8. Mechanika kapalin a plynů

8.1 Vlastnosti kapalin a plynů

Základní vlastností je tekutost. Tekutost je, když částečky se po sobě velmi snadno a velmi dobře pohybují (platí to pro tekutiny i plyny). Díky tekutosti nemají kapaliny ani plyny stálý tvar, ale přizpůsobují se tvaru nádoby.

8.1.1 Obecné poznatky o kapalinách

Kapalná tělesa se vyznačují objemovou stálostí díky vzájemnému působení částic mezi sebou. V tíhovém poli Země vytvářejí vodorovný povrch, volnou hladinu. Díky 3. NZ mezi molekulami existují síly akce a reakce, proto jsou kapaliny nestlačitelné za normálních podmínek.

Kapaliny se vyznačují různou tekutostí. Voda je více tekutá než olej. Je to způsobeno vnitřním třením. Tekutost nesouvisí s hustotou.

Pro naše účely zavádíme pojem **dokonalá kapalina**, protože je nestlačitelná a nemá vnitřní tření.

8.1.2 Obecné poznatky o plynech

Částice plynné látky jsou daleko od sebe a mají velkou rychlost. Síly mezi molekulami jsou zanedbatelné, proto plynná tělesa nemají stálý tvar ani objem a nemají ani konstantní povrch. Snadno se přizpůsobí tvaru nádoby. Plyn se velmi dobře rozpíná i stlačuje.

Pro naše účely zavádíme pojem **ideální plyn**, který je dokonale tekutý, bez vnitřního tření a je dokonale stlačitelný.

8.2. Tlak v kapalinách a plynech

Tlak je důležitá fyzikální veličina charakterizující stav tekutiny v klidu a označujeme jí p.
Tlak vypočítáme, když velikost tlakové síly F dělíme plochou S, na kterou působí síla kolmo.

Vztah: $p = \frac{F}{S}$ **Jednotka:** $[p] = 1 N \cdot m^{-2} = 1 Pa$

Definice jednoho pascalu: Jeden Pascal je tlak, který vyvolá síla 1 N rovnoměrně rozložená na ploše o obsahu $1m^2$ a působící kolmo na tuto plochu.

Jednotky používané v praxi: hPa, MPa, 1hPa=10^2 Pa, atmosféra 10^5 Pa

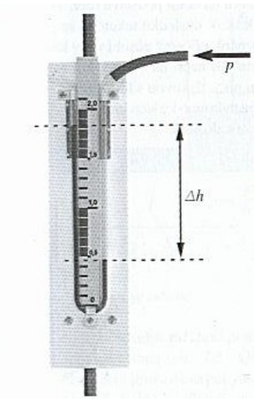
Velmi často používáme jednotku atmosféra: $1\ at = \frac{1kp}{1cm^2} = \frac{9,806}{10^{-4}} = 9,81 \cdot 10^{-4} = 10^5\,Pa$

8.2.1 Tlaková síla

Působí-li ve všech místech plochy S všude stejný tlak p, pak na celou plochu S působí tlaková síla, která je dána vztahem: $F = p \cdot S$

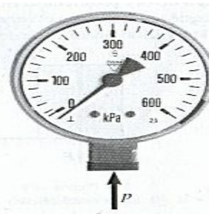
8.2.2 Měření tlaku

K měření tlaku používáme manometry. Máme dva základní typy:



a) Otevřený manometr

U otevřeného kapalinového manometru se měří tlak plynu z rozdílu hladin Δh v trubici ve tvaru písmena U.



b) Kovový manometr

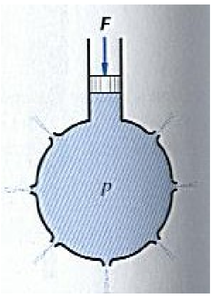
U kovových manometrů ze změn vyvolaných pružnou deformací jeho určitých částí. Např. deformací ohnuté kovové trubice spojené s ručkou přístroje.

8.2.3 Vyvolání tlaku v kapalinách a plynech

Tlak v kapalinách a plynech může být vyvolán dvojím způsobem:

1) vnější silou prostřednictvím pevného tělesa
2) tíhovou silou, kterou působí na tekuté těleso naše Země

8.3 Tlak vyvolaný vnější silou



V důsledku tekutosti se přenáší tlaková síla v kapalném tělese do všech směrů, přičemž působí vždy kolmo na určitou plochu kapalného tělesa. Působíme-li např. na vodu v kulové nádobě s postranními otvory prostřednictvím pístu tlakovou silou F, vystřikuje voda stejně prudce všemi otvory, a to kolmo ke stěnám nádoby. Důsledkem je Pascalův zákon.

.

8.3.1 Pascalův zákon

Definice Pascalova zákona: Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalné těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.

Dodatek: Síla se díky tekutosti přenáší do všech směrů, ale vždy působí kolmo na nějakou plochu (díky Pascalovu zákonu).

