohybem. Toto byly první názory na látky ve starověku.

Další představy vytvářeli filozové – atomisté. Atomisté vysvětlovali vlastnosti těles a některé jevy tvarem, uspořádáním a pohybem jednoduchých a dále nedělitelných částeček (z řečtiny *atomos* = nedělitelný). Mezi atomisty v Řecku patřili *Leukippos*, *Démokritos* a *Epikúros*. V Římě pak zastával názory atomistů *Lucretius*.

Ve starověku však s názory atomistů polemizoval např. *Aristoteles* (4. stol. př. n. l.), podle něhož byla Země složena ze čtyř prvků, které v soustředných kulových vrstvách obalují jeden druhý: oheň (teplosuchý), vzduch (teplotekutý), voda (studenotekutá), země (studenosuchá). Dá se říci, že tyto živly jsou vlastně jedním z prvních pokusů zavést elementární částice ve fyzice.

Kromě částicového pohledu na látky se však zároveň rozvíjel pohled na látky z hlediska jejich užití pro technické aplikace. Mezi jedny z prvních, kdo položili základy oboru mechaniky tekutin (3. stol. př. n. l.), patřil *Archimédes* *ze Syrakus*, *Stratón z Lampsaku*, *Ktébisios z Alexandrie*, *Filón z Byzancie* a *Hérón Alexandrijský*.

Se jménem Archiméda ze Syrakus si všichni vybavíme především Archimédův zákon. *Stratón z Lampsaku* pravděpodobně jako jeden z prvních jako metodu vědecké práce považoval experiment. *Ktébisois z Alexandrie* byl pak známý jako konstruktér strojů a zařízení využívajících vzduch a vodu. Vynalezl mj. také tlakovou vzduchovou pumpu (vodní dělo), požární stříkačku a vylepšil vodní hodiny (tzv. *klepsydru*).[1] O vysoké úrovni hydrostatiky a hydromechaniky v té době svědčí také další poznatky. Ktébisiův žák *Filón z Byzance* popsal podrobně vodní čerpadla, studny propojené navzájem (spojené nádoby), ale i vodní kolo. Výčet slavných jmen z této doby uzavřeme známým jménem *Herón z Alexandrie*, z jehož technických vynálezů té doby spojených s mechanikou tekutin je známá především *Héronova baňka* a *Héronova fontána*.

Další osobnost, jejíž jméno lze také spojit s mechanikou tekutin, je římský architekt *Vitruvius* (1. stol.př.n.l.), který se v této oblasti zabýval hledáním vodních pramenů v souvislosti s dešťovými srážkami. Ve svém díle *Deset knih o architektuře* popsal také princip různých strojů a zařízení využívajících vodu (např. čerpací vodní kola šlapací, vodní mlýn, vodní šnek, Ktébisiova pumpa na tlak ...).

Shrneme-li vše, co bylo doposud uvedeno, lze konstatovat, že poznání v antice lze shrnout do dvou cest:

- formulace obecných principů, z nichž se s logickou důsledností vyvozovala přirozená zákonitost jevů (Aristoteles),

- jednoduché teze, nevyžadující důkazy (Archimédes).

Obecně říci, že antičtí filozofové se pokoušeli přírodní jevy nejen vysvětlit, ale najít také mezi nimi zákonité souvislosti. Když však Řekové přírodní jevy zkoumali, nesnažili se je napodobit – neprováděli experimenty. Ty začala provádět až novověká fyzika.

Další rozvoj hydrauliky a hydrostatiky byl zaznamenán až v 15. století, a to díky projektům *Leonarda da Vinciho*. Jednalo se o projekty melioračních prací, vodních kanálů, zesplavnění říčních toků. Jako první přepažoval říční toky dvoudílnými vraty. Leonardo da Vinci znal princip spojených nádob pro kapaliny různých hustot a zákon hydrostatiky, který byl později pojmenován na počest svého spoluobjevitele jako *Pascalův zákon*.

Dílo Leonarda da Vinciho ovlivnilo řadu dalších učenců, např. *Giovanni Battista Benedetti* (1530 – 1590) odvodil tzv. *hydrostatický paradox*, tj., že u dané kapaliny velikost tlakové síly na dno nezávisí na hmotnosti kapaliny.

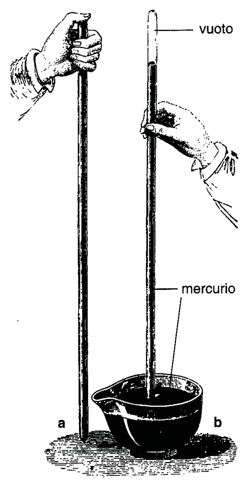
[1] Např. první zmínky o klepsydře se objevují už roku 522 př.n.l..

V 16. století rozvoj dále pokračoval. *Galileo Galilei* (1564 – 1642) popsal v díle *La Bilancetta* přesné hydrostatické váhy umožňující vážením pevných látek ve vzduchu a ve vodě jednoduše stanovit podíl jednotlivých složek (např. zlato – stříbro) ve slitinách kovů.[2]

Další vývoj byl ovlivněn především objevem atmosférického tlaku. Bezprostřední příčinou objevu bylo přání toskánského vévody mít ve svých terasovitých zahradách ve Florencii nasávací pumpy – začal se řešit problém, proč se vodu podařilo zvednout pístem pokaždé jen do výšky, která nepřekročila 10 metrů.

Podívejme se ještě na chvíli zpět. Již Aristoteles vysvětloval vystupování vody v pumpách a násoskách tím, že prázdný prostor, který vzniká pod pístem, ihned naplní voda – prázdno v přírodě není možné, protože hmota je podle Aristotela spojitá. Aristotelovo tvrzení, že příroda má strach ze vzduchoprázdna (*horror vacui*), přetrvávalo poměrně dlouhou dobu a hodilo se i církvi – vodu do pumpy tlačí božská síla.

Galileo Galilei tento poznatek korigoval tak, že tvrdil, že příroda sice prázdný prostor nemá, ale jen do určité míry, jelikož „strach z prázdnoty má omezenou velikost“. Na hodnotu této míry přišel v roce 1643 Galileův nástupce *Evangelista Torricelli* (1608 – 1647). Svou představu, že k vytvoření prázdného prostoru vede tlak vzduchu, potvrdil svým známým pokusem se rtuťovým sloupcem ve skleněné trubici. Tuto ideu pokusu sice vymyslel Torricelli, ale vlastní pokus provedl Galileův žák *Vincenzo Viviani* (1622 – 1703).

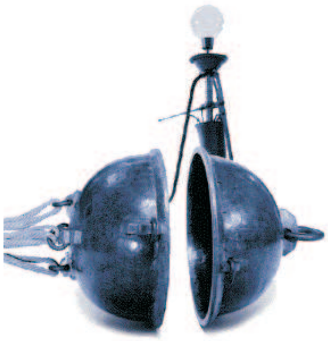


Obr. 1
Pokus z roku 1643 – 1644

Tímto pokusem byla dokázána jednak existence vakua, ale i skutečnost, že atmosféra působí na všechny předměty podobně jako kapalina. Asi v polovině 17. století se o atmosferický tlak začal zajímat také *Otto von Guericke* (1602 – 1686). Ten zopakoval Torricelliho pokus se sloupcem vody a svými pokusy ukázal vliv sloupce počasí na sloupec vody (tím byly položeny základy předpovídání počasí). Ovšem nejznámější jsou jeho pokusy s vývěvou a s tzv. *magdeburskými polokoulemi*, jak bude ještě dále v textu podrobněji popsáno.

[2]Z této skutečnosti lze soudit, že Galileo Galilei také studoval poznatky ze starověku – zřejmě znal historii o královské koruně krále *Hierona*, což vedlo objevení Archimédova zákona, o čemž se ještě zmíníme, až se budeme zabývat Archimédovým zákonem.

Na Torricelliho pokusy navázal *Blaise Pascal* (1623 – 1662), který ověřil platnost Torricelliho závěrů pro různé kapaliny a zobecňoval Torricelliho závěry o existenci vakua. Pascal také konal další pokusy se rtuťovým sloupcem; při těchto pokusech zjistil, že výška rtuťového sloupce v trubici klesá se stoupající nadmořskou výškou, čímž byl položen základ pro měření nadmořských výšek pomocí barometru. Dále také zformuloval zákon o přenášení tlaku v kapalinách dnes známý jako *Pascalův zákon*. Řešení problémů spojených s atmosférickým tlakem bylo v té době velmi aktuální.



Obr. 2
Magdeburské polokoule

Měřením atmosférického tlaku se také zabývala celá řada dalších fyziků, např. *Edmond Halley* (1656 – 1742) odvodil vztah mezi rozdíly nadmořských výšek a atmosférických tlaků naměřených na dvou místech zemského povrchu, dále např. také *Daniel Gabriel Fahrenheit* (1686 – 1736) si vyráběl vlastní výškoměry a barometry. Zajímavé jsou i tzv. *Goethovy barometry* (obr. 3) z 19. století (které se prodávají po určitých úpravách dodnes (obr. 4), více informací je možno nalézt na http://meteostanice.e-pocasi.cz) – hladina vody ve výlevkovité části skleněné nádoby při vysokém atmosférickém tlaku klesá, při nízkém naopak stoupá (z těchto stránek je také obr. 4).

Obr. 3
Goethův barometr

Na závěr této části jen pro zajímavost: měření barometrického tlaku prováděl také *Emilij Christianovič Lenz* (1804 – 1865) na filipínském ostrově Luzón a změřil výšky několika hor.

Obr. 4
Goethův barometr – dnes

Poznatky o závislosti atmosferického tlaku a výšky se později začaly využívat ve fyzikálním zeměpisu při tvorbě map. Na základě změn tlaku v určitých místech země se začala vyvíjet meteorologie – možnost předpovídat počasí na základě změn tlaků. Tento vývoj pokračuje dodnes, zdokonaluje se technika, ale fyzikální principy, na jejichž základě všechno funguje, se nemění – pouze bylo třeba je objevit a zformulovat – a pak samozřejmě to všechno umět využít. A o to se budeme snažit i v tomto textu – vidět využití fyzikálních jevů kolem nás v běžném životě.

Poznámka

1. Pokud byste se chtěli podívat i na další obrázky týkající se historických pokusů o vakuu, je možno je nalézt např. na stránkách *Museum of vakuum* <*http://www.vacuum-guide.com*>, odkud jsou i obr. 1, 2.

2. Na stránkách <*http://commons.wikimedia.org/wiki/*
Category : *Measuring_instruments_%28pressure%29* >, odkud je i obr. 3, je možno nalézt i další Goethovy barometry a stojí za to se podívat, jak vypadala i další historická měřidla na měření tlaku.

1 Tlak v kapalinách

Tlak p patří mezi jednu z velmi důležitých veličin v hydromechanice. Obecně vyjadřuje plošný účinek síly $\boldsymbol{F}$ a je určen silou, působící kolmo na jednotku plochy S, tj.

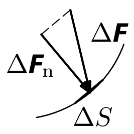
$$p = \frac{F}{S}.$$

Toto je vztah obecně používaný v případě, že síla $\boldsymbol{F}$ působí na rovinnou plochu.

Při zjišťování tlaku v nějakém místě kapaliny, kdy už plocha nebude rovinná – např. stěna lopatky vodní turbíny, je tlak definován pomocí vztahu

$$p = \frac{|\Delta \boldsymbol{F}_\mathrm{n}|}{\Delta S},$$

kde $\Delta \boldsymbol{F}_\mathrm{n}$ je normálová složka působící síly $\Delta \boldsymbol{F}$, tj. složka kolmá na plochu (obr. 5).



Obr. 5 Tlak na křivé ploše

Jednotka tlaku je $\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-2} = \mathrm{Pa}$. Vzhledem k tomu, že pascal je malá jednotka, používají se častěji násobky této jednotky kPa, MPa.

V minulosti se používaly ještě jiné jednotky tlaku, se kterými je možno se ještě dnes setkat u některých starších měřidel nebo ve starší literatuře, a to:

technická atmosféra	1 at = 98,0665 kPa = 1 kp · m^{-2},
torr	1 torr = 133,322 Pa,
bar	1 bar = $1 \cdot 10^5$ Pa.

Technická atmosféra je tlak vodního sloupce vysokého 10 m při teplotě 4 °C, 1 torr je tlak rovný hydrostatickému tlaku 1 mm rtuťového sloupce.

Tlak v kapalině (tekutině) může být vyvolán

- vnější silou, působící na povrchu kapaliny (tekutiny) z vnějšku,
- vlastní tíhou kapaliny (tekutiny).

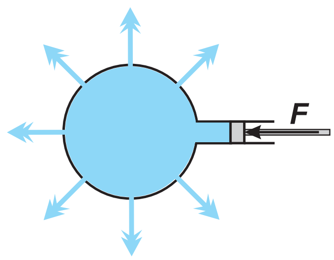
1.1 Tlak v kapalině vyvolaný vnější silou

Tento tlak se na povrchu kapaliny přenáší jako účinek vnějších sil působících na kapalinu zvnějšku. Tento tzv. *vnější tlak* může být způsoben:

- vnější silou působící na píst v uzavřeném prostoru - např. ve válci; plocha pístu je ve styku s hladinou kapaliny,
- tlakem kapaliny, např. stlačeným plynem působícím na hladinu kapaliny v uzavřené nádobě,
- tlakem vzdušného obalu Země, tzv. *atmosférickým tlakem*, působícím na hladinu otevřené nádoby.

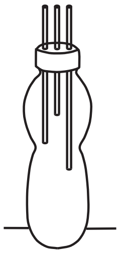
Neuvažujeme-li působení tíhového pole Země, platí pro tento tlak tzv. *Pascalův zákon*: *Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalné těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.*

Pascalův zákon je možno ověřit jednoduchým pokusem: vezmeme kulovou nádobu s otvory na povrchu uzavřenou válcem a pístem (obr. 6). Pokud naplníme nádobu vodou a budeme na píst působit silou o velikosti F, bude voda vystřikovat kolmo ke stěnám nádoby stejně prudce všemi otvory.



Obr. 6 Model vodního ježka

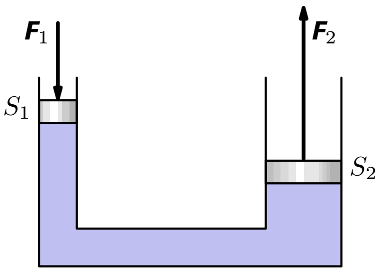
Pokud bychom neměli tuto pomůcku k dispozici, můžeme experimentálně ověřit platnost Pascalova zákona pomocí následující pomůcky. Stačí nám k tomu plastová láhev (pokud možno se širším hrdlem) a tři trubičky (skleněné popř. i brčka) různé délky. Do víčka láhve navrtáme tři otvory a prostrčíme jimi trubičky tak, aby vně láhve měly trubičky stejnou délku (a uvnitř různou). Trubičky utěsníme např. pomocí plastelíny nebo nějakého vhodného tmelu. Potom láhev zcela zaplníme vodou a uzavřeme tak, aby se voda dostala také částečně do trubiček. Pokud láhev nyní stlačíme, vystoupí voda ve všech trubičkách do stejné výšky, i když jsou spodní konce trubiček v různé výšce (obr. 7).



