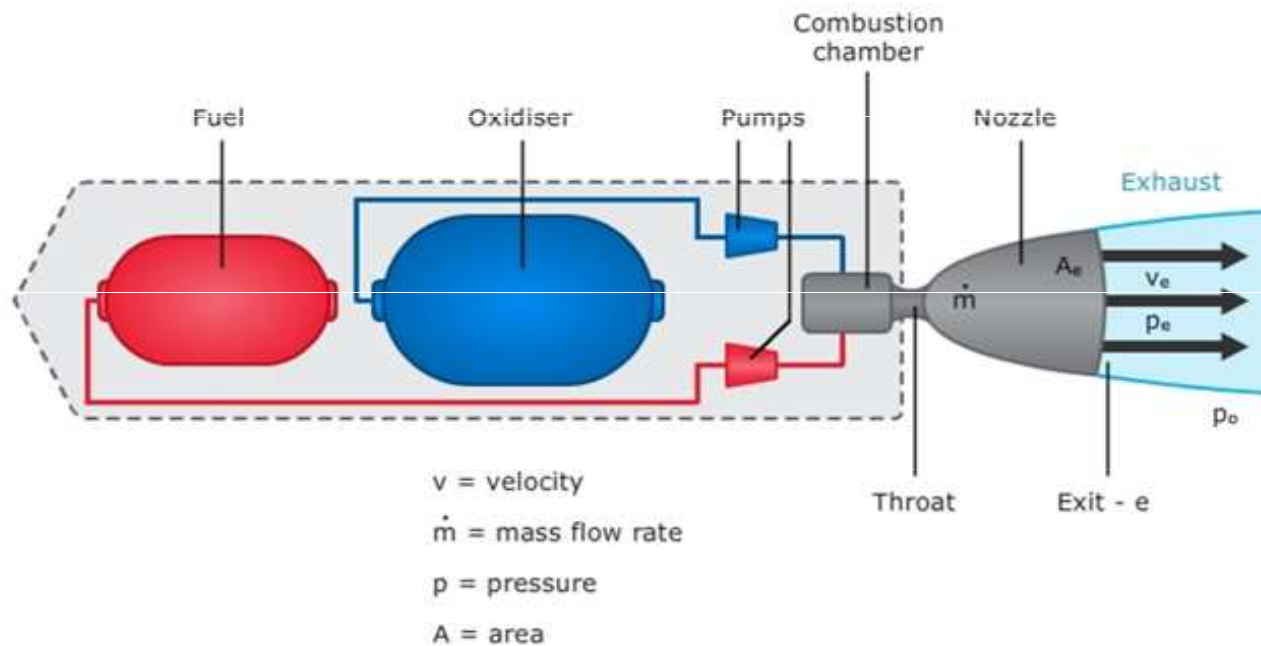


Raketa

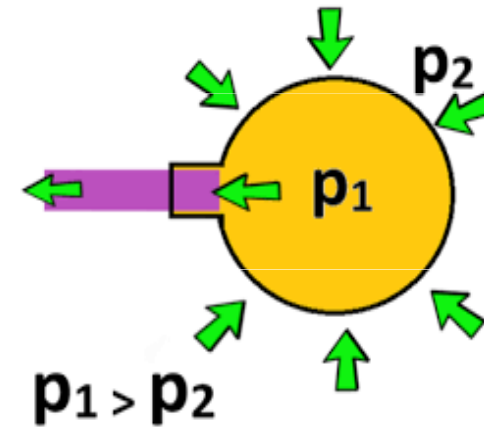
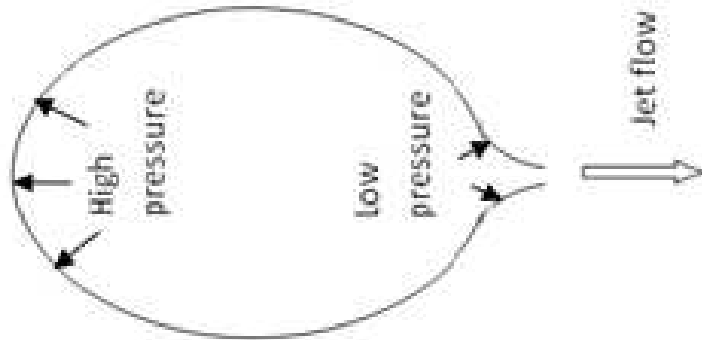
Raketa je létající stroj, který se pohybuje pouze na principu akce a reakce. Nejjednodušší konstrukcí rakety je např. komora naplněná stlačeným plynem. Malý otvor dovoluje plynu unikat a vzniká síla táhnoucí raketu opačným směrem.



$$\text{Thrust} = F = \dot{m} v_e + (p_e - p_o) A_e$$



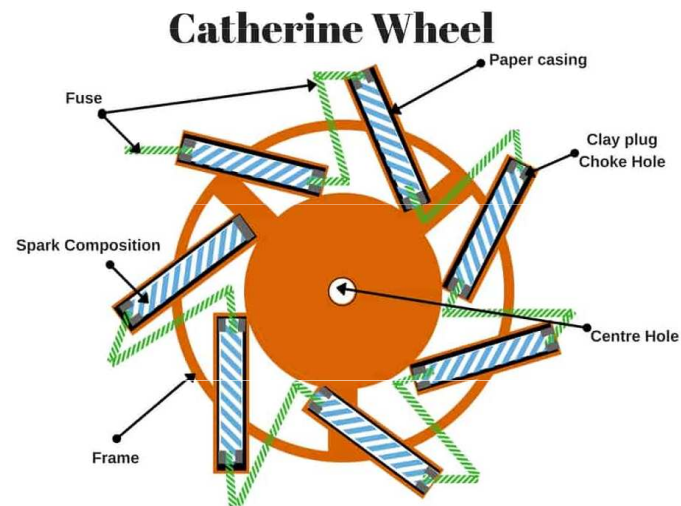
Vzduch uvnitř **balónku** je tlačěn gumovými stěnami. Vzduch reaguje opačnou silou, takže síly se tak vyrovnávají. Pokud se uvolní výpusť balónku, vzduch jím uniká a balónek se pohybuje opačným směrem.



Aeolipile (Heronova koule) funguje na principu reaktivního parního motoru.

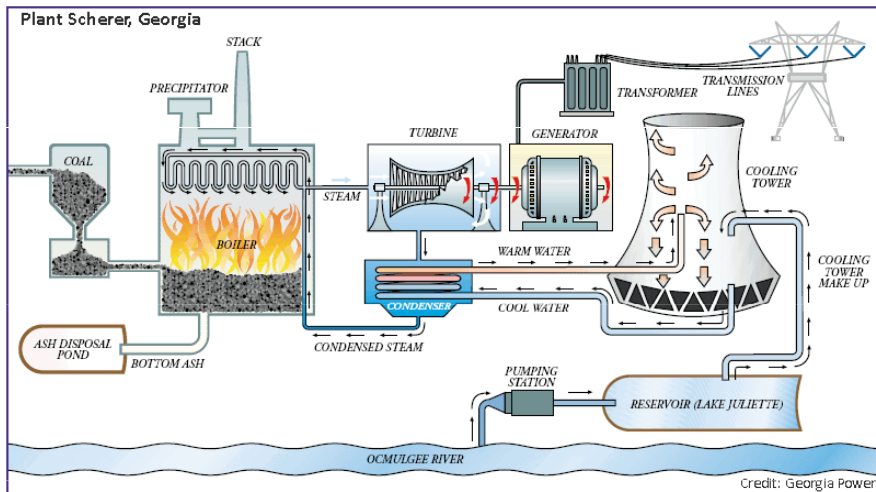


Catherine wheel (pinwheel) je druh pyrotechniky.



Parní turbína

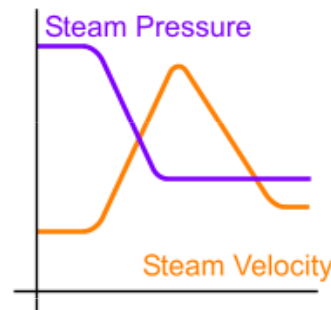
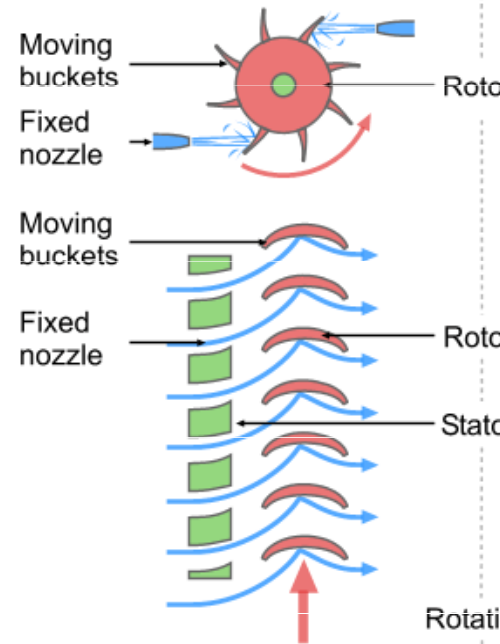
Parní turbína je turbína, točivý tepelný stroj, který převádí tlakovou a kinetickou energii páry, přicházející z generátoru páry, tj. parního kotle, na energii mechanického rotačního pohybu hřídele, osy stroje.



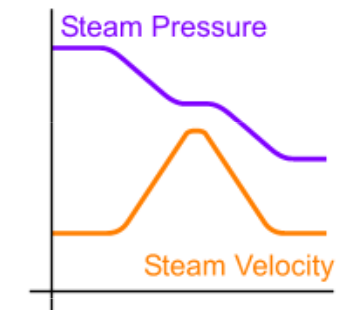
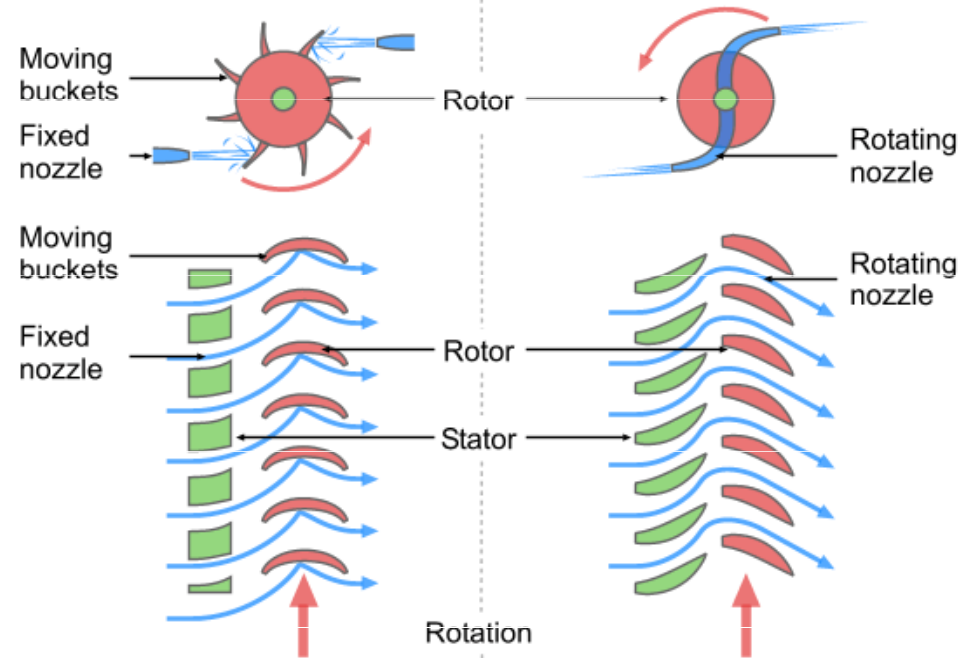
Použití:

v energetice pro pohon alternátoru tepelných elektráren (uhelných nebo jaderných) a jako lodní pohon (parník, bitevní loď, jaderná ponorka).

Impulse Turbine

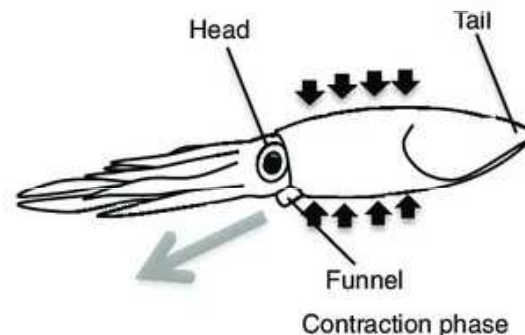
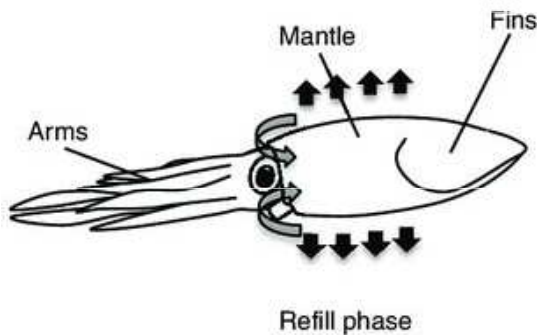
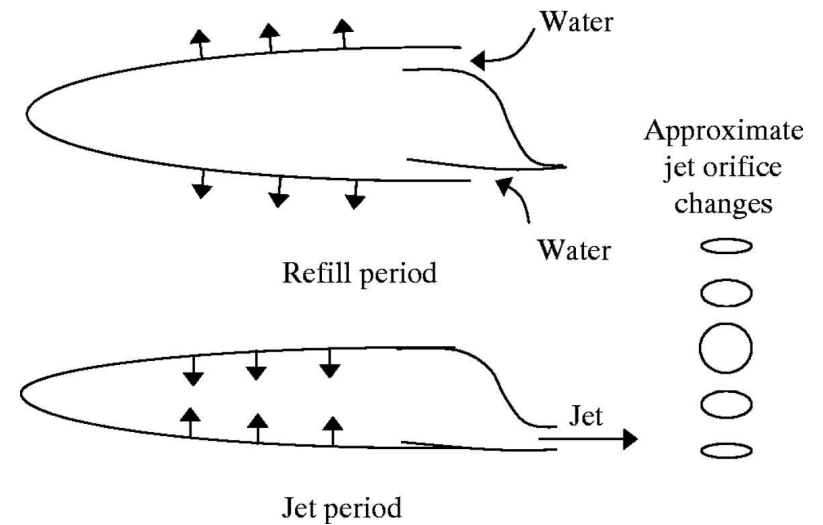
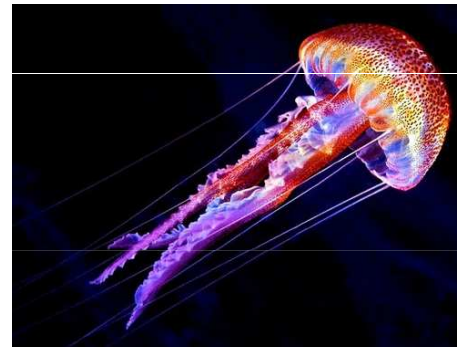
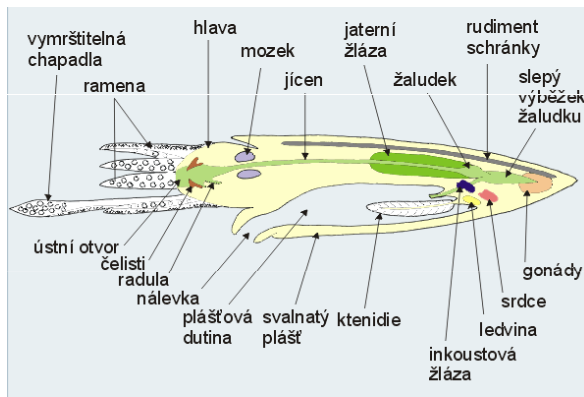
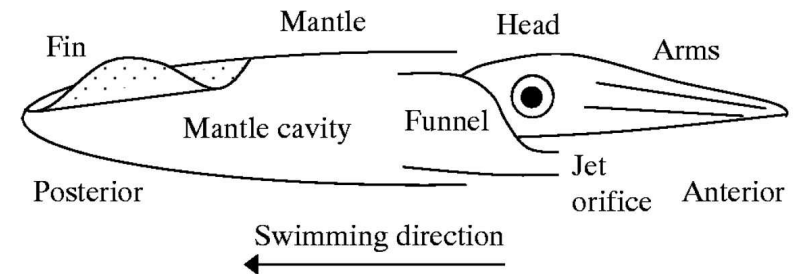
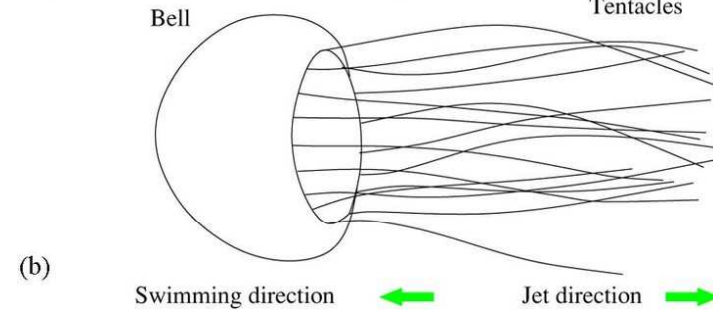
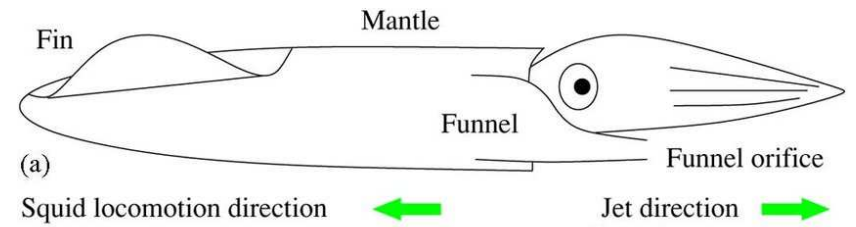
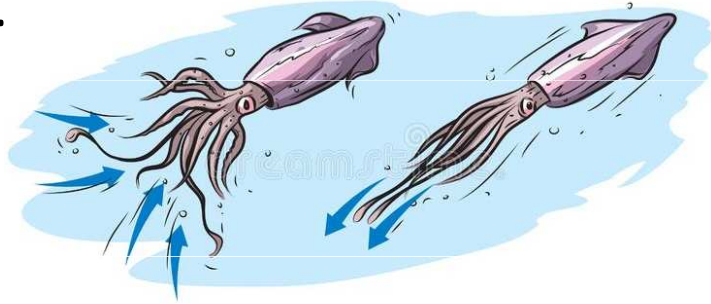


Reaction Turbine



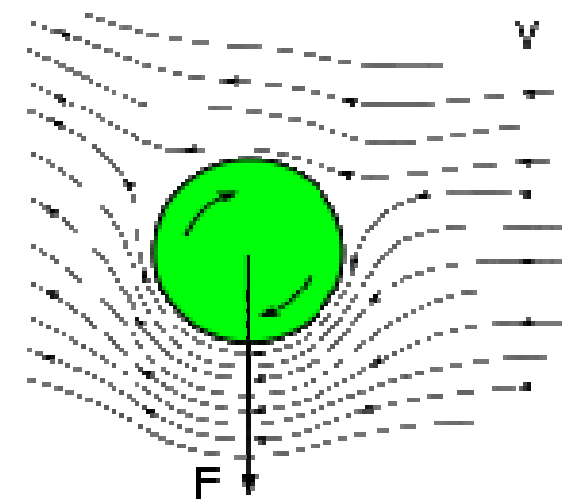
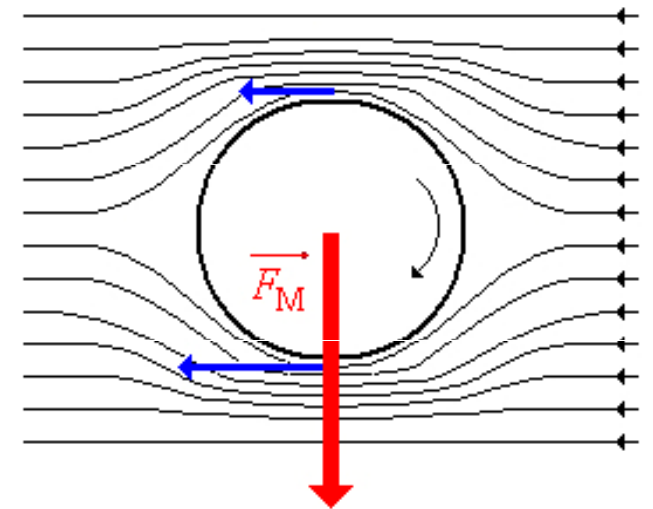
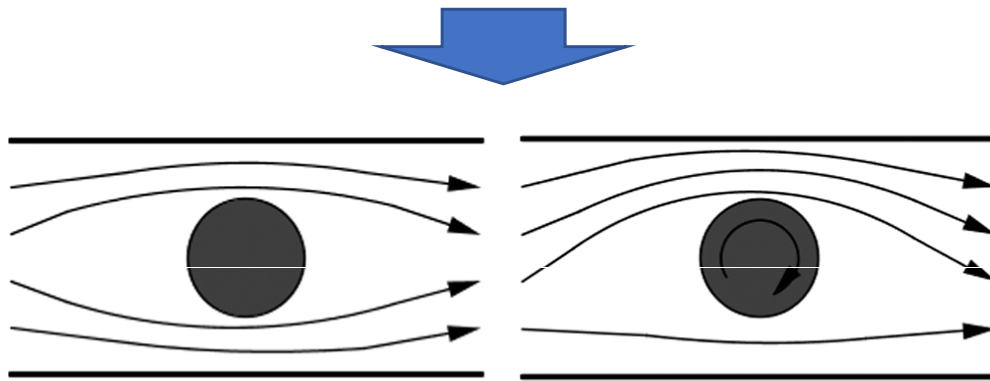
Pohyb medúz a hlavonožců

Reaktivní pohyb: plášťová dutina uvnitř těla se stáhne a dojde k vystříknutí vody dopředu → tělo se pohybuje směrem dozadu.



Magnusův jev

Magnusův jev je vznik boční síly při obtékání rotujícího tělesa proudícím plynem nebo kapalinou. V důsledku vnitřního tření vzniká mezi pohybujícím se tělesem a proudící tekutinou tzv. **mezní vrstva**. Ta těleso na jedné straně (horní) urychluje, na druhé (spodní) je naopak brzdí. V místě, kde obtéká tekutina těleso vyšší rychlostí, vzniká (ve shodě s Bernoulliho rovnicí) podtlak vzhledem k místu, kde je velikost rychlostí obtékající tekutiny menší.



Velikost síly vytvořené válcem poloměru r jednotkové délky, rotujícím rychlostí ω v proudu tekutiny o hustotě ρ pohybujícím se rychlostí v je určena vztahem

$$F = 2\pi\rho v\omega r^2$$

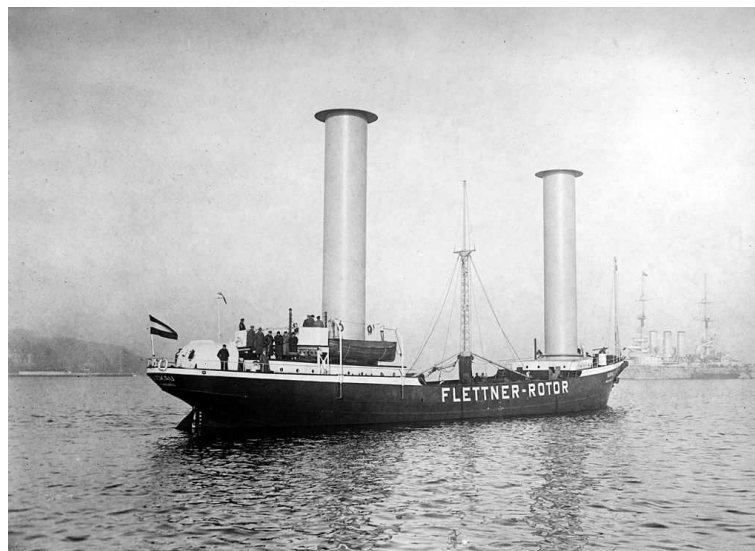
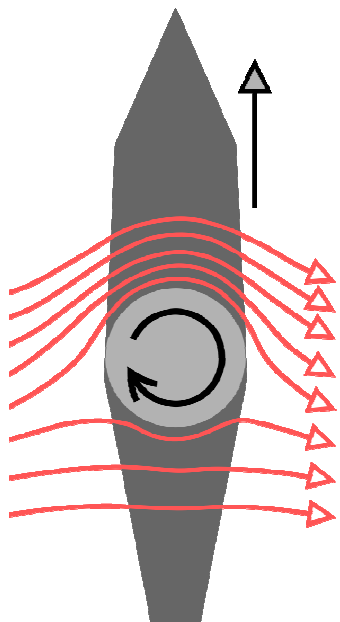
Síla působí kolmo na směr rychlosti v .

Jev je významný zvláště ve vnější balistice.

Flettnerův rotor

Flettnerův rotor je rotující válec využívající Magnusův jev. Magnusův jev spočívá v rozdílném tlaku proudícího plynu na protilehlých stranách rotujícího tělesa. Boční vítr, který obtéká rotující Flettnerovy válce, vytváří při správném směru otáčení podtlak na přední straně válce, díky čemuž se loď pohybuje dopředu.

Výhodou tudíž má být jednoduchost ovládání oproti plachtám, a zároveň využití menších motorů k rotaci válců, než by bylo třeba k samotnému pohonu lodi lodním šroubem.



Stokesův zákon a sedimentace

Při sedimentaci je částice vystavena působení **tíhové síly**

$$F_g = m \cdot g = V \cdot \rho_p \cdot g$$

kde m = hmotnost částice, ρ_p = hustota částice

a **vztlakové síly** podle Archimédova zákona

$$F_{vz} = V \cdot \rho_r \cdot g$$

kde ρ_r = hustota kapaliny

Když je hustota částice větší, než hustota kapaliny, částice začne klesat.

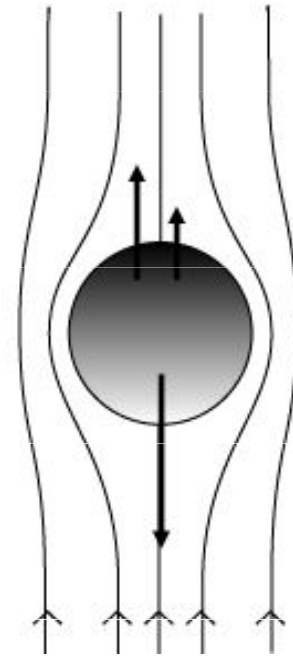
Proti jejímu pohybu působí **odporová síla**, daná **Stokesovým vztahem**:

$$F_o = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

kde r = poloměr částice, η = dynamická viskozita prostředí, v = rychlost částice.

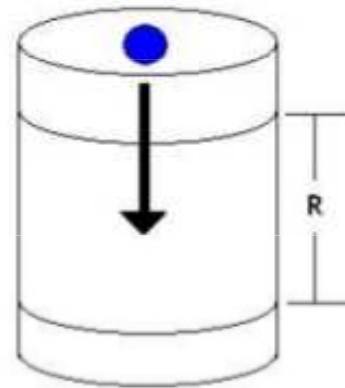
Odtud pro **rychlost sedimentace**:

$$v = \frac{2(\rho_p - \rho_r)r^2g}{9\eta}$$



Höpplerův kuličkový viskozimetr

Viskozimetr s kalibrovanou kuličkou padající ve skleněném temperovaném válci mezi dvěma ryskami. Měří se pádová doba ve skleněném temperovaném válci, který je odkloněn o 10° od vertikálního směru. Viskozimetr může být použit jen pro průhledné newtonské kapaliny.



$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 \cdot g \cdot (\rho_k - \rho)}{u}$$

$$\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} = \frac{u_{\text{ref}}}{u} \cdot \frac{(\rho_k - \rho)}{(\rho_k - \rho_{\text{ref}})} = \frac{\tau}{\tau'} \cdot \frac{(\rho_k - \rho)}{(\rho_k - \rho_{\text{ref}})}$$

ρ_k je hustota kuličky, ρ a ρ_{ref} hustoty měřené a srovnávací kapaliny, u a u_{ref} rychlosti pádu kuličky, τ a τ_{ref} doby průchodu kuličky mezi dvěma ryskami A a B, je-li trubice naplněna měřenou a standardní kapalinou.

Odpor prostředí

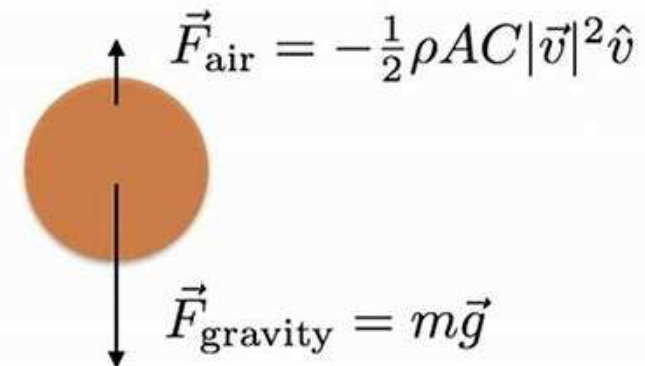
Odpor prostředí je soubor všech sil, kterými plyn nebo kapalina působí proti pohybu těles v něm. Odpor je způsoben třením, které vzniká při kontaktu tělesa a prostředí. Protože pohyb je relativní, je jedno, zda se těleso pohybuje v nehybném plynu či kapalině, nebo jestli je těleso v klidu a kolem něj proudí plyn nebo kapalina (obtékání těles). Rozhodující je **relativní rychlost** mezi tělesem a tekutinou.

Odporová síla působí vždy proti směru relativního pohybu, tzn. těleso pohybující se v nehybné tekutině je zpomalováno, zatímco nehybné těleso v pohybující se tekutině je tekutinou urychlováno. Při nízkých rychlostech je odporová síla relativně malá a je považována za přímo úměrnou rychlosti pohybu. Při vyšších rychlostech však odporová síla vzrůstá s druhou mocninou rychlosti. Velikost odporové síly vyjádřit tzv. **Newtonovým zákonem odporu**

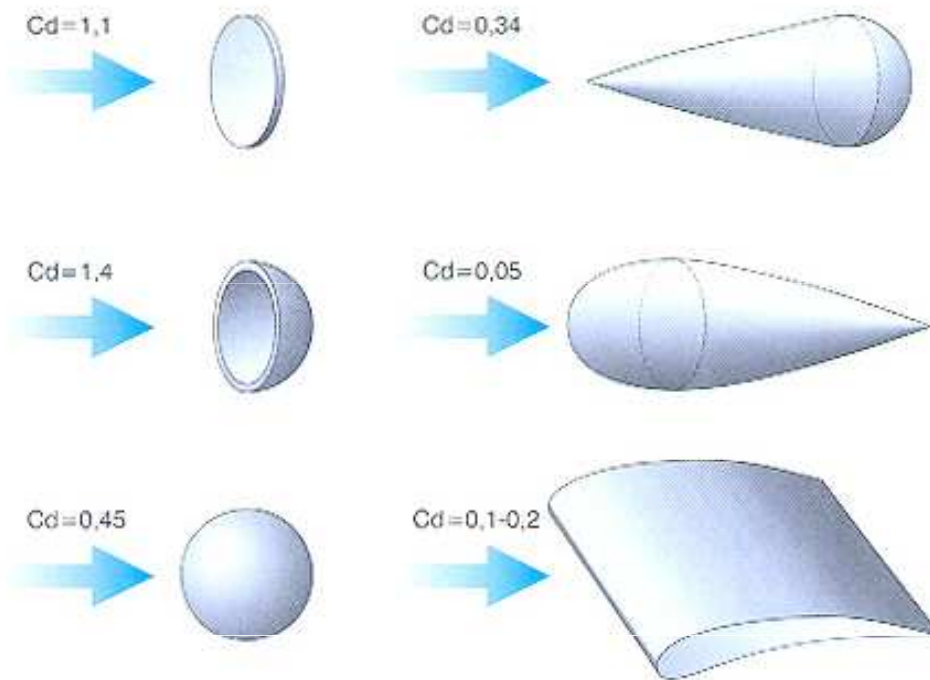
$$F = \frac{1}{2} C_x S \rho v^2$$

kde S je velikost čelní plochy v průřezu, ρ je hustotě okolního prostředí, v je rychlost tělesa.

K zobecněnému popisu tvaru tělesa slouží tzv. *součinitel odporu* C_x , zohledňující tvar a kvalitu povrchu tělesa.



Součinitel odporu C_x se v zahraniční literatuře se také označuje jako **drag coefficient** C_d .

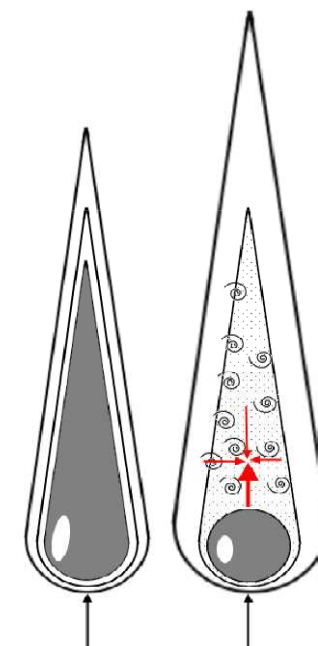
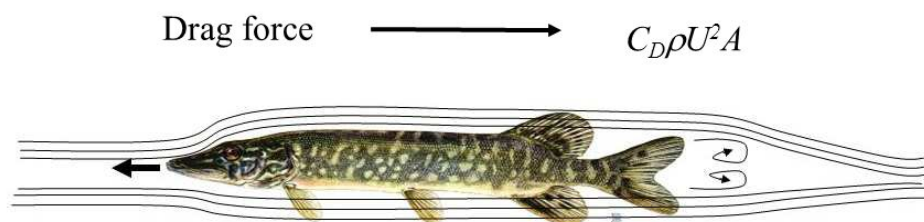


Příklad

Koule při pohybu rozráží okolní vzduch, ale za ní zůstává prostor s nižším tlakem, který se snaží kapalina (plyn) vyplnit ze všech směrů, kde se nachází vyšší tlak.

Tento podtlak (přetlak okolí) ale působí i na kouli a nasává (tlačí) jí zpět do kapsy podtlaku za ní - dramaticky ji zpomaluje.

Těleso kapkovitého tvaru však místo, kde by se vytvořil prostor s nižším tlakem, vyplní vlastním tvarem (tělem) a tím nedochází k jeho brždění - tahu zpět - (záleží také na dokonalosti tvaru a rychlosti pohybu tělesa plynem)



Příklad

Jaký poloměr má skleněná kulička ($\rho_s = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$), pokud padá ve vodě ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) konstantní rychlostí $v = 2 \text{ m.s}^{-1}$. $C = 0,48$

$$\rho_s = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$v = 2 \text{ m.s}^{-1}$$

$$C = 0,48$$

$$F_g = F$$

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C \cdot S \cdot \rho \cdot v^2$$

$$V \cdot \rho_s \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot v^2$$

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_s \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad | : \pi \cdot r^2$$

$$\frac{4}{3} \cdot r \cdot \rho_s \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot v^2$$

$$8 \cdot r \cdot \rho_s \cdot g = 3 \cdot C \cdot \rho \cdot v^2$$

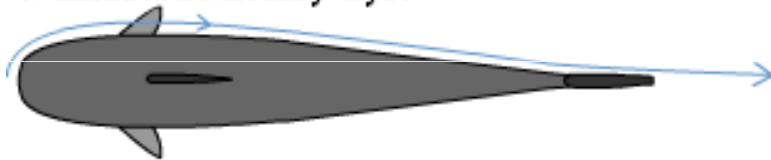
$$r = \frac{3 \cdot C \cdot \rho \cdot v^2}{8 \cdot \rho_s \cdot g}$$

$$r = \frac{3 \cdot 0,48 \cdot 1000 \text{ kg.m}^{-3} \cdot (2 \text{ m.s}^{-1})^2}{8 \cdot 2500 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 10 \text{ m.s}^{-2}} = 0,0288 \text{ m} = 2,88 \text{ cm}$$

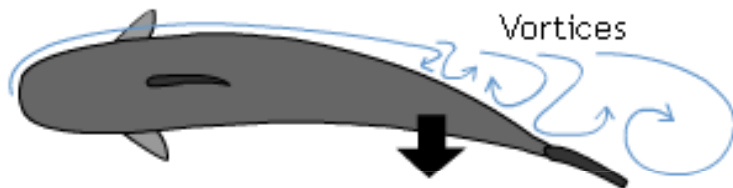
$$r = 2,88 \text{ cm}$$

Kůže **žraloků** není hladká, ale má rýhy ve směru proudění – to způsobuje zmenšení proudového odporu.

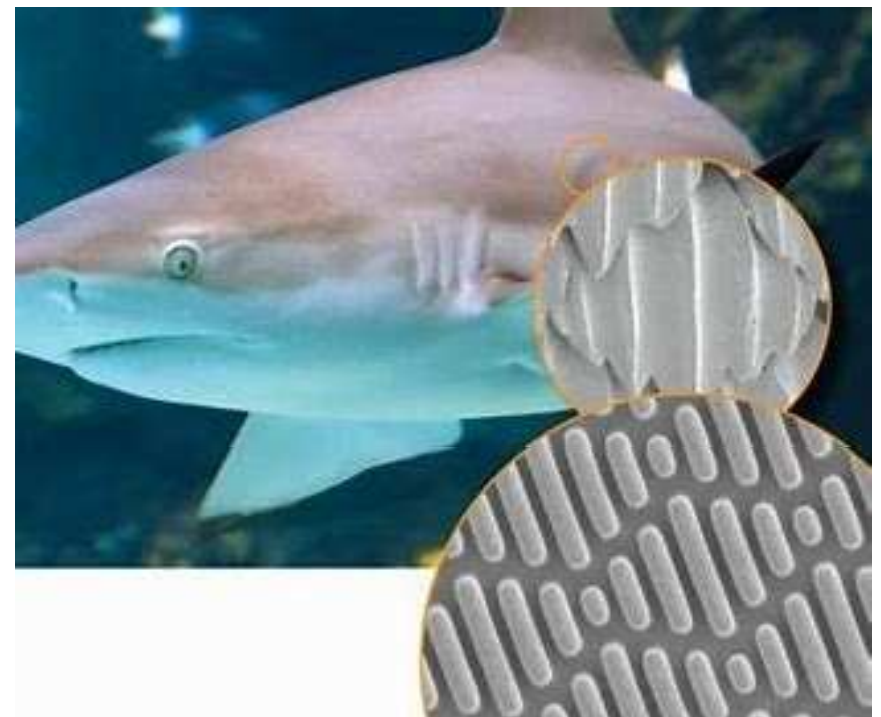
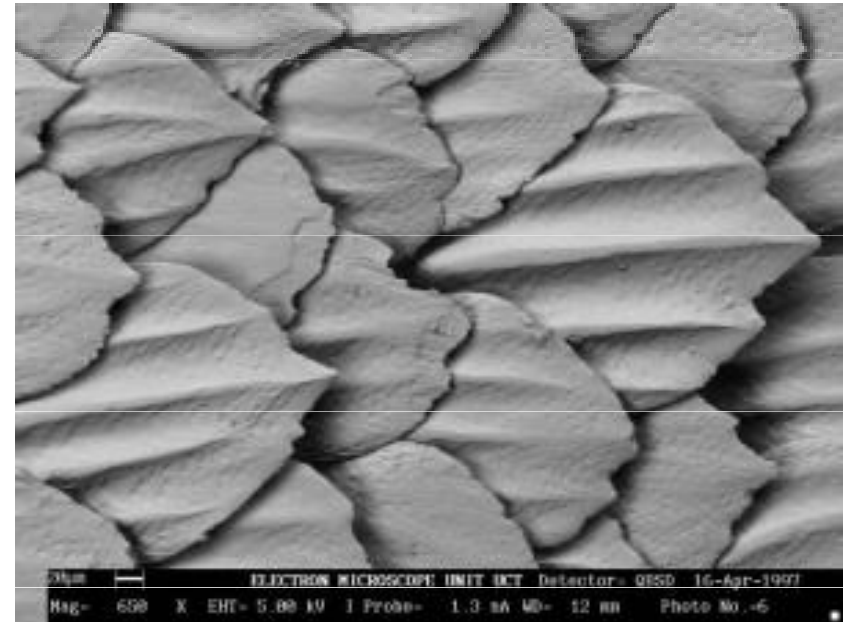
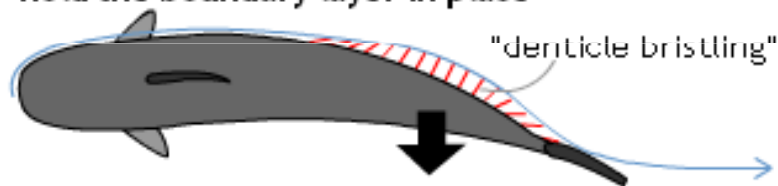
1: Lamina boundary layer



2: Boundary layer separation as shark flexes

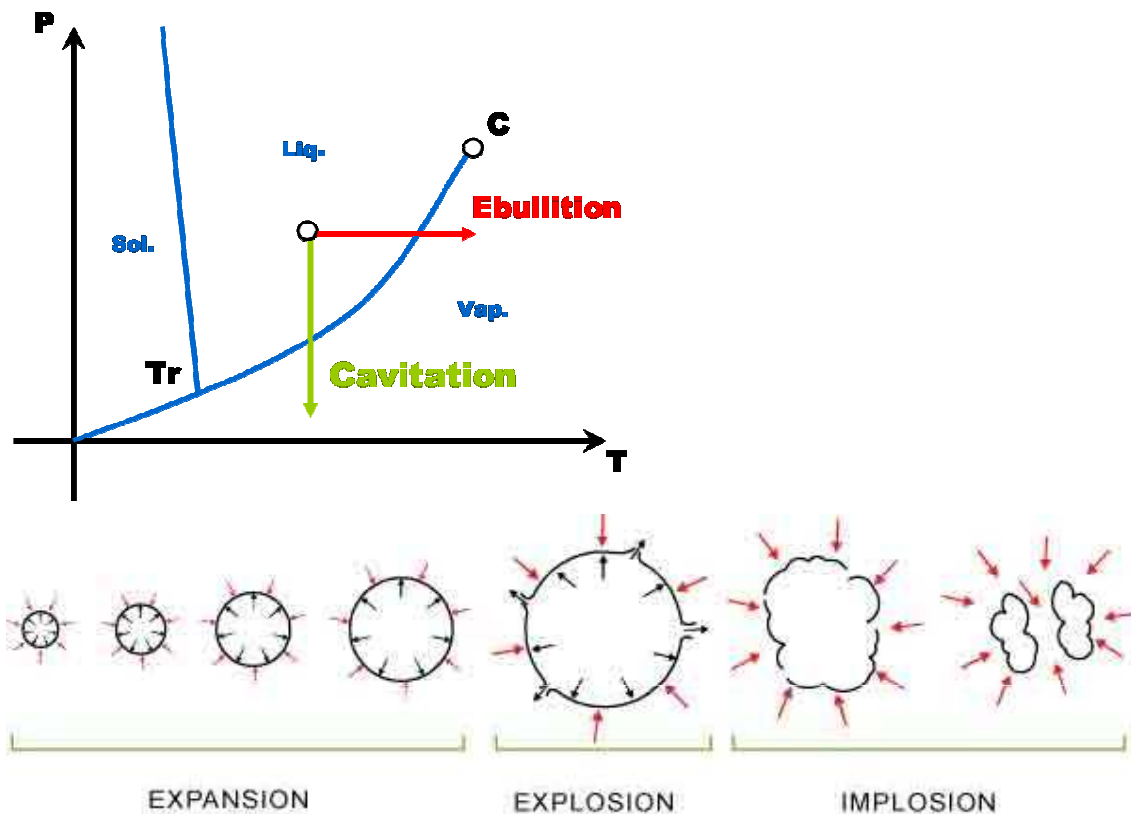


3: Denticles lift off the skin like flaps to 'hold' the boundary layer in place



Kavitace

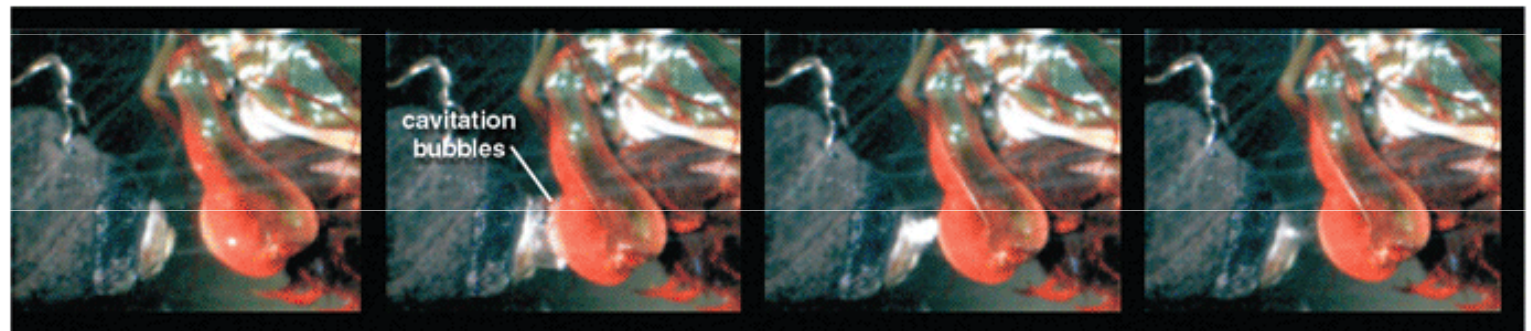
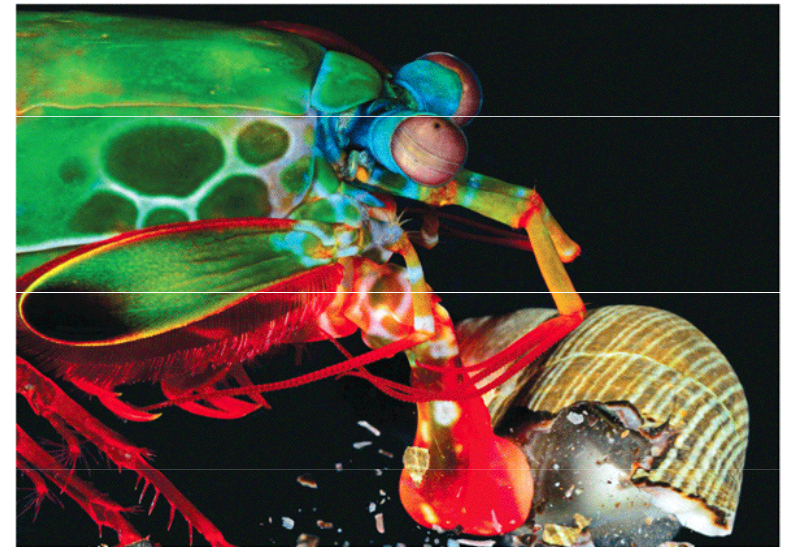
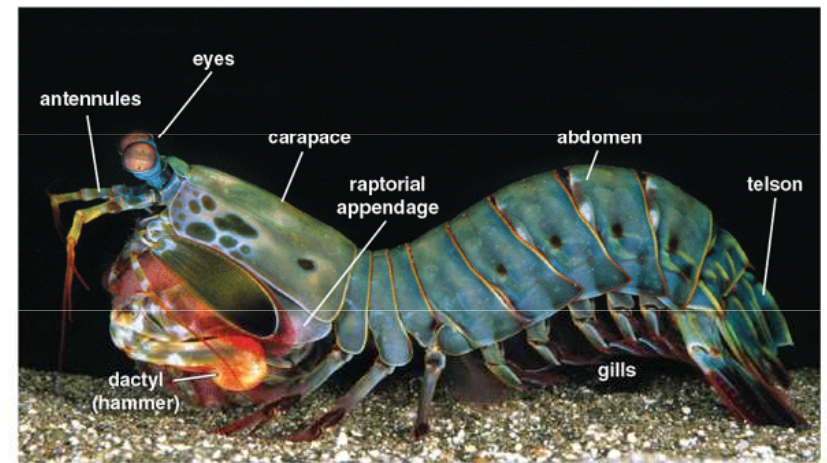
Kavitace je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál.