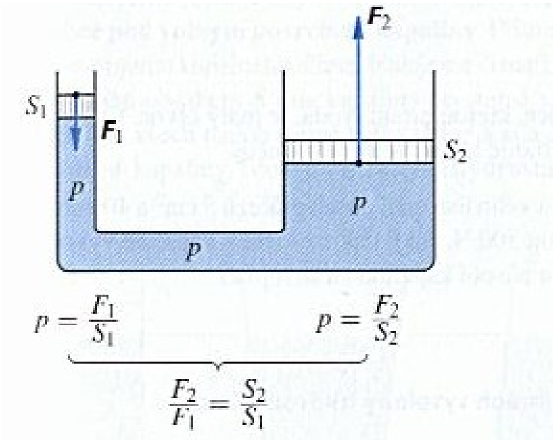
Na čem tlak závisí?

Tlak závisí na velikosti působící síly F a na velikosti styčné plochy S.

Tlak nezávisí na objemu V, na hustotě ρ a není závislá na směru.

Ukazuje se, že Pascalův zákon platí i pro plyny. Např: huštění pneumatiky.

8.3.2 Využití Pascalova zákona v praxi - Hydraulický lis



Hlavní částí hydraulického zařízení jsou dvě válcové nádoby nestejného průřezu. U dna jsou spojena spojovací trubicí. Oba válce i trubice jsou naplněny kapalinou, která je uzavřena pohyblivými písty. Působíme-li na menší píst silou F_1, vyvoláme tím tlak v kapalině p všude stejný tlak. Proto na širší píst o obsahu S_2 působí kapalina tlakovou silou F_2 o velikosti: $\boxed{F_2 = p \cdot S_2 = \frac{F_1}{S_1} \cdot S_2}$.

Výsledný vztah je: $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$

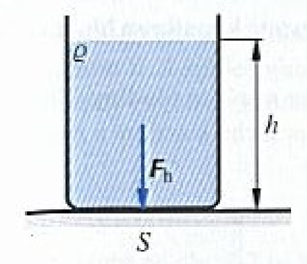
Důsledek:
Velikost sil působících na písty jsou ve stejném poměru jako obsahy jejich průřezů. To znamená, že na širší píst působí kapalina tolikrát větší silou, než je síla působící na užší píst, kolikrát je obsah průřezu širšího pístu větší, než je obsah průřezu pístu užšího. Síla působící na širší píst může být tedy mnoho násobně větší.
Využíváme to v hydraulických lisech, zvedácích, v brzdách automobilu. Na stejném principu pracují pneumatická zařízení. Zde používám místo kapaliny stlačený vzduch.

8.4 Hydrostatická síla a hydrostatický tlak

8.4.1 Hydrostatická síla

V tíhovém poli Země působí na všechny částice kapalného tělesa tíhová síla. Výsledkem tohoto působení je **hydrostatická tlaková síla** F_h.

Touto tlakovou silou působí kapalina na dno a na stěny nádoby, ale také na pevná tělese ponořená do kapaliny.



Velikost hydrostatické tlakové síly F_h, kterou působí kapalina v hloubce h na dno nádoby o plošném obsahu S se určí takto:

$F_h = F_G = m \cdot g$ - tíha kapaliny v nádobě

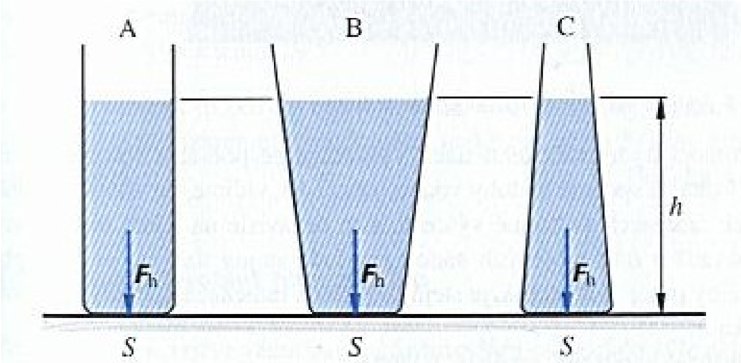
Po vyjádření hmotnosti m = $\rho \cdot V$, objemu: $V = S \cdot h$ a úpravě dostaneme vztah pro hydrostatickou sílu: $F_h = \rho \cdot S \cdot h \cdot g$

Na čem hydrostatická síla závisí F_h závisí:
Na hustotě kapaliny, na velikosti obsahu dna a hloubce kapaliny pod volným povrchem.

Na čem hydrostatická síla nezávisí F_h:
Na tvaru a celkovém objemu kapalného tělesa.

8.4.2 Hydrostatické paradoxon

Kapalina se stejným obsahem S dna do výšky h bude na dno všech nádob působit stejně velká tlaková síla F_h, i když v každé nádobě je jiný objem kapaliny.



