

1 Vlastnosti kapalin a plynů

hydrostatika – zkoumá vlastnosti kapalin z hlediska stavu rovnováhy → kapalina je v klidu

hydrodynamika – zkoumá vlastnosti kapalin v pohybu

aerostatika, aerodynamika → analogicky pro plyny (nejčastěji vzduch)

tekutiny – společný název pro kapaliny a plyny

- ⇒ tvar dle nádoby, nemají stálý tvar
- ⇒ jsou snadno dělitelné

Kapaliny:

- ⇒ stálý objem
- ⇒ v tíhovém poli Země vytváří tzv. volnou hladinu, která je vždy kolmá na směr tíhové síly F_G
- ⇒ téměř nestlačitelné
- ⇒ viskozita (vnitřní tření uvnitř kapaliny: srovnej např. chování vody a oleje)
- ⇒ kapilární jevy (elevace, deprese)

Ideální kapalina

- ⇒ nestlačitelná
- ⇒ chová se jako **spojité prostředí** → **kontinuum** (nebereme v úvahu částicovou strukturu)
- ⇒ nulová viskozita (vnitřní tření)
- ⇒ dokonale tekutá
- ⇒ v reálu neexistuje; reálná kapalina za běžných podmínek se chová jen nepatrně odlišně od ideální kapaliny
- ⇒ nejvíce se tomuto ideálu blíží např. supratekuté helium

Plyny

- ⇒ nemají stálý tvar ani objem (přitažlivé síly mezi částicemi jsou velmi malé)
- ⇒ nevytváří volný povrch
- ⇒ velmi snadno stlačitelné

Ideální plyn

- ⇒ dokonale tekutý a stlačitelný
- ⇒ bez vnitřního tření

2 Tlak v tekutinách

⇒ v případě, že je tekutina v klidu a působíme silou F na povrch tekutiny o obsahu S

p – tlak **$[p] = \text{N/m}^2 = \text{Pa (pascal)}$**

skalární veličina

☺ rádobyvtip

V nebi se sejdou tři fyzikové: Newton, Pascal a Archimédes. I rozhodnou se zahrát si na schovávanou. Archimédes, jako služebně nejstarší, počítá u pikoly. Sotva začne, Pascal zmizí skryt ve vegetaci. Newton jen popojde, nakreslí na zem okolo sebe čtverec metr krát metr a čeká. Archimédes dopyká, otočí se a zvolá: "Deset, dvacet - Newton!" Newton však zakroutí hlavou a povídá: "Kdepak - Newton na metru čtverečním je Pascal!"

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

F – tlaková síla působící kolmo na plochu o obsahu S

Vyjádření 1 Pa v základních jednotkách SI: $1\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2 = \text{kg m s}^{-2} / \text{m}^2 = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$

1 hPa = 10^2 Pa – hektopascal

Staré jednotky tlaku:

1 torr (1 mm Hg) – nazvaná podle Torricelliho; 1 torr = 133,322 Pa

1 bar = 100 000 Pa (u počasí se často používá jednotka 1 milibar = 1 hPa)

1 atm = 760 torr = 1,01 bar

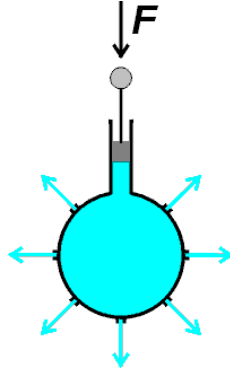
Měření tlaku:

- a) **manometr** → otevřený kapalinový
→ kovový – aneroid (mechanická deformace povrchu) – měření atmosférického tlaku
- b) **barograf** → přístroj, který zapisuje aktuální hodnotu tlaku do grafu; využívá se v meteorologii
- c) **barometr** → přístroj, který měří aktuální hodnotu atmosférického tlaku
- d) **digitální tlakoměr krevního tlaku** → oscilometrický princip (hodnoty tlaku se počítá na základě vibrace cévních stěn při nafukování a vyfukování manžety)

3 Tlak v tekutině vyvolaný vnější silou – Pascalův zákon

Tlak vyvolaný vnější silou se přenáší do všech směrů.

