

Tlak kolem nás

S tlakem se v každodenním životě setkáme často: Vzduch, který nás obklopuje, na nás tlačí obrovskými silami – aniž to ovšem pociťujeme. To, že můžeme plavat ve vodě, umožňuje vztlaková síla, což je vlastně tlaková síla vody na naše ponořené tělo. V dnešní přednášce ze Zajímavé fyziky si ukážeme některé zajímavé aspekty tlaku a řadu pokusů, které je ilustrují.

Co je to tlak?

Tlakem se rozumí jednak fyzikální jev, jednak fyzikální veličina. Tlak jako jev se projevuje tak, že nějaké těleso působí silou („tlačí“) na jiné těleso přes plochu, podél níž je s ním v bezprostředním kontaktu. Například když stojím na zemi, moje nohy tlačí na zem a země naopak tlačí na moje nohy. Také na mě tlačí ze všech stran vzduch, který mě obklopuje. Co se týče tlaku jako fyzikální veličiny, je to podíl velikosti zmíněné síly F a velikosti plochy S :

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

Jednotkou tlaku je Pascal (Pa), což je totéž jako Newton na metr čtvereční.

Hydrostatický tlak

Tlak v kapalině roste s hloubkou pod hladinou. To je vidět snadno z následující úvahy: vymezíme si ve vodě těleso ve tvaru kvádrů. Na tento vodní kvádr působí tlakové síly okolní vody a také gravitační síla. Protože je v rovnováze (nikam nezrychluje), musí být výslednice všech těchto sil nulová. Gravitační síla tlačí kvádr dolů, proto výslednice tlakových sil musí směřovat nahoru. Tlakové síly na boční stěny se vzájemně vyruší a proto zmíněná výslednice musí pocházet od tlakových sil na spodní a horní podstavu kvádrů. Tlaková síla na spodní podstavu tedy musí být větší než síla na horní. Pokud provedeme tuto úvahu kvantitativně, dojdeme k tomu, že tlak v hloubce h pod hladinou je $p = h\rho g + p_0$, kde p_0 je tlak na hladině, ρ je hustota kapaliny a g je tíhové zrychlení (s hodnotou přibližně cca. 10 m/s^2).

To, že tlak roste s hloubkou, můžeme demonstrovat pokusem s výtokem vody z nádoby s několika otvory. Z nejnižšího stříká voda nejrychleji, protože je zde největší tlak.

Ve vodě vzroste každých 10 metrů hloubky tlak asi o 10^5 Pa, tady asi o 1 bar (tj. o hodnotu atmosférického tlaku, viz níže). Na dně nejhlubšího místa v moři v Mariánském příkopu, kde je hloubka přes 11 kilometrů, je tak tlak asi $1000\times$ větší než tlak atmosférický. Při takto obrovském tlaku se už projeví stlačitelnost vody, která je za normálních okolností zanedbatelná: díky velkému průměrnému tlaku ve světových oceánech je jejich hladina o něco níže, než by byla, pokud by vody bylo stejné množství (co se týče hmotnosti), ale byla by zcela nestlačitelná. A o kolik? Dá se spočítat, že o celých 50 metrů! Kdyby se tedy voda náhle stala zcela nestlačitelnou, hladina světových moří by stoupla o 50 metrů.

Hydrostatická vztlaková síla

Každý asi zná Archimédův zákon, který mluví o síle, kterou je nadlehčováno těleso ponořené do kapaliny. Tato vztlaková síla není ničím jiným než celkovou tlakovou silou, kterou kapalina na těleso působí. Je to logické: jestliže hydrostatický tlak roste s hloubkou, pak tlak (a tím i tlaková síla) působící na spodní část tělesa je větší než ten působící na horní část tělesa. Výsledná tlaková síla bude působit vzhůru a bude tak těleso nadlehčovat. Jednoduchý výpočet ukazuje, že velikost této síly je $F = V\rho g$, kde V je objem ponořené části tělesa.

Mikroskopická podstata hydrostatického tlaku

A jak vlastně hydrostatický tlak „funguje“? Tedy jakým mechanismem kapalina na své okolí tlakem působí? Abychom to pochopili, musíme si uvědomit, co se děje v místě kontaktu kapaliny (pro konkrétnost uvažujme vodu) například se dnem nebo stěnou nádoby. Jestliže se molekuly kapaliny příliš přiblíží k molekulám nádoby, objeví se mezi molekulami odpuzivá síla, která jim brání přiblížit se vzájemně ještě více. Tato odpuzivá síla má elektromagnetickou povahu, protože souvisí s elektrostatickými silami mezi elektronovými obaly molekul. Při příliš těsném přiblížení tak molekuly vody vlastně „odpuzují“ či „odtlačují“ stěnu nádoby a stěna zase odpuzuje molekuly vody.