Strašek paví (*Odontodactylus scyllarus*) je velký korýš obývající oblast Tichého a Indického oceánu od ostrova Guam až po východní pobřeží Afriky, kde vyhledává písčité či bahnité dno. Jde o denního i nočního dravce dorůstajícího 3 - 18 cm.

Kladivovitý útvar v dolní části hlavy dokáže vyvinout velké zrychlení (cca $100\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) a dosáhnout rychlosti přes $31\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V okamžiku provede až 100 úderů, kterými rozbije schránky měkkýšů.

Straškové jsou poměrně agresivní, dokážou usmrtit i podstatně větší živočichy a nebo rozbít stěnu akvária.



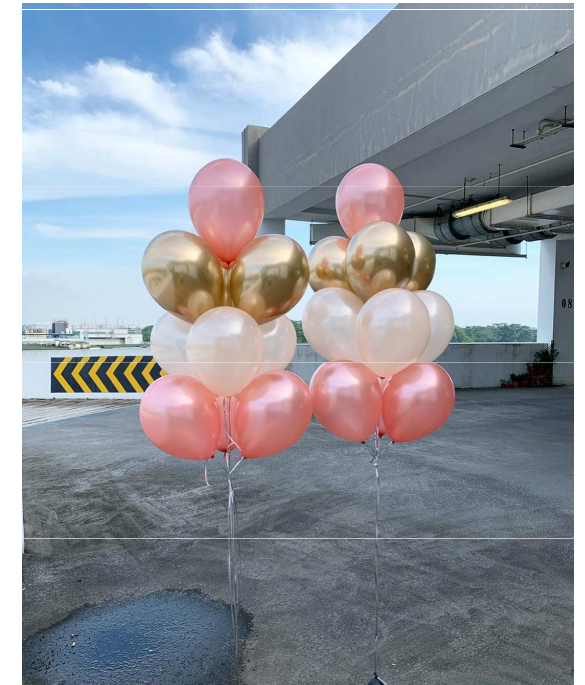
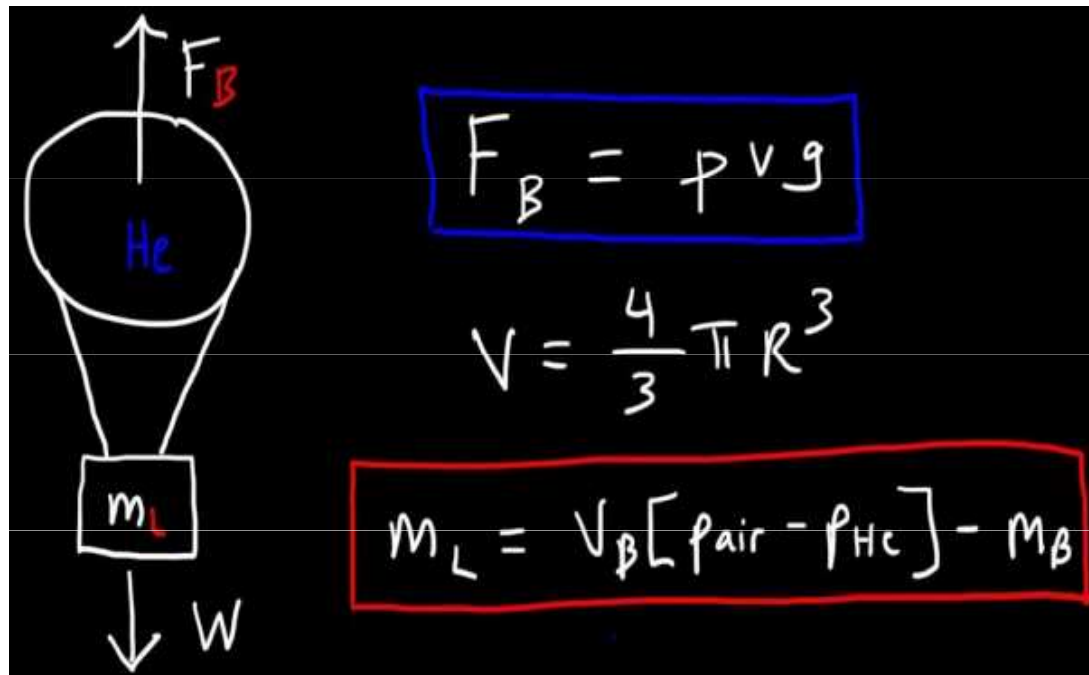
Aerostatická vztlaková síla

= obdoba hydrostatické vztlakové síly v plynech.

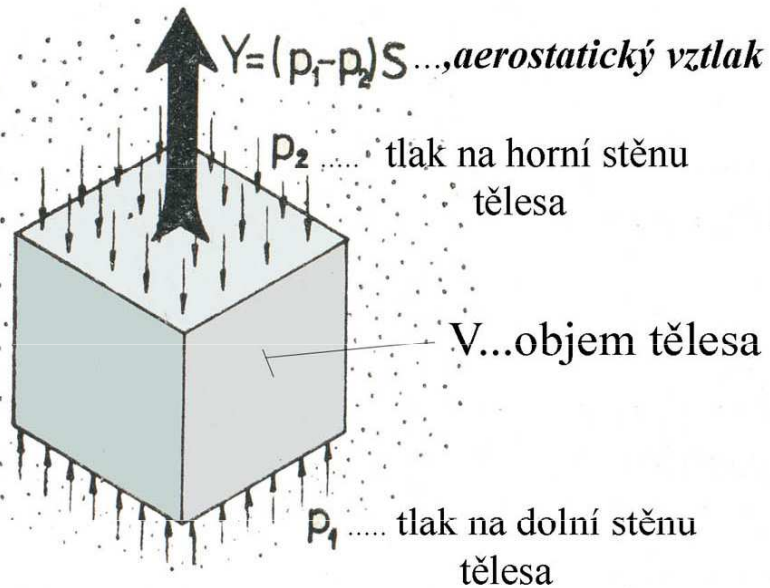
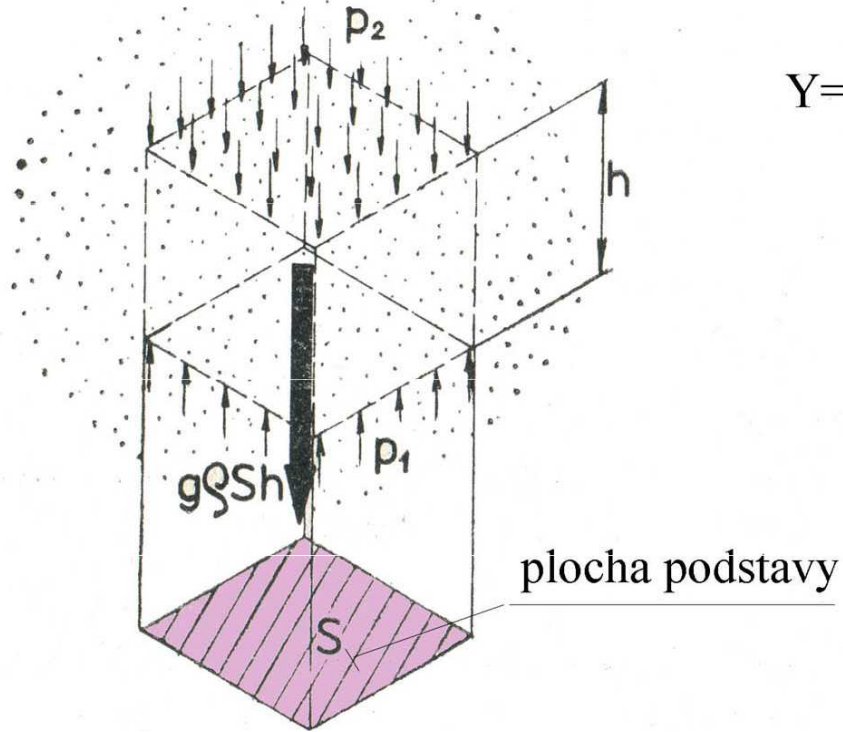
Platí Archimedův zákon.

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

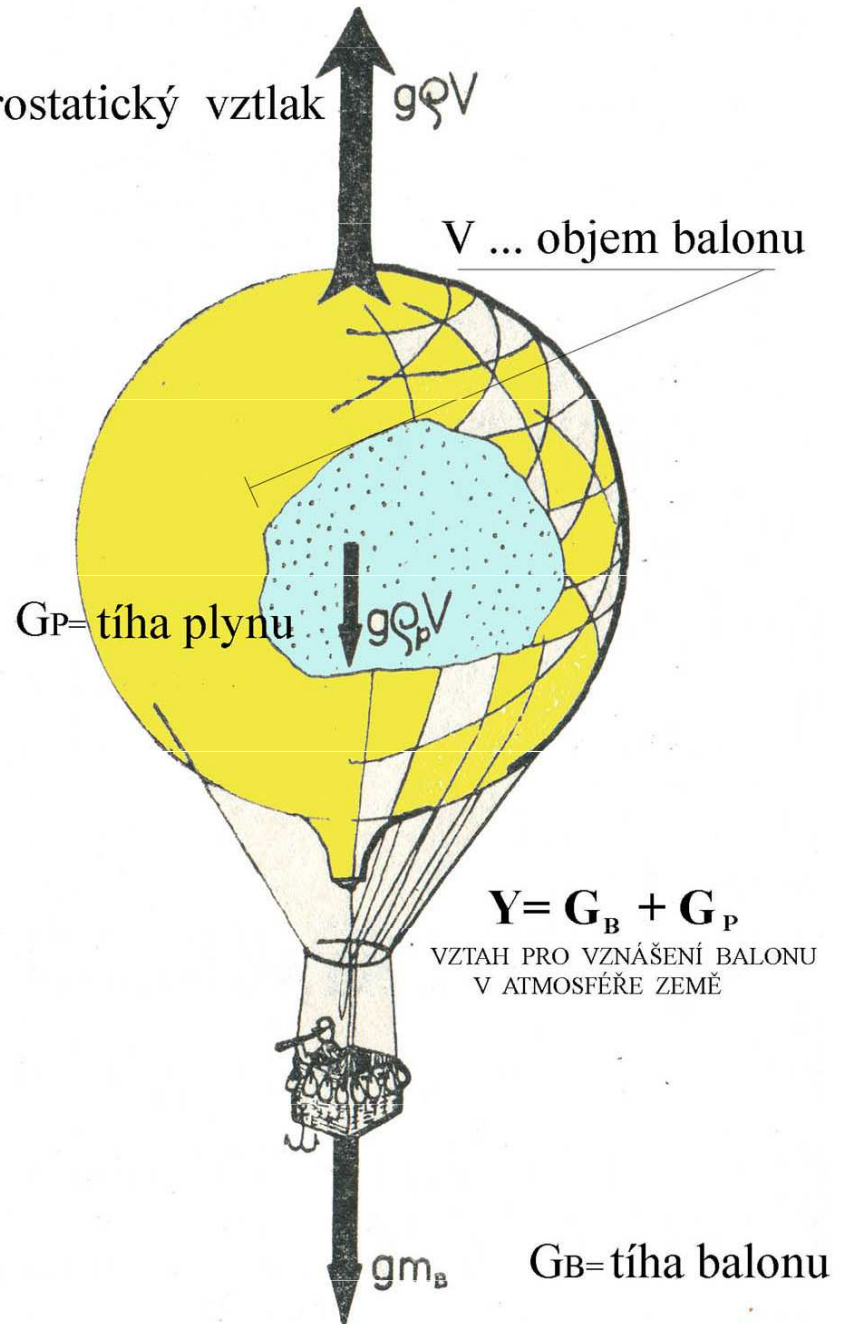
Na tomto principu létají stroje lehčí než vzduch (tzv. aerostaty), např. balony či vzducholodě.



Archimedův zákon pro tělesa ponořená do tekutiny

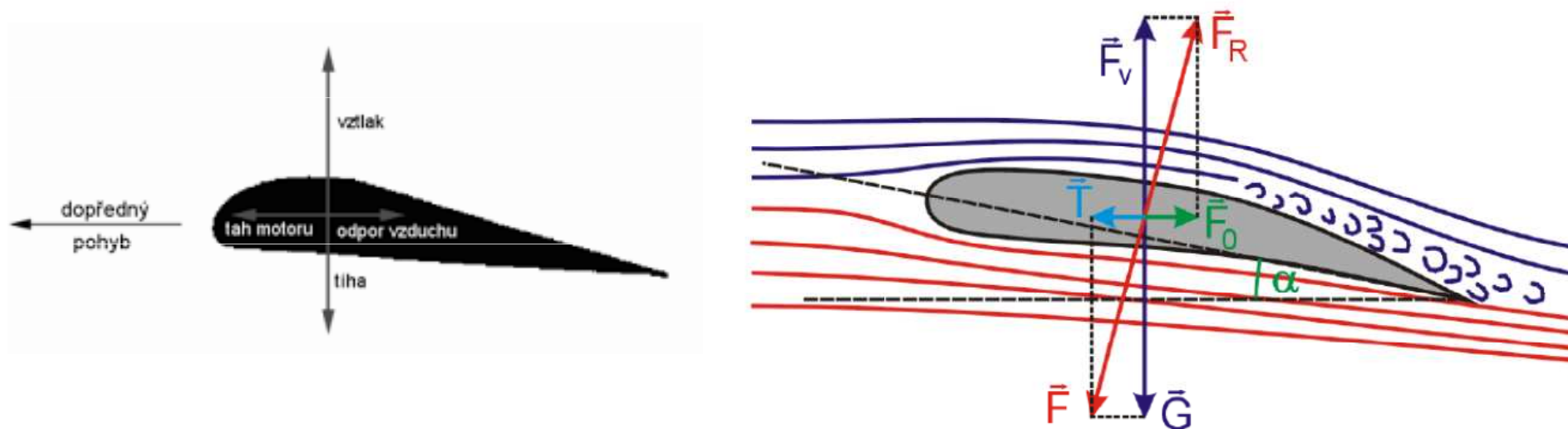


$Y = \text{aerostatický vztlak}$ $g\rho V$

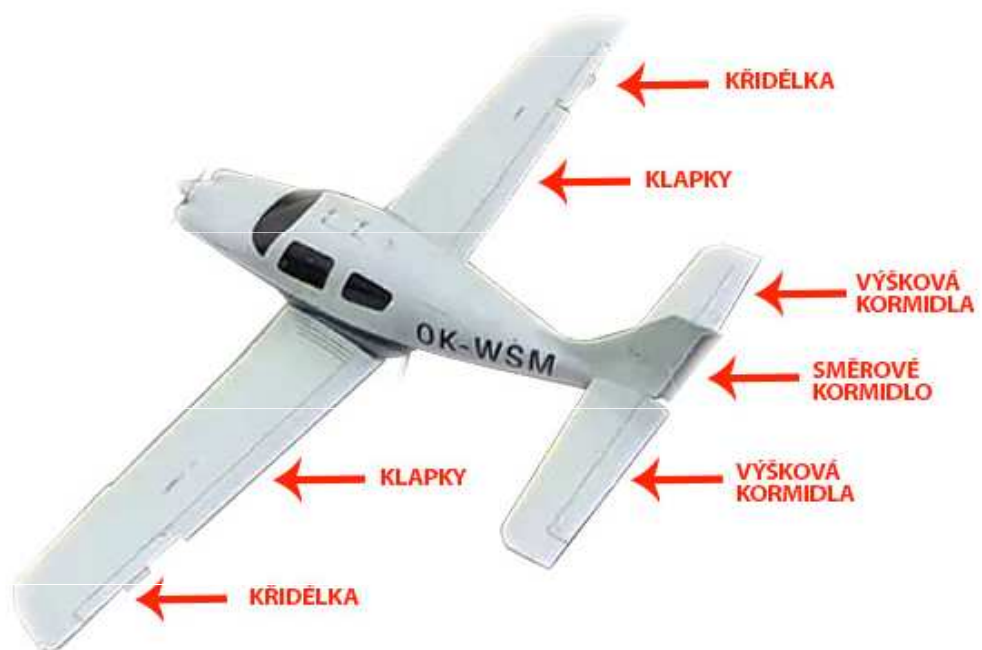


Aerodynamická síla

Aerodynamická síla je výslednice aerodynamických sil vznikajících při obtékání tělesa vzduchem.



Kromě **vztlakové síly F_v** , která působí proti **tíhové síle G** a udržuje letící těleso ve vzduchu. **Celková reakční síla F_R působící na křídlo** je při rovnoměrném letu kompenzována **výslednicí F tíhy letadla G a tažné síly T motoru přenesené na křídlo** (proti ní působí **odporová síla F_0 prostředí**). **Vztlaková síla F_v závisí na tvaru křídla** a též na **úhlu náběhu α** , který je znázorněn na předchozím obrázku. **Vztlaková síla je kladná (míří vzhůru)** od mírně záporných hodnot úhlu α a svého maxima dosahuje v okolí $\alpha = 15^\circ$.



Termika

Teplota

Teplota je charakteristika tepelného stavu hmoty. V obecném významu je to vlastnost předmětů a okolí, kterou je člověk schopen vnímat a přiřadit jí pocity studeného, teplého či horkého. Postupně bylo pozorováno, že zvýšení teploty působí změnu rozměrů, tvaru nebo skupenství předmětů.

V přírodních a technických vědách a jejich aplikacích je **teplota** skalární intenzivní stavová veličina, která je vzhledem ke svému pravděpodobnostnímu charakteru vhodná k popisu stavu ustálených makroskopických systémů. Teplota souvisí s vnitřní energií systému. Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K; $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout.

Teplota je základní fyzikální veličinou soustavy SI s plným názvem termodynamická teplota, jednotkou **kelvin** (K) a vedlejší jednotkou **stupeň Celsia** ($^{\circ}\text{C}$). K měření teploty se používají teploměry.

Stupeň Celsia: teplotní rozdíl $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$, avšak Celsiova stupnice je posunutá: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpovídá přesně 273,15 K, což je přibližná teplota tání ledu, zatímco $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (373,15 K) je přibližná teplota varu vody (při tlaku 101,325 kPa = 1 atm).

Teplotní roztažnost

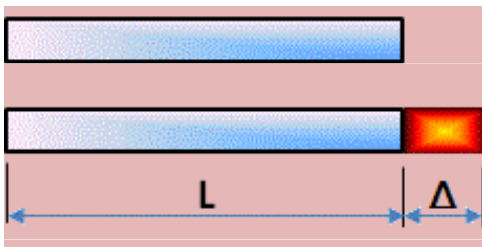
Fyzikální jev spočívající ve změně rozměrů tělesa při změně jeho teploty nazýváme **teplotní roztažnost**. Pokud látce dodáváme teplo, tak na molekulární úrovni tuto energii částice využijí k tomu, že mohou překonat vlivy přitažlivých sil a vzdálí se od sebe.

Výpočet změny délky

Pokud se zvýší teplota tělesa délky L_0 o teplotní rozdíl ΔT , tak délka L po změně teploty

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_K - T_S))$$

kde α je teplotní součinitel délkové roztažnosti, T_K je teplota na konci a T_S je teplota na začátku teplotní změny.



Látka	$\frac{\alpha}{10^{-6} \text{ K}^{-1}}$
ocel	12
hliník	23,8
mosaz (62 % Cu, 38 % Zn)	18
invar (64 % Fe, 36 % Ni)	2
sklo pro teploměry	8,3
sklo SIMAX	3,7
sklo křemenné	0,6

Teplotní roztažnost v praxi:

- průvės drátů elektrického vedení,
- konstrukce mostů,
- kolejnice,
- písty tepelných motorů,
- silnice - pružný asfalt mezi betonovými panely,
- pružná kolena v kovových horkých potrubích.

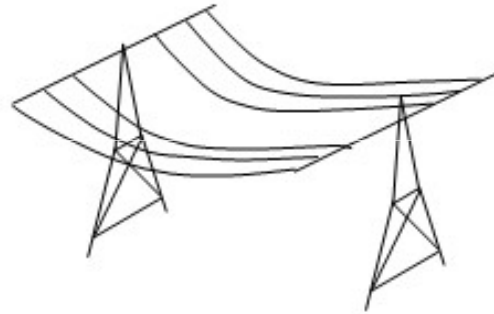
Eiffelova ocelová věž v Paříži (dostavěna roku 1889) má výšku 300 m (včetně antény na vrcholu 324 m), která může vlivem teplot kolísat až o 18 centimetrů.



Zdeformované kolejnice svědčí o extrémních teplotách okolního prostředí. Relativně běžné teplotní výkyvy kompenzuje **dilatační spára**. U železničních kolejnic se mezi každou 8 m kolejnicí nechává mezera 6 mm, zatímco např. mezi kolejnicemi tramvají nebývá (tramvajové kolejnice jsou pokládány do země, kde nejsou teplotní výkyvy tak značné).



U **telefonních nebo elektrických vedení** se mezi jednotlivými sloupy používá drát daleko delší než je vzdálenost sloupů. Vodiče jsou zejména v parném létě v důsledku tepelné délkové roztažnosti viditelněji **prověšeny** než v období mrazů.

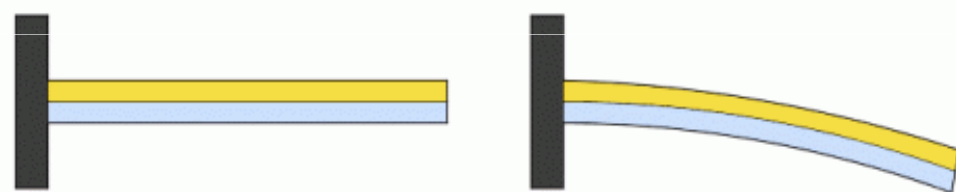


Pro nadzemní i podzemní **potrubí** je ochrana proti nadměrné teplotní dilataci řešena pomocí U-kompensátorů (dilatačních oblouků).

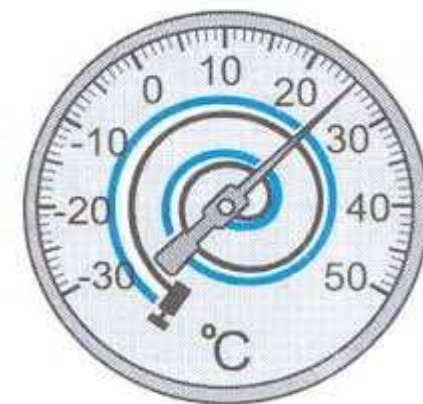


Bimetal

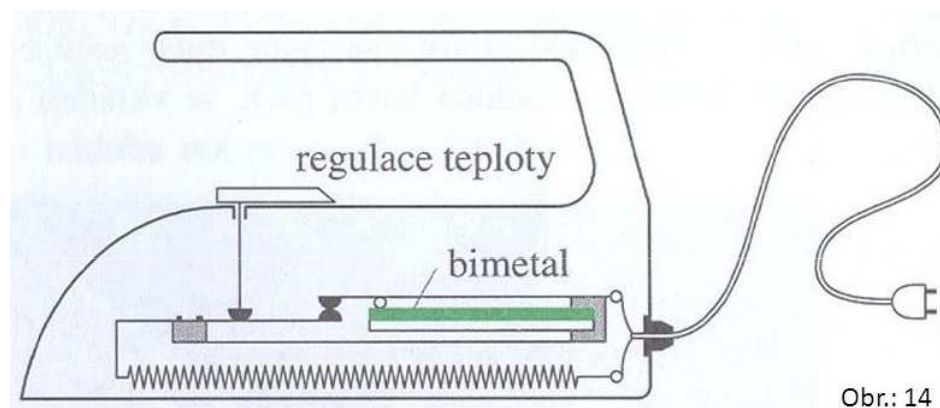
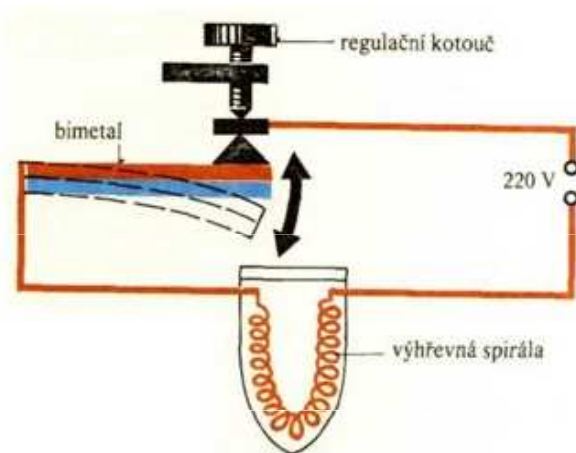
Snýtováním pásků z různých kovů a s různou teplotní délkovou roztažností získáme dvojkov čili **bimetal**. Vrstva kovu z materiálu s větší tepelnou roztažností se označuje jako **aktivní** a vrstva s menší tepelnou roztažností jako **pasivní**.



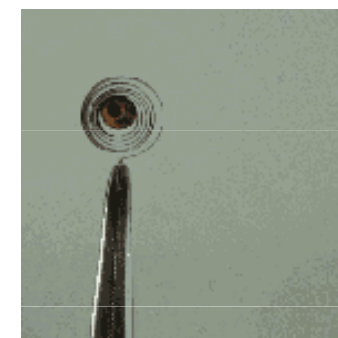
Bimetalový
teploměr



Setkáváme se s ním v regulátorech teploty, např. v žehličce. Zvýšením teploty se bimetal zkroučí a sepne, popř. rozezne kontakty.



Obr.: 14



Teplotní součinitele délkové roztažnosti

Látka	α 10^{-6} K^{-1}
ocel	12
hliník	23,8
mosaz (62 % Cu, 38 % Zn)	18
invar (64 % Fe, 36 % Ni)	2
sklo pro teploměry	8,3
sklo SIMAX	3,7
sklo křemenné	0,6

Coarse Aggregate/Rock Group	Coefficient of Expansion (1°C)
Chert or flint	12×10^{-6}
Quartzite	14×10^{-6}
Sandstone	12.5×10^{-6}
Marble	7×10^{-6}
Siliceous limestone	10.5×10^{-6}
Granite	10×10^{-6}
Dolerite	9.5×10^{-6}
Basalt	10×10^{-6}
Limestone	9×10^{-6}
Glacial gravel	13×10^{-6}
Sintered fly ash (coarse and fine)	7×10^{-6}
Sintered fly ash (coarse and natural aggregate fines)	9×10^{-6}

Material	Thermal Expansion Coefficient (α_l) in $\text{m}/\text{m}/^\circ\text{K}$
Aluminum	23.8×10^{-6}
Concrete	12.0×10^{-6}
Copper	17.6×10^{-6}
Brass	18.5×10^{-6}
Steel	12.0×10^{-6}
Timber	40.0×10^{-6}
Quartz Glass	0.50×10^{-6}
Quartz Glass	$40-200 \times 10^{-6}$
Polymeric Materials	23.8×10^{-6}
Acrylic	75.0×10^{-6}

Teplotní objemová roztažnost

Pokud přejdeme do trojrozměrného prostoru, tak i zde látky reagují na změnu teploty změnou svého objemu.

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) = L_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot (T_K - T_S))$$

kdy V je objem po teplotní změně, V_0 je počáteční objem tělesa a β je teplotní součinitel objemové roztažnosti. U pevného tělesa z izotropní látky platí: **$\beta \approx 3\alpha$** .

Objemová roztažnost je problém u cejkovaného laboratorního nádobí. To je zakázáno sušit v sušárně za vyšší teploty.



Změna hustoty v závislosti na teplotě

Vycházíme z toho, že při změně teploty se nemění hmotnost tělesa. Tím pádem součin objemu a hustoty musí zůstat zachován. Proto při kladném teplotním součiniteli objemové roztažnosti hustota látky klesá.

$$V_0 \cdot \rho_0 = V \cdot \rho \rightarrow V_0 \cdot \rho_0 = V_0 \cdot (1 + \beta \Delta T) \cdot \rho \rightarrow \rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \Delta T)}$$

Příklad

Potrubí teplovodu délky 200 m bylo svařované při teplotě 20 °C. O jakou délku se prodlouží, pokud v provozních podmínkách teplota naroste na 120 °C? Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro daný materiál je $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

$$l_0 = 200 \text{ m}$$

$$\Delta T = 100 \text{ K}$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$l = ?$$

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$l = l_0 + l_0 \alpha \Delta T$$

$$l - l_0 = l_0 \alpha \Delta T$$

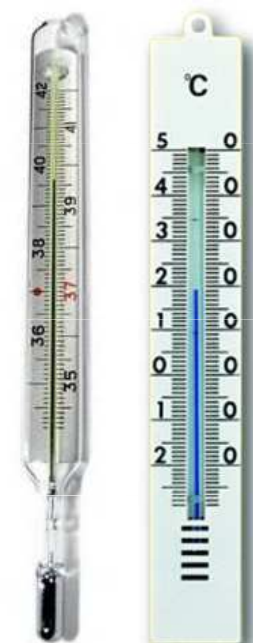
$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

$$\Delta l = 200 \text{ m} \cdot 0,000012 \text{ K}^{-1} \cdot 100 \text{ K} = 0,24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

$$\underline{\Delta l = 0,24 \text{ m}}$$

Dilatační teploměry

Dilatační teploměry jsou založeny na tepelné roztažnosti jednotlivých látek, kdy je objem měrné látky (rtuť, ethanol) závislý na její teplotě (změna rozměru je závislá na dodaném teple).



Příklad

Zásobník rtuti teploměru lze aproximovat válcem o výšce 1,5 cm a poloměru 0,3 cm, jaký musí být poloměr kapiláry teploměru, aby při změně o 10 °C odpovídala změna výšky rtuťového sloupce v kapiláře 2 cm? Pro rtuť je $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

$$l = 1,5 \text{ cm}$$

$$r_0 = 0,3 \text{ cm}$$

$$\Delta t = 10 \text{ °C}$$

$$\Delta h = 2 \text{ cm}$$

$$r = ?$$

$$V = V_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$

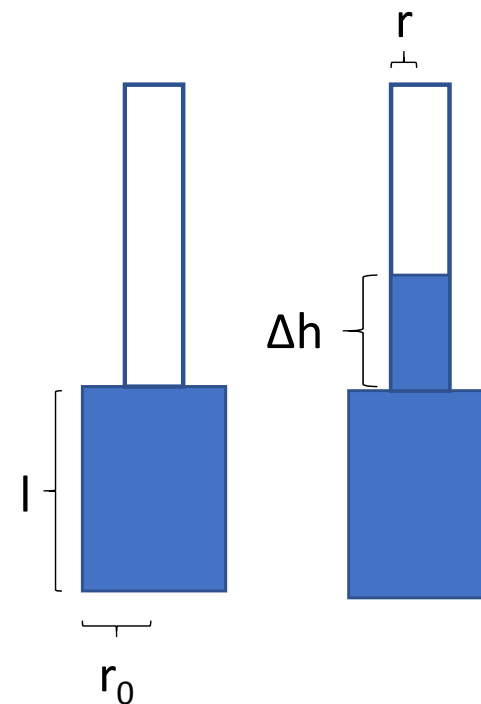
$$(V - V_0) / V_0 = \alpha \cdot (t - t_0)$$

$$\Delta h \cdot \pi \cdot r^2 / l \cdot \pi \cdot r_0^2 = \alpha \cdot \Delta t$$

$$2 \cdot \pi \cdot r^2 / 1,5 \cdot \pi \cdot r_0^2 = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 10$$

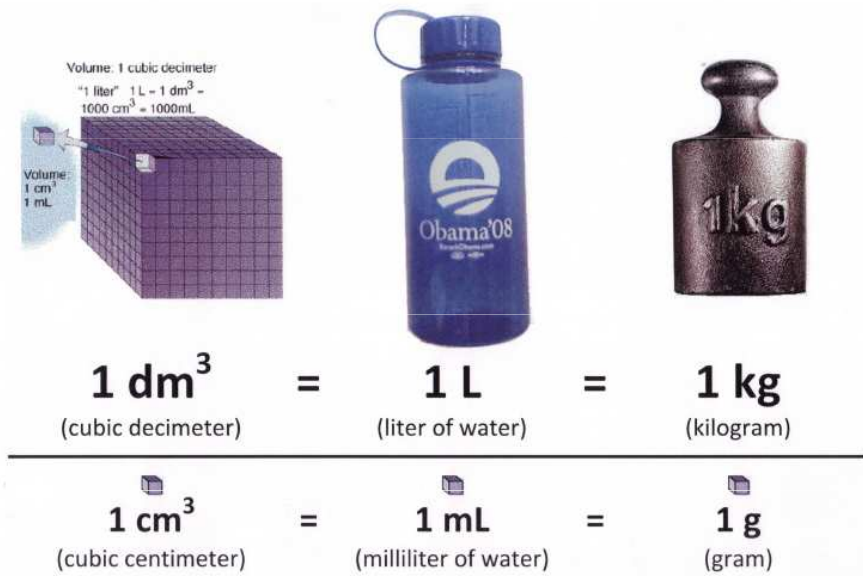
$$r / r_0 = 0,037$$

$$r = \underline{0,11 \text{ mm}}$$



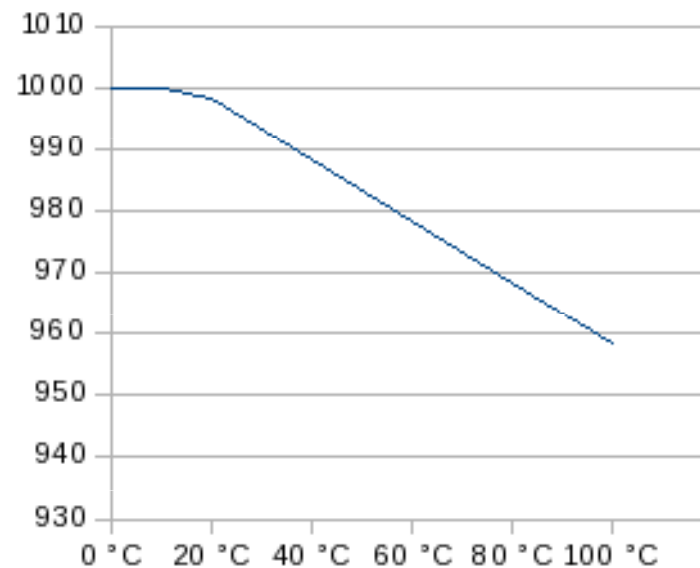
Fyzikální vlastnosti vody

Přibližná hustota destilované vody se obvykle uvádí $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$ (1 litr vody váží 1 kilogram).

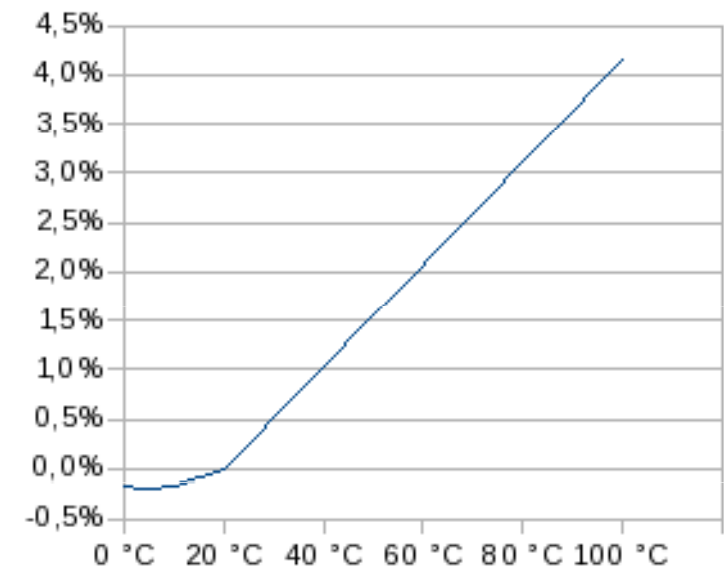


teplota	0 °C	4 °C	10 °C	20 °C	100 °C
hustota [kg/m ³]	999,84	999,97	999,7	998,2	958,38
objem	998 l	998 l	998 l	1 000 l	1 042 l
zmena objemu	-0,2%	-0,2%	-0,2%	0,0%	4,2%

Hustota vody

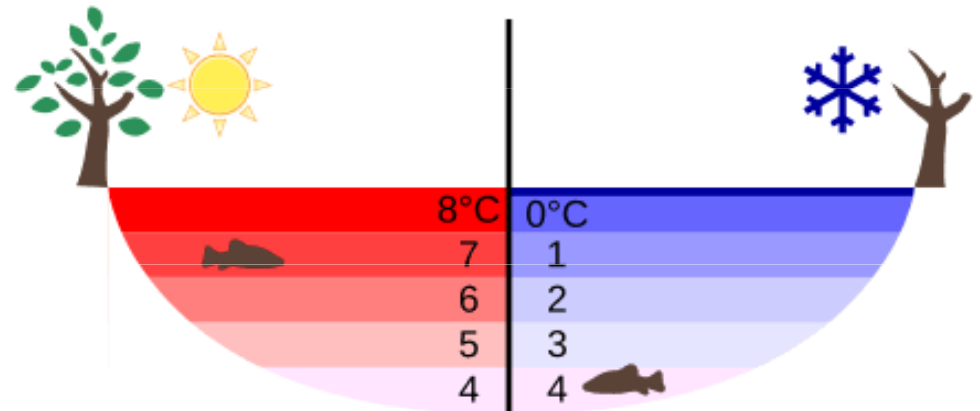


Zmena objemu

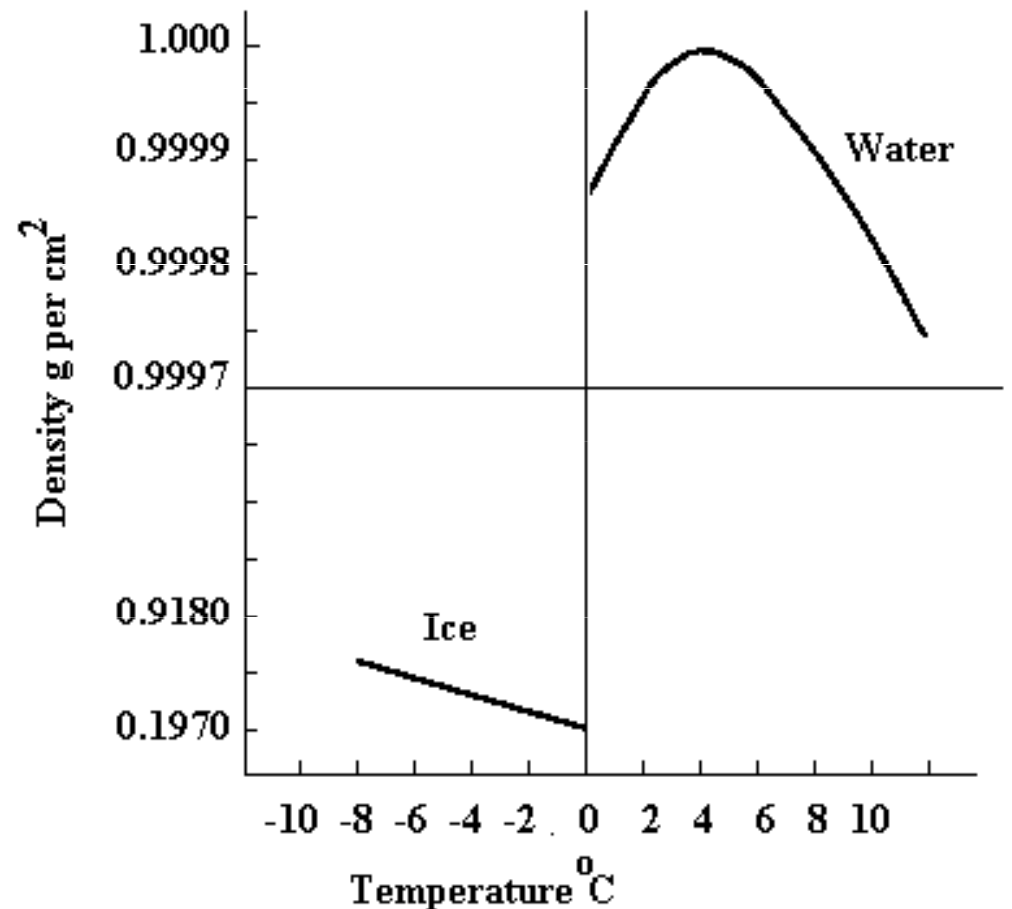


Anomálie vody

Zahříváme-li vodu z 0°C na 4°C, zmenšuje se její objem a její hustota roste. Ve 4°C voda dosahuje max. hustoty 1000 kg na kubický metr. Teprve od teploty 4°C výše se objem vody zvětšuje a hustota se zmenšuje. Tato odlišná závislost teploty a hustoty vody v porovnání s ostatními kapalinami je anomálie vody.



