

# Hydrostatika

Hydrostatika je věda, která se zabývá podmínkami rovnováhy kapalin a silovým působením na tuhá tělesa. Kapalina je v klidu tehdy, když se nepohybuje vůči stěnám nádoby, která se nachází v *inerciálním prostoru*.

Molekuly tekutin narážejí na stěny nádoby, se kterými se stýkají. Tekutina proto působí na stěny tlakovou silou a uvnitř tekutiny vzniká **tlak**. Tlak v tekutině, který je vyvolán vnější silou, vypočítáme tak, že tlakovou silou  $F$  dělíme obsahem plochy  $S$ , na kterou působí tlaková síla kolmo

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

O tom, že tlak závisí na ploše, na kterou působí síla, vypovídá třeba píchnutí jehly, krájení ostrým nožem, jízda na lyžích, chůze ve sněžnicích nebo použití pásů u tanků jezdcích v rozbahněné krajině.

Jednotkou tlaku je **pascal** (Pa). Jeden pascal je tlak, který vyvolává síla **1 newtonu** rovnoměrně rozložená na rovinné ploše s plošným obsahem **1 čtverečního metru** a kolmá ke směru síly. Pascal je jednotka udaná základními jednotkami:

$$\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$$

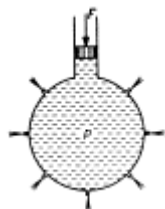
V praxi se častěji používají jednotky **kPa**, **MPa**. Dříve se používala jednotka 1 bar = 100 kPa, atmosféra 1 atm = 101,325 kPa a 1 torr = 133,322 Pa.

Tlaky v tekutinách se měří **manometry**. Pro menší tlaky jsou to kapalinové manometry, pro větší tlaky se užívají deformační manometry.

Nejvyšší tlak vyvinutý v laboratoři dosáhl v gigantickém hydraulickém lisu ve tvaru broušeného diamantu v Carnegie institution's Geophysical Laboratory ve Washingtonu v červnu 1978 1700 tun na 1 cm<sup>2</sup> (170 GPa). Při užití nárazových metod a nárazové rychlosti až do 29 000 km/h byl USA r. 1958 dosažen momentální tlak 75 milionů atmosfér tj. 7000 GPa. Jednu z nejvyšších hodnot tlaku bychom naměřili ve středu Země 3,6 · 10<sup>11</sup> Pa nebo ve středu Slunce 2 · 10<sup>16</sup> Pa. Nejvyšší vakuum v hodnotě řádově 10<sup>-16</sup> Pa bylo dosaženo ve středisku IBM v New Yorku v říjnu 1976 v kryogenním zařízení s teplotou pod -200 °C. Nejnižší tlak vůbec, bychom našli v mezihvězdném prostoru, a to 10<sup>-17</sup> Pa.

## Tlak vyvolaný vnější silou

Kapalina nepůsobí tlakem jen na stěny nádoby, ale na všechno, co je v ní ponořeno. Působení tlaku v kapalinách vyjadřuje **Pascalův zákon**: *Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na povrch tekutiny, je v každém místě kapalného tělesa stejně velký, a to ve všech směrech*. Nezávisí tedy na směru síly, která jej vyvolala, ale pouze na její velikosti.



Závěry plynoucí z Pascalova zákona platí také pro plyny. Hustíme-li např. pneumatiku jízdního kola, její stěny se napínají ve všech místech stejně, i když tlaková síla vstupujícího vzduchu působí v jednom směru. Manometr tlakové nádoby ukazuje stejný tlak nezávisle na tom, na kterou stěnu nádoby je namontován.

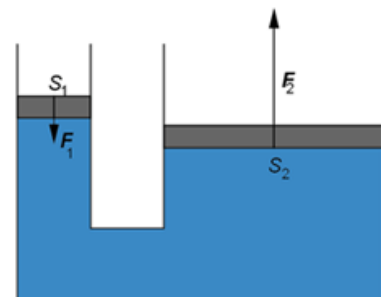
Působení tlakové síly v tekutinách se využívá v **hydraulických a pneumatických zařízeních**. Základní částí hydraulického zařízení jsou dvě válcové nádoby nestejného obsahu, spojené u dna trubicí. V nádobách je uzavřena pod pohyblivými písty kapalina.

Působíme-li na píst v užším válci o průřezu  $S_1$  tlakovou silou  $F_1$ , přenáší se tato síla do kapaliny, v níž vyvolá tlak  $p_1$ , který je ve všech místech kapaliny uzavřené v hydraulickém zařízení stejný. Proto na širší píst o průřezu  $S_2$  působí kapalina tlakovou silou

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

a odtud po úpravě

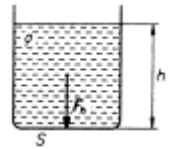
$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$



Můžeme tedy při působení velmi malé silou na jeden píst vyvolat značnou sílu na druhém pístu, ovšem práce zůstává stejná. Dráha malého pístu je tolikrát větší, kolikrát větší je síla vyvolaná pístem s větším plošným obsahem. Velký význam má Pascalův zákon v hydraulických brzdách. Zde existence stejného tlaku ve všech místech rozvodu brzdové kapaliny umožňuje, aby brzdy na kola působily stejnými silami a vozidlo se při brzdění nedostalo do smyku. Hydrauliku používá i řada živočichů, např. mořské ježovky, sumýši apod.

