

Vlastnosti kapalin a plynů

Hydrostatika a aerostatika- studuje podmínky rovnováhy kapalin a plynů

Hydrodynamika a aerodynamika- studuje zákonitosti pohybů kapalin a plynů

Vlastnosti kapalin a plynů

Základní vlastností je tekutost- snadná vzájemná pohyblivost částic plynů a kapalin- nemají stálý tvar a přizpůsobují se nádobě- kapaliny a plyny označujeme jako tekutiny

Mechanika tekutin= mechanika kapalin + plynů

Tekutiny jsou snadno dělitelné a mohou do nich vnikat jiná tělesa

Kapaliny a plyny však mají některé rozdílné vlastnosti- pramenící především z různé velikosti sil mezi částicemi:

- Kapaliny
 - Objemová stálost- relativně silné odpuzivé síly mezi molekulami zabraňují stlačení
 - Tvoří horizontální hladinu- pokud jsou v klidu tvoří v tíhovém poli země vodorovný povrch
- Plyny
 - Velké vzdálenosti molekul plynů- vzájemné síly mezi částicemi jsou zanedbatelné
 - Nemají tedy stálý tvar ani objem- jsou lehce stlačitelné
 - Netvoří vodorovný povrch
 - Tvar a objem plynného tělesa jsou určeny tvarem a objemem nádoby

Kapaliny a plyny se odlišují také tekutostí (vzájemnou pohyblivostí částic)- je způsobena vnitřním třením a vznikem odporových sil mezi částicemi

Tekutost je obecně vyšší u plynů, ale liší se i mezi kapalinami (např. voda je tekutější, než olej)

Obligátní fyzikální zanedbání:

- Ideální kapalina- je dokonale tekutá, bez vnitřního tření a zcela nestlačitelná
- Ideální plyn- dokonale tekutý, bez vnitřního tření, ale přitom dokonale stlačitelný

Ideální tekutiny jsou také považovány za kontinuum- tzv. že nepřehlídíme k jejich částicové struktuře, ač právě z ní vychází jejich vlastnosti

Tlak v kapalinách a plynech

$$p = \frac{F}{S(a)}$$

p=tlak (N/m²=Pa=pascal); F=síla; S (a)=plocha (area)

tlakovou silou lze na kapalinu v klidu působit dvojím způsobem:

tlak je měřen umístěním sondy měřící sílu a vypočítání tlaku pomocí plochy sondy- tímto tlakem charakterizujeme stav tekutiny v tomto místě

pokud zapůsobíme na jednu vrstvu tekutiny, tato vrstva působí na další a takto vzniká v tekutině tlak
pokud je kapalina v klidu na spodní vrstvu vždy působí váha (weight) kapaliny nad touto vrstvou

tlakovou sílu lze v tekutinách realizovat dvojím způsobem:

1. Vnější silou prostřednictvím pevného tělesa, které působí na povrch kapaliny (píst)
2. Tíhovou silou, kterou působí na kapalinu tíhové pole Země

Tlak v kapalinách

Tlak v kapalinách vyvolaný vnější silou

Na rozdíl od pevných látek je síla aplikovaná na jednu část kapaliny, díky tekutosti, přenášena do všech směrů, ne pouze do směru působení původní síly- takto působící síla je kolmá k ploše kapaliny, jelikož kapalina zůstává při působení této síly v klidu (písty, tlak na stěny nádoby)

Působící vnější tlaková síla vyvolává v kapalině tlak

Jak lze experimentálně prokázat (např. aparaturou na obrázku) takto vyvíjený tlak je ve všech místech kapaliny stejný (voda bude z nádoby vystřikovat zhruba stejně a vždy kolmo k otvoru)

Tlak je skalární veličinou- nemá tedy směr působení

Blaise Pascal- Pascalův zákon:

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

Pascalův zákon uvažuje pouze tlak vyvolaný působením vnější síly, hydrostatický tlak vyvolaný působením tíhového pole Země nezahrnuje, přestože hydrostatický tlak na kapalinu stále působí

Pascalův zákon platí v naprosto stejné formulaci i pro plyny

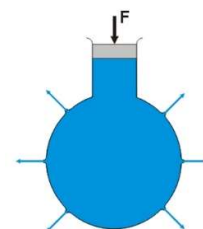
V praxi se Pascalův zákon používá u hydraulických a pneumatických zařízení (lis, zvedák, brzdy)- dva písty o různé ploše jsou spojeny trubicí s nestlačitelnou kapalinou (olej)

