Fyzika Zeme

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskeho programu Geológia
- kvapaliny (a plyny) a ich prúdenie

Obsah prednášky:

- skupenstvá
- ideálny a reálny plyn (kvapalina)
- Archimedov zákon
- rovnica kontinuity
- Bernoulliho rovnica
- laminárne a turbulentné prúdenie

skupenstvá

Poznáme 4 základné skupenstvá:

Pevné skupenstvo
- pevné usporiadanie častíc
- silné sily
- tvarová stálosť

Kvapalné skupenstvo
- slabé sily
- nestlačitelnosť
- neudržatelnosť tvaru

Plynné skupenstvo
- slabé sily
- stlačitelnosť
- neudržatelnosť tvaru

Plazma

(ionizovaný stav hmoty podobný plynu)
- prítomnosť nabitých častíc
- vodivosť a ovplyvňovanie častíc elektromagnetickým poľom

skupenstvá

Rôzne skupenstvá tej istej látky sa nazývajú fázy, napríklad mlieko pozostáva z dvoch fáz – vody (tekuté skupenstvo) a tuku (pevné skupenstvo).
Tento pojem je však relatívny – závisí od stupňa podrobnosti skúmania danej látky. Pri povrchnom skúmaní sa dá napríklad aj tvrdiť, že mlieko je len jednofázové - tekuté, a pojmy fáza a skupenstvo potom splývajú.
Čistá látka môže v rovnovážnom stave za danej teploty a tlaku existovať buď v jednej, v dvoch alebo najviac v troch fázach súčasne (fázové diagramy).

Látka môže v danom stave zotrvávať len v určitom intervale teplôt a tlakov. Pri ich zmene môže látka prejsť do iného stavu (skupenstva) – napr. topenie, var, sublimácia.

skupenstvá v stavbe hornín



V mineralógii a petrológii sa prejavujú základné fázy látky nasledujúcim spôsobom:

- pevné skupenstvo: minerály, skelet horniny

- kvapalné skupenstvo: kvapaliny v póroch hornín (najmä voda, ale aj ropa)

- plynné skupenstvo: plyny v póroch hornín (najmä vzduch, ale aj uhľovodíkové plyny)

- plazmatický stav sa bežne v prírode medzi minerálmi nevyskytuje.

Plyny

Plyn alebo **plynné skupenstvo (látka)** je jedno zo základných skupenstiev, pri ktorom sú jednotlivé častice látky relatívne ďaleko od seba, voľne sa pohybujú v priestore a pôsobia na ne zanedbateľne malé príťažlivé sily.

V porovnaní s kvapalinami a tuhými látkami majú plyny omnoho menšiu hustotu a viskozitu a sú stlačiteľné.

Na zjednodušené skúmanie vlastností plynov sa používa **ideálny plyn (stlačiteľný).**

Skutočný plyn (reálny) má na rozdiel od plynu ideálneho aj viskozitu, teda vnútorný mechanický odpor a nedá sa úplne stlačiť.

Ideálny plyn

Ideálny plyn je teoretický model, ktorý opisuje hypotetickú hmotu v plynnom skupenstve. Je zjednodušením, ktoré sa používa vo fyzike pri štúdiu reálnych plynov.

Zjednodušenie spočíva v tom, že zatiaľ čo molekuly reálneho plynu na seba navzájom pôsobia silami, pri ideálnom plyne toto silové pôsobenie zanedbávame. Molekuly ideálneho plynu sa preto medzi jednotlivými zrážkami pohybujú priamočiaro.

Teoretické vlastnosti ideálneho plynu dostatočne presne vystihujú vlastnosti reálneho plynu pri nižších hustotách a tlakoch a stredných teplotách. Priblíženie ideálneho plynu prestáva byť presné najmä pri vysokých hustotách.

Ideálny a reálny plyn

Každý plyn s ktorým sa stretávame (**reálny**) v prírode sa do určitej miery líši od **ideálneho**. Mnohé plyny sa však za normálnych podmienok líšia len nepatrne (napr. vodík a hélium).

Napriek tomu, že skutočný plyn (reálny) nemôžeme úplne stlačiť a má na rozdiel od plynu ideálneho aj vnútorný mechanický odpor môžeme zákonitosti platné pre ideálny plyn použiť aj na vyšetrovanie reálnych plynov.

kvapaliny

Kvapalina (iné názvy: kvapalné skupenstvo, kvapalná látka, tekutina, tekutá látka).

Kvapalina je tekutá forma látky a jedno zo skupenstiev, pri ktorom sú častice relatívne blízko pri sebe, ale nie sú viazané v pevných polohách a môžu sa pohybovať v celom objeme.





kvapaliny

Vonkajšie vlastnosti kvapalín:

- kvapaliny sú tekuté,
- kvapaliny sú ľahko deliteľné,
- kvapalné telesá nemajú svoj tvar, ale majú tvar podľa nádoby, v ktorej sa nachádzajú,
- kvapalné telesá majú vlastný objem,
- kvapalné telesá majú voľný povrch (hladinu),
- kvapaliny tvoria kvapky (vďaka slabým príťažlivým silám medzi časticami),
- kvapaliny sú ťažko stlačiteľné,
- kvapaliny sa snažia zaujať čo možno najmenší povrch,
- teplo sa v kvapalinách môže šíriť prúdením,
- elektrický prúd vo vodivých kvapalinách sa prenáša iónmi.

Ideálna a reálna kvapalina

Ideálna kvapalina je homogénna, nestlačiteľná a má nulové vnútorné trenie (tzv. viskozitu).

Reálna kvapalina je čiastočne stlačiteľná a medzimolekulové sily sa v nej prejavujú vnútorným trením.

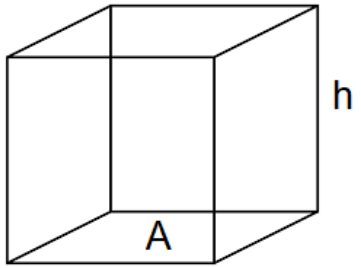
Najväčšie rozdiely sa prejavujú pri popise prúdenia týchto dvoch druhov kvapalín.

kvapaliny – dôležité veličiny

Hydrostatický tlak (p), skalárna veličina

Hydrostatický tlak v kvapalinách a plynoch (aerostatický tlak) je tlak spôsobený ich hmotnosťou. V gravitačnom poli zeme pôsobí kvapalina (plyn) tiažovou silou na vrstvy pod nimi.

Jednotka: Pa ($Pa = N/m^2 = N\ m^{-2} = kg\ m^{-1}\ s^{-2}$)

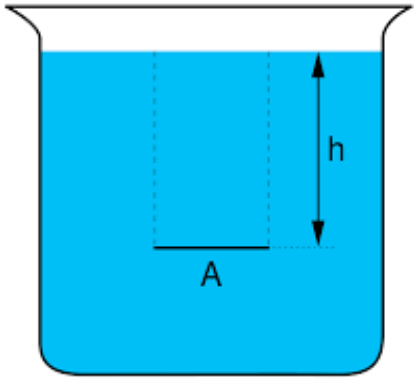


$$p = \frac{|F|}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho h A g}{A} = \rho h g$$

kde: A – spodná plocha objemu, V – objem, ρ – hustota.

Hydrostatický tlak pôsobí všetkými smermi (kvôli rozkladu síl medzi časticami kvapaliny do rôznych smerov).