<http://www.fyzikalni-experimenty.cz/cz/mechanika/pascaluv-zakon-model-jezka/>



Demonstrace Pascalova zákona – vodní ježek

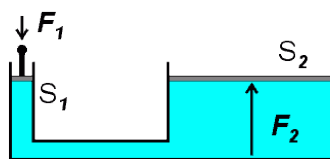
Pascalův zákon:

Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalinu v uzavřené nádobě, je ve všech místech stejný.

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

Technická praxe

- a) spojené nádoby – **hydraulická zařízení**



Spojené nádoby

- b) pneumatická zařízení – buchary, kladiva, brzdy u vlaku → stlačený vzduch

4 Tlak v kapalinách vyvolaný tíhovou silou

⇒ kapalina v tíhovém poli → na kapalinu působí tíhová síla → vyvolává tzv. hydrostatickou tlakovou sílu F_h

F_h – hydrostatická tlaková síla

$$F_h = mg = \rho V g = \rho S h g$$

$$F_h = Sh\rho g$$

S – plocha, např. dna (kolmá na tíhovou sílu)

h – hloubka pod volným povrchem kapaliny

⇒ F_h působí na dno i na stěny nádoby

⇒ F_h působí na tělesa ponořená do kapaliny

Hydrostatický paradox – hydrostatická síla na dno nádoby nezávisí na tvaru nádoby, ale pouze na výšce hladiny a ploše dna

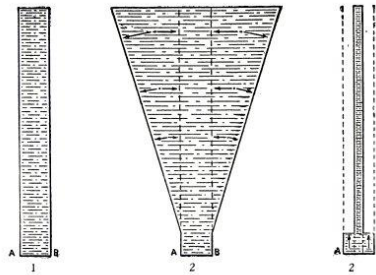


Fig. 89.—Explanation of the Hydrostatic Paradox.

Hydrostatický paradox

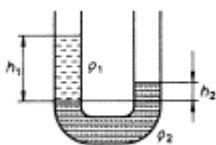
p_h – hydrostatický tlak

$$p_h = h\rho g$$

⇒ místa o stejném hydrostatickém tlaku nazýváme **hladiny**

⇒ **volná hladina** – na povrchu kapaliny, kde je $p_h = 0$ Pa

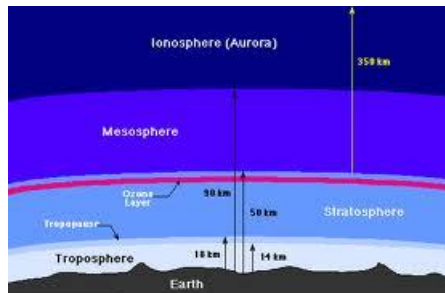
Dvě kapaliny v U – trubici → určení hustoty neznámé kapaliny (ρ_1 – např. voda – známe)



$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

5 Tlak vzduchu vyvolaný tíhovou silou

⇒ atmosféra Země (tekutina) podobně jako kapalina vytváří atmosférickou tlakovou sílu F_a



Složky atmosféry

- ⇒ účinky atmosférického tlaku lze např. sledovat při pokusu se sklenicí a táckem → ačkoliv na tácek působí zdánlivě velkou silou voda ve sklenici, tácek drží u sklenice síla atmosférického tlaku
- ⇒ <http://www.fyzikalni-experimenty.cz/cz/mechanika/atmosfericky-tlak-prevracena-sklenice-s-vodou/>

p_a – atmosférický tlak

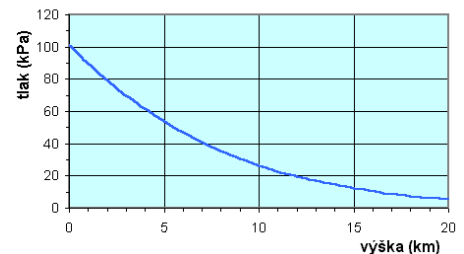
$$p_a = p_0 e^{-\frac{h\rho_0 g}{p_0}}$$

p_0 – tlak ve výšce $h = 0$ m. n. m.

