1.8.3 Hydrostatický tlak

Předpoklady: 010802

Z normální nádoby s dírou v boku voda vyteče, i když na ni netlačí vnější síla.

Pokus: Prázdná tetrapacková krabice, několik stejných děr v boční stěně postupně nad sebou. Krabici naplníme vodou $\Rightarrow$ z dírek začne vytékat voda, čím je dírka níže, tím rychleji voda vytéká $\Rightarrow$

- v kapalině existuje tlak,
- velikost tlaku roste s hloubkou.

Krabice je otevřená, a tak je zřejmé, že tlak nezpůsobuje vnější síla, o které jsme se bavili v minulé hodině.

Př. 1: Najdi příčinu tlaku, který jsme objevili v předchozím pokusu.

Tlak způsobuje gravitační síla působící na kapalinu.
Každý kousíček vody přitahuje gravitace $\Rightarrow$ aby neklesl, musí ho něco nadlehčovat (stejně jako nadlehčuje stůl předmět, který na něj položíme) $\Rightarrow$ každá vrstva vody musí „unést“ všechnu vodu nad ní (stejně jako u kostek naskládaných na sobě, musí každá kostka unést všechny kostky nad sebou) $\Rightarrow$ čím hlouběji je zkoumaná vrstva vody, tím víc vody je nad ní a tím víc vody musí udržet a tím větší tlak na ní působí.

Tento tlak se objevuje v kapalině vždy, i když stojí. Proto se nazývá **hydrostatický tlak**, značí se většinou p_k.

Jak určit hydrostatický tlak v hloubce h pod hladinou nádoby s kapalinou o hustotě ρ a plošném obsahu S?
Předpokládáme, že stěny nádoby jsou kolmé. Hydrostatický tlak způsobuje hmotnost vody $\Rightarrow$ určíme hmotnost vody, která je nad vrstvou vody, která nás zajímá.
$m = V\rho = hS\rho$.
Potřebujeme tlakovou sílu (rovná se síle, kterou přitahuje Země vodu nad ní):
$F = mg = Sh\rho g$.
Tlak: $p_k = \frac{F}{S} = \frac{Sh\rho g}{S} = h\rho g$.

- Vzorec odpovídá pokusu, ve větší hloubce působí větší tlak.
- Hydrostatický tlak nezávisí na průřezu nádoby, protože větší průřez nádoby znamená sice větší hmotnost vody, ale rozprostřenou na větší plochu.
- Vztah, který jsme odvodili pro nádobu se svislými stěnami, platí i pro všechny ostatní nádoby (ještě to ověříme).

Hydrostatický tlak kapaliny je přímo úměrný hustotě kapaliny a hloubce místa pod volným povrchem vody. Je určen vztahem: $p_h = h\rho g$. Hydrostatický tlak nezávisí na tvaru nádoby.

Př. 2: Je možné umístit nádobu do takových podmínek, aby v ní neexistoval hydrostatický tlak?

Hydrostatický tlak je důsledkem působení gravitační síly $\Rightarrow$ nevzniká v kapalině, která je beztížném stavu.

Př. 3: Urči hydrostatický tlak na dně bazénu hlubokého 2,5 m.

$h = 2{,}5\,\mathrm{m}$, $\rho = 1000\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, $g = 10\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$, $p = ?$

$p_k = h\rho g = 2{,}5 \cdot 1000 \cdot 10 = 25000\ \mathrm{Pa}$

V hloubce 2,5 m působí hydrostatický tlak 25000 Pa.

Podobná hodnota jako tlak boty na podlahu. Je vidět, že hydrostatický tlak může dosahovat značných hodnot.

Př. 4: Spočti hydrostatický tlak ve vodě v hloubce 10 m, 100 m a 10 km.