Hydrostatickým tlakom tlačí kvapalina na telesá do nej ponorené, na steny nádoby v ktorej je umiestnená.



Pozn.: Uvedený vzťah ($p = \rho\ hg$) platí aj pre **atmosferický** a **litostatický tlak**.

tlak

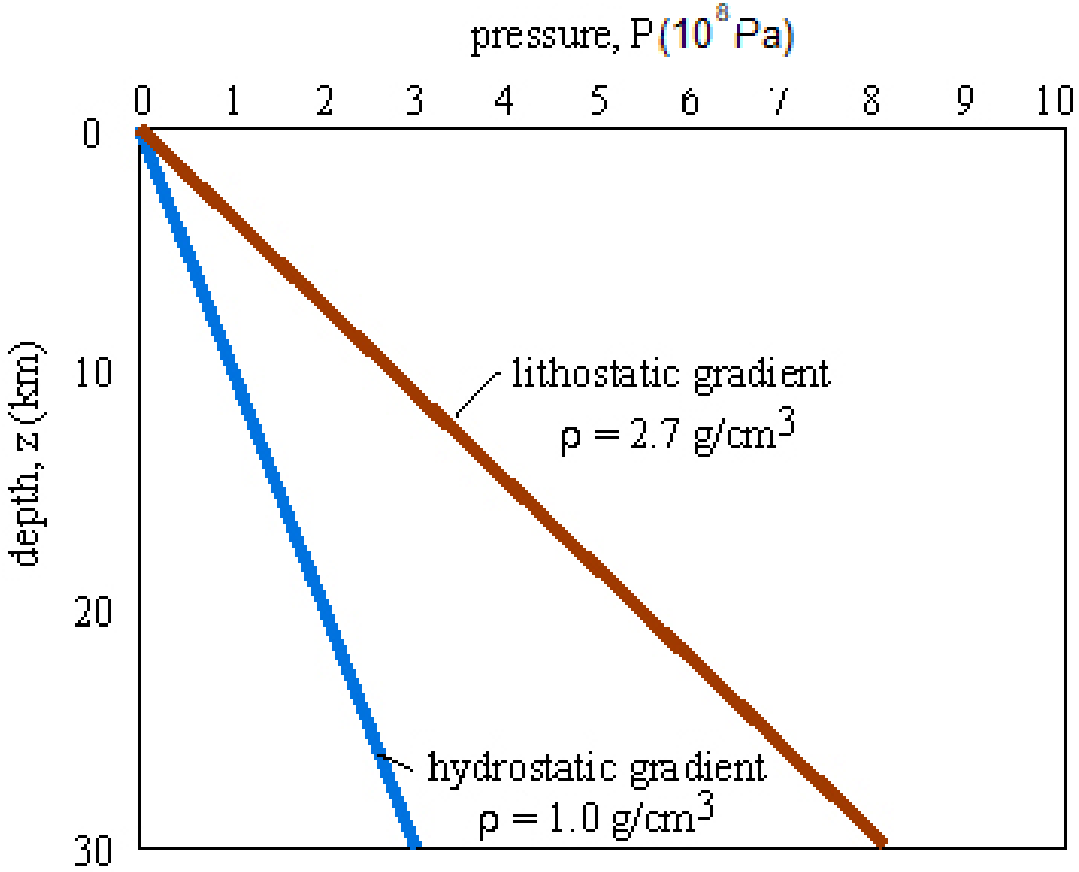
Hydrostatický tlak v plynoch a kvapalinách je daný hmotnosťou horných vrstiev, ktoré v gravitačnom poli pôsobia silou na vrstvy pod nimi. Túto sila pôsobiacu na plochu nazývame hydrostatickým tlakom.

Atmosférický alebo **barometrický** tlak je špeciálnym prípadom hydrostatického tlaku vyvolaného hmotnosťou vzduchu tvoriaceho atmosféru. Pod vplyvom počasia atmosférický tlak mierne kolíše, preto bol zavedený takzvaný *štandardný atmosférický tlak* alebo *normálny tlak* s hodnotou 101 325 Pa (t.j. cca 100 kPa alebo 0.1 MPa) a je približne rovný priemernej hodnote tlaku na úrovni mora. Tlak v atmosfére klesá s nadmorskou výškou, pretože sa zmenšuje stĺpec vzduchu nad miestom merania.

Litostatický tlak je tlak horných vrstiev hornín a používa sa pri modelovaní procesov v litosfére (napr. pri vysvetľovaní tzv. izostatickej rovnováhy).

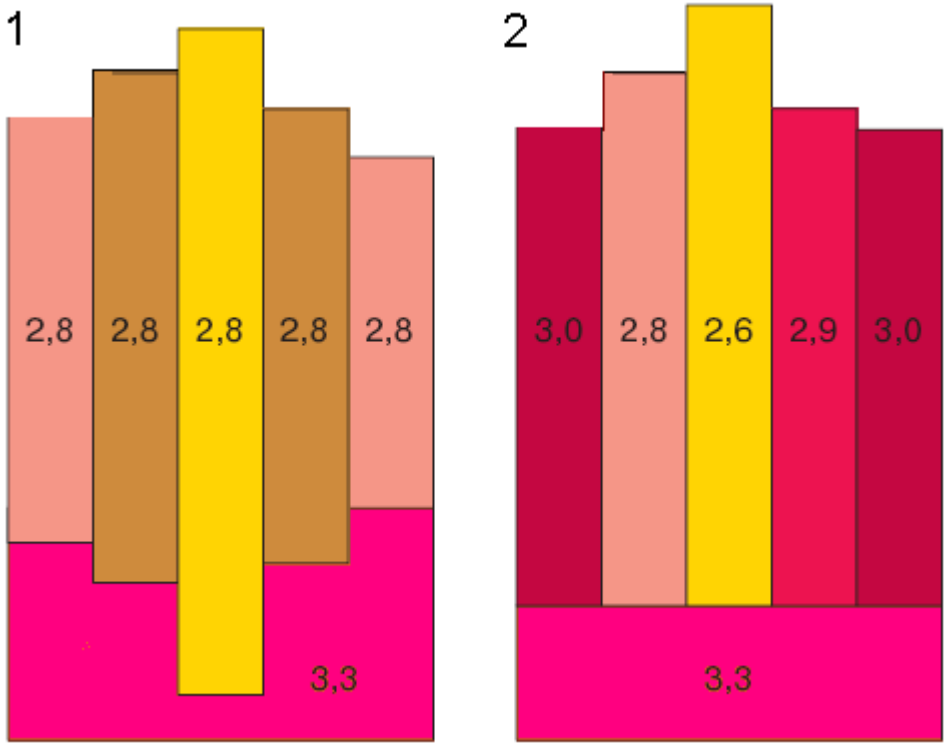
litostatický tlak

Litostatický tlak je tlak horných vrstiev hornín a používa sa pri modelovaní procesov v litosfére (napr. pri vysvetľovaní tzv. izostatickej rovnováhy).
Je možné vyjadriť ho ako súčin výšky a hustoty horninového bloku s gravitačným zrýchlením: $\rho \cdot h \cdot g$



litostatický tlak

Izostázia predpokladá kompenzáciu litostatických tlakov od horninových celkov litosféry v určitej hĺbke (astenosféra).