Obr. 7 Experimentální ověření platnosti Pascalova zákona

Důsledkem Pascalova zákona je vznik situace, že pokud se v nějakém libovolném místě v uzavřené nádobě mění tlak, má to za následek změnu tlaku v celé uzavřené nádobě.[3] Tohoto důsledku se s výhodou využívá u celé řady hydraulických zařízení, jako je hydraulický zvedák (obr. 8, 9), hydraulický lis, hydraulické brzdy v automobilech atd., kde můžeme psát

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}.$$



Obr. 8 Schéma hydraulického zvedáku

Obr. 9 Model hydraulického zvedáku

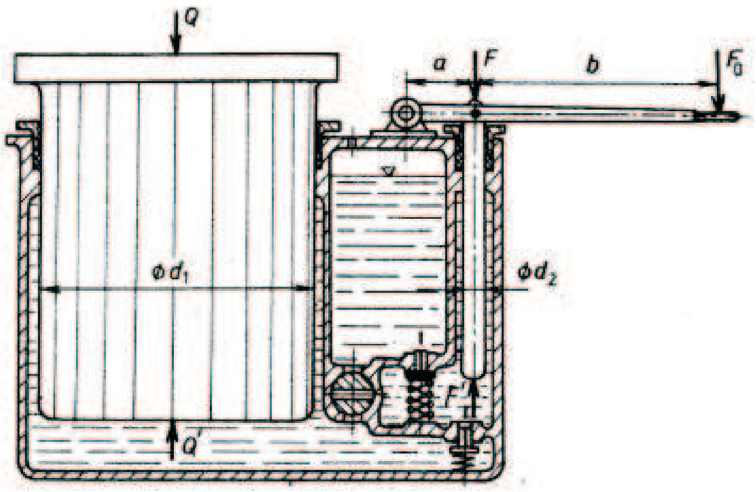
Výsledný účinek kapaliny na stykovou plochu se nazývá *tlaková síla* (působí kolmo na styčnou plochu kapaliny a stěny). V kapalinách není závislá na směru, závisí pouze na velikosti tlaku kapaliny a velikosti styčné plochy. Velikost tlakové síly působící na rovinnou plochu při stálém tlaku určíme užitím vztahu

$$F = p \cdot S.$$

[3]Připomeňme si, že Pascalův zákon platí i pro plyny, tj. stlačitelné tekutiny.

Příklad 1 – hydraulický zvedák

Pomocí hydraulického zvedáku je možno zvedat břemena značných hmotností. Uvažujme, že máme břemeno Q o hmotnosti 500 kg a chtěli bychom ho zvednout pomocí hydraulického zvedáku (obr. 10)[4].



Obr. 10 Hydraulický zvedák

Hydraulický zvedák má průměr velkého pístu 100 mm, průměr malého pístu 10 mm; páka má ramena $a = 30$ mm, $b = 270$ mm; kapalina přenášející tlak je tvořena olejem, tíhové zrychlení $g = 9{,}81\ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$. Určete

a) tlak přenášený olejem v kPa,

b) hydraulický převodový poměr $i_\mathrm{H} = \dfrac{Q}{F}$ (obr. 10),

c) velikost síly, kterou musíme působit na malý píst,

d) pákový převodový poměr $i_\mathrm{P} = \dfrac{F}{F_0}$,

e) celkový převodový poměr $i = \dfrac{Q}{F_0}$,

f) sílu, kterou musíme působit na páce.

[4]Obr. 10 je převzat ze [4].

Řešení

a) Na základě vztahu pro výpočet tlaku platí

$$p = \frac{Q}{S_1} = \frac{mg}{\frac{\pi d_1^2}{4}} = \frac{4mg}{\pi d_1^2} = 625 \text{ kPa}.$$

b) Hydraulický převodový poměr je

$$i_\mathrm{H} = \frac{Q}{F} = \frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 100.$$

c) Velikost síly F, kterou musíme působit na malý píst je dána vztahem

$$F = \frac{Q}{i_\mathrm{H}} = \frac{mg}{i_\mathrm{H}} = 49 \text{ N}.$$

d) Z rovnováhy momentů sil na páce můžeme psát

$$F \cdot a = F_0(a + b),$$

z čehož

$$i_\mathrm{P} = \frac{F}{F_0} = \frac{a+b}{a} = 10.$$

e) Celkový převodový poměr je $i = i_\mathrm{H} \cdot i_\mathrm{P} = 1000$.

f) Velikost síly F_0, kterou je třeba působit na páce, je dána vztahem

$$F_0 = \frac{Q}{i} = \frac{mg}{i} = 4{,}9 \text{ N}.$$

Cvičení 1

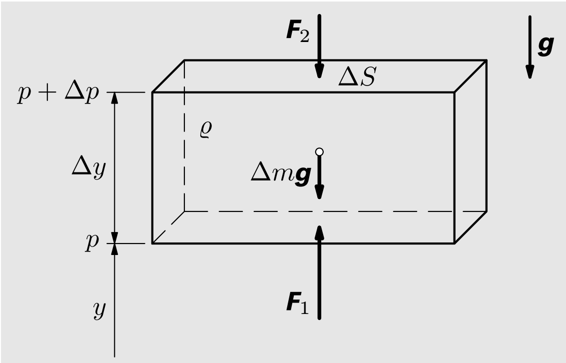
1. V hydraulickém zařízení křesla u zubního lékaře je píst o průměru 10 cm. Křeslo s pacientem má hmotnost 100 kg. Jak velkou silou je třeba působit na píst o průměru 2 cm, abychom uvedli křeslo s pacientem do pohybu?

2. Pomocí hydraulického zařízení byl zvedán náklad o hmotnosti 1 tuna, přičemž byla vykonána práce 20 J. Malý píst se při tom posunul o 10 cm vzhůru při každém zdvihu a vykonal celkem 5 zdvihů. Určete a) velikost síly, která působí na malý píst, b) o kolik cm se posunul celý náklad, c) hydraulický převodový poměr $i_\mathrm{H} = \dfrac{S_2}{S_1}$.

1.2 Tlak v kapalině způsobený vlastní tíhou kapaliny

Bude-li se kapalné těleso nacházet v tíhovém poli, projeví se to vznikem tlaku v kapalině. My se v tomto případě budeme zabývat situací, že kapalné těleso se bude nacházet v homogenním tíhovém poli Země. Takto vzniklý tlak budeme nazývat *hydrostatický tlak*.

Abychom zjistili účinek pole na kapalné těleso, vyjmeme z tělesa element tvaru kvádru o hmotnosti $\Delta m = \varrho \Delta V = \varrho \Delta S \Delta y$ (obr. 11).



Obr. 11 Působení silového pole na element

Budeme vyšetřovat vliv pole na tento element.[5] Toto pole působí na element silou $\Delta m\boldsymbol{g}$. Vzhledem k tomu, že toto pole vyvolává v kapalině tlak (jehož velikost budeme měřit ve směru y), bude na dolní podstavu kvádru o poloze y působit tlaková síla o velikosti $F_1 = p\Delta S$ a na horní postavu kvádru o poloze $y + \Delta y$ tlaková síla o velikosti $F_2 = (p + \Delta p)S$. Na boční stěny kvádru budou také kolmo na boční stěny působit tlakové síly, dvojice těchto sil, majících působiště na protilehlých stěnách, se vždy navzájem vyruší. Podmínka statické rovnováhy elementu ve směru působícího pole (tj. ve směru $\boldsymbol{g}$) má proto tvar

$$\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \Delta m\boldsymbol{g} = \boldsymbol{0}, \quad \text{čili} \quad F_1 - F_2 - \Delta mg = 0.$$

Po dosazení

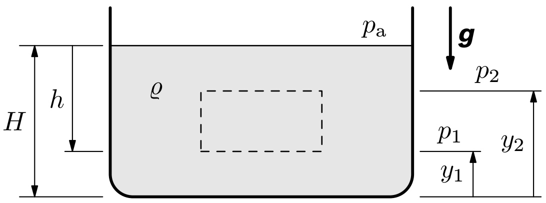
$$p\Delta S - (p + \Delta p)\Delta S - \varrho \Delta S \Delta y g = 0.$$

Po úpravě dostáváme rovnici pro elementární změnu tlaku nestlačitelné kapaliny v silovém poli

$$\Delta p = -\varrho g \Delta y. \tag{1}$$

[5] V našich úvahách budeme považovat Δy za natolik malé, že $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{konst}$.

Nyní ukážeme, jak z této obecnější rovnice (1) vyplývá nám dobře známá rovnice hydrostatického tlaku $p_\mathrm{h} = h\varrho g$. Budeme uvažovat kapalné těleso v nádobě podle obr. 12.



Obr. 12 K odvození rovnice pro hydrostatický tlak

Jedná o homogenní pole, $\Delta y = y_2 - y_1$, pak podle rovnice (1) můžeme psát

$$p_2 - p_1 = -\varrho g(y_2 - y_1).$$

Položme nyní $y_2 = H$, $p_2 = p_\mathrm{a}$, $y_1 = y$, $p_1 = p$. Potom

$$p_\mathrm{a} - p = -\varrho g(H - y).$$

Protože tlak v kapalině je skalární veličina, nemá směr. Celkový tlak pod volnou hladinou (hladina o nulovém hydrostatickém tlaku) v hloubce $h = H - y$ tedy bude roven

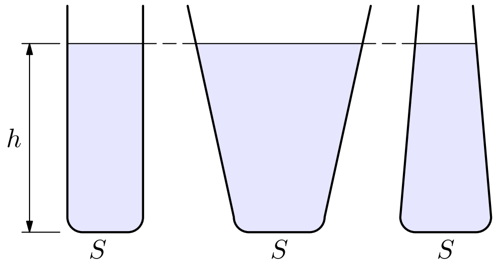
$$p = p_\mathrm{a} + h\varrho g = p_\mathrm{a} + p_\mathrm{h},$$

kde $p_\mathrm{h} = h\varrho g$ je nám již dobře známý vztah pro hydrostatický tlak. Důležité je také si uvědomit skutečnost, že hladina kapaliny v nádobě, která je vůči Zemi v relativním klidu, je rovinná. Pokud bychom však uvažovali „rozlehlejší nádoby“, jako jsou např. moře nebo oceány, mají hladiny přibližně kulový tvar se středem ve středu Země.[6]

Hydrostatický tlak je stejně velký ve všech místech, která se nacházejí ve stejné hloubce pod hladinou. Nezávisí na množství kapaliny nad tímto místem, závisí pouze jen na hloubce h pod hladinou kapaliny. Protože tlak je skalární veličina, nemá směr.

Hydrostatická tlaková síla $\boldsymbol{F}_\mathrm{h}$, která působí na element plochy ΔS pod hladinou, má směr kolmý k tomuto elementu plochy. Důležité je také si uvědomit, že velikosti tlakových sil, kterými působí stejná kapalina na dna nádob o stejném plošném obsahu, ale odlišném tvaru stěn (a tedy také o různém objemu), jsou stejné. Tento jev se nazývá hydrostatické paradoxon (obr. 13).

[6] Tuto skutečnost zřejmě věděl již i Archimédes, který na základě toho usuzoval, že Země má kulový tvar.



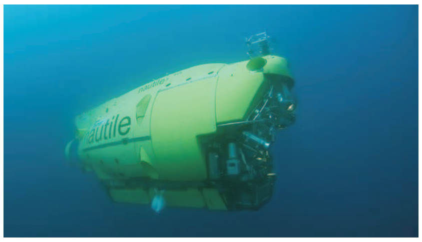
Obr. 13 Hydrostatické paradoxon

Poznámka

Nejhlubším místě na světě je tzv. *Mariánský příkop*, který se nachází v Tichém oceánu. V Mariánském příkopu se nachází rozsedlina *Challenger Deep*, jejíž hloubka je 11 034 m.

V červnu 2009 se robotická ponorka *Nereus* (obr. 14 – z [15]) ponořila v západním Tichém oceánu, aby prozkoumala oblast Mariánského příkopu. Ponorka sestoupila až do nejhlubší rozsedliny příkopu a strávila tam více než 10 hodin. Pouze další dvě zařízení dosud dosáhla dna v oblasti Challenger Deep. První byl americký batyskaf *Trieste* (s nímž na dno sestoupili lidé - americký poručík *Don Walsh* a švýcarský oceánolog *Jacques Piccard*) v roce 1960 a druhý byl japonský robot *Kaiko*, který provedl tři sestupy do příkopu bez člověka mezi lety 1995 až 1998. Trieste ukončil provoz v roce 1966 a Kaiko se ztratil v moři v roce 2003.

Obr. 14 Ponorka Nereus



Obr. 15 Ponorka Nautilus

Příklad 2 – miniponorka Nautilus

Při hledání černé skříňky zříceného Airbusu A330 byla použita francouzská speciální miniponorka Nautilus (obr. 15 - z [20]), která se může potopit až do hloubky 6 km. Odhadněte hodnotu hydrostatického tlaku, kterému ponorka ještě dokáže odolat. Hustota mořské vody je $1\,030\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

Řešení

Použijeme základní vztah pro výpočet hydrostatického tlaku

$$p_{\mathrm{h}} = h\varrho g = 6\,000 \cdot 1\,030 \cdot 9{,}81 \text{ Pa} = 60{,}6 \text{ MPa}.$$

Cvičení 2

3. Při sběru mořských hub bez dýchacích přístrojů se potápěč potopí až do hloubky 15 metrů, záchranné ponorky se pohybují obvykle v hloubce asi 2 000 metrů. Ještě hlouběji se ponořila slavná francouzská ponorka Nautilus, a to do hloubky 3 780 metrů k lodi Titanic, která se potopila v Atlantském oceánu. Rekord v potápění však drží od roku 1960 batyskaf Trieste, který se potopil do hloubky 10 912 metrů v Mariánském příkopu. Sestup do Mariánského příkopu se podařil také robotické ponorce Nereus v červnu 2009, a to do hloubky 10 902 metrů. Odhadněte hodnoty hydrostatických tlaků pro dané situace a porovnejte je s atmosférickým tlakem. Hustota mořské vody je 1 030 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

4. Malý potápěč, který ještě nezná fyzikální zákony, uvažuje, že když se bez problémů potápí se sací trubicí (tzv. *šnorchlem*) o délce 20 centimetrů, neměl by být problém zvládnout totéž s trubicí, kterou si sám prodlouží. Neuvědomuje si však, že potápění tímto způsobem by se mohlo stát velmi nebezpečným. Jaké nebezpečí tomuto potápěči hrozí?