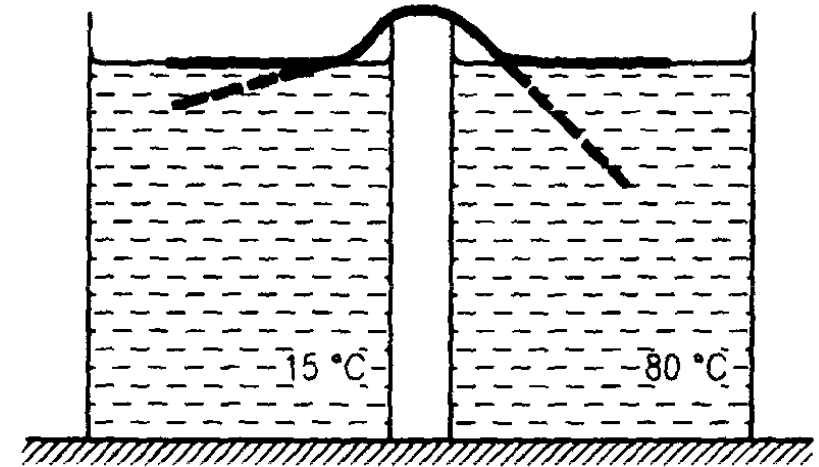
11.2.2 Density of ice and water depends on temperature



$$\rho = 1000 \left\{ 1 - \left[\frac{T + 288.9414}{508929 (T + 68.129630)} \right] (T - 3.9863)^2 \right\}$$

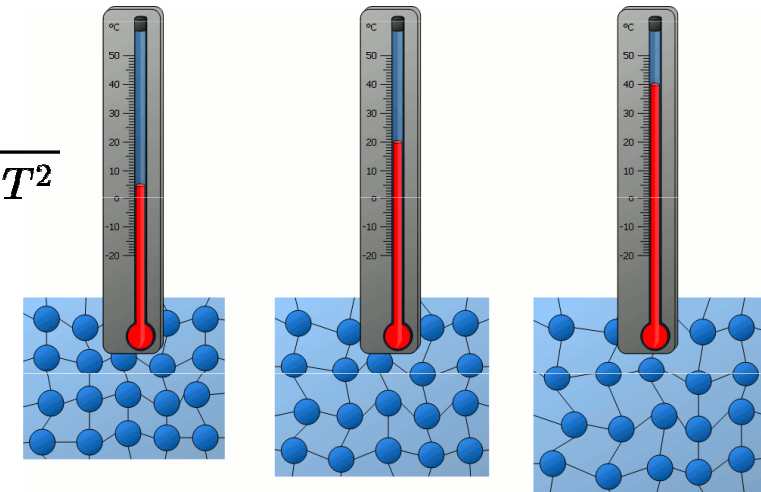
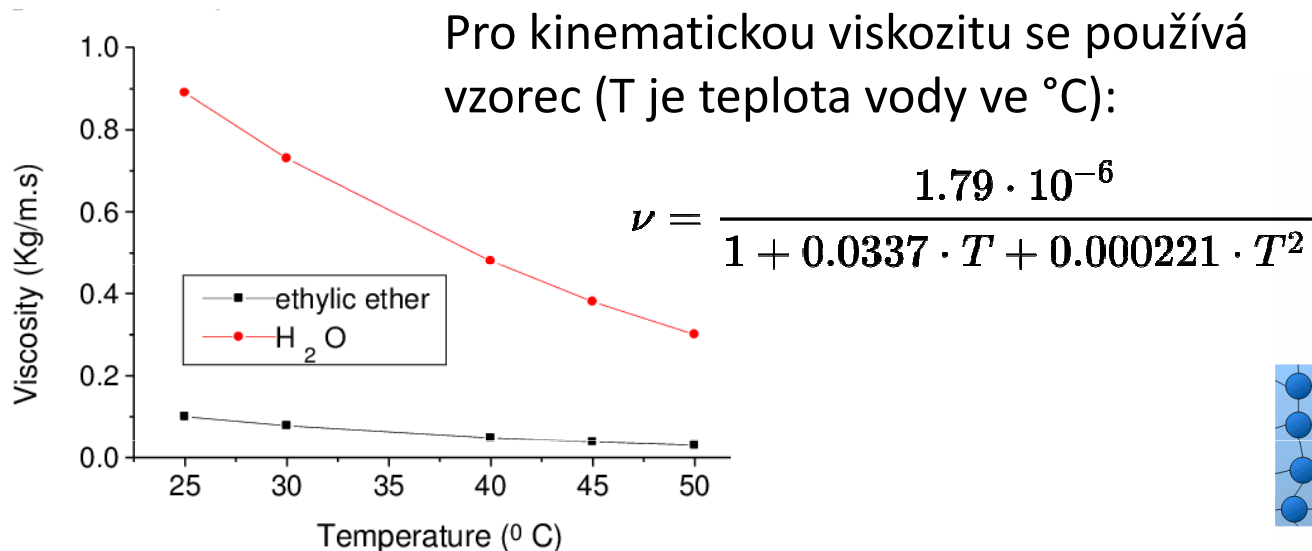
Teplotní závislost povrchového napětí

s rostoucí teplotou povrchové napětí klesá, v důsledku snižování přitažlivých sil mezi molekulami.



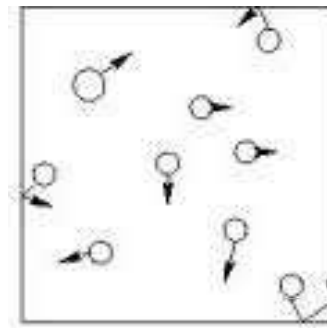
Teplotní závislost viskozity kapalin

Viskozita kapalin s rostoucí teplotou klesá, v důsledku snižování přitažlivých sil mezi molekulami.

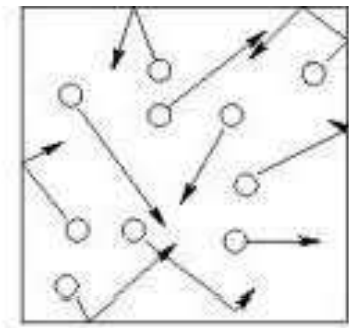


Teplota a kinetická teorie plynů

Zvýšením teploty dojde ke zvýšení rychlosti molekul a zvýšení frekvence srážek (zkracuje se střední volná dráha) a počtu nárazů na stěnu nádoby (zvětšuje se tlak, resp. objem).

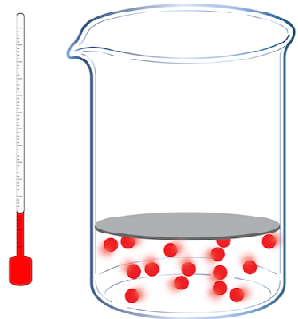


Cool gas, fewer and less energetic collisions

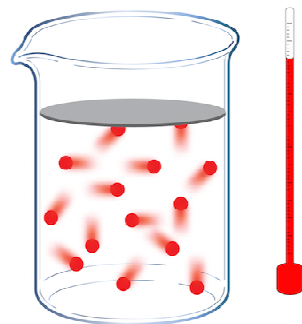


Hot gas, more and more energetic collision

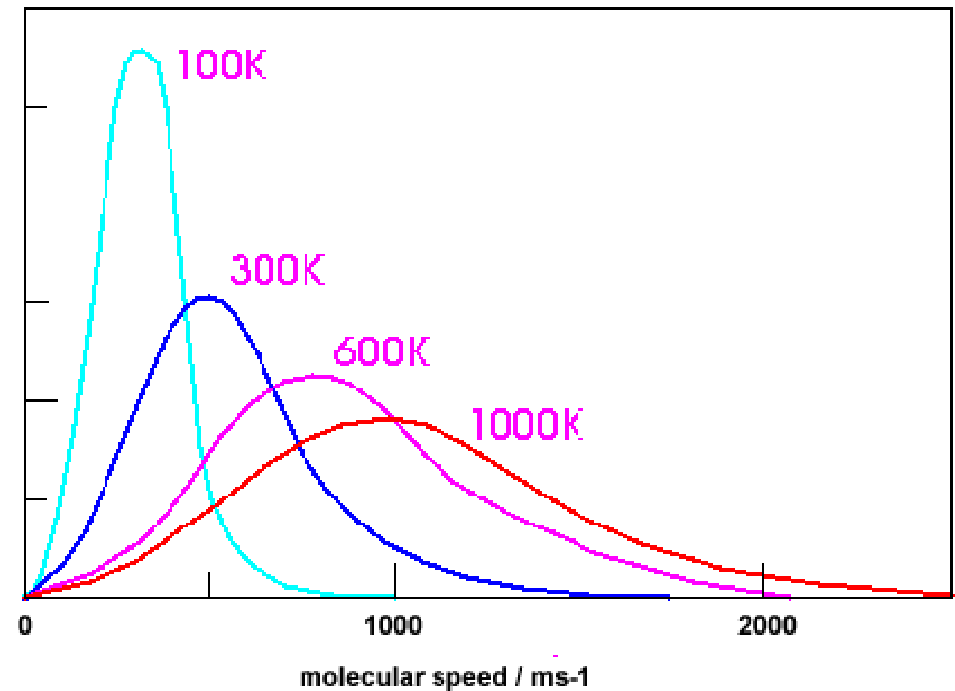
Low temperature



High temperature



number of particles



U plynů viskozita s rostoucí teplotou roste.

U plynů hustota s rostoucí teplotou klesá.

Sutherlandův vzorec
$$\eta = A \frac{\sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}}$$

Gay-Lussacův zákon

Při izobarickém ději se zvyšující se termodynamickou teplotou lineárně roste objem ideálního plynu.

Koeficient teplotní roztažnosti α má pro různé plyny prakticky stejnou hodnotu a není závislý ani na teplotě ani na tlaku.

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \sim 0.00375$$

α je přírůstek objemu vztažený na objemovou jednotku, způsobený nárůstem teploty o jeden stupeň.

Celkový objem plynu při teplotě t je

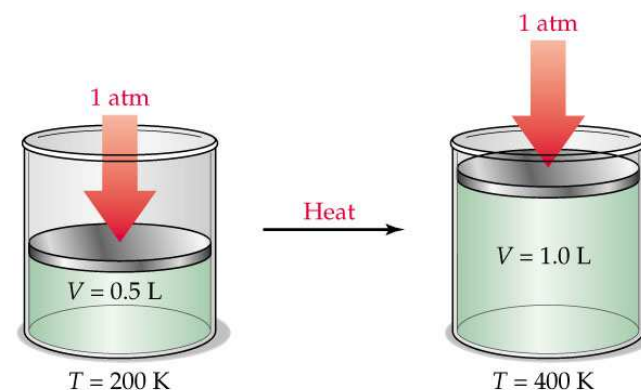
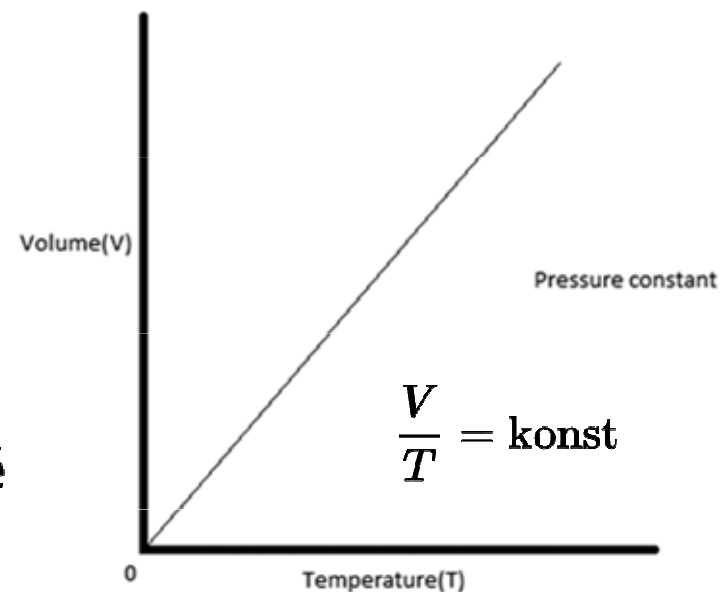
$$V_t = V_0 + \alpha V_0 t = V_0 (1 + \alpha t)$$

Gay-Lussacův zákon platí jen v oblasti velmi nízkých tlaků, je to zákon mezní (limitní):

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{V}{V_0} = 1 + \alpha_0 t$$

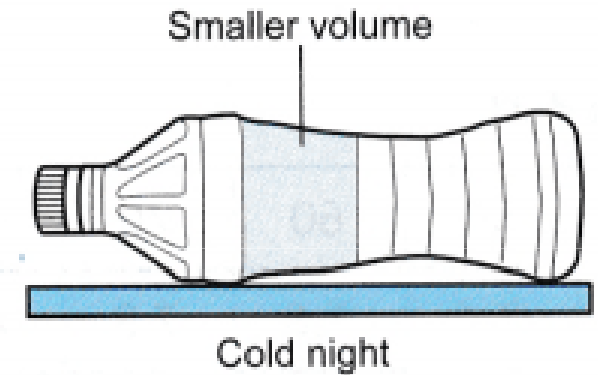
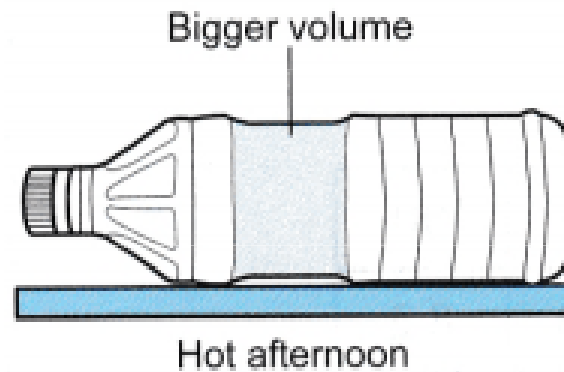
α_0 je limitní hodnota koeficientu teplotní roztažnosti α pro tlak plynu blížíící se nule,

$$\underline{\alpha_0} = 0.0036610 = \underline{1/273.15}$$



Příklad

Změna objemu **PET láhve** při různé teplotě se zhruba řídí Gay-Lussacovým zákonem.



V případě **skleněné láhve** dojde jen ke změně tlaku, což odpovídá Charlesovu zákonu.

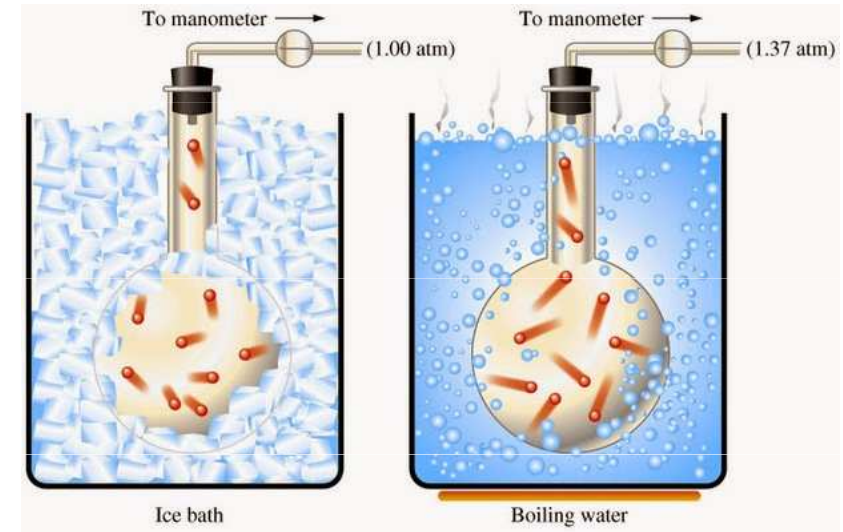
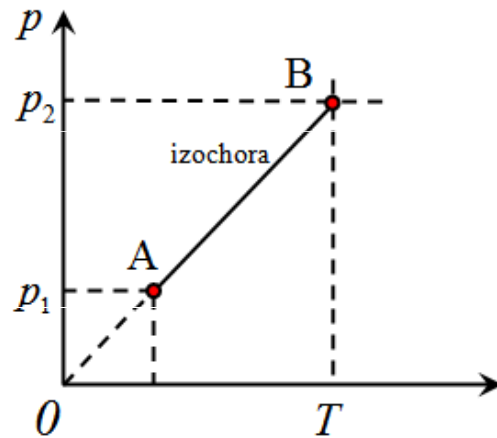
Při velkém zvýšení teploty se zvětší tlak plynu natolik, že tlaková síla překoná elastickou mez (u pružných materiálů, např. pneumatik, ...) resp. mez pevnosti (u pevných materiálů, např. tlakových lahví) nádoby a dojde k jejímu roztržení.



Charlesův zákon

Při izochorickém ději v ideálním plynu o stálé hmotnosti je termodynamická teplota tohoto plynu přímo úměrná jeho tlaku.

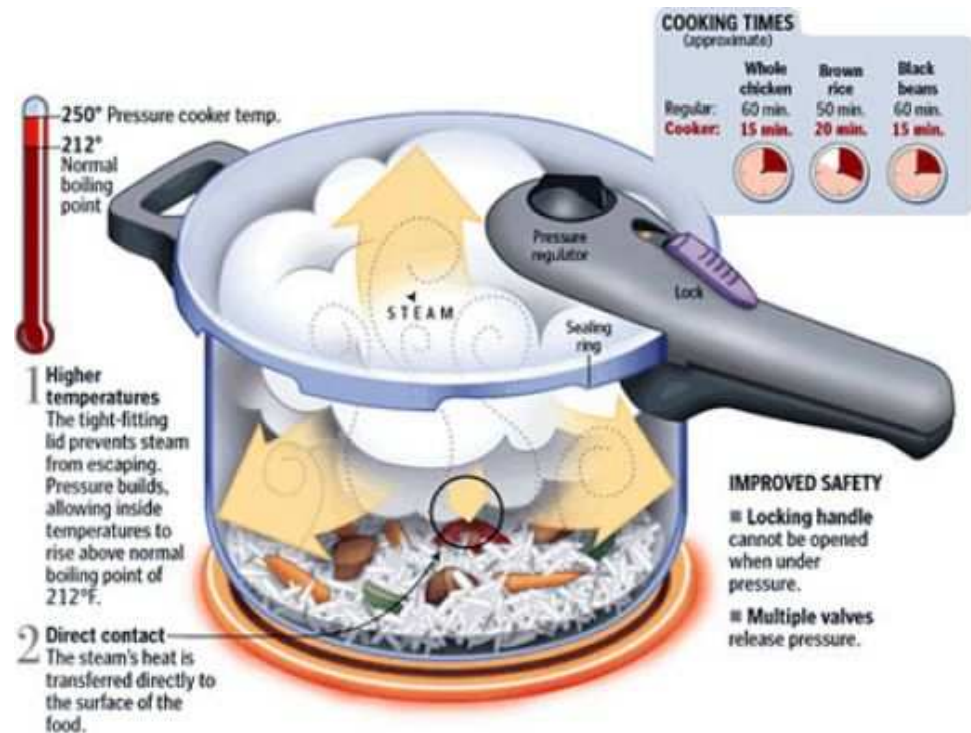
$$\frac{p}{T} = \text{konst}$$



Autokláv je přístroj-reaktor konstruovaný pro reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty. V laboratořích se autokláv typicky používá ke sterilizaci materiálů v laboratorním skle, zejména médií. Samotný proces sterilizace je prováděn vlhkým teplým vzduchem a zvýšením tlaku.

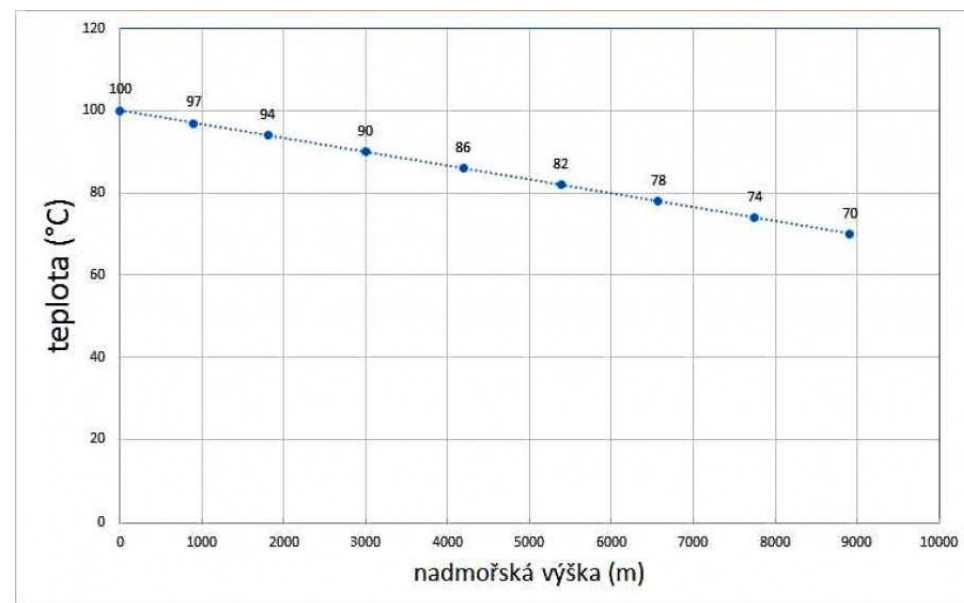


Tlakový (Papinův) hrnec je silnostěnný hrnec sloužící k vaření za vyššího tlaku (280 - 300 kPa), jímž se dosáhne vyšší teploty vaření (120 °C - 130 °C), a tím i rychlejšího uvaření pokrmu. Poklice, již je hrnec neprodyšně uzavřen, je opatřena pojistným ventilem, který propouští přebytečnou páru, a tak zamezuje nebezpečnému zvýšení tlaku, které by mohlo vést k roztržení hrnce a výbuchu.



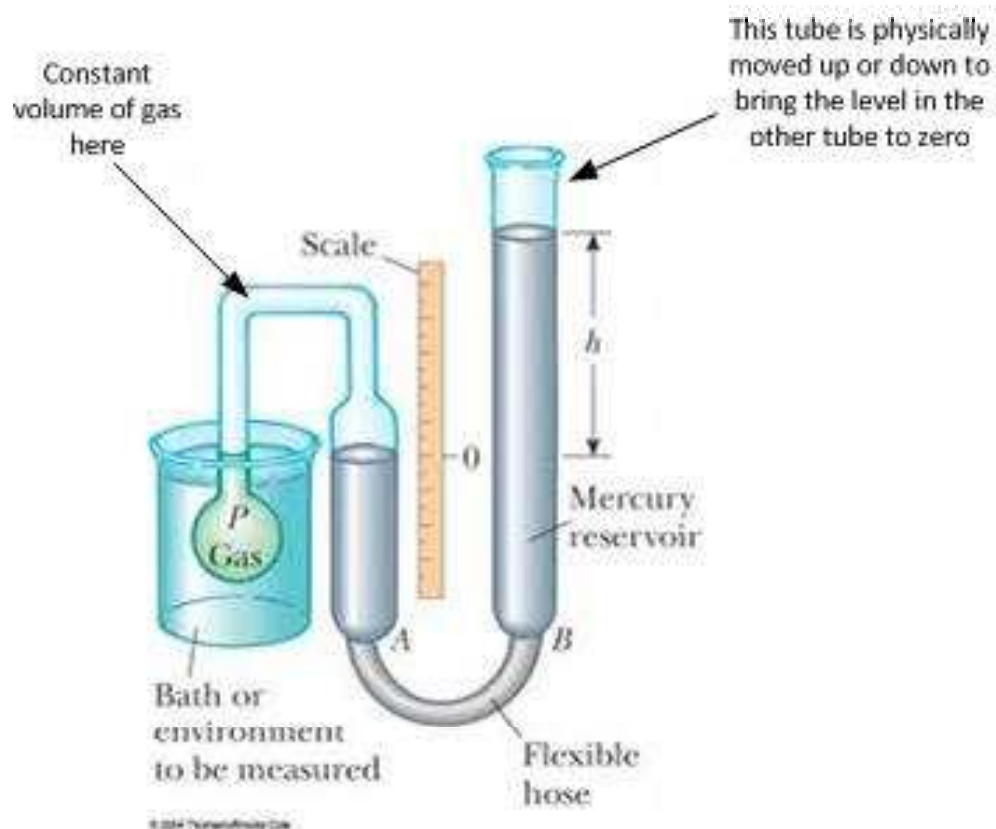
Vaření ve vysokých nadmořských výškách

Atmosférický tlak a tím i teplota varu vody je závislý na nadmořské výšce. Např. voda na Mt. Everestu se vaří už při 70 °C. To znamená, že se jídlo vaří jen velmi pomalu a některé potraviny se „neuvaří“ vůbec.

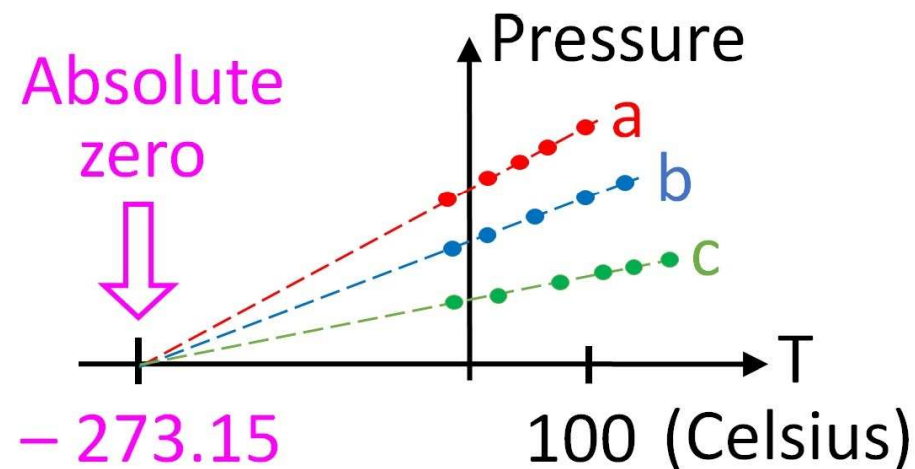


Plynový teploměr

Plynový teploměr se skládá z nádoby naplněné plynem (např. vodíkem, heliem, dusíkem), která je spojena úzkou trubkou s otevřením kapalinovým manometrem. Manometr má jedno rameno pohyblivé ve svislém směru, aby se hladina plynu v pevném rameni mohla udržet stále na úrovni značky. Tím se zaručuje, že změny tlaku plynu změnou teploty probíhají za stálého objemu plynu.



Extrapolací dat pro různé (ideální) plyny lze odhadnout počáteční bod Kelvinovy stupnice (**absolutní nulu**).



$$T = t + 1/\alpha_0 = t + 273,15$$

Příklad

Kovové uzávěry šroubovacích zavařovacích lahví lze snadněji odšroubovat pokud se zahřejí proudem teplé vody. Kov má větší teplotní součinitel roztažnosti než sklo. Po zahřátí se kov mírně roztáhne, což umožní snadnější otevření lahve. Při zahřátí lahve se uvnitř zvýší tlak a tím se sníží přitlačná síla na víčko.

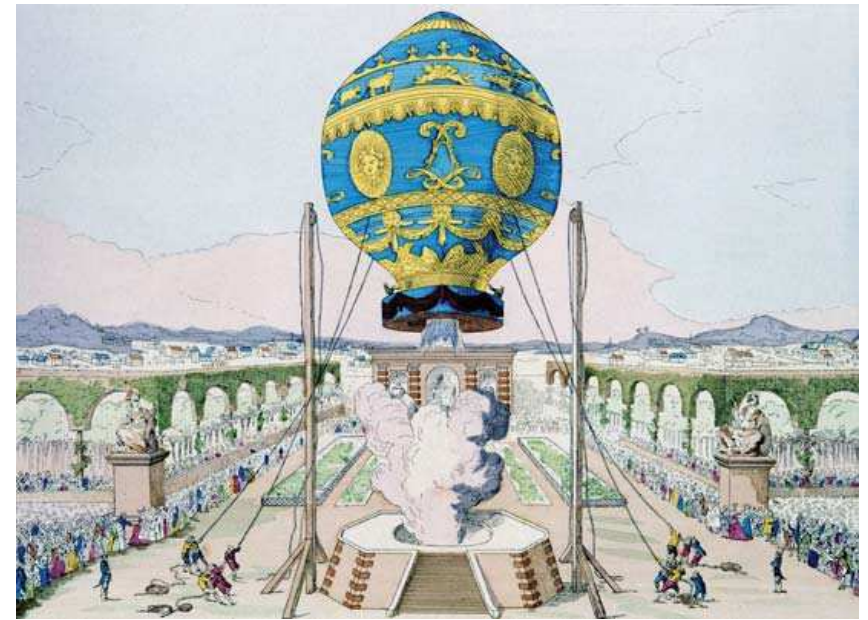


Horkovzdušný balón (montgolfiéra)

Využívá vztlakové síly dané rozdílem hustot
chladného a horkého vzduchu.

Vztah mezi teplotou a hustotou plynu je dán
stavovou rovnicí

$$P = \frac{m}{M \cdot V} \cdot R \cdot T = \frac{\rho}{M} \cdot R \cdot T$$



Příklad

Balon o objemu 1000 m^3 je naplněn heliem na tlak $62,4 \text{ kPa}$ a váží i s košem 350 kg . Jakou zátěž unese, je-li ve výšce 3700 m při teplotě okolí $-11 \text{ }^\circ\text{C}$? Molární hmotnost vzduchu je $29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ a helia $4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.

$$T = -11 \text{ }^\circ\text{C} = 262 \text{ K}$$

$$V = 1000 \text{ m}^3$$

$$m_b = 350 \text{ kg}$$

$$p = 62,4 \text{ kPa} = 62400 \text{ Pa}$$

$$M_v = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 0,029 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$M_{\text{He}} = 4 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 0,004 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$F_v = m_v \cdot g$$

$$F_g = (m_{\text{He}} + m_b + m_z) \cdot g$$

$$F_v = F_g$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = (m/M) / R \cdot T$$

$$p \cdot M = n \cdot R \cdot T = (m/V) / R \cdot T = \rho / R \cdot T$$

$$\rho_v = p \cdot M_v / R \cdot T = 62400 \cdot 0,029 / 8,314 \cdot 262 = 0,83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{He}} = p \cdot M_{\text{He}} / R \cdot T = 62400 \cdot 0,004 / 8,314 \cdot 262 = 0,115 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$m_z = m_v - m_{\text{He}} - m_b = V \cdot (\rho_v - \rho_{\text{He}}) - m_b = 10^3 \cdot (0,83 - 0,115) - 350 = \underline{365 \text{ kg}}$$

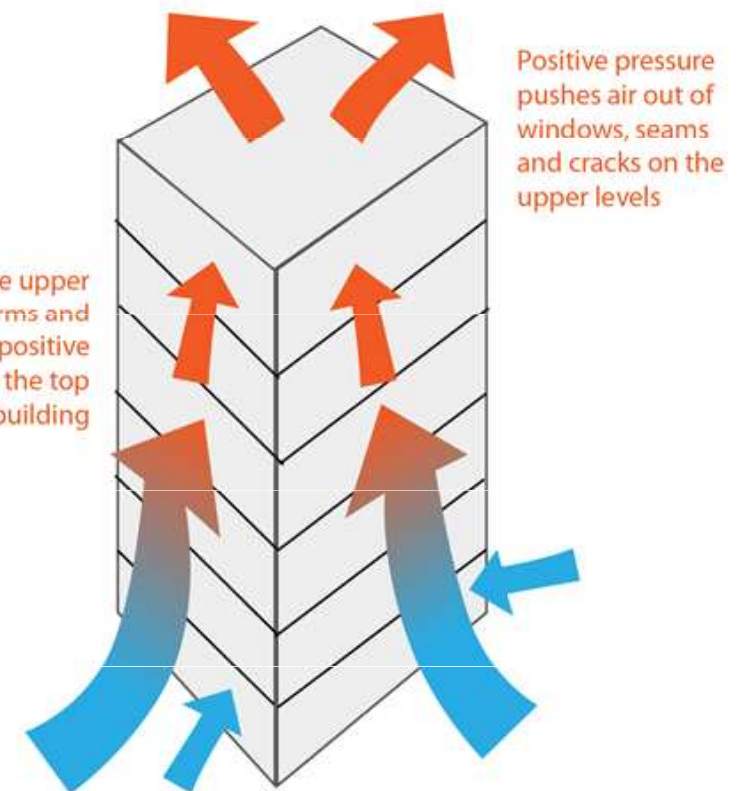


Komínový efekt

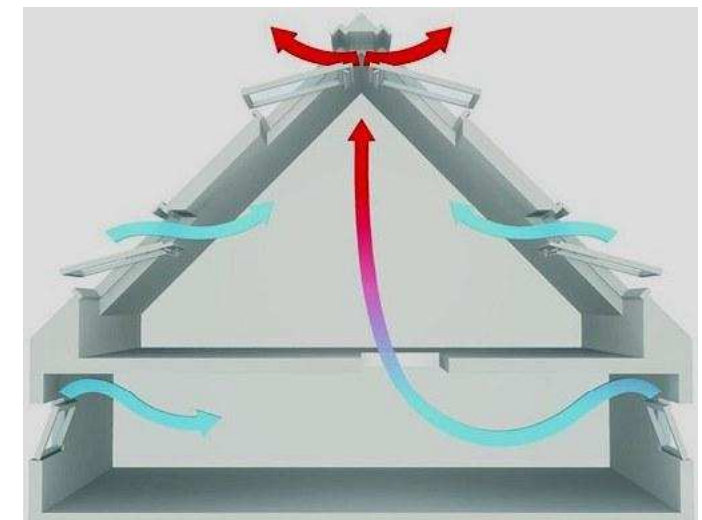
Komínový efekt je proudění (stoupání) teplého vzduchu svislou dutinou způsobený rozdílnou teplotou na obou koncích této dutiny. Vzduch opouštějící dutinu (komín) má nižší hustotu než chladnější vzduch okolního prostředí a stoupá proto vzhůru působením vztlaku. Teplý vzduch opouštějící dutinu v ní působí podtlak, který způsobuje nasávání teplého vzduchu dolním koncem dutiny. Čím vyšší je rozdíl teplot a výška konstrukce (např. komínu), tím vyšší je rozdíl hustoty vzduchu (vztlak) a výsledný komínový efekt.

Díky **komínovému efektu** dochází během topné sezóny v budovách (které nejsou nikdy dokonale uzavřeny) k cirkulaci vzduchu, kdy teplejší vzduch stoupá nahoru a chladnější vzduch proniká okny, dveřmi nebo průduchy či netěsnostmi dovnitř.

Air rises to the upper levels as it warms and increases positive pressure near the top of the building



Negative pressure on lower levels encourages infiltration of cold outdoor air through windows, doors, and openings



Teplotní inverze

Za normálních okolností teplota vzduchu klesá se zvyšující se nadmořskou výškou (zemský povrch pohlcuje sluneční paprsky a atmosféru ohřívá). Lehčí teplý vzduch stoupá, zatímco studený proudí na jeho místo (**konvekce**).

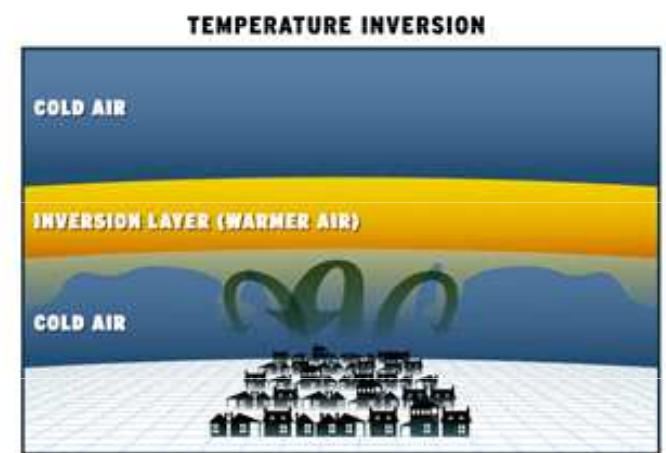
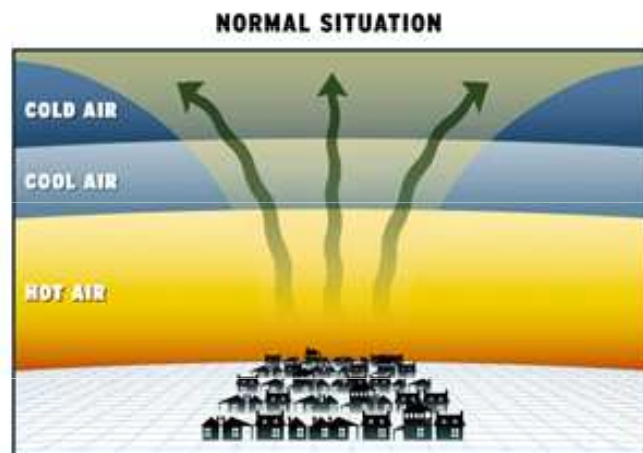
Porušení až otočení tohoto jevu (zpravidla v podzimních a zimních měsících) se říká **inverze teploty vzduchu**.

K **inverzi advekční** dochází zejména v zimě - vzduch se od země ochladí, zatímco ve výšce zůstává teplý.

V mírném pásmu se vytváří **inverze subsidenční**, kde studený vzduch klesá z vyšších vrstev do údolí, kde je uzavřen. Nad ním se mezitím tvoří oblačnost, v níž se pak často zachycují škodliviny a vzniká smog.

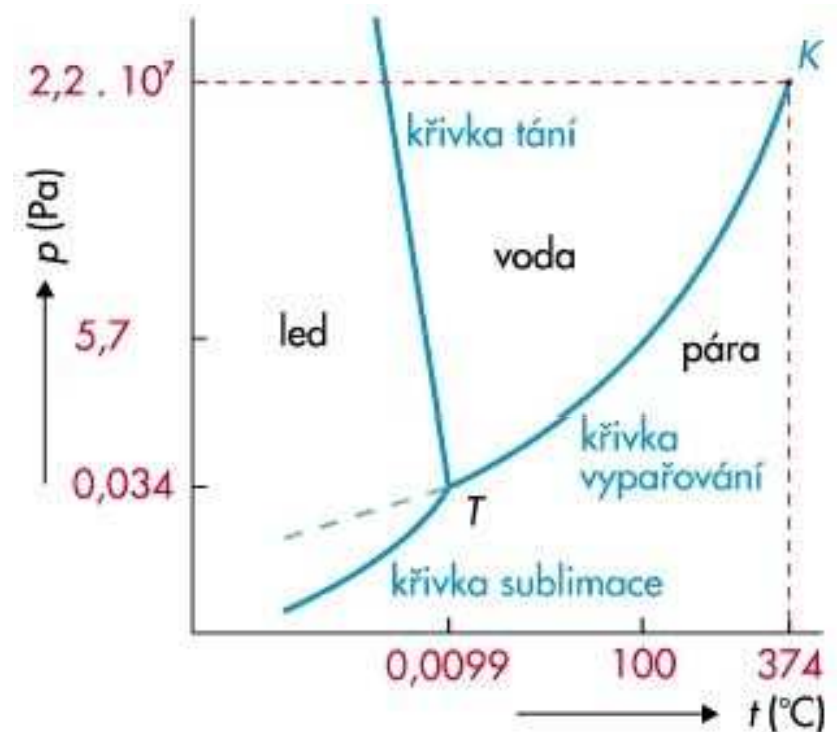
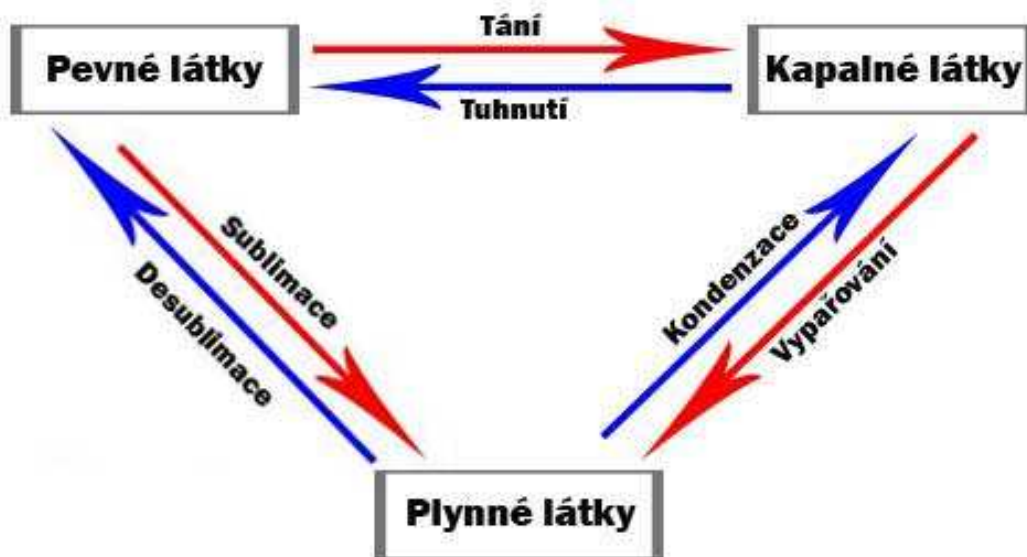
Radiační inverze je způsobena nočním chladnutím zemského povrchu. Přilehlá atmosféra rychle ztrácí teplotu, což v zimě zapříčiňuje přízemní mrazíky a v létě rosu.

Turbulentní inverze vzniká při nestandardním pohybu vzduchu, kdy dynamikou jeho proudění dochází k mísení jednotlivých vrstev. Často vznikají poblíž mořského pobřeží.



Změna skupenství

Jedna látka se může vyskytovat jako plynná, kapalná nebo pevná. Tyto tři stavy téže látky nazýváme skupenství plynné, kapalně a pevné. Změnou skupenství rozumíme fyzikální děj, při němž se mění skupenství látky.