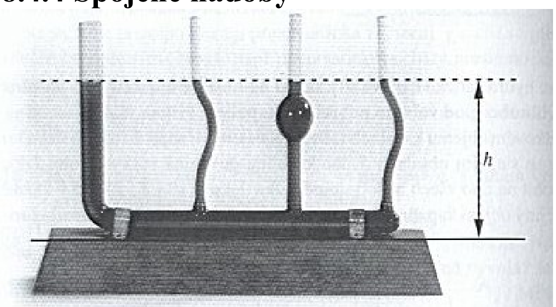
8.4.3 Hydrostatický tlak

Tlak v kapalině vyvolaný hydrostatickou tlakovou silou se nazývá **hydrostatický tlak** a vypočítáme ho takto:

$$p_h = \frac{F_h}{S} = \frac{S\rho hg}{S} = \rho hg$$

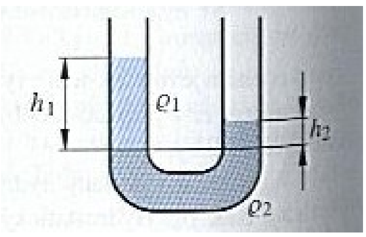
Místa o stejném hydrostatickém tlaku p_h se nazývají hladiny. Hladina o nulovém hydrostatickém tlaku je na volném povrchu kapaliny (nahoře) a nazývá se volná hladina.

8.4.4 Spojené nádoby



Podstatu spojených nádob vysvětlujeme pomocí hydrostatického tlaku. Naplníme-li spojené nádoby vodou (obrázek), vidíme, že volná hladina je ve všech ramenech ve stejné výšce h, a to nezávisle na jejich tvaru a objemu. U dna je stejný tlak $p_h = \rho \cdot g \cdot h$. Veličiny ρ a g jsou stejné, proto musí být stejné i h.

8.4.5 Spojené nádoby s kapalinami různé hustoty



Naplníme-li spojené nádoby kapalinami o různých hustotách ρ_1 a ρ_2, ustálí se volné hladiny navzájem se nemísících kapalin v různých výškách h_1 a h_2. Kapaliny jsou v obou ramenech spojených nádob v rovnováze, jsou-li hydrostatické tlaky v místě společného rozhraní obou kapalin stejné.

Platí tedy: $p_1 = p_2$

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

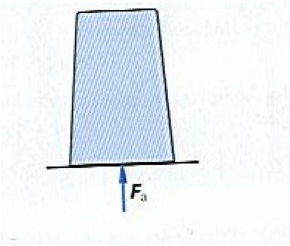
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$$

Tuto metodu používáme k určení hustoty neznámé látky.

8.5 Tlak vzduchu vyvolaný vnější silou - atmosférický tlak

8.5.1 Tlaková síla

Naši Zemi obklopuje vrstva vzduchu zvaná atmosféra sahající do výše několika tisíc kilometrů. Působením tíhové síly Země jsou všechny částice atmosféry stále přitahovány k povrchu Země, čímž je celá atmosféra poutána k Zemi a koná s ní otáčivý pohyb. Výsledkem tohoto působení je **atmosférická tlaková síla** $\vec{F}_a$. Tato síla působí na všechny pozemská tělesa a na celý povrch Země.



O existenci tlakové síly se přesvědčíme následujícím pokusem (viz. obrázek). Sklenici s rovným okrajem naplníme vodou, k okraji přiložíme papír. Pak sklenici s vodou převrátíme a papír opatrně pustíme. Působením atmosférické tlakové síly je papír stále přitlačován ke sklenici a voda nevyteče.

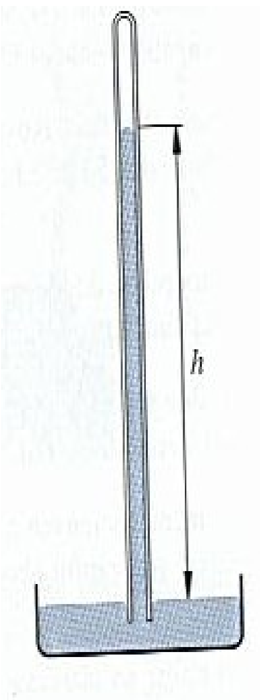
8.5.2 Atmosférický tlak

Tlak vyvolaný atmosférickou tlakovou silou se nazývá atmosférický tlak p_a.

Atmosférický tlak se zmenšuje s rostoucí nadmořskou výškou a to takto: každých 100 m výšky se sníží tlak o 1 300 Pa.

Výpočet atmosférického tlaku

Atmosférický tlak p_a je obdoba hydrostatického tlaku p_h v kapalině. Nelze ho však vypočítat $p_h = \rho hg$. Hustota vzduchu není totiž u vzduch stálá ale s rostoucí výškou se zmenšuje.



8.5.3 Měření atmosférického tlaku

Základem pro měření atmosférického tlaku se stal Torricelliho pokus. Skleněnou trubici 1 m dlouhou trubici zatavíme na jednom konci, naplníme rtutí a druhý konec ucpeme prstem. Pak ji otočíme a ponoříme do kádinky se rtutí. Potom prst uvolníme a vidíme, že rtuť se v trubici ustálí ve výšce přibližně 75 cm. Nad rtutí bude vakuum. Sloupec rtuti udržuje v uvedené výšce atmosférická tlaková síla $\vec{F}_a$, která působí na volný povrch rtuti v kádince.

Výpočet atmosférického tlaku z Torricelliho pokusu:

Atmosférický tlak je v rovnováze s tlakem hydrostatickým.