A proč se vlastně molekuly vody přiblíží k molekulám ve stěně nebo dně nádoby natolik, že se objeví zmíněné tlakové síly? Je to proto, že na ně z druhé strany tlačí jiné molekuly vody, které jsou nad nimi nebo vedle nich. Každá molekula se postupně dostane do takového stavu, že celková síla na ni působící je nulová, to to vede právě ke stavu hydrostatické rovnováhy.

Atmosférický tlak

Atmosférický tlak má podobný původ jako tlak hydrostatický: vzduch je gravitací přitahován dolů k zemi a pokud je v rovnováze, musí existovat síla, která tento účinek gravitace kompenzuje. Touto silou je právě tlaková síla, kterou povrch Země tlačí na vzduch směrem vzhůru.



Obrázek 1: Horkovzdušný balón.

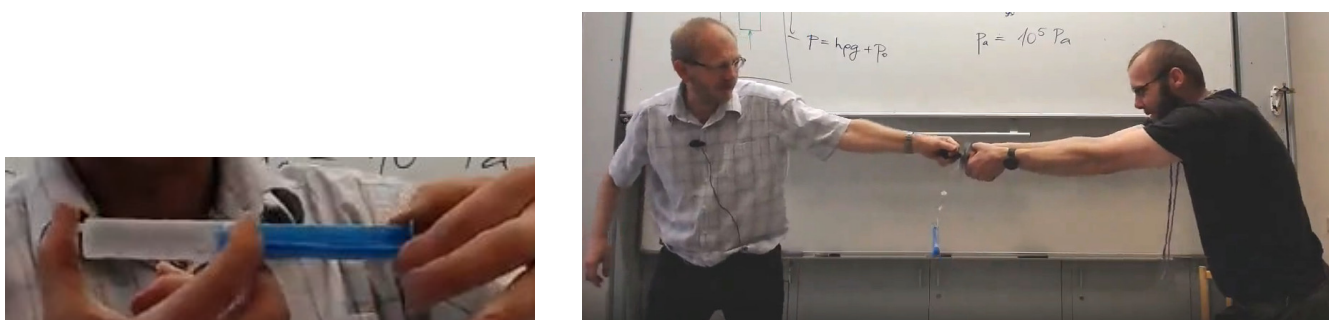
Atmosférický tlak se podobně jako ten hydrostatický mění s výškou. U hladiny moře má přibližnou

hodnotu 10^5 Pa, ale už ve výšce asi šesti kilometrů má hodnotu jen poloviční. Hodnota u hladiny moře, která se také značí 1 bar, odpovídá síle přibližně 10 Newtonů na každý centimetr čtvereční. A 10 Newtonů je zase tíha přibližně kilogramového závaží. Dá se tedy říci, že vzduch tlačí na zemi stejným tlakem, jako kdyby na každém čtverečním centimetru zemského povrchu leželo kilogramové závaží. Když se nad tím zamyslíme, je jasné, že přesně to musí být právě hmotnost vzduchu nad každým čtverečním centimetrem.

Tato úvaha umožňuje spočítat velmi snadno a jen s minimem údajů hmotnost celé zemské atmosféry. Jestliže nad každým centimetrem čtverečním zemského povrchu je kilogram vzduchu, pak stačí zjistit velikost zemského povrchu v centimetrech čtverečních a získáme tak hmotnost zemské atmosféry v kilogramech. Poloměr Země R je asi 6387 km, tj. 638700000 cm, a její povrch pak

$$S = 4\pi R^2 \approx 4 \cdot 3,14 \cdot (637\,800\,000 \text{ cm})^2 \approx 5,11 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2.$$

Hmotnost zemské atmosféry je tedy cca. $5 \cdot 10^{18}$ kilogramů, tj. asi jedna milióntina hmotnosti celé Země.