Tenzi par kapaliny lze pro danou teplotu vypočítat z **Antoineovy rovnice**

$$\log p = A - \frac{B}{C + T}$$

A, B, C jsou konstanty charakteristické pro danou kapalinu

Příklad

Při jaké teplotě bude vřít voda ve Lhase, ležící v nadmořské výšce 3000 m. n. m.?
Teplota vzduchu ve Lhase je 17 °C. Molární hmotnost vzduchu je 29 g.mol⁻¹.

$$T = 17 \text{ °C} = 290 \text{ K}$$

$$M = 29 \text{ g.mol}^{-1} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$h = 3\,000 \text{ m}$$

Konstanty Antoineovy rovnice pro vodu

$$A = 4,14259$$

$$B = 1716,96$$

$$C = 234,268$$

$$P_h = P_0 \cdot e^{-M \cdot g \cdot h / (k \cdot T)} \quad (\text{barometrický vzorec})$$

$$P_h = 101325 \cdot \exp(29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 3000 / (8,314 \cdot 290)) = 71,12 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$\log(p) = A - B / (t + C) \quad (\text{Antoineova rovnice})$$

$$\log(71,12 \cdot 10^{-3}) = 4,14259 - 1716,96 / (t + 234,268)$$

$$t = \underline{90,26 \text{ °C}}$$



Vlhkost vzduchu

Vlhkost je základní vlastnost vzduchu. Vlhkost vzduchu udává, jaké množství vody v plynném stavu (vodní páry) obsahuje dané množství vzduchu.

Absolutní vlhkost vzduchu vyjadřuje hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu. Vyjadřuje se nejčastěji v gramech vodní páry na metr krychlový vzduchu.

$$\Phi = \frac{m}{V}$$

Relativní vlhkost vzduchu udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení. Udává se v procentech (%).

$$\phi = 100 \frac{m}{M} \quad \phi = 100 \frac{\Phi}{\Phi_n}$$

Rosný bod je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %).

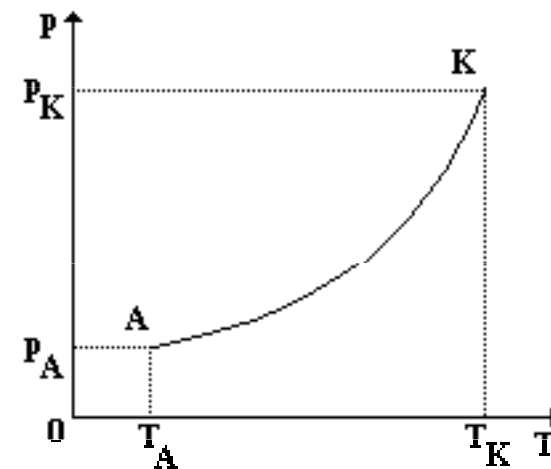
Tlak (tenze) vodní páry je parciální tlak vodní páry obsažené ve vzduchu [Pa]

Magnusův vzorec:

$$E_s = E_{s,273,16} \cdot 10^{\left(\frac{8,5 \cdot t}{273,16+t}\right)} \quad E_s = E_{s,273,16} \cdot 10^{\left(\frac{9,7 \cdot t}{273,16+t}\right)}$$

Tenze par nad povrchem vody *Tenze par nad povrchem ledu*

Sytá pára (nasyčená pára) je pára, která je v termodynamické rovnováze s kapalinou o stejné teplotě a tlaku. Tlak nasyčené páry je závislý pouze na teplotě, a nikoli na objemu, který nasyčená pára zaujímá. Tlak nasyčené páry stoupá s teplotou. Sytá pára není ideální plyn.

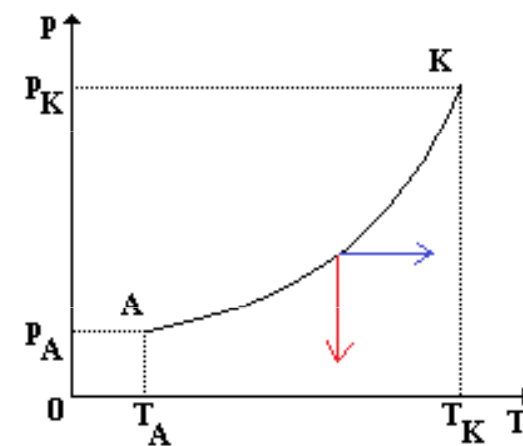


bod **K** ... kritický bod
bod **A** - trojný bod

Přehřátá pára má nižší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty. Přehřátá pára se svými vlastnostmi blíží spíše vlastnostem plynů, a to tím více, čím více se její stav liší od stavu syté páry. Pro přehřáté páry, jejichž stav je daleko od stavu sytých par platí přibližně stavová rovnice ideálního plynu.

Přehřátá pára vzniká

- zahříváním syté páry **bez přítomnosti kapaliny** při konstantním tlaku (**modrá šipka**)
- zvětšením objemu syté páry **bez přítomnosti kapaliny** při konstantní teplotě (**červená šipka**)



Přenos (sdílení) tepla

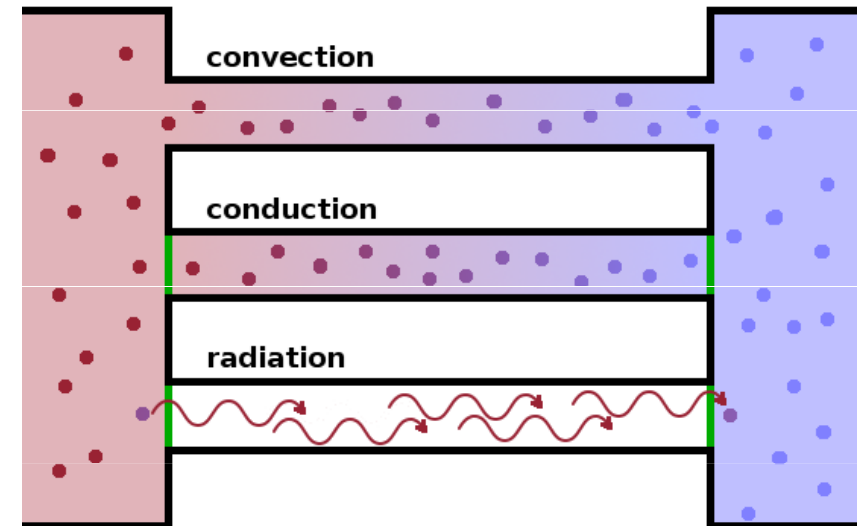
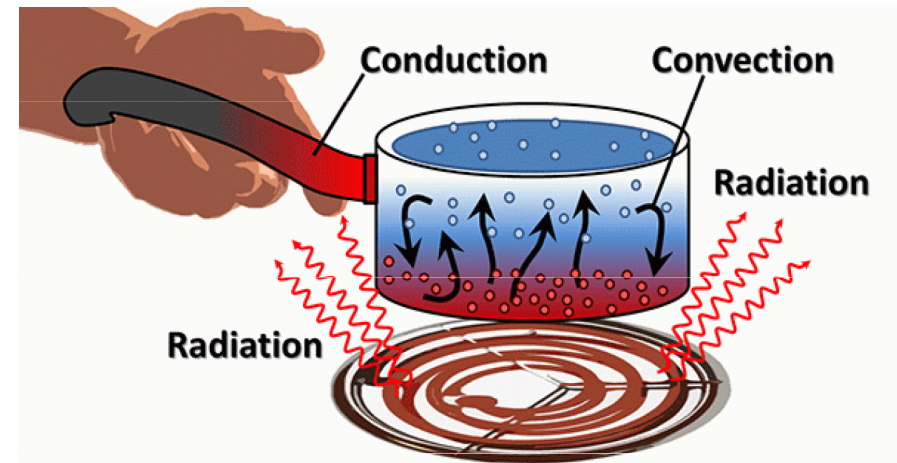
Šíření tepla (sdílení tepla) je jedním ze způsobů přenosu energie. Spočívá v tepelné výměně, což je termodynamický děj, při kterém dochází k výměně tepla mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Tepelná výměna vždy probíhá tak, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšimu tělesu.

V **tepelných vodičích** se děje výměna rychleji, v **tepelných izolantech** – za stejných podmínek – pomaleji.

konvekcí (prouděním)

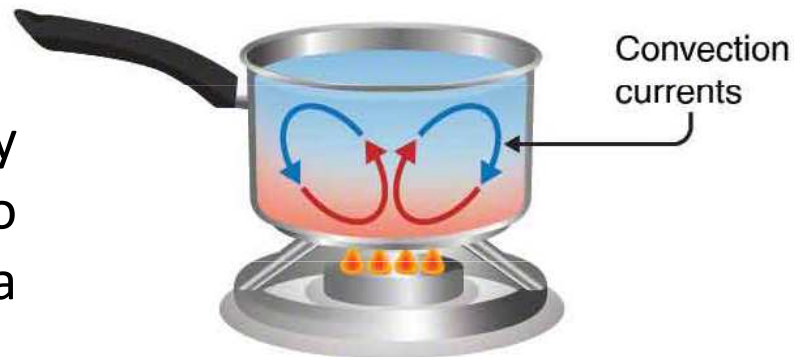
kondukcí (vedením)

radiací (zářením)



Přenos tepla prouděním

= přenos tepelné energie prouděním tekutiny (kapaliny, plynu) z teplejších míst do chladnějších. V gravitačním poli teplejší tekutina stoupá vzhůru protože má menší hustotu.



Při konvekci dochází na rozdíl od radiace a kondukce kromě přenosu energie i k přenosu látky.

Množství tepla Q , které je za daný čas τ (s) odvedeno z povrchu tělesa o ploše S (m^2) do okolí o teplotě nižší o Δt (K) je dáno vztahem:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \cdot \tau$$

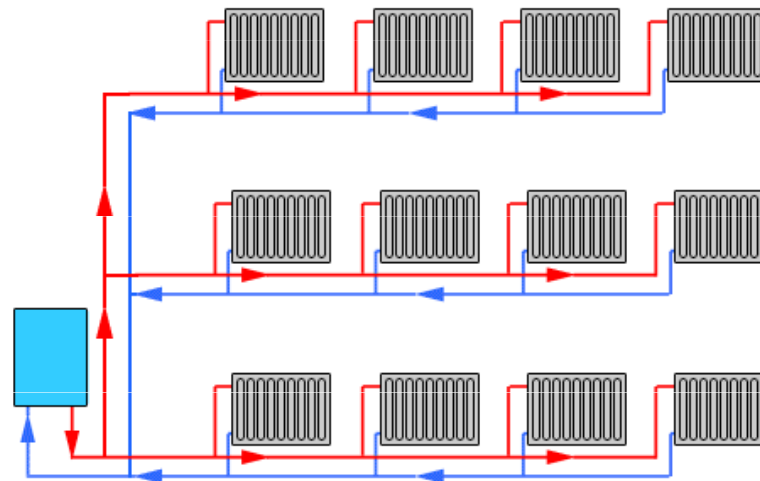
kde α ($W/K \cdot m^2$) je koeficient přestupu tepla rozhraním. Koeficient α lze stanovit experimentálně.

Např.

Ústřední topení

V okruhu ústředního topení dochází k proudění vody bez čerpadla, pokud je kotel umístěn dole a radiátory nahoře.

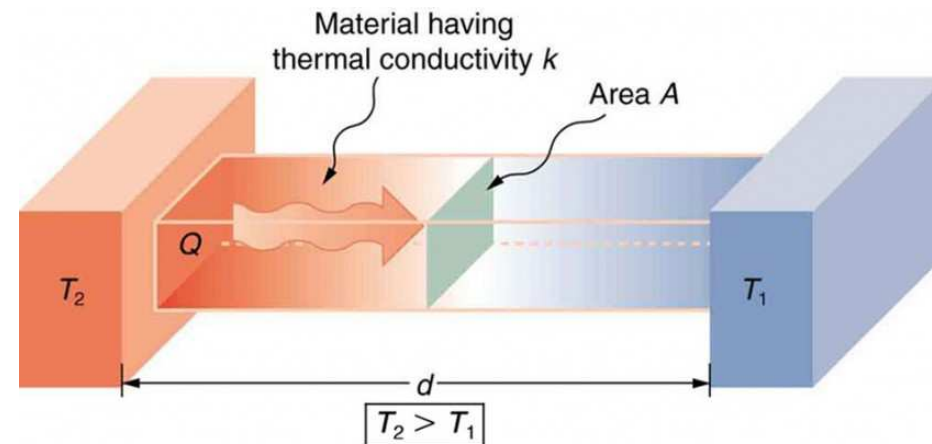
Komínový efekt



Přenos tepla vedením

teplotní spád (gradient) (K/m, °C/m)

$$\frac{t_2 - t_1}{d}$$



Množství tepla Q , které za těchto podmínek projde libovolným kolmým průřezem S tyče za dobu τ , je roven

$$Q = \lambda S \frac{t_2 - t_1}{d} \tau$$

Konstanta úměrnosti λ je **součinitel tepelné vodivosti** (tepelná vodivost).

Teplo procházející plochou určuje tzv. **tepelný tok**. Množství tepla Q , které projde plochou S za čas τ , se nazývá **hustota tepelného toku** (q)

$$q = \frac{Q}{\tau S} \quad q = \lambda \frac{t_2 - t_1}{d} \quad q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Fourierův zákon: průběh teploty v rovinné desce je při ustáleném proudění tepla lineární.

Předchozí vztahy lze využít při řešení problému průchodu tepla rozhraním.

Pokud se těleso (např. deska), kterým teplo prostupuje, skládá z n vrstev o různé tepelné vodivosti λ_i a tloušťce d_i pro i -tou vrstvou, $i=1,2,\dots,n$, pak za ustáleného stavu musí být hustota tepelného proudu ve všech vrstvách stejná

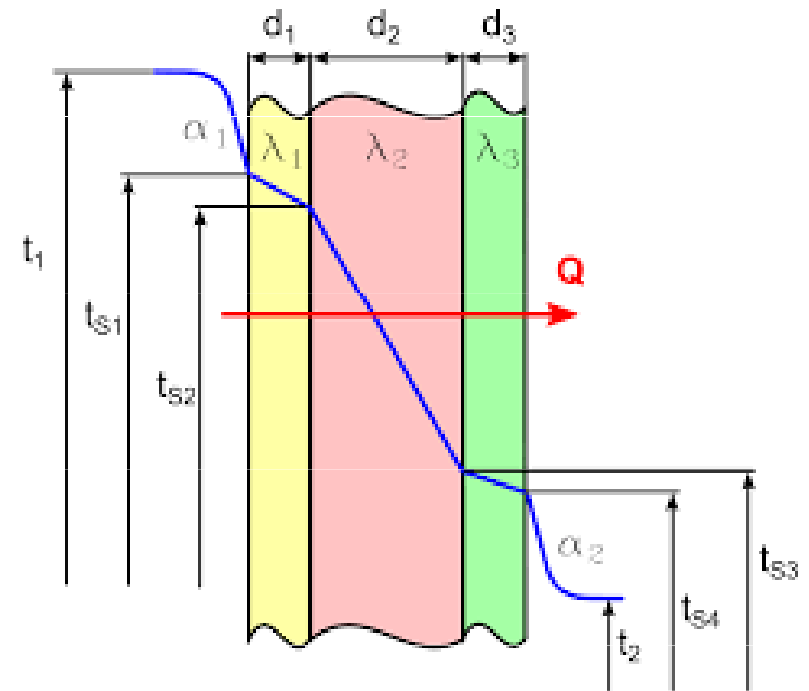
$$q = \frac{\lambda_1}{d_1}(t_1 - t_2) = \frac{\lambda_2}{d_2}(t_2 - t_3) = \dots = \frac{\lambda_n}{d_n}(t_n - t_{n+1})$$

$$t_1 - t_{n+1} = (t_1 - t_2) + (t_2 - t_3) + \dots + (t_n - t_{n+1}) = q \frac{d_1}{\lambda_1} + q \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + q \frac{d_n}{\lambda_n} = q \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}$$

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad \frac{d_i}{\lambda_i} = \text{tepelný odpor vrstvy}$$



$$Q_\tau = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} S$$



Přenos tepla vyzařováním (sáláním)

Tepelné záření je infračervené elektromagnetické záření. Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím sálání teplo přenášet také ve vakuu (bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím).

teplota tělesa – množství vyzařené energie je popsáno *Planckovým vyzařovacím zákonem*.

barva povrchu – nejmenší množství tepla je vyzařováno stříbřitě lesklými povrchy, největší černými. Toho se využívá například při konstrukci termosek, kde jsou povrchy stříbřitě lesklé pro minimalizaci předávání tepla sáláním. Naopak chladiče kosmických lodí, které jsou černé pro maximalizaci vyzařeného tepla. Při teplotách nad 1000 °C je ale pro většinu materiálů již rozdíl zanedbatelný a s malou chybou lze počítat s tím, že se prakticky všechna tělesa chovají jako **absolutně černé těleso**.

obsah plochy – energie vyzařovaná sáláním je přímo úměrná obsahu povrchu vyzařujícího tělesa.

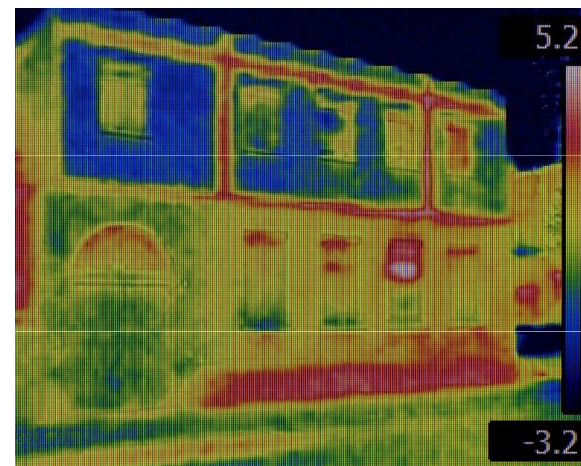
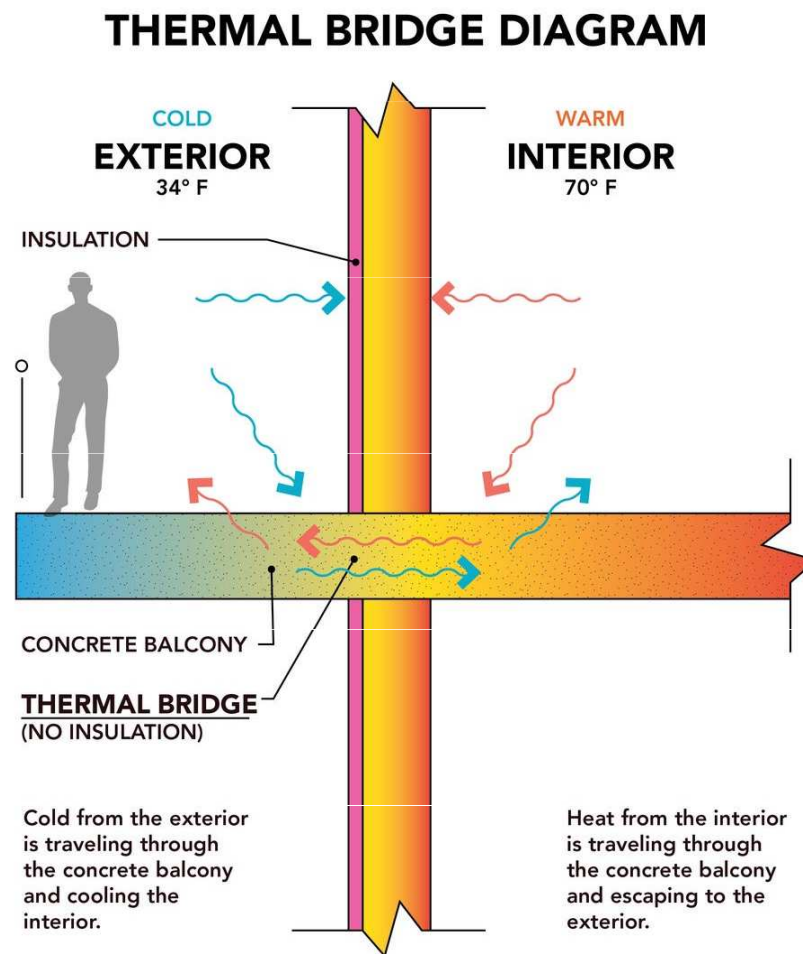
Stefanův-Boltzmannův zákon: intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa.

$$I = \text{konst.} \cdot T^4$$

Tepelné mosty

Tepelný most (tepelná vazba) je místo v konstrukci, kde konstrukcí domu uniká více tepla než v ostatních místech tepelné obálky objektu. Dochází k větším tepelným tokům než v jeho okolí. Projevuje se chladnějším povrchem.

Typická jsou například napojení dvou různých konstrukcí (otvorové výplně – okna, dveře) nebo také změny v geometrii konstrukce (např. rohy). Dále pak prvky, které procházejí vrstvou tepelné izolace (např. kotvení pergol). Jakýkoliv prostup vrstvou tepelné izolace totiž ve výsledku snižuje její efekt. Zvláště pokud se jedná o materiál velmi vodivý. Taková konstrukce může fungovat i jako chladič.

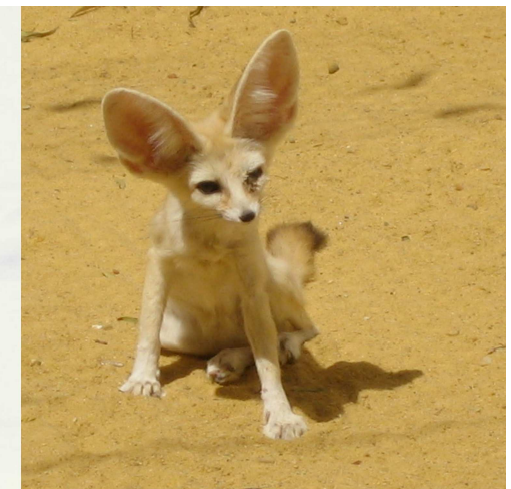
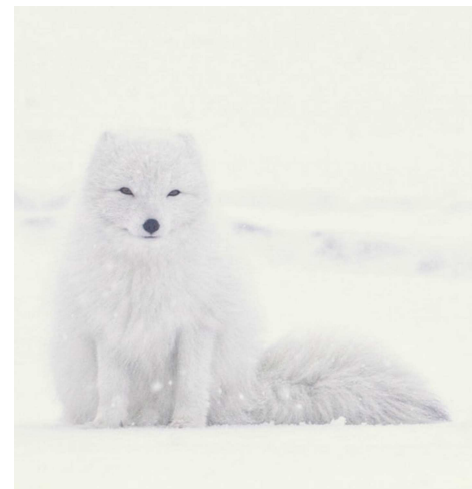
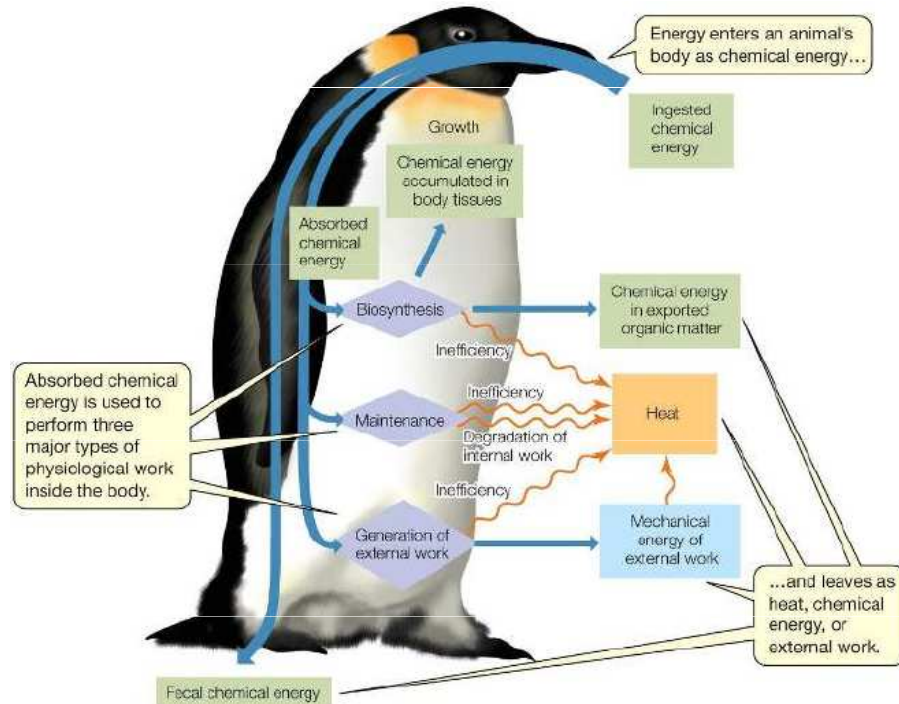
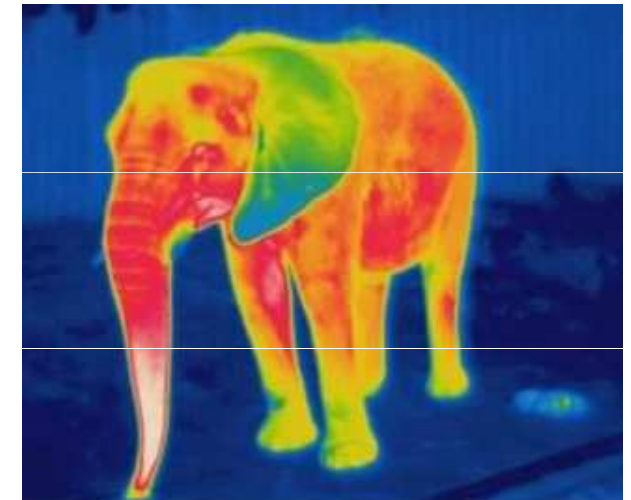


Termoregulace u živočichů

Teplo vzniká v těle především jako vedlejší efekt metabolických procesů a důsledek svalové práce.

Odvod tepla

Odpařování vody



Termodinamika

Energie

Energie může mít různé formy. Celková energie systému je dána součtem všech jednotlivých druhů energií.

Podle působící síly se rozlišuje

Mechanická energie

Kinetická (pohybová) energie

Potenciální (polohová) energie

Gravitační potenciální energie

Potenciální energie pružnosti

Tlaková potenciální energie

Elektrická energie

Magnetická energie

Energie záření

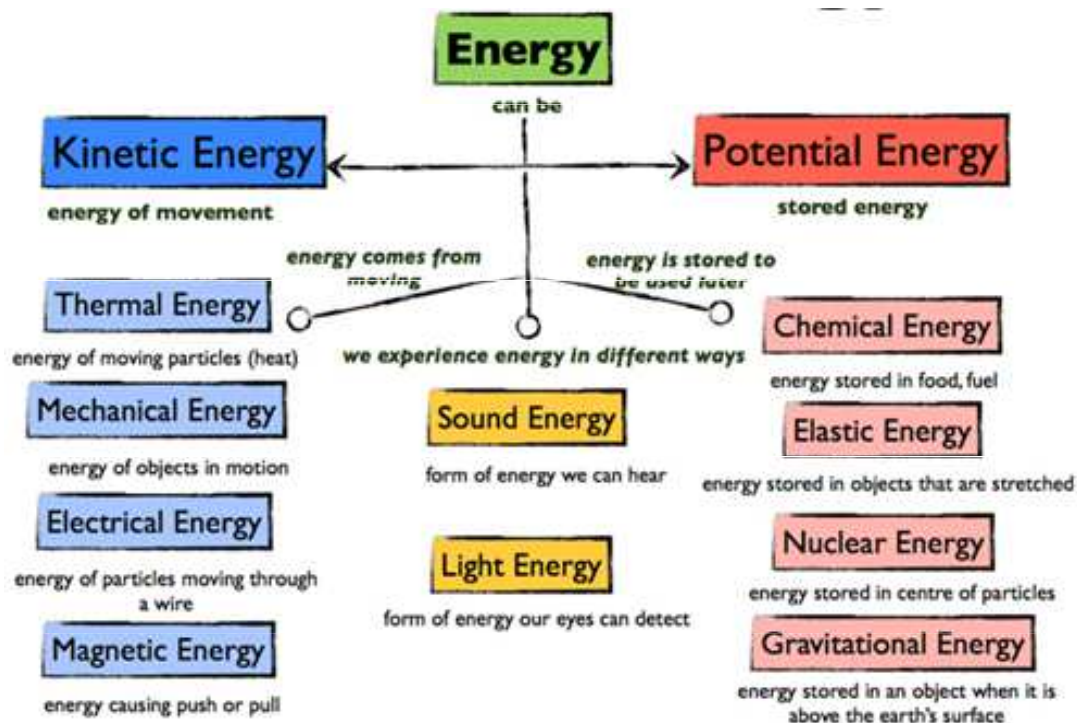
Energie vlnění

Vnitřní energie

Tepelná energie (teplo)

Jaderná energie

Chemická energie (energie chemické vazby, vazebná energie)



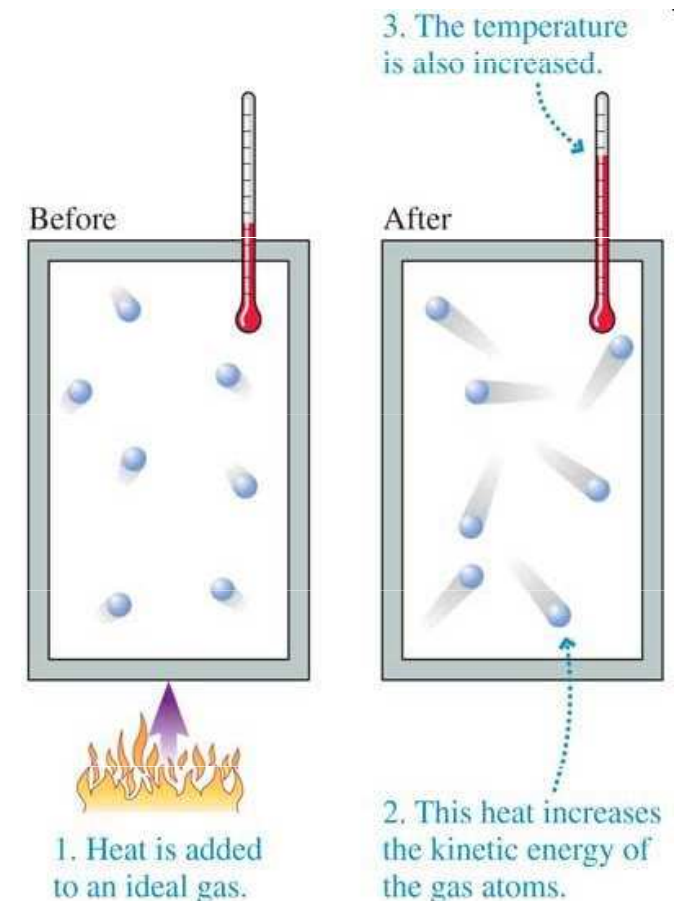
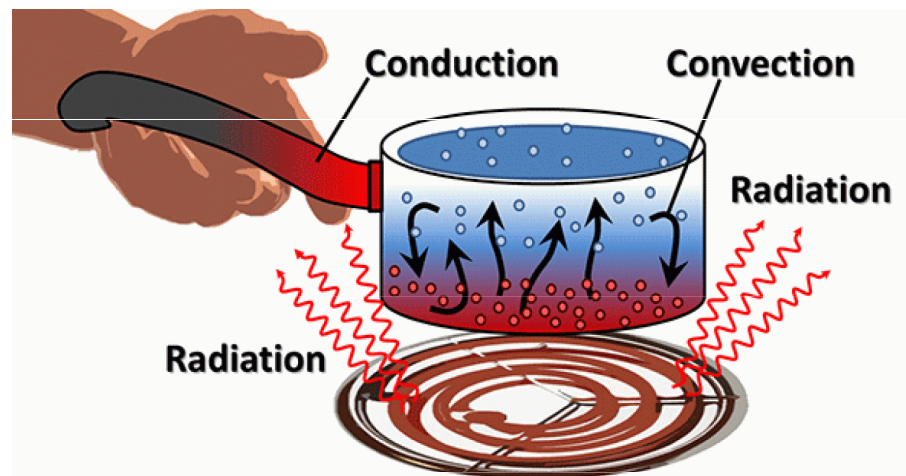
Teplo

Dochází-li k výměně energie na základě teplotního rozdílu mezi systémem a okolím (např. předáváním kinetické energie neuspořádaného pohybu molekul), nazýváme tuto změnu energie vyměněným teplem.

Teplo závisí v obecném případě nejen na počátečním a konečném stavu, ale též na cestě oba stavy spojující. Nemá tedy totální diferenciál. Teplo předávané systémem do okolí má zápornou hodnotu a teplo přijaté z okolí do systému je kladné.

Sdílení tepla

konvekci
(prouděním)
kondukci
(vedením)
radiaci
(zářením)



Tepelný ekvivalent mechanické práce: počet jednotek mechanické práce nebo energie odpovídající tepelné jednotce 4,1858 J (= 1 cal).

Přeměny ostatních forem energie na teplo

Přeměna energie na teplo bývá nazývána **disipace energie**.

Elektrická energie

Odporový ohřev

Vodič se průchodem proudu zahřívá a uvolňuje teplo (Joulovo teplo).

$$E = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t$$

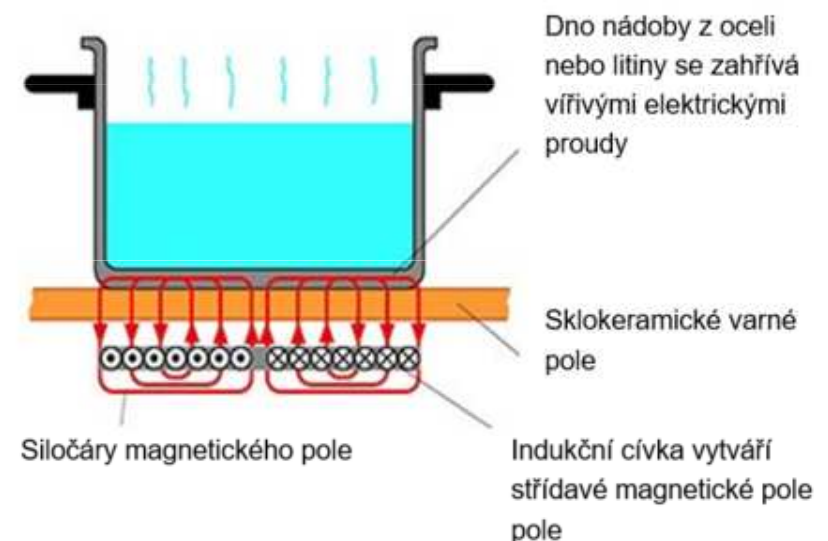
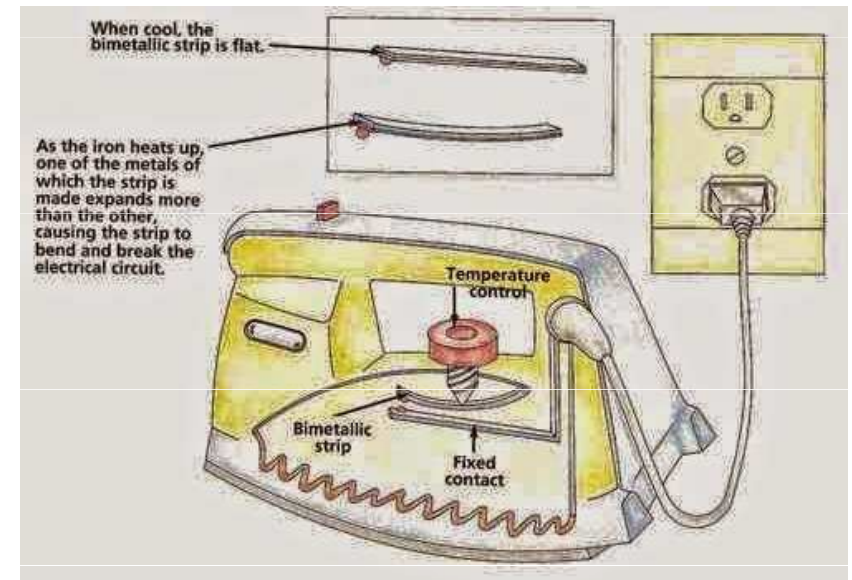
E - Joulovo teplo, U – napětí, I – proud, R - odpor vodiče, t - čas.

Příklady: žehlička, rychlovarná konvice, elektrický vaříč, elektrická pec, žárovka, ...

Indukční ohřev

zahřívání probíhá pomocí indukovaných vířivých proudů.

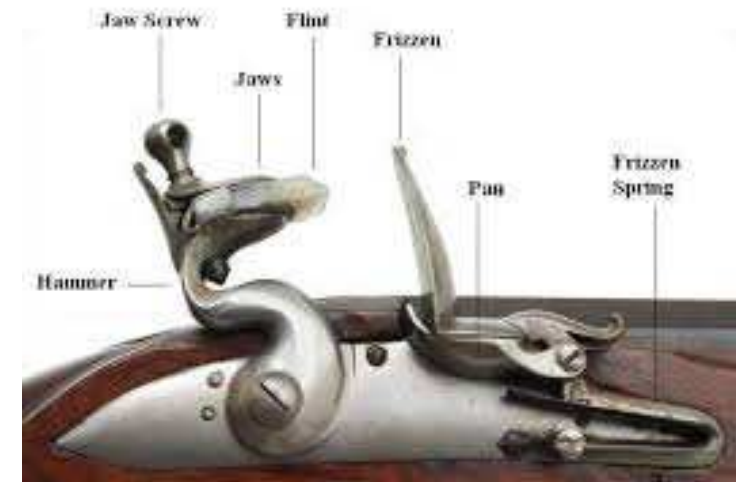
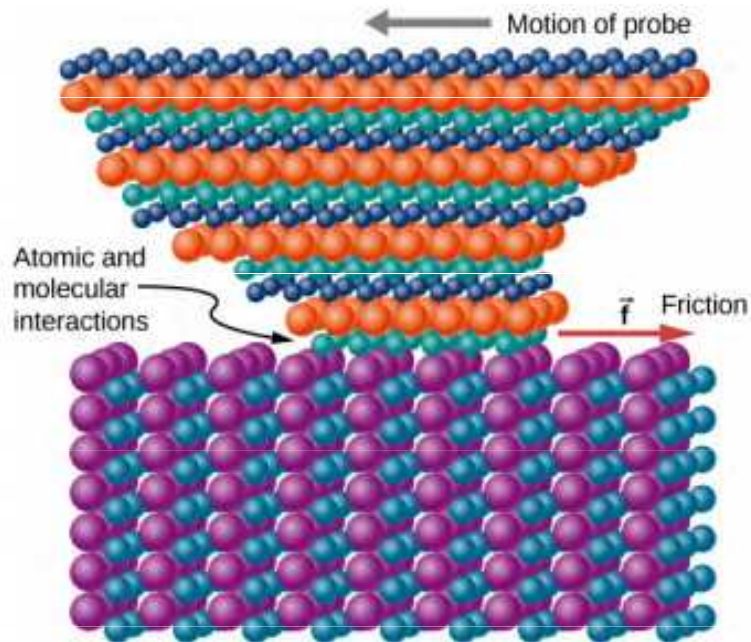
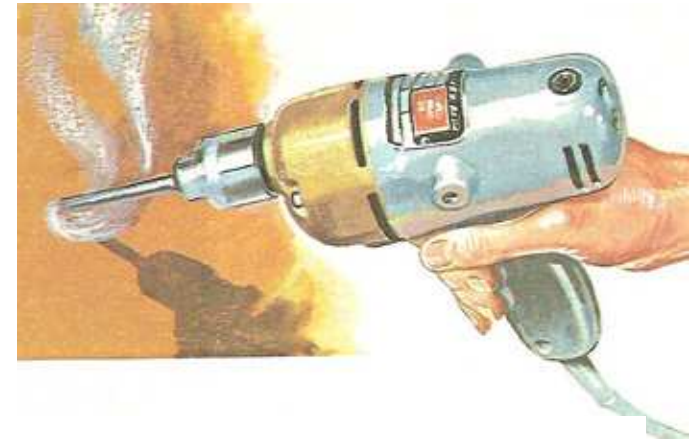
Příklady: indukční elektrický vaříč + hrnec, indukční elektrická pec, ...



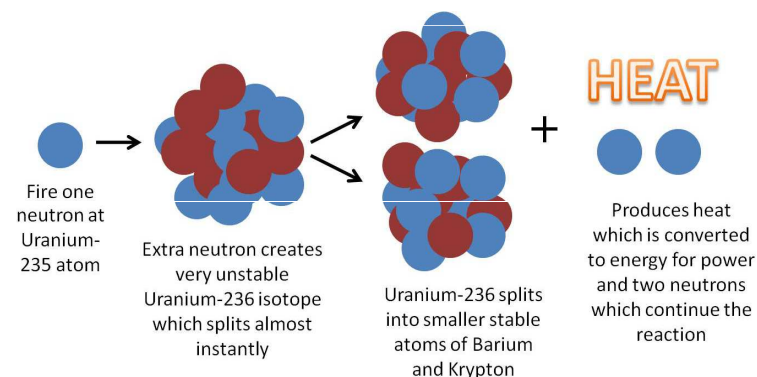
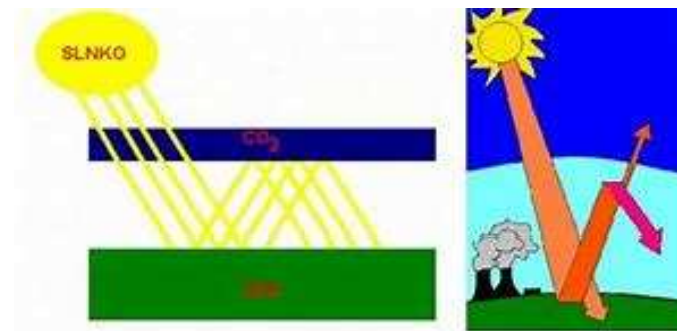
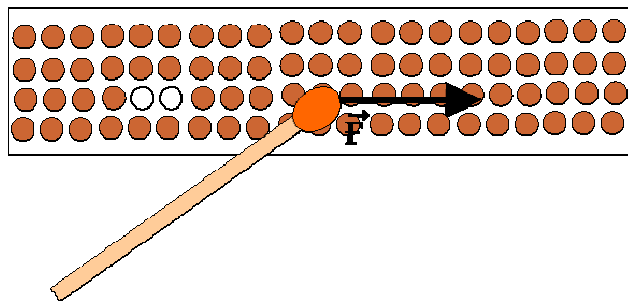
Přeměny ostatních forem energie na teplo

Mechanická energie

k přeměně mechanické práce na teplo dochází prostřednictvím tření.



Koncem zápalky, na kterém je hořlavá směs rychle třeme o škrtdlo a vzniká teplo. Když je teplo, které vzniká při tření dostatečně velké, hořlavá směs vzplane. Dnes je nejběžnější teplota pro vznícení směsi okolo 100°C.



Energie záření
Energie jaderná
Energie chemická (exotermní reakce)



Příklad:

Vlak o hmotnosti 500 t, jedoucí rychlostí $72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, byl brzděním zastaven za dobu 20 s. Jaké teplo vzniklo při brzdění za předpokladu, že veškerá pohybová energie se změnila v teplo?

Řešení:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 20^2 \text{ J} = 10^8 \text{ J} = 0,1 \text{ GJ}$$

Vzniklé teplo nezávisí na čase, po který brzdění probíhalo.



