Kapitola 8

Mechanika tekutin

Víte, že…

Tlak vzduchu je jedním z nejdůležitějších meteorologických údajů. Změny tlaku vzduchu totiž souvisí se změnami počasí. Zařízení, které změny tlaku vzduchu registruje, může být velmi jednoduché. Stačí skleněná baňka s jedním uzavřeným a jedním otevřeným koncem naplněná tekutinou (viz obrázek 8-1). Podobná zařízení používali zejména námořníci. Jak z polohy hladiny poznali, že se blíží bouře?

Obrázek 8-1.
Historické provedení nejjednoduššího barometru – skleněné nádoby s jedním uzavřeným a jedním otevřeným koncem naplněné tekutinou.

Cíle

1. **Poznáte dvě důležité charakteristiky tekutin – hustotu a tlak.**
2. **Seznámíte se se základy hydrostatiky, části fyziky zkoumající tekutiny v klidu. Dozvíte se co je to tlak, jak se vypočítá a měří hydrostatický tlak v kapalině nebo atmosférický tlak. Poznáte Archimédův zákon.**
3. **Seznámíte se se základy hydrodynamiky, která se zabývá pohybem tekutin. Naučíte se používat rovnici kontinuity a Bernoulliovu rovnici.**

8.1. Tekutiny

Tekutinami rozumíme látky, které „tečou". To znamená, že **nemají stálý tvar**, ale přizpůsobují se tvaru nádob, do kterých je umístíme. Patří sem proto jak **kapaliny,** tak **plyny**. Přestože se jedná o dvě odlišná skupenství hmoty, mají mnoho společných vlastností.

Na dvou nejdůležitějších tekutinách – vodě a vzduchu – závisí život na Zemi. Bez poznání a využití jejich mechanických vlastností by také náš dnešní život vypadal docela jinak. Měření tlaku vzduchu nám umožňuje předpovídat počasí, proudící vzduch pohání plachetnice a větrné elektrárny. Díky podrobnému studiu proudění vzduchu můžeme konstruovat letadla. Základní zákony mechaniky tekutin využívají hydraulická zařízení sloužící k přenosu a zvětšování síly například v brzdách automobilu.

8.2. Hustota

Pro každou oblast studovaných jevů používá fyzika určité charakteristické veličiny. V případě pohybu tuhých těles jsou základními veličinami hmotnost tělesa a síla na ně působící (pro otáčivý pohyb ještě moment síly). Pro popis chování tekutin nejsou tyto veličiny vhodné. Tekutina totiž tvoří jediné spojité těleso, jehož vlastnosti se mohou bod od bodu měnit. Pokud nás zajímá, co se děje „uvnitř" tekutého tělesa a nehledíme přitom až na úroveň atomů a molekul, použijeme jako charakteristické veličiny **hustotu** a **tlak**.

Hustotu známe jako charakteristiku stejnorodého tělesa. Definujeme ji jako podíljeho hmotnosti m a objemu V,

$$\boxed{\rho = \frac{m}{V}.}$$

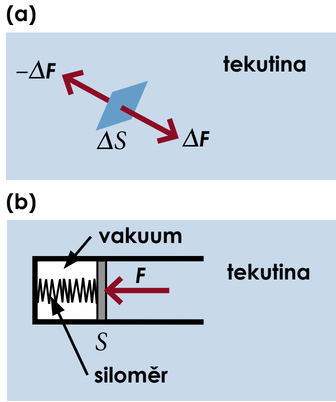
Její jednotkou je kg·m^{-3}. Hustota těles, a tedy i tekutiny, se však může spojitě měnit, například hustota vzduchu v atmosféře se zmenšuje s nadmořskou výškou. Uvedený vzorec pak udává **průměrnou hustotu tělesa** nebo jaho části o objemu V. Potřebujeme také definici hustoty pro určité místo tekutiny. Dospějeme k ní tak, že vymezíme kolem tohoto místa jen malý objem ΔV, ve kterém se nachází tekutina o hmotnosti Δm. Přitom objem ΔV můžeme zvolit libovolně malý a dostat tak **hustotu tekutiny v daném bodě** jako $\rho = \Delta m / \Delta V$.

V souvislosti s hustotou připomeňme ze zkušenosti dobře známý rozdíl mezi kapalinou a plynem. Stlačíme-li plyn, jeho hustota se výrazně mění – zvyšuje se. Při rozpínání naopak klesá. Hustota kapaliny je naopak téměř neměnná. Například hustota vody na dně oceánu, kde je obrovský tlak, je téměř stejná jako hustota vody na hladině. Proto můžeme bez problémů používat model **nestlačitelné kapaliny**.

8.3. Tlak

V závěru předchozího odstavce jsme použili slovo „tlak". Nyní si ukážeme, o jakou veličinu jde. Vzpomínáte si na tlakové síly, jimiž na sebe působí tělesa v přímém kontaktu? Například v odstavci 4-6 jsme se seznámili s kolmou tlakovou silou. Pro všechny tlakové síly je typické, že působí podél rozhraní těles a v každém bodě jsou kolmé k tomuto rozhraní. Připomeňme si třeba jednoduchou situaci člověka stojícího na podlaze. Podlaha působí na člověka kolmou tlakovou silou a stejně velkou ale opačně orientovanou silou působí také člověk na podlahu. Obdobná situace je i v tekutině. Tlakovými silami kolmými na rozhraní na sebe navzájem působí nejen stěny či dno nádoby a tekutina, ale i jednotlivé části tekutiny navzájem. Je-li tekutina v klidu, je vzájemné působení mezi částmi kapaliny vždy kolmé k rozhraní. Protože směr působení tlakové síly je vždy určen směrem rozhraní, stačí charakterizovat jeho velikost. V okolí libovolného bodu v tekutině zvolíme malou plochu ΔS, kterou můžeme libovolně zmenšovat. Označme ΔF Velikost síly, kterou na sebe působí dvě části kapaliny z obou stran vymezené plochy (viz obrázek 8-2a). Tlak v tomto bodě tekutiny definujeme jako podíl

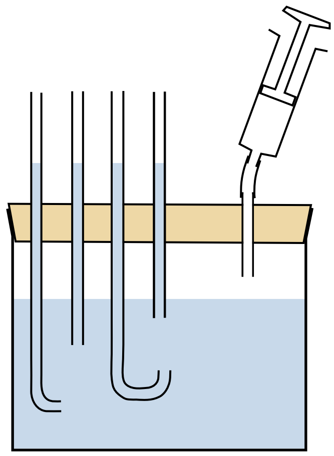
$$\boxed{p = \frac{\Delta F}{\Delta S}.}$$



Obrázek 8-2.
(a) Definice tlaku.
(b) Princip jednoduchého přístroje na měření tlaku. Přístroj pomocí siloměru měří, jakou silou ΔF působí tekutina na plochu pístu známé velikosti ΔS.

Uvědomme si, že hodnota tlaku nezávisí na velikosti zvolené plochy ΔS, protože při zmenšování plochy se zmenšuje také tlaková síla ΔF. Jednotka tlaku je podle definice $N \cdot m^{-2}$. Tato jednotka má svůj vlastní název pascal (Pa) podle francouzského matematika, fyzika a filozofa Blaise Pascala. S dalšími jednotkami tlaku se ještě seznámíme později.