$p_h = \rho \cdot h \cdot g = 13{,}6 \cdot 10^3 \cdot 0{,}75 \cdot 9{,}81 = 100\,000 Pa \cdot$

Tato hodnota představuje velikost atmosférického tlaku.

Atmosférický tlak není na daném místě konstantní, jeho hodnota se během doby mění v souvislosti s meteorologickou situací.

Normální atmosférický tlak p_n odpovídá hydrostatickému tlaku sloupce rtuti o výšce 0,76 m při normálním tíhovém zrychlení, při teplotě 0 °C a hustotě rtuti $\rho = 13595 kg \cdot m^{-3}$.

Jeho hodnota je $p_n = 101325 Pa$ **.**

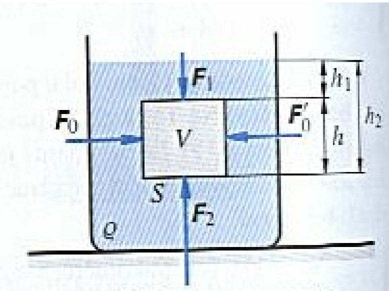
8.5.4 Vedlejší jednotky používané u tlaku

1mb = 1hPa
760 Torr = 101 325 hPa
1 Torr = 133 Pa

8.6 Vztlaková síla v kapalinách a plynech

8.6.1 Vztlaková síla

Víme, že těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno. Síla, která ho v kapalině nadlehčuje je **vztlaková síla** $\vec{F}_{VZ}$. a má opačný směr než síla tíhová.



Odvození vztlakové síly

Uvažujme těleso tvaru kvádru s podstavou o plošném obsahu S výšce h. Těleso úplně ponoříme do kapaliny o hustotě ρ . Na všechny stěny kvádru působí kapalina hydrostatickými tlakovými silami. Tlakové síly $\vec{F}_0$ *a* $\vec{F}_0'$ jsou stejně velké, ale opačného směru, proto se vzájemně ruší.

Na horní podstavu působí tlaková síla o velikosti $F_1 = \rho S h_1 g$ a na dolní podstavu $F_2 = \rho \cdot S \cdot h_2 g$.

Výslednice sil je vztlaková síla, která je určena následujícím vztahem: $F_{VZ} = F_2 - F_1 = \rho S h_2 g - \rho S h_1 g = \rho \cdot Sg \cdot (h_2 - h_1) = \rho Shg = V \cdot \rho \cdot g$

Velikost F_{VZ} nezávisí na tvaru tělesa ani na hloubce pod volným povrchem.

8.6.2 Archimédův zákon

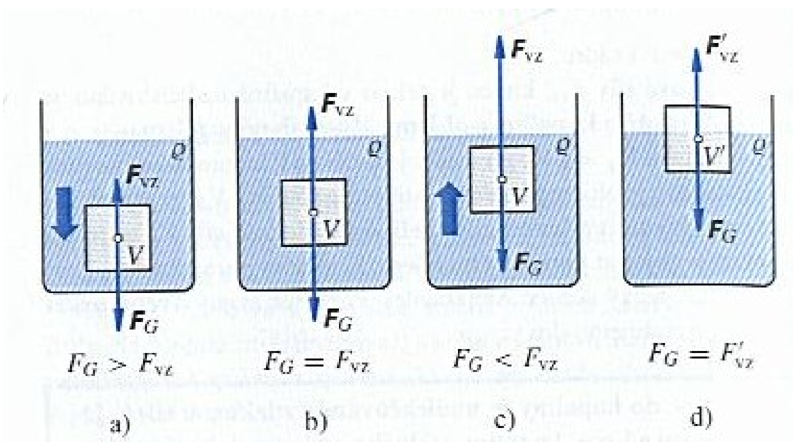
Ze vztahu plyne, že velikost vztlakové síly se rovná tíze kapaliny o objemu ponořeného tělesa.

Důkaz: $F_{VZ} = \rho \cdot V \cdot g = m \cdot g = F_G$

Tuto myšlenku shrnuje **Archimédův zákon**:

Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze kapaliny stejného V, jako je objem ponořené části tělesa.

8.6.3 Důsledky Archimedova zákona



Důsledkem Archimedova zákona je různé chování těles v kapalině. Je třeba si totiž uvědomit, že na každé těleso ponořené do kapaliny působí jednak Země tíhovou silou $\vec{F}_G$ směrem dolů a proti ní směrem vzhůru působí vztlaková síla $\vec{F}_{VZ}$. Pro velikost těchto sil platí:

$$\boxed{F_G = \rho_t V g \qquad F_{VZ} = \rho V g}$$

ρ_t - průměrná hustota tělesa
ρ - hustota kapaliny
V - objem ponořené části tělesa

O chování těles rozhoduje výslednice těchto sil: $F = F_G - F_{VZ}$
Mohou nastat 3 případy:
a) $\rho_t > \rho$ pak $F_G > F_{VZ}$ a výslednice směřuje dolů (**klesá ke dnu**)
b) $\rho_t = \rho$, $F_G = F_{VZ}$ a výslednice sil $F = 0$, **těleso se v kapalině volně vznáší**; Př. vznášejí se těla ryb, mořských živočichů.
c) $\rho_t < \rho_i$ $F_G < F_{VZ}$, výslednice sil je $\uparrow$, **těleso stoupá k volné hladině hladině kapaliny.**
d) Těleso se vynoří v takové poloze, že tíhová síla $F_G = F'_{VZ}$. Tíha kapaliny stejného objemu, jako je objem ponořené části tělesa. **Těleso plave na hladině** kapaliny (korková zátka).