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

Hydraulické stroje tedy využívají skutečnosti, že hydraulická kapalina tlak přenáší a, pokud přenáším z menšího pístu na větší, také násobí

Hydraulická zařízení: hydraulické lisy, zvedáky automobilů, plošiny pro vozíčkáře, ovládání rypadel, kapalinové brzdy osobních aut, pohybový aparát hvězd (kapalina s vysokým obsahem bílkovin slouží k přenosu tlaku)

Pneumatická zařízení: pneumatické brzdy vlaků, kovářské buchary



Tlak v kapalinách vyvolaný tíhovou silou

V případě Pascalova zákona je předpokladem, že na povrch kapaliny působí pouze vnější síla, pokud jsou však částice kapaliny v tíhovém poli Země, působí na každou částici právě tíhová síla, která by se dala nazvat silou vnitřní

Výsledkem působení tíhové síly na částice kapaliny je hydrostatická tlaková síla (F_h)

Hydrostatická tlaková síla působí na dno a stěny nádoby a také na pevná tělesa ponořená uvnitř (bazén- voda působí na stěny, dno a plavce; značný hydrostatický tlak působí na podmořské živočichy)

Hydrostatická tlaková síla vyvolává v každém bodě kapaliny určitý hydrostatický tlak

Na část vodního sloupce o tvaru válce působí tlak kapaliny pod touto částí (F_1) a v opačném směru tlak vzduchu (F_a) a tíhová síla (F_g)- vodní sloupec však zůstává v klidu:

$$F_1 = F_a + F_g$$

pS =síla vyvíjená vodou pod válcem; $p_a S$ =síla vyvíjená vzduchem; $Sh\rho g = Sh$ (objem)* ρ (hustota)* $g=m*g$

$$p * S = p_a * S + S * h * \rho * g$$

$$p = p_a + h * \rho * g$$

p =absolutní tlak- skládá se z tlaku vzduchu (p_a) a tlaku kapaliny na daném bodem

$p-p_a$ =hydrostatický tlak

$$p_h = h * \rho * g$$

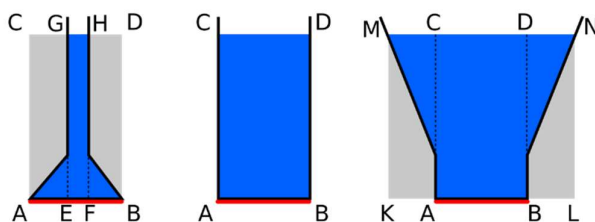
$$F_h = S * h * \rho * g$$

Kapalina působí na zvolenou plochu všemi směry

Hydrostatická tlaková síla však nezávisí na tvaru a celkovém objemu kapaliny

Hydrostatický paradox- pokud nalijeme stejnou kapalinu do nádob s naprosto odlišnými objemy a tvary, ale plocha dna a výška budou stejné- hydrostatický tlak na dně bude stejný

Tento paradox je však v podstatě neexistující- dochází k zapojení síly stěn u zúžených nádob (sice menší váha, ale stěny přitlačují kapalinu ke dnu) i u rozšířených nádob (větší váha, ale stěny nadlehčují kapalinu šikmo vzhůru)



Spojené nádoby- naplníme-li spojené nádoby hladina bude vždy ve stejné výšce, nezávisle na tvaru a objemu- jelikož u dna bude vždy jeden stejný hydrostatický tlak ($p_h = h \cdot \rho \cdot g$)- ρ i g je konstantní společně s tlakem vzduchu (p_a)- tedy i výška (h) jednotlivých sloupců musí být stejná

Pokud naplníme spojené nádoby kapalinami a různých hustotách- výška se ustálí na různých hodnotách- zde však využijeme faktu, že v místě rozhraní jsou tlaky obou kapalin stejné, kdyby nebyly, rozhraní by se posouvalo:

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

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

Využití spojených nádob: sifon odpadních trubek umyvadel a záchodů- zabraňují pronikání pachů z kanalizace, hadicové vodováhy

Pokud působí na kapalinu v nádobě také vnější tlaková síla vzduchu, je podle Pascalova zákona navýšen tlak kapaliny o stejnou hodnotu ve všech místech