Obrázek 2: Ilustrace tlaku vzduchu pomocí injekční stříkačky a modelu Magdeburských polokoulí

Atmosférické tlakové síly, které tlačí na všechny předměty kolem nás i na naše tělo, jsou obrovské. Tak například na dlaň dospělého člověka o velikosti $9 \times 9 \text{ cm}^2$ tlačí stejná síla, jaká odpovídá tíze 81 kilogramového tělesa. Jak to, že nám takto velká síla ruku neprolomí a udržíme ji klidně ve vzduchu? Protože stejně velká síla působí na ruku i z opačné strany. Obě síly se vzájemně kompenzují a my tak žádnou sílu nepocítujeme. Jiná situace ale nastane v letadle letícím ve výšce deseti kilometrů nad zemí, když se mu z nějakého důvodu rozbije okénko nebo otevřou dveře. V té chvíli se naplno projeví rozdíl tlaků uvnitř letadla a v okolní atmosféře (v letadle je uměle vytvořen přetlak, aby zde lidé mohli dýchat), a nepřipoutaného cestujícího sedícího poblíž může doslova vysát ven.

Podobně jako na tělesa ponořená do vody či jiné kapaliny, působí i na tělesa obklopená vzduchem vztlačová síla. Té se využívá např. u balónů nebo vzducholodí. Kvůli malé hustotě vzduchu je ale k dosažení potřebného vztlaku potřeba velký objem. Proto jsou balóny a vzducholodě tak velké. V Zajímavé fyzice si předvádíme horkovzdušný balón splený lepicí páskou z mikrotenové fólie určené na příkrývání nábytku při malování, viz obr. 1.

S atmosférickým tlakem můžeme udělat celou řadu velmi pěkných pokusů, viz např. obr. 2 a 3. Jejich seznam je na konci tohoto dokumentu.

Mikroskopická podstata atmosférického tlaku

Vzduch je mnohem řidší než voda a proto je mikroskopický mechanismus působení atmosférického tlaku poněkud odlišný než u tlaku kapaliny. Molekuly vzduchu se po většinu doby pohybují volně a jen občas do něčeho narazí – buď do jiné molekuly vzduchu nebo do tělesa, které je vzduchem obklopeno, což může být např. naše tělo. Tlak vzduchu na takové těleso je pak vytvářen obrovským počtem nárazů molekul vzduchu na těleso, kdy při každém nárazu molekula do tělesa poněkud „šfouchne“ – předá mu určitou hybnost. Souhrn takto předaných hybností za daný čas pak vytváří tlakovou sílu.



Obrázek 3: Zvedání židle velkou přísavkou

To lze pěkně demonstrovat pomocí toho, že si dva lidé sedící na jezdících židlích (reprezentující stěny nádoby) přehazují závaží („molekulu“) a tím se od sebe vzájemně odtlačují, viz obr. 4.



Obrázek 4: Ilustrace mikroskopického principu tlaku vzduchu pomocí přehazování pětilitrové lahve s vodou

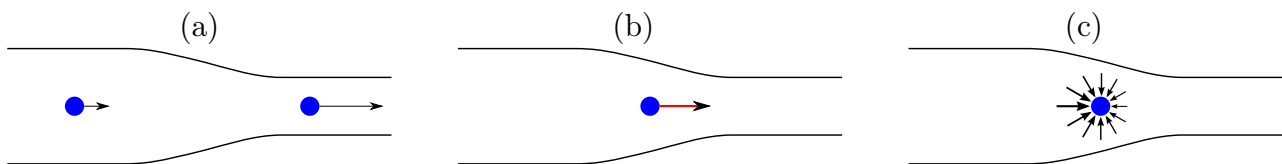
Bernoulliho princip

Bernoulliho princip je velmi důležitý při popisu tzv. ustáleného (tedy časově neproměnného) proudění tekutiny. Tento princip je matematicky vyjádřen Bernoulliho rovnicí. Ta je dost obecná, nám bude stačit její velmi zjednodušená verze platná pro nestlačitelnou kapalinu bez přítomnosti gravitačního pole. Ta říká, že se při ustáleném proudění zachovává (nemění) veličina

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1)$$

kde v je rychlost tekutiny v daném místě a p je tlak v témže místě. Pěkně se to dá ilustrovat na příkladu proudění ve zužující se trubce, viz obr. 5. Při ustáleném proudění musí za jednotku času projít každým průřezem trubky stejné množství kapaliny, takže její rychlost v pravé části je větší než v levé. Neměnnost veličiny (1) má pak za následek, že tlak v pravé části trubky je menší než tlak v

levé části. To se může zdát na první pohled velmi zvláštní, naše intuice nám možná napovídá, že by to mělo být právě naopak.