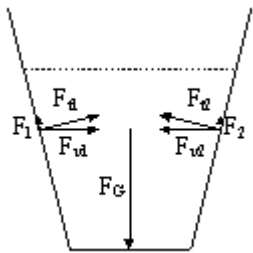
## Tlak v kapalinách vyvolaný tíhovou silou

V tíhovém poli Země působí na všechny částice kapalného tělesa **tíhová síla**. Výsledkem tohoto působení je **hydrostatická tlaková síla**  $F_h$ . Touto silou působí kapalina na dno a stěny nádoby nebo na potápěče či ponorku pod hladinou.



Velikost hydrostatické tlakové síly  $F_h$ , kterou působí kapalina v hloubce  $h$  na dno nádoby o plošném obsahu  $S$ , je dána v případě nádoby se svislými stěnami tíhou  $F_G$  ( $G$ ) kapaliny v nádobě. Je-li  $m = \rho \cdot V$  ( $\rho$  je hustota a  $V$  objem kapaliny) a  $V = S \cdot h$  pak platí:

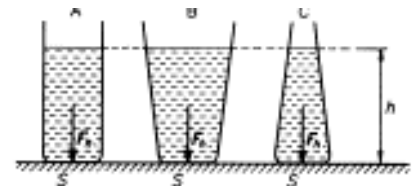
$$F_h = F_G = m \cdot g = \rho \cdot S \cdot h \cdot g$$



**Velikost hydrostatické tlakové síly závisí na hustotě kapaliny, na obsahu dna a na hloubce pod volným povrchem kapaliny. Nezávisí na tvaru a celkovém objemu kapalného tělesa.** Když nalijeme do nádob různého tvaru, ale se dnem stejné plochy  $S$  a hladinou ve stejné výšce  $h$  kapalinu, bude na dno nádoby působit vždy stejná tlaková síla. Tento jev se nazývá **hydrostatické paradoxon**. Je způsobeno tím, že v nádobách, jejichž stěny nejsou svislé, působí kromě tíhy kapaliny také reakce stěn na kolmé tlakové síly.

Obr. – na dno působí tíhová síla  $F_G$ .

Kapalina zároveň působí kolmými tlakovými silami na stěny. Reakce kolmých sil působí na kapalinu. Tyto reakce jsou síly  $F_{t1}$  a  $F_{t2}$ . Rozkládají se na svislé složky  $F_1$  a  $F_2$  a vodorovné  $F_{v1}$  a  $F_{v2}$ . Vodorovné složky se vzájemně zruší a svislé nadlehčí kapalinu právě tak, že na dno působí je síla  $F_h$ , přestože velikost  $F_G$  je v tomto případě větší.



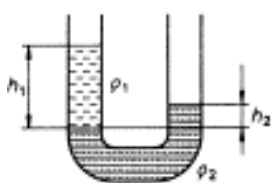
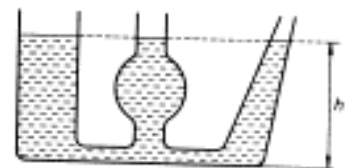
Tlak v kapalině vyvolaný hydrostatickou tlakovou silou se nazývá **hydrostatický tlak**  $p_h$ . Hydrostatický tlak v hloubce  $h$  pod volným povrchem kapaliny o hustotě  $\rho$  je:

$$p_h = \frac{F_h}{S} = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} = \rho \cdot h \cdot g$$

Hydrostatický tlak je přímo úměrný hustotě kapaliny a hloubce místa pod volným povrchem kapaliny.

Místa o stejném hydrostatickém tlaku se nazývají **hladiny**. Hladina o nulovém hydrostatickém tlaku je na volném povrchu kapaliny a nazývá se **volná hladina**.

Na základě hydrostatického tlaku lze vysvětlit podstatu **spojených nádob**. Spojené nádoby jsou nádoby, které jsou u dna spojeny trubicí. Jejich tvar může být jakýkoli. Nalijeme-li do těchto nádob kapalinu o stejné hustotě, pak se hladina ve všech nádobách ustálí ve stejné výšce  $h$  nad společným dnem. Je to způsobeno důsledkem Pascalova zákona – ve všech místech kapaliny je stejný tlak. U dna tedy bude tlak  $p_h = \rho \cdot h \cdot g$ . Veličiny  $\rho$  a  $g$  jsou stejné, proto musí být i stejná výška  $h$ .