Celkový tlak v kapalině je tedy:

$$p = p_h + p_a = h \cdot \rho \cdot g + p_a$$

Tlak v plynech

Tlak vzduchu vyvolaný tíhovou silou

Na všechny částice atmosféry působí tíhová síla Země, která zajišťuje její připoutání a zároveň otáčení společně se Zemí- výsledkem je také atmosférická tlaková síla (F_a)

Atmosférická tlaková síla působí na všechna pozemská tělesa a povrch Země samotný- tlak vyvolaný touto silou se nazývá atmosférický tlak (p_a)

Atmosférický tlak se zmenšuje s nadmořskou výškou- do 1km n. m. klesá o 1hPa na 10m výšky- dále je již pokles vyšší

Platí, že atmosférický tlak klesne na polovinu pozemského ve výšce 5,5km nad povrchem

Na hodnotu atmosférického tlaku má kromě nadmořské výšky vliv také teplota, obsah vodní páry v atmosféře a zeměpisná šířka

Tlak vzduchu je sice ekvivalentní s tlakem v kapalinách, nelze jej však vypočítat stejným vzorcem- jelikož hustota vzduchu se s nadmořskou výškou mění- není tedy stálou veličinou ve všech bodech tělesa

Torricelliho pokus- Torricelli položil základy měření atmosférického tlaku- použil 1m dlouhou trubici na jedno konci uzavřenou- naplnil ji rtutí a vertikálně ji postavil dnem vzhůru do nádoby s rtutí- otevřený konec byl tedy ponořen v rtuť- sloupec rtuť v trubici klesl na hodnotu 0,75m- a nad ním vzniklo v trubici tzv. Torricelliho vakuum

Sloupec rtuť udržovala v uvedené výšce atmosférická tlaková síla, která působila na hladinu rtuť v nádobě- atmosférická tlaková síla je v tu chvíli v rovnováze s hydrostatickým tlakem rtuťového sloupce

$$p_a = p_h = h * \rho * g = 0,75 * 13680 * 9,81 = 1010hPa$$

Tlak se v souvislosti se změnou počasí stále mění- proto byl stanoven normální atmosférický tlak:

$$\overline{p_a} = 1013,25hPa$$

Normální atmosférický tlak odpovídá výšce rtuťového sloupce 0,76m

K měření atmosférického tlaku se užívají barometry (tlakoměry):

- Rtuťový tlakoměr- dle Torricelliho pokusu- pro přesná laboratorní měření
- Kovový tlakoměr (aneroid)- základem je kovová krabice s vnitřním vakuem, zvlněným víčkem a pružinkou uvnitř- atmosférická tlaková síla tlačí na pružné víčko- to tlačí na pružinu a ta hýbe ručičkou a ukazuje na ocejchovaném ciferníku atmosférický tlak zpravidla v hPa

Barograf- užívá se pro grafický záznam atmosférického tlaku- užívá se několik aneroidových krabiček za sebou- pro zvýraznění (vyšší citlivost) výchylky ručičky

Barometry se zároveň užívají jako výškoměry- využívají toho, že atmosférický tlak klesá s nadmořskou výškou

Další jednotky tlaku:

- 1 milibar (mb)=1hPa=100Pa
- 760 torr=1013,25hPa (atmosférický tlak)

Vztlaková síla v kapalinách a plynech

V praxi vidíme, že tělesa ponořená do kapaliny jsou nadlehčována

Síla, která tělesa v kapalině nadlehčuje se nazývá vztlaková síla (F_b/F_{vz})- má opačný směr než tíhová síla (F_g)

Vztlaková síla vzniká jako výslednice hydrostatických sil působících na povrch tělesa v kapalině v klidu

Pokud kvádr o výšce (v) a ploše (S) ponoříme do kapaliny, tak aby stěny kvádru byly rovnoběžné se stěnami nádoby- boční hydrostatické síly se vyruší- a výslednice vrchní a spodní síly bude:

$$F_b = F_{zdola} - F_{zhora}$$

$$= Sh_2\rho g \text{ (tlak na dolní podstavu)} - Sh_3\rho g \text{ (tlak na horní podstavu)}$$

$$F_b = S\rho g * (h_2 - h_1)$$

$$h_2 - h_1 = v$$

$$S * v = V$$

$$F_b = S * v * \rho * g = V * \rho * g$$

Podobně lze vypočítat i vztlakovou sílu pro tělesa ponořená jen částečně (plovoucí tělesa)