ρ_0 – hustota vzduchu ve výšce $h = 0$ m. n. m.

- ⇒ klesá s nadmořskou výškou cca o 1 hPa na 10 m
- ⇒ v ČR se nadmořská výška udává vzhledem ke hladině Baltského moře

Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce

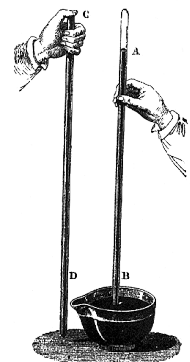


podtlak – tlak menší než barometrický

přetlak – tlak větší než barometrický

Torricelliho pokus

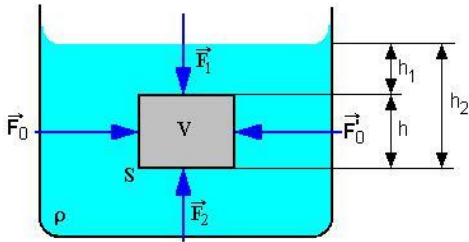
- ⇒ základ pro měření atmosférického tlaku (historický experiment se rtutí – 1643)
- ⇒ **rtuť** v uzavřené trubici dlouhé 1 m poklesne do **výšky cca 76 cm**, ale nevyteče → **nad rtutí je vakuum** a sloupec je udržován ve výšce okolním atmosférickým tlakem → **princip barometru**
- ⇒ při stejném experimentu s vodou vystoupí voda do max. výšky 10 m → mechanickou pumpou nelze čerpat vodu z hlubší studny nebo do větší výšky než 10 m



normální atmosférický tlak - $p_n = 101,3$ kPa

6 Vztlková síla v tekutinách – Archimédův zákon

⇒ na těleso ponořené do kapaliny působí vztlková síla F_{vz}



Odvození vztlkové síly:

$F_1 = S h_1 \rho_k g$ – síla působící na horní podstavu

$F_2 = S h_2 \rho_k g$ – síla působící na dolní podstavu

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

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

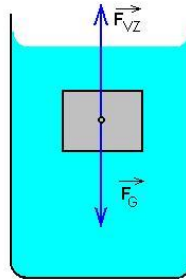
V – objem **ponořené části** tělesa

ρ_k – hustota kapaliny

g – tíhové zrychlení

Síly působící na těleso ponořené do kapaliny:

- ⇒ dolů: tíhová síla F_G
- ⇒ nahoru: vztlková síla F_{vz}
- ⇒ výsledná síla $F = |F_G - F_{vz}|$; směr podle větší ze sil



Archimédův zákon:

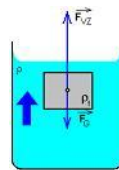
Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno hydrostatickou **vztlkovou silou**. Velikost této síly je rovna tíze kapaliny stejného objemu, jako je objem ponořené části tělesa.

Př. těleso vytlačí mimo nádobu vodu (objem vody převedeme na kilogramy), tato voda má nějakou tíhu $G = mg$; vztlková síla je stejně veliká jako tato tíha ($F_{vz} = G$)

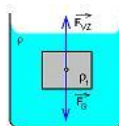
Plování těles

ρ_t – hustota tělesa, ρ_k – hustota kapaliny

a) $\rho_t > \rho_k$ – **těleso klesá ke dnu** (kámen ve vodě)



b) $\rho_t = \rho_k$ – **vznáší se** (ryby, mořští živočichové)

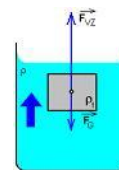


c) $\rho_t < \rho_k$ – **stoupá**, až se částečně vynoří (dřevo ve vodě)

⇒ po vynoření je vztlková síla v rovnováze s tíhovou silou

⇒ $F_{vz} = F_G$ tj. $V_{ponor} \rho_k g = m g$, tj. $V_{ponor} \rho_k g = V_t \rho_t g$ tj.