Tepelné kapacity

Tepelná kapacita je fyzikální veličina, která vyjadřuje *množství tepla, kterým se těleso ohřeje o jednotkový teplotní rozdíl* (v SI 1 kelvin). Protože teplo není stavová veličina, je nutné u tepelné kapacity specifikovat i tepelný děj, při kterém k přenosu tepla a ke změně teploty dochází, zpravidla pomocí veličin které se při daném tepelném ději zachovávají, ale předávané teplo na nich obecně závisí (např. tepelná kapacita při konstantním objemu, při konstantním tlaku, při konstantní magnetické indukci apod.).

Měrná tepelná kapacita (měrné teplo) je tepelná kapacita jednotkové hmotnosti látky (v SI jednoho kilogramu). Tepelnou kapacitu tělesa o hmotnosti m lze tedy vyjádřit ve tvaru $C = m \cdot c$, kde c je měrná tepelná kapacita.

Molární tepelná kapacita je tepelná kapacita vztažená na jednotku látkového množství (v SI 1 mol). Tepelnou kapacitu tělesa o látkovém množství n lze tedy vyjádřit ve tvaru $C = n \cdot c_m$, kde c_m je molární tepelná kapacita.

Kalorimetrická rovnice

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

$$Q = n \cdot c_m \cdot \Delta t$$

Příklad



Př.: Za jak dlouho se v rychlovarné konvici o příkonu 2000W ohřeje 1l vody z teploty 20°C na teplotu varu?

Předpokládáme, že se veškerá el. energie spotřebovaná konvicí přemění na teplo, které přijme voda:

Voda

Rychlovarná konvice

Vypočteme teplo potřebné k ohřátí vody z teploty 20°C na 100°C.

Známe výkon a práci, kterou musí varná konvice vykonat je stejná jako teplo potřebné k ohřátí vody. Vypočteme čas potřebný k ohřátí vody.

$$m = 1\text{kg}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$c = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q = 4,18 \cdot 1 \cdot (100 - 20)$$

$$Q = 334,4\text{kJ}$$

$$P = 2000\text{W}$$

$$W = 334,4\text{kJ} = 334400\text{J}$$

$$t = ?$$

$$W = P \cdot t \quad |:P$$

$$t = \frac{W}{P}$$

$$t = \frac{334400}{2000}$$

$$t = 167,2\text{s}$$

$$t = 2\text{ min } 47\text{s}$$

Do vzorce pro výpočet el. práce musíme dosadit v základních jednotkách!

Měrná resp. molární tepelná kapacita jsou funkcemi teploty. Pro daný rozsah teplot se proto používají **střední měrná tepelná kapacita**, resp. **střední molární tepelná kapacita**.

$$C_{p_{mh}} \equiv \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dt}{T_2 - T_1}$$

Smísíme-li látku o měrné tepelné kapacitě c_1 , hmotnosti m_1 a teplotě t_1 s jinou látkou o měrné tepelné kapacitě c_2 , hmotnosti m_2 a teplotě t_2 platí

$$m_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot t_2 = t_s \cdot (m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2)$$

Příklad:

Do kalící olejové lázně o hmotnosti 35 kg, teplotě 25 °C a měrném teple oleje 1675 J.kg⁻¹.deg⁻¹ se vloží ohřátý výkovek o hmotnosti 5 kg a měrném teple 628 J.kg⁻¹.deg⁻¹. Po vyrovnání teplot stoupne teplota olejové lázně na 60 °C. Jaká byla původní teplota výkovku?

$$t_x = (60 \cdot (35 \cdot 1675 + 5 \cdot 628) - 35 \cdot 1675 \cdot 25) / (5 \cdot 628) = 713,7 \text{ °C}$$

Teplota výkovku před ponořením do lázně byla 713,7 °C.

Tepelná kapacita plynu při stálém objemu a stálém tlaku

Izobarická tepelná kapacita (tepelná kapacita při konstantním tlaku): parciální derivace tepla za konstantního tlaku je rovna parciální derivaci stavové veličiny – entalpie.

$$\Delta H = n \cdot c_{mp} \cdot \Delta t \quad c_{mp} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial H_m}{\partial T} \right)_p$$

Izochorická tepelná kapacita (tepelná kapacita při konstantním objemu): parciální derivace tepla za konstantního objemu je rovna parciální derivaci stavové veličiny – vnitřní energie za konstantního objemu.

$$\Delta U = n \cdot c_{mV} \cdot \Delta t \quad c_{mV} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial U_m}{\partial T} \right)_V$$

$$c_{mp} - c_{mV} = -T \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V^2}{\left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T}$$

Pro ideální plyn platí **Mayerův vzorec** $c_{mp} - c_{mV} = R$
 Pro reálné plyny je rozdíl o něco větší

CV	VERSUS	CP
CV is the amount of heat energy that a substance absorbs or releases with the change in temperature where a volume change does not occur		CP is the amount of heat energy that a substance absorbs or releases with the change in temperature where a pressure change does not occur
CV = (dU / dT)		CP = (dH / dT)
Volume is constant		Pressure is constant
Related to the internal energy of a system		Related to the enthalpy of a system

Ekvipartiční teorém: Energie molekuly je rozdělena stejnoměrně mezi všechny platné stupně volnosti molekuly, přičemž na každý platný stupeň volnosti připadá energie

$$u_1 = \frac{1}{2} k T$$

Počet platných stupňů volnosti se rovná počtu nezávislých parametrů, které určují energii soustavy.

$$KE_{avg} = \frac{3}{2} kT \quad \text{per molecule}$$

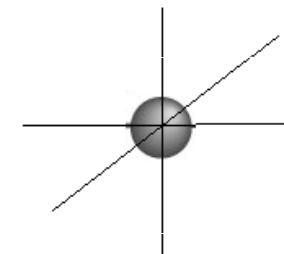
$$KE_{avg} = \frac{3}{2} RT \quad \text{per mole}$$

k = Boltzmann constant = R/N_A

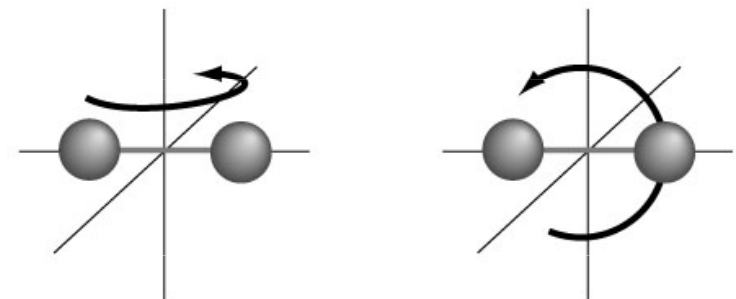
$$k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

R = universal gas constant = kN_A

$$R = 8.3145 \text{ J / mol K}$$







Translational Motion



Rotational Motion



Vibrational Motion

Type of molecule	N	Degrees of freedom	Modes
Monatomic, e.g. Ne 	1	3	3 translational 0 rotational 0 vibrational
Diatomic, e.g. HCl 	2	6	3 translational 2 rotational 1 vibrational
Triatomic linear, e.g. CO ₂ 	3	9	3 translational 2 rotational 4 vibrational
Triatomic non-linear, e.g. H ₂ O 	3	9	3 translational 3 rotational 3 vibrational

Tepelná kapacita plynů

Z kinetické teorie plynů a podle ekvipartičního teorému platí pro 1 mol plynu

Ideální plyn, monoatomární plyny a páry kovů – 3 stupně volnosti translačního pohybu

$$C_{mv} = 3/2 R$$

$$C_{mp} = 3/2R + R = 5/2 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 5/3$$

Dvouatomové plyny - 3 stupně volnosti translačního pohybu + 2 stupně volnosti rotačního pohybu

$$C_{mv} = 5/2 R$$

$$C_{mp} = 5/2R + R = 7/2 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 7/5$$

Víceatomové plyny - 3 stupně volnosti translačního pohybu + 3 stupně volnosti rotačního pohybu

$$C_{mv} = 6/2 R = 3 R$$

$$C_{mp} = 6/2R + R = 8/2 R = 4 R$$

$$K = C_{mp}/C_{mv} = 4/3$$

Tepelná kapacita plynů

Na každý stupeň volnosti pohybu molekul připadá na jeden mol energie $\frac{1}{2} R \cdot T$. Každý stupeň volnosti přispívá k molární tepelné kapacitě C_{mv} hodnotou $R/2$. Odtud pro m stupňů volnosti

$$C_{mv} = mR/2$$

$$C_{mp} = mR/2 + R = (m+2)R/2$$

$$\kappa = C_{mp}/C_{mv} = (m+2)/m$$

Degrees of freedom

3



Monoatomic

$$C_v = \frac{3}{2}R = 12.5 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Helium 12.5
Argon 12.6

5



Diatomic

$$C_v = \frac{5}{2}R = 20.8 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Nitrogen (N₂) 20.7
Oxygen (O₂) 20.8

6



Polyatomic

$$C_v = \frac{6}{2}R = 24.9 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Ammonia (NH₃) 29.0
Carbon dioxide (CO₂) 29.7

Gas	C_v (J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹)	C_p	$C_p - C_v$	γ
Monatomic gases				
He	12.5	20.8	8.33	1.67
Ar	12.5	20.8	8.33	1.67
Ne	12.7	20.8	8.12	1.64
Kr	12.3	20.8	8.49	1.69
Diatomic gases				
H ₂	20.4	28.8	8.33	1.41
N ₂	20.8	29.1	8.33	1.40
O ₂	21.1	29.4	8.33	1.40
CO	21.0	29.3	8.33	1.40
Cl ₂	25.7	34.7	8.96	1.35
Polyatomic gases				
CO ₂	28.5	37.0	8.50	1.30
SO ₂	32.4	40.4	9.00	1.29
H ₂ O	27.0	35.4	8.37	1.30

Tepelná kapacita plynů – závislost na teplotě

Pro ideální plyn jsou hodnoty C_{mv} a C_{mp} konstantní, obecně jsou závislé na teplotě. Tato závislost se vyjadřuje pomocí mnohočlenů s celistvými mocninami teploty:

$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

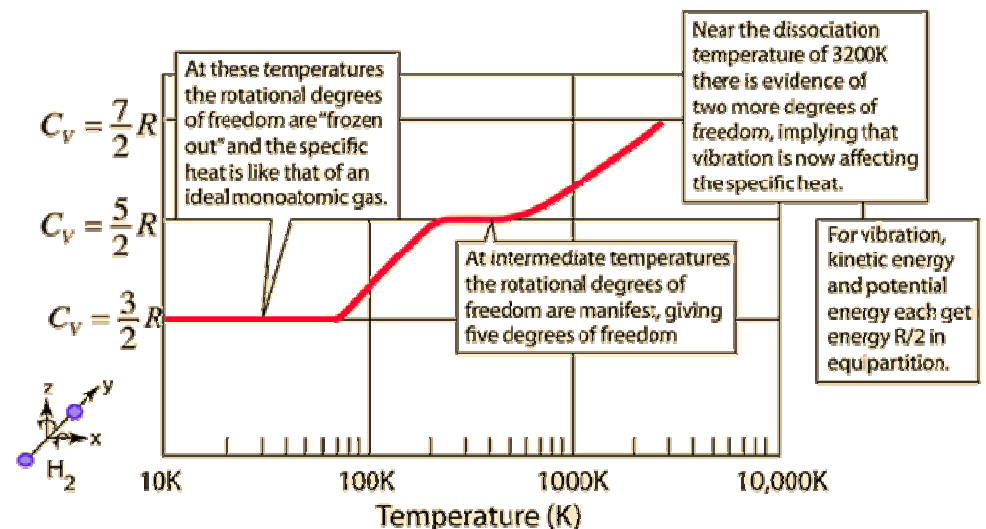
$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^{-2} \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

$$C_{mp}(T) = a + bT + cT^2 + dT^{-1} + eT^{-2} \quad (\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1})$$

konstanty a, b, c, ... jsou tabelovány.

Výpočet příslušného tepla se provádí integrací rovnic v mezích $T_1 - T_2$.

Gas	a	b	c	d
SO ₂	38.91	3.904×10^{-2}	-3.105×10^{-5}	8.606×10^{-9}
SO ₃	48.50	9.188×10^{-2}	-8.540×10^{-5}	32.40×10^{-9}
O ₂	29.10	1.158×10^{-2}	-0.6076×10^{-5}	1.311×10^{-9}
N ₂	29.00	0.2199×10^{-2}	-0.5723×10^{-5}	-2.871×10^{-9}



C: molar specific heat of Various Gases

Gas constant: $R = 8.315 \text{ J/mol.K}$

Molar Specific Heat (J/mol · K) ^a				
Gas	C_P	C_V	$C_P - C_V$	$\gamma = C_P/C_V$
Monatomic Gases				
He	20.8	12.5	8.33	1.67
Ar	20.8	12.5	8.33	1.67
Ne	20.8	12.7	8.12	1.64
Kr	20.8	12.3	8.49	1.69
Diatomic Gases				
H ₂	28.8	20.4	8.33	1.41
N ₂	29.1	20.8	8.33	1.40
O ₂	29.4	21.1	8.33	1.40
CO	29.3	21.0	8.33	1.40
Cl ₂	34.7	25.7	8.96	1.35
Polyatomic Gases				
CO ₂	37.0	28.5	8.50	1.30
SO ₂	40.4	31.4	9.00	1.29
H ₂ O	35.4	27.0	8.37	1.30
CH ₄	35.5	27.1	8.41	1.31

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

$$C_V = \frac{5}{2}R$$

$$C_V \approx \frac{7}{2}R$$

Tepelná kapacita pevných látek

Dulongovo – Petitovo pravidlo: molární tepelné kapacity pevných prvků jsou přibližně rovny hodnotě $26 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Pravidlo platí jen přibližně. Za laboratorní teploty se hodnota C_{mp} pevných prvků pohybuje v intervalu $25 - 29 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ (zejm. těžké kovy). Výjimkou jsou prvky C, B a Si jejichž molární tepelné kapacity jsou nižší a hodnoty $26 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ dosahují jen za vysokých teplot (nad $1000 \text{ }^\circ\text{C}$).

Neumannovo – Koppovo pravidlo: molární tepelné kapacity pevných sloučenin se rovnají stechiometrickému součtu molárních tepelných kapacit pevných prvků z nichž se skládají. Pokud se molekula skládá z n atomů její hodnota C_{mp} by se měla rovnat $26n \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. Pravidlo je spíše orientační, chyba může činit až 10 %.

Při laboratorní teplotě nutno brát do sumace tyto hodnoty:

prvek	C	H	B	N	O	F	ostatní	Pb	I	K
Inkrement molární tepelné kapacity ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)	1.8	2.3	2.7	4.0	4.0	5.0	6.3	6.4	6.6	7.31

U sloučenin obsahujících krystalovou vodu se za každou molekulu vody započítává 9.85 (odpovídá hodnotě C_{mp} ledu).

Příklad:

Výpočet molární tepelné kapacity ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$) pevných látek podle Neumann – Koppova pravidla:

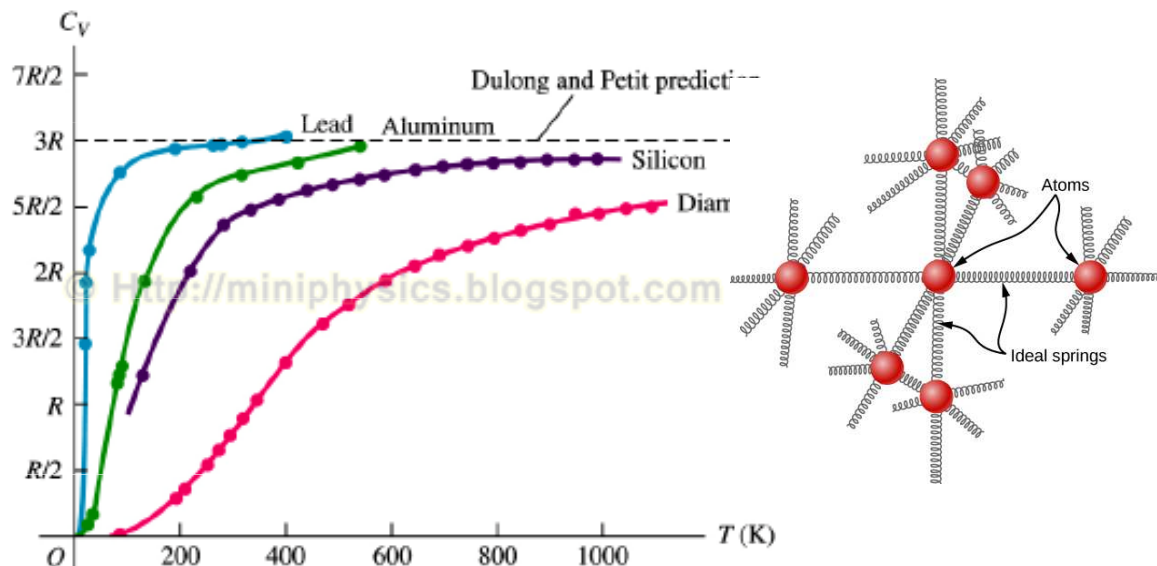
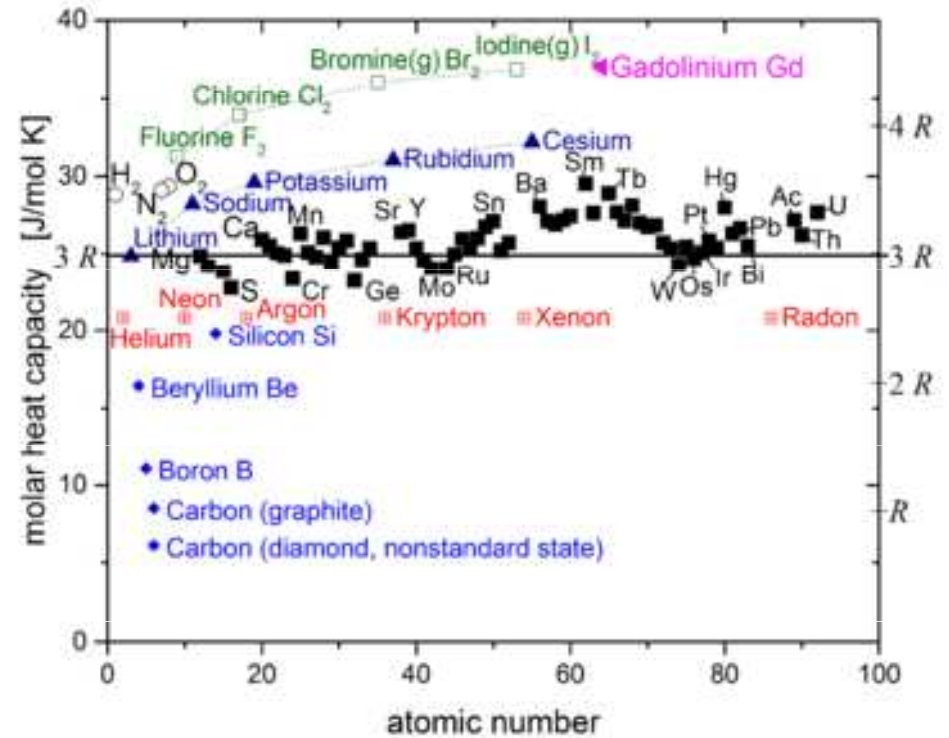
Sloučenina	C_{mp} experiment	C_{mp} vypočteno
CaCO_3	20.44	19.8
PbI_2	19.6	19.6
KNO_3	24.12	23.31
PbCO_3	21.6	20.2

Tepelná kapacita krystalů

V krystalické mřížce nemohou částice vykonávat rotační ani translační pohyb, zůstávají pouze 3 stupně volnosti kmitavého pohybu ve směru 3 souřadnicových os (= prostorový oscilátor). Podle **ekvipartičního principu** by se molární tepelná kapacita pevných látek měla rovnat

$$C_{mp} = 3 R = 25 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}.$$

Tato hodnota je obvykle dosažena až za vysokých teplot.



Comparison of the Dulong-Petit law to experiment values for one mole of substance

	77 K (JK ⁻¹)	273 K (JK ⁻¹)
classical value	24.9	24.9
copper	12.5	24.3
aluminium	9.1	23.8
gold	19.1	25.2
lead	23.6	26.7
iron	8.1	24.8
sodium	20.4	27.6
silicon	5.8	21.8

Tepelné kapacity krystalů – kvantová teorie

Při dostatečně nízkých teplotách vykazují prakticky všechny pevné prvky odchylky od Dulong – Petotova pravidla. Pravidlo je tedy speciálním případem obecnějšího zákona (limitní zákon pro vysoké teploty).

Einsteinova teorie: všechny prostorové oscilátory kmitají se stejnou frekvencí, charakteristickou pro daný prvek.

$$C_V = 3Nk \left(\frac{\varepsilon}{kT} \right)^2 \frac{e^{\varepsilon/kT}}{(e^{\varepsilon/kT} - 1)^2} \quad \varepsilon = h \cdot \nu$$

Einsteinův model predikuje dobře tepelné kapacity spíše pro vyšší teploty, limitně se blíží Dulong–Petitově pravidlu.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} C_V = 3Nk$$

Debyeova teorie: prostorové oscilátory kmitají v oboru frekvencí od nuly do určité maximální hodnoty.

$$C_V = 9Nk \left[\frac{T}{T_D} \right]^3 \int_0^{T_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad x = \frac{h\nu_s n}{2LkT} \quad x_{\max} = \frac{h\nu_s n_{\max}}{2LkT} = \frac{h\nu_s}{2kT} \left(\frac{6N}{\pi V} \right)^{1/3} = \frac{T_D}{T}$$

T_D je Debyeova teplota (tabelována)

Pro výpočet teplotních závislostí tepelných kapacit prvků je nejvhodnější Debyeova funkce, Einsteinova funkce poskytuje nižší hodnoty, zejména v oblasti nízkých teplot. Nicméně Einsteinova teorie je vhodná pro výpočet vibračních příspěvků tepelných kapacit plynů a také u pevných látek při popisu závislosti C_{nv} na T u sloučenin.

Hodnoty Einsteinovy i Debyeovy funkce jsou tabelovány.

Pro úsek hodnot kolem absolutní nuly je podle Debyeovy teorie tepelná kapacita úměrná třetí mocnině teploty:

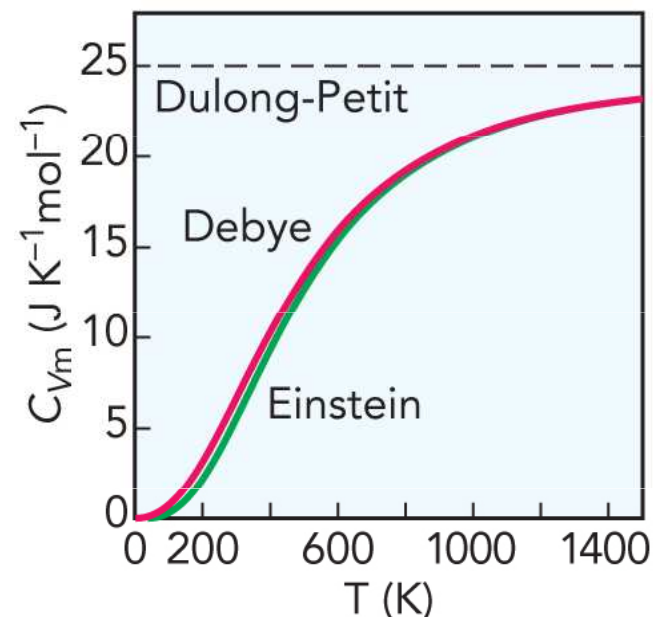
$$C_{mv} = a \cdot T^3$$

To odpovídá experimentálně potvrzenému **kubickému zákonu**.

Molární tepelné kapacity pevných sloučenin

Pohyb n -atomové molekuly jako celku zahrnuje celkem $3n$ lineárních oscilátorů, z toho 3 zahrnují oscilace molekuly jako celku a $3(n-1)$ pohyb atomů v molekule.

Oscilace molekuly jako celku lépe popisuje Debyeova funkce, kmity atomů v molekule lépe popisuje funkce Einsteinova.



Tepelná kapacita kapalin

Tepelná kapacita kapalin se zpravidla s teplotou mění jen málo. Tato závislost se rovněž vyjadřuje pomocí mnohočlenů s celistvými mocninami teploty.

Joule - Koppovo pravidlo platí i pro kapaliny, hodnoty atomových tepel jsou vyšší než pro pevné látky v důsledku vyššího počtu stupňů volnosti v kapalině:

prvek	C	H	B	N	O	F	Ostatní těžké prvky
Inkrement molární tepelné kapacity ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)	3.0	5.0	4.8	4.5	6.0	7.0	8.0

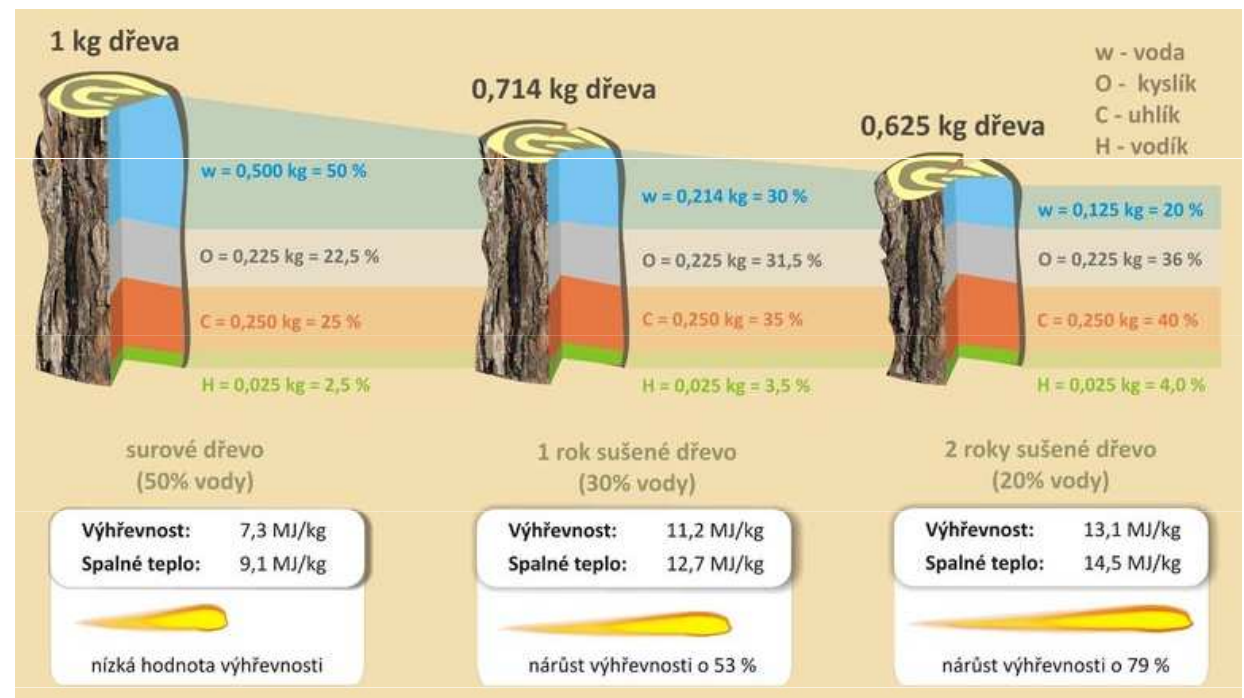
Voda má větší měrnou tepelnou kapacitu ve skupenství kapalném než ve skupenství pevném nebo plynném.

MATERIAL	SPECIFIC HEAT (Joules/gram • °C)
Liquid water	4.18
Solid water (ice)	2.11
Water vapor	2.00

Spalné teplo a výhřevnost v energetice

Spalné teplo je takové množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva (J/kg, resp. J/mol nebo J/m³). Předpokládá se, že voda, uvolněná spalováním, zkondenzuje a energii chemické reakce není třeba redukovat o její skupenské teplo. Tím se spalné teplo liší od výhřevnosti, kde se předpokládá na konci reakce voda v plynném skupenství. Proto je hodnota spalného tepla vždy větší nebo rovna hodnotě výhřevnosti. Rovnost nastává, když spalováním nevzniká voda.

Výhřevnost je vlastnost paliva, která udává, kolik energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky (obvykle 1 kg). Proti spalnému teple není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry, obsažené ve spalinách (předpokládá se, že její teplo je nevyužitelné a uniká v plynném stavu se spalinami).



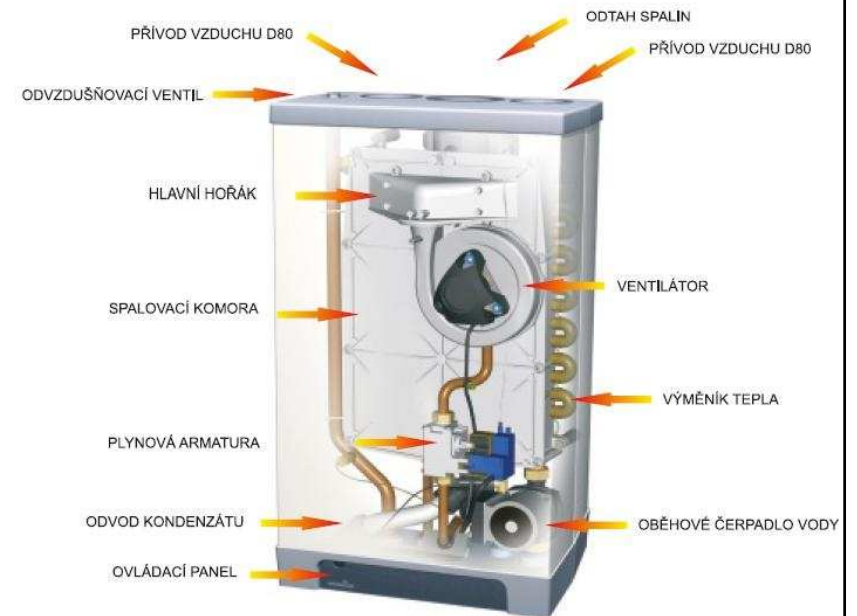
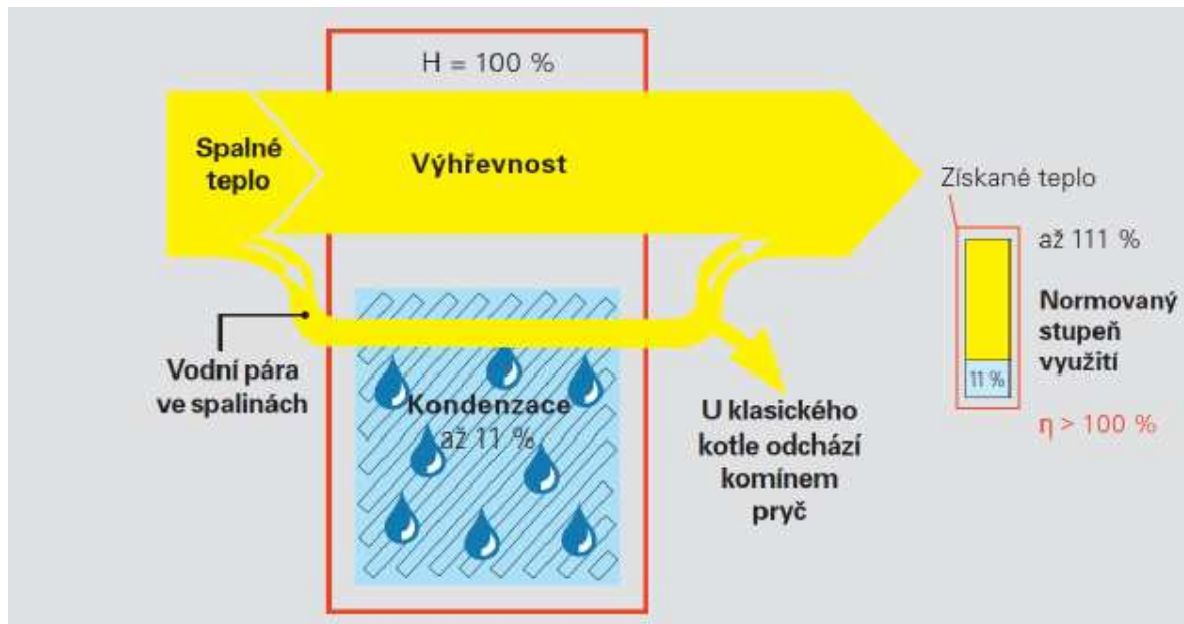
Pevná paliva	Výhřevnost [MJ/kg]
HU tříděné Sokolov	14,17
HU tříděné Most	17,18
ČU energetické Kladno	22,61
ČU energetické Ostrava	29,21
Koks otopový	27,49
Brikety	23,05
Dřevěné brikety	16,21
Dřevo palivové	14,62
Sláma obilná	15,50
Papír	14,11
Komunální odpad	9,12

Kapalná paliva	Výhřevnost [MJ/kg]
Těžký topný olej	40,61
Lehký topný olej	42,30
Motorová nafta	42,61
Autobenzín	43,59

Plynná paliva	Výhřevnost [MJ/m³]
Zemní plyn	33,48
Propan-Butan	46,40
Bioplyn	22,50
Koksárenský plyn	15,62
Svítiplyn	14,50

Kondenzační kotel

Princip **kondenzačního kotle** spočívá v tom, že zužitkuje také teplo, které u běžné topné techniky zůstává bez užitku. Kondenzační kotel odebírá téměř dokonale teplo obsažené ve spalinách a přeměňuje ho dodatečně na topné teplo.



Příklad

Určete hmotnost uhlí potřebného k zahřátí ocelového bloku o hmotnosti 10 000 kg z teploty 20 °C na kovací teplotu 1100 °C. Účinnost pece je 30%. Výhřevnost uhlí je 30 MJ/kg a měrná tepelná kapacita oceli 452 J/kg.

Řešení:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 10000 \cdot 452 \cdot (1100 - 20) = 4\,881,6 \text{ MJ}$$

$$E = Q / 0.3 = 16\,272 \text{ MJ}$$

$$m = E / 30 = 542,4 \text{ kg}$$

Na zahřátí ocelového bloku se spotřebuje 542,4 kg uhlí.

Práce

Formy výměny energie, při nichž zpravidla dochází k silovému působení mezi systémem a okolím, nazýváme **prací**. V mechanice je definována jako energie potřebná na přemístění tělesa z jedné polohy do druhé po zvolené dráze.

Práce je způsob výměny energie při němž se působením síly posouvá nebo otáčí nějaký soubor částic určitým směrem.

Práce závisí v obecném případě nejen na počátečním a konečném stavu, ale též na cestě oba stavy spojující. Nemá tedy totální diferenciál, infinitezimální změna se značí symbolem δW (neúplný diferenciál). Práce předávaná systémem do okolí má zápornou hodnotu a práce přijatá z okolí do systému kladnou.

Podle interakce mezi soustavou a okolím rozeznáváme různé druhy práce:

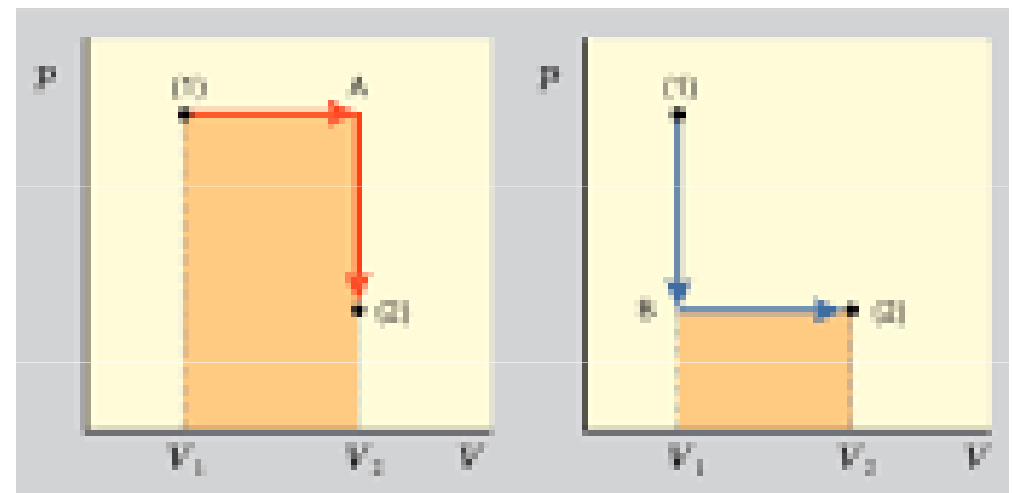
Mechanickou

Objemovou

Povrchovou

Elektrickou

Magnetickou



Vnitřní energie

Mechanická (vnější energie) = zahrnuje kinetickou energii soustavy jako celku (např. se soustava pohybuje vůči okolí) a potenciální energii soustavy v různých vnějších polích (např. gravitačním). Do hodnoty vnitřní energie tedy *není zahrnuta* kinetická a potenciální energie systému jako celku, který se pohybuje v určitém prostoru.

Vnitřní energie = extenzivní stavová veličina charakterizující celkový obsah energie soustavy za definovaných podmínek. Je sumou všech energií uvnitř soustavy: kinetické energie tepelného pohybu částic (atomů a molekul), potenciální energie jejich vzájemné polohy a energie excitace a záření uvnitř systému.

$$dU = \delta Q + \delta W$$

δQ a δW nejsou totální diferenciály, symbol δ pouze infinitezimální změnu (neúplný diferenciál). Po integraci

$$U = Q + W$$

Celkovou hodnotu vnitřní energie U nedokážeme určit, sledovat lze pouze její změny (přírůstek nebo úbytek) na základě I. věty termodynamiky. Změna vnitřní energie izolovaného systému je nulová.

Vnitřní energie reálné látky závisí na teplotě, tlaku a velikosti soustavy (extenzivní veličina).

Příklad

Kočka lezoucí na strom zvyšuje díky práci svalů svoji potenciální energii danou tíhovým polem Země, a při skoku na zem zvyšuje svoji energii kinetickou a její potenciální energie klesá. Oba tyto druhy energie tvoří **mechnickou energii**.

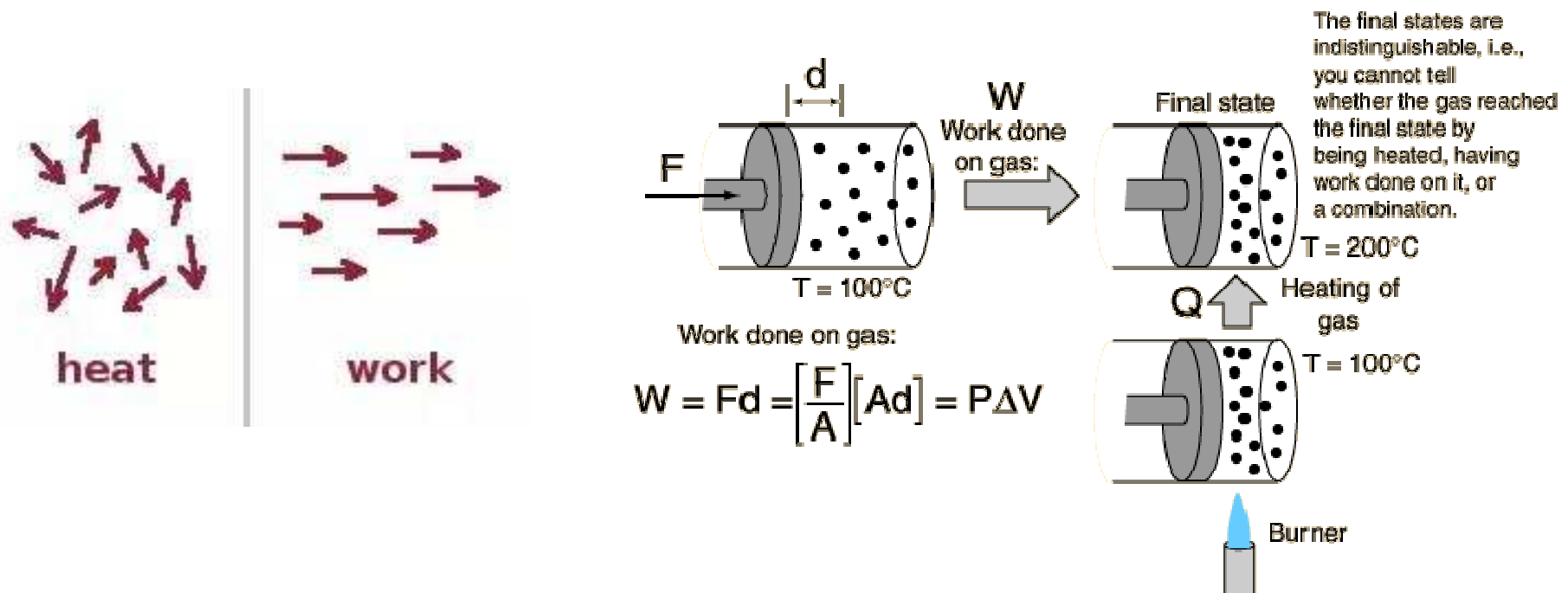
Kočka ale také může být najezená či vyhladovělá, může jí být zima nebo teplo a tyto vlastnosti stejně jako přeměna energie ve svalovou práci souvisí s **energií vnitřní**.



Při změně stavu soustavy se mění i její **vnitřní energie**, která se může zvětšit dodáním energie zvenčí (z okolí) nebo zmenšit předáním energie okolí (formou tepla nebo práce).

Změna vnitřní energie pro danou změnu stavu je vždy stejná bez ohledu na cestu (způsob) tohoto přechodu (závisí jen na počátečním a konečném stavu, její diferenciál je totálním diferenciálem).

Na rozdíl od vnitřní energie teplo ani práce nejsou stavové veličiny (nejsou funkcí stavu, jsou funkcí cesty termodynamického procesu, jejich diferenciál není totálním diferenciálem).



Práce a teplo jsou dvě různé formy přenosu energie mezi systémem a okolím.

I. věta termodynamiky a zákon zachování energie

Zákon zachování energie:

Množství energie v izolované soustavě je konstantní.

Celková energie izolované soustavy zůstává při všech dějích konstantní.

První věta termodynamická je rozšířením zákona zachování energie na disipativní systémy, tj. systémy vyměňující s okolím teplo. Jestliže např. systém převzal z okolí teplo Q ($Q > 0$), pak dle povahy děje přeměnil tuto energii buď jen na vzrůst vnitřní energie systému, nebo jenom na práci ($W < 0$) nebo v určitém poměru na obě.

Existuje stavová funkce zvaná vnitřní energie U , pro jejíž totální diferenciál dU platí

$$dU = đQ + đW$$

po integraci

$$\Delta U = Q + W$$

Změna vnitřní energie soustavy se rovná součtu tepla a práce, které se vymění mezi soustavou a okolím.