Velikost vztlačové síly, kterou je těleso nadlehčováno je tedy přímo úměrná hustotě kapaliny a objemu ponořené části tělesa- (V_p) představuje hmotnost kapaliny (m) stejného objemu jako je objem ponořené části- k tomuto došel již Archimedes:

- Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlačovou silou (F_b), jejíž velikost se rovná velikosti tíhy kapaliny stejného objemu, jako je objem ponořené části tělesa
- **$F_b = V * \rho * g$**

O chování těles v kapalině rozhoduje výslednice tíhy (m_g) a vztlačové síly (V_{pg})

- $F_g > F_b \rightarrow$ klesá ke dnu ($\rho_t > \rho_k$)
- $F_g = F_b \rightarrow$ volně se vznáší ($\rho_t = \rho_k$)
- $F_g < F_b \rightarrow$ stoupá k hladině ($\rho_t < \rho_k$)

Pokud těleso stoupá a dosáhne hladiny, částečně se vynoří a dosáhne tak stavu, kdy $F_g = F_b$

Ke dnu klesají např. těžké kovy, ve vodě se vznášejí ryby po částečném naplnění vzduchové měchýře či člověk po mírném nadechnutí, a na hladině plove např. korek, špejle, polystyren, pořádně nadechnutý člověk, ledová kra, v Mrtvém moři lze plovat na hladině bez vlastního úsilí (hustota slané vody je vyšší, než hustota sladké), ocel plove na rtuti

Při správné úpravě mohou na lodi plovat i tělesa zhotovená z hustších materiálů, než je hustota kapaliny, pokud jsou např. dutá (lodě)- díky snížené průměrné hustotě ponořené části

Pro plovoucí tělesa platí:

$$m_g = F_b$$

$$V_{\text{celé těleso}} * \rho_t * g = V_{\text{ponořená část}} * \rho_k * g$$

$$\frac{V_{\text{celé těleso}}}{V_{\text{ponořená část}}} = \frac{\rho_{\text{kapalina}}}{\rho_{\text{těleso}}}$$

Těleso se tedy ponoří do kapaliny tím větší částí svého objemu, čím je hustota tělesa vyšší nebo čím je hustota kapaliny menší

Na různém ponoru těles v závislosti na hustotě kapalin jsou založeny hustoměry (areometry)

Vztlačovou silou působí na všechna tělesa také plyny- vzhledem k malé hustotě je však vztlačová síla velmi malá

Na působení vztlačové síly v plynech je založeno vznášení těles ve vzduchu (balonky plněné heliem, horkovzdušné balony, meteorologické sondy, vzducholodě)

Přetlak, podtlak

Přetlak- pokud tlak stlačovaného plynu vzroste nad hodnotu tlaku atmosférického (tlakové láhve- desítky MPa, pneumatiky- 250kPa, nafukovací haly- 310Pa, pumpička na kolo, bombičky na výrobu šlehačky, nafukovací matrace, spreje, kompresor)

Manometry- měření tlaku v plynech:

- Kovové manometry- do kovové zahnuté trubice (někdy pružné membrány) proudí plyn pod tlakem- trubice se částečně narovná- změny tvaru trubice se přenáší na pohyb ručičky
- Otevřený kapalinový manometr- měření malých přetlaků- je tvořen trubicí tvaru U naplněnou kapalinou- jeden konec je připojen k plynu a druhý je volný- přetlak se rovná hydrostatickému tlaku použité kapaliny odpovídajícímu rozdílu výšek kapaliny v ramenech trubice
- Uzavřený kapalinový manometr- slouží k měření větších přetlaků

Jednotky:

- 1 atmosféra (at)=0,1MPa
- 1 psi (pound-force per square inch)=6,9kPa

Manometry mají stupnice počínající nulou- měří se tedy pouze rozdíl mezi plynem pod tlakem a atmosférou (přetlak tedy může být i veličinou- rozdíl mezi absolutním a atmosférickým tlakem)

Podtlak- tlak je nižší, než atmosférický (sací pumpy, vývěvy, vakuové balení, sušení, vysavač, dýchání, pití)

Vakuum- prostor se sníženým množstvím hmotných částic:

- Podtlak (polovina atmosférického tlaku)
- Hrubé vakuum (10^4 - 10^2 Pa)- mechanické vývěvy (vodní vývěvy)- chemicky netečné prostředí (žárovky)
- Jemné vakuum (10^2 - 10^{-1} Pa)- difúzní vývěvy- delší dráha doletu částic (rentgenky, elektronky)
- Vysoké vakuum (HV; 10^{-1} - 10^{-5})- turbomolekulární, iontové a difúzní vývěvy, případně ve spojení s rotačními vývěvami- ještě delší dráhy doletu (obrazovky, některé elektronky, výroba polovodičů)
- Ultravysoké a extrémně vysoké vakuum (10^{-5} -...Pa)- absorpční a kryogenní vývěvy- velmi dlouhé dráhy doletu (urychlovače částic, tokamaky, vesmírný prostor)

Ve vesmírném vakuu je koncentrace částic asi 1 atom na 1m^3

Proudění kapalin a plynů

Proudění- převážný pohyb částic tekutin v jednom směru

Obtékání těles- jedoucí auta, letadla, lodě

Při proudění dochází k pohybu jednotlivých částí tekutiny, jednotlivé částice mohou měnit svou vzájemnou polohu, rychlost a směr- pohyb je tedy složitější, než u pevných těles

je-li rychlost částic ve všech bodech stejná jedná se o stacionární/ustálené proudění- při tomto proudění se nemění hustota ani tlak

trajektorie částic proudící tekutiny při stacionárním proudění znázorňujeme proudnicemi- čára jejíž tečna v libovolném bodě je vektor rychlosti pohybující se částice- každým bodem stacionárně proudící tekutiny prochází právě jedna proudnice- ty se tedy nemohou vzájemně křížit- je možné je pozorovat např. přidáním barviva do určitého bodu proudící kapaliny

proudnice orientujeme ve směru pohybu a v místech, kde tekutina proudí rychleji, jsou proudnice blíže u sebe- soustava proudnic tedy dává představu o směru i o rychlosti

Představíme-li si uvnitř kapaliny uzavřenou křivku, pak každým bodem této křivky prochází právě jedna proudnice. Protože se proudnice neprotínají, je těmito proudnicemi ohraničen určitý prostor. Tento prostor se nazývá proudová trubice. Protože se kapalina, která protéká proudovou trubicí, pohybuje podél této trubice (vektor rychlosti je k proudové trubici tečný), je tato kapalina proudovou trubicí uzavřena. Z trubice nemůže kapalina odtéci a nemůže do ní žádná kapalina přitéci z vnějšího prostoru trubice.- tento útvar se nazývá také proudové vlákno- proudové vlákno vytvoříme např. vložením prstýnku do proudu vody

Stacionární proudění ideální kapaliny- nejjednodušší případ proudění- kapalina dokonale tekutá a nestlačitelná- při ustáleném proudění ideální kapaliny protéká každým průřezem trubice za stejný čas kapalina o stejném objemu

Pro ustálené proudění kapaliny zavádíme veličinu objemová průtok (Q_V):

$$Q_V[m^3/s] = \frac{V}{t}$$

každá částice s za čas (Δt), díky shodné rychlosti (v) posune o stejnou dráhu (d):

$$d = v * \Delta t$$

Objem protečené kapaliny bude tedy roven součinu dráhy (d) a průřezu (S):

$$V = S * v * \Delta t$$

Po dosazení dostaneme:

$$Q_V = A(S) * v$$

Rovnice uvedené výše se však uplatňují pouze za předpokladu stacionárního proudění ideální kapaliny (ve všech bodech stejná rychlost, dále je tekutina nestlačitelná- nemůže se v žádném místě hromadit atp.)- při tomto předpokladu je objemový průtok (Q_V) konstantní- toto vyjadřuje rovnice kontinuity (spojitosti toku)

- Při stacionárním proudění ideální kapaliny je součin obsahu průřezu a velikosti rychlosti proudu v tomto průřezu v každém místě stejný

Rovnice kontinuity je speciálním případem zákona o zachování hmotnosti- pokud vynásobíme hustotou (ρ) a časem (Δt) dostaneme hmotnost protečené tekutiny (m):

$$m = S * v * \rho * \Delta t$$

Pokud máme horizontální trubici nestejného obsahu průřezu využijeme rovnice kontinuity:

$$Q_1 = Q_2$$

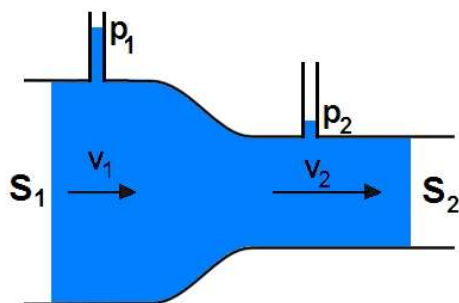
$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