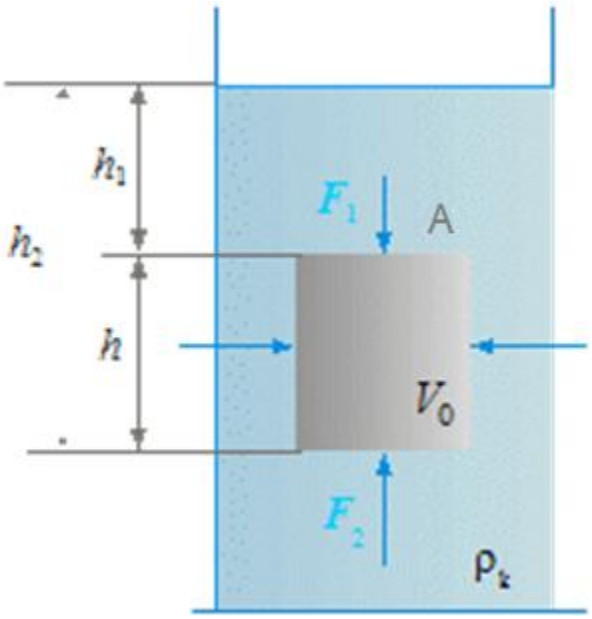
tzv. Airyho model a Prattov model

kvapaliny – dôležité veličiny

Hydrostatická vztlaková sila (F_{vz}), vektorová veličina

Na základe vzťahu pre hydrostatický tlak si vieme vyjadriť vzťah pre silu, ktorá pôsobí na teleso, ktoré je ponorené do kvapaliny:

$$p = \rho h g = \frac{|F|}{A} \rightarrow |F| = h \rho g A$$



- na hornú podstavu pôsobí tlaková sila zvisle nadol:

  $F_1 = h_1 \rho g A$

- na dolnú podstavu pôsobí tlaková sila zvisle nahor:

  $F_2 = h_2 \rho g A$ $\quad F_2 > F_1$

- výslednica týchto síl, pôsobiaca na valec zvisle nahor sa nazýva **hydrostatická vztlaková sila:**

- $F_{VZ} = F_2 - F_1$

  $F_{VZ} = (h_2 - h_1) \rho g A$

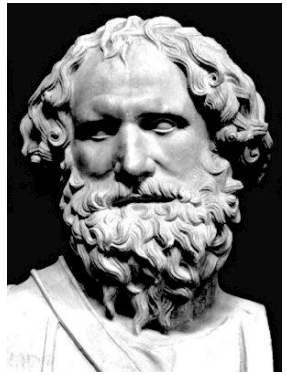
  $F_{VZ} = h \rho g A$

  $F_{VZ} = \rho g V$ ← **základ Archimedovho zákona**

Archimedov zákon

- Teleso ponorené do kvapaliny je nadľahčované hydrostatickou vztlakovou silou, ktorej veľkosť sa rovná veľkosti tiaže kvapaliny vytlačenej ponorenou časťou telesa.
- **Veľkosť hydrostatickej vztlakovej sily:**

$$F_{VZ} = \rho g V$$

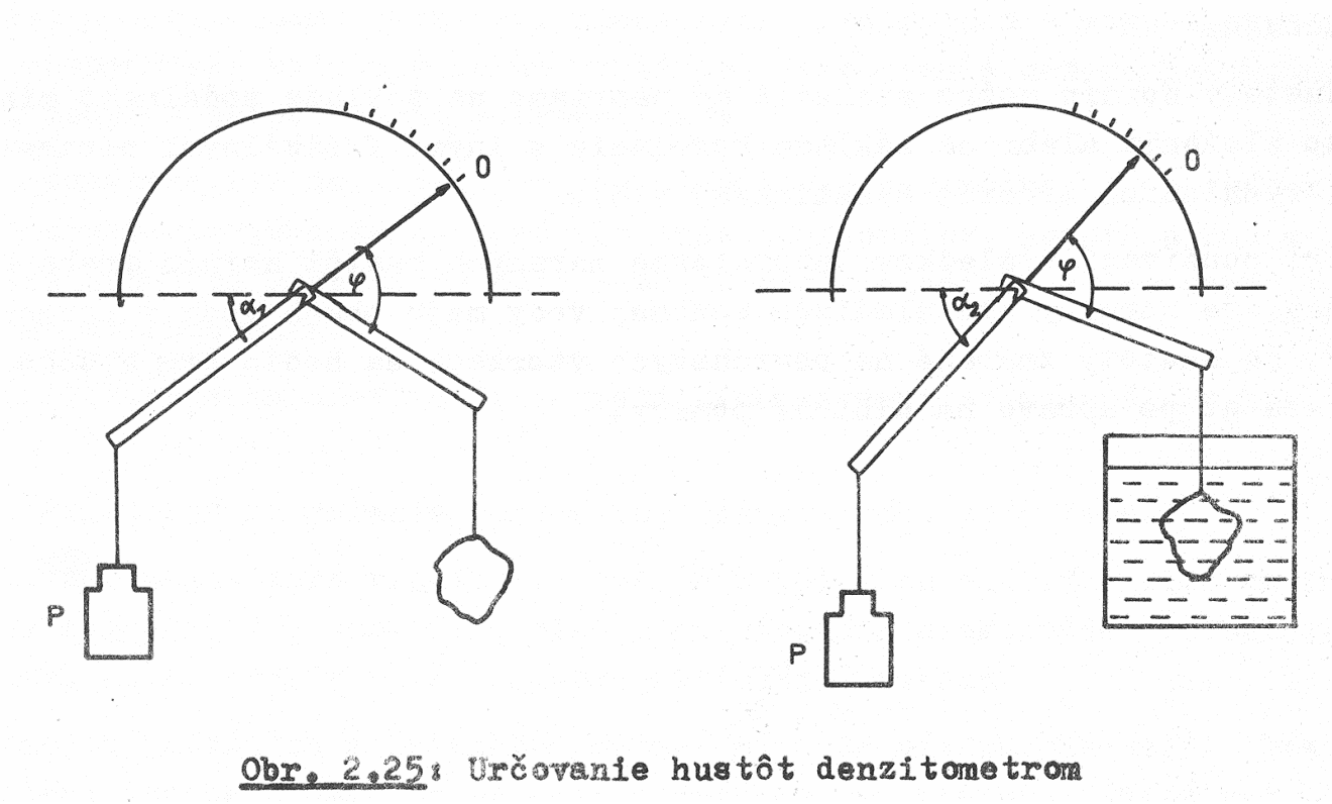


Archimedes
(asi 287 – 212 pred n. l.)

- je priamo úmerná objemu V ponorenej časti telesa, hustote ρ kvapaliny a veľkosti tiažového zrýchlenia g.