Obr. 16 Potápěč

1.3 Tlaková síla působící na svislou stěnu obdélníkového tvaru

V praktickém životě se často můžeme setkat se situacemi, kdy potřebujeme určit velikost a polohu působiště hydrostatické tlakové síly působící na svislou stěnu. Může se jednat např. o akvárium, přehradní hráz a různé výpustě přehradních nádrží a rybníků.

V této části si ukážeme postup, jak je možno vypočítat velikost a polohu působiště hydrostatické tlakové síly působící na svislou stěnu. V našich úvahách budeme uvažovat stěnu o délce b a výšce c (obr. 17).

Velikost tlakové síly F_{hS} na svislou stěnu (šipky na obr. 17 naznačují nárůst hydrostatického tlaku) určíme užitím vztahu

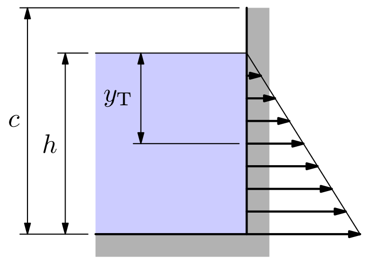
$$F_{\mathrm{hS}} = S \cdot p_{\mathrm{hT}},$$

kde $S = b \cdot h$ je obsah plochy ponořené části stěny, p_{hT} je hydrostatický tlak v těžišti ponořené plochy, tj.

$$p_{\mathrm{hT}} = y_{\mathrm{T}} \varrho g = \frac{h}{2} \varrho g.$$

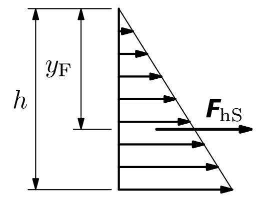
Po dosazení

$$F_{\mathrm{hS}} = \frac{1}{2} g \varrho b h^2.$$



Obr. 17 K výpočtu velikosti tlakové síly na svislou stěnu

Při určování polohy výslednice tlakových sil na svislou obdélníkovou stěnu budeme dále postupovat tak, že nejprve nakreslíme tzv. *zatěžovací plochu* (obr. 18). Poloha výslednice pak leží v těžišti této zatěžovací plochy, tj. $y_{\mathrm{F}} = \frac{2}{3} h$.



Obr. 18 K výpočtu polohy výslednice tlakových sil na svislou stěnu

Poznámka

K tomuto výsledku by také bylo možno dospět užitím vyšší matematiky, což by bylo nad rámec tohoto textu.

Příklad 3 – výpusť

V roce 1584 začal Jakub Krčín z Jelčan s výstavbou rybníka Rožmberk. Od té doby prošel rybník několika přestavbami a v současné době má rybník 2 355 metrů dlouhou hráz, kterou budeme v našich úvahách považovat za téměř svislou stěnu, kterou nechal v roce 1662 kníže Schwarzenberg zpevnit a obložit kamenem. Průměrná hloubka vody u hráze je 6,2 metru. Aby bylo možno rybník vypouštět, byly ve spodní části hráze vybudovány dvě výpustě, které jsou zakryty litinovými víky obdélníkového tvaru o šířce 1,6 m a výšce 2,2 m. V úloze budeme uvažovat, že spodní hrana víka je v hloubce 14 metrů pod vodní hladinou. Pod hlavní výpustí byla v roce 1922 uvedena do provozu malá vodní elektrárna. Celá hráz je navíc ještě zpevněna kořeny stromů.

Obr. 19 Hráz rybníka Rožmberk

Určete a) velikost tlakové síly, kterou působí voda na přehradní hráz, b) velikost a polohu působiště tlakové síly, kterou působí voda na výpusť.

Řešení

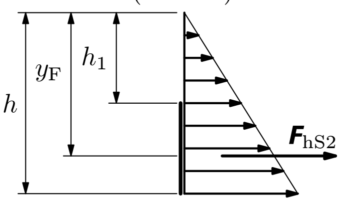
a) Velikost tlakové síly, kterou působí voda na přehradní hráz je dána vztahem

$$F_{\mathrm{hS1}} = S \cdot p_{\mathrm{hT1}} = 6{,}2 \cdot 2\,355 \cdot \frac{1}{2} \cdot 6{,}2 \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81\ \mathrm{N} = 444\ \mathrm{MN}.$$

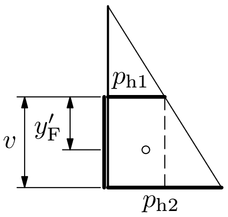
b) Velikost hydrostatické tlakové síly na víko určíme pomocí vztahu

$$F_{\mathrm{hS2}} = S \cdot p_{\mathrm{hT2}} = 1{,}6 \cdot 2{,}2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (14 + 11{,}8) \cdot 1\,000 \cdot 9{,}81\ \mathrm{N} = 445\ \mathrm{kN}.$$

K určení polohy působiště této síly si nejprve zakreslíme zatěžovací obrazec (obr. 20), dále pak ještě je nutno odvodit vzorec pro výpočet polohy těžiště lichoběžníka (obr. 21).



Obr. 20 K výpočtu polohy výslednice tlakových sil



Obr. 21 Lichoběžník

Lichoběžník si můžeme představit, že je složen z obdélníku o stranách p_{h1}, v a pravoúhlého trojúhelníku o odvěsnách $(p_{\mathrm{h2}} - p_{\mathrm{h1}})$ a v. Pro výpočet polohy těžiště y'_{F} tohoto lichoběžníku platí

$$p_{\mathrm{h1}} v \cdot \frac{v}{2} + \frac{1}{2}(p_{\mathrm{h2}} - p_{\mathrm{h1}}) v \cdot \frac{2}{3} v = \frac{1}{2}(p_{\mathrm{h2}} + p_{\mathrm{h1}}) v \cdot y'_{\mathrm{F}}.$$

Po dosazení za $p_{\mathrm{h1}} = h_1 \varrho g$, $p_{\mathrm{h2}} = (h_1 + v)\varrho g$ a úpravě dostaneme

$$y'_{\mathrm{F}} = \frac{\left(h_1 + \frac{2}{3} v\right) v}{2h_1 + v}.$$

Pro polohu těžiště, a tím i polohu výslednice tlakových sil na výpusť, od vodní hladiny pak platí

$$y_{\mathrm{F}} = h_1 + y'_{\mathrm{F}} = h_1 + \frac{\left(h_1 + \frac{2}{3}v\right) v}{2h_1 + v}.$$

Pro dané hodnoty

$$y_{\mathrm{F}} = 11{,}8 \text{ m} + \frac{\left(11{,}8 + \frac{2}{3} \cdot 2{,}2\right) \cdot 2{,}2}{2 \cdot 11{,}8 + 2{,}2} \text{ m} = 12{,}9 \text{ m}.$$

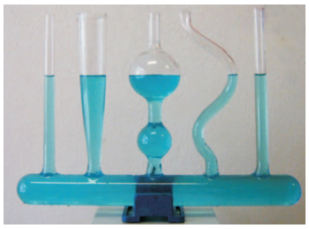
Cvičení 3

5. Tomáš má akvárium tvaru kvádru o rozměrech dna $a = 30$ cm, $b = 70$ cm a výšce $c = 60$ cm. Akvárium je naplněno vodou do výšky $h = \frac{3}{4}c$. Určete velikosti a působiště hydrostatických tlakových sil působících na stěny akvária.

6. Ve stěně svislé přehradní hráze je otvor (výpusť), který je uzavřený obdélníkovou deskou o šířce $b = 1{,}5$ m a výšce $v = 3$ m, jejíž horní hrana je v hloubce $h_1 = 20$ m pod hladinou vody. Určete velikost hydrostatické tlakové síly působící na desku a vzdálenost působiště této síly od vodní hladiny.

1.4 Spojené nádoby

Každý z vás se už určitě ve svém životě setkal se spojenými nádobami, s jednou z nich dokonce už i v tomto textu, a to s hydraulickým zvedákem. Připomeňme si i další situace, kdy je možno se setkat se spojenými nádobami. Může to být konvice na zalévání, hadicová vodováha používaná především ve stavebnictví, sifony umyvadel a WC, zdymadla, napáječky pro drůbež, různé měřiče tlaku v nádobách a v neposlední řadě již v historickém úvodu zmiňovaný Goethův atmosférický barometr (obr. 3, 4).

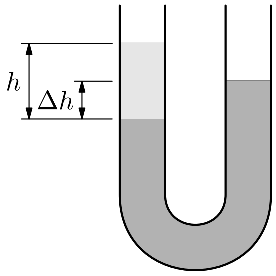


Obr. 22 Spojené nádoby

V této kapitole se zaměříme především na základní fyzikální principy týkající se spojených nádob.

Příklad 4 – měření hustoty kapaliny

Skleněná trubice o vnitřním průměru 1 cm byla ohnuta do tvaru písmene „U“. Pak byla upevněna do stojanu tak, aby obě ramena mířila svisle vzhůru. Do trubice byla nalita rtuť o hustotě ϱ_1. Potom byla do levého ramene nalita kapalina o neznámé hustotě ϱ, a to tak, že nad hladinou rtuti vytvořila sloupec o výšce $h = 34$ cm. Po nalití kapaliny se rtuťový sloupec posunul tak, že v pravém rameni byla jeho hladina o $\Delta h = 2{,}5$ cm výše než v levém rameni.



Obr. 23 U-trubice

Určete hustotu ϱ nalité kapaliny. Hustota rtuti je $\varrho_1 = 13\,600\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

Řešení

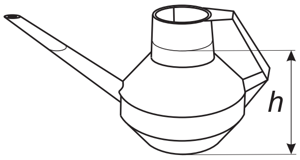
Z rovnosti hydrostatických tlaků na rozhraní obou kapalin vyplývá

$$\Delta h \varrho_1 g = h \varrho g,$$

z čehož $\varrho = \dfrac{\Delta h}{h}\varrho_1 = \dfrac{2{,}5}{34} \cdot 13\,600\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}} = 1\,000\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.
Na rtuti je nalita voda.

Cvičení 4

7. V konvici na zalévání květin je nalita voda do výšky $h = 14$ cm, průměr dna konvice je $d = 11$ cm. Určete velikost hydrostatického tlaku a hydrostatickou tlakovou sílu, která působí na dno konvice.



Obr. 24 Konvice

Praktická úloha 1 – měření tlaku v uzavřené nádobě

V této praktické úloze ověříme, jak je to s tlakem vzduchu uvnitř napáječky pro drůbež (obr. 25 [7]), jejíž model si vyrobíme.

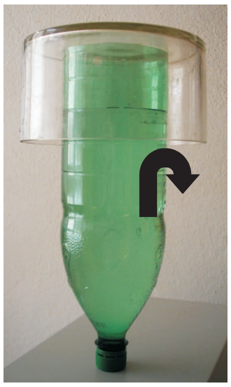
Pomůcky: plastová láhev – 2 litry, injekční stříkačka – 20 ml, větší nádoba – může být i nějaký nižší kuchyňský hrnec (pánev) – na obr. 27 je použita skleněná káď, ocelové měřítko, odměrný válec, barometr
Úkol: změřte tlak vzduchu uvnitř napáječky (plastové láhve) nad hladinou vody v závislosti na množství vody uvnitř napáječky


Obr. 25 Napáječka

[7] Obrázek je stažen z internetu z *http://www.zemedelske-potreby.cz/*.

Postup: plastovou láhev upravte dle obr. 26 (odříznout dno a vyříznout dva otvory asi o průměru 10 mm ve výšce 10 mm nad spodním okrajem odříznuté láhve). Naplňte napáječku (láhev) 1,5 litru vody, nalijte do převrácené plastové láhve a přiklopte nádobou (obr. 27). Nádobu přitlačte k plastové láhvi, celé pak otočte o 180° a nechte ustálit (obr. 28). Pak změřte ocelovým měřítkem (nebo pravítkem) výšky h_1, h_2 (obr. 29) a tlak p_a (barometrem) v místnosti.

Obr. 26 Poloha otvorů

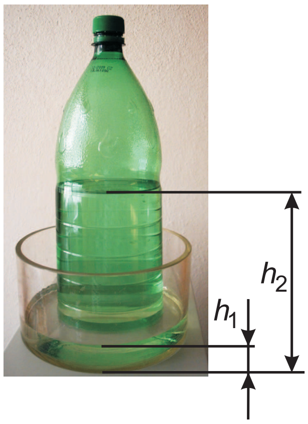


Obr. 27 Nasazení nádoby

Tlak v nádobě pak lze určit pomocí vzorce

$$p = p_a + (h_1 - h_2)\varrho g.$$

Potom pomocí injekční stříkačky odeberte 60 ml vody z nádoby (jako když drůbež upíjí vodu), nechte ustálit a při tom sledujte, co se děje při odebírání vody. Pak znovu změřte výšky h_1 a h_2. Toto několikrát opakujte (tak dlouho, až se výšky obou hladin vyrovnají) a pokaždé vypočtěte příslušné tlaky (výsledky pak zpracujte v Excelu).



Obr. 28 Překlopení

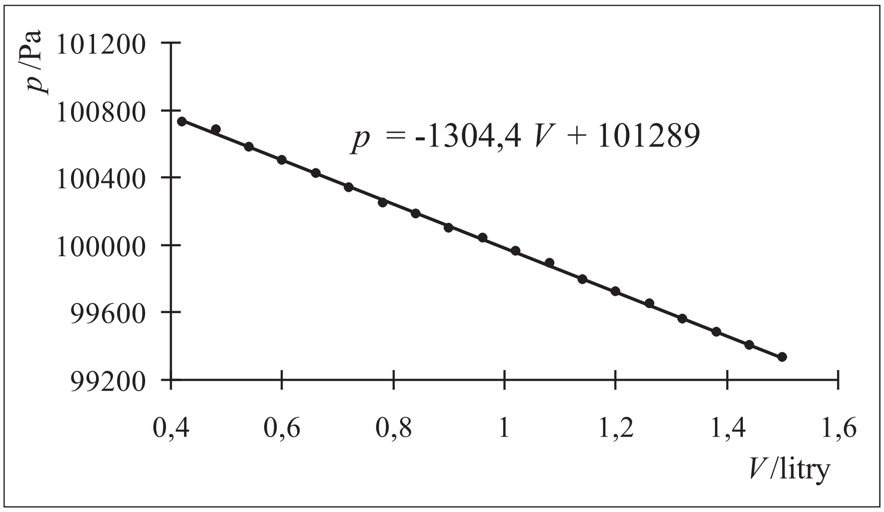
Obr. 29 Odebírání vody

Pokuste se fyzikálně zdůvodnit výsledky svého pozorování i naměřené hodnoty.