Jak můžeme tlak měřit? Jendoduchý model měřiče tlaku ukazuje obrázek 8-2b. Na píst působí z jedné strany tekutina tlakovou silou a z druhé strany pružina. Je-li píst v klidu, musí být obě síly v rovnováze. Velikost tlakové síly můžeme určit ze stlačení pružiny a pomocí plochy pístu S spočítat tlak. V praxi se používají nejrůznější měřiče tlaku neboli **manometry** založené na uvedeném principu rovnováhy sil.



Obrázek 8-3.
Nádoba s vodou je vzduchotěsně uzavřena zátkou, v níž jsou zasunuté trubice. Pomocí další trubičky připojené k pístu můžeme nyní zvětšit tlak vzduchu na hladině vody. Podle Pascalova zákona se tato změna tlaku objeví ve všech místech tekutiny. Voda ve všech trubičkách vystoupí do stejné výšky.

8.4. Pascalův zákon

Poté, co jsme definovali základní veličiny, můžeme podrobněji prozkoumat vlastnosti tekutin. V tomto odstavci si všimneme důležitého zákona, který objevil už výše zmiňovaný Blaise Pascal.

Představme si nádobu s vodou uzavřenou vzduchotěsně zátkou, v níž jsou v různých místech zasunuty trubice různého tvaru (viz obrázek 8-3). Pomocí další trubice napojené na píst můžeme zvětšit tlak vzduchu na hladině vody. Podle výstupu hladiny v trubicích můžeme sledovat, jak se změní tlak v různých místech kapaliny. Po provedení pokusu zjistíme, že okamžitě po stlačení pístu vystoupí voda ve všech trubicích o stejnou hodnotu. Zobecnění tohoto poznatku je obsahem **Pascalova zákona**

Působíme-li na tekutinu tlakovou silou, objeví se příslušná změna tlaku ve všech místech tekutiny i na stěnách nádoby, ve které je tekutina uzavřena.

Změna tlaku se v tekutině šíří konečnou rychlostí. Tato rychlost je však zpravidla tak velká vzhledem k rozměrům tekutého tělesa, že změnu tlaku pozorujeme okamžitě ve všech místech tekutiny.

Pomocí Pascalova zákona můžeme snadno vysvětlit princip **hydraulického zařízení**, které se používá k přenosu a zvětšování sil. Setkáme se s ním nejčastěji u automobilových brzd, hydraulického lisu nebo ovládání stavebních strojů. Princip hydraulického zařízení ukazuje obrázek 8-4. Jeho základem jsou dva písty s různými obsahy průřezu S_1 a S_2 spojené pevnou trubicí. Celé zařízení je uzavřeno a je naplněno kapalinou. Na píst s menším obsahem S_1 působíme silou o velikosti F_1, což způsobí přírůstek tlaku $\Delta p = F_1/S_1$. Podle Pascalova zákona se stejná změna tlaku objeví také v místě druhého pístu, na který bude kapalina působit silou o velikosti

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

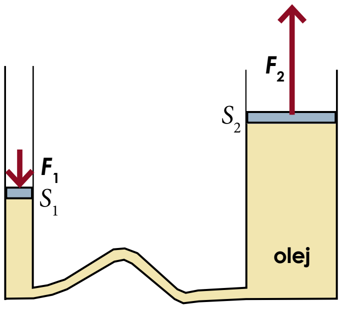
Vidíme, že poměr S_2/S_1 určuje, kolikrát větší (případně menší) je velikost síly F_2 oproti F_1. Zpravidla chceme sílu zvětšovat, proto působíme na užší píst, tak jako na obrázku 8-4. Mohlo by se zdát, že hydraulické zařízeni zvětšuje sílu „zadarmo“, ale není tomu tak. „Cenou“ za zvětšení síly je zmenšení vzdálenosti, o kterou se širší píst posune (objem nestlačitelné kapaliny musí zůstat zachován). Díky tomu je práce síly $\boldsymbol{F}_1$ stejně velká jako práce vykonaná zvětšenou silou $\boldsymbol{F}_2$.

8.5. Hydrostatický tlak

Ponorky, které se ponořují do velkých hloubek oceánu, musí mít pevnou konstrukci odolávající velkým tlakovým silám. Naopak tlak vzduchu klesá s rostoucí nadmořskou výškou. Z podobných zkušeností víme, že tlak v tekutině roste s přibývající hloubkou pod hladinou. Zkusme nyní odpovědět na otázku, kde se tento tlak bere a na čem přesně závisí jeho velikost.

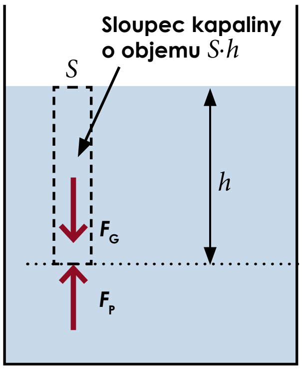
Tlak, který se objevuje v kapalině v klidu umístěné v tíhovém poli, se nazývá **hydrostatický tlak**. Představme si pro jednoduchost takovou situaci, kdy na hladinu kapaliny nepůsobí žádná síla, tedy že tlak na hladině je nulový. Na kapalinu bude působit pouze tíhová síla. Uvažme nyní, jaké síly budou působit na vzorek kapaliny, který se nachází v pomyslném válci s plochou podstavy S a výškou h (viz obrázek 8-5). Bude na něj působit tíhová síla $F_G = mg = Sh\rho g$, kde je ρ hustota kapaliny a g je velikost tíhového zrychlení (Sh je objem válce). Je-li kapalina v klidu, pak stejně velkou ale opačně orientovanou silou musí na sloupec kapaliny působit okolní voda. Musí se jednat o tlakovou sílu $\boldsymbol{F}_P$, která působí na spodní podstavu válce o ploše S, neboť síly působící zboku se vyruší. Velikost tlakové síly můžeme zapsat pomocí tlaku jako $F_P = pS$. Porovnáním velikostí obou sil dostaneme

$$F_G = F_P \quad \Rightarrow \quad Sh\rho g = pS \quad \Rightarrow \quad p = h\rho g.$$

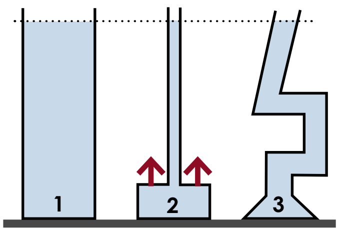


Obrázek 8-4.
Hydraulické zařízení převádí menší sílu F_1 na větší F_2.

Tlakové změny se v daném prostředí šíří rychlostí zvuku. Rychlost zvuku ve vzduchu je za běžných podmínek $330\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, ve vodě $1500\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$.



Obrázek 8-5.
Hydrostatický tlak v hloubce h je dán tíhou vodního sloupce výšky h.



Obrázek 8-5.
Tlak v kapalině na dně všech nádob je stejný. Přesto působí každá nádoba na podložku jinou silou. Tento zdánlivý paradox se snadno vysvětlí, uvědomíme-li si, že kapalina působí tlakovou silou na všechny stěny nádoby, nejen na její dno. U nádoby číslo 2 jsou vyznačeny tlakové síly, kterými kapalina působí na nádobu směrem nahoru.

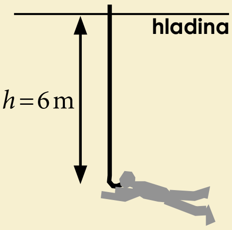
Vidíme, že hydrostatický tlak závisí jen na hloubce pod hladinou, hustotě kapaliny a tíhovém zrychlení. Nezávisí na tvaru nádoby, jak ukazuje obrázek 8-5.