Je-li velikost tíhové síly $F_G = \rho_t V g$ a velikost vztlakové síly plovoucího tělesa $F'_{VZ} = \rho V' g$ a víme-li, že $F_G = F'_{VZ}$, pak platí tyto vztahy:
$\rho_t V g = \rho \cdot V' \cdot g$

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

V' - objem ponořené části tělesa

Těleso se ponoří do kapaliny tím větší částí svého V, čím je jeho hustota ρ větší (nebo čím je ρ kapaliny menší). Na různém ponoru těles jsou založeny hustoměry. Zkoumáme jím náplně hustotu kapaliny. Příklad: chladiče, akumulátory.

Vztlaková síla působí i na plyny.
Nadlehčována jsou tedy i všechny tělesa ve vzduchu. Vzhledem k velmi malé hustotě plynů je vztlaková síla působící na tělesa v plynech mnohem menší než v kapalinách.
Příklad: meteorologické balóny, balónky, vzducholodě.

8.6.4 Určení hustoty pevných těles pomocí Archimédova zákona

K výpočtu hustoty tělesa potřebujeme znát hmotnost a objem tělesa ($\rho = \frac{m}{V}$). Hmotnost určíme přeným vážením. K určení objemu používáme znalosti z Archimédova zákona.

Určení objemu:

1) Tuhé těleso, jehož hustotu chceme stanovit, musíme nejprve zvážíme a tím dostaneme hmotnost m_1.

2) Těleso ponoříme do kapaliny o známé hustotě ρ_k a určíme hmotnost tělesa a označíme ji m_2.

3) Těleso je nadlehčováno vztlakovou silou $F_{VZ} = V\rho_k g$. Z bodu 1 a 2 plyne, že velikost vztlakové síly vypočítáme: $F_{VZ} = V\rho_k g = m_1 g - m_2 g$.

4) Stanovíme rovnost: $V\rho_k = m_1 - m_2$

5) Z rovnice určíme objem: $V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_k}$.

Určení hustoty:

Hustotu tělesa vypočteme podle vztahu: $\rho = \frac{m_1}{V}$.

Výsledný vztah pro hustotu bude vypadat takto: $\boxed{\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2}\rho_k}$.

Podobným způsobem se určí i hustota neznáme kapaliny a dospějeme k výslednému vztahu: $\boxed{\rho = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3}\rho_k}$, m_1 – pomocné ponorné tělísko, m_2 – hmotnost tělesa ponořeného do neznámé kapaliny, m_3 – hmotnost tělesa ponořeného do známé kapaliny.

8.7 Proudění kapalin a plynů

Začneme uvažovat pohyb kapalin nebo plynů v jednom směru. Tomuto jevu kdy se kapalina pohybuje říkáme **proudění**.

Příklady: voda a plyn proudí potrubím, pohonné hmoty tečou z nádrže do motoru potrubím, H_2O je přiváděna k turbině také potrubím.

Znalosti proudění využíváme při konstrukci raketoplánů, letadel, trupy lodí, raketové střely, karosérie automobilů. Tekutina je zde v klidu a pohybují se např. dopravní prostředky. Tento jev označujeme jako obtékání těles.

8.7.1 Proudění

V proudící tekutině má každá částice má svou $\vec{v}$, jejíž velikost a směr se může měnit v závislosti na místě a čase.

Pokud se $\vec{v}$ částic nebude měnit v libovolně zvoleném místě, jedná se o **ustálené proudění**.

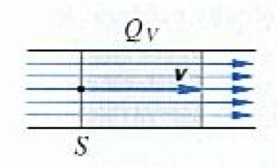
Proudnice – je myšlená čára, tečna v libovolném bodě, má směr rychlosti pohybující se částice. Při ustáleném proudění prochází každým bodem jen jedna proudnice (nesmí se vzájemně protínat).

Nejjednodušším případem proudění je **ustálené proudění ideální kapaliny** (nestlačitelná a dokonale tekutá).

8.7.2 Objemový průtok

Pro ustálené proudění zavádíme veličinu **objemový průtok** (objem kapaliny, který proteče trubicí za čas) Q_V a definujeme ho vztahem:

$$Q_V = \frac{V}{t}.$$



Je-li $\vec{v}$ rychlost proudící kapaliny, posune se za dobu t každá částice kapaliny průřezem trubice o dráhu $s = v \cdot t$. Označíme-li obsah průřezu S, je objem kapaliny $V = S \cdot v \cdot t$.