Zpracování naměřených hodnot

Tabulka naměřených hodnot ($\Delta h = h_1 - h_2$) – na následující stránce.

$\frac{V_{voda}}{l}$	$\frac{V_{vzduch}}{l}$	$\frac{h_1}{mm}$	$\frac{h_2}{mm}$	$\frac{\Delta h}{mm}$	$\frac{p_a}{Pa}$	$\frac{p}{Pa}$
1,5	0,25	165	21	144	100775	99335
1,44	0,31	158	21	137	100775	99405
1,38	0,37	150	21	129	100775	99485
1,32	0,43	142	21	121	100775	99565
1,26	0,49	133	21	112	100775	99655
1,2	0,55	126	21	105	100775	99725
1,14	0,61	119	21	98	100775	99795
1,08	0,67	109	21	88	100775	99895
1,02	0,73	102	21	81	100775	99965
0,96	0,79	94	21	73	100775	100045
0,9	0,85	88	21	67	100775	100105
0,84	0,91	80	21	59	100775	100185
0,78	0,97	73	21	52	100775	100255
0,72	1,03	64	21	43	100775	100345
0,66	1,09	56	21	35	100775	100425
0,6	1,15	48	21	27	100775	100505
0,54	1,21	40	21	19	100775	100585
0,48	1,27	30	21	9	100775	100685
0,42	1,33	25	21	4	100775	100735



Obr. 30 Graf lineární závislosti tlaku v nádobě na objemu vody v nádobě

2 Archimédův zákon a jeho užití v praxi

Historie objevu Archimédova zákona velmi úzce souvisí s přáním syrákúského krále *Hieróna II.* zjistit, zda ho zlatník, u kterého si dal zhotovit korunu, nepodvedl. O posudek byl požádán Archimédes. Ten na řešení údajně přišel, když se koupal ve vaně. Přišel na to, že objem vody, kterou vytlačí těleso do ní ponořené, nezávisí na hmotnosti tělesa, nýbrž na jeho objemu. Pokud tedy mají dvě tělesa o stejné hmotnosti různé hustoty, musejí se lišit svými objemy. Vzhledem k tomu, že hustota zlata je větší než hustota stříbra, musí mít „ošizená“ koruna větší objem než stejně hmotný kus ryzího zlata.

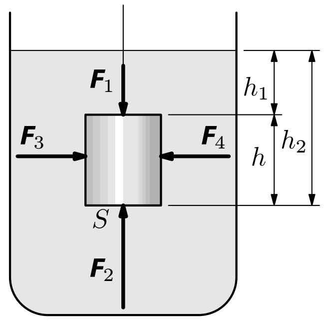
Obr. 31 Jásající Archimédes

Po tomto objevu údajně vyskočil z vany, pobíhal nahý po ulici a volal řecky „heuréka“ (našel jsem to).[8]

Než si zformulujeme a odvodíme Archimédův zákon, připomeňme si, co už víme: na každou libovolně malou část povrchu tuhého tělesa ponořeného do kapaliny působí kapalina hydrostatickou tlakovou silou směrem kolmým k této části povrchu tělesa.

Položme si nyní otázku: jaký je účinek těchto tlakových sil na těleso zcela ponořené v kapalině? Než se pustíme do odvození konkrétního vztahu, udělejme si jednoduchý pokus. Vezměme těleso a zavěsme jej na siloměr; na siloměru odečteme sílu, kterou je napínána pružina siloměru. Potom toto těleso ponoříme do vody a znovu změříme sílu napínající pružinu siloměru. Síla bude nyní menší.

Z výsledků pokusu vyplývá, že těleso ponořené do kapaliny musí být v kapalině nadlehčováno. My se nyní pokusíme nastínit odvození vztahu pro výpočet síly, která těleso v kapalině nadlehčuje. Uvažujme, že máme těleso tvaru válce, které je ponořeno v kapalině hustoty ϱ_k, a to tak, že horní a dolní podstavy válce jsou rovnoběžné s volným povrchem kapaliny; horní podstava je v hloubce h_1, dolní podstava v hloubce h_2 pod volným povrchem kapaliny (obr. 32).



Obr. 32 Odvození Archimédova zákona

[8] Tato historka objevu Archimédova zákona se dochovala v *Deseti knihách o architektuře* od Caesarova architekta *Vitruvia* v 1. st. př. Kr..

Nechť $p_1 = h_1 \varrho_k g$ je hydrostatický tlak v hloubce h_1, $p_2 = h_2 \varrho_k g$ je hydrostatický tlak v hloubce h_2. Potom na horní podstavu působí svisle dolů hydrostatická tlaková síla o velikosti $F_1 = h_1 \varrho g S$, obdobně na dolní podstavu tlaková síla o velikosti $F_2 = h_2 \varrho_k g S$, směřující svisle vzhůru, přičemž $F_2 > F_1$. Na stejné protilehlé plošky válce působí síly $\boldsymbol{F}_3$, $\boldsymbol{F}_4$, přičemž platí $\boldsymbol{F}_3 = -\boldsymbol{F}_4$; tyto síly jsou v rovnováze (ruší se tuhostí tělesa). Výslednice všech těchto tlakových sil je síla $\boldsymbol{F}_{vz}$, která směřuje svisle vzhůru, a pro jejíž velikost platí

$$F_{vz} = F_2 - F_1 = S \varrho g (h_2 - h_1) = S h \varrho_k g = V \varrho_k g.$$

Na tuhý válec zcela ponořený do kapaliny tak působí směrem svisle vzhůru hydrostatická vztlaková síla o velikosti $F_{vz} = V \varrho_k g$. Toto však není síla, kterou je namáhán siloměr. Siloměr je totiž napínán silou $\boldsymbol{F}$, která je výslednicí sil $\boldsymbol{F}_G$ a $\boldsymbol{F}_{vz}$, tj.

$$F = mg - V \varrho_k g.$$

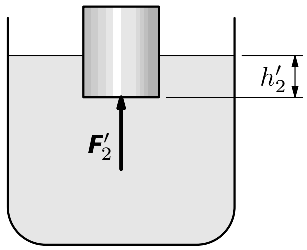
Tuto úvahu by bylo možno zobecnit a ukázat, že platí pro těleso jakéhokoliv tvaru, které je ponořené do kapaliny. Tím se zde však podrobně nebudeme zabývat a podíváme se na některé speciální případy chování tělesa v kapalině.

a) V kapalině je ponořeno těleso, které vyplavalo na hladinu. Dle obr. 33 platí

$$F'_{vz} = V' \varrho_k g = F_G = V \varrho g,$$

kde $V' = h'_2 S$ je objem ponořené části tělesa. Z tohoto vztahu pak vyplývá

$$\frac{V'}{V} = \frac{\varrho_k}{\varrho}.$$

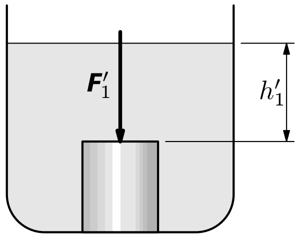


Obr. 33 Vynořování tělesa z kapaliny

b) Těleso, které je ponořeno v kapalině, přiléhá svou dolní podstavou těsně ke dnu (budeme předpokládat, že oba přiléhající povrchy jsou velmi hladké a není mezi nimi žádná mezera). V tomto případě je velikost výslednice sil působících na těleso rovna

$$F = F_G + F'_1 = mg + h'_1 S \varrho_k g,$$

tj. na těleso nepůsobí vztlaková síla, těleso je přitlačováno ke dnu nádoby.



Obr. 34 Těleso na dně nádoby

Tento případ nás zase naopak varuje, že v některých případech by mohla nastat situace, že vztlaková síla na těleso vždy působit nemusí, třebaže je toto těleso celé ponořeno v kapalině. Pozor tedy např. na situaci, aby ponorka nedosedla do měkkého bahnitého dna – posádku by pak asi čekalo nemilé překvapení....

Chování tělesa ponořeného do kapaliny

Nechť V je objem celého tělesa, ϱ_k je hustota kapaliny, ϱ hustota tělesa.

1. Je-li $F_{vz} > F_G$, potom $V\varrho_k g > V\varrho g$, z čehož dostáváme $\varrho_k > \varrho$, těleso plove.
2. Je-li $F_{vz} = F_G$, z čehož $\varrho_k = \varrho$, pak se těleso vznáší.
3. Je-li $F_{vz} < F_G$, z čehož $\varrho_k < \varrho$, pak těleso klesá ke dnu.

2.1 Praktické užití Archimédova zákona

S užitím Archimédova zákona v praktickém životě se setkáváme velmi často, v následujících příkladech popíšeme několik situací, kdy tohoto zákona využíváme.

Příklad 4 – koruna krále Hierona

Jak již bylo předesláno v úvodu této kapitoly, syrakúský král Hieron II. si nechal od zlatníka vyrobit vavřínovou korunu ve tvaru věnce, která měla být vyrobena ze 3 liber čistého zlata[9], při ponoření do vody byla koruna o 0,2 libry lehčí. Podle toho lze vypočítat, kolik zlata a kolik stříbra obsahovala koruna a zda zlatník krále nepodvedl. Hustota čistého zlata je $\varrho_z = 19\,300\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, hustota stříbra je $\varrho_s = 10\,500\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, hustota vody je $\varrho_v = 1\ 000\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, hustotu vzduchu zanedbejte.

Řešení

Označme M hmotnost celé koruny, m_z hmotnost zlata, m_s hmotnost stříbra a Δm hmotnost vody vytlačené korunou.

Obr. 35 Věnec

Podle zadání platí $M = m_z + m_s$. Ze vztahu $F_{vz} = \Delta m g = V\varrho_v g$, dostaneme

$$V = \frac{\Delta m}{\varrho_v}.$$

[9]Jednalo se o tzv. *římskou libru*, což bylo 327,45 gramu.

Pro objem V dále platí $V = V_z + V_s$. Po dosazení dostaneme

$$\frac{\Delta m}{\varrho_v} = \frac{m_z}{\varrho_z} + \frac{m_s}{\varrho_s}.$$

Po dosazení za $m_s = M - m_z$ dostaneme

$$\frac{\Delta m}{\varrho_v} = \frac{m_z}{\varrho_z} + \frac{M - m_z}{\varrho_s},$$

z čehož

$$m_z = \frac{\Delta m \varrho_z \varrho_s - M \varrho_v \varrho_z}{\varrho_v(\varrho_s - \varrho_z)} = 1{,}97 \text{ liber} = 0{,}645 \text{ kg}.$$

Hmotnost stříbra je pak $m_s = 1{,}03$ libry $= 0{,}337$ kg. Z Vitruviových zápisků, jak byly dochovány do dnešní doby, pak víme, že tímto způsobem Archimédes dokázal, že zlatník krále podvedl.

Historické poznámky

1. Z Vitruviových zápisků dále vyplynulo, že králi Hieronovi velmi záleželo, aby věnec byl z pravého zlata, protože to měl být posvátný věnec věnovaný bohům. Hieron takovéto věnce (existovaly celkem tři – jeden z nich je na obr. 35) pokládal na sochu boha nebo bohyně.

2. Hmotnost věnce (koruny) 1 kg (3 libry) je pouze model – přesný údaj o hmotnosti věnce se zřejmě nedochoval, protože i Vitruvius ve svých zápiscích popisuje už pouze model této situace.

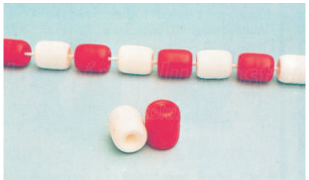
3. Tyto informace a obr. 35 (jedná se zřejmě o překlad – zpracování Vitruviových zápisků do angličtiny) jsou uvedeny na

http://www.math.nyu.edu/~crorres/Archimedes/,

kde je možno se také více dozvědět o postupu, jakým byl v době Archiméda tento problém řešen.

Příklad 5 – plovací bójky

Plovací bójky tvaru válce, které se používají jako součást dělících lan v bazénech, jsou vyrobeny z hostalenu (polyetylen s vysokou hustotou). Bójky jsou ve vodě ponořeny tak, že nad hladinu vyčnívá pouze 1/10 jejich průměru. Průměr bójky je $d = 75$ mm, délka bójky je $l = 85$ mm, hustota vody je $\varrho_v = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



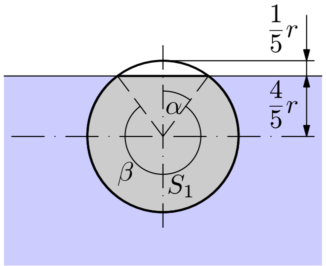
Obr. 36 Bójky

Určete a) hustotu hostalenu, b) hmotnost jedné bójky.[10]

[10]Informace o bójkách a obr. 36 je možno nalézt na *http://www.lodniprislusenstvi.cz/*.

Řešení

a) Nejprve určíme objem V_1 ponořené části bójky. Označíme ϱ_1 hustotu vody, ϱ hustotu hostalenu, S_1 obsah příčného řezu ponořené části bójky.



Obr. 37 Bójka ve vodě

Dle obr. 37 můžeme psát $\cos\alpha = \frac{4}{5}$, z čehož $\alpha = 38°$. Potom $\beta = 360° - 2\alpha = 286°$. Pomocí Pythagorovy věty dále určíme délku z základny rovnoramenného trojúhelníka z obr. 37, tj.

$$\frac{z}{2} = \sqrt{r^2 - \left(\frac{4}{5}r\right)^2} = \frac{3}{5}r,$$

z čehož $z = \frac{6}{5}r$. Potom $S_1 = \left(\frac{\pi}{360°} \cdot 286° + \frac{1}{2} \cdot \frac{6}{5} \cdot \frac{4}{5}\right) r^2$.

Z rovnosti síly tíhové a vztlakové můžeme psát $F_{\mathrm{vz}} = F_G$, po dosazení $V_1 \varrho_{\mathrm{v}} g = V \varrho g$. Dále pak

$$\left(\frac{\pi}{360°} \cdot 286° + \frac{12}{25}\right) r^2 l \varrho_{\mathrm{v}} g = \pi r^2 l \varrho g,$$

z čehož

$$\varrho = \left(\frac{286°}{360°} + \frac{12}{25\pi}\right) \varrho_{\mathrm{v}} = 947\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}.$$

Tento výsledek odpovídá skutečnosti.

b) Hmotnost jedné bójky je $m = \varrho V = \varrho \pi r^2 l = 0{,}36$ kg.