Při odvození vztahu pro hydrostatický tlak jsme uvažovali, že tlak na hladině kapaliny je nulový. Změníme-li tlak na hladině na hodnotu p_0, potom podle Pascalova zákona se tato změna projeví ve všech místech kapaliny, proto pro **celkový tlak v hloubce *h*** pod hladinou kapaliny bude platit

$$\boxed{p = p_0 + h\rho g.}$$

Příklad 8-1

Potápěč-kutil předpokládá, že když dobře funguje sací trubice dlouhá 20 cm, bude fungovat i trubice dlouhá 6 m, se kterou by se mohl potápět do větší hloubky.
Vypočtěte, jaký je rozdíl Δp mezi tlakem v jeho plicích při přiložení trubice k ústům a tlakem okolní vody, potopí-li se do hloubky $h = 6$ m (viz obrázek). Jaké nebezpečí mu hrozí?



Celkový tlak v hloubce h pod hladinou vody je $p = p_0 + h\rho g$. Tělo potápěče se působením tohoto tlaku mírně smrští tak, aby se tlak v těle vyrovnal s okolím. Když potápěč přiloží trubici k ústům, tlak v jeho plicích poklesne na hodnotu p_0, která je na hladině. Dosadíme-li hustotu vody $\rho = 1000\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ a $g = 10\,\mathrm{m\cdot s^{-2}}$ dostaneme, že rozdíl tlaku v plicích a tlakem okolní vody je

$$\Delta p = h\rho g = 6\,\mathrm{m}\cdot 1000\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}\cdot 9{,}8\,\mathrm{m\cdot s^{-2}} = 59\,\mathrm{kPa}.$$

Důsledkem takového rozdílu tlaku je selhání plic způsobené tím, že do nich vnikne krev, jež má výrazně větší tlak než vzduch v plicích.

8.6. Atmosférický tlak

Zemská atmosféra dosahuje do výšky několika stovek kilometrů nad povrch Země. Tvoří plynné těleso umístěné v tíhovém poli, a proto je na místě očekávat, že pod „hladinou“ této tekutiny bude značný tlak, podobně jako pod hladinou moře. Tento tlak vzduchu v atmosféře se nazývá **atmosférický tlak**. Jeho hodnotu nemůžeme jednoduše vypočítat podle vztahu pro hydrostatický tlak $p = h\rho g$, protože jak hustota vzduchu, tak velikost gravitačního zrychlení se s výškou nad povrchem Země zmenšují. Proto se raději zaměříme na to, jak hodnotu atmosférického tlaku změřit.

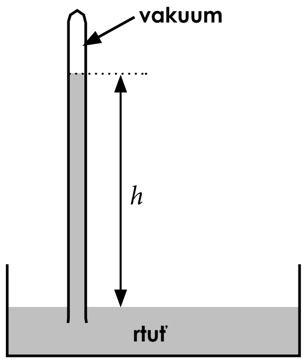
Jako prvnímu se povedlo změřit atmosférický tlak Italovi **G. E. Torricellimu** v roce 1643. Torricelli vlastně sestrojil první **rtuťový barometr**, přístroj k měření atmosférického tlaku. Je to alespoň 80 cm dlouhá skleněná, z jedné strany uzavřená trubice, kterou po naplnění rtutí obrátíme do otevřené nádoby se rtutí (viz obrázek 8-8). Hladina rtuti v trubici klesne a ustálí se ve výšce h nad volnou hladinou v nádobě. V horní uzavřené části trubice nad hladinou rtuti není vzduch, ale pouze páry rtuti, jejichž tlak je za pokojové teploty tak malý, že jej můžeme zanedbat. Prostor, kde je zanedbatelně malý tlak, se nazává **vakuum**.

Atmosférický tlak p_a určíme ze změřené výšky h rtuťového sloupce. V dolní části trubice nacházející se v hloubce h pod horní hladinou rtuti (kde je tlak nulový) je hydrostatický tlak $h\rho g$, kde $\rho = 13\,546\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ je hustota rtuti. Toto místo

Víte, že...

Vážné nebezpečí hrozí potápěčům při použití dýchacího přístroje. Stoupá-li potápěč při vynořování příliš rychle, bez dodržení bezpečnostních přestávek a bez vydechování, dojde k obrácené situaci než v příkladu 8-1. Tlak vzduchu v okolí bude větší než tlak v těle. Díky tomu se plyn rozpuštěný v krvi a tkáních může uvolnit a vytvořit malé bublinky. V srdci nebo v mozku může vzduchová bublinka způsobit smrtelně nebezpečnou embolii – ucpání cévy.

Obrázek 8-7.
Při potápění můžete obdivovat krásy podmořského života. Ale neznalost fyzikálních zákonů vás může stát život.



Obrázek 8-8.
Torricelliho pokus.

Pro pokles atmosférického tlaku s nadmořskou výškou h se dá odvodit přibližný vztah

$$p_a = p_0 e^{-\frac{\rho_0 hg}{p_0}},$$

kde p_0 je tlak v nulové výšce a ρ_0 hustota vzduchu v nulové výšce, $e = 2{,}718$ je Eulerovo číslo (matematická konstanta). Pro přibližný výpočet můžeme dosazovat hodnoty

$$p_0 = 100\,\mathrm{kPa} \text{ a } \rho_0 = 1{,}3\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}.$$

Pro některé známé vrcholy dostaneme tyto hodnoty tlaku:

Petřín - 324 m	96 kPa
Sněžka - 1602 m	81 kPa
Mt. Blanc - 4807 m	62 kPa

je zároveň na úrovni volné hladiny rtuti v nádobě, kde je pouze vnější – atmosférický tlak p_a. Proto platí $p_a = h\rho g$.

V nevelké nadmořské výšce změříme hodnotu h kolem 75 cm a tedy atmosférický tlak je přibližně

$$p_a = h\rho g = 0{,}75\,\mathrm{m} \cdot 13\,546\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} \cdot 9{,}8\,\mathrm{m{\cdot}s^{-2}} = 10^5\,\mathrm{Pa} = 100\,\mathrm{kPa}.$$

Jak jsme již uvedli, **atmosférický tlak silně závisí** na vzdálenosti od povrchu Země, tedy **na nadmořské výšce** h. Už v nadmořské výšce kolem 5500 m je tlak vzduchu poloviční oproti tlaku na hladině moře. Několik příkladů a přibližný vztah pro závislost atmosferického tlaku na nadmořské výšce najdete v poznámce vlevo.

Zemská atmosféra není úplně pravidelná a nehybná vrstva vzduchu, proto se tlak vzduchu mírně mění také v závislosti na zeměpisné poloze a na čase. Změříme-li tlak vzduchu ve stejné nadmořské výšce ale na různých místech Zemského povrchu, zjistíme, že hodnoty se od sebe o něco liší. Právě toto **horizontální rozložení tlaku** určuje charakter počasí, proto se podrobně studuje v meteorologii. My se jím nebudeme podrobněji zabývat.

Z praktických důvodů byla dohodnuta určitá hodnota tlaku, která se označuje jako **normální atmosférický tlak** $p_n = 101{,}325\,\mathrm{kPa}$. Tato hodnota odpovídá ve rtuťovém barometru při teplotě 0^0C výšce rtuťového sloupce $h = 760$ mm. Z této dohody vychází také další používané jednotky tlaku atmosféra a torr:

$$1\,\mathrm{atm} = 101{,}325\,\mathrm{kPa} = 760\,\mathrm{torr}.$$

Příklad 8-2

Jak dlouhou trubici budeme potřebovat, chceme-li sestrojit barometr (viz obrázek 8-7) naplněný místo rtuti vodou? Jak vysoký vodní sloupec h by odpovídal tlaku 1 atm? Hustota vody je $\rho = 1000\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$.