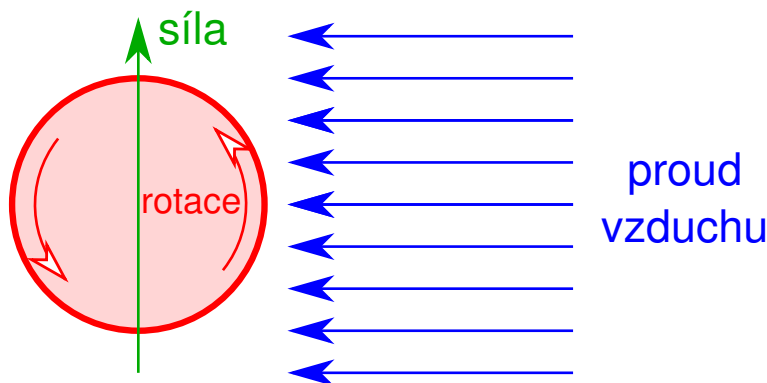


Obrázek 5: Proudění v trubce měnícího se průřezu. Díky Bernoulliho principu je tlak v levé části větší než v pravé.

Následující jednoduchou úvahou se ale přesvědčíme, že to, co říká Bernoulliho rovnice, je vlastně velmi logické. Uvažujme částici tekutiny pohybující se v trubce. Jak jsme si řekli, v levé části se pohybuje pomalu, v pravé rychle, viz obr. 5(a). Při pohybu místy, kde se trubka zužuje, se tedy částice musí zrychlovat směrem doprava, viz obr. 5(b). To musí být způsobeno nějakými silami. Jediné síly, co na částici působí, jsou tlakové síly od okolní tekutiny (gravitaci nyní neuvažujeme). Z toho je jasné, že tlak v levé části trubky musí být větší než v pravé, aby výslednice tlakových sil směřovala doprava, viz obr. 5(c). A to je přesně ve shodě s Bernoulliho principem.

Magnusův efekt

S Bernoulliho efektem úzce souvisí tzv. Magnusův jev. Jde o to, že pokud proud vzduchu obtéká rotující těleso (např. válec nebo kouli), působí na toto těleso síla kolmá na proud vzduchu i na osu otáčení, která těleso bude strhávat do strany, viz obr. 6.



Obrázek 6: Magnusův jev

Tohoto jevu se hojně využívá ve sportu. Tak například hráči golfu dokážou při odpalu udělit míčku zpětnou rotaci (kdy se míček otáčí opačným směrem, než kdyby se valil po zemi). Díky Magnusovu jevu se pak objeví vztlačková síla, která míček táhne vzhůru a částečně kompenzuje účinek gravitace; míček pak díky tomu letí po mnohem méně zakřivené dráze a doletí dál.

Magnusova jevu využívají i fotbalisté, kteří dokážou vhodným kopnutím udělit míči silnou rotaci a ten pak letí po zakřivené dráze. Tím mohou zmást brankáře, který odhaduje dráhu míče podle jeho počáteční rychlosti a nemá pak již čas zareagovat. A podobně to funguje i u stolního tenisu.

Na principu Magnusova jevu funguje i zvláštní typ plachetnice, která má místo plachty svislý rotující válec, nebo letadla, která mají rotující válce místo křídel. Jde však spíše o experimentální zařízení, která se příliš nerozšířila.

V Zajímavé fyzice jsme si Magnusův efekt ilustrovali pomocí dvojice kelímků slepených k sobě lepící páskou, které jsme roztočili pomocí omotaného provázku přivázaného k tyčce, viz obr. 7.



Obrázek 7: Demontrace Magnusova jevu

Kelímky pak nepadají k zemi svisle dolů, ale jdou po šikmé dráze – jakoby klouzaly po jakési virtuální nakloněné rovině.

Seznam pokusů:

- Výtok vody z nádoby – demonstrace rozdílných tlaků v různých hloubkách
- Pokusy na atmosférický tlak:
 - demonstrace tlaku plynu pomocí přehazování si závaží na dvou jezdících židlích
 - tlak vzduchu ilustrovaný pomocí injekční stříkačky
 - zvedání židle velkou přísavkou
 - model Magdeburských polokoulí
 - gumová rukavice v zavařovací láhvi
 - vztlaková síla – vypuštění horkovzdušného balónu
 - lihová raketa
- Pokusy na Bernoulliho princip:
 - přitahování dvou papírů, mezi které foukáme
 - zvedání papíru, nad který foukáme
 - pingpongový míček v trychtýři nevyfoukneme, ale bude tam vězet
 - vodní vývěva (sama o sobě), vysátí vzduchu z láhve a ukázka efektu atmosférického tlaku
 - Bernoulliho rukáv
 - zvučící roura roztočená nad hlavou
 - model křídla letadla
- Pokusy na Magnusův efekt:
 - šikmý let roztočeného válce
 - šikmý let roztočených slepených kelímků
 - vrčení roztočeného dřívka na provázku