Aplikácia Archimedovho zákona - princíp denzitometra (denzitometer – jednoduché zariadenie na odhad hustôt vzoriek)



Obr. 2.25: Určovanie hustôt denzitometrom

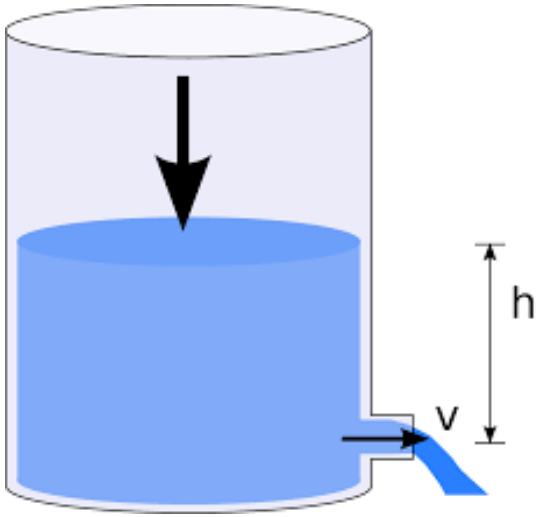
Ponorená vzorka do kvapaliny (vody) je nadľahčovaná vztlakovou silou, ktorá je úmerná tiaži kvapaliny vytlačenej objemom telesa. V strede váh dochádza ku rovnováhe momentov síl.

kvapaliny – dôležité veličiny

Rýchlosť vytekajúcej kvapaliny (tzv. Torricelliho vzorec)

Popisuje rýchlosť ideálnej kvapaliny, ktorý voľne vyteká z nádoby otvorom na základe pôsobenia tiažovej sily. Táto rýchlosť má práve takú veľkosť, akú by získali častice kvapaliny pri voľnom páde z výšky h.

Pre reálnu kvapalinu bude rýchlosť výtoku nižšia vzhľadom na jej viskozitu.



$$|v| = \sqrt{2gh}$$

Pri odvodení sa vychádza z jednoduchých vzťahov pre voľný pád:

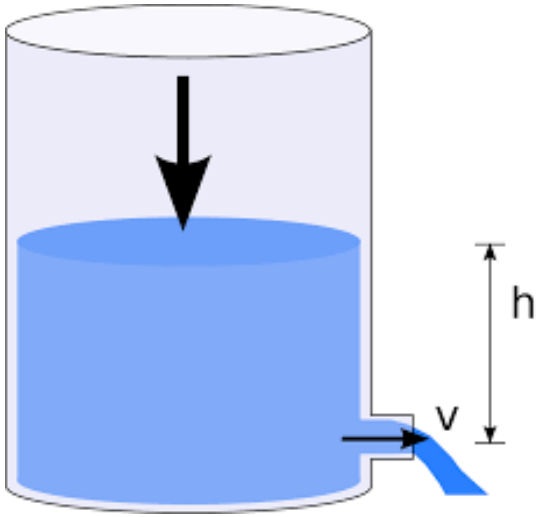
$$s = h = \frac{1}{2} g t^2 \ , \quad v = gt$$

kvapaliny – dôležité veličiny

Rýchlosť vytekajúcej kvapaliny (tzv. Torricelliho vzorec)

Popisuje rýchlosť ideálnej kvapaliny, ktorý voľne vyteká z nádoby otvorom na základe pôsobenia tiažovej sily. Táto rýchlosť má práve takú veľkosť, akú by získali častice kvapaliny pri voľnom páde z výšky h.

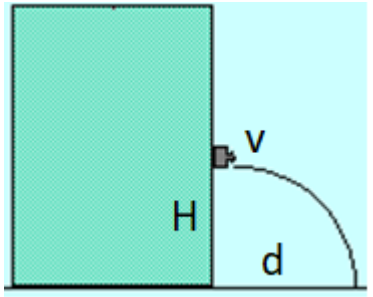
Pre reálnu kvapalinu bude rýchlosť výtoku nižšia vzhľadom na jej viskozitu.



$$|v| = \sqrt{2gh}$$

Pri takýchto príkladoch vieme vypočítať vzdialenosť, do akej dopadne takto vytekajúca kvapalina – podľa tzv. horiz. vrhu:

$$d = v.\sqrt{\frac{2.H}{g}}$$



kvapaliny – prúdenie

Prúdenie plynov a kvapalín:

Prúdenie plynov a kvapalín sa popisuje rozdielne, nakoľko pri kvapalinách sa uvažuje s ich nestlačiteľnosťou (hustota kvapalín sa nemení).
Na druhej strane, plyny sú stlačiteľné (hustota sa mení – tzv. stavová rovnica plynu).

kvapaliny – prúdenie

Prúdenie plynov a kvapalín:

Prúdenie plynov a kvapalín sa popisuje rozdielne, nakoľko pri kvapalinách sa uvažuje s ich nestlačiteľnosťou (hustota kvapalín sa nemení).
Na druhej strane, plyny sú stlačiteľné (hustota sa mení – tzv. stavová rovnica plynu).

Dôležité pojmy a rovnice:

- prietok,
- rovnica kontinutiy,
- Bernouliho rovnica.

kvapaliny – prúdenie

Objemový prietok (Q), skalárna veličina

(prietok alebo prietokové množstvo alebo prietokový objem)

je objem tekutiny, ktoré prejde daným prierezom

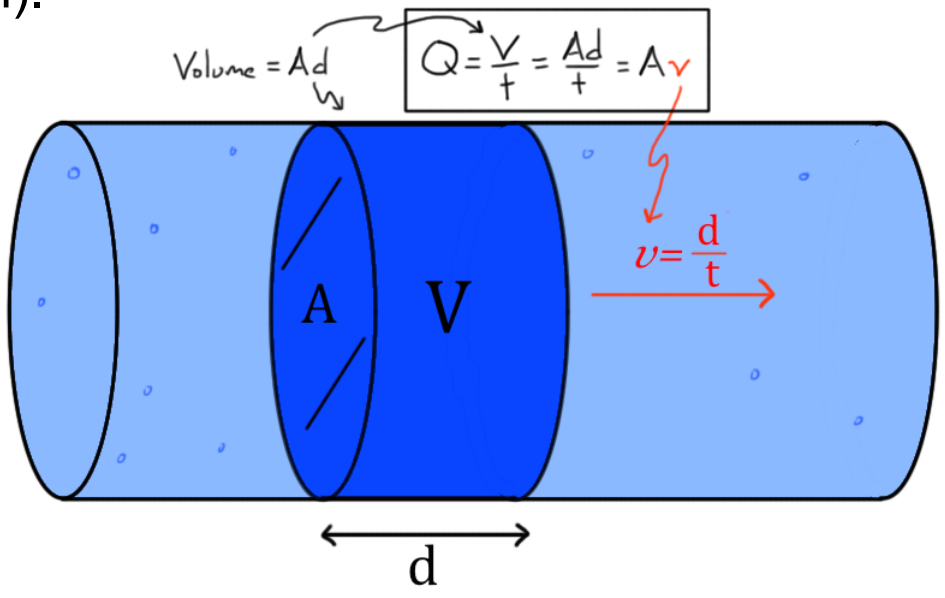
(napríklad istým miestom potrubia alebo rieky) za istý čas.

Jednotka: meter kubický za sekundu ($m^3\,s^{-1}$).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{dA}{t} = |v|\,A$$

kde: Q – objemový prietok, V – objem, t – čas, A – prierez (niekedy aj S),

v – rýchlosť (veľkosť rýchlosti).



Zaujímavosť:
Priemerné prietoky našich riek:
Dunaj: 6 400 $m^3\,s^{-1}$
Váh: 150 $m^3\,s^{-1}$
Hron: 50 $m^3\,s^{-1}$

kvapaliny – prúdenie

Objemový prietok (Q): $Q = \frac{V}{t} = \frac{dA}{t} = |v| A$

niekedy sa používa:

Hmotnostný objemový prietok (Q_m), skalárna veličina

je hmotnosť tekutiny, ktoré prejde daným prierezom (napríklad istým miestom potrubia alebo rieky) za istý čas.