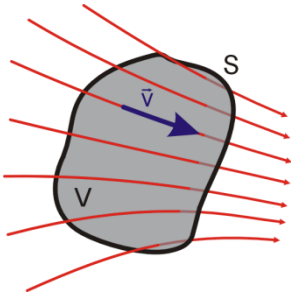
⇒ využití: **hustoměry**



$$\frac{V_{ponor}}{V_t} = \frac{\rho_t}{\rho_k}$$

7 Proudění tekutin – hydrodynamika, aerodynamika

Proudění – pohyb tekutiny (kapaliny, plynu) v jednom směru

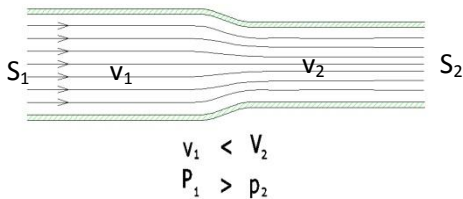


- ⇒ plocha S vymezuje tzv. **proudovou trubici**
- ⇒ kapalina proudí rychlostí v
- ⇒ **proudové vlákno** – kapalina procházející trubicí
- ⇒ **proudnice** – myšlená čára, jejíž tečna v daném bodě určuje směr rychlosti

Stacionární proudění – **rychlost** proudění v jednom místě **se nemění** s časem

Nestacionární proudění – **rychlost** proudění v 1 místě **se mění** s časem

Rovnice spojitosti (kontinuity)



- ⇒ v užší části trubice jsou proudnice hustší a rychlost proudění je větší ($v_2 > v_1$)
- ⇒ tlak je naopak v užší části menší (viz hydrodynamický paradox dále)
- ⇒ S_1, S_2 – plochy kolmého řezu trubice

hmotnostní tok Q_m

$$[Q_m] = \text{kg s}^{-1}$$

$$Q_m = S v \rho$$

- ⇒ množství vody v kg, které za 1 sekundu proteče určitým průřezem

objemový průtok Q_v

$$[Q_v] = \text{m}^3 \text{s}^{-1}$$

$$Q_m = S v$$

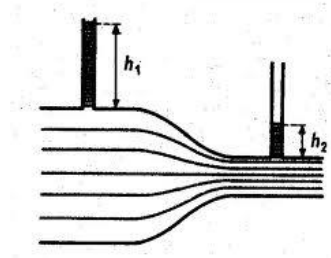
Rovnice spojitosti – při ustáleném proudění (a za předpokladu konstantní hustoty) je objemový průtok konstantní

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Př. sleduj tvar proudu vody vytékajícího z vodovodní baterie - vysvětli

8 Bernoulliho rovnice

- ⇒ popisuje proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí
- ⇒ v užší části potrubí je větší rychlost proudění (viz. obr.), tudíž kinetická energie je tam větší než v širší části
- ⇒ z čeho se bere přírůstek energie?
- ⇒ vodorovná trubice → stejná výška nad zemí, takže E_p se nemění



- ⇒ experimentem lze zjistit, že **v užší části trubice** je sloupec kapaliny v menší výšce než v širší části trubice → je tam **menší tlak**
- ⇒ **na úkor tlakové energie se zvýší energie kinetická**

E_p – tlaková potenciální energie

$$E_p = p \Delta V$$

p – tlak v kapalině

ΔV – změna objemu

Musí platit zákon zachování energie: $E_k + E_p = \text{konst.}$, tj. $\frac{1}{2} m v^2 + p \Delta V = \text{konst.}$, hmotnost m nahradíme pomocí ρV , tj. $\frac{1}{2} \rho V v^2 + p \Delta V = \text{konst.}$ Rovnici můžeme vzhledem ke konstantnímu objemu vydělit V .