10 m: $p_k = h\rho g = 10 \cdot 1000 \cdot 10 = 100000\ \mathrm{Pa}$

(na plochu lavice působí 6 automobilů Škoda Octavia Combi)

100 m: $p_k = h\rho g = 100 \cdot 1000 \cdot 10 = 10^6\ \mathrm{Pa} = 1\,\mathrm{MPa}$

(na plochu lavice působí 2 tanky T-72M4CZ)

10 km: $p_k = h\rho g = 10000 \cdot 1000 \cdot 10 = 10^8\ \mathrm{Pa} = 100\,\mathrm{MPa}$

(na plochu lavice působí 6250 vozů Škoda Octavia Combi, 200 tanků T-72M4CZ nebo čtyři naložené nákladní vlaky)

Př. 5: Bazén pro potápění je hluboký 10 m. Urči hydrostatický tlak, který působí na potápěče, který je 2 metry nade dnem.

Hydrostatický tlak závisí na hloubce pod hladinou $\Rightarrow$ potápěč je v hloubce 8 m.

$p_k = h\rho g = 8 \cdot 1000 \cdot 10 = 80000\ \mathrm{Pa}$

Na potápěče působí tlak 80000 Pa.

Pedagogická poznámka: V předchozím příkladu jde o odhalení zcela automatického myšlení těch žáků, kteří buď neví, které ze dvou čísel dosadit do vzorce, nebo jedno z nich dosadí (a získají tak špatný výsledek).

Př. 6: Urči sílu, kterou musí potápěč překonat při nádechu vzduchu o normálním atmosférickém tlaku v hloubce 10 m.

Při nádechu musí svaly nadzvednout hrudník, aby se zvětšil objem plic.

Plocha hrudníku 30 cm x 30 cm (přibližně) $\Rightarrow$ $S = ab = 0{,}3 \cdot 0{,}3\,\mathrm{m}^2 = 0{,}09\,\mathrm{m}^2$

Tlak v hloubce 10 m už jsme spočítali: $p_k = 10^5\ \mathrm{Pa}$.

$$p = \frac{F}{S} \Rightarrow F = pS = 10^5 \cdot 0{,}09\,\mathrm{N} = 9000\,\mathrm{N}$$

Při nádechu vzduchu o normálním tlaku by potápěč v hloubce 10 m musel překonat sílu 9000 N.

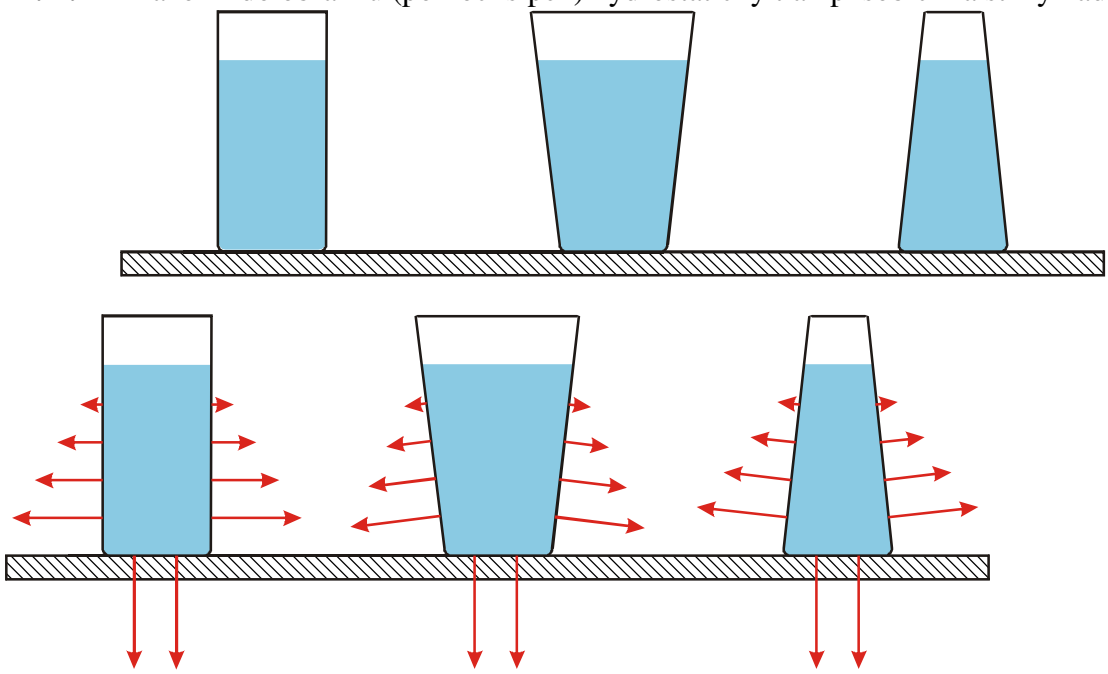
⇒ Potápěči nedýchají vzduch o normálním tlaku, vzduch z bomby je pouštěn pod vyšším tlakem (a tak pomáhá svalům nazvednout hrudník).
⇒ Při vynoření musí potápěči vyplouvat pomalu, aby vzduch rozpuštěný v krvi při rychlé dekompresi (tj. snížení tlaku okolního prostředí) nevytvořil bublinky (tak jako se vytvoří bublinky v perlivé limonádě po jejím otevření a poklesu tlaku uvnitř PET lahve).