V tomto barometru porovnáváme atmosférický tlak s hydrostatickým tlakem vodního sloupce, proto

$$p_a = h\rho g \Rightarrow h = \frac{p_a}{\rho g}.$$

Dosadíme-li tlak $p_a = 1\,\mathrm{atm} = 101{,}325\,\mathrm{kPa}$, dostaneme

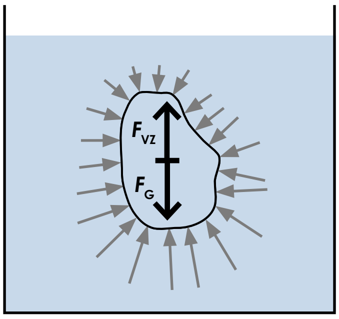
$$h = \frac{101{,}325\,\mathrm{kPa}}{1000\,\mathrm{kg^{-3}{\cdot}9{,}8\,m{\cdot}s^{-2}}} = 10{,}3\,\mathrm{m}.$$

Tlaku jedné atmosféry odpovídá hydrostatický tlak přibližně desetimetrového sloupce vody. Trubice proto musí mít alespoň deset metrů.

8.7. Vztlaková síla

Ze zkušenosti dobře víme, že každé těleso ponořené do tekutiny je nadlehčováno. Řečeno jazykem fyziky – působí na něj síla svisle vzhůru (proti směru tíhové síly), která se nazývá **vztlaková síla**. Díky vztlakové síle člověk ve vodě může plavat, lodě zůstávají na hladině a vzducholodě mohou vzlétnout.

Odvodit vztah pro velikost vztlakové síly nebude obtížné. Představme si, že pod vodní hladinu umístíme velmi tenký pytlík se zanedbatelnou hmotností naplněný vodou (viz obrázek 8-9). Pytlík nám slouží vlastně jen k ohraničení tělesa tvořeného vodou. Toto těleso je pod hladinou ve statické rovnováze, nestoupá ani neklesá. To znamená, že výsledná působící síla musí být nulová. Ovšem na



Obrázek 8-9.
Pytlík s vodou je ve statické rovnováze, tíhová a vztlaková síla se vyruší.
Vztlaková síla je způsobena vzrůstem tlaku s hloubkou. Šipky představují elementární tlakové síly, působící na těleso. Jejich výslednice směřuje vzhůru.

vodu v pytlíku působí tíhová síla $\boldsymbol{F_G}$, proto na ni okolní voda musí působit stejně velkou ale opačně orientovanou vztlakovou silou $\boldsymbol{F_{VZ}}$. Vztlaková síla v kapalině vzniká jako důsledek toho, že hydrostatický tlak roste s hloubkou, jak ukazuje obrázek 8-9. Elementární tlakové síly působící na spodní část tělesa jsou větší než na vrchní část a součtem všech těchto sil je výsledná vztlaková síla. Porovnáním velikostí tíhové a vztlakové silý dostaneme

$$F_{VZ}=F_G \quad => \quad F_{VZ}=mg=V\rho_K g,$$

kde m je hmotnost kapaliny v pytlíku, V jeho objem a ρ_K hustota vody.

Když pytlík s vodou nahradíme tělesem stejného tvaru s větší hustotou, například kamenem, rozložení tlaku v kapalině se nezmění. Vztlaková síla zůstane stejná. Kámen bude klesat jen díky tomu, že na něj působí větší tíhová síla. Obrácená situace nastane, nahradíme-li pytlík s vodou tělesem s menší hustotou než je hustota kapaliny, například dřevem. Vztlaková síla je stále stejná, ale tíhová síla se zmenší, proto se dřevo bude pohybovat vzhůru. Všechny tři možnosti shrnuje obrázek 8-10. Když dřevěné těleso vystoupá k hladině, část se ho vynoří a nastane opět rovnováha sil. **Vztlaková síla** totiž **působí jen na ponořenou část tělesa**.

Nyní můžeme shrnout naše úvahy a vyslovit **Archimédův zákon:** Na těleso ponořené do tekutiny působí vztlaková síla o velikosti

$$\boxed{F_{VZ}=V\rho_K g,}$$

kde V je objem ponořené části tělesa, ρ_K je hustota tekutiny a g je velikost tíhového zrychlení.

Příklad 8-3

Horkovzdušný balón má objem $V=3000\,\mathrm{m^3}$. Hmotnost samotného balónu včetně konstrukce a koše je $m_B=320\,\mathrm{kg}$. Při průměrné teplotě vzduchu uvnitř balónu $t_B=70^0\mathrm{C}$ je hustota vzduchu $\rho_B=1{,}023\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$. Vypočtěte nosnost balónu, tj. jakou hmotnost ještě unese
(a) v létě při teplotě $20^0\mathrm{C}$, kdy je hustota okolního vzduchu $\rho_{20}=1{,}204\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$,
(b) v zimě při teplotě $0^0\mathrm{C}$, kdy je hustota okolního vzduchu $\rho_0=1{,}295\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$.

Na náklad hmotnosti m plus balón o hmotnosti m_B plus vzduch uvnitř balónu o hmotnosti $m_B=V\rho_B$ působí tíhová síla o velikosti

$$F_G=(m+m_B+m_V)g=(m+m_B+V\rho_B)g.$$

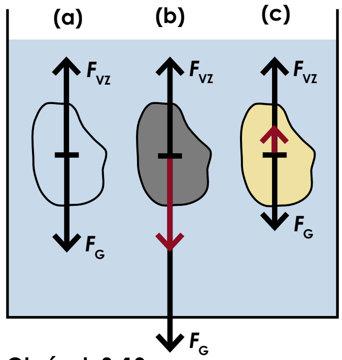
Vztlaková síla má velikost $F_{VZ}=V\rho g$, kde ρ je hustota okolního vzduchu. Objem nákladu můžeme vzhledem k objemu celého balónu zanedbat.
Aby se balón udržel ve vzduchu (nezačal klesat), musí být obě síly stejně velké, tedy

$$F_G=F_{VZ} \quad => \quad (m+m_B+V\rho_B)g=V\rho g \quad => \quad m+m_B+V\rho_B=V\rho \quad => \quad m=V(\rho-\rho_B)-m_B.$$

Dostali jsme obecný výsledek a můžeme dosadit číselné hodnoty:

(a) léto: $\rho_{20}=1{,}204\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}} \quad => \quad m=3000\,\mathrm{m^3}\cdot(1{,}204-1{,}023)\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}-320\,\mathrm{kg}=223\,\mathrm{kg}$,
(b) zima: $\rho_0=1{,}295\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}} \quad => \quad m=3000\,\mathrm{m^3}\cdot(1{,}295-1{,}023)\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}-320\,\mathrm{kg}=496\,\mathrm{kg}$.

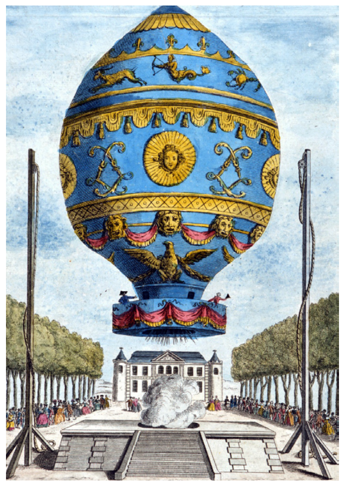
V létě by tedy balón unesl přibližně tři osoby. Nosnost balónu v zimě při teplotě okolí $0^0\mathrm{C}$ nám vyšla přibližně dvojnásobná. Ve skutečnosti by byl rozdíl o něco menší, neboť vzduch v balónu bude chladnout během styku s okolím.