Bernoulliho rovnice pro vodorovné potrubí

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

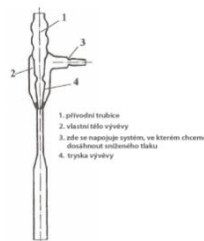
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Hydrodynamický paradox – snížení tlaku v užší části trubice

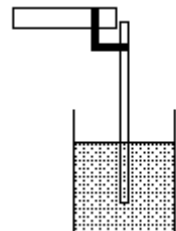
Vysvětlení: v užší části trubice je větší rychlost, tj. $v_2^2 > v_1^2$. Aby platila Bernoulliho rovnice, musí být $p_2 < p_1$.

Využití:

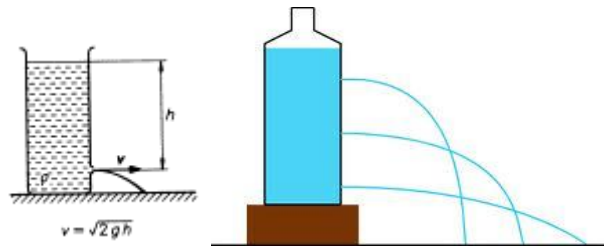
a) vodní vývěva



b) mechanický rozprašovač (fixírka) – stříkáci pistole, karburátory u motocyklů



c) kapalina vytékající z nádoby vlivem tíhového pole



Voda vytékající z nádoby

⇒ trajektorie: parabola

⇒ kapalina vytéká rychlostí $v = \sqrt{2gh}$

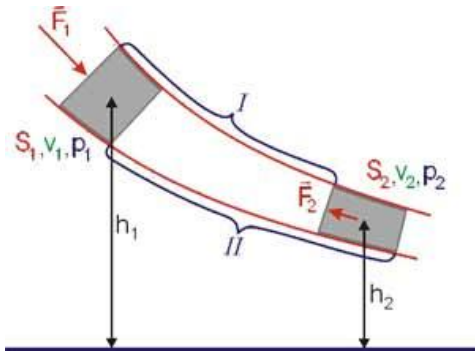
Pozn. Obecně platí při různém rozdílu tlaků uvnitř a vně nádoby $v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$

9 Proudění reálné tekutiny a obecná Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice – platí pro ideální kapalinu bez vnitřního tření

Reálná kapalina → projevuje se **vnitřní tření - viskozita**

Obecná Bernoulliho rovnice



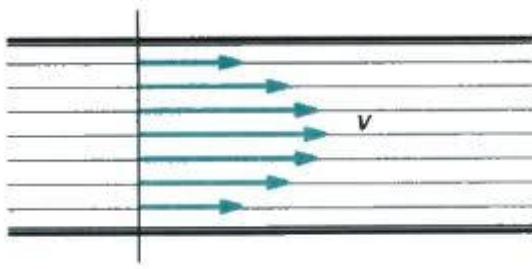
$$p + h \rho g + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konst.}$$

$$p_1 + h_1 \rho g + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + h_2 \rho g + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Vnitřní tření - viskozita

- ⇒ tření o stěny nádoby
- ⇒ tření vrstev tekutiny o sebe
- ⇒ mění se s teplotou (u kapalin s rostoucí T se viskozita zmenšuje)

Proudění v reálné tekutině



- ⇒ **mezní vrstva** – u stěny s nádobou: $v = 0 \text{ m/s}$
- ⇒ koncové body vektorů rychlosti tvoří **parabolu**

Laminární proudění

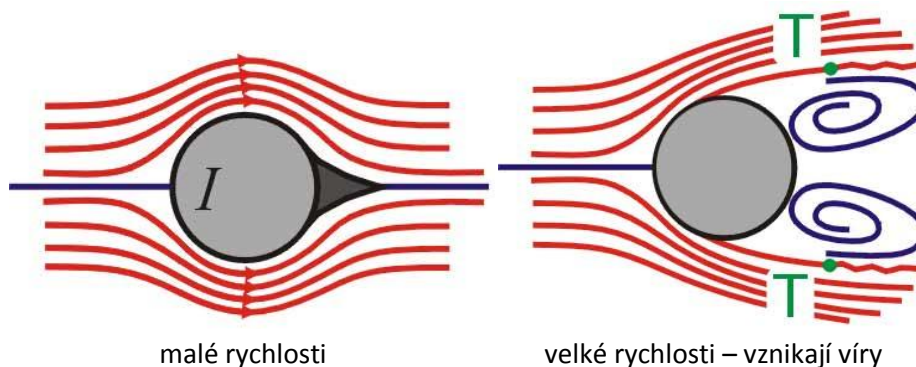
- ⇒ proudnice jsou rovnoběžné
- ⇒ malé rychlosti
- ⇒ vrstvy se po sobě posouvají