Hydrostatický tlak působí:

- nahoru (nadlehčování vyšších vrstev vody),
- dolů (tlak na nižší vrstvy, na dno nádoby),
- do stran (vytékání vody z dírek),

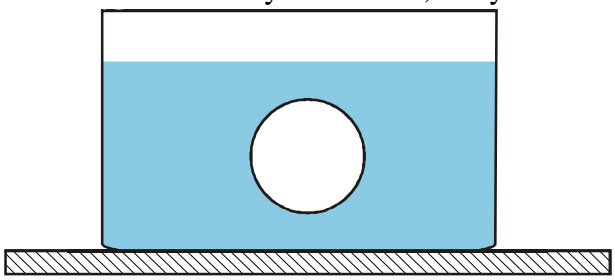
⇒ (stejně jako tlak způsobený vnější silou) působí v tekutině do všech stran.

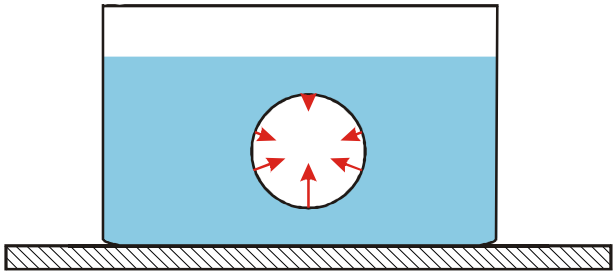
Př. 7: Znázorni do obrázku (pomocí šipek) hydrostatický tlak působící na stěny nádob.



Tlak se zvětšuje s hloubkou, vždy působí kolmo na stěnu.

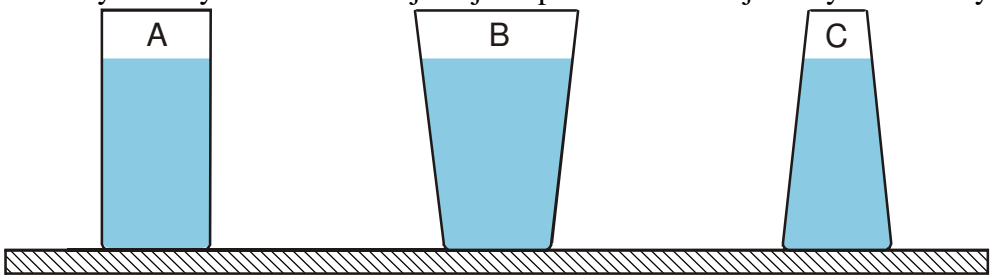
Př. 8: Znázorni do obrázku (pomocí šipek) hydrostatický tlak působící na ponořenou kuličku. Jaká bude výslednice sil, kterými voda na kuličku působí?