Příklad 6 – evakuace stanice na kře

Rychlé tání ledové kry v Severním ledovém oceánu, na níž pracovala ruská polární expedice, si vynutilo předčasné ukončení práce a likvidaci vědecké stanice Severní pól 35 (obr. 38 [11]). Kře, která zatím urazila přes dva a půl tisíce kilometrů, hrozí úplný rozpad, protože směřuje do oblasti, kde jsou relativně teplé vody. K nebezpečně se ztenčující kře byl vyslán atomový ledoborec Arktika a loď Michail Somov, která v noci na 24.6. 2009 nalodila na svou palubu dvacet polárníků i jejich dva psy. Ledová kra měla v době vybudování stanice rozměry 5 km x 3 km a tloušťku 3 metry, v době evakuace stanice měla kra rozměry jen

[11] Obrázek a údaje použité v úloze jsou uvedeny na internetu *http://www.tyden.cz/*, 25.6.2009, článek: Rusové evakuují stanici na kře. Taje jim pod nohama.

300 m × 600 m a tloušťku 1,5 metru. Hmotnost nákladu uloženého na kře byla 220 tun. Určete

a) výšku kry (v centimetrech), která byla původně nad vodou a jak se tato výška změnila po vybudování stanice (náklad 220 tun),

b) jaká výška kry zůstala nad vodou po odtátí kry (i s nákladem) a jak se tato výška změnila, když byla stanice opět odstěhována.

Hustota ledu je $\varrho = 917\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$, hustota mořské vody je $\varrho_\mathrm{v} = 1030\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$.

Obr. 38 Evakuace

Řešení

a) Z rovnováhy vztlakové a tíhové síly vyplývá

$$Sh_1\varrho_\mathrm{v}g = Sh\varrho g,$$

z čehož

$$h_1 = \frac{\varrho}{\varrho_\mathrm{v}}h \doteq 2{,}67\ \mathrm{m}.$$

Nad vodní hladinou vyčnívá 33 cm ledové kry.

Po vybudování stanice platí (m je hmotnost nákladu na kře)

$$Sh_1'\varrho_\mathrm{v}g = Sh\varrho g + mg,$$

z čehož

$$h_1' = \frac{\varrho}{\varrho_\mathrm{v}}h + \frac{m}{S\varrho_\mathrm{v}} \doteq 2{,}67\ \mathrm{m}.$$

Kra poklesla o výšku $\Delta h = h_1' - h_1 = \dfrac{m}{S\varrho_\mathrm{v}} = 1{,}4 \cdot 10^{-5}$ m, což je vzhledem k tloušťce kry zanedbatelné.

b) Obdobným postupem (proveďte sami) jako v úloze a) bychom zjistili, že po odtátí kry bude nad vodou 16 centimetrů, po evakuaci stanice by kra vystoupila nad vodu o 1 milimetr.

Cvičení 5

8. Nákladní loď plave na vodě. Položíme-li na ni náklad o hmotnosti $m = 1\,000$ kg, ponoří se o 1 cm hlouběji. Jak velký je plošný obsah vodorovného průřezu v rovině volného povrchu vody? Hustota vody je $1\,000\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$.

9. Kotevní bóje tvaru koule má průměr 300 mm a hmotnost 11 kg. Je ponořena ve vodě 1/2 svého objemu. Určete průměrnou hustotu materiálu bóje.

Praktická úloha 2 – měření hustoty dřeva

K realizaci této úlohy budete potřebovat kousek dřevěného prkénka tvaru kvádru (ze silnějšího dřeva), jehož hustotu budeme určovat, a polyetylénovou fólii.

Postup:

1. Prkénko zabalte do fólie, aby se nemohlo v průběhu pokusu nasáknout vodou.

2. Pravítkem (měřítkem) si předem změřte rozměry kvádru. Pak si vezměte nádobu s vodou a kvádr položte na vodní hladinu. Určete výšku, s jakou kvádr vyčnívá nad vodní hladinu. Na základě tohoto údaje pak vypočtěte hustotu materiálu kvádru.

3. Hustotu dřeva lze také určit pomocí známého vzorce $\varrho = \dfrac{m}{V}$. Při tomto postupu je však třeba také vážit.

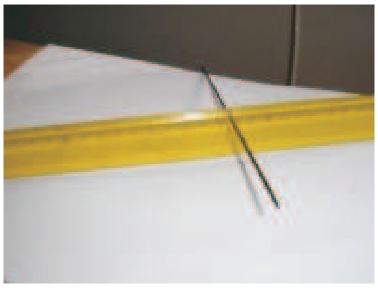
Porovnejte hodnoty získané oběma metodami. Případné rozdíly zdůvodněte.

Praktická úloha 3 – měření hustoty kapaliny

(Tato úloha popisuje princip práce s Mohrovými vážkami.)

Pomůcky: pravítko, pletací jehlice, stojan, malá lahvička od léků (s pískem), sada závaží, režná nit, odměrný válec, teploměr.

Provedení: uvnitř pravítka o délce 30 cm vyvrtáme malý otvor ve vzdálenosti 20 cm od levého okraje tak, abychom jím mohli volně prostrčit pletací jehlici (obr. 39). Jehlici pak vodorovně upneme do stojanu, aby vytvořila osu (obr. 41), kolem které se bude pravítko otáčet. Pravítko bude tvořit vahadlo, na které budeme postupně zavěšovat závaží. Do malé lahvičky od léků nasypeme asi do 2/3 písek. Nad víčkem lahvičky vytvoříme malé oko, aby šla za něj lahvička zavěšovat (obr. 40). Objem ponořené lahvičky určíme pomocí odměrného válce.

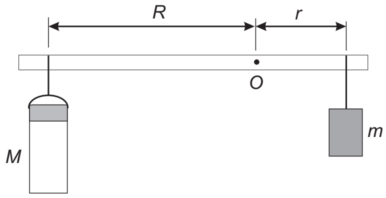


Obr. 39
Pravitko

Obr. 40
Lahvička

Obr. 41
Rovnováha

Nejprve vše vyvážíme, a to tak, že lahvičku zavěsíme na jednu stranu pravítka, vyvažovací závaží m na druhou stranu pravítka tak, aby nastala rovnováha (obr. 41, 42).



Obr. 42 Pravitko

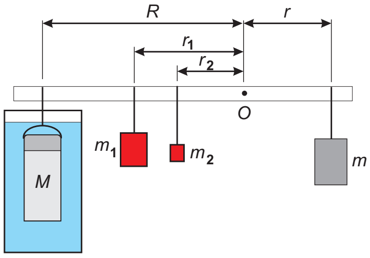
Napíšeme podmínku rovnováhy

$$MgR = mgr. \tag{2}$$

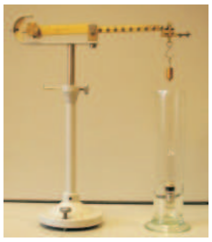
Nyní lahvičku ponoříme do nádobky s kapalinou, jejíž hustotu chceme určovat (např. líh). Tím dojde k porušení rovnováhy.

Rovnováha opět nastane, když na pravítko zavěsíme další závaží pomocí předem připravených ok z režné nitě, na která závaží budeme zavěšovat (obr. 43). Protože hustota kapaliny také závisí na teplotě, nesmíme zapomenout také změřit teplotu kapaliny.

Obr. 43 Obnovení rovnováhy



Obr. 44 Obnovení rovnováhy



Obr. 45 Mohrovy vážky

Opět pro tento případ napíšeme podmínku rovnováhy

$$(Mg - V\varrho_\mathrm{k}g)R + m_1r_1g + m_2r_2g = mrg.$$

Užitím vztahu (2) můžeme z tohoto vztahu vyjádřit hustotu ϱ_k kapaliny

$$\varrho_\mathrm{k} = \frac{m_1r_1 + m_2r_2}{R} \cdot \frac{1}{V}. \tag{3}$$

Poznámka

1. Závažíčka m_1, m_2 slouží k vyrovnání rovnovážné polohy. V případě potřeby by bylo možno použít závažíček i více, nebo naopak stačí jen jedno.

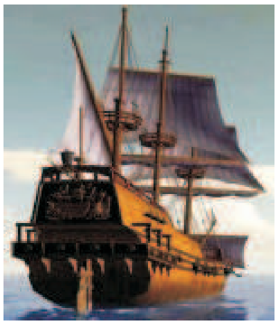
2. Na tomto principu pracují tzv. *Mohrovy vážky* (obr. 45), pomocí kterých se hustota kapaliny měří.

3. V praxi se také velmi často měří hustota kapaliny pomocí *hustoměru*, pokud ho máme k dispozici.

Příklad zpracování měření:

Na pravítku (obr. 43, 44) byly naměřeny údaje: 0 cm; 11,2 cm; 29,1 cm, z čehož $R = 20{,}0$ cm; $r = 9{,}1$ cm; $r_1 = 8{,}8$ cm. Použité hmotnosti jsou: $m = 200$ g; $m_1 = 100$ g. Vnější objem lahvičky je $V = 53{,}5$ ml, teplota kapaliny je $t = 23\ °\mathrm{C}$. Po dosazení do vztahu (2) dostaneme $\varrho_k = 822\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$.

2.2 Stabilita při plování



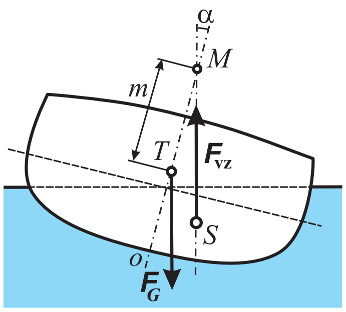
Obr. 46 Galeona

Všichni jste se už určitě setkali se situací, kdy jste viděli těleso (např. loď), jak plove na vodě. Rovněž jste jistě slyšeli o tom, že se nějaké těleso ve vodě převrátilo. Tato skutečnost hraje svoji roli při stavbě lodí – u špatně postavené lodi by docházelo k převrácení lodi a jejímu potopení. Takto labilní lodi se vyskytovaly především v 16. a 17. století. Jednalo se o španělské válečné lodi – tzv. *galeony* (obr. 46). Tyto lodi měly ještě navíc 5 patrové ubikace na zádi, což stabilitu lodí ještě snižovalo.

U lodí je možno říci, že její stabilita je tím větší, čím větší může být výchylka lodi z rovnovážné polohy, při níž ještě nedojde k převrácení lodi. Stabilita rovnovážné polohy lodi závisí především na jejím tvaru a na poloze těžiště (obojí je ovlivněno tím, jakým způsobem je loď postavena vzhledem k účelu jejího použití).

Podívejme se tedy alespoň ve stručnosti na to, co z hlediska fyziky stabilitu ovlivňuje. Označme T těžiště plovoucího tělesa (obr. 47), v němž působí tíhová síla $\boldsymbol{F}_G$. Bod S je pak těžiště ponořené části, $\boldsymbol{F}_{\mathrm{vz}}$ je vztlaková síla působící na těleso.

Aby nastala rovnováha, musí platit $F_G = F_{\mathrm{vz}}$. Při vychýlení plovoucího tělesa o malý úhel α protne nositelka vztlakové síly osu o v bodě, který označíme M. Tento bod se nazývá *metacentrum*. Moment $F_G m \sin\alpha$ je tzv. *stabilní moment*. Aby rovnovážná poloha tělesa při plování byla stabilní, musí být působiště vztlakové síly nad těžištěm tělesa, nebo musí být metacentrum nad těžištěm tělesa. Vzdálenost m na obr. 47 je tzv. *metacentrická výška* a je mírou stability polohy při plování.



Obr. 47 Stabilita

Problémem stability se podrobněji zabývá např. [1]. Tento studijní text je také možno stáhnout na webu: *http://www.uhk.cz* nebo na *http://fo.cuni.cz.*

3 Atmosférický tlak

Atmosférický (někdy také barometrický) tlak je tlak, který je způsoben vzdušným obalem (atmosférou) Země. Tento tlak je vyvolán tíhou vzduchového sloupce sahajícího od místa (hladiny), kde tlak zjišťujeme, až po horní hranici atmosféry. S projevy atmosférického tlaku jste se již setkali ve svém životě všichni a o jeho konkrétních účincích jste hovořili již dříve v hodinách fyziky.

Jako první začal zřejmě zkoumat projevy atmosférického tlaku *Aristoteles*, který tvrdil, že příroda má strach ze vzduchoprázdna, jak jsme se již zmiňovali v historickém úvodu. Tento názor přetrvával velmi dlouho, téměř až do doby, kdy si toskánský vévoda přál mít ve svých terasovitých zahradách nasávací pumpy. Nikdy se nepodařilo vyčerpat pomocí pístových čerpadel vodu z větší výšky než 10 metrů. Pumpaři požádali o vysvětlení *G. Galileiho* (1564 – 1642). Galilei tvrdil, že příroda sice strach z prázdnoty má, ale jen do jisté omezené míry.

V roce 1643 prováděl experimenty italský matematik a fyzik Evangelista Torricelli - Galileův žák - s trubičkou naplněnou rtutí. Asi 1 m dlouhou trubičku na jednom konci zatavil a celou ji naplnil rtutí. Druhý konec trubičky pak utěsnil palcem, obrátil ji dnem vzhůru a uzavřený konec vložil do misky se rtutí. Když palec uvolnil, hladina rtuti v trubičce sice poklesla, ale stále byla výše než hladina v misce. V horní části trubičky se vytvořilo vakuum. Torricelli usoudil, že rtuť v trubičce je držena tíhou vzduchu, který působí tlakem na rtuť v misce. Tím dokázal existenci atmosférického tlaku.

Později Torricelliho pokus zopakoval *Blaise Pascal* (1623 – 1662), použil však místo rtuti použil červené víno. Toto víno bylo asi 15-krát lehčí než rtuť, a proto byl také sloupec vína 15-krát vyšší než rtuťový. K ověření Torricelliho domněnky, pak Blaise Pascal ještě vystoupil v roce 1648 z *Clermontu* společně se svým bratrem na nedaleký vrchol *Puy de Dôme* (1054 m) a zjistil, že s rostoucí výškou poklesl sloupec rtuti ve skleněné trubici na každých 10 metrů o 1 milimetr. Uvědomil si, že je to způsobeno poklesem tlaku vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou.

Praktická úloha 4 – Torricelliho pokus

Torricelliho pokus si můžete provést i vy sami. Stačí k tomu asi 11 metrů dlouhá průhledná hadice, nádoba s vodou a musíme mít možnost vstupu do vyšší budovy. Hadici nejprve naplňte vodou, nejlépe z vodovodního kohoutku s trubičkou na konci, konec pak zazátkujte. Dolní konec hadice ucpěte palcem a hadici překlopte tak, aby dolní konec ucpaný palcem byl ve vodě, zazátkovaný konec hadice vytáhněte svisle vzhůru a uvolněte palec. Pak už jen označte na hadici výšku, kam až vystoupila voda a změřte ji. Dokážete předem odhadnout, jaký bude výsledek?

V průběhu 17. století se o atmosférický tlak začal také zajímat magdeburský purkmistr *Otto von Guericke* (1602 - 1686). Guericke zopakoval Torricelliho pokus s vodou. Všiml si také další zajímavé věci – změny tlaku v souvislosti se změnou počasí, čímž položil první základy vědecké předpovědi počasí.