Turbulentní proudění

- ⇒ vírové proudění
- ⇒ při velkých rychlostech
- ⇒ **Reynoldsovo číslo** – udává, kdy se laminární proudění mění na turbulentní

10 Obtékání těles reálnou tekutinou

⇒ k obtékání dochází při vzájemném pohybu tělesa a tekutiny



odporová síla prostředí F_x - Newtonův vztah

$$F_x = \frac{1}{2} C_x S \rho v^2$$

S – plocha příčného řezu

ρ – hustota tekutiny

v – rychlost proudění

C_x – součinitel odporu

Tabulka C_x pro různé tvary

		1,33
		1,12
		0,48
		0,34
		0,03

Stokesův vzorec

⇒ udává sílu odporu prostředí pro kouli padající v nějakém prostředí

⇒ využívá se pro měření viskozity

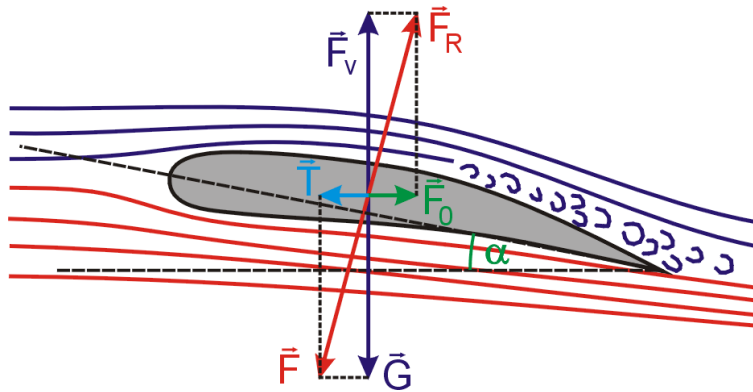
⇒ η – viskozita kapaliny, r – poloměr koule, ρ – hustota tělesa, ρ_k – hustota tělesa

$$F = 6\pi\eta r v$$

$$\eta = \frac{2}{9v} r^2 g(\rho - \rho_k)$$

Křídlo letadla

- ⇒ nemůže být symetrické → nepůsobila by žádná síla vzhůru
- ⇒ nad křídlem proudnice hustší → větší rychlost, menší tlak → podtlak
- ⇒ pod křídlem proudnice řidší → menší rychlost, větší tlak → přetlak zespoda



Rozložení sil na křídle letadla

Kromě již zmíněné **vztlakové síly F_V** , která působí proti **tíhové síle G** a udržuje letící těleso ve vzduchu, je to **odporová síla F_0 prostředí**. **Celková reakční síla F_R působící na křídlo** je při rovnoměrném letu kompenzována **výslednicí F tíhy letadla G a tažné síly T motoru přenesené na křídlo**. **Vztlaková síla F_V závisí na tvaru křídla** a též na **úhlu náběhu α** , který je znázorněn na předchozím obrázku. **Vztlaková síla je kladná (míří vzhůru)** od mírně záporných hodnot úhlu α a svého maxima dosahuje v okolí $\alpha = 15^\circ$.

Nadzvuková letadla

- ⇒ při rychlosti letadla $v = v_{zvuku}$ roste prudce odporová síla F_x
- ⇒ vzniká tzv. **rázová vlna** (tlaková), která se projevuje **třeskem** (podobně jako při prasknutí bičem)



Rázová vlna