Tlak působící na spodní část kuličky (hlouběji pod hladinou) je větší než tlak působící na horní část kuličky, síly z obou bočních stran jsou stejné $\Rightarrow$ výsledná síla bude na kuličku působit směrem nahoru.

Př. 9: Všechny nádoby na obrázku mají stejnou plochu dna a stejnou výšku hladiny.



Porovnej: a) velikost hydrostatického tlaku kapaliny na dna nádob,
b) velikost hydrostatické tlakové síly na dna nádob.

a) Velikost hydrostatického tlaku kapaliny na dna nádob je u všech nádob stejná (podle vzorce $p = h\rho g$).

b) Velikost hydrostatické tlakové síly je určena vzorcem $F = pS$ $\Rightarrow$ tlaková síla musí být u všech nádob stejná.

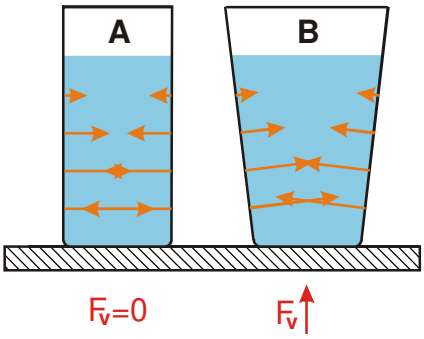
Výsledek předchozího příkladu je překvapivý (nádoby obsahují různé množství kapaliny, ale tlaková síla na dno všech nádob je stejná), proto se označuje jako hydrostatický paradox (hydrostatické paradoxon).

Hydrostatický paradox: Hydrostatická tlaková síla kapaliny působící na dno nádoby nezávisí na jejím tvaru, pouze na druhu kapaliny, hloubce nádoby a ploše dna.

Proč jsou stejné tlakové síly kapaliny u nádob *A* a *B*?

Problém: Nádoba *B* obsahuje více kapaliny než nádoba *A* $\Rightarrow$ pokud jsou tlakové síly obou kapalin stejné, musí existovat síla, která působí na kapalinu v nádobě *B* směrem nahoru.

Př. 10: V příkladu 6 jsme kreslili do obrázku síly, kterými působí kapalina na stěny nádoby. Zakresli do obrázku síly, kterými působí stěny nádob *A* a *B* na kapalinu. Jaká je výslednice těchto sil?



3. Newtonův zákon: stěna musí na kapalinu působit stejně velkou silou opačného směru ⇒ zakreslené síly ⇒

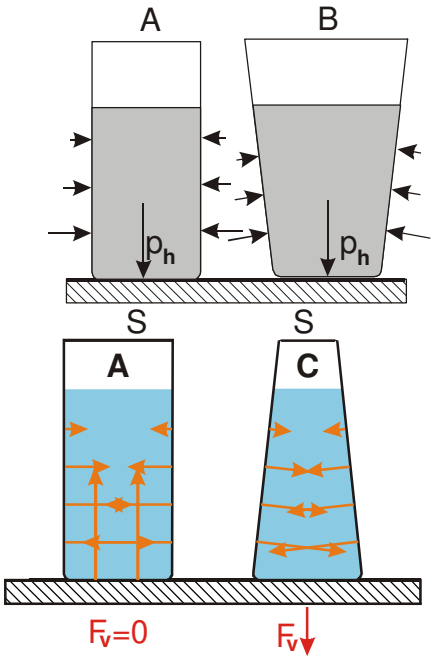
- nádoba *A*: výslednice sil stěny je nulová,
- nádoba *B*: výslednice sil stěny směřuje kolmo vzhůru.

Větší množství kapaliny v nádobě *B* nadlehčuje výsledná síla bočních stěn ⇒ tlaková síla na dno může být stejná jako u nádoby *A*.

Dodatek: Předchozí úvaha není důkazem, jde pouze o nalezení možného vysvětlení. Je možné pokračovat i dále. Pokud budou stěny méně svislé, je rozdíl mezi množství kapaliny v nádobě *B* a v nádobě *A* větší, zároveň se však zvětší i výsledná síla, kterou na kapalinu působí stěny nádoby *B*.