Pro úplnost je ještě třeba dodat, že na základě Torricelliho podkladů vyvinul J. W. Goethe (1749 – 1832) barometr (obr. 3, 4) sloužící k předpovědi počasí: pokud tlak vzduchu stoupá, voda v krčku klesá a předpokládá se, že dojde ke zlepšení počasí a naopak. Vraťme se ale zpátky ke Guerieckovým pokusům, které jsou známy jako pokusy s magdeburskými polokoulemi (obr. 48).

Jednalo se o polokoule, které k sobě velmi těsně přiléhaly a byl z nich vyčerpán vzduch. Tyto polokoule bylo možno od sebe odtrhnout pouze působením značně velkých sil, jak bude vidět v následujícím příkladu. Modely těchto polokoulí je možno dnes nalézt také v řadě kabinetů fyziky.

Obr. 48 Model polokoulí

Příklad 7 – Pokusy s magdeburskými polokoulemi

První magdeburské polokoule jsou doloženy teprve v roce 1656. Byly měděné o průměru 20 cm a o jejich odtržení od sebe se neúspěšně pokusilo několik magdeburských hromotluků. O rok později byl pokus zopakován, tentokrát s koulemi o průměru 35 cm a ani šesti párům koní se je nepodařilo od sebe odtrhnout. Po roce 1661 se začaly používat magdeburské polokoule o průměru 60 cm a neodtrhlo je ani osm párů koní. Odhadněte nejmenší sílu, kterou by bylo ve všech třech případech působit, aby tyto polokoule byly od sebe odtrženy. Pro výpočet použijte hodnotu atmosférického tlaku $p_\mathrm{a} = 101\,300$ Pa.

Řešení

Velikost síly potřebné k odtržení polokoulí vypočteme užitím vztahu

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \cdot p_\mathrm{a}.$$

Po dosazení zadaných hodnot vychází v roce 1656 síla o velikosti $F_1 = 3{,}2$ kN, v roce 1657 síla o velikosti $F_2 = 9{,}7$ kN a v roce 1661 síla o velikosti $F_3 = 28{,}6$ kN.

Vzhledem k tomu, že se plyny dají velmi dobře stlačit, není barometrický tlak lineární funkcí výšky, jako tomu bylo v případě hydrostatického tlaku.

Popišme si postup, jak lze odvodit rovnici popisující závislost atmosférického tlaku na výšce od povrchu Země, tzv. *barometrickou rovnici*. Při našich dalších úvahách budeme uvažovat, že teplota plynu je stálá. Vymezíme si v atmosféře tenkou vrstvičku vzduchu o hustotě ϱ (jejíž hodnotu v této vrstvě budeme považovat za stálou) a tloušťce Δh, která se bude nacházet ve výšce h. Ze vztahu pro hydrostatický tlak pak můžeme pro tlakový rozdíl Δp ve vrstvě na základě rovnice (1) psát

$$\Delta p = -\varrho g \Delta h.$$

Podle *Boylova-Mariottova* zákona platí při stálé teplotě vztah

$$pV = p\frac{m}{\varrho} = p_0 V_0 = p_0 \frac{m}{\varrho_0}, \text{ z čehož } \varrho = \frac{\varrho_0}{p_0} p,$$

kde p_0, ϱ_0 jsou hodnoty atmosférického tlaku a hustoty v místě, odkud začínáme měřit (od místa nulové nadmořské výšky). Po dosazení za ϱ do rovnice pro Δp dostaneme

$$\Delta p = -\frac{\varrho_0}{p_0} p g \Delta h.$$

Pokud bychom vrstvičku neustále ztenčovali, a tím zpřesňovali výpočet, mohli bychom přejít od $\Delta h \to \mathrm{d}h$ a výše uvedenou rovnici přepsat na tvar

$$\frac{\mathrm{d}p}{p} = -\frac{\varrho_0}{p_0} g \,\mathrm{d}h.$$

Integrací této rovnice dostaneme barometrickou rovnici[12] pro tlak p ve tvaru

$$p = p_0 \mathrm{e}^{-\frac{\varrho_0 g}{p_0} h}.$$

Tento vztah je možno po dosazení za $\varrho_0 = 1{,}29\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, $p_0 = 101\,325$ Pa a $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ upravit na konkrétnější tvar

$$p = 101\,325 \cdot \mathrm{e}^{-0{,}000125 h}\ \mathrm{Pa}. \tag{4}$$

Příklad 8 – atmosférický tlak

Když horolezci stoupají do hor, mění se jimi měřený tlak se stoupající výškou h podle vzorce (4).

a) Odhadněte, v jaké nadmořské výšce je atmosférický tlak poloviční než je ve výšce nulové.

b) Odhadněte, jaký je atmosférický tlak v některých místech ve Vysokých Tatrách: Tatranská Lomnica, Lomnický štít.

c) Sestrojte v Excelu graf změn tlaku p v závislosti na výšce h pro výšky od 0 do 20 km.

[12] Tento postup je uveden např. ve [2].

Řešení

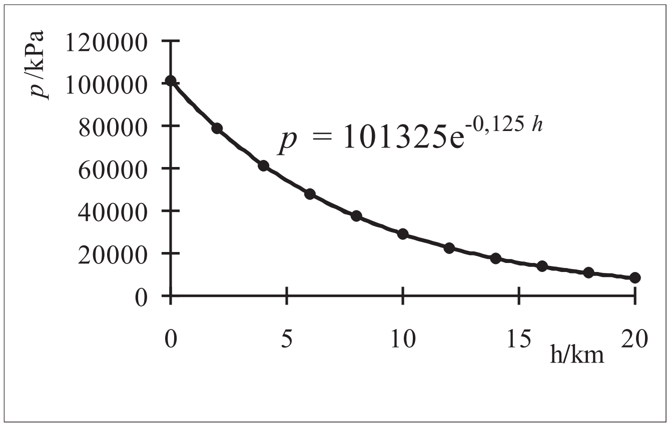
a) Podle zadání platí $\frac{p_0}{2} = p_0 \mathrm{e}^{-0{,}000125h}$, po logaritmování můžeme vyjádřit h. Dostaneme

$$h = \frac{\ln 2}{0{,}000125}\ \mathrm{m} = 5\,545\ \mathrm{m}.$$

b) Nejprve musíme zjistit nadmořskou výšku zadaných míst. Tatranská Lomnica se nachází v nadmořské výšce 850 m, Lomnický štít nadmořskou výšku 2634 m. Po dosazení do rovnice (4) dostaneme, že v Tatranské Lomnici je atmosférický tlak $p_1 = 91{,}1$ kPa, na Lomnickém štítu $p_2 = 72,9$ kPa.

Pokud se tedy turista rozhodne dostat se na Lomnický štít pouze lanovkami, musí vyjet z Tatranské Lomnice nejprve na Skalnaté pleso (1751 m), zde pak přestoupí na další lanovku, která ho vyveze až na observatoř na Lomnickém štítu, při tom se musí vyrovnat s tlakovým rozdílem $\Delta p = p_1 - p_2 = 18{,}2$ kPa, neboli $p_2 = 0{,}8p_1$. Proto také při výjezdu ze Skalnatého plesa na Lomnický štít je vzhledem k rychlosti jízdy lanovky doporučeno mít pootevřená ústa, aby se organismus lépe vyrovnával se vznikajícími tlakovými změnami.

c)



Obr. 49 Závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce

Cvičení 6

10. Určete hodnoty atmosférických tlaků (v násobcích atmosférického tlaku na hladině moře p_0) na vrcholcích nejvyšších hor světa podle jednotlivých světadílů (potřebné údaje nalezněte v zeměpisném atlasu nebo na internetu).

3.1 Měření tlaku

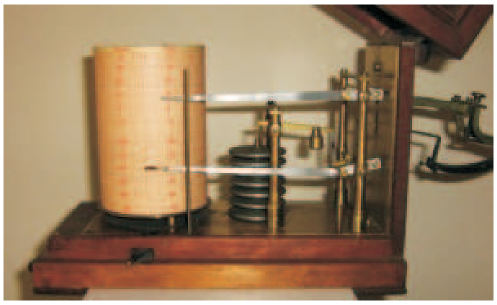
Tlak je jedna z veličin, kterou často měříme. V této části se zaměříme především na dvě situace: měření atmosférického tlaku a měření tlaku uvnitř uzavřené nádoby. S měřením atmosférického tlaku se setkáváme např. tehdy, když chceme vědět, jaké bude počasí (obr. 50). Přístroj, pomocí kterého měření provádíme se nazývá *barometr* a již jste se s ním určitě setkali. Při vyšším tlaku bývá obvykle jasno, naopak klesající tlak znamená změnu počasí na deštivé.

Obr. 50 Barometr

Pro přesnější měření tlaku používáme *rtuťový barometr*[13]. Barometr vynalezl Torricelli v roce 1643 (obr. 1), jak již jsme psali dříve. Hlavní částí rtuťového barometru je trubice, která je na jednom konci zatavená. Trubice je naplněná rtutí, na kterou na druhém konci působí působí tlak vzduchu, tzv. *atmosférický tlak*. Podle toho, jaká je výška rtuti v zataveném konci, určujeme atmosférický tlak podle vztahu $p_\mathrm{a} = h\varrho_\mathrm{Hg}g$.

Další typ barometru, se kterým je možno provádět měření tlaku, je tzv. *aneroid*[14] (pérový barometr), který pracuje na principu měření deformace plechové krabičky, která je uvnitř vzduchoprázdná. Aneroid vynalezl v roce 1843 *Lucien Vidie*. Aneroid se často používá i při měření v meteorologii, kdy bývá součástí meteorologických sond.

Kromě barometru se ukazuje výhodné obzvlášť při sledování vývoje počasí používat tzv. *barograf*, který umožňuje provádět měření tlaku (i teploty) v určitém časovém rozpětí a graficky vše zaznamenat. Součástí barografu je opět plechová krabička, jejíž deformace se mění s měnícím se tlakem (obr. 51).


Obr. 51 Barograf

Toto byla měřidla sloužící k měření atmosférického tlaku. My však v praktickém životě často potřebujeme měřit tlak v různých nádobách, a to i v případě, kdy je tlak nižší než atmosférický tlak - tzv. *podtlak* (např. vývěva), nebo když je měřený tlak vyšší než atmosférický tlak - tzv. *přetlak* (např. v pneumatikách kol, motocyklů a automobilů nebo v různých tlakových nádobách - např.

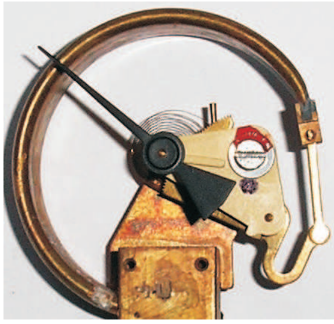
[13] Název barometr pochází z řeckých slov *baros* (těžký) a *metron* (měřit).
[14] Název je odvozen z *baromètre anéroide* - „tlakoměr bez kapaliny“.

zahradnická stříkačka). Obecně se měřidlo pro měření jakéhokoliv tlaku v kapalině nebo plynu nazývá *manometr*. Manometry pak mohou mít své speciální názvy: barometr, barograf, aneroid.

Při měření přetlaku uvnitř nějaké nádoby (např. v pneumatikách) se velmi často používají manometry, jejichž součástí je tzv. *Bourdonova trubice*, která se zhotovuje nejčastěji z mosazi nebo (v případě vyšších tlaků) z oceli (obr. 52).[15]

Obr. 52 Bourdonova trubice

Obr. 53 Manometr



Obr. 54 Detail uvnitř manometru

Bourdonova trubice je trubice eliptického průřezu stočená do spirály. Jeden konec je spojen se vstupem tlaku a druhý uzavřen a spojen přes převodové ústrojí s ukazatelem na stupnici. Při působení tlaku má trubice tendenci se narovnávat a eliptický tvar měnit na kruhový. Takovéto manometry mohou měřit tlaky až do 2000 MPa.

Na závěr této části si ještě řekneme něco o měření tlaku v současnosti. Položme si např. praktickou otázku: proč je nutné pravidelně měřit tlak v pneumatikách a jak se to řeší v současné době? Důvodů je celá řada, řekněmě si alespoň některé z nich: přílišné nahuštění zmenšuje kontaktní plochu pneumatiky s vozovkou. Nízký tlak (podhuštěné pneumatiky) pak ovlivňuje:

1. jízdní vlastnosti – vozidlo je hůře ovladatelné,
2. bezpečnost – brzdná dráha je na podhuštěné pneumatice delší,
3. výkon – nárůst valivého odporu, zvýšená spotřeba paliva,
4. životnost – vyšší opotřebení pneumatik.

Pravidelné měření tlaku však ještě není zárukou toho, že bude vždy vše v pořádku (stačí např. větší teplotní rozdíl během dne). V současné době se již provádí měření tlaku pneumatik elektronicky – na ráfcích každé pneumatiky jsou umístěny senzory. Více o této problematice je možno se dočíst např. na *http://www.vseumel.cz/view.php?cisloclanku=2005052401.*

[15] Bourdonův manometr byl patentován ve Francii v roce 1849.

Poznámka

V 19. století se k měření nadmořské výšky na základě změny atmosférického tlaku používal tzv. *hypsometr*. Změna se zjišťovala měřením teploty bodu varu kapaliny. Měřila se teplota páry vystupující z hladiny vroucí kapaliny, která závisela na aktuálním tlaku. Protože hypsometr byl snadno přenosný, používal se ke zjišťování nadmořských výšek v terénu, především v horských a těžko přístupných oblastech. Více informací lze nalézt na *http://www.wikipedia.org.*

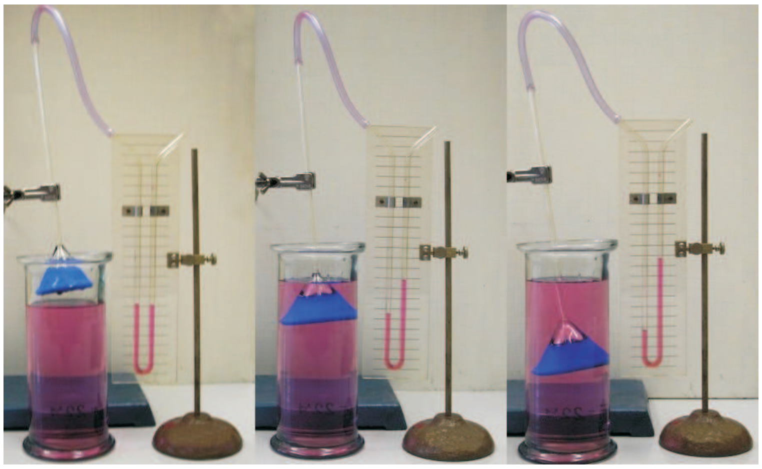
Praktická úloha 5 – měření s aneroidem

S aneroidem vystupte ze sklepa až do nejvyšších pater nějakého vysokého domu. Sledujte, jak se při této činnosti mění tlak.
Jiná varianta této úlohy: vložte aneroid do igelitového sáčku a zkuste sáček nafouknout. Sledujte údaj na aneroidu.