Obrázek 8-10.
Vztlaková a tíhová síla určují výslednou sílu, která působí na ponořené těleso.
(a) Pytlík s vodou se vznáší,
(b) kámen klesá,
(c) Dřevo stoupá.

Víte, že...

Vztlakové síly ve vzduchu využívají balóny a vzducholodě. Aby balón vzlétl, musí být jeho průměrná hustota včetně konstrukce a nákladu menší než hustota okolního vzduchu. Toho se dosahuje buď použitím plynů lehčích než vzduch (vodík, helium) nebo snížením hustoty samotného vzduchu jeho ohřátím.


Obrázek 8-11. První pilotovaný let balónem uskutečnili bratři Montgolfiérové v Paříži 21. listopadu 1783. Jejich horkovzdušný balón byl vyroben z papíru. První let trval 25 minut a balón při něm vystoupal do výšky přes 100 m nad Paříž.

8.8. Proudění tekutin

Studium proudění tekutin je velmi důležité v mnoha oborech, například v letectví nebo při konstrukci lodí a automobilů. Energii proudící tekutiny využívají vodní a větrné elektrárny. Proudění vzduchu v atmosféře je zase rozhodující pro studium podnebí a počasí. Podle druhu proudící tekutiny rozlišujeme **hydrodynamiku**, zkoumající proudění kapalin, a **aerodynamiku**, specializovanou na proudění plynů.

Podíváme-li se na proudění vody v peřejích nebo proudění vzduchu při silném větru, uvědomíme si, že pohyb tekutiny je velmi složitý oproti pohybu hmotného bodu nebo tuhého tělesa. Jednotlivé částice tekutiny se totiž mohou pohybovat různými rychlostmi, mezi nimiž jen výjimečně najdeme nějaký jednoduchý vztah, jako tomu bylo například u otáčivého pohybu tuhého tělesa. Problémy týkající se pohybu **reálných tekutin** jsou proto často velmi obtížně řešitelné. Základní principy hydrodynamiky však můžeme pochopit, použijeme-li jednoduchý model tzv. **ideální kapaliny** a omezíme-li se jen na **ustálené laminární proudění**.

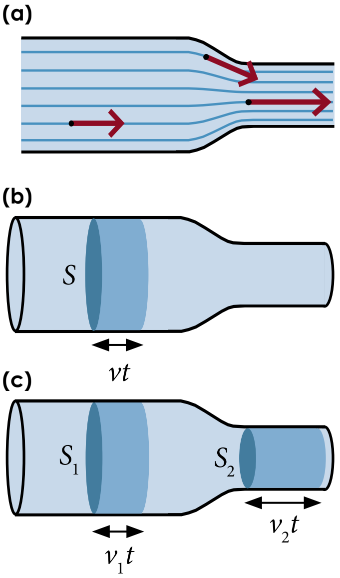
Při studiu pohybu těles ve vzduchu (viz kapitola 4) jsme používali vztah pro odporovou sílu

$$F_{\mathrm{ODP}}=\frac{1}{2}C\rho S v^2.$$

Tato síla vzniká při turbulentním proudění tekutiny (vzduchu) okolo tělesa. Vztah je možné získat jen experimentálně, protože teoretický popis turbulentního proudění je velmi složitý.

Ideální kapalina je **nestlačitelná** a **bez vnitřního tření**. Vnitřní tření neboli **viskozita** určuje tekutost kapaliny a je vytvářena působením odporových sil mezi jednotlivými částmi kapaliny. Například olej se nám zdá „hustší“ než voda. Správně ale musíme říci „méně tekutý“ nebo „viskóznější“, protože hustota oleje je menší než hustota vody. Viskozita kapaliny je analogická smykovému tření u tuhých těles: při proudění viskózní tekutiny mechanická energie klesá na úkor vnitřní energie (tekutina se zahřívá), zatímco při proudění ideální kapaliny se její mechanická energie zachovává.

Proudění tekutiny můžeme graficky znázornit pomocí **proudnic**. Jsou to čáry, které v každém místě ukazují směr rychlosti proudících částic (viz obrázek 8-12a). Je-li rychlost částic v každém místě proudící tekutiny v čase neproměnná, mají proudnice stále stejný tvar. Takové proudění nazýváme **ustálené** (stacionární). V případě ustáleného proudění proudnice splývají s trajektoriemi částic.



Obrázek 8-12.
Ustálené laminární proudění ideální kapaliny trubicí.
(a) Řez trubicí. Proudnice ukazují v každém bodě směr rychlosti částic kapaliny.
(b) Objemový průtok trubicí můžeme určit pomocí rychlosti proudění, je-li stejně velká a kolmá na vybraný průřez ve všech jeho bodech.
(c) Objemový průtok je ve všech částech trubice stejný. Proto je v části s menším průřezem větší rychlost proudění.

Poslední omezení souvisí s rychlostí proudění. Při relativně malých rychlostech proudící tekutiny (záleží též na její hustotě a viskozitě) mají proudnice jednoduchý tvar, v každém bodě můžeme určit rychlost proudících částic. Takové proudění se nazývá **laminární**. Při překročení určtité rychlosti přechází laminární proudění v **turbulentní,** proudnice se navzájem promíchávají a částice kapaliny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Například pomalé proudění vody ve středu klidného toku je blízké laminárnímu, zatímco v peřejích je proudění turbulentní.

Podívejme se nyní na konkrétní příklad ustáleného laminárního proudění vody v trubici podle obrázku 8-12. Může se jednat třeba o vodovodní potrubí. V takových případech často potřebujeme vědět, kolik kapaliny potrubím proteklo za určitý čas (třeba proto, aby nám mohla vodárenská společnost vystavit účet za spotřebovanou vodu) K tomu využíváme veličinu zvanou **objemový průtok** Q_V. Definujeme ji vztahem

$$\boxed{Q_V=\frac{V}{t},}$$

kde V je objem kapaliny, který proteče průřezem trubice za dobu t. Jednotkou objemového průtoku je $\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}$.

Je-li možné najít v trubici takový průřez, že ve všech jeho bodech je rychlost proudění stejně velká a kolmá na plochu průřezu, můžeme objemový průtok vyjádřit také pomocí velikosti rychlosti proudění v a plochy průřezu S. To je splněno například v rovné části trubice na obrázku 8-12b. Za dobu t se částice kapaliny posunou od průřezu o ploše S o vzdálenost $d=vt$. Průřezem trubice tedy proteče objem $V=Sd=Svt$. Objemový průtok je $Q_V=Sv$.

Jelikož uvažujeme proudění nestlačitelné kapaliny, musí být průtok stejný ve všech částech trubice. Situace je znázorněna na obrázku 8-11c. Tuto skutečnost můžeme zapsat jednoduše jako

$$\boxed{Q_V=Sv=\text{konst.}}$$

Zapsaný vztah se nazývá **rovnice kontinuity** proudění. Z rovnice plyne, že rychlost kapaliny je větší v užších místech trubice a naopak.