Př. 11: Najdi analogické zdůvodnění pro rovnost tlakových sil kapaliny na dna nádob *A* a *C*.

Problém: Nádoba *C* obsahuje méně kapaliny než nádoba *A* ⇒ pokud jsou tlakové síly obou kapalin na dno stejné, musí existovat síla, která působí na kapalinu v nádobě *C* směrem dolů.



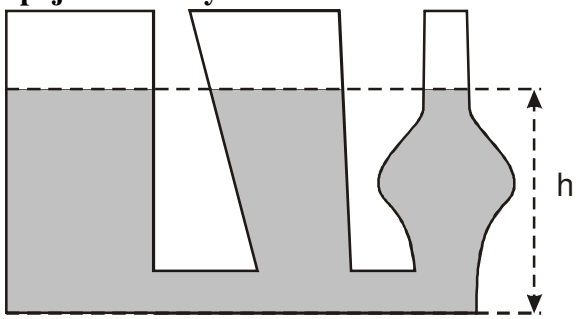
3. Newtonův zákon: stěna musí na kapalinu působit stejně velkou silou opačného směru ⇒ zakreslené síly ⇒

- nádoba *A*: výslednice sil stěny je nulová,
- nádoba *C*: výslednice sil stěny směřuje kolmo dolů.

Menší množství kapaliny v nádobě *C* výsledná síla bočních stěn tlačí dolů ⇒ tlaková síla na dno může být stejná jako u nádoby *A*.

Dodatek: Ze vzorce pro hydrostatický tlak můžeme fyzikálně definovat slovo hladina. Hladina je množina bodů se stejným hydrostatickým tlakem. Na povrchu kapaliny je nulový hydrostatický tlak, tato hladina se nazývá volná.

Spojené nádoby

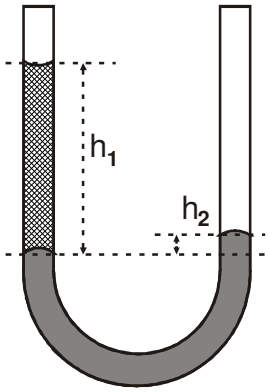


I v sebesložitěji vypadající nádobě se hladina ustálí tak, aby byla ve všech částech stejně vysoko.
V dolní společné části nádoby musí být stejný hydrostatický tlak, jinak by kapalina tekla z části, kde je větší tlak, do části, kde je tlak nižší, a tím by vyrovnala hladiny.

Př. 12: Vysvětli funkci a použití hadicové vodováhy[TB1].

Jde o využití principu spojených nádob, obě skleněné odměrky jsou spojeny hadicí a naplněné kapalinou $\Rightarrow$ hladina se musí v obou skleněných koncovkách ustálit ve stejné výšce.

Př. 13: Na obrázku je nádoba ve tvaru písmene U. Do každého jejího ramene byla nalita jiná kapalina. Co můžeme prohlásit o hustotách těchto kapalin? Urči, která kapalina je nalita v pravém rameni, pokud v levém je nalita voda a platí $h_1 = 23\,\text{cm}$ a $h_2 = 1{,}7\,\text{cm}$.



Hydrostatický tlak obou kapalin nad společným rozhraním musí být stejný $\Rightarrow$ pokud se liší výšky hladin, musí se lišit i hustoty kapalin. Kapalina v pravém rameni má větší hustotu než kapalina v levém rameni, protože dokáže vytvořit stejný hydrostatický tlak menším sloupcem.
Platí: $p_1 = p_2$ (hydrostatický tlak obou kapalin je stejný)

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

$$h_1\rho_1 = h_2\rho_2$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{h_1}{h_2} = 1000\frac{0{,}23}{0{,}017}\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} = 13500\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Hustota druhé kapaliny je $13500\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, jde tedy nejspíše o rtuť.

Shrnutí: Působení gravitační síly vytváří v kapalině hydrostatický tlak, který roste s hloubkou a nezávisí na tvaru nádoby.