Výsledný vztah pro objemový průtok: $\boxed{Q_V = S \cdot v}$ **Jednotka:** $[Q_V] = m^3 \cdot s^{-1}$

Praktické použití: vodoměr, plynoměr

Vodoměr – zařízení, které zjišťuje kolik vody (tekutiny) proteče daným potrubím za libovolnou dobu.

Plynoměr – zařízení, které zjišťuje kolik plynu proteče daným potrubím za libovolnou dobu.

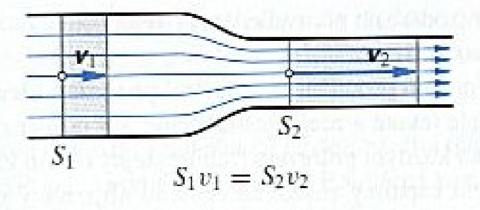
8.7.3 Rovnice spojitosti toku (rovnice kontinuity)

Ideální kapalina je nestlačitelná kapalina, a proto se při proudění nemůže v žádném místě hromadit. Takže objemový průtok je konstantní. Tomuto poznatku říkáme **rovnice spojitosti toku** (rovnice kontinuity) a charakterizuje jí tento vztah: $\boxed{S \cdot v = konst.}$

Slovní vyjádření rovnice spojitosti toku:

Při ustáleném proudění ideální kapaliny se součin obsahu průřezu S a rychlosti proudu v každém místě stejný.

Vodorovná trubice nestejného průřezu



Uvažujeme vodorovnou trubici nestejného průřezu. Průtoky v širším a užším místě trubice se musí rovnat $Q_{V1} = Q_{V2}$. Potom platí: $S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$.

Z toho vyvodíme vztah: $\boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}}$

Závěr: V užším průřezu trubice proudí kapalina větší rychlostí než v průřezu širším.

Příklad: U zahradní hadice přiškrtíme její konec. Voda bude proudit větší rychlostí a díky tomu voda dostříkne do větší vzdálenosti.

8.8 Bernoulliho rovnice

8.8.1 Mechanická energie v kapalině

Podíváme se na proudění ideální kapaliny z hlediska mechanické energie. Mění-li se ve vodorovné trubici nestejného průřezu velikost rychlosti proudící kapaliny, mění se kinetická energie.

V zúžené části trubice je větší kinetická energie než v její širší části.

Zajímá nás, kde se kinetická energie bere.

Musí platit zákon zachování energie: $E_K + E_P = konst.$

Tzn. Jestliže v užší části trubice E_K roste, E_P musí klesat.

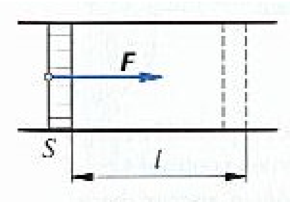
Energii kinetickou jsme určili, ale kde se „bere“ energie E_P?

Známe tyto druhy potenciální energie: E_P z výšky – NE; E_P z pružnosti – NE

Zavedeme tlakovou energii, která souvisí s tlakem proudící kapaliny a označíme jí jako **tlakovou potenciální energii (TPE)**.

DŮKAZ TPE: O její existenci svědčí skutečnost, že H_2O z proudícího potrubí odplavuje zeminu a poškozuje silnice. TPE může roztrhnout potrubí.

Odvození TPE:



Vyjdeme z mech. práce: $W = F \cdot l$, W- práce, kterou vykoná tlaková síla, F – je velikost tlakové síly a za ní dosadíme: $F = p \cdot S$, p – tlak kapaliny. Dostaneme výsledný vztah: $\boxed{W = p \cdot S \cdot l = p \cdot V}$, V - objem kapaliny v části potrubí o délce l.

Můžeme tedy stanovit vztah pro TPE: $\boxed{E_P = p \cdot V}$

8.8.2 Bernoulliho rovnice

Z předchozí kapitoly můžeme učinit závěr: Zvětší-li se E_K proudící kapaliny, zmenší se současně E_P její tlaková potenciální energie. Pro proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí platí: $E_P + E_K = konst.$

Zkusíme si jednotlivé části rovnice vyjádřit:

energie kinetická: $E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho V v^2$

energie TPE: $E_P = p \cdot V$ a je to v praxi tlak proudící kapaliny.

Vyjádříme zákon zachování energie pro potrubí a v praxi se velmi často označuje Bernoulliho rovnice:

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

Slovní vyjádření Bernoulliho rovnice:

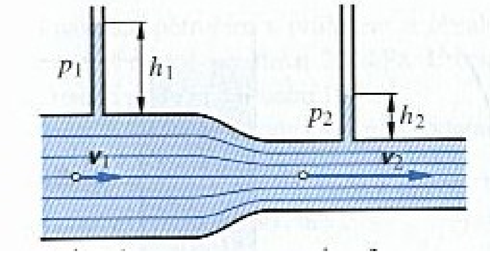
Součet kinetické a tlakové potenciální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech částech vodorovné trubice stejný.

Pro vodorovnou trubici se dvěma průřezy má Bernoulliho rovnice tento tvar:

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

p_1, p_2 – můžeme sledovat pomocí manometrických trubic připojených ve dvou místech.