Nemáte-li k dispozici aneroid, zkuste si vyrobit vlastní manometr (praktická úloha 6, 7).

Praktická úloha 6 – vyrobte si vlastní manometr – 1

Zkuste si vyrobit vlastní manometr – potřebujete k tomu nálevku, U-trubici, nafukovací míček a plastovou hadičku. Do U-trubice nalijte vodu (pokud byste však chtěli měřit větší tlakové rozdíly, je vhodnější nalít do U-trubice rtuť). Další postup, jak ocejchovat manometr už ukazuje obr. 55. Tento manometr je vhodný pro měření tlaku v kapalinách.



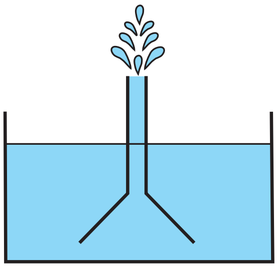
Obr. 55 Výroba manometru

Praktická úloha 7 – vyrobte si vlastní manometr – 2

Velkou láhev uzavřete zátkou, do níž předtím vyvrtáte otvor pro skleněnou trubičku o vnitřním průměru asi 1 mm, ohnutou do pravého úhlu. trubičku zasuňte do otvoru a vše dobře utěsněte. Doprostřed vodorovné části trubičky umístěte malou kapičku obarvené vody. Láhev pak tepelně izolujte, např. vložením do krabice s nějakou izolační látkou (např. vatou), aby vzduch uzavřený v láhvi nemohl reagovat na teplotní změny v okolí. Sledujte, co se bude dít s kapkou vody ve vodorovné trubici budete-li stoupat vzhůru nebo klesat dolů a pokuste se získaný výsledek fyzikálně zdůvodnit. Měření je velmi citlivé již při výškových rozdílech několika metrů.

Cvičení 7

11. Vezměte obyčejnou nálevku, uchopte ji palcem a prostředním prstem a rychle ponořte širším koncem do vody. Ve vodě ji nadzvedněte (při tom uzavřete ukazováčkem ústí úzkého konce). Oba pohyby několikrát rychle po sobě opakujte. Když nálevku podruhé ponoříte, vystříkne vám voda z nálevky i několik decimetrů vysoko. Pokuste se tento jev vysvětlit.

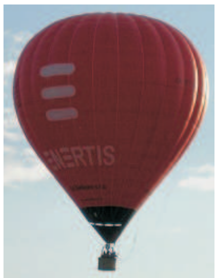


Obr. 56 Nálevka

12. Při hodině fyziky položil učitel na plochý talíř minci, kterou zalil takovým množstvím vody, aby mince byla právě potopená. Pak položil žákům otázku, zda by dokázali minci vytáhnout z talíře, aniž by si při tom namočili prsty nebo vylili vodu. Jeden žák se přihlásil, že by to zvládl: položil na talíř asi 10 cm vysoký sloupeček z dalších mincí a na něj zbytek svíčky. Svíčku zapálil a překlopil přes ni sklenici tak, aby mince ležela vně této sklenice. Po chvíli voda vystoupila do sklenice a mince zůstala na suchu. Dokážete tento jev vysvětlit?

3.2 Platí Archimédův zákon v plynech?

Tuto otázku si už zcela jistě řada z vás položila. Platnost Archimédova zákona v plynech dokládá např. i to, že někdy je na obloze vidět, jak letí horkovzdušný balón. Pokud byste se podívali na internet, určitě byste tam někde nalezli i nabídku na vyhlídkové lety horkovzdušným balónem. Jak to tedy s tím horkovzdušným balónem je?



Obr. 57
Horkovzdušný balón

Základem všeho je, že na balón i ve vzduchu musí působit vztlaková síla. Aby se mohl horkovzdušný balón vznášet, musí svým objemem vytlačit takové množství vzduchu, jehož tíha je rovna tíze balónu (i s košem), cestujících a vzduchu ohřátého uvnitř balónu. Toto vše by však samo o sobě nestačilo. Dále je třeba vzít v úvahu ještě jednu velmi důležitou skutečnost: teplý vzduch má menší hustotu než vzduch studený. Čím je teplota vzduchu uvnitř balónu vyšší, tím je menší hustota vzduchu uvnitř balónu a v důsledku toho může horkovzdušný balón stoupat vzhůru.[16] Při teplotě blížící se teplotě 100 °C je hustota teplého vzduchu asi o 25 % menší než hustota okolního vzduchu. Pokud bychom uvažovali, že hustota vzduchu v okolí balónu je 1,28 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, pak můžeme říci, že 1 $\mathrm{m^3}$ teplého vzduchu má asi o 320 gramů $(1280 - 1280 \cdot 0,75 = = 320)$ menší hmotnost než 1 $\mathrm{m^3}$ vzduchu pokojové teploty.

Moderní horkovzdušné balóny ohřívají vzduch spalováním propanu. Propan je uložen v tlakových lahvích z lehkého materiálu uložených po obvodu koše. K ohřívači jsou tlakové lahve připojeny pomocí pružných hadic. Při spalování propanu roste teplota plynu v balonu. Horký vzduch nemůže z balonu v jeho spodní části uniknout, protože existuje vztlaková síla a ta ho neustále přitlačuje k vzhůru k obalu. Po určité době ale okolní chladnější vzduch ten teplý v balónu ochladí, pak je nutno opět zapnout hořáky, aby balón nezačal klesat k zemi. Pokud hořáky hoří, balón plynule stoupá[17].

Příklad 9 – horkovzdušný balón

Budeme uvažovat, že horkovzdušný balón má obal o hmotnosti 100 kg; koš, palivo, hořáky a další technické vybavení má celkovou hmotnost také 100 kg. V balónu jsou cestující, jejichž celková hmotnost je asi 300 kg. Vzduch v balónu má teplotu přibližně 100 °C. Určete na základě těchto údajů a údajů uvedených výše přibližný průměr obalu balónu.

Řešení

Celková hmotnost balónu i s příslušenstvím a cestujícími je 500 kg. Vzhledem k předchozím údajům je možno říci, že 1 $\mathrm{m^3}$ vzduchu v obalu balónu „unese“

[16] Praktické pokusy ukázaly, že vzduch v balónu nelze zahřát na teplotu vyšší než 100 °C. Při překročení této teploty by balón mohl roztát.

[17] Historická poznámka: první historický horkovzdušný balón vzlétl 21. listopadu 1783, a to ve Francii. Balón vyrobili bratři *Mongolfierové* a měl objem 2800 $\mathrm{m^3}$. Pařížský fyzik *Jacques Alexandre César Charles* zdokonalil balon tím, že ho naplnil vodíkem a tím zmenšil jeho objem na 380 $\mathrm{m^3}$. O dva roky později se *Pilâtre* stal první obětí vzduchoplavby, k čemuž došlo tím, že se mu vodíkem plněný balon vzňal. Kvůli tomu se později balóny začaly plnit dražším héliem. V současné době je možno se s horkovzdušnými balóny opět setkat – používají se především na vyhlídkové lety (obr. 57).

asi 320 gramů, tj. 0,32 kg zátěže. Hmotnost zátěže je asi 500 kg, vzduch v obalu balónu tedy musí mít objem asi $1562,5\ \mathrm{m}^3$. S použitím vztahu pro objem koule $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ pak dostaneme odpovídající průměr, tj. $d = 14{,}4$ m.

Poznámka

K tomuto výsledku jsme dospěli úvahou. K témuž výsledku lze také dospět na základě rovnice

$$mg + V\varrho_{\mathrm{n}}g = V\varrho_{\mathrm{vz}}g,$$

kde ϱ_{n} je hustota náplně balónu, ϱ_{vz} je hustota okolního vzduchu, V je objem balónu, m je hmotnost zátěže. S použitím vztahu pro objem koule a po dosazení dostaneme

$$d = 2r = 2\sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi(\varrho_{\mathrm{vz}} - \varrho_{\mathrm{n}})}} = 14{,}4\ \mathrm{m}.$$

Cvičení 8

13. První horkovzdušné balóny byly později nahrazeny balóny, které měly jako náplň vodík[18]. Uvažujte balón o průměru z příkladu 9. Určete maximální zátěž, kterou může tento balón nést, bude-li místo horkým vzduchem naplněn vodíkem o hustotě $\varrho = 0,08895\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

14. Vzhledem k tomu, že vodíková náplň balónu se ukázala jako výbušná, začaly se používat balóny plněné dražším héliem. Určete průměr balónu naplněného héliem o hustotě $\varrho = 0{,}1762\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, je-li jeho zátěž stejná jako u balónu v příkladu 9.

3.3 Zemská atmosféra

Zemská atmosféra je tvořena plynným obalem, který sahá od povrchu Země až do výšky několika desítek tisíc kilometrů. Atmosféra v převážné míře rotuje společně se Zemí. Slovo atmosféra (= plynný obal Země) vyniklo z řečtiny ATMOS = pára a SFAIRA = koule.

Pro celou atmosféru je charakteristický stálý exponenciální pokles tlaku podle vzorce (4). Proč právě exponenciální – to vychází z odvození barometrické rovnice (vzduch je stlačitelný a jednotlivé vzduchové vrstvy jsou stlačovány dalšími vrstvami vzduchu ležícími nad nimi).

Podle průběhu teploty v závislosti na výšce můžeme atmosféru rozdělit na: *troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru* a *exosféru* a několik úzkých mezivrstev mezi těmito hlavními sférami.

[18] První start tzv. *charliéry* uskutečnili *Jacques Charles* a *Nicholas Louis Robert* 1. prosince 1783 u pařížského zámku Tuilerie.

3.3.1 Rozdělení podle průběhu teploty v závislosti na výšce

Troposféra

Je nejspodnější vrstvou atmosféry, která sahá od zemského povrchu do výšky asi 11 km. Hlavním charakteristickým rysem troposféry je úbytek teploty s rostoucí .výškou, a to asi 0,65 °C na každých 100 m výšky. V troposféře se odehrává také většina jevů, které nazýváme souhrně *počasí*. V rozsahu poloviny troposféry, tj. od Země do výšky 5500 m, je soustředěna téměř polovina hmotnosti celé atmosféry, jak jsme si ukázali při řešení příkladu 8. Celá troposféra pak má hmotnost 75 % celé atmosféry, což lze ukázat užitím rovnice (4), tj.

$$p = p_0 \mathrm{e}^{-0{,}000125 \cdot 11\,000} = 0{,}25 p_0.$$

Slovo troposféra pochází z řečtiny „tropos" = „otáčet" a „sféra" = „koule". Troposféra je neustále promíchávána, takže vzduch má stálé zastoupení plynů. Je to nejnižší část atmosféry, kde se vyskytují nejvýznamnější povětrnostní jevy.

Tropopauza

Je asi 2 km silná přechodová vrstva mezi troposférou a následující vyšší sférou. Typické pro tuto vrstvu je, že teplota v této vrstvě zůstává přibližně konstantní.

Stratosféra

V této vrstvě zůstává teplota vzduchu až do výšek (20 – 25) kilometrů konstantní (asi −60 °C). Od této výšky dále se zvyšuje koncentrace ozónu a vlivem interakce se slunečním zářením dochází ke zvyšování teploty vzduchu. Ve výšce asi 50 km (horní hranice stratosféry) je teplota 0 °C.

Stratosféra je velmi důležitou částí atmosféry, neboť obsahuje ozón, který absorbuje velké množství ultrafialového záření dopadajícího na Zemi. Molekuly ozónu pohlcují krátkovlnné, především ultrafialové záření, které má zhoubný vliv na tkáně živých organismů. Díky ozónové vrstvě se k povrchu Země dostává jen asi 1 % ultrafialového záření, přicházejícího ze Slunce. Ozónová vrstva se při tom zahřívá. Tím si vysvětlujeme zvýšenou teplotu v horní vrstvě stratosféry.

Mezosféra

Mezi stratosférou a mezosférou leží opět přechodová vrstva – *stratopausa*. Mezosféra sahá do výšky 50 km až 80 km. Je pro ni charakteristický pokles teploty vzduchu −40 °C až −90 °C.

Termosféra

Také na spodní hranici termosféry leží přechodová vrstva – *mezopausa*. Termosféra sahá od výšky 80 km až do (800 až 1200) km, což je definováno výskytem polární záře. Teplota vzduchu zde nepřetržitě vzrůstá až na 1400 °C.

Exosféra

Poslední vrstvu atmosféry, v níž je neměřitelná hustota vzduchu. Část plynných částic odtud uniká do kosmu.

Příklad 9 – Kármánova hranice

Kármánova hranice je všeobecně přijímaná hranice mezi zemskou atmosférou a kosmickým prostorem. Je určena výškou 100 km nad povrchem Země. Se zvyšující se výškou klesá hustota vzduchu, a proto musí letadlo navržené pro let v určité výšce používat větší plochu křídel, nebo letět vyšší rychlostí pro dosažení vztlaku dostatečného pro vodorovný let. Plocha křídel je technicky omezená, takže je ve vysoké atmosféře nutné použít vysokou rychlost. Ve výšce Kármánovy hranice už ovšem potřebná rychlost překračuje orbitální rychlost, tudíž nemá výše smysl používat křídla. Ve Spojených státech se používá pro hranici kosmického prostoru i výška 80 km. Po jejím překročení pak vzniká nárok na označení astronaut (údaje z Wikipedie). Určete tlak vzduchu odpovídající Kármánově hranici ve výšce 80 km a 100 km v násobcích atmosférického tlaku.

Řešení

Při řešení užijeme vztah (4), pro poměr $\dfrac{p}{p_0}$ platí $\dfrac{p}{p_0} = \mathrm{e}^{-0{,}000125\,h}$.
Po dosazení za $h = 100$ km dostaneme $p = 4 \cdot 10^{-6} p_0$.
Je-li $h = 80$ km, potom $p = 5 \cdot 10^{-5} p_0$.

Příklad 10 – hmotnost zemské atmosféry

Ze znalosti hodnoty atmosférického tlaku $p_\mathrm{a} = 101\,300$ Pa odhadněte hmotnost zemské atmosféry.