Velikosti rychlostí proudící kapaliny v trubici nestejného průřezu jsou v opačném poměru, než obsahy průřezů- v užší části trubice proudí voda rychleji (proud vody vyteká z kohoutku se zužuje- díky gravitaci se voda zrychluje)

Vodoměry/plynoměry- slouží k měření objemu tekutiny, která proteče daným útvarem za daný čas

Bernoulliho rovnice pro horizontální trubici



Oproti rovnici kontinuity, Bernoulliho rovnice funguje na principu zákona o zachování energie

$$K_E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho V v^2$$

$$P_E = F_p * \Delta x = (p * S) * v * \Delta t = p * (S * v * \Delta t) = p * V$$

$$U_g = mg\Delta y$$

Rovnice kontinuity nám v podstatě říká:

$$V_1 = V_2$$

I přes měnění se rychlost a tlak musí být stále zachována energie – Bernoulliho rovnice pro vodorovnou trubici:

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

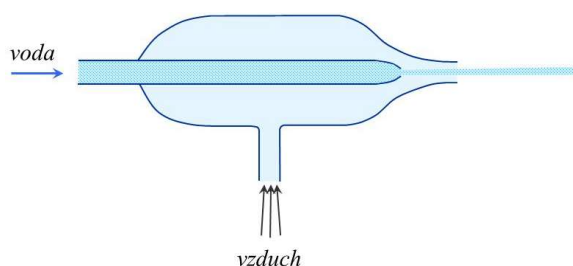
$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$$

Pokud se mění zároveň i výška trubice – trubice tedy již není horizontální:

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

U trubice s kapalinou se mění tři formy energie: kinetická energie, potenciální tlaková energie, potenciální gravitační energie

Při výrazném zúžení trubice (vysokých rychlostech) může tlak kapaliny poklesnout pod atmosférický a manometrické trubice (na obrázku výše s popisem p_1 a p_2) mohou začít nasávat vzduch- tohoto jevu využívá vodní vývěva

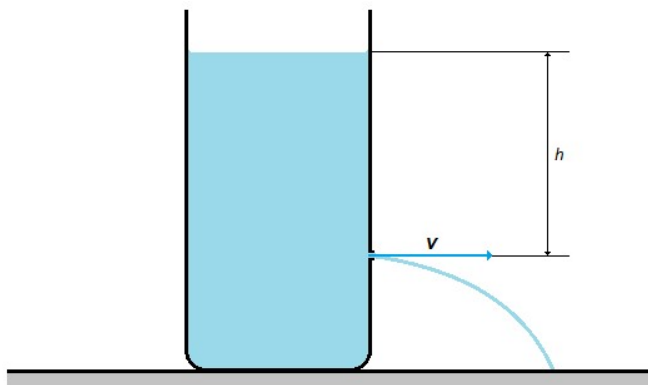


¹ Označení pro hustotu je jak (ρ), tak (ϱ)

„Hydrodynamický paradox“- historický název pro snížení tlaku při vyšší rychlosti kapalin- na této situaci však není nic paradoxního a je naprosto v souladu se zákony o zachování energie

„Aerodynamické paradoxon“- Podtlak vznikne také v případě proudících plynů- pro plyny je však Bernoulliho rovnice složitější- změnou tlaku v plynech se mění i jejich hustota- je tedy nutné užít calculus (matematickou analýzu)- podtlak proudícího vzduchu využívají rozprašovače, stříkácí pistole, karburátory spalovacích motorů

Proudí-li vzduch při vichřici kolem domu s šikmou střechou, vzniká u vrcholu podtlak a na opačné straně přetlak- díky tomu vzniká přetlak i domě pod střechou- přetlakem zdola a pod tlakem z vrchu se může střecha nadzvednout



Zákonem o zachování energie lze také určit rychlost kapaliny vytékající otvorem v nádobě

Vytékáním kapaliny se snižuje výška hladiny, tedy potenciální gravitační energie a mění se na kinetickou energii vytékajícího proudu:

$$mg\Delta y = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{2g\Delta y}$$

Rychlost kapaliny vytékající otvorem je tedy vyšší, čím je otvor hlouběji

Tato rovnice však zanedbává kinetickou energii, kterou kapalina má během poklesu hladiny- ta je však v případě nádob typických rozměrů velmi malá až zanedbatelná