Izochorické ohřívání a ochlazování látky

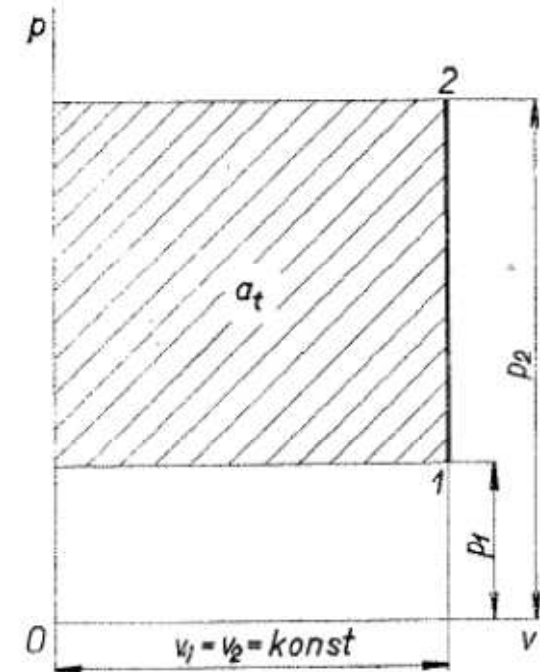
Izochorický děj probíhá za konstantního objemu soustavy. S okolím se tudíž nevyměňuje žádná energie ve formě objemová práce.

$$\Delta U = Q + W = Q - p \cdot \Delta V$$

$$\Delta V = 0$$

$$W = 0$$

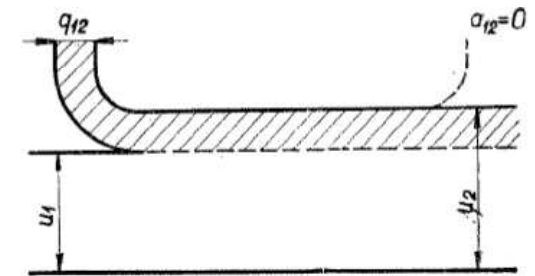
$$\Delta U = Q$$



Obr. 16. Izochorická změna v p—v diagramu

Teplo vyměněné mezi soustavou a okolím je rovno změně vnitřní energie soustavy.

Veškeré teplo dodané soustavě za konstantního objemu je využito k jejímu ohřevu.



Obr. 17. Energetická bilance izochorické změny

Izobarické ohřívání a ochlazování látky

Při izobarickém ději je konstantní tlak. Objemová práce ideálního plynu:

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = -p \cdot \Delta V$$

$$\Delta U = Q - p \cdot \Delta V$$

odtud

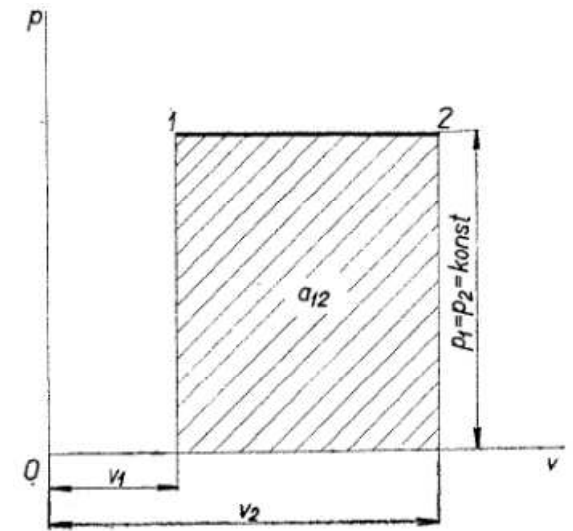
$$U_2 - U_1 = Q - p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$(U_2 + p \cdot V_2) - (U_1 + p \cdot V_1) = Q$$

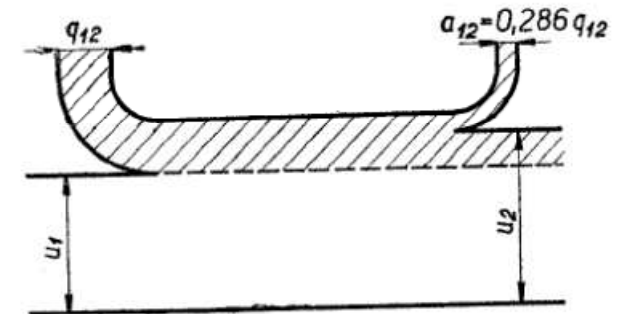
$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q$$

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V$$

Teplo pohlcené při izobarickém ději se rovná zvýšení **enthalpie**.

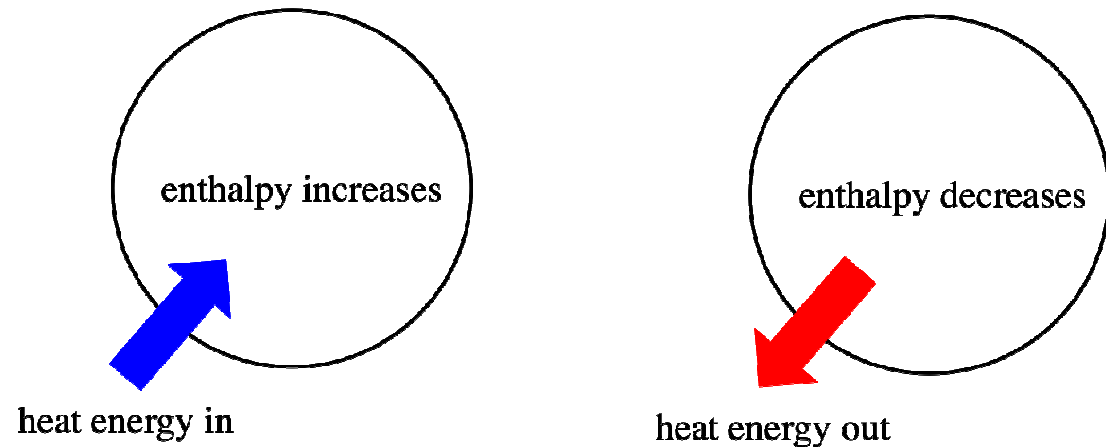


Obr. 18. Izobarická změna v $p-v$ diagramu



Obr. 19. Energetická bilance izobarické změny

Enthalpie



Enthalpie (izobarické teplo) je definováno

$$H = U + P \cdot V$$

je extenzivní stavová veličina, jejíž absolutní hodnotu nelze určit (podobně jako u vnitřní energie), sledovat lze pouze její změny (přírůstek nebo úbytek). Protože při izobarickém ději jsou U i P stavové veličiny, je stavovou veličinou i H . Její změna nezávisí na cestě a její diferenciál je **totálním diferenciálem**.

Diferenciální tvar rovnice pro změnu vnitřní energie při izobarickém ději je

$$dU = dH - p \cdot dV$$

$$\Delta U = \Delta H - p \cdot \Delta V$$

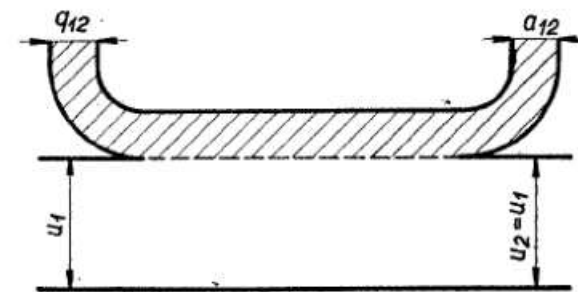
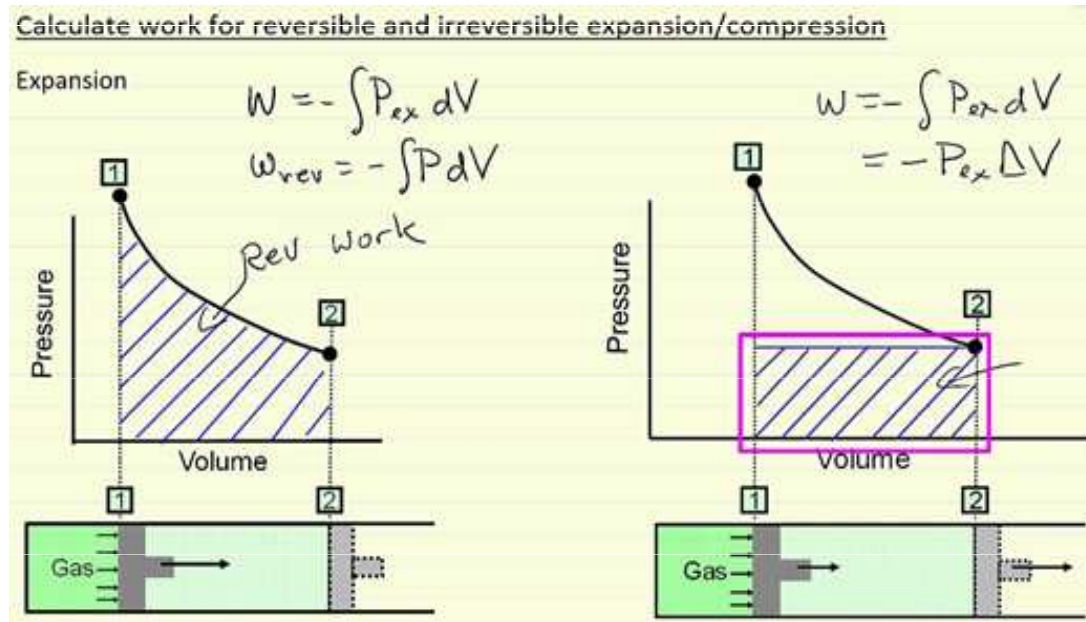
Izotermická komprese a expanze plynu

Izotermický děj probíhá při konstantní teplotě. Pro ideální plyn je vnitřní energie soustavy určena jen pohybovou energií molekul (ekvipartiční teorém), která je dána výlučně teplotou, nikoliv tlakem. Proto je změna vnitřní energie při izotermickém ději s ideálním plynem nulová.

$$\Delta U = Q + W = 0$$

$$Q = -W$$

Vykonaná práce se rovná teplotu přijatému soustavou. Přijatá práce se rovná teplotu odevzdanému soustavou.



Obr. 21. Energetická bilance izotermické změny

Adiabatická (isoentropická) expanze a komprese plynu

Adiabatický děj probíhá v tepelně izolovaných soustavách. Energie se vyměňuje s okolím jen formou práce.

$$Q = 0$$

$$\Delta U = W$$

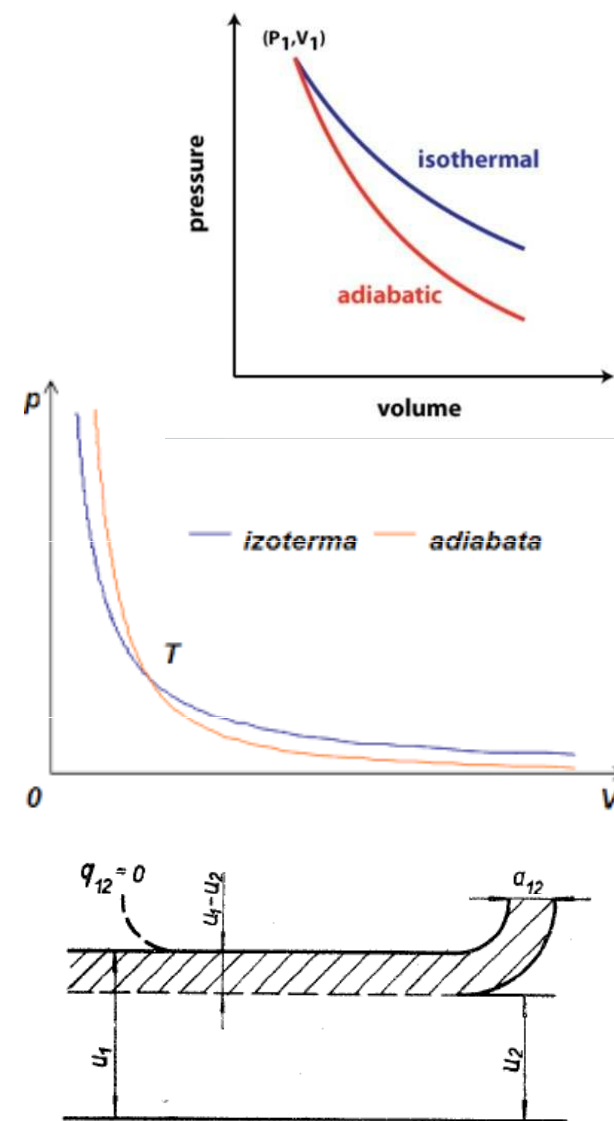
Pro výpočet konečného stavu plynu, kterou zpravidla neznáme, je u **vratného** adiabatického děje

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa$$

$\kappa = c_p/c_v$ je poměr molárních tepelných kapacit pro daný plyn (Poissonova konstanta).

U **nevratného** adiabatického děje neplatí Poissonovy rovnice. Výpočty vychází z kalorimetrické rovnice

Při adiabatickém ději se nemění stavová veličina **entropie** = isoentropický děj.

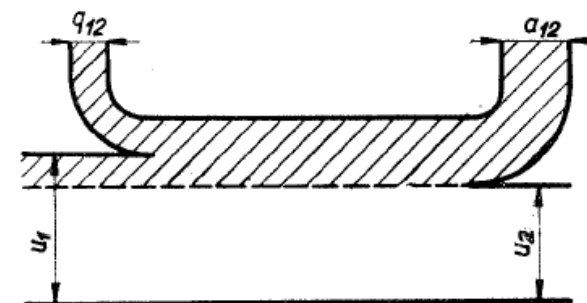
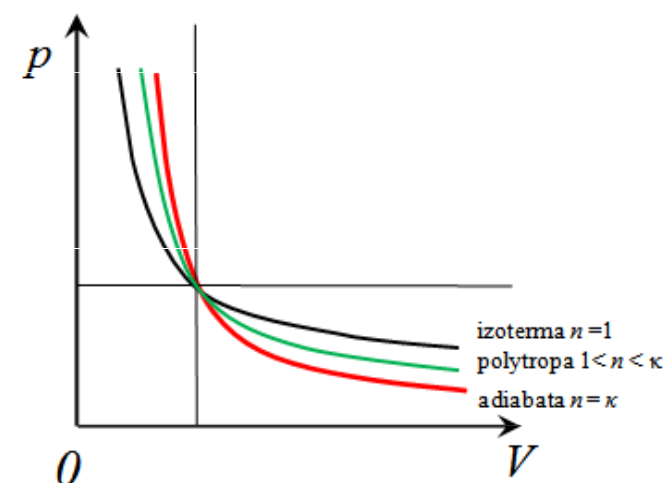
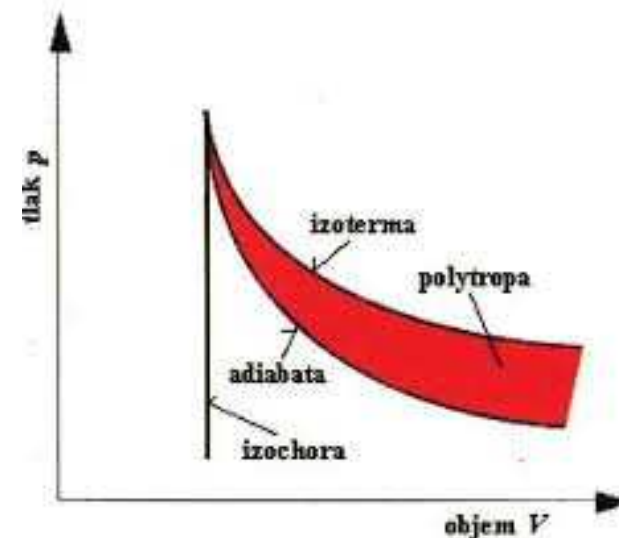


Obr. 25. Energetická bilance adiabatické změny

Polytropická expanze a komprese plynu

Polytropický děj je termodynamický proces, který více odpovídá reálným dějům, než klasické jednoduché procesy jako např. děj izotermický nebo adiabatický. Lze jej definovat tak, že **tepelná kapacita** (uzavřené) soustavy je při něm konstantní. Při polytropickém ději se obecně mění všechny stavové veličiny (odtud název).

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad n = \text{konst}$$

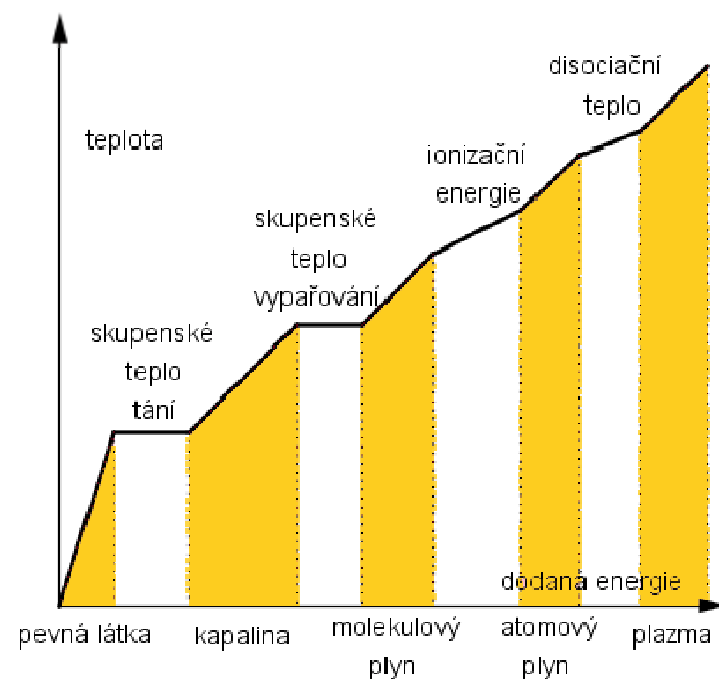
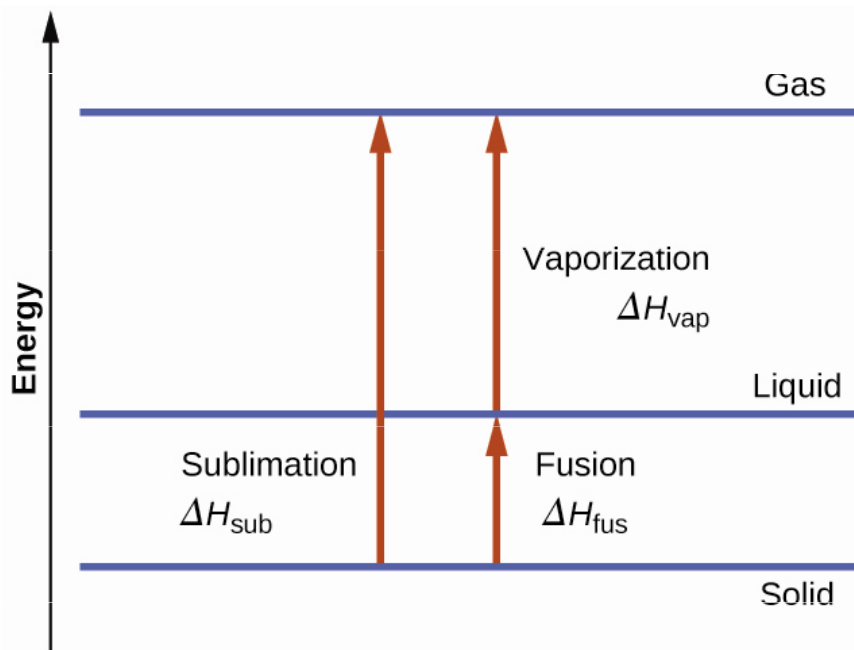
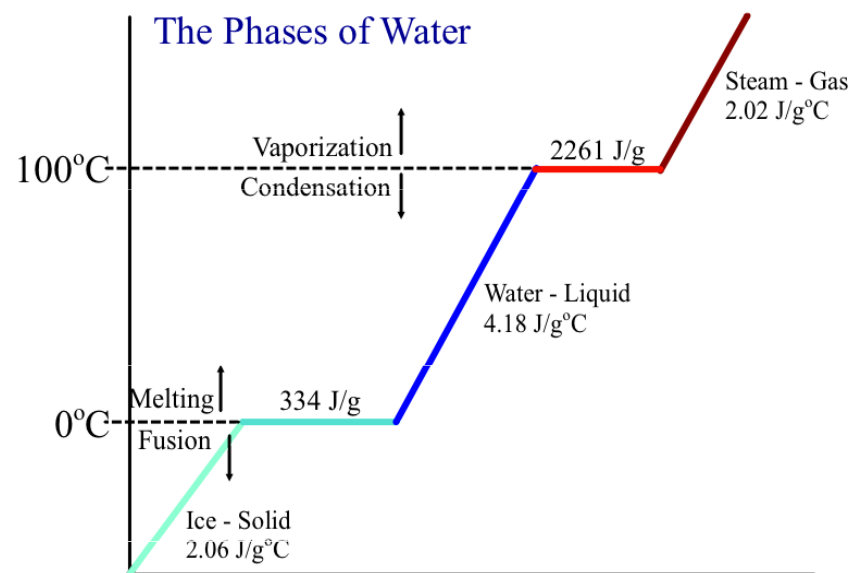


Obr. 26. Energetická bilance polytropické změny

Process	Equations			
	Internal energy ΔU	Work (\dot{W})	Heat (\dot{Q})	Equation of state ($PV = mRT$)
Isothermal Process $T = C$	Zero	$P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$	W	$P_1 V_1 = P_2 V_2$
Isochoric Process $V = C$	ΔU	Zero	ΔU	$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$
Adiabatic Process $PV^\gamma = C$ $S = C$	-W	$\frac{(P_1 V_1 - P_2 V_2)}{\gamma - 1}$ $\frac{(P_2 V_2 - P_1 V_1)}{1 - \gamma}$	Zero	$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$
Isobaric Process $P = C$	ΔU	$P(V_2 - V_1)$ $R(T_2 - T_1)$	ΔH	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Polytropic process $PV^n = C$	ΔU	$\frac{(P_1 V_1 - P_2 V_2)}{n - 1}$ $\frac{R(T_1 - T_2)}{n - 1}$	$W + \Delta U$ $\left(\frac{\gamma - n}{\gamma - 1}\right) \frac{R}{1 - n} (T_2 - T_1)$	$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

Termodynamika fázových přeměn – molární tepla

Fázový přechod je fyzikální pojem, označující skokovou změnu makroskopických vlastností termodynamického systému (fáze) při změně nějaké termodynamické proměnné (např. teploty).



Příklad

Jakou rychlostí se musí pohybovat olověný projektil o hmotnosti 1 g vystřelený proti stěně, aby při nárazu na stěnu roztál? Teplota tání olova je 327 °C, enthalpie tání olova je 25 J.g⁻¹, měrná tepelná kapacita za normálního tlaku je 0,12 J.K⁻¹.g⁻¹, teplota projektilu je 20 °C. Zahřátí stěny lze zanedbat.

$$T_1 = 20 \text{ °C}$$

$$T_2 = 327 \text{ °C}$$

$$\Delta H_t = 25 \text{ J.g}^{-1}$$

$$c_p = 0,12 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$$

$$v = ?$$

Kinetická energie projektilu

$$E_k = \frac{1}{2}.m.v^2$$

Teplo nezbytné k zahřátí projektilu

$$\Delta H = m.c_p.\Delta T + \Delta H_t = 61,84 \text{ J}$$

$$E_k = \Delta H$$

$$\frac{1}{2}.m.v^2 = m.c_p.\Delta T + \Delta H_t$$

$$v = \underline{351,7 \text{ m.s}^{-1}}$$

Kulka by se musela pohybovat nadzvukovou rychlostí.

Příklad: Hliníkový žebřík o hmotnosti 10 kg se vlivem vysoké teploty při požáru zahřeje z teploty 25 °C na 700 °C. Kolik tepla se spotřebuje na zahřátí?

Teplota tání hliníku je 639 °C. Žebřík se roztaví (fázový přechod s → l).

$$\Delta H_{\text{tání}} = 10480 \text{ J/mol.}$$

$$C_{p(s)} = 20.68 + 12.39 \cdot 10^{-3} T \text{ J/mol}$$

$$C_{p(l)} = 29.3 \text{ J/mol}$$

$$Ar_{\text{Al}} = 26.98$$

$$T_1 = 25 + 273 = 298 \text{ K}$$

$$T_{\text{tání}} = 639 + 273 = 912 \text{ K}$$

$$T_2 = 700 + 273 = 973 \text{ K}$$

$$\Delta H = C_{p(s)} \cdot (T_{\text{tání}} - T_1) + \Delta H_{\text{tání}} + C_{p(l)} \cdot (T_2 - T_{\text{tání}})$$

$$\Delta H = 20.68 \cdot (912 - 298) + 12.39 \cdot 10^{-3} (912 - 298)^2 + 10480 + 26.98 \cdot (973 - 912) = 34170 \text{ J/mol.}$$

$$Q = 10 \cdot 34170 / 26.98 = \underline{12665 \text{ kJ}}$$

Výpočet výparného tepla kapalin

Trouton's Rule

$$\frac{\Delta_{vap} H_m}{T} = \Delta_{vap} S_m \approx 88 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Troutonovo – Pictetovo pravidlo

Hodnota entropie vypařování je pro většinu kapalin v rozmezí 85-88 J/mol.K.

T_b = bod varu kapaliny

$$\Delta S_{vap} = \frac{\Delta H_{vap}}{T_b}$$

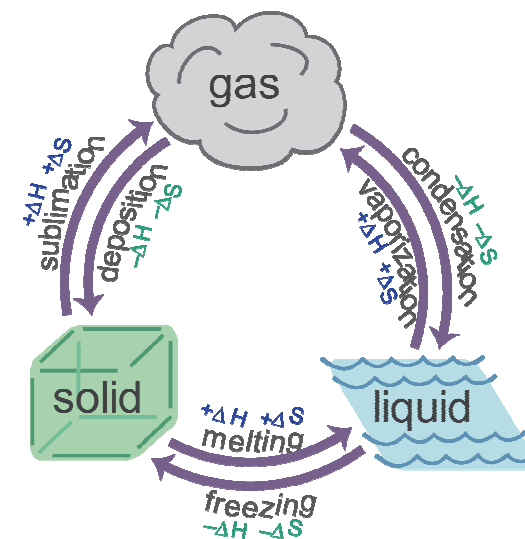
Clausius – Clapeyronova rovnice

Clausius – Clapeyronova rovnice v diferenciálním tvaru a rovnice pro tenzi par (**Antoineova** nebo **Calingaertova - Davisova**).

$$\Delta H_{výp} = R \cdot T_V^2 \cdot \ln(10) \cdot B / (t + C)^2$$

TABLE 5.1 Enthalpies and Entropies of Vaporization and Fusion

Substance	Liquid \rightleftharpoons Vapor			Solid \rightleftharpoons Liquid		
	T_b K	$\Delta_{vap} H_m$ kJ mol ⁻¹	$\Delta_{vap} S_m$ J K ⁻¹ mol ⁻¹	T_m K	$\Delta_{fus} H_m$ kJ mol ⁻¹	$\Delta_{fus} S_m$ J K ⁻¹ mol ⁻¹
He	4.20	0.084	19.66	3.45	0.021	6.28
H ₂	20.38	0.904	44.35	13.95	0.117	8.37
N ₂	77.33	1.777	72.13	63.14	0.720	11.38
O ₂	90.18	6.820	75.60	54.39	0.444	8.16
H ₂ O	373.15	40.656	108.951	273.15	6.009	22.096
SO ₂	263.13	24.916	94.68	197.48	7.401	37.45
CH ₄	111.16	8.180	73.26	190.67	.941	10.38
C ₂ H ₆	184.52	14.715	79.75	89.88	2.858	31.80
CH ₃ OH	337.85	35.27	104.39	175.25	3.167	18.07
C ₂ H ₅ OH	351.65	38.58	109.70	158.55	5.021	31.67
n-C ₄ H ₁₀	272.65	22.40	82.13	134.80	4.661	34.572
C ₆ H ₆	353.25	30.76	87.07	278.68	10.590	35.296
C ₇ H ₈						
(toluene)	383.77	33.48	87.19			
CH ₃ COOH	391.45	24.35	61.92	289.76	11.72	40.42



Příklad: *Stabilita alotropických modifikací*

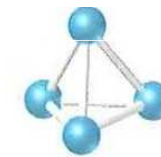
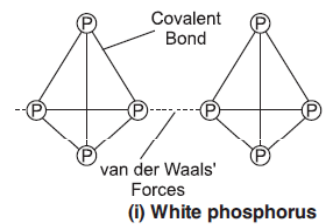
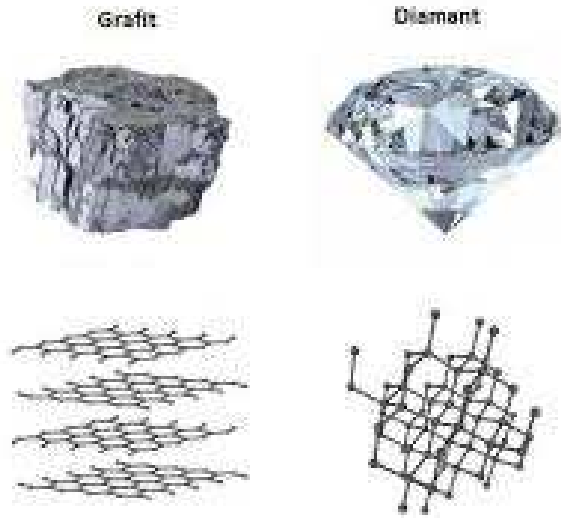
Stálé modifikaci je za standardních podmínek přiřazena nulová entalpie.

C (diamant) \rightarrow C (grafit)

$$\Delta H_{298} = -1883 \text{ kJ/mol}$$

P (bílý) \rightarrow P (červený)

$$\Delta H_{298} = -17,57 \text{ kJ/mol}$$



White phosphorus



Red phosphorus



Přeměna diamantu na grafit může probíhat (termodynamická nestálost), je však neměřitelně pomalá (kinetická stálost).

Objemová práce

Objemová práce = mechanická práce při níž se mění objem soustavy. Zmenšování objemu soustavy je **kompresa** (práci koná okolí), zvětšování objemu soustavy je **expanze** (práci koná soustava).

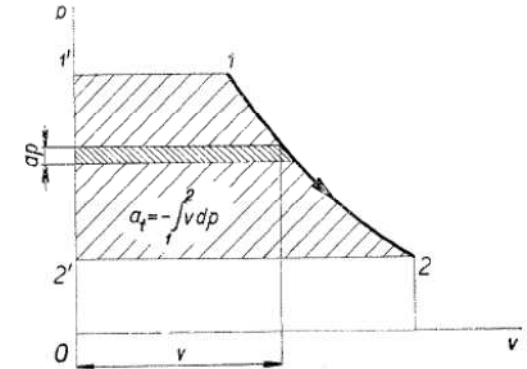
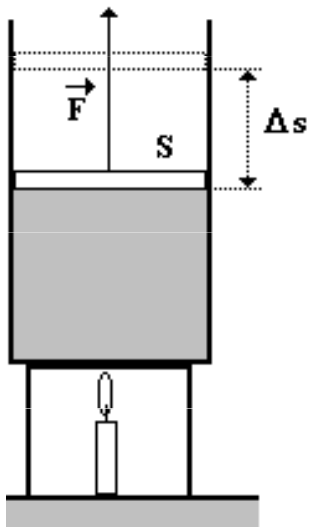
Objemová práce konaná soustavou při izobarickém ději je

$$W = -F \cdot \Delta s = -P \cdot S \cdot \Delta s = -p \cdot \Delta V$$

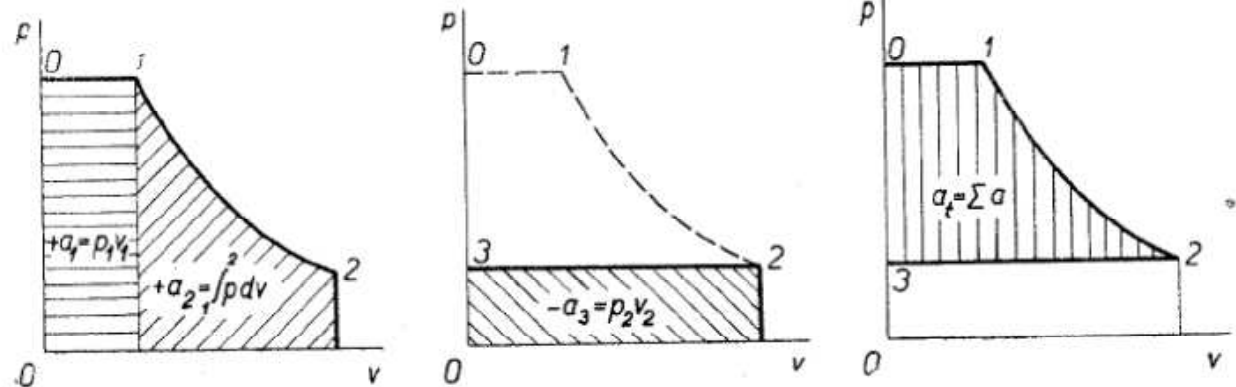
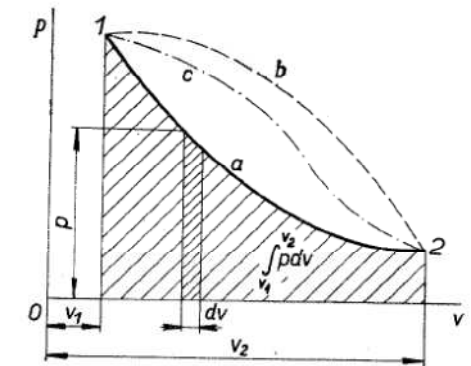
(záporné znaménko definitivně znamená, že práci koná soustava, nezávisle na tom zda jde o kompresi nebo expanzi)

Absolutní práce

Technická práce



Obr. 11. Technická práce



Obr. 12. Souvislost technické a absolutní práce

Tepelný stroj

Tepelný stroj je stroj, který pracuje na základě prvního termodynamického zákona, podle něhož je možné vzájemně přeměnit teplo na vnitřní energii anebo práci. Tepelný stroj musí zároveň respektovat druhý termodynamický zákon, podle kterého není možné vykonávat přeměnu energií úplně.

tepelné motory: teplo dodávané ze zásobníku s vyšší teplotou se přeměňuje na práci při vzniku zůstatkového tepla, které je potřeba dovést do zásobníku s nižší teplotou. Pracovní cyklus takového stroje v p-V diagramu probíhá ve směru hodinových ručiček.

chladičí stroje nebo **tepelná čerpadla:** přivedená mechanická práce se spotřebovává na přenos tepla ze zásobníku s nižší teplotou do zásobníku s vyšší teplotou. Pracovní cyklus takového stroje v p-V diagramu probíhá proti směru hodinových ručiček.

Účinnost tepelného stroje ve výkon stroje dělený jeho příkonem:

$$\eta \leq \eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Cyklus tepelného stroje: stroj odebere teplo teplejšímu zásobníku. Část tohoto tepla se přemění na práci, zbytek se předá chladnějšímu zásobníku.

Tepelný motor	η_{\max}	η
parní stroj lokomotivy	0,35	0,09 - 0,15
parní turbína	0,60	0,25 - 0,35
plynová turbína	0,55	0,22 - 0,37
čtyřdobý zážehový motor	0,65	0,20 - 0,33
vznětový motor	0,73	0,30 - 0,42
raketový motor	0,75	0,50



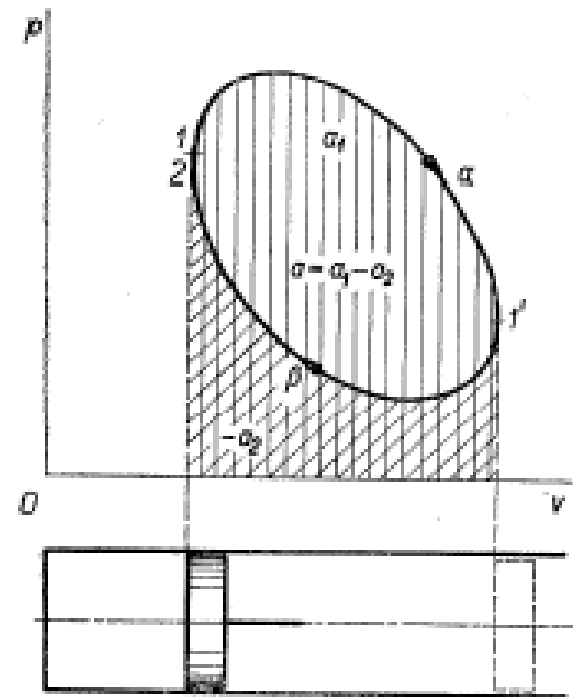
I. věta termodynamiky a kruhový děj

Kruhovým (cyklickým) dějem nazýváme takový děj, při kterém je konečný stav systému totožný s výchozím. Změny **stavových veličin** jsou při kruhovém ději nulové. **Teplo** a **práce** nejsou stavovými veličinami a proto nejsou při kruhovém ději nulové.

Formulace I. věty termodynamické:

Nelze realizovat uzavřenou a izolovanou soustavu jejíž energie by vlivem nějakého děje probíhajícího uvnitř soustavy rostla, tj. nelze vyrobit perpetuum mobile prvního druhu.

Z I. věty termodynamické plyne nemožnost konstrukce perpetua mobile prvního druhu, tj. cyklicky pracujícího stroje, kde by vykonaná práce byla větší než přijaté teplo. Pro cyklický děj platí $U = 0$ (počáteční a koncový stav je stejný), a tedy $Q + W = 0$ (cyklický děj)



Obr. 29. Kruhový proces v $p-v$ diagramu

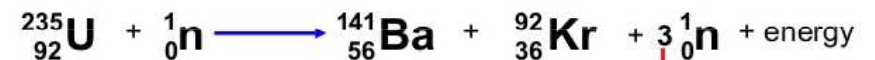
Příklad

Nechť je naším systémem kostka ledu o hmotnosti 1 g a výchozím stavem teplota $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlak 100 kPa. V systému proběhl sled dějů: kostka byla ohřáta na teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, při které roztála. Kapalná voda byla při této teplotě elektrolyzována. Vzniklá směs vodíku a kyslíku byla expandována na tlak 200 Pa a zapálena. Vodní pára vzniklá reakcí měla po skončení reakce teplotu $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Byla ochlazena na teplotu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a stlačena na 100 kPa. V průběhu stlačování došlo k desublimaci (sněžení) a systém se vrátil do původního termodynamického stavu. Proběhl kruhový děj.

Formulace I. věty termodynamiky předpokládá konstantní hmotnost systému – z tohoto důvodu do takto formulovaného principu nezapadají **jaderné reakce**.



NUCLEAR FISSION EQUATION



$$\begin{aligned}\text{Mass defect} &= \text{mass before} - \text{mass after} \\ &= [235.04 + 1.01] - [140.91 + 91.93 + 3(1.01)] \\ &= 0.18 \text{ a.m.u} \\ &= 0.18 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 2.988 \times 10^{-28} \text{ kg}\end{aligned}$$

$$E = mc^2$$

$$\begin{aligned}&= 2.988 \times 10^{-28} \times (3.0 \times 10^8)^2 \\ &= 2.69 \times 10^{-11} \text{ J} \\ &= 1.68 \times 10^8 \text{ eV}\end{aligned}$$

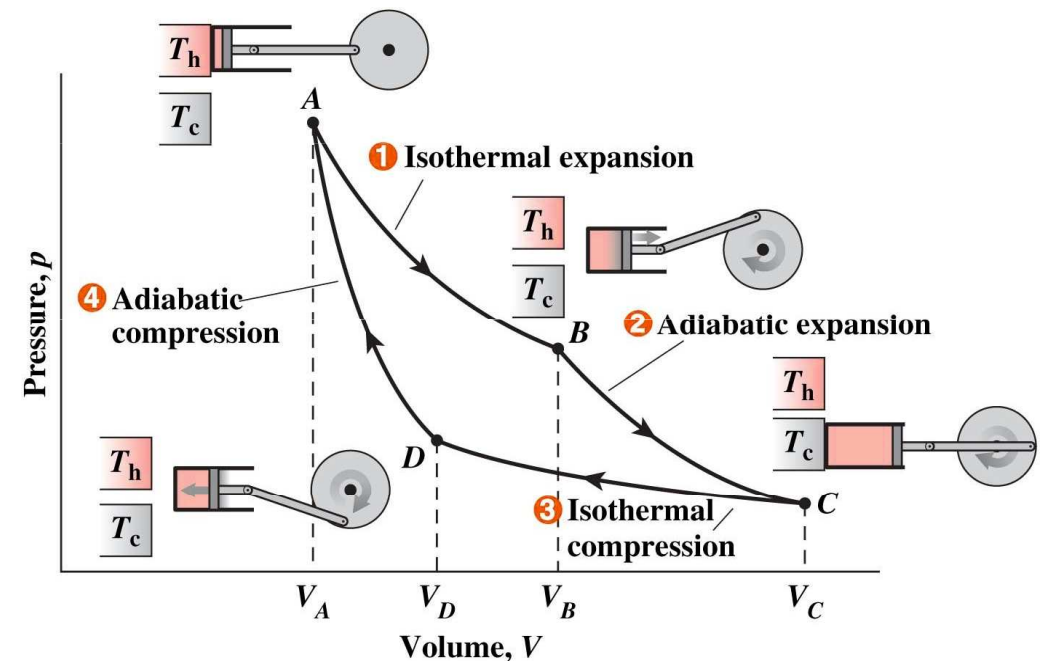
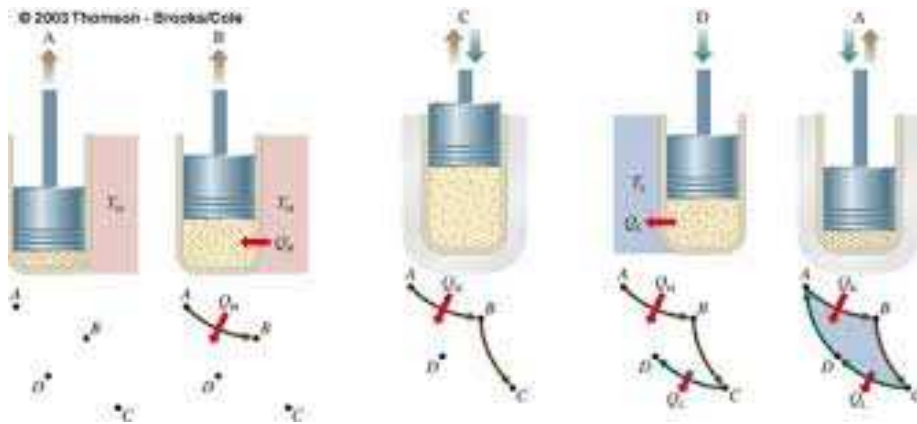
Carnotův cyklus

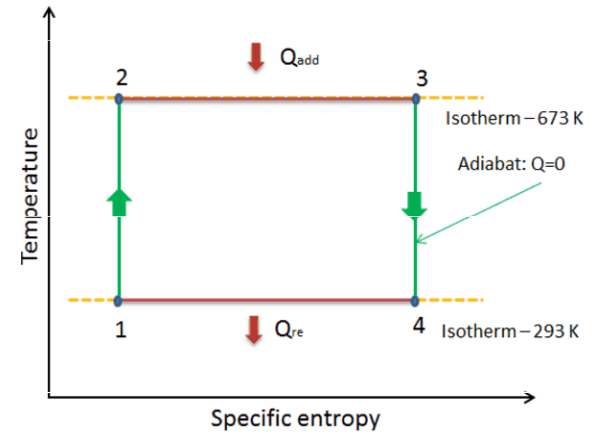
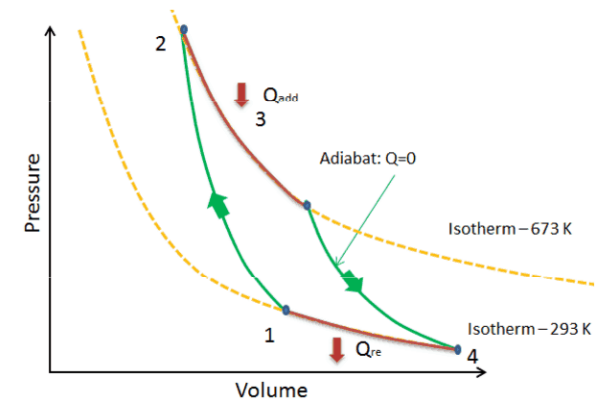
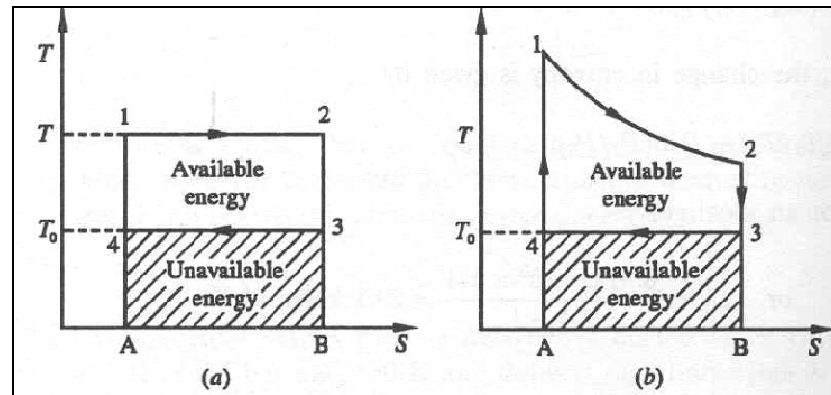
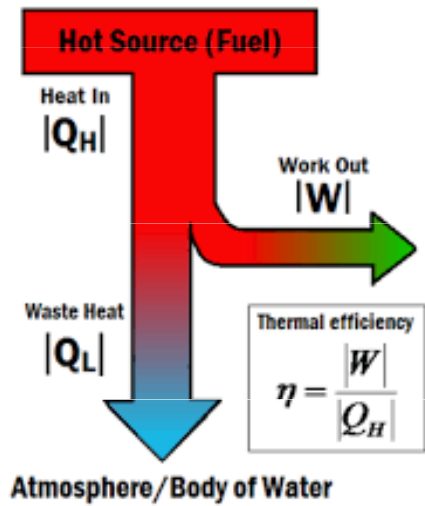
Carnotův stroj je hypotetické zařízení odebírající teplo z teplejšího zásobníku o teplotě T_h , konající práci a odevzdávající teplo chladnějšímu zásobníku o teplotě $T_c < T_h$. Předpokládá se, že zásobníky mají tak velkou kapacitu, že se jejich teploty při odebírání a dodávání tepla nemění. Náplní stroje je ideální plyn, jehož izochorická tepelná kapacita nezávisí na teplotě.