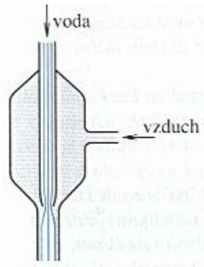
8.8.3 Důsledky Bernoulliho rovnice



Vodorovného potrubí (širší část) s průřezem S_1 je rychlost kapaliny v_1 a tlak p_1 a hladina h_1. Vodorovného potrubí (užší část) s průřezem S_2 je rychlost kapaliny v_2 a tlak p_2 a hladina h_2.

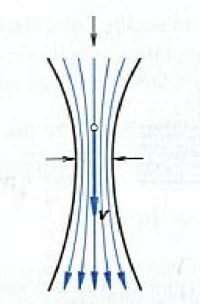
Závěry: pro rychlosti: $v_2 > v_1$, pro tlak: $p_2 < p_1$.
V užší části má kapalina větší rychlost a tím i větší kinetickou energii, ale je tam menší tlaková potenciální energie, tzn. je tam menší tlak.

Hydrodynamické paradoxon



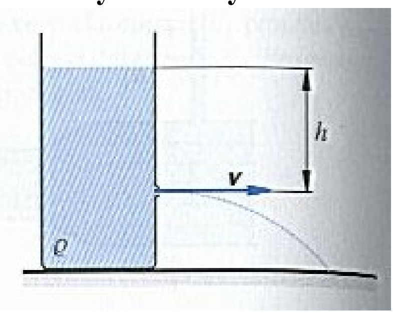
Položme si otázku: **Co když trubici značně zúžíme?**
Rychlost kapaliny je tak obrovská, že tlak velmi rychle klesá a vzniká nám tam podtlak. V manometrické trubici dojde k nasávání vzduchu. Tohoto jevu využíváme u vodní vývěvy. (viz. obrázek)

Aerodynamické paradoxon



Podtlak vzniká také v případě proudících plynů. Pro plyny je Bernoulliho rovnice složitější, protože změnou tlaku se mění i hustota plynu.
Praktické využití: rozprašovač, stříkací pistole, v karburátorech spalovacích motorů.
Foukáme-li mezi dva svisle zavěšené listy papíru vzduch, vznikne mezi nimi podtlak a působením atmosférického tlaku se listy k s obě přitahují (viz. obrázek).

8.8.4 Výtoková rychlost ze sudu



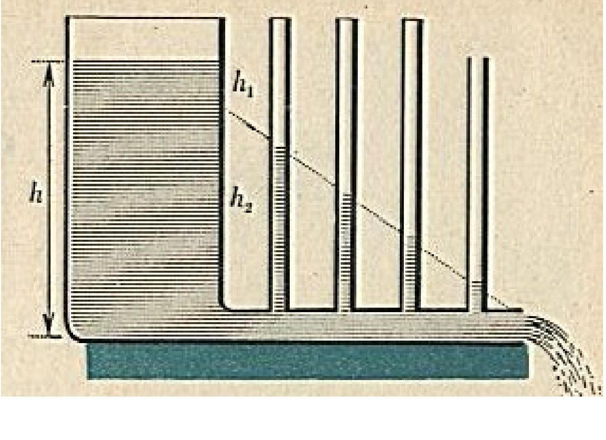
Vyjdeme ze zákona zachování mechanické energie a určíme rychlost vytékající kapaliny z otvoru ve stěně. Budeme předpokládat, že objem bude konstantní.
V blízkosti otvoru v hloubce h pod volným povrchem kapaliny se mění TPE, která představuje tlak: $p = h \cdot \rho \cdot g$,
v energii kinetickou $E_K = \frac{1}{2}\rho v^2$.

Potom platí rovnice na jednotku objemu: $\frac{1}{2}\rho v^2 = h \cdot \rho g$

velikost výtokové rychlosti je: $v = \sqrt{2gh}$

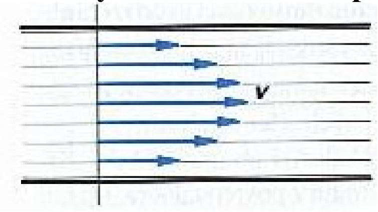
Závěr: Na čem závisí výtoková rychlost?
Rychlost v je větší u otvoru, který je ve větší hloubce. Je to stejné jako by H_2O padala z této výšky na zem.

8.9 Proudění reálné kapaliny



Z nádoby vytéká voda trubicí stálého průřezu. v připojených manometrických trubicích můžeme sledovat tlak p. Pozorujeme, že přetlak v trubici ve směru toku rovnoměrně klesá a u otvoru se blíží nule. Bernoulliho rovnici a rovnici spojitosti toku jsme odvodili za předpokladu proudění ideální kapaliny. Reálné kapaliny však tyto vlastnosti nemají a uvnitř existuje vnitřní tření (viskozita). Abychom jí překonali zmenšuje se nám tlaková potenciální energie. Tzn. klesá nám tlak.