Jednotka: meter kubický za sekundu (kg s^{-1}).

$$Q_m = |v| A\rho$$

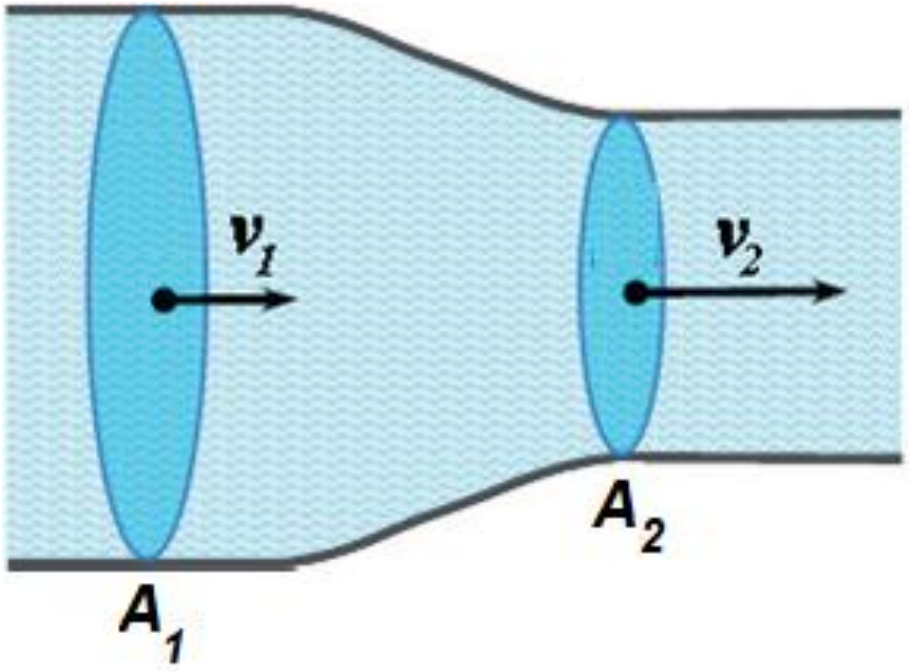
kde: ρ – hustota.

kvapaliny – prúdenie

Rovnica kontinuity (rovnica spojitosti toku)

Keďže ideálna kvapalina je nestlačiteľná (a neexistujú zdroje, ktoré by jej objem zväčšovali), jej objemový prietok zostáva pri prúdení rovnaký.

$$|v|_1 A_1 = |v|_2 A_2 \quad \Rightarrow \quad |v| A = \text{const.}$$



kvapaliny – prúdenie

Bernoulliho rovnica

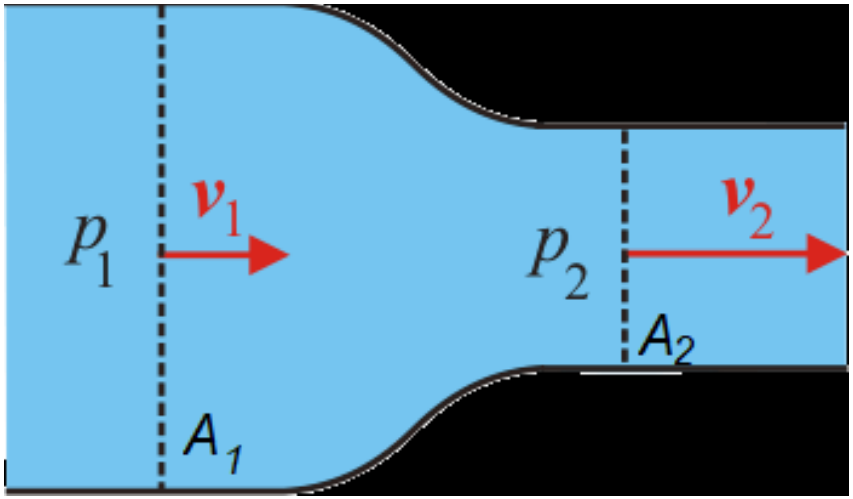
Pomery tlakov pri prúdení ideálnej kvapaliny najlepšie popisuje tzv. Bernoulliho rovnica:

externý tlak

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

hydrostatický tlak

hydrodynamický tlak

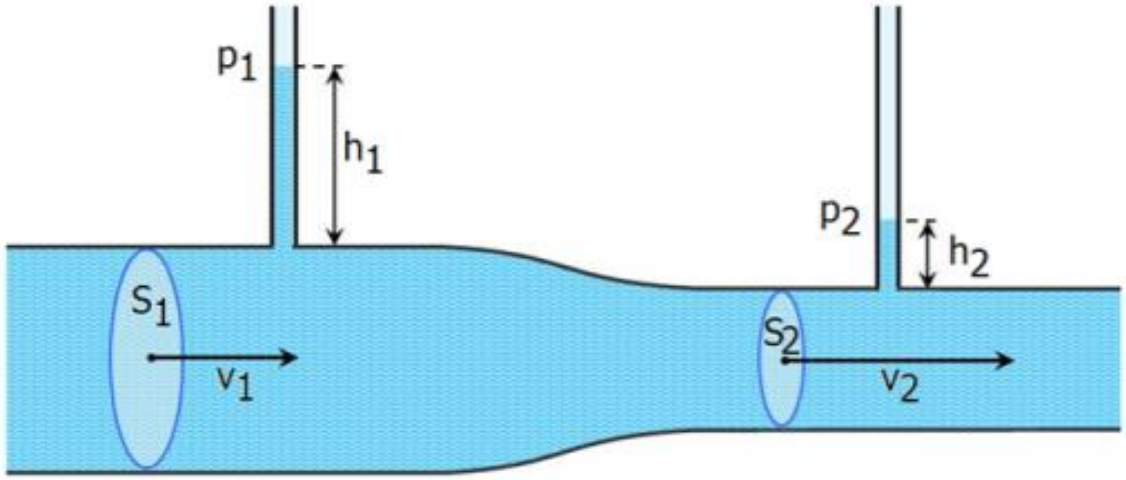


kvapaliny – prúdenie

Bernoulliho rovnica - tzv. hydrodynamický paradox

$$p + \rho hg + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const.}$$

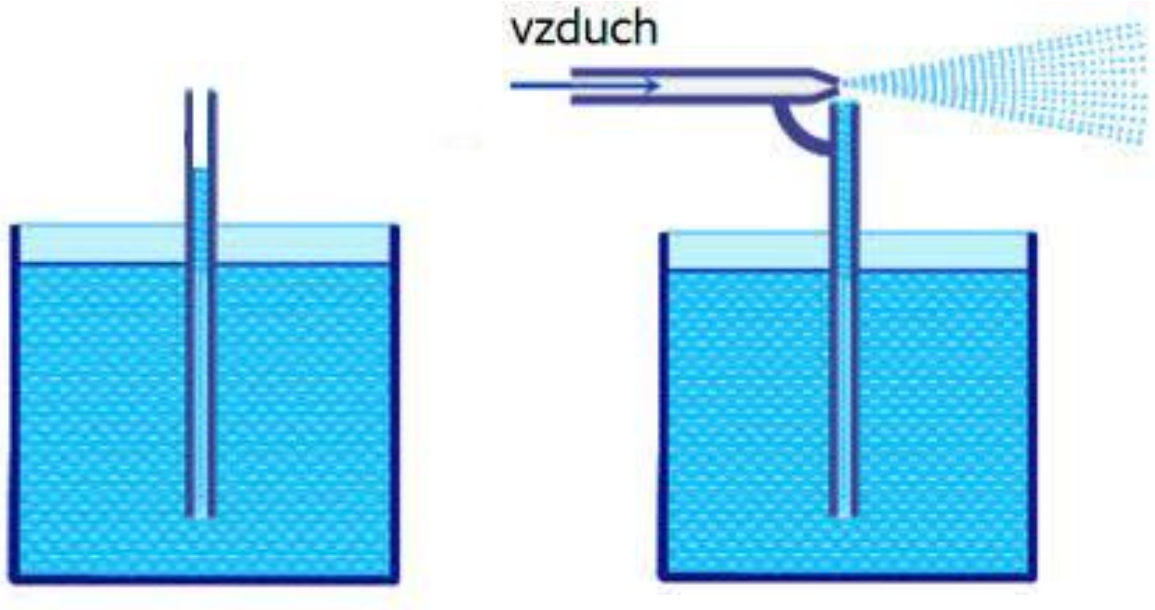
Jav, pri ktorom v užšej trubici (s väčšou prietokovou rýchlosťou) vzniká menší tlak.



Platí aj pri plynoch – tzv. aerodynamický paradox.

kvapaliny – prúdenie

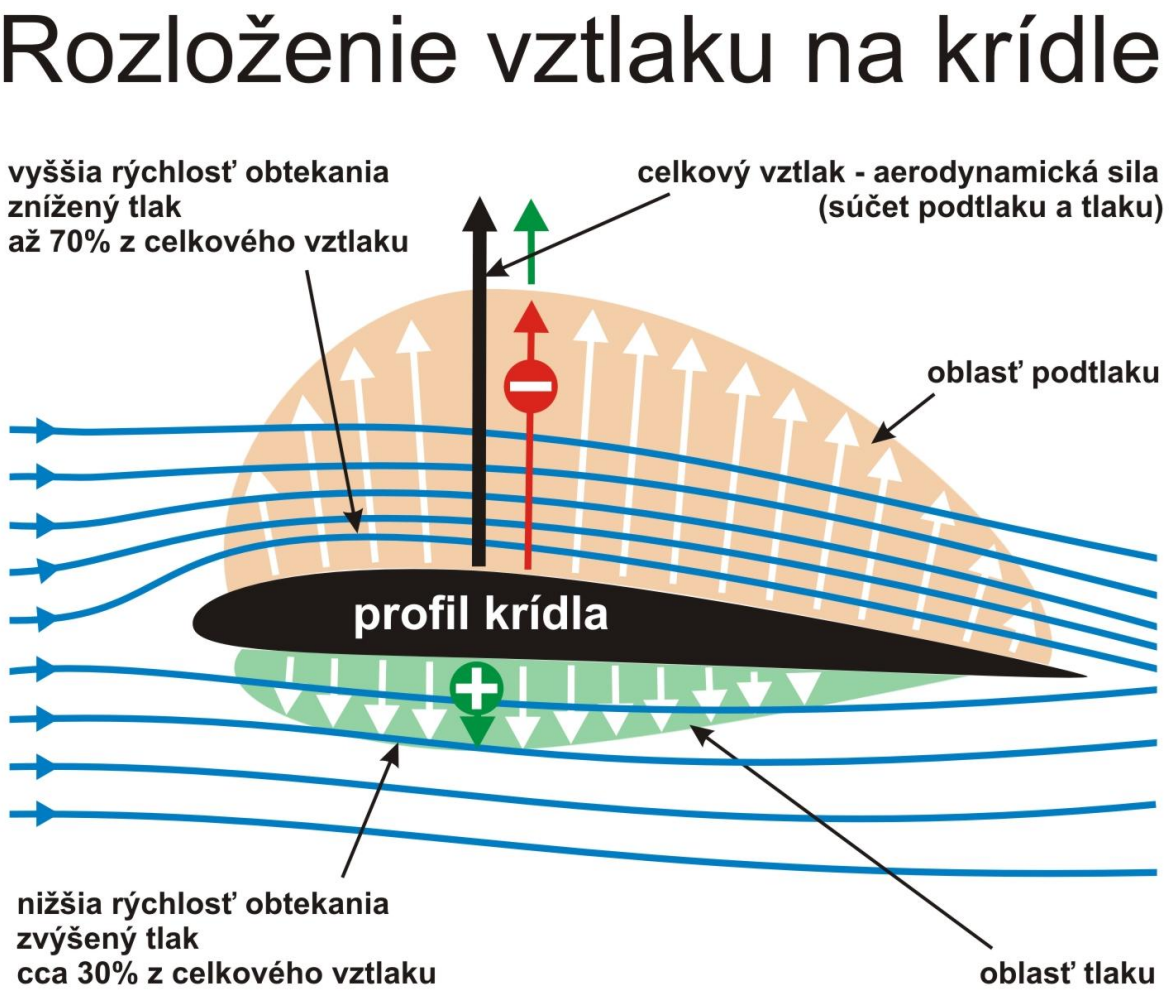
Bernoulliho rovnica - tzv. hydrodynamický paradox



Vďaka tejto rovnici sa dá vysvetliť princíp rozprašovača
(aj karburátora v spaľovacom motore, atď.)

Prečo sa ťažké lietadlá udržia pri lete vo vzduchu…?

No, kvôli tvaru krídel… hmmm?



Ideálna a reálna kvapalina

späť ku tejto téme…

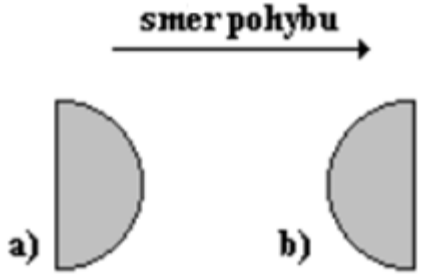
kvapaliny – prúdenie

odporová hydrodynamická sila

Pri narážaní prúdu kvapalinu na prekážku dochádza ku vzniku tzv. odporovej sily. Pre jej veľkosť (skalár) platí tzv. Newtonov vzťah:

$$F = \frac{1}{2} C A \rho v^2$$

kde: C – tzv. súčiniteľ odporu (bezrozmerná veličina) –
závisí od tvaru telesa (telesá s najväčšou hodnotou C: padák, … ;
telesá s najmenšou hodnotou C: telá rýb a vtákov,
karosérie automobilov, …), napr. $C_{guľa} = 0{,}48$.
A – prierez,
ρ – hustota kvapaliny,
v – rýchlosť (veľkosť rýchlosti).