V Carnotově stroji probíhá cyklický děj, jenž je tvořen čtyřmi dílčími vratnými ději:

- 1 - 2: izotermická vratná expanze,
- 2 - 3: adiabatická vratná expanze,
- 3 - 4: izotermická vratná komprese,
- 4 - 1: adiabatická vratná komprese.

Velikost práce v Carnotově cyklu odpovídá velikosti uzavřené plochy v P-V diagramu.





Účinnost Carnotova stroje

$$\eta = \frac{-W}{Q_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Carnotův teorém (věta): *největší možná účinnost tepelného stroje nezávisí na jeho náplni ale jen na teplotách tepelných zásobníků.*

Účinnost tepelného stroje lze zvyšovat rozdílem teplot obou zásobníků. 100% účinnost lze dosáhnout pokud by chladnější lázeň měla teplotu absolutní nuly.

Příklad

Jaká musí být teplota kotle, aby při teplotě okolí 293 K byla účinnost vratného tepelného stroje 0,5?

$$\eta = 0,5$$

$$T_1 = 293 \text{ K}$$

$$T_2 = ?$$

$$\eta = 1 - T_1/T_2$$

$$0,5 = 1 - 293/T_2$$

$$T_2 = 568 \text{ K} = \underline{295 \text{ }^\circ\text{C}}$$

II. věta termodynamiky

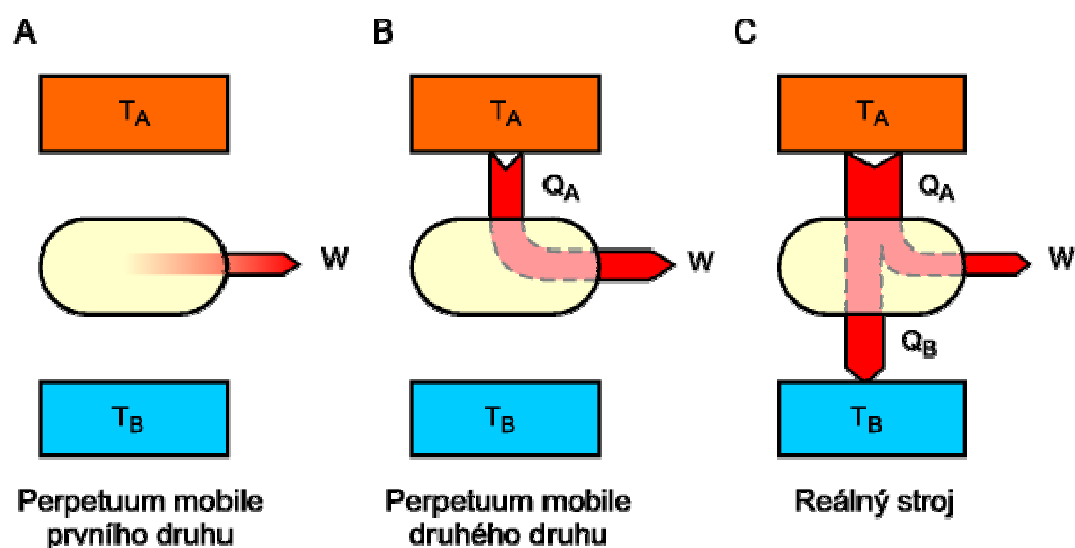
Umožňuje určovat uskutečnitelnost a směr děje.

Teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší
(Clausius 1850)

Nelze sestavit periodicky pracující stroj, který by pouze odebíral z tepelného zásobníku teplo a měnil ho na rovnocennou práci (nelze sestavit perpetuum mobile druhého druhu) (Kelvin 1851 a Planck 1891)

Perpetuum mobile I. druhu: vyrábí energii z ničeho.

Perpetuum mobile II. druhu: odebírá energii z okolí.



Entropie a nevratné děje

Při **vratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem kompenzují, jejich součet je nula.

Při **nevratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem nekompenzují, jejich součet je větší než nula.

Při **kruhovém ději** (vratném i nevratném) je změna entropie soustavy nulová.

Protože samovolně probíhají pouze nevratné děje, lze změnu entropie považovat za **kritérium samovolnosti** děje.

Typické nevratné děje:

Expanze plynu do vakua a škrčení plynu (viz Joule-Thomsonův jev)

Mísení plynů volnou difuzí

Předávání (sdílení) tepla

Tření

Pracovní cykly tepelných strojů

Pracovní cyklus tepelného stroje (tepelný oběh) je série postupných změn stavu pracovní látky, které začínají a končí ve stejném stavu. Existuje více modelových pracovních cyklů tepelného stroje, speciální postavení mezi nimi má **Carnotův cyklus**. Pro teoretické výpočty technických aplikací se používají i jiné modely tepelných cyklů.

V oblasti *pístových spalovacích motorů* se pracuje s:

Ottovým cyklem

Dieselovým cyklem

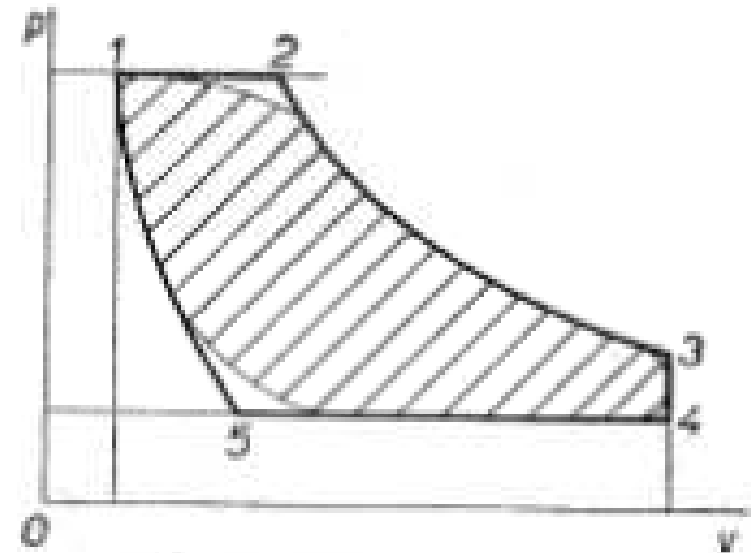
Seiligerovým cyklem

V oblasti *plynových turbín* se pracuje s:

Humphreyovým cyklem

Erikson-Braytonovým cyklem

Joule-Braytonovým cyklem

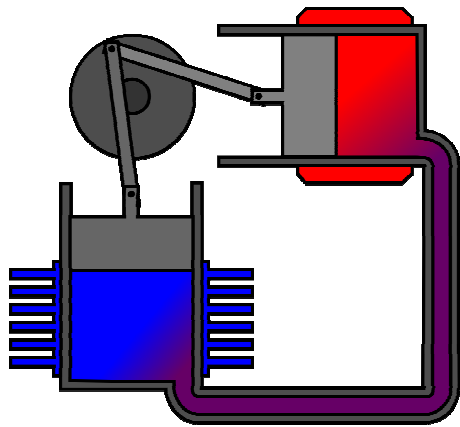


Obr. 31. Cyklus parního stroje

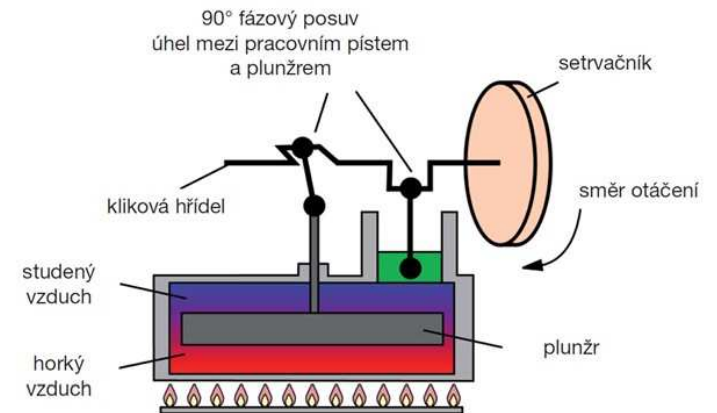
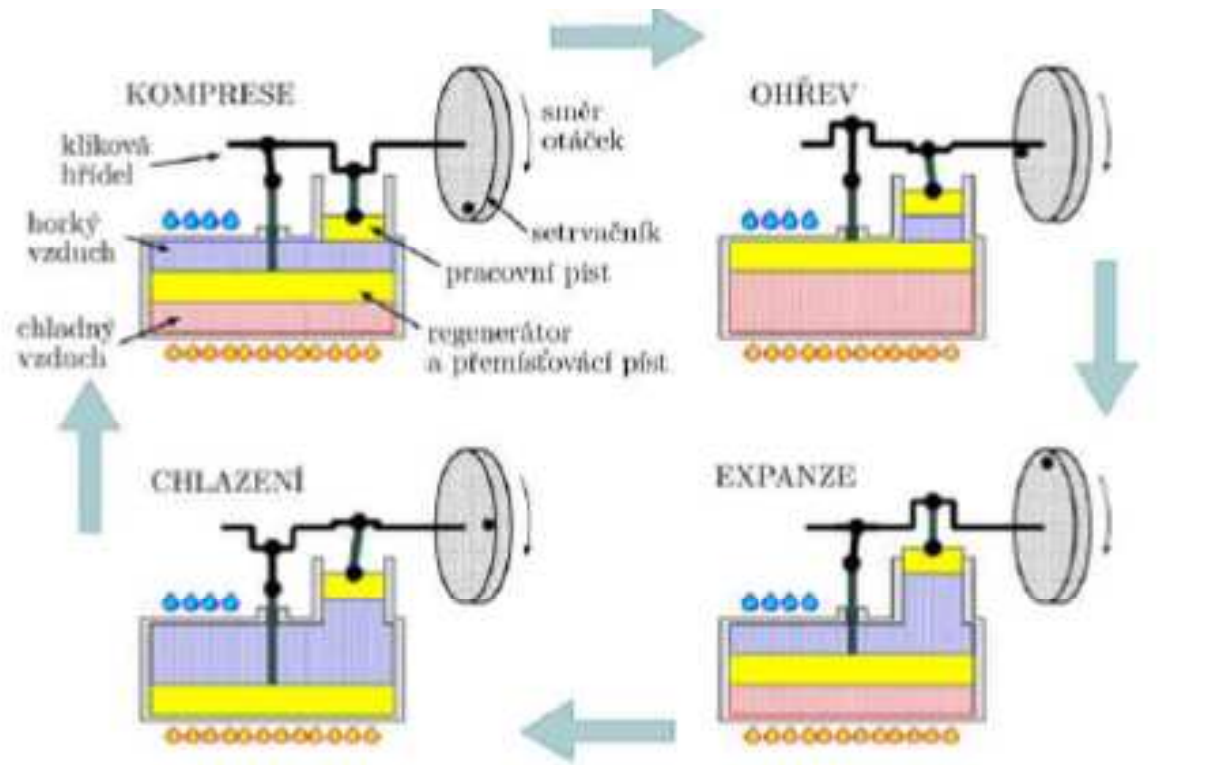
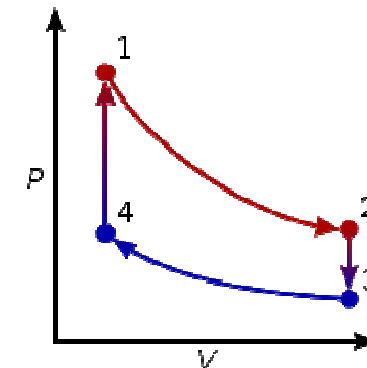
Tepelný stroj pracující v **Carnotově cyklu** je *ideální stroj*.

Stirlingův motor

Pracovní plyn je stlačován v chladnější části stroje a expanduje v teplejší části stroje za vzniku práce.

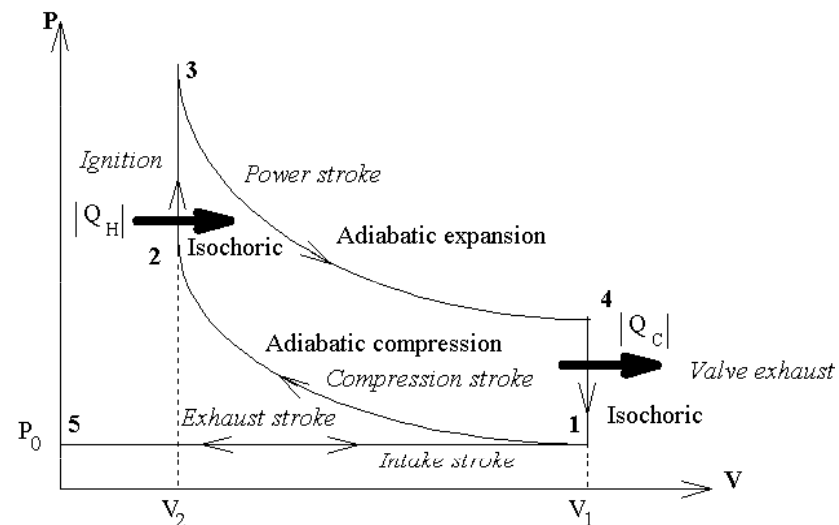


- 1-2 Izotermická expanze.
- 2-3 Isochorické chlazení
- 3-4 Izotermická komprese
- 4-1 Isochorické zahřátí



Ottův cyklus (zážehový motor)

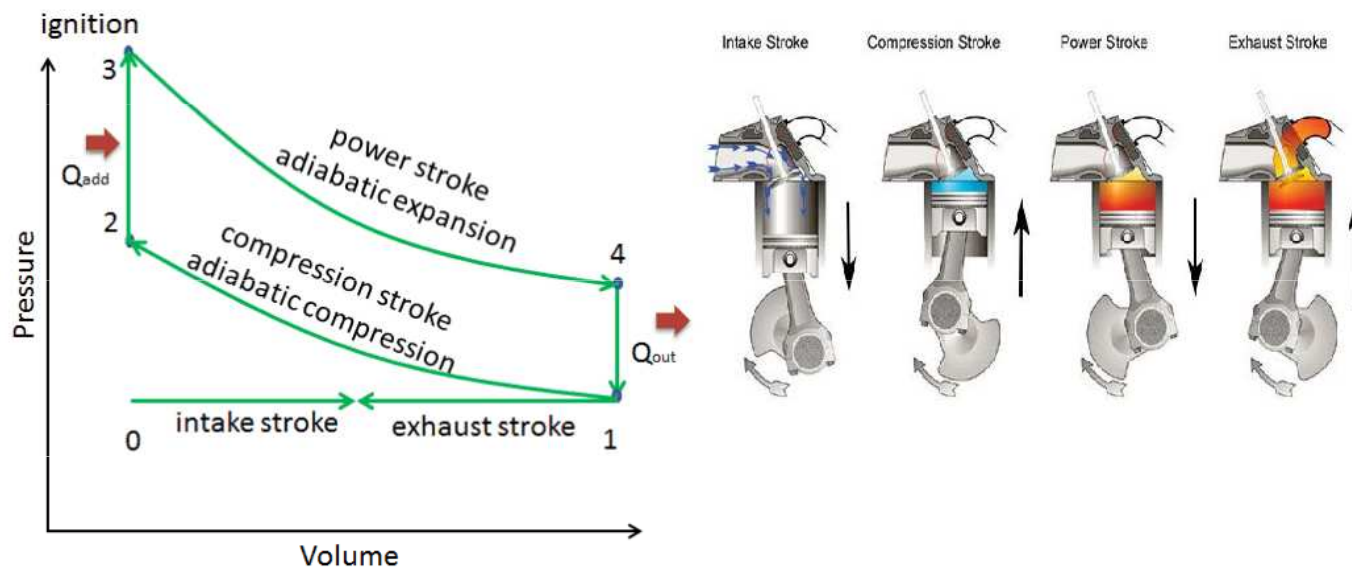
Ottův cyklus je ideální tepelný oběh sestávající z vratných změn. Ottův cyklus popisuje práci tepelného stroje, kde přívod a odvod tepla se uskutečňuje ve velmi krátkém čase - beze změny pohybu pístu. Takové přiblížení lze použít pouze pro zážehové motory, kde je rychlost spalování (přívod tepla) dostatečně vysoká. Odvod tepla je realizován výměnou náplně, což zhruba odpovídá předpokladům modelu.



- 1 až 2 - adiabatická komprese
- 2 až 3 - izochorický přívod tepla
- 3 až 4 - adiabatická expanze
- 4 až 1 - izochorický odvod tepla

Účinnost Ottova cyklu závisí pouze na **kompresním poměru** ϵ tj. poměru objemu ve stavech 1 a 4 k objemu ve stavech 2 a 3 a na exponentu adiabaty (Poissonova konstanta)

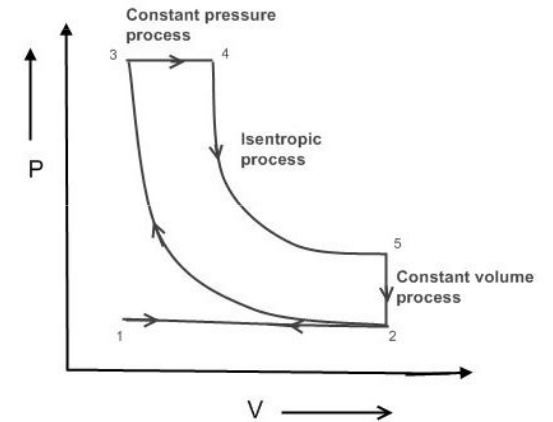
$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$



Dieselův cyklus (vznětový motor)

Dieselův cyklus je ideální tepelný oběh sestávající z vratných změn. Dieselův cyklus popisuje práci tepelného stroje, kde přívod tepla probíhá plynule během expanze a odvod tepla se uskuteční ve velmi krátkém čase – beze změny pohybu pístu. Takové přiblížení je možno použít pro vznětové motory při plném zatížení, kde se větší část spalování (přívod tepla) koná během expanze. Odvod tepla je realizován výměnou náplně.

Diesel Cycle P-V Diagram



Účinnost Dieselova cyklu závisí na:

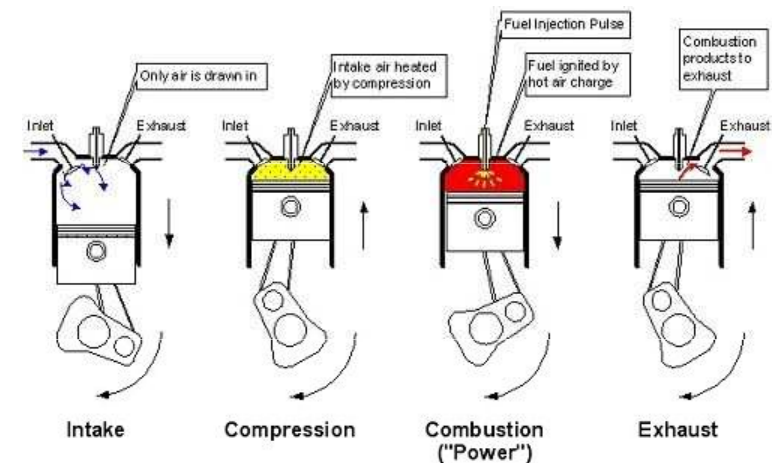
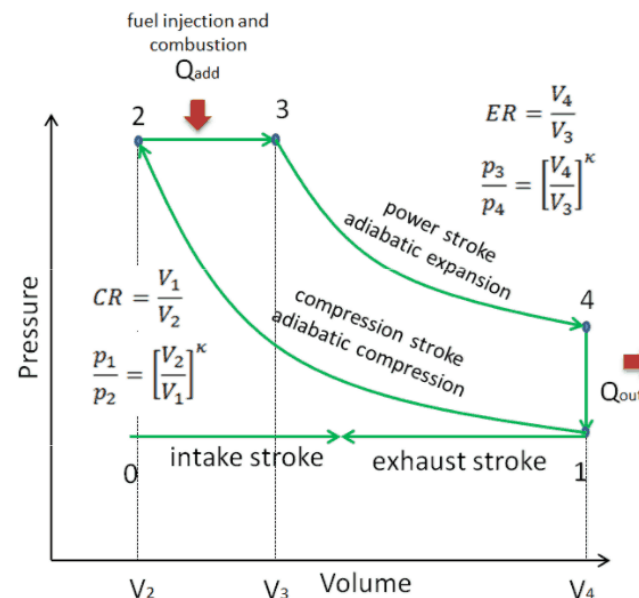
kompresním poměru, tj. poměru objemu ve stavu 1-4 k objemu ve stavu 2-3 (ϵ)

exponentu adiabaty – Poissonově konstantě (k)

množství přivedeného tepla, tj. poměru objemu ve stavu 3 k objemu ve stavu 2 (ρ)

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)}$$

- 1 až 2 – adiabatická komprese
- 2 až 3 – izobarický přívod tepla
- 3 až 4 – adiabatická expanze
- 4 až 1 – izochorický odvod tepla



Entropie a nevratné děje

Při **vratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem kompenzují, jejich součet je nula.

Při **nevratných dějích** se entropie soustavy a okolí navzájem nekompenzují, jejich součet je větší než nula.

Při **kruhovém ději** (vratném i nevratném) je změna entropie soustavy nulová.

Protože samovolně probíhají pouze nevratné děje, lze změnu entropie považovat za **kritérium samovolnosti** děje.

Typické nevratné děje:

Expanze plynu do vakua a škrčení plynu (viz Joule-Thomsonův jev)

Mísení plynů volnou difuzí

Předávání (sdílení) tepla

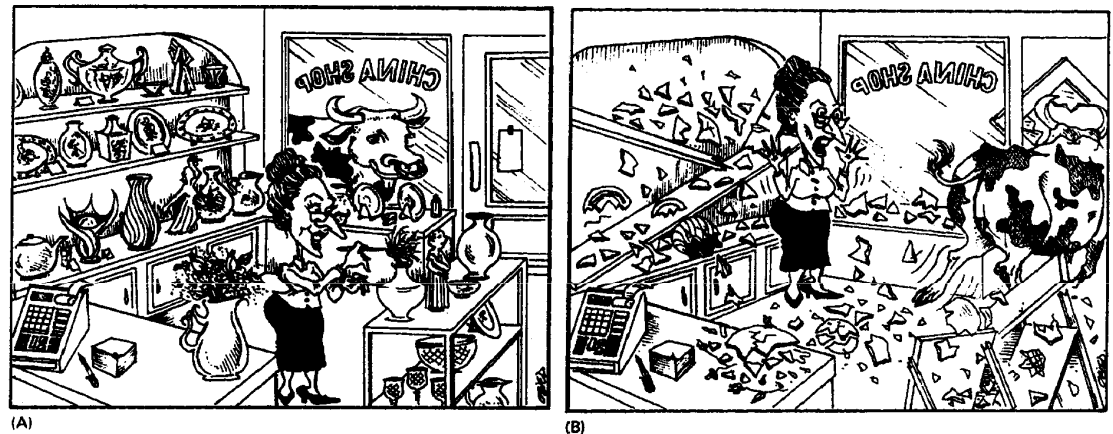
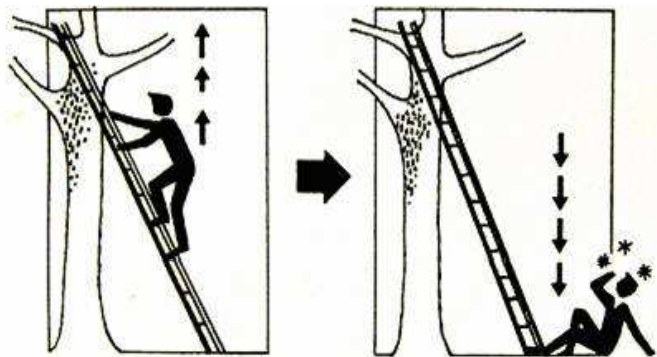
Tření

Entropie a samovolné děje

Reversibilní děje: $\Delta S = 0$, v systému probíhají pouze vratné děje a systém je v rovnováze.

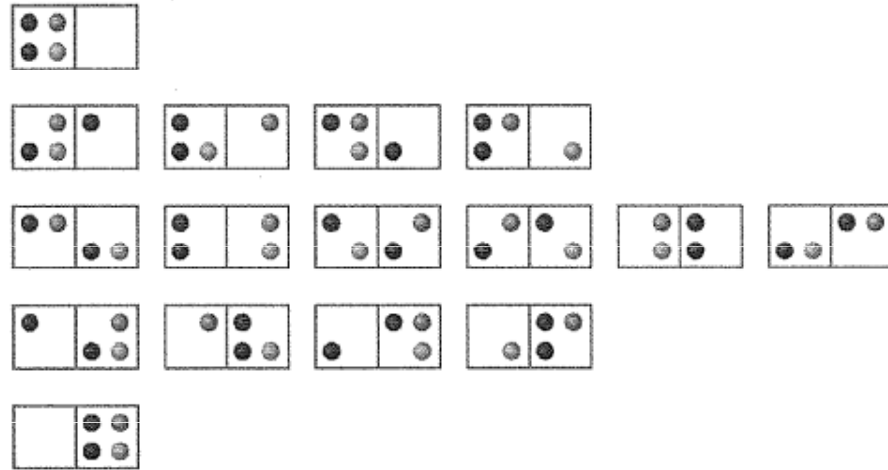
Ireversibilní děje: $\Delta S < 0$ děj neprobíhá samovolně, $\Delta S > 0$ děj probíhá samovolně.

Z toho je patrné, že entropie je **kritériem samovolnosti děje**.

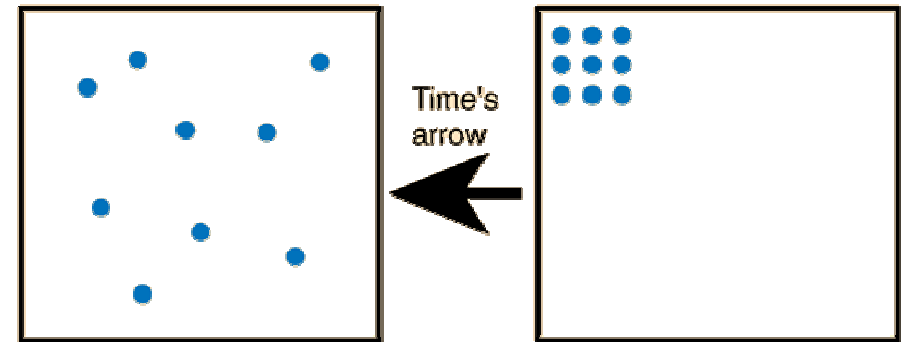


Růst entropie = směr plynutí času

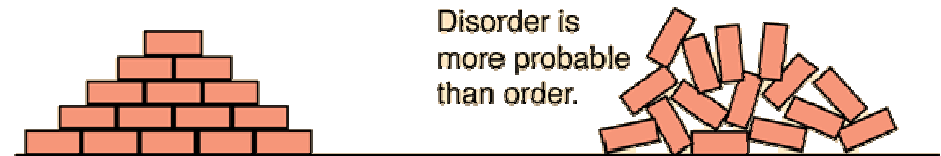
Statistický výklad entropie



If the particles represent gas molecules at normal temperatures inside a closed container, which of the illustrated configurations came first?



If you tossed bricks off a truck, which kind of pile of bricks would you more likely produce?



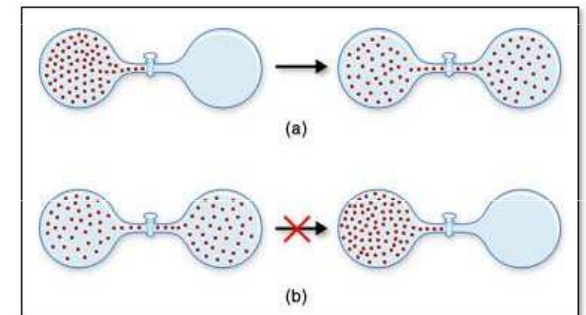
Disorder is more probable than order.

Samovolné děje lze charakterizovat nejen zvětšením entropie, ale též vzrůstem neuspořádanosti vznikajícího stavu soustavy, vzhledem ke stavu výchozímu. Proto se entropie také definuje jako míra neuspořádanosti systému. Čím je systém neuspořádanosti větší, tím má vyšší entropii. Entropie se udává v jednotkách $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$.

$$S = k \cdot \ln P$$

k je Boltzmanova konstanta

P je termodynamická pravděpodobnost děje (daného uspořádání).

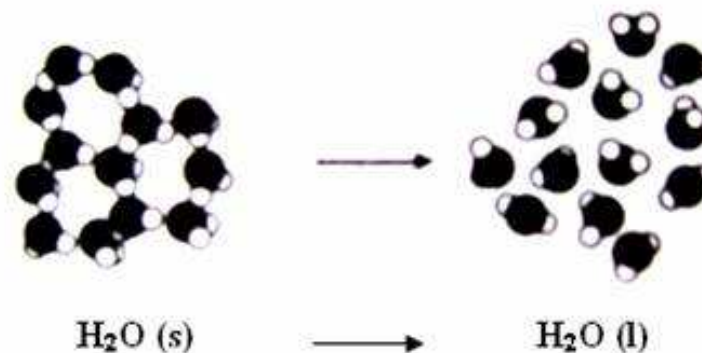


Příklad:

Změna neuspořádanosti systému při přeměně: $\text{H}_2\text{O} (\text{s}) \rightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

Při tomto ději přechází systém do stavu s větší neuspořádaností, tedy entropie se zvětšuje:

$$\Delta S = S_{(\text{l})} - S_{(\text{s})}$$
$$\underline{\underline{\Delta S = 21,5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}}$$



Mechanické kmitání

Harmonický pohyb

Harmonický pohyb je periodický pohyb, při kterém těleso pravidelně přechází z jedné krajní polohy přes rovnovážnou polohu do druhé krajní polohy, přičemž časový průběh výchylky $y(t)$ z rovnovážné polohy je vyjádřen vztahem

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

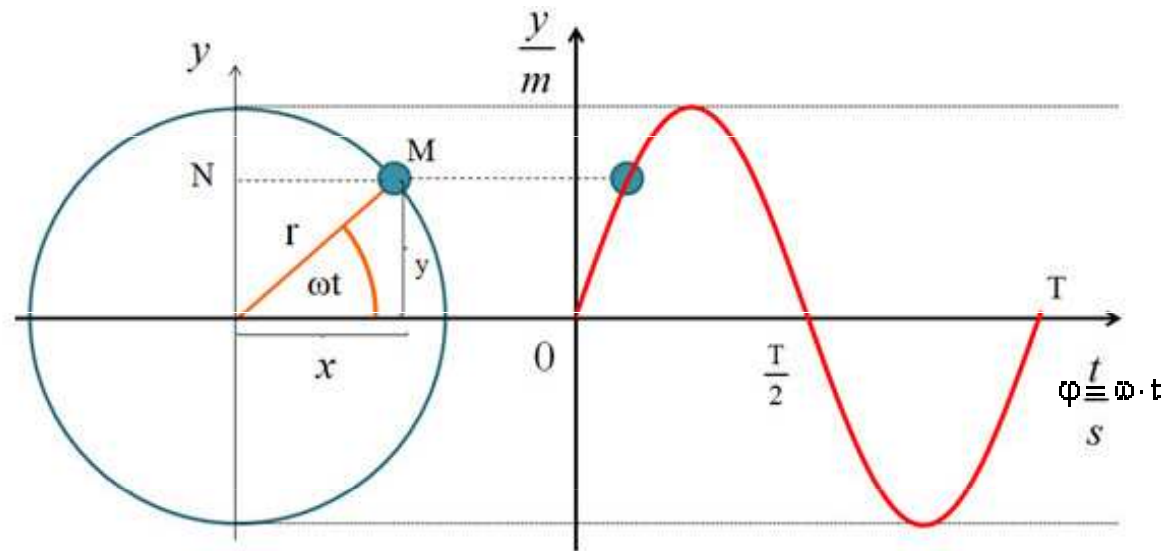
kde A je amplituda výchylky,

ω je úhlová frekvence

$\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$ je fáze

φ_0 je počáteční fáze harmonicky proměnné veličiny.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

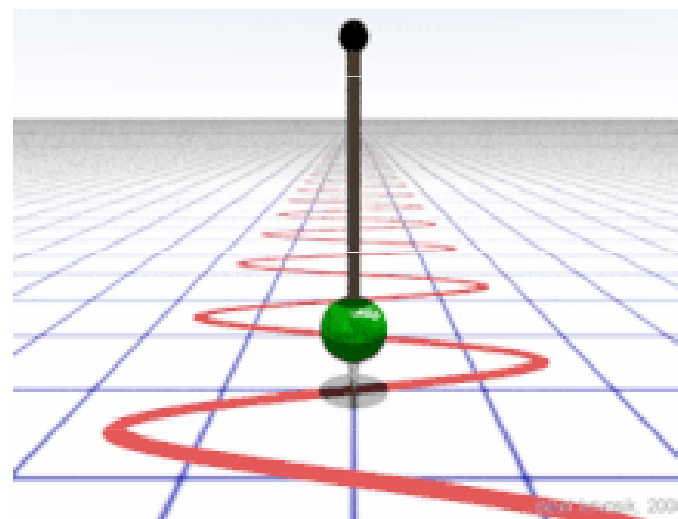
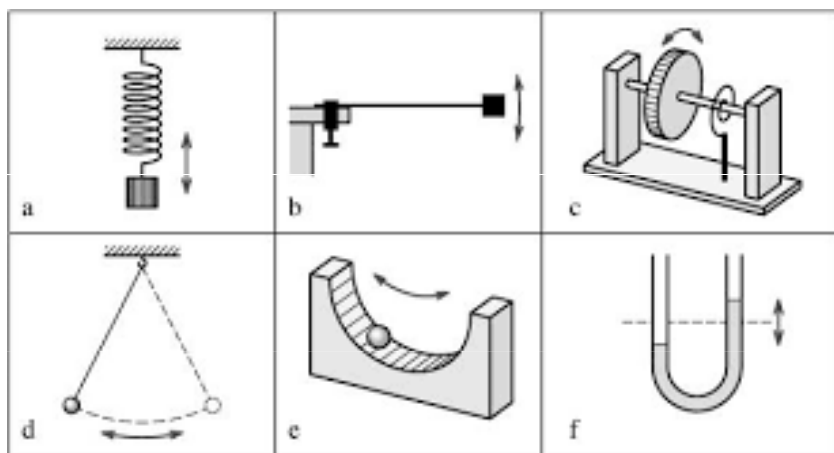


Při harmonickém pohybu je zrychlení úměrné výchylce z rovnovážné polohy ($y = 0$) a má směr proti směru výchylky. Největší výchylka je pro sinus rovno jedné, tj. $y = A$, a nazývá se **amplituda** (rozkmit). Převratná hodnota **doby kmitu** (T) se nazývá **kmitočet**.

Kmitání (oscilace) a oscilátor

Kmitání (oscilace) je změna (zpravidla v čase) nějaké veličiny, vykazující opakování nebo tendenci k němu.

Oscilátor je systém nebo zařízení, schopné **kmitavého pohybu**, při němž se hodnoty určitých parametrů (poloha, rychlost, napětí atd.) periodicky opakují. Oscilátory mohou být mechanické, elektrické aj. a dělí se na **harmonické** (kyvadlo, závaží na pružině), kde je průběh kmitu charakterizován sinusoidou, resp. **relaxační** s nesouměrným tvarem kmitů a další.



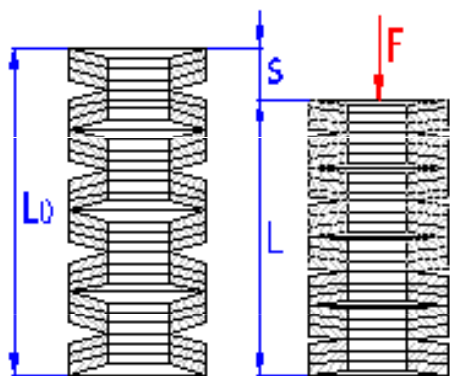
Příčinou kmitání **mechanického oscilátoru** je buď síla pružnosti, nebo tíhová síla. Ze znalosti zrychlení harmonického kmitavého pohybu ($a = -\omega^2 \cdot y$) a 2. Newtonova zákona ($F = m \cdot a$) můžeme obecně vyjádřit velikost síly, která způsobuje harmonické kmitání:

$$F = -m \omega^2 y$$

Pružina

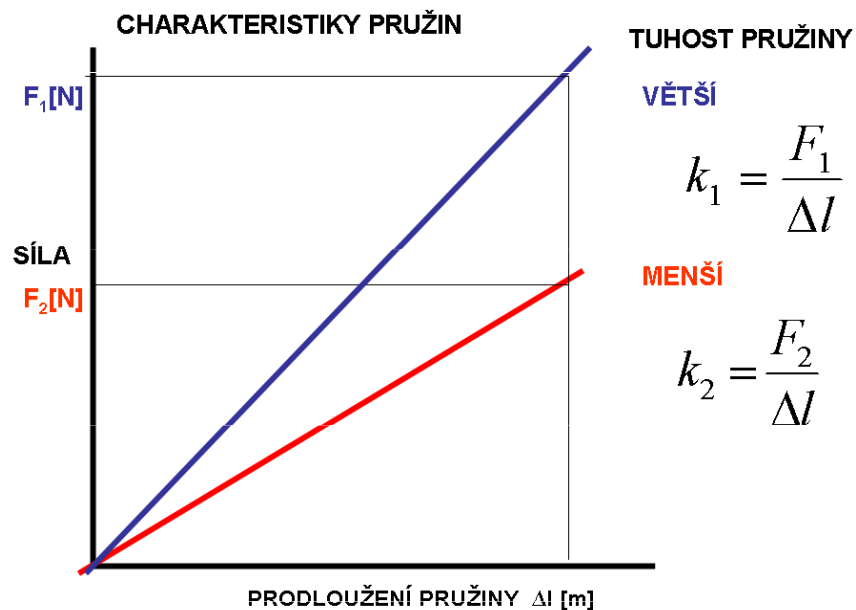
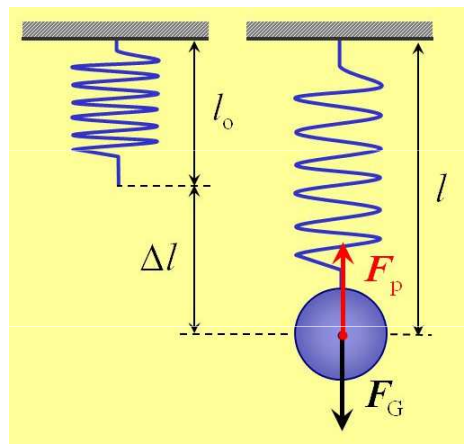
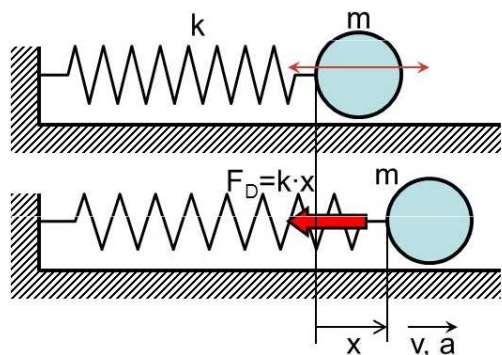
Pružina umožňuje v jednom nebo i více směrech elastickou deformaci (působením síly se deformuje, ale když síla přestane působit, vrací se do původního tvaru). Využívá se k pružnému spojení jiných součástí tak, aby se rázy a kmitání neodpružené součásti (například nápravy) nepřenášely na část odpruženou (například podvozek).

Pružina obvykle působí **silou** závislou na velikosti její výchylky z klidové polohy a ve směru proti této výchylce. Podle **Hookova zákona**



$$F = -k \cdot x$$

k je tuhost pružiny



Frekvence a doba kmitu pružiny

$$-k \cdot y = -m \omega^2 y \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

Energie mechanického oscilátoru

Pro **potenciální energii** stlačené nebo natažené hookovské pružiny platí

$$V(x) - V(x_0) = \int_{x_0}^x ky \, dy = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{2}kx_0^2,$$

$$E_p = W = \frac{1}{2}F \cdot x$$

$$E_p = \frac{1}{2}ky^2,$$

V libovolném okamžiku je E_p

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \varphi)$$

V **rovnovážné poloze** je $y = 0$ a tudíž

$$E_p = 0$$

V **maximální výchylce** $|y| = A$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

kde k je tuhost pružiny a y je výchylka z rovnovážné polohy pružiny.