8.9.1 Rychlost v reálné kapalině a druhy proudění



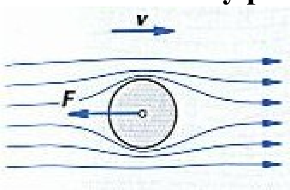
Při proudění reálných kapalin působí vždy proti vzájemnému posouvání částic kapaliny síly vnitřního tření, které pohyb částic brzdí. Největší rychlost mají částice ve středu kapaliny. Vrstva kapaliny pohybující se na kraji se stýká se stěnami a dochází ke tření ⇒ **kapalina se pohybuje pomalu či vůbec**.

8.10 Obtékání těles reálnou tekutinou

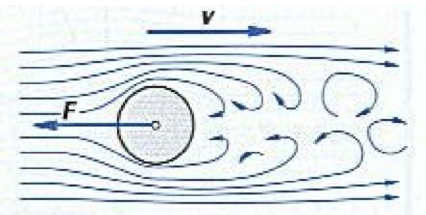
Postavíme-li proudící tekutině do cesty překážku, tekutina ji obtéká.
Příklad: Voda obtéká kolem pilíře mostu, vzduch kolem křídla letadla.
K obtékání může dojít ve dvou případech:
1) **tekutina se pohybuje těleso v klidu**
2) **tekutina v klidu těleso se pohybuje** (parník, automobil) dochází zde k odporovým silám (hydro a aero)⇒ odpor prostředí

U kapalin mluvíme o hydrodynamické odporové síle a u plynu o aerodynamické odporové síle.

Máme dva druhy proudění:



1) laminární – dochází k němu při menších rychlostech tělesa vzhledem k tekutině. Na obrázku vidíme rozložení proudnic v okolí tělesa. Ukazuje se, že velikost odporové síly je přímo úměrná relativní rychlosti proudící tekutiny.

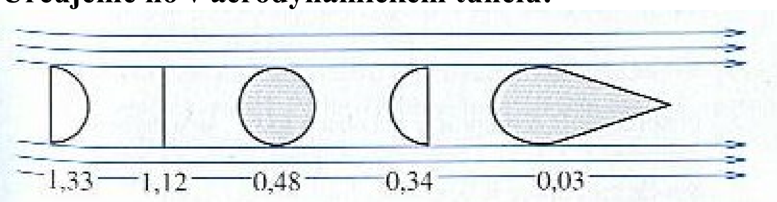


2) turbulentní – dochází k němu při větších rychlostech tělesa vzhledem k tekutině. Za tělesem se tvoří víry, které způsobují zvětšení odporové síly.

Pro velikost aerodynamické odporové síly působící na tělesa libovolného tvaru odvodil Newton vztah: $\boxed{F = \frac{1}{2} C \rho \cdot S \cdot v^2}$

C – součinitel odporu, ρ - hustota vzduchu, S – obsah průřezu tělesa kolmého ke směru pohybu, v - relativní rychlost.

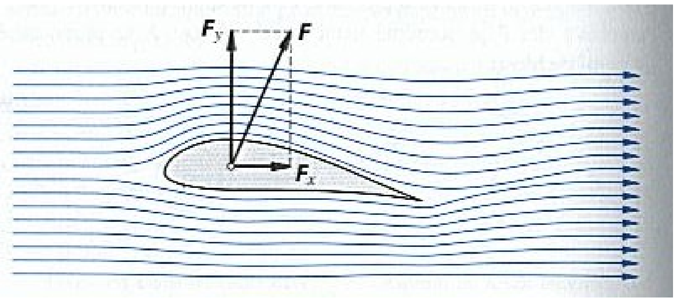
Součinitel odporu C závisí na tvaru tělesa.
Určujeme ho v aerodynamickém tunelu:



Závěr:

Nejméně vhodný je tvar otevřené polokoule. V praxi se s ním setkáme u padáku, kde potřebujeme, aby odpor vzduchu byl co největší.
Nejvhodnější aerodynamický tvar je kapky. V praxi se s ním setkáme u těl ryb, ptáků. Tomuto tvaru snažíme přizpůsobit automobily, letadla, lodě.

Tvar křídla letadla



Aerodynamický tvar má rovněž profil nosné plochy letadel dosahujících menších nebo středních rychlostí. Nesouměrný profil nosné plochy způsobuje, že vzduch obtéká její horní stěnu větší rychlostí než stěnu spodní. Podle Bernoulliho rovnice je tlak na horní stěnu nosné plochy menší než na spodní stěnu a na celou nosnou plochu působí **vztlaková aerodynamická síla** $\vec{F}_y$, která působí proti tíhové síle a udržuje letadlo ve vzduchu. Dále je tu **odporová síla** $\vec{F}_x$, kterou překonává tažná síla motorů.
Výslednicí obou sil je **aerodynamická síla**: $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$.

Pozor: Uvedený Newtonův vztah pro velikost odporové síly platí jen pro středně velké rychlosti. Pro rychlosti větší, než je rychlost zvuku, je velikost odporové síly přímo úměrná třetí mocnině rychlosti. Dochází ke vzniku rázové vlny
Důsledek: Nadzvuková letadla (stíhačky) po přeletu způsobují silné zvukové efekty.