kvapaliny – prúdenie

odporová hydrodynamická sila

$$F = \frac{1}{2} C A \rho v^2$$

Tvary telies a profily	C
Kruhová doska	1,11
Štvorcová doska	1,05 až 1,27
Dutá pologuľa	1,35 až1,40
Vypuklá pologuľa	0,30 až 0,40
Kruhový valec	1,2
Eliptický valec $a:b = 2:1$	0,48
Eliptický valec $a:b = 8:1$	0,20
Profily s minim. odporom	0,003 až 0,01
Trup lietadla	0,045 až 0,005

kvapaliny – prúdenie

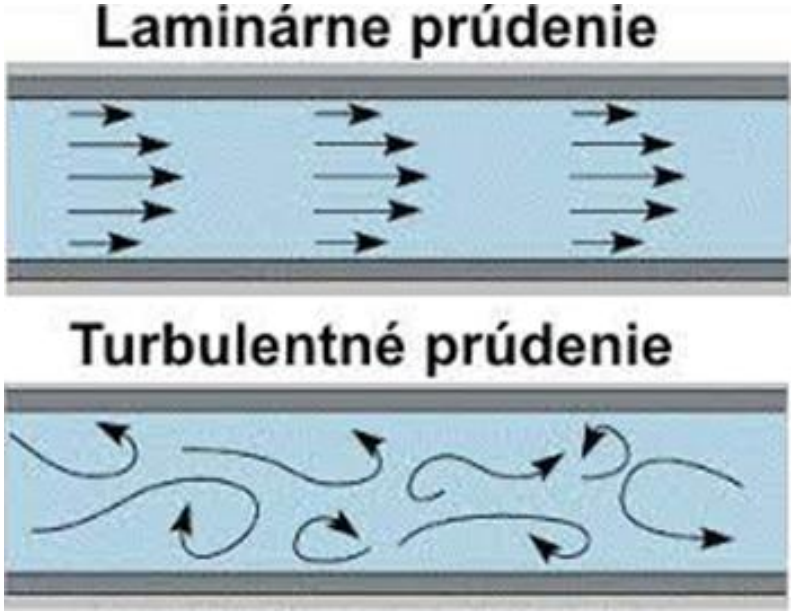
Prúdenie plynov a kvapalín:

Reálne kvapaliny majú svoju vizkozitu nenulovú – prúdia vo vrstvičkách.

Laminárne prúdenie je ustálené prúdenie reálnej kvapaliny malou rýchlosťou (vrstvy kvapaliny sa po sebe pravidelne posúvajú).

Turbulentné prúdenie neustálené prúdenie reálnej kvapaliny – pri väčších rýchlostiach dochádza ku vzniku vírenia.

Prechod medzi nimi: **prechodové prúdenie**.







kvapaliny – prúdenie

Prúdenie plynov a kvapalín:

Laminárne prúdenie je ustálené prúdenie reálnej kvapaliny malou rýchlosťou (vrstvy kvapaliny sa po sebe pravidelne posúvajú).

Turbulentné prúdenie neustálené prúdenie reálnej kvapaliny – pri väčších rýchlostiach dochádza ku vzniku vírenia.

Prechod medzi nimi: **prechodové prúdenie**.

Tento prechod sa dá kvantitatívne popísať tzv. **Reynoldsovým číslom**:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho |v| D}{\mu}$$

kde: ρ – hustota prúdiacej kvapaliny,
v – jej rýchlosť,
D – rozmer kolmý na smer prúdenia (napr. priemer potrubia),
μ – koeficient dynamickej viskozity

Je to bezrozmerné číslo.

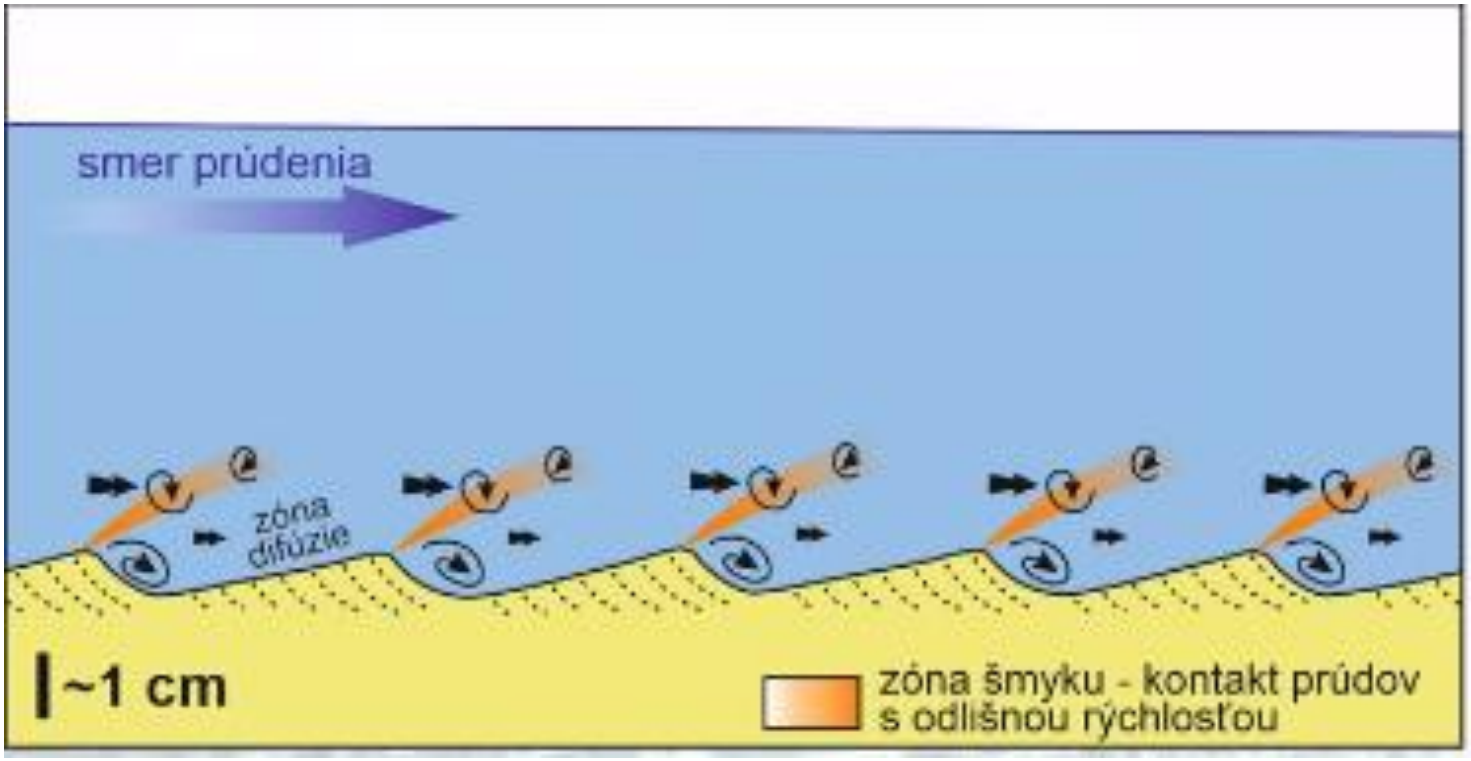
Pri jeho hodnotách 2000 až 2500 nastáva prechod od laminárneho k turbulentnému prúdeniu (napr. zvyšovaním rýchlosti prúdu).

Pri niektorých technických aplikáciách je vznik turbulentného prúdenia žiadaný, pri iných je to práve naopak.

kvapaliny – prúdenie

Prúdenie plynov a kvapalín:

Turbulentné prúdenie – môže byť vyvolané aj lokálne, a to prekážkami (napríklad pri sedimentácii čerín a dún).