Kinetická energie

V libovolném okamžiku je E_k

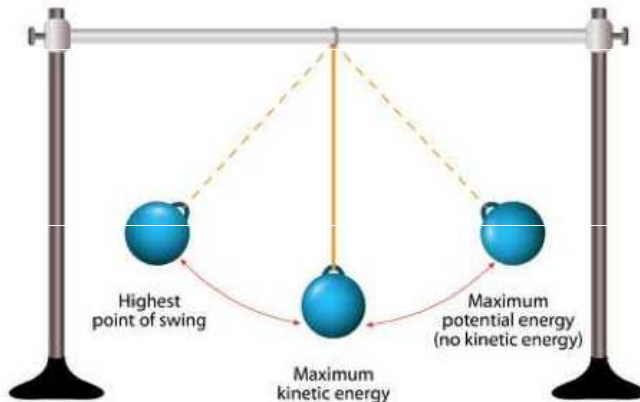
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (k/\omega^2) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \varphi)$$

V rovnovážné poloze je $y = 0$ a tudíž

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

V maximální výchylce $|y| = A$

$$E_k = 0$$



Celková energie

V libovolném okamžiku je E

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot (\sin^2(\omega \cdot t + \varphi) + \cos^2(\omega \cdot t + \varphi))$$

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Energy in Simple Harmonic Oscillator

A spring has Elastic Potential Energy:

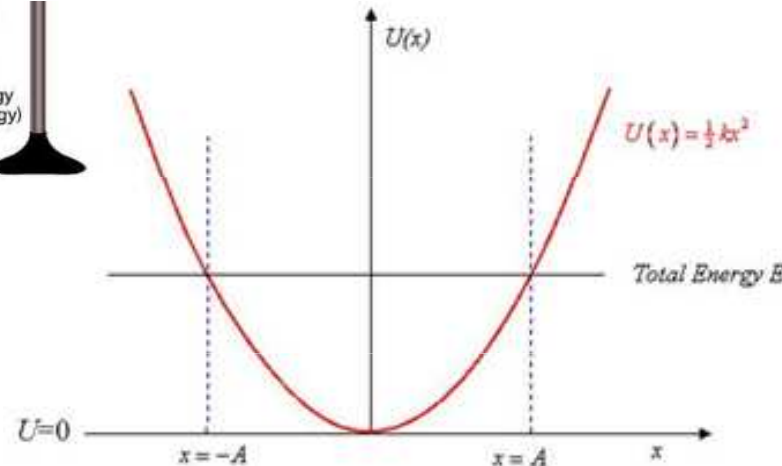
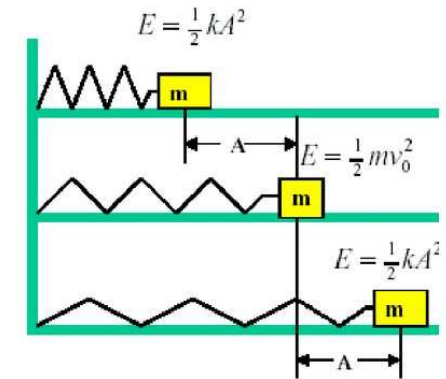
$$PE = \frac{1}{2} kx^2$$

Kinetic Energy:

$$KE = \frac{1}{2} mv^2$$

Total Energy:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$$



Potential Energy $U(x)$ for a Simple Harmonic Oscillator.

For **total** energy E , the oscillator swings back and forth between $x = -A$ and $x = +A$.

- The oscillator has total energy equal to kinetic energy + potential energy.
- when the oscillator is at A , it is momentarily at rest, so has no kinetic energy

Příklad

Jak se změní perioda harmonického kmitavého pohybu, jestliže ke pružině namísto měděného válečku ($\rho_1 = 8930 \text{ kg.m}^{-3}$) připevníme hliníkový váleček ($\rho_2 = 2700 \text{ kg.m}^{-3}$) se stejným objemem?

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\rho_1 V}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{8930 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\rho_2 V}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2700 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 0,55$$

$$T_2(\text{Al}) = 0,55T_1(\text{Cu})$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{2700 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}}{2\pi\sqrt{\frac{8930 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}} = \sqrt{\frac{2700}{8930}} = \sqrt{0,30235} = 0,55$$

Příklad

Jakou práci vykonáme, stlačíme-li pružinu o 20 cm, je-li její tuhost 30 N.cm^{-1} ?

$$k = 30 \text{ N.cm}^{-1}$$

$$y = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

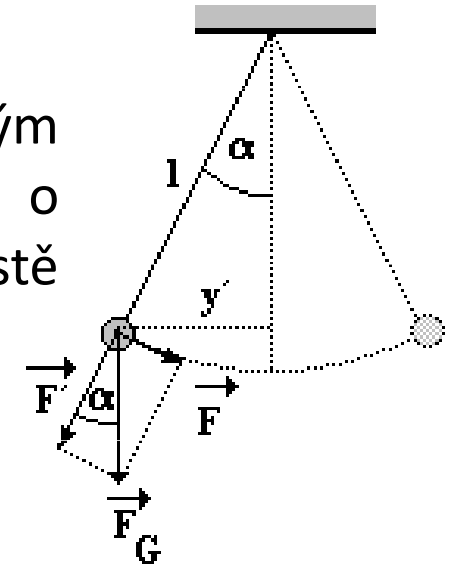
$$E_p = \frac{1}{2}ky^2,$$

$$W = \frac{1}{2}.k.y^2 = 0,5.30.20.0,2 = \underline{60 \text{ J}}$$

Kyvadlo

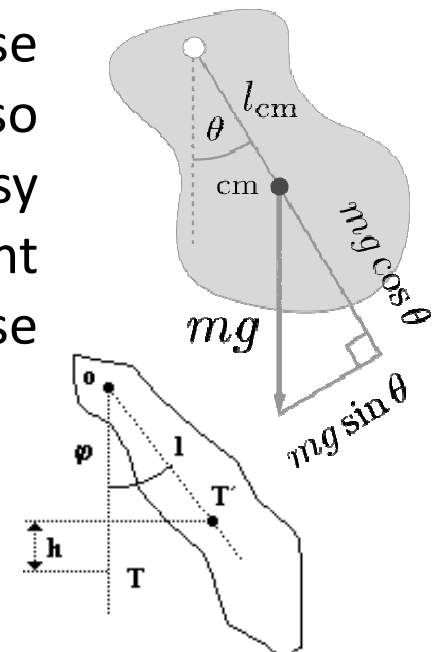
Kyvadlo = každé zařízení v tíhovém poli Země, které vykonává kývavý pohyb (opakované pohyby sem a tam).

Matematické kyvadlo. Kývajícím tělesem se nahrazuje hmotným bodem o hmotnosti m , který se kýve na nehmotném závěsu o konstantní délce l , úhel vychýlení $\alpha < 5^\circ$. Zanedbává se tření v místě závěsu a odpor vzduchu.



$$-mg \frac{y}{l} = -m\omega^2 y \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Fyzikální kyvadlo. Kývajícím tělesem se nepovažuje za hmotný bod, nezanedbává se hmotnost závěsu (tyče). Pohybová energie se skládá z kinetické energie posuvného a rotačního pohybu: těleso se v tíhovém poli otáčí se kolem pevné vodorovné osy neprocházející jeho hmotným středem, uplatňuje se moment setrvačnosti kývajícího se tělesa. Potenciální energie kyvadla se mění v kinetickou energii rotačního pohybu.



$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{J + ml^2}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgh}{I}}$$

Kyvadlové hodiny

Metronomy



Příklad

Jak se změní doba kmitu matematického kyvadla, když jeho délku zkrátíme o 20 % a hmotnost snížíme na polovinu?

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

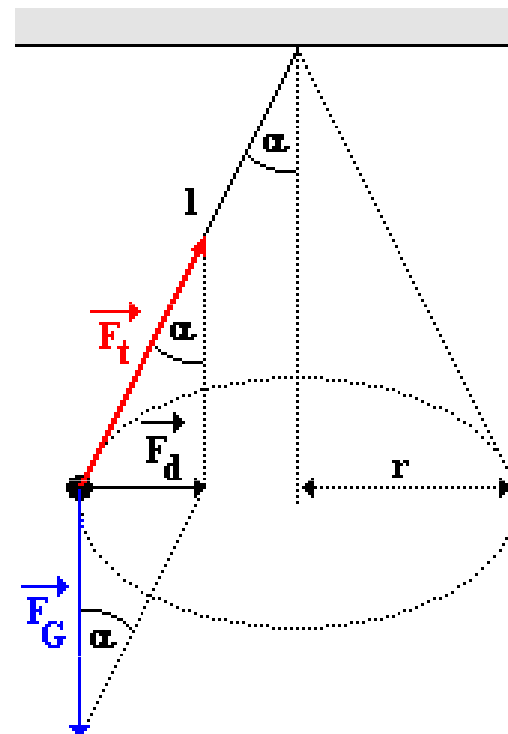
Doba kmitu matematického kyvadla na jeho hmotnosti nezávisí

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}}{2\pi \sqrt{\frac{4l}{5g}}} = \frac{\sqrt{\frac{l}{g}}}{\sqrt{\frac{4l}{5g}}} = \frac{\sqrt{\frac{l}{g}}}{\sqrt{5g}} = \sqrt{\frac{\frac{l}{g}}{5g}} = \sqrt{\frac{5gl}{4gl}} = \sqrt{\frac{5}{4}} = \underline{\underline{\frac{1}{2}\sqrt{5}}}$$

Kónické kyvadlo = kyvadlo, kterému je udělena taková rychlost, aby závěs opisoval plášť rotačního kužele (kónusu). Hmotný bod se pohybuje po kružnici, takže na něj působí dostředivá síla, kterou lze rozložit na sílu tíhovou a tahovou sílu závěsu.



$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l \cos \alpha}}$$



Ruské kuželky



Tetherball

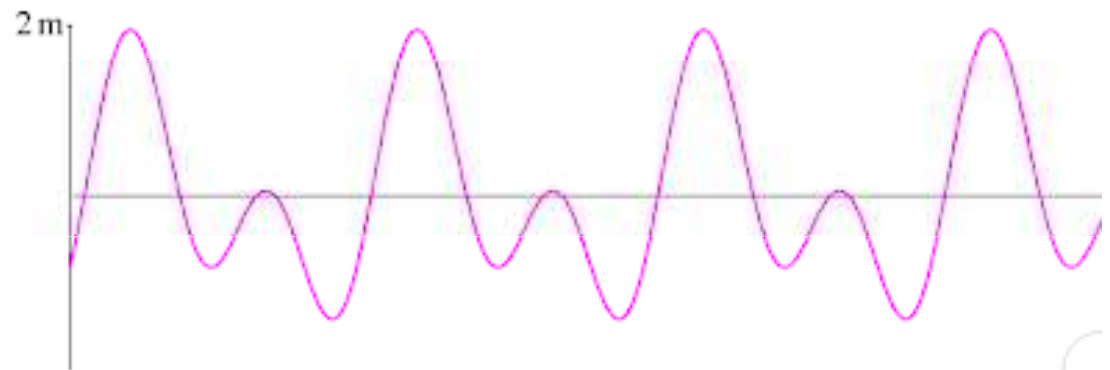
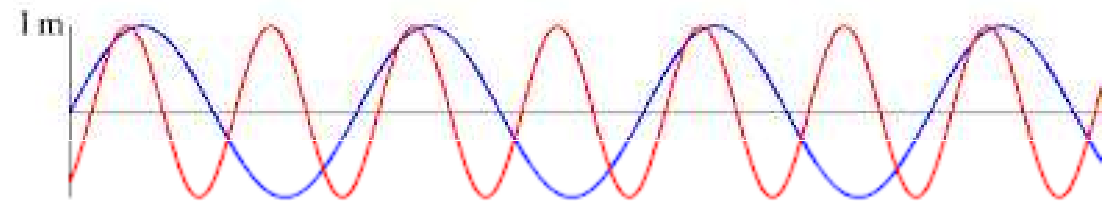
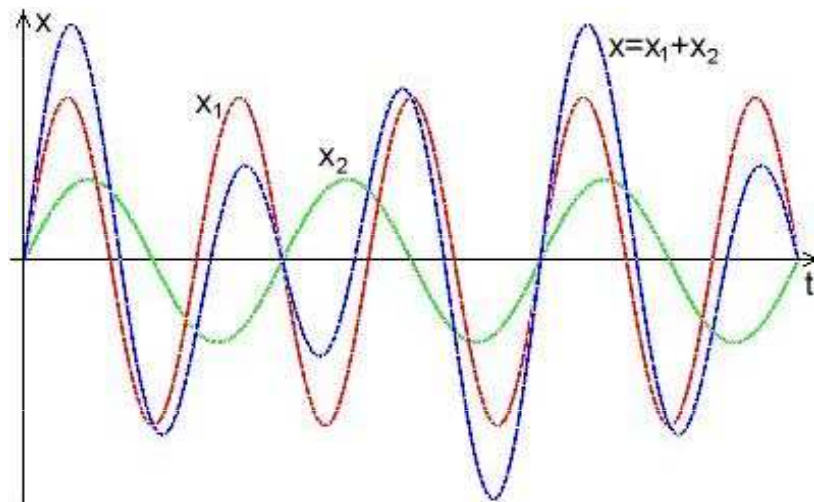
Skládání rovnoběžných (stejnoseměrných) harmonických kmitů

Pro **lineární kmitání** platí, že probíhá-li současně několik kmitavých dějů (např. pokud hmotný bod koná několik kmitavých pohybů současně), je výsledný kmitavý pohyb určen součtem (obecně vektorovým) jednotlivých kmitavých dějů. Tato skutečnost je v souladu s **principem superpozice**. Pro **nelineární kmitání** nemusí být výsledné kmitání součtem jednotlivých kmitání, z nichž je složeno.

$$x_1 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

$$x = x_1 + x_2$$



výsledné složené kmitání není harmonické

Rovnoběžné harmonické kmity se stejnou úhlovou frekvencí

Složení dvou harmonických kmitů se stejnou úhlovou frekvencí ω , tzv. **izochronních kmitů**

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

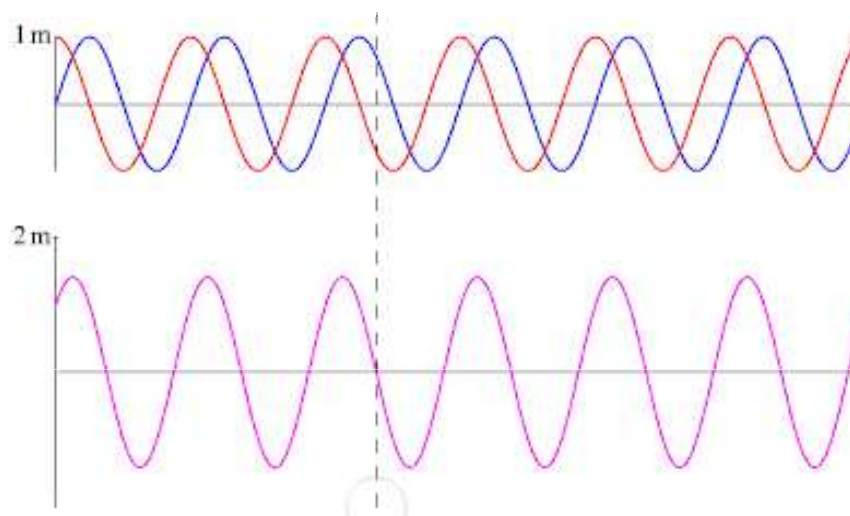
$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

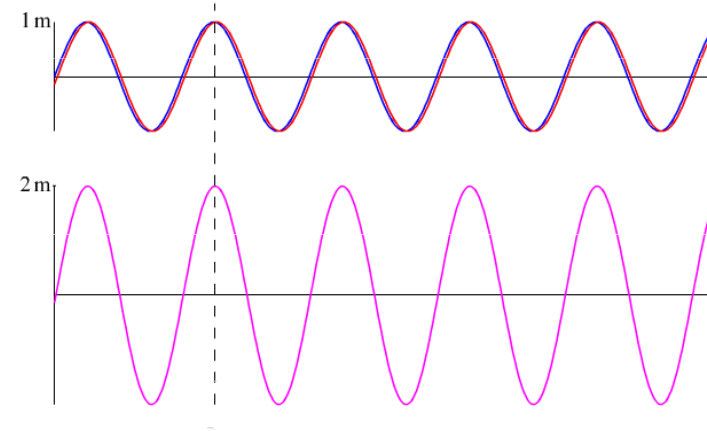
Výsledná amplituda A: $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

Fázový posun φ : $\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$

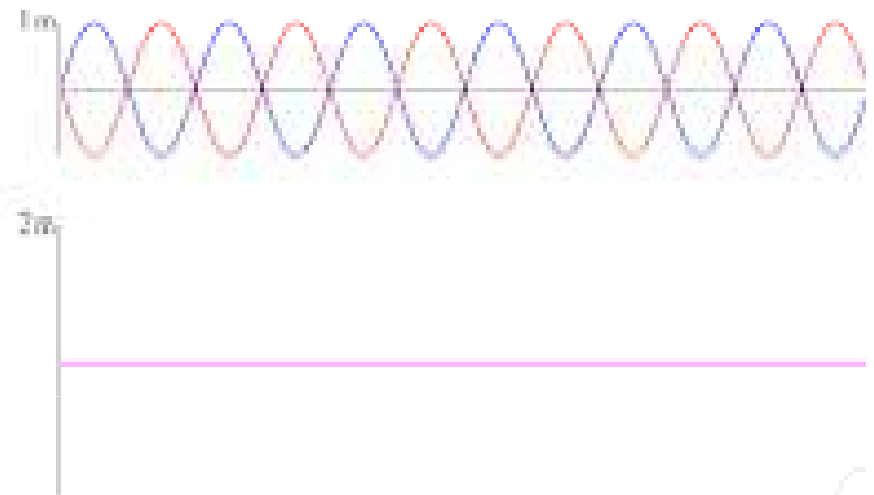
Fázový posun představuje vzájemné posunutí fází dvou kmitajících složek jediného kmitavého pohybu.



Je-li rozdíl počátečních fází dvou kmitů $\varphi_2 - \varphi_1 = 2.k.\pi$, kde k je celé číslo, mají oba skládané kmity **stejnou fází**. V takovém případě lze položit $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ a amplituda je dána jako $A = A_1 + A_2$. Při vektorovém znázornění leží oba kmity na stejné přímce a mají stejný směr.



Při skládání kmitů s **opačnými fázemi** lze počáteční fáze zapsat jako $\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = \varphi + \pi$. Amplituda kmity je rovna $A = A_2 - A_1$. Při vektorovém znázornění leží vektory A_1 a A_2 na stejné přímce, ale mají opačný směr. Je-li $A_1 = A_2$, je výsledná amplituda nulová ($A = 0$), tzn. oba kmity se navzájem vyruší.



Rovnoběžné harmonické kmity s blízkými úhlovými frekvencemi

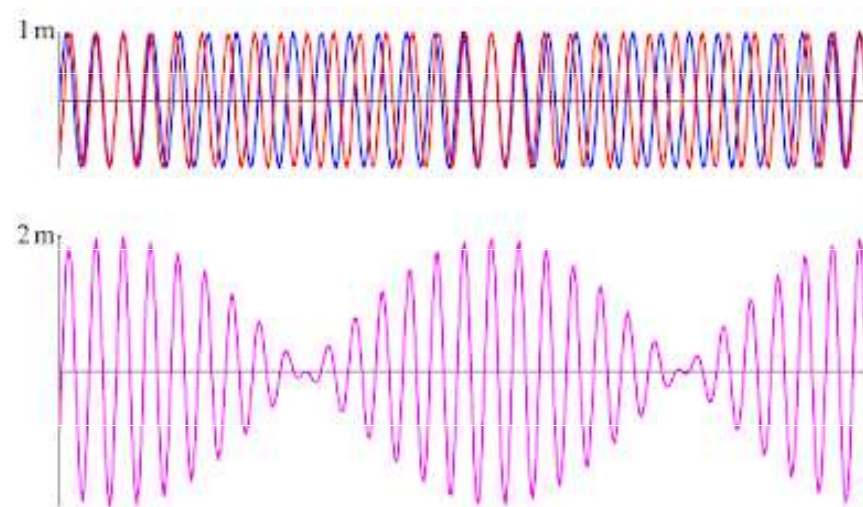
Skládání dvou rovnoběžných harmonických kmitů, které mají různé, ale blízké frekvence, amplitudy obou kmitů jsou stejné ($A_0 = A_1 = A_2$), a fázový posun je nulový ($\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$). Výsledný kmitavý pohyb, který sestává z kmitů

$$x_1 = A_0 \sin \omega_1 t$$

$$x_2 = A_0 \sin \omega_2 t$$

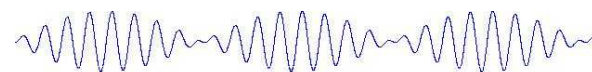
$$x = x_1 + x_2 = A_0 (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)$$

$$x = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)$$



Pokud se úhlové kmitočty ω_1 a ω_2 příliš neliší, pak platí $\omega_2 - \omega_1 \ll \omega_1 + \omega_2$. To znamená, že kosinus, v němž vystupuje $\omega_2 - \omega_1$, se mění mnohem pomaleji než sinus, v němž vystupuje výraz $\omega_1 + \omega_2$. To umožňuje považovat předchozí vztah za kmitání s úhlovou frekvencí $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2 \approx \omega_1 \approx \omega_2$ s pomalu se měnící amplitudou

$$A(t) = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right)$$



Periodické kolísání amplitudy se projevuje tzv. **rázy (záznějemi)**.

Spřažená kyvadla (vázané oscilátory)

dvě stejná kyvadla spojená pružinou nebo vláknem se závažím

O ... **oscilátor** (zdroj nuceného kmitání)

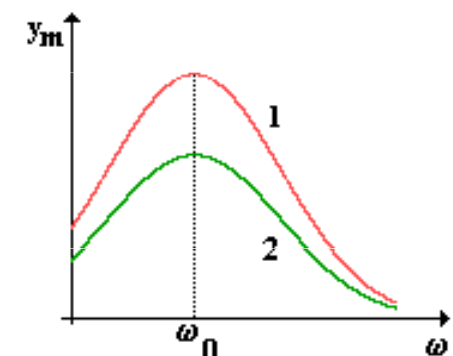
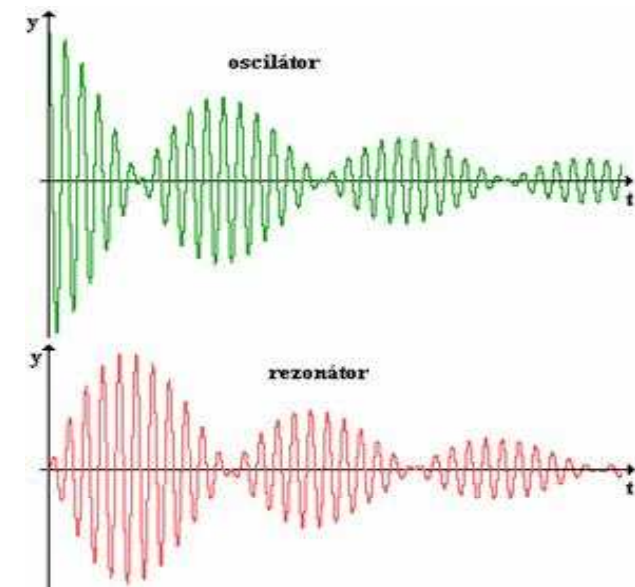
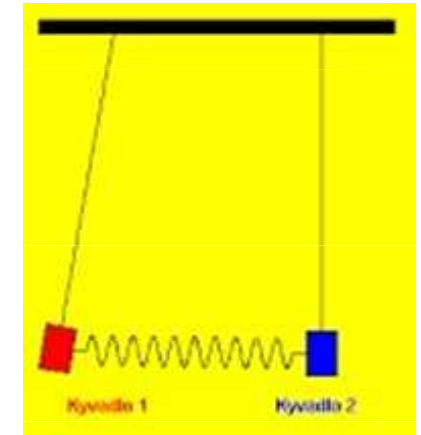
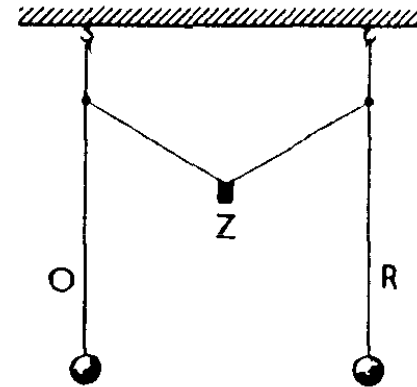
R ... **rezonátor** (působením zdroje se nucené rozkmitá)

Z ... **závaží + vlákno = VAZBA** (zprostředkovává přenos energie mezi oscilátorem a rezonátorem)

Vazba může být

volná: pomalé přenášení energie z oscilátoru na rezonátor, amplituda nucených kmitů je malá.

těsná: rychlé přenášení energie z oscilátoru na rezonátor, amplituda nucených kmitů je velká.



Skládání kolmých harmonických kmitů

Vzájemně **kolmé harmonické kmity** nelze skládat algebraickým součtem výchylek, ale je nutné je skládat vektorově.

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

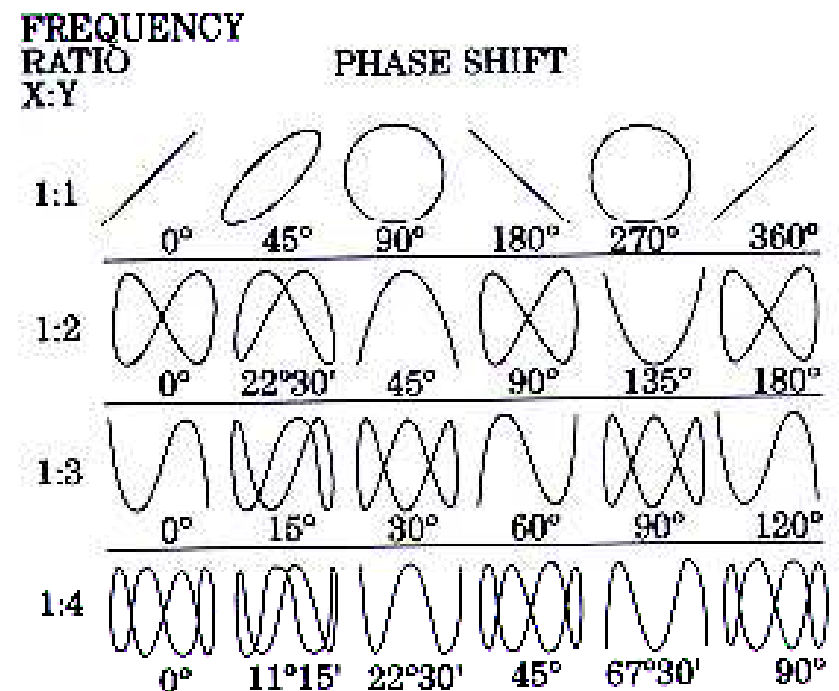
Tyto kmity leží v rovině dané osami x a y, výsledné kmity budou také ležet v této rovině.

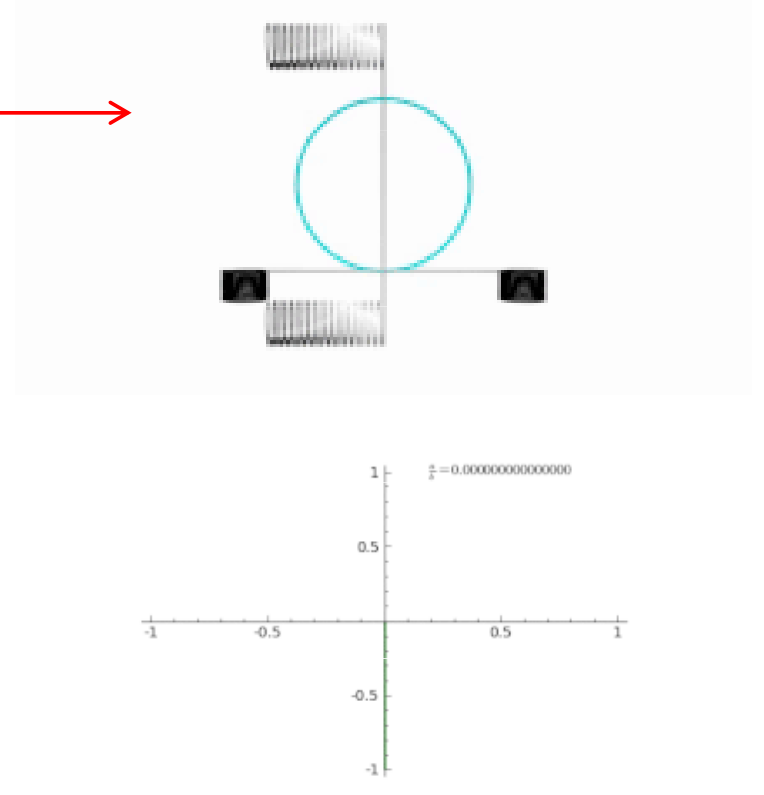
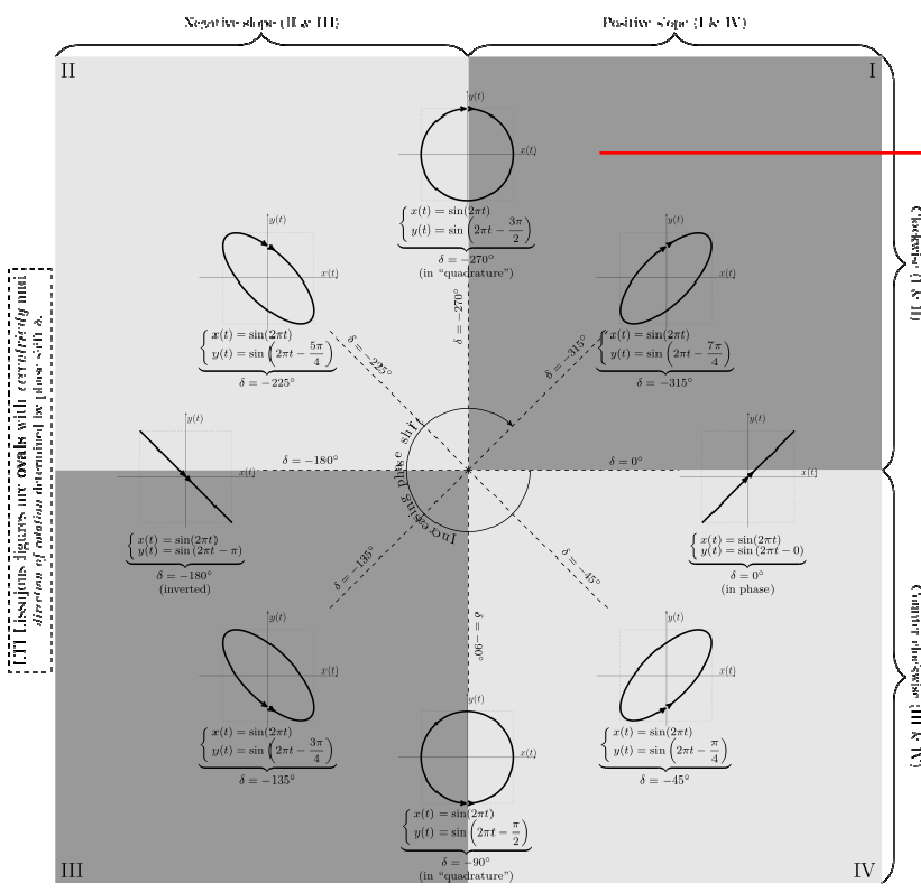
Obecně je výsledkem skládání dvou harmonických kmitů o stejné frekvenci pohyb po **elipse**, která ve zvláštních případech přechází v kružnici nebo úsečku.

Výsledný pohyb při skládání dvou kolmých harmonických kmitů různých frekvencí, amplitud a počátečních fází probíhá jako periodický pohyb po křivkách nazývaných **Lissajousovy obrazce** (křivky).

Animace:

<http://gerdbreitenbach.de/lissajous/lissajous.html>

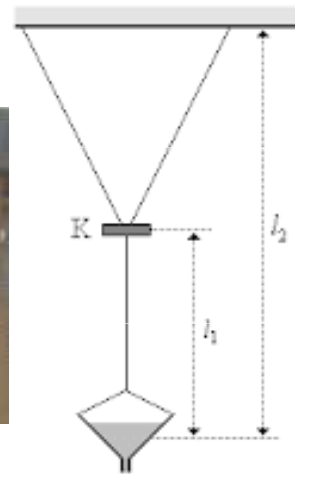




Blackburnovo (pískové) kyvadlo slouží ke skládání dvou navzájem kolmých kmitavých pohybů. Jedná se vlastně o dvě matematická kyvadla s délkami závěsů l_1 a l_2 .

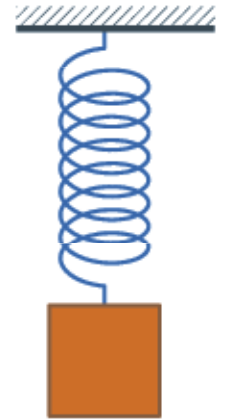
Kyvadlo (nádobka s pískem) bude opisovat *Lissajousovy obrazce*, pokud bude následující rovnice vyjádřena podílem dvou celých čísel.

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}$$



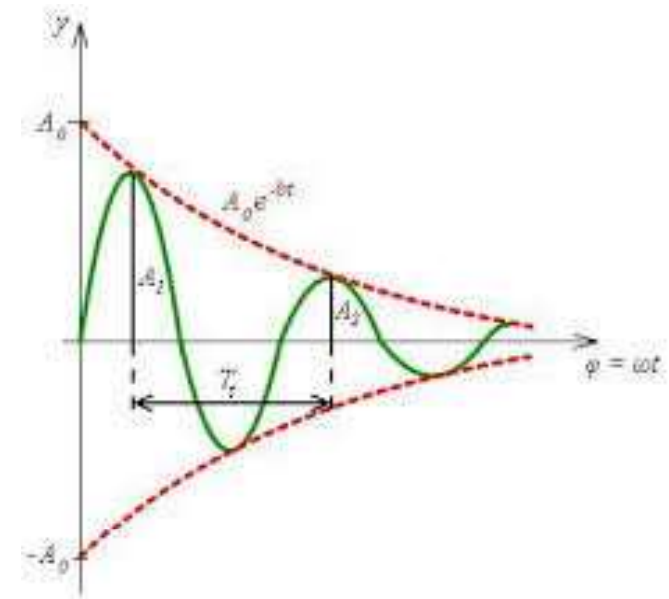
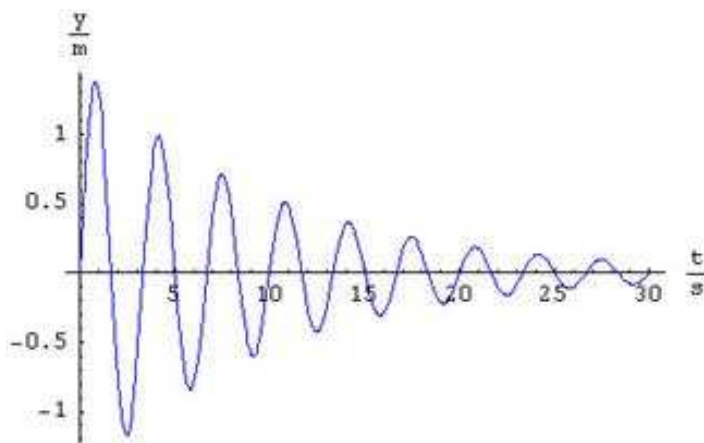
Tlumené kmity

Dochází k němu přeměnou části energie kmitavého pohybu na jiné formy energie (vnitřní energie okolí i oscilátoru, vynaložení práce na překonání třecích sil, ...). Tlumení kmitání harmonického oscilátoru je závislé na hustotě prostředí, ve kterém kmitá. Tlumení je větší ve vodě než na vzduchu. Dále je závislé na rychlosti, kterou oscilátor kmitá.



$$y = e^{-bt} y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

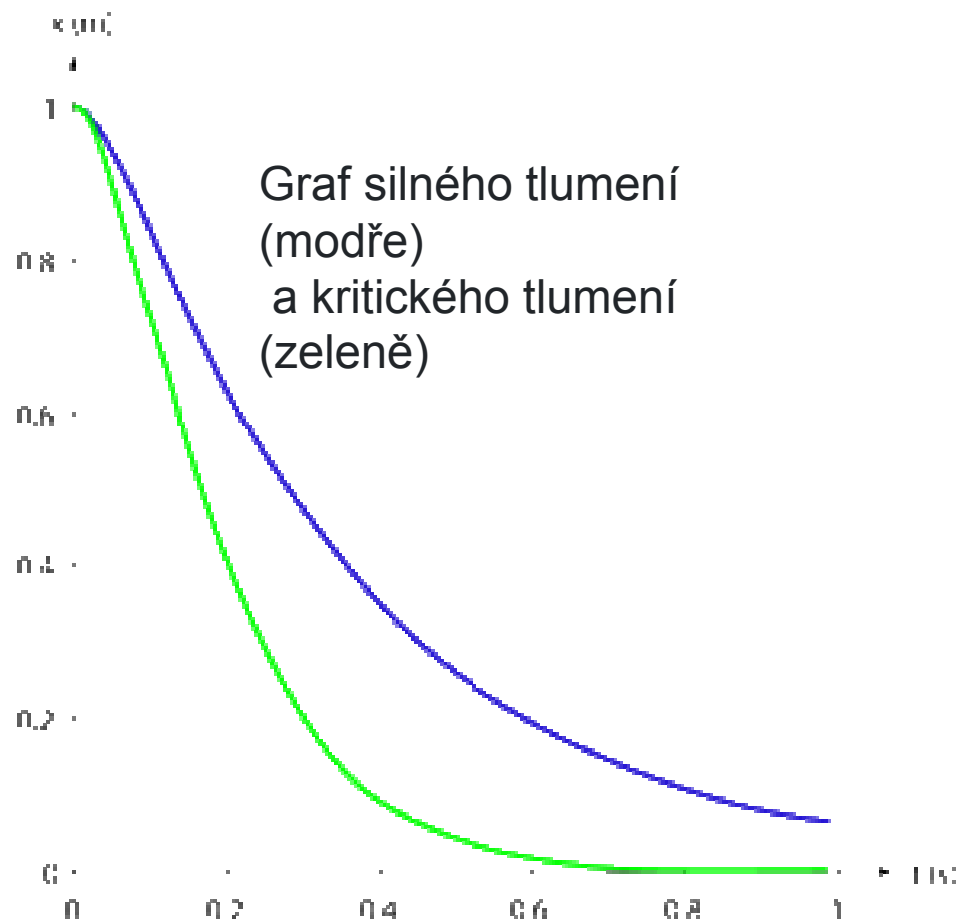
kde b je **koeficient útlumu**. Body, které mají **maximální výchylku** téhož znaménka, leží na grafu exponenciální funkce.



Vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené. Tlumení má vliv také na periodu: tlumený oscilátor kmitá volně s větší periodou, než jakou by měl netlumený oscilátor se stejnými parametry.

V závislosti na velikosti tlumení harmonického oscilátoru může dojít k následujícím dvěma situacím:

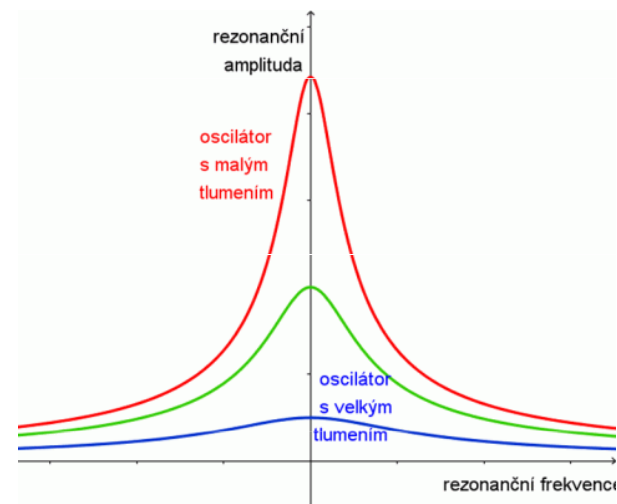
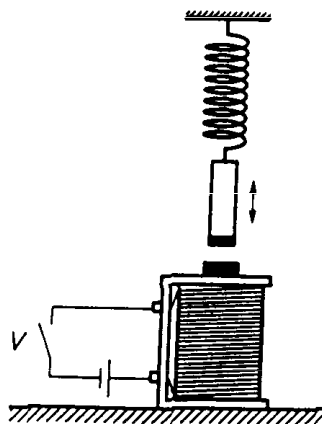
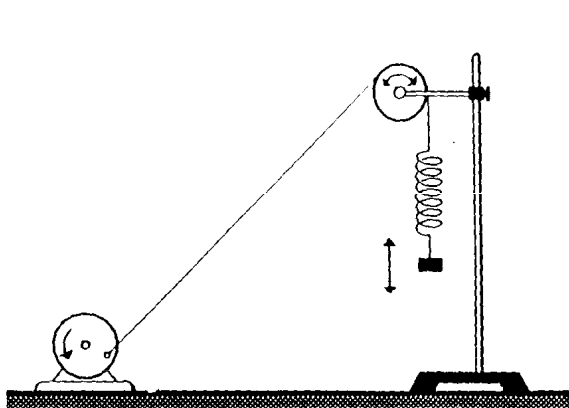
1. **tlumení je kritické** - pohyb oscilátoru je takový, že oscilátor se za nejkratší možnou dobu ustálí v rovnovážné poloze.
2. **tlumení je nadkritické** - jedná se o neperiodický (aperiodický) pohyb, kdy se oscilátor bude pomalu vracet do své rovnovážné polohy.



Nucené kmitání, rezonance

Nucené kmitání vzniká působením periodické síly na oscilátory i na objekty, které vlastnosti oscilátoru nemají. Frekvence nuceného kmitání závisí na frekvenci působící síly a nezávisí na vlastnostech kmitajícího objektu. Nucené kmitání je netlumené.

Při nuceném kmitání oscilátor kmitá vždy s frekvencí vnějšího působení. Netlumené harmonické kmitání nastane, pokud je energie dodávána v celém průběhu periody.



Pokud se frekvence zdroje energie výrazně liší od frekvence oscilátoru, je účinek jen velmi malý. Pokud se frekvence zdroje energie liší jen málo od frekvence oscilátoru, amplituda se postupně zvětšuje. Největší je při stejných frekvencích. Dochází k jevu, který se nazývá **rezonance**.

Výskyt rezonance:

zesílení zvuku hudebních nástrojů (struna, těleso kytary)

vznik nežádoucího rezonančního kmitání u strojních zařízeních, která konají otáčivý pohyb

pérování sedadel automobilu na hrbolaté silnici (prevence: tlumiče, změna vlastní frekvence, zvýšení tření)

Zřícení Tacoma Narrows Bridge

Tacoma Narrows Bridge je visutý most přes Tacomskou úžinu v americkém státě Washington. Původní most byl na místě postaven v červenci 1940. Most byl postaven tak, že byl překážkou větru, stavitelé jej pokřtili *Cválající Gertie* kvůli vertikálním pohybům mostovky za větrného počasí. Dne 7. listopadu za větrného dopoledne, kdy vítr dosahoval rychlosti až 68 km/h, vítr most vlastní silou rozhoupal, což nakonec způsobilo pád mostu. Při kolapsu mostu nedošlo k žádným lidským obětem, o život však přišel jeden malý pes, kterého v jednom z aut nechal jeho vlastník.



Příklad

Perioda vlastního kmitání železničního vagónu je 1,25 s. Nárazy na spoje kolejnic dostává vagón silové impulsy, které ho rozkmitají. Při jaké rychlosti vlaku se vagón nejvíce rozkmitá, pokud délka kolejnic je 25 m?

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1,25s} = 1,6\pi s^{-1}$$

$$s = O = 2\pi r$$

$$r = \frac{s}{2\pi} = \frac{25m}{2\pi}$$

$$v = \omega_0 r = 1,6\pi s^{-1} \cdot \frac{25m}{2\pi} = \frac{1,6 \cdot 25m \cdot s^{-1}}{2} = 20m \cdot s^{-1}$$

$$v = 20m \cdot s^{-1} = 72km \cdot h^{-1}$$