Příklad 8-4

Objemový průtok je nepostradatelnou veličinou v hydrologii. Můžeme pomocí něj například porovnávat mohutnost různých řek. Několik příkladů průměrného ročního průtoku ukazuje tabulka 8-13. Využijte údaje v tabulce k vyřešení následujících úkolů.
(a) Největší přehradní jezero v České republice co do množství zadržované vody je Orlická přehrada s objemem $720\cdot10^6\,\text{m}^3$. Vypočtěte, za jak dlouhou dobu by řeka Amazonka naplnila celou Orlickou přehradu.
(b) Na řece Jang-C-Tiang v Číně v místě zvaném Tři soutěsky byla postavena přehrada s nejvýkonnější hydroelektrárnou světa. Vypočítejte průměrný výkon hydroelektrárny, jestliže rozdíl hladin, mezi kterými elektrárna pracuje, je 113 m a účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou je 90%.

(a) Označíme-li průtok řeky Q_V a objem přehradní nádrže V, pak čas napouštění t dostaneme jednoduše z definice průtoku

$$t=\frac{V}{Q_V}=\frac{720\cdot10^6\,\text{m}^3}{220\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}}=3273\,\text{s}=55\,\text{min}.$$

(b) Ze známého průtoku $Q_V=10\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ můžeme spočítat hmotnost m vody, která proteče elektrárnou za čas t. Platí $m=\rho V=\rho Q_V t$, kde $\rho=1000\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ je hustota vody. Při poklesu výšky o $h=113\,\text{m}$ se zmenší gravitační potenciální energie vody o $\Delta E=mgh$. Elektrárna přeměňuje tíhovou potenciální energii vody na elektrickou s účinností 90%. Proto průměrný výkon elektrárny bude

$$P=0{,}9\cdot\frac{\Delta E}{t}=0{,}9\cdot\frac{mgh}{t}=0{,}9\cdot\frac{\rho Q_V tgh}{t}=0{,}9\rho Q_V gh.$$

$$P=0{,}9\cdot10^3\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot10^4\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot9{,}8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot113\,\text{m}=9970\,\text{MW}.$$

Pro srovnání: výkon jaderné elektrárny Dukovany je 1760 MW.

Příklad 8-5

Obsah průřezu aorty dospělého člověka v klidu je $S_0=3\,\text{cm}^2$ a rychlost, jakou jí prochází krev, má velikost $v_0=30\,\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Typická vlásečnice (nejtenčí céva v těle) má přibližně kruhový průřez o průměru $d=6\,\mu\text{m}$. Rychlost proudění krve ve vlásečnici je asi $v=0{,}05\,\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Kolik má přibližně člověk vlásečnic?

Tabulka 8-13. Průměrný roční průtok některých řek.

Amazonka (ústí)	$220\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Kongo (ústí)	$42\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Jang-C-Tiang (ústí)	$32\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Jang-C-Tiang (Tři soutěsky)	asi $10\,000\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Dunaj (ústí)	$6\,500\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Labe (ústí)	$700\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Labe (Hřensko)	$300\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Víte, že...

Průtok řek se stává velmi sledovanou veličinou také při povodních. Zatímco normální průtok Vltavy v Praze je $150\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, ve středu 14. srpna 2002 dosáhl rekordní hodnoty $5\,500\,\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Obrázek 8-14. Stoletá voda na Vltavě v roce 2002 v Praze Lahovicích.

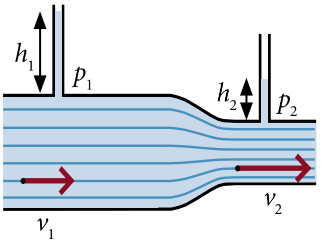
Průtok krve vlásečnicemi musí být stejný jako průtok aortou, což vyjádříme pomocí rovnice kontinuity

$$S_0v_0=nSv,$$

kde $S=\pi r^2=\pi d^2/4=\pi\cdot(6\cdot10^{-4}\,\mathrm{cm})^2/4=3\cdot10^{-7}\,\mathrm{cm}^2$ je obsah průřezu vlásečnice a n je hledaný počet vlásečnic. Dostaneme

$$n=\frac{S_0v_0}{Sv}=\frac{3\,\mathrm{cm}^2\cdot30\,\mathrm{cm\cdot s^{-1}}}{3\cdot10^{-7}\,\mathrm{cm}^2\cdot0{,}05\,\mathrm{cm\cdot s^{-1}}}=6\cdot10^9$$

8.9. Bernoulliova rovnice

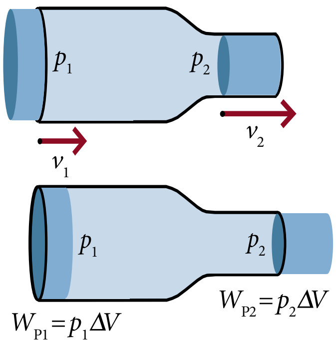


Obrázek 8-15.
Tlak v kapalině měříme pomocí výšky sloupce h v připojené svislé trubici. Platí

$$p_1=h_1\rho g,\ \ p_2=h_2\rho g.$$

Pokračujme ještě ve studiu proudění kapaliny v trubici podle obrázku 8-12. Změříme-li **tlak** kapaliny v různých místech, zjistíme, že **je menší v užší části, kde kapalina proudí větší rychlostí**. Tlak kapaliny můžeme měřit například pomocí výšky sloupce v připojené svislé trubici (viz obrázek 8-15). Proč je tlak menší při vyšší rychlosti proudění? Abychom dokázali odpovědět, podívejme se na proudění kapaliny z hlediska **zákona zachování mechanické energie**.

Mění-li se v trubici velikost rychlosti proudící kapaliny, mění se také její kinetická energie. Ve zúžené části má tedy kapalina větší kinetickou energii. Podle zákona zachování mechanické energie, který pro ideální kapalinu platí, musí být celkový součet kinetické a potenciální energie konstantní. To znamená, že kinetická energie proudící kapaliny roste na úkor její potenciální energie. Trubice je vodorovná, takže se nejedná o gravitační potenciální energii a kapalina je nestlačitelná, takže nemůže jít ani o energii pružnosti. Setkáváme se tu s novým druhem potenciální energie, kterou můžeme označit jako **tlaková potenciální energie**.



Obrázek 8-16.
Ustálené laminární proudění ideální kapaliny trubicí. Aby se objem kapaliny ΔV dosal do trubice, musí se vlevo vykonat práce $W_{P1}=p_1\Delta V$. Zároveň kapalina vpravo vykoná práci $W_{P2}=p_2\Delta V$.

Tuto energii můžeme určit z mechanické práce vykonané tlakovou silou o velikosti F, která posune tekutinu v trubici o vzdálenost Δx ve směru svého působení. Sílu totiž můžeme zapsat pomocí tlaku jako $F=pS$ a pro práci tak dostaneme $W_p=F\Delta x=pS\Delta x=p\Delta V$. Nyní tento vztah aplikujeme na proudění kapaliny trubicí podle obrázku 8-16. Abychom kapalinu do trubice „natlačili", musíme vykonat práci $W_{P1}=p_1\Delta V$. V pravé části ovšem kapalina vykoná práci $W_{P2}=p_2\Delta V$. Celková práce, kterou tlakové síly vykonaly při protečení kapaliny o objemu ΔV trubicí, je proto

$$W_P=p_1\Delta V-p_2\Delta V=(p_1-p_2)\Delta V.$$

To znamená, že tlaková potenciální energie části kapaliny o objemu ΔV klesla o $\Delta E_p=W_P=(p_1-p_2)\Delta V$. Zároveň se zvětšila kinetická energie kapaliny. Hmotnost objemu ΔV kapaliny o hustotě ρ je $\Delta m=\rho\Delta V$ proto

$$\Delta E_k=\tfrac{1}{2}\Delta m v_2^2-\tfrac{1}{2}\Delta m v_1^2=\tfrac{1}{2}\Delta m(v_2^2-v_1^2)=\tfrac{1}{2}\rho\Delta V(v_2^2-v_1^2).$$