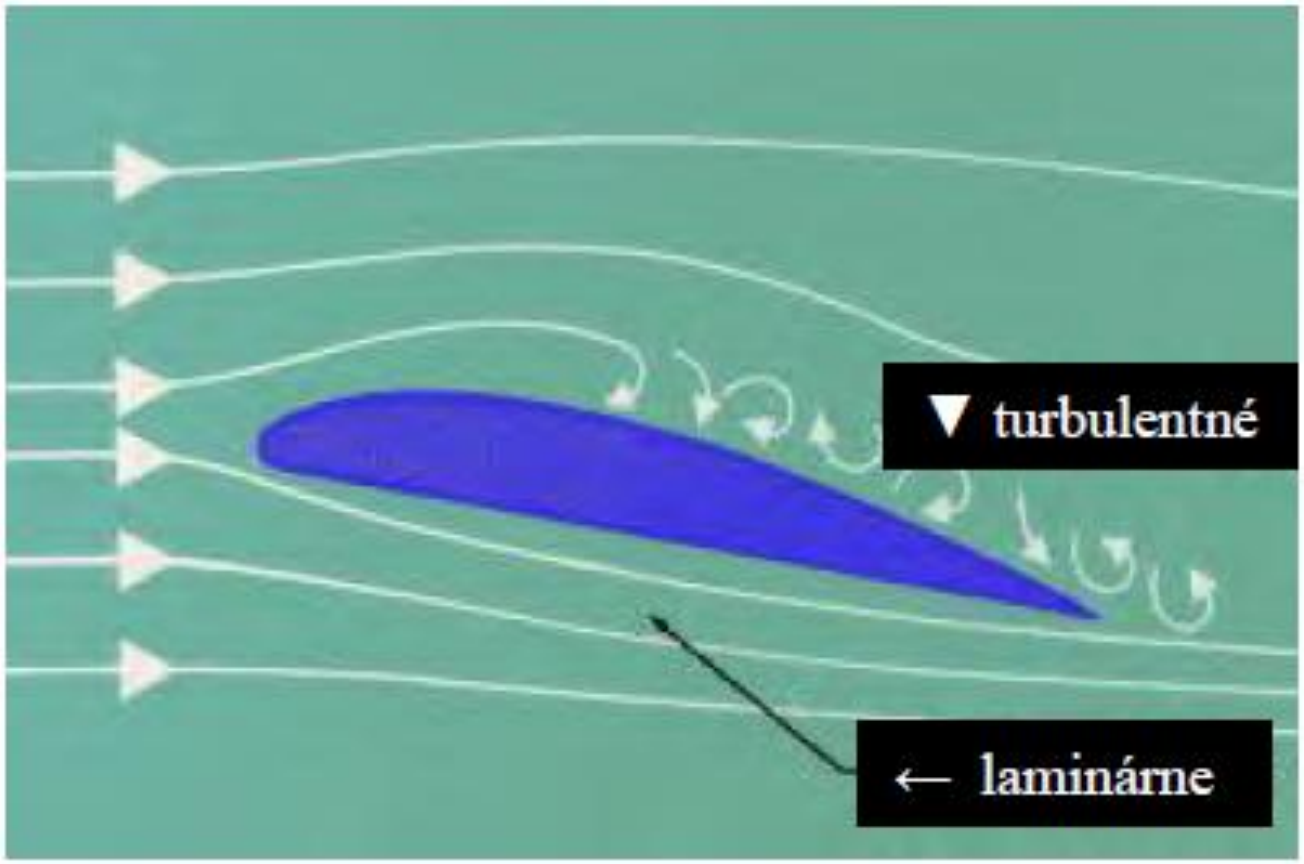
Turbulencia za prekážkou spôsobuje spomalenie prúdenia a následne sedimentáciu transportovaného materiálu.

kvapaliny – prúdenie

Prúdenie plynov a kvapalín:

Turbulentné prúdenie – môže byť vyvolané aj lokálne, a to prekážkami (napríklad pri krídle lietadla).

obtekanie profilu krídla



kvapaliny – prúdenie

Prúdenie reálnej kvapaliny:

tzv. Navier-Stokesova rovnica:

Veľmi zložitá nelineárna diferenciálna rovnica, ktorej analytické riešenie (zatiaľ) neexistuje,

(je možné ju riešiť iba približne – numericky).

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\varrho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}$$

Ústav Clay Mathematical Institute (USA) vypísal v máji 2000 cenu ***1 milión dolárov*** za takýto dôkaz (pochopiteľne po schválení komisiou odborníkov).

Je to výzva pre všetkých záujemcov.

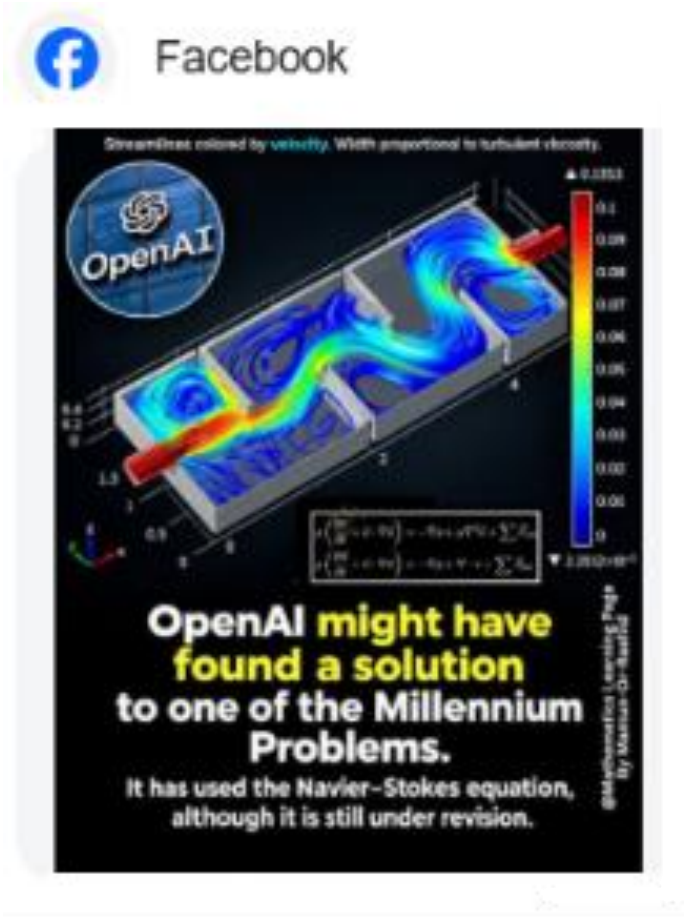
Navier-Stokesova rovnica: jej riešenie patrí do zoznamu doteraz nevyriešených celosvetových mat-fyz. problémov (tzv. Millenium Problems).



záber
z filmu
“Veľký dar”

Millennium Problems:
Yang–Mills and Mass Gap
Riemann Hypothesis
Poincaré Conjecture
P vs NP Problem
Navier–Stokes Equation
Hodge Conjecture
Birch and Swinnerton-Dyer Conjecture

Navier-Stokesova rovnica: jej riešenie patrí do zoznamu doteraz nevyriešených celosvetových mat-fyz. problémov (tzv. Millenium Problems).



Počas ostatných týždňov sa diskutuje zaujímavé riešenie, ktoré dosiahli vo firme OpenAI – riešenie Navier-Stokesovej rovnice...

Systém využil zhruba 10 000 koordinovaných AI agentov bežiacich na internom modeli, ktoré vygenerovali milióny správ a miliardy tokenov počas približne 88 hodín. Odborníci teraz budú musieť dôkaz podrobne preskúmať.