Řešení

Při řešení použijeme úvahu, že atmosférický tlak je tlak způsobený vlastní tíhou vzduchu. Na 1 m^2 zemského povrchu tedy působí tlaková síla o velikosti 101 300 N. Na celý zemský povrch tedy působí tíhová síla o velikosti

$$F_G = p_a \cdot 4\pi R_z^2 = 101\,300 \cdot 4\pi \cdot (6\,378 \cdot 10^3)^2\ \mathrm{N} = 5{,}178 \cdot 10^{19}\ \mathrm{N}.$$

Známe-li velikost této tíhové síly, potom můžeme užitím vztahu $m = \dfrac{F_G}{g}$ určit, že $m = 5{,}3 \cdot 10^{18}$ kg.

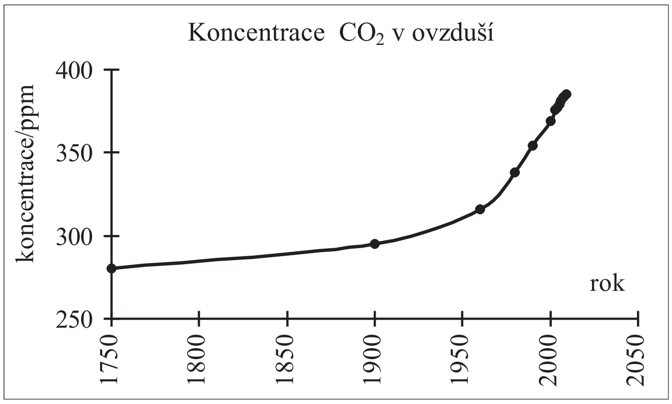
3.3.2 Složení atmosféry

Hlavními plyny v atmosféře jsou dusík N_2 (78,04 %), kyslík O_2 (20,95 %), argon Ar (0,93 %) a oxid uhličitý CO_2 (v roce 2009: 0,0385 %). Roční nárůst CO_2 je 0,0001 % (1 ppm)[19]. Ostatními plyny zastoupenými v atmosféře jsou neon Ne (0,0018 %), hélium He (0,0005 %), metan CH_4 (0,0002 %), krypton Kr (0,0001 %), vodík H_2 aj.

Příklad 11 – vývoj koncentrace CO_2 obsaženého v zemské atmosféře

Na internetu na stránkách *http://gnosis9.net/* byly uvedeny údaje o koncentraci CO_2 v ovzduší v minulosti: v roce 1750 – 280 ppm, v roce 1900 – 295 ppm, v roce 1960 – 316 ppm, v roce 1980 – 338 ppm, v roce 1990 – 354 ppm, v roce 2000 – 369 ppm, v roce 2003 – 376 ppm, v roce 2004 – 377 ppm, v roce 2005 – 379 ppm, v roce 2006 – 381 ppm, v roce 2007 – 383 ppm, v roce 2008 – 384 ppm a v roce 2009 – 385 ppm. Sestrojte z těchto údajů spojnicový graf časové závislosti koncentrace (v ppm) v Excelu.

Řešení



Obr. 58 Koncentrace CO_2

[19]Pro látky zastoupené v malém množství užíváme jednotky ppm (parts per million – částic na milion), přičemž 1 ppm = 0,0001 %; 100 % = 1 000 000 ppm.

Na stránkách *http://gnosis9.net/* se rovněž uvádí, že koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší se v roce 2007 zvýšila o 2,2 ppm na 383 ppm. V posledním desetiletí minulého století tato hodnota stoupala o 1,5 ppm za rok. Průměrný nárůst za období let 2000 až 2007 je 2 ppm za rok. Současná koncentrace oxidu uhličitého je nejvyšší za posledních 650 tisíc let a zřejmě i za posledních 20 milionů let.

Nejrychleji stoupají emise v rozvojových zemích - zejména v Indii a Číně. Od roku 2005 jsou za většinu emisí odpovědné rozvojové státy, které nejsou vázány Kjótským protokolem, jejich procentuální podíl na celkových emisích se stále zvyšuje. V roce 2007 činil už 53 procent.

Již koncem 19. století vypočítal švédský badatel *Swante Arrhenius*, který za své chemické objevy získal v roce 1903 Nobelovu cenu, že kdyby se koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře zdvojnásobila, její teplota by se mohla zvednout až o 5°C. Dnes se vědci shodují, že zvyšující se skleníkový efekt[20] způsobený větším podílem CO_2 a jiných plynů významně přispívá k současnému globálnímu oteplování.

3.4 Meteorologie

První přístrojová měření se prováděla ve francouzském městě Clermont Ferrand v roce 1649. První meteorologická síť stanic pak vznikla v Toskánsku v roce 1652. Meteorologie se zabývá základními vlastnostmi atmosféry. Zkoumá především oblast troposféry, kde probíhají veškeré jevy, které souvisí s počasím. Aby předpověď počasí byla pokud možno co nejpřesnější, zjišťují meteorologové teplotu vzduchu, tlak vzduchu, vlhkost vzduchu, proudění vzduchu, oblačnost a srážky. Řadu informací ohledně meteorologie je možno nalézt na stránkách *Českého hydrometeorologického ústavu*, na adrese *http://www.chmi.cz/*.

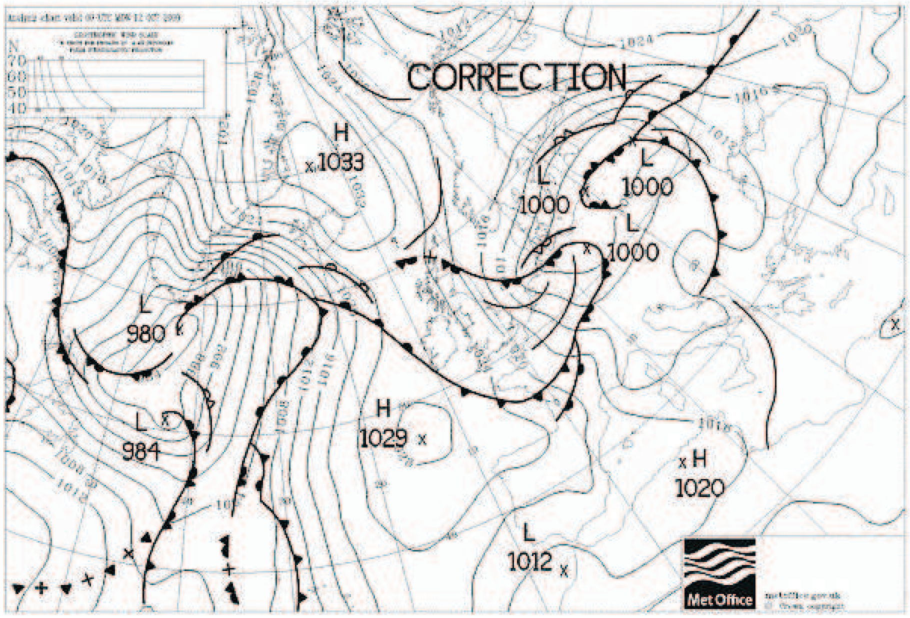
Všichni dobře víte, že atmosférický tlak není na různých místech zemského povrchu stejný, protože vzduch je v neustálém pohybu, mění se jeho proudění, teplota i vlhkost. K průběžnému sledování změn tlaku vzduchu používáme již dříve zmiňovaný barograf (obr. 51).

Prouděním vzduchu v atmosféře vznikají na různých místech zemského povrchu atmosférické fronty, které oddělují dvě vzduchové oblasti o různé teplotě (oblast studeného a teplého vzduchu). Z hlediska vývoje tlakových útvarů je pro meteorologii zajímavé sledovat vývoj tzv. *tlakových útvarů*: *tlakové výše* a *tlakové níže*.

[20] Pojem skleníkový efekt použil jako první francouzský vědec J. B. J. Fourier. Pochází od skleníků užívaných v zahradnictví, nejedná se však o příliš přesné pojmenování, neboť skleníky pracují na jiném principu: skleník je vybudován ze skla; ohřívá se přímo, neboť Slunce ohřívá zemi okolo něj, od ní se ohřívá vzduch nad ní a sklo brání ohřátému vzduchu stoupat a uniknout pryč.

Tlaková výše (anticyklona) je tlakový útvar, který je na meteorologické mapě vyjádřen alespoň jednou uzavřenou izobarou. Anticyklonu charakterizuje proudění vzduchu ve směru hodinových ručiček. Na mapě se označuje písmenem H (v češtině V) (obr. 59 [21]). Směrem do středu tlakové výše tlak stoupá. Tlakovou výši charakterizuje sestupný pohyb vzduchu. Tím se brzdí vývoj oblačnosti. V létě se tlaková výše projevuje málo oblačným počasím, beze srážek, se slabým větrem nebo bezvětřím. V zimě však většinou dochází ke tvorbě *inverze*, tj. ke vzniku mlh a nízké inverzní oblačnosti.

Tlaková níže (cyklona) je oblast se sníženým tlakem vzduchu. Charakterizuje ji cirkulace vzduchu proti směru hodinových ručiček. Směrem do středu tlakové níže tlak klesá a vzrůstá rychlost větru. V tlakové níži převládají vzestupné pohyby vzduchu, které podporují rozvoj oblačnosti. Na synoptických mapách se střed tlakové níže označuje písmenem L (v češtině N) (obr. 59). V cyklónách proto převládá oblačné počasí s trvalejšími srážkami a dosti silným větrem. Aktuální předpověď počasí je možno sledovat např. na adrese *http://www.ct24.cz/pocasi/*.



Obr. 59 Synoptická mapa

[21] Zdroj [21].

Výsledky cvičení

1. $F_2 = \frac{S_2}{S_1} F_1 = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \cdot mg = 39$ N.

2. a) $F_1 = \frac{W}{n \cdot s_1} = \frac{20}{5 \cdot 0{,}1}$ N $= 40$ N, b) $s_2 = \frac{W}{F_2} = \frac{20}{1000 \cdot 9{,}81}$ m $=$ $= 2 \cdot 10^{-3}$ m $= 0{,}2$ cm, c) $\frac{S_2}{S_1} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{s_1 \cdot F_2}{W} = \frac{5 \cdot 0{,}1 \cdot 1000 \cdot 9{,}81}{20} = 245$.

3. Potápěč při sběru mořských hub $p_{\mathrm{h1}} = 0{,}15$ MPa $= 1{,}5\,p_0$; záchranná ponorka $p_{\mathrm{h2}} = 20$ MPa $= 200\,p_0$; ponorka Nautilus $p_{\mathrm{h3}} = 38$ MPa $= 380\,p_0$; batyskaf Trieste $p_{\mathrm{h4}} = 110$ MPa $= 1\,100\,p_0$; ponorka Nereus $p_{\mathrm{h5}} = 110$ MPa $=$ $= 1\,100\,p_0$.

4. V plících je atmosférický tlak, okolo přetlak.

5. Na dno 927 N, působiště v těžišti obdélníku o rozměrech $a \times b$. Na boční stěny o rozměrech $b \times c$ síla 695 N, působiště tlakové síly je v rovině stěny v hloubce 30 cm pod vodní hladinou, ve vodorovném směru ve vzdálenosti 35 cm od jedné ze svislých hran ohraničujících stěn. Na boční stěny o rozměrech $a \times c$ síla 298 N, působiště tlakové síly je v rovině stěny opět v hloubce 30 cm pod vodní hladinou, ve vodorovném směru ve vzdálenosti 15 cm od jedné ze svislých hran ohraničujících stěn.

6. 949 kN, $y' = 1{,}53$ m, $y' + h_1 = 21{,}53$ m.

7. 1,4 kPa, 13 N.

8. $S = \frac{m}{\Delta h \varrho_{\mathrm{v}}} = 100\ \mathrm{m}^2$.

9. $\varrho = 500\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$.

10. Nejvyšší hory světa podle světadílů (p_0 je tlak na hladině moře):
Severní Amerika – Mount Mc Kinley – 6194 m; tlak $0{,}46\,p_0$,
Jižní Amerika – Aconcagua – 6959 m; tlak $0{,}42\,p_0$,
Evropa – Mont Blanc – 4808 m; tlak $0{,}55\,p_0$,
Antarktida – Vinson Massif – 4897 m; tlak $0{,}54\,p_0$,
Asie – Mount Everest – 8850 m; tlak $0{,}33\,p_0$,
Afrika – Killimanjaro – 5892 m; tlak $0{,}48\,p_0$,
Oceánie – Mount Wilhelm – 4509 m; tlak $0{,}57\,p_0$ (Papua – Nová Guinea).

13. $m_1 = \frac{4}{3}\pi r^3(\varrho_{\mathrm{vz}} - \varrho_{\mathrm{H}})$, po dosazení za r z příkladu 9 dostaneme

$$m_1 = \frac{\varrho_{\mathrm{vz}} - \varrho_{\mathrm{H}}}{\varrho_{\mathrm{vz}} - \varrho_{\mathrm{n}}} m = 1860 \text{ kg}.$$

Při stejné hodnotě zátěže by stačil balónu plněnému vodíkem menší průměr ($d = 9{,}1$ m) než by měl horkovzdušný balón.

14. Stejný postup jako v příkladu 9: $d_{\mathrm{He}} = 9{,}5$ m.

Literatura

[1] VYBÍRAL, B. *Mechanika ideálních kapalin.* Hradec Králové: MAFY, 2003.

[2] VYBÍRAL, B. *Mechanika ideálních plynů.* Hradec Králové: MAFY, 2004.

[3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika.* Praha: Prometheus, 2000.

[4] VONDRÁČEK, V., STŘEDA, I., MAMULA, V., HLINKA, M. *Mechanika IV.* Praha: SNTL, 1977.

[5] KRAUS, I. *Fyzika v kulturních dějinách Evropy I. – IV.* Praha: ČVUT, 2006, 2007.

[6] BEDNAŘÍK, M., ŠIROKÁ, M. *Fyzika pro gymnázia – mechanika.* Praha: Prometheus, 2000.

[7] BEDNÁŘ, J. *Meteorologie.* Praha: Portál, s.r.o., 2003.

[8] HORÁK, Z., KRUPKA, F. *Fyzika.* Praha: SNTL, 1981.

[9] BACKE, H. *Fyzika z vlastních pozorování.* Praha: SPN, 1973.

[10] <http://www.wikipedia.cz/.>

[11] <http://www.w3c.org/.>

[12] <http://www.math.nyu.edu/~crorres/Archimedes/.>

[13] <http://www.vacuum-guide.com/.>

[14] <http://digiweb.ihned.cz/.>

[15] <http://www.lidovky.cz/.> (7. září 2009)

[16] <http://meteostanice.e-pocasi.cz/.>

[17] <http://www.tyden.cz/.> (24. června 2009)

[18] <http://www.chmi.cz/.>

[19] <http://www.ct24.cz/pocasi/.>

[20] <http://www.novinky.cz/static/js/novinky_ all.js?38. >

[21] <http://pocasi.astronomie.cz/meteo03.htm.>

Fotografie a obrázky, u nichž nejsou uvedeny zdroje, vytvořila Miroslava Jarešová.