Porovnáním $\Delta E_p=\Delta E_k$ dostaneme

$$\tfrac{1}{2}\rho\Delta V(v_2^2-v_1^2)=(p_1-p_2)\Delta V,$$

což po vydělení ΔV, roznásobení a přeskupení členů dává

$$\tfrac{1}{2}\rho v_1^2+p_1=\tfrac{1}{2}\rho v_2^2+p_2.$$

Získali jsme rovnici, která vyjadřuje zákon **zachování mechanické energie kapaliny proudící ve vodorovné trubici** a zároveň ukazuje hledanou **souvislost rychlosti proudění a tlaku** v kapalině. Tento vztah se nazývá **Bernoulliova rovnice**, podle italského fyzika Daniela Bernoulliho. Výraz $\frac{1}{2}\rho v^2$ odpovídá kinetické energii jednotkového objemu kapaliny a p jeho tlakové potenciální energii.

Na základě uvedeného rozboru můžeme jednoduše rozšířit platnost rovnice i na situace, kdy kapalina při proudění stoupá nebo klesá v tíhovém poli Země. Tíhová potenciální energie kapaliny o objemu ΔV je $\Delta E_p = \Delta mgh = \Delta V \rho gh$ (h je výška v tíhovém poli, g je velikost tíhového zrychlení). Vydělením ΔV dostaneme tíhovou potenciální energii jednotkového objemu kapaliny $\Delta E_p = \rho gh$. Tento výraz je třeba přičíst k celkové mechanické energii. Celkem tak dostaneme **obecný tvar Bernoulliovy rovnice**

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho gh = \text{konst.}}$$

Můžeme se snadno přesvědčit, že rovnice platí i pro kapalinu v klidu. Bude-li rychlost proudění nulová, dostaneme $p + \rho gh = \text{konst.}$ Porovnáme-li dvě místa kapaliny o různých výškách h_1 a h_2, bude platit

$$p_1 + \rho gh_1 = p_2 + \rho gh_2 \quad \Rightarrow \quad p_1 - p_2 = \rho gh_2 - \rho gh_1 \quad \Rightarrow \quad \Delta p = \rho g \Delta h.$$

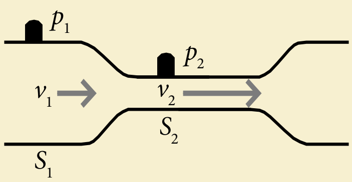
To přesně odpovídá vztahu pro hydrostatický tlak v kapalině.

Na závěr dodejme, že hlavní důsledek Bernoulliovy rovnice, totiž že větší rychlost proudění znamená menší tlak, platí kvalitativně i při turbulentním proudění. S jeho projevy se můžeme setkat v řadě situací. Například hladina moře se při silném větru vzdouvá díky poklesu tlaku proudícího vzduchu. Člun plující po řece je tlačen do místa nejrychlejšího proudu.

Bernoulliovu rovnici využívá také tzv. Venturiho trubice, jejíž princip objasňuje příklad 8-6. Používá se k měření rychlosti proudící kapaliny a tedy i průtoku na základě poklesu tlaku ve zúženém místě. Proudí-li kapalina trubicí dostatečně velkou rychlostí, může tlak klesnout pod hodnotu atmosférického tlaku a trubice začne nasávat vzduch. Na tomto principu je založena vodní vývěva.

Příklad 8-6

Venturiho průtokoměr je tvořen trubicí se zúžením z průřezu obsahu $S_1 = 4\,\text{cm}^2$ na $S_2 = 1\,\text{cm}^2$. V užší i širší části jsou tlaková čidla měřící tlaky p_1 a p_2 (viz obrázek). Trubicí proudí benzín o hustotě $\rho = 740\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
(a) Najděte obecný vzorec pro výpočet objemového průtoku Q_V trubicí na základě znalosti rozdílu tlaků z tlakových čidel $\Delta p = p_1 - p_2$, obsahů S_1, S_2 a hustoty kapaliny ρ.
(b) Vypočtěte průtok pro hodnotu $\Delta p = 8\,660\,\text{Pa}$.
(c) Za jak dlouho proteče trubicí při daném průtoku 40 l benzínu?



(a) Bernoulliovu rovnici pro tok vodorovnou trubicí (bez členu ρgh) zapíšeme ve tvaru

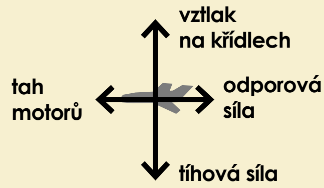
$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2.$$

V rovnici vystupují rychlosti proudění kapaliny v_1 a v_2, které neznáme. Proto použije

Víte, že...

Všechny dopravní prostředky musí překonávat odporovou sílu vznikající při proudění vzduchu kolem nich. Odporová síla působí vždy proti směru jejich pohybu a brzdí je. V poněkud jiné situaci je letadlo.

Křídlo letadla má takový tvar, že při jeho obtékání vzduchem vzniká kromě odporové síly ještě aerodynamická vztlaková síla, která působí přibližně kolmo na směr letu. Motory letadla tak při vodorovném letu pouze překonávají odporovou sílu, zatímco vztlak na křídlech musí vyrovnat tíhu letadla (viz obrázek).



Obrázek 8-17. Takto můžete vidět křídlo letadla Boeing 777 přímo z jeho paluby. Proudící vzduch právě na toto křídlo musí působit aerodynamickou vztlakovou silou přes 1 000 000 N, neboť celé letadlo váží přes 200 tun.

me ještě rovnici kontinuity $S_1 v_1 = S_2 v_2$. Součin Sv je zároveň objemový průtok Q_V takže můžeme rychlosti proudění vyjádřit jako

$$v_1 = \frac{Q_V}{S_1} \quad \text{a} \quad v_2 = \frac{Q_V}{S_1}$$

a dosadit do Bernoulliovy rovnice. Dostaneme

$$\frac{1}{2}\rho\frac{Q_V^2}{S_1^2} + p_1 = \frac{1}{2}\rho\frac{Q_V^2}{S_2^2} + p_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2}\rho Q_V^2\left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2}\right) = p_1 - p_2 = \Delta p \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad Q_V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}\cdot\frac{S_2^2 S_1^2}{S_1^2 - S_2^2}}\,.$$

(b) Po dosazení $\Delta p = 8660\,\mathrm{Pa}$, $\rho = 740\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, $S_1 = 4\,\mathrm{cm^2} = 4\cdot10^{-4}\,\mathrm{m^2}$, $S_2 = 1\cdot10^{-4}\,\mathrm{m^2}$, vyjde

$$Q_V = 5{,}0\cdot10^{-4}\,\mathrm{m^3\cdot s^{-1}} = 0{,}5\,\mathrm{l\,s^{-1}}.$$

(c) Objem $V = 40$ litrů proteče při průtoku $Q_V = 0{,}5\,\mathrm{l\,s^{-1}}$ za čas

$$t = \frac{V}{Q_V} = \frac{40\,\mathrm{l}}{0{,}5\,\mathrm{l\,s^{-1}}} = 80\,\mathrm{s}.$$

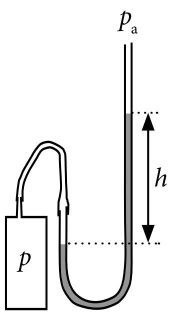
Otázky

1

Obrázek ukazuje princip nejjednoduššího měřiče tlaku plynu – otevřeného kapalinového manometru. Je to trubice ve tvaru písmene U, která je na jedné straně otevřená a druhý konec se pomocí hadičky připojí k nádobě s plynem, jehož tlak měříme.