Z toho, že princip spojených nádob vychází z Pascalova zákona, můžeme odvodit i to, že ve spojených nádobách, ve kterých jsou různé kapaliny, jsou hustoty kapalin v převráceném poměru k výškám kapalin nad společným rozhraním, protože tam je hydrostatický tlak stejný.

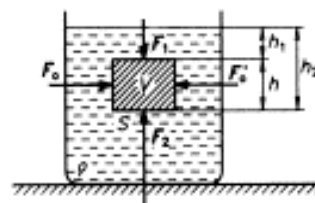
$$\rho_1 \cdot h_1 \cdot g = \rho_2 \cdot h_2 \cdot g$$

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

## Vztlaková síla v kapalinách a plynech

Tělesa, která ponoříme do kapaliny, jsou lehčí než ve vzduchu. Nadlehčuje je **vztlaková síla**  $F_{vz}$ . Směřuje vzhůru a je důsledkem hydrostatického tlaku kapaliny. Ponoříme-li do kapaliny kvádr, působí na každou jeho stěnu kolmá tlaková síla. Síly, které působí na boční stěny, se navzájem vruší, na horní stěnu působí síly  $F_1 = p_{h1} \cdot S$  a na spodní  $F_2 = p_{h2} \cdot S$ .

Jejich výslednice je vztlaková síla



$$F_{vz} = F_2 - F_1 = \rho \cdot S \cdot h_2 \cdot g - \rho \cdot S \cdot h_1 \cdot g = \rho \cdot S \cdot h \cdot g = \underline{\underline{\rho \cdot V \cdot g}}$$

kde  $V = S \cdot h$  je objem kvádrů.

Tento poznatek popisuje **Archimédův zákon**:

**Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze kapaliny stejného objemu, jako je objem ponořeného tělesa.**

Důsledkem Archimédova zákona je různé chování těles v kapalině. Na každé těleso ponořené do kapaliny totiž působí Země tíhovou silou  $F_G = \rho_t \cdot V \cdot g$  ve svislém směru dolů a kapalina vztlakovou  $F_{vz} = \rho \cdot V \cdot g$ .  $\rho_t$  je průměrná hustota ponořeného tělesa,  $\rho$  je hustota kapaliny a  $V$  objem ponořeného tělesa. Mohou nastat tři případy:

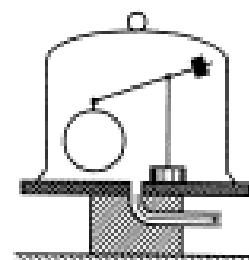
- 1)  $\rho_t > \rho \Rightarrow F_G > F_{vz} \rightarrow$  výslednice sil  $F$  směřuje dolů a těleso klesá ke dnu. Takto se chovají např. kovové předměty ve vodě.
- 2)  $\rho_t = \rho \Rightarrow F_G = F_{vz} \rightarrow$  výslednice sil  $F = 0$  a těleso se v kapalině vznáší. Ve vodě se vnašejí např. ryby a mořští živočichové.
- 3)  $\rho_t < \rho \Rightarrow F_G < F_{vz} \rightarrow$  výslednice sil  $F$  směřuje nahoru a těleso stoupá k volné hladině kapaliny. Jakmile jí dosáhne, částečně se vynoří a ustálí se v takové poloze, že tíhová síla  $F_G$  je v rovnováze se vztlakovou silou  $F_{vz}$  jejíž velikost se rovná tíze  $G'$  kapaliny stejného objemu  $V'$ , kterou vytlačuje ponořená část tělesa. Takto se chová např. dřevěný špalek ve vodě.

Mezi hustotami tělesa a kapaliny a celým a ponořeným objemem tělesa je vztah vyplývající z rovnosti sil:

$$\frac{V'}{V} = \frac{\rho_t}{\rho}$$

*Těleso se ponoří do kapaliny tím větší částí svého objemu, čím je jeho hustota větší, nebo čím je hustota kapaliny menší. Tohoto poznatku využívají **hustoměry** (slouží k měření hustoty kapalin).*

Vztlakovou silou působí nejen kapaliny, ale také plyny. Nadlehčována jsou tedy i všechna tělesa ve vzduchu. Vztlaková síla plynů působící na tělesa je však mnohem menší než vztlaková síla kapalin kvůli malé hustotě plynů (např. vzduch –  $\sim 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Při vážení předmětů, které mají hustotu mnohem větší než plyny, lze vztlakovou sílu zanedbat, ale existuje. Když na vzduchu vyvážíme skleněnou baňku, ani závaží ani baňka neklesne dolů. Když je vložíme pod skleněný zvon a odčerpáme vzduch, klesne baňka, protože ve skutečnosti je těžší. Když pod zvon opět pustíme vzduch, baňka a závaží budou opět v rovnováze.



Na principu vztlakové síly vzduchu fungují balóny a vzducholodě (teplý vzduch a vodík nebo helium je lehčí než studený vzduch).