(a) Vysvětlete princip zařízení.

(b) Jaký je tlak p plynu v nádobě? Vyjádřete jej pomocí veličin h – rozdílu hladin v trubici, ρ – hustoty kapaliny a p_a – atmosférického tlaku.

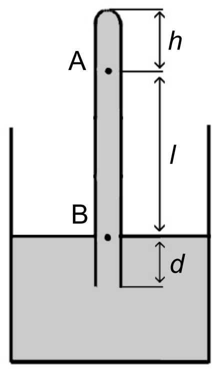


2

Nádoba s kapalinou o hustotě ρ je umístěna v tíhovém poli Země. Tíhové zrychlení je g. V nádobě je svislá zkumavka naplněná toutéž kapalinou, otočená dnem vzhůru. Atmosférický tlak je p_a.

(a) Jaký je tlak v bodě A?

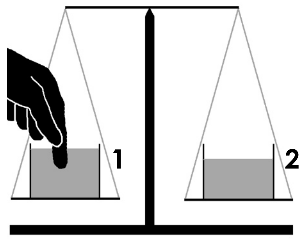
(b) Jaký je tlak v bodě B?



3

Na rovnoramenných vahách jsou vyváženy dvě stejné nádoby s kapalinou. Experimentátor opatrně ponoří prst do vody v první nádobě tak, aby se ruka nedotýkala nádoby, misky ani závěsu (viz obrázek). Vyberte a zdůvodněte správné tvrzení.

(a) Miska 2 poklesne.
(b) Miska 1 poklesne.
(c) Váhy zůstanou v rovnováze.
(d) Záleží na hustotě kapaliny, jestli poklesne miska 1 nebo miska 2.
(e) Záleží na hustotě ponořeného tělesa (prstu), jestli poklesne miska 1 nebo miska 2.



4

Tři kostky stejné velikosti jsou celé ponořeny do vody. Jedna kostka je ze železa, druhá z mědi a třetí z hliníku. Seřaďte je

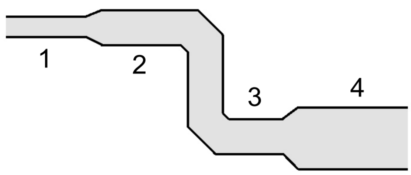
(a) podle velikosti tíhové síly, kterou na ně působí Země,
(b) podle velikosti vztlakové síly, kterou na ně působí voda.

5

Na hladině bazénu je loďka, na dně loďky leží kámen. Vyhodíme-li kámen z loďky do bazénu, hladina vody v bazénu stoupne, klesne, nebo zůstane stejná? Svou odpověď správně zdůvodněte!

6

Voda teče potrubím znázorněným na obrázku. Proudění je ustálené. Seřaďte úseky 1, 2, 3, 4 podle tlaku v potrubí.



Úlohy

1

Jakému přetlaku (rozdílu tlaků) jsou vystaveny
(a) tělo potápěče v hloubce 20 m pod mořem,
(b) láhev, která byla naplněna a uzavřena v nulové nadmořské výšce a poté vynesena na Mt. Blanc,
(c) skafandr kosmonauta ve volném vesmíru?
[(a) 202 kPa, (b) 28 kPa, (c)100 kPa]

2

Ponorka havarovala v hloubce 80 m pod hladinou moře. Jakou silou bude musel působit potápěč na poklop ponorky o ploše 0,7 m², aby ho otevřel? [57 kN]

3

Navrhněte parametry hydraulického zařízení, které umožní člověku zvednout automobil o hmotnosti 1,5 t. Předpokládejte, že člověk je schopen vyvinout sílu maximálně 500 N.

4

Výška sloupce rtuti ve rtuťovém barometru byla 752 mm. Jaký je tlak vzduchu v Pascalech? Jak vysoko by vystoupila hladina při použití vody?
[tlak je 998 hPa, voda by vystoupila 10,18 m]

5

Jaká část celkového objemu ledovce zůstává skryta pod mořskou hladinou? Hustota ledu je 920 $kg{\cdot}m^{-3}$. Hustota mořské vody je 1 030 $kg{\cdot}m^{-3}$.
[89%]

6

Vypočtěte, jaký minimální objem musí mít vzducholoď plněná heliem, víte-li, že hustota helia ve vzducholodi je 0,17 $kg{\cdot}m^{-3}$. Hmotnost konstrukce vzducholodi a nákladu je dohromady 400 kg.
[$V = 300\,m^3$]

7

Fyzik dostal za úkol ověřit, zda je prsten skutečně ze zlata. Na vzduchu byl prsten vyvážen závažímo hmotnosti 1 g, ve vodě závažím o hmotnosti 0,92 g. Na základě výpočtu stanovte, zda je prsten skutečně z čistého zlata. Hustota zlata je 19 300 kgm^{-3}.
[nejde o zlato, hustota prstenu je 12 500 $kg{\cdot}m^{-3}$]

8

Dřevěný vor o hmotnosti m_V=100 kg a hustotě ρ_V=750 $kg{\cdot}m^{-3}$ se nachází na hladině jezera. Určete nejmenší hmotnost kamení *m*, kterou musíme položit na povrch voru, aby se vor celým svým objemem právě ponořil pod hladinu.
[maximální zatížení voru je 33 kg]

9

Průřez říčního koryta má obsah 30 m² a voda v něm teče rychlostí o velikosti 1,2 $m{\cdot}s^{-1}$. Předpokládáme pro jednoduchost, že rychlost proudu je stejná ve všech bodech.
(a) Vypočtěte objemový průtok vody řekou.
(b) Za jak dlouho by voda z této řeky naplnila brněnskou přehradu, která zadrží $11\cdot10^6\,m^3$ vody?
[(a) 36 $m^3{\cdot}s^{-1}$, (b) asi 3,5 dne]

10

Odhadněte, jaký je objemový průtok vody odtékající z území ČR, víte-li že průměrné roční srážky na našem území jsou 700 mm/m² a rozloha republiky je 78 864 km². Dále víme, že přibližně 1/3 spadlé vody se vypaří. Výsledek můžete porovnat s údaji v tabulce 8-13.
[přibližně 1200 $m^3{\cdot}s^{-1}$]

11

Hadice o vnitřním průměru 1,5 cm je připojena k postřikovači trávníku, který se skládá z 24 děr o průměru 0,5 mm. Jakou rychlostí voda vystřikuje z otvorů, je-li rychlost v hadici 1 ms^{-1}?
[$v = 38\,m{\cdot}s^{-1}$]

12

Voda vytéká rychlostí v_0=1 $m{\cdot}s^{-1}$ z vodovodního kohoutku o obsahu průřezu S_0. Zanedbáme-li odpor vzduchu, určete, jak hluboko pod kohoutkem bude mít proud vody poloviční obsah průřezu než kohoutek.
[$h = 15\,cm$]

13

Zásobník na vodu byl prostřelen ve vzdálenosti $h = 1{,}5\,m$ pod úrovní hladiny vody. Vypočtěte, jakou rychlostí začne voda vytékat z nádrže.
[v = 5,4 $m{\cdot}s^{-1}$]