

Výfučtení: Ideální plyn

Stavová rovnice ideálního plynu

Potkali jste se již s tímto pojmem? Ne? Nevadí, potkáte se s ním právě teď. Stavová rovnice ideálního plynu popisuje, jak se chová správný ideální plyn a jak mezi sebou souvisí různé *stavové veličiny*. Ale dřív, než si o nich povíme, si představíme, co vlastně takový ideální plyn je.

Libovolný plyn si můžeme představit jako shluk částic (molekul, atomů, ...), které náhodně poletují prostorem a působí na sebe. A to různými vzájemnými srážkami, ale také například i jejich vzájemnou přitažlivostí nebo elektrickými silami. Popsat rozumně takový nepořádek je mimořádně těžké, proto si definujeme zjednodušený fyzikální model – nazveme ho *ideální plyn*. Zjednodušení spočívá v tom, že si řekneme, že částice ideálního plynu mají nulový poloměr, náboj a nepůsobí na sebe gravitační silou. Tak zaručíme, že jediné působení mezi částicemi ideálního plynu jsou vzájemné srážky.

Kdo objevil rovnici ideálního plynu?

Na tuto otázku není jednoduché odpovědět. Stavová rovnice vznikla jako zobecnění čtyř fyzikálních zákonů: Boyleova-Mariottova zákona, Gay-Lussacova zákona, Charlesova zákona a Avogadrova zákona. První tři se zabývají tím, jak se plyny chovají při konstantní teplotě, tlaku anebo objemu. Čtvrtý z nich nám ale říká, že dva plyny při stejném tlaku a objemu mají stejný počet částic, nezávisle na jejich chemickém složení.

Stavové veličiny

Dostáváme se k stavové rovnici. Vypadá takto

$$pV = nRT.$$

Pojďme si vysvětlit, co tedy jednotlivá písmenka značí.

Tlak Pod tlakem si umíme představit silové působení částic plynu na stěnu nádoby. Toto působení vzniká tak, že částice plynu narážející na stěnu nádoby se musejí od stěn odrážet. Aby se něco takového mohlo stát, tak na částice musí nádoba působit silou. Ze zákona akce a reakce však víme, že stejnou silou musí působit každá odrážející se částice na nádobu. Součet všech takovýchto sil od částic dělený plochou nádoby se rovná tlaku. Měli bychom si připomenout, že jednotkou tlaku je pascal (Pa), jeho rozměr je $1 Pa = 1 kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$.

Objem Věřím, že všichni víme, co je to objem. Jedinou pozoruhodnou zvláštností je, že pod pojmem ideálního plynu rozumíme opravdu *prázdný* prostor mezi jednotlivými částicemi.

Teplota Fyzikální význam teploty nebyl dlouhou dobu známý. Definovat *termodynamickou teplotu* se podařilo až v druhé polovině 19. století. V této době se teploty měřily běžnými rtuťovými teploměry. Ty fungují na základě tepelné roztažnosti – při zahřátí či zchlazení o nějakou teplotu se změní objem rtuťi v kapiláře. Jako velmi přesně měřitelná látka se namísto rtuťi používal zředěný plyn (jehož vlastnosti jsou skoro stejné jako vlastnosti ideálního plynu). Při pozorování tepelné roztažnosti se zjistilo, že při ochlazení o jeden stupeň Celsia se jeho objem zmenšil vždy o stejnou hodnotu.

Pokud bychom teploměru stále odebírali jeho energii, objem plynu by se postupně zmenšoval, až při určité teplotě by byl objem plynu nulový. Tuto teplotu následně označil lord Kelvin jako *absolutní nulu*, tedy 0 K. Teplota absolutní nuly v Celsiově stupnici je rovná $-273,16^\circ C$.

A je to nejmenší možná tepota, jaká může existovat. Víc energie totiž už z teploměru nemůžeme odčerpat. Tuto teplotu můžeme tedy vnímat jako veličinu, která nám nějakým způsobem popisuje energii plynu.

Látkové množství Uvádí se v molech a není to ani tak fyzikální, jako spíše chemická veličina. Označuje se n a její jednotka je mol. 1 mol částic je rovný Avogadrově konstantě, čili přibližně $6,022 \cdot 10^{23}$ částicím.

Univerzální plynová konstanta Tato konstanta se v rovnici vyskytuje pouze proto, abychom mohli v stavové rovnici používat tradiční jednotky tlaku, objemu a podobně. Hodnota plynové konstanty je $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Poslední dvě veličiny se dají nahradit veličinami s větším fyzikálním významem. Platí vztah

$$nR = Nk,$$

kde N je počet částic, které se nacházejí v plynu (tedy obrovské číslo) a k je Boltzmannova konstanta (velmi malé číslo: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)¹. V jednotkách Boltzmannovy konstanty vidíme, že spojuje energii (joule) s teplotou (kelvin). V úvodu jsme si však již říkali, že pohyb částic je čistě náhodný, částice mají různé směry a rychlosti, ale tedy i různě přiměřené kinetické energie².

Pro tuto energii (značíme $\langle E_k \rangle$) jedné částice ideálního jednoatomového³ plynu platí vztah

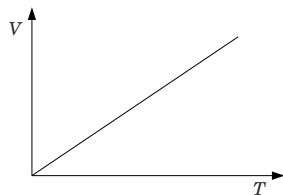
$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT.$$

Z tohoto vztahu můžeme vidět, co vlastně znamená teplota. Je to veličina, která nám určuje přiměřenou energii částic plynu.⁴ Jak zvýšíme teplotu, tak rychlost částic plynu bude větší. Tím pádem musíme očekávat, že i srážky mezi částicemi budou silnější, a plyn tak bude měnit své vlastnosti! Rozlišujeme tři základní děje, při nichž se mění stavové veličiny ideálního plynu: izobarický, izochorický a izotermický děj.

Izobarický děj

Přinutit plyn měnit se izobaricky (se stále stejným tlakem) můžeme například v nádobě, která je uzavřená pohyblivým pístem o nějaké hmotnosti. Tíha pístu dělená plochou pístu spolu s atmosferickým tlakem se bude rovnat tlaku v nádobě, jinak by síly působící na píst nebyly v rovnováze a píst by se ihned posunul do své rovnovážné polohy. Tím je zaručeno, že tlak v nádobě zůstává po celý čas stejný. Ve stavové rovnici to znamená, že tlak p není proměnná, ale konstanta, stejně jako n ⁵ a R . Jediné proměnné jsou V , T a platí pro ně vztah

$$V = \frac{nR}{p}T.$$



Obr. 1: VT diagram izobarického děje

¹Proto je používání „číselné hezcích“ n a R běžnější.

²Kinetická energie objektu s hmotností m a rychlostí v je rovná $E_k = mv^2/2$.

³To jsou především vzácné plyny jako helium, neon apod. U větších molekul musíme do energie započítat i vibrace a rotace. Celková střední energie molekuly je pak $\langle E \rangle = s \cdot kT/2$, kde s je přirozené číslo určitélné z geometrie molekuly. Pro jednoatomovou molekulu je $s = 3$, protože nemůže rotovat ani vibrovat. Pro dvouatomovou molekulu je $s = 5$.

⁴Stejně tak můžeme říct, že teplota tuhých látek popisuje energii molekul tohoto materiálu.

⁵Plyn nám z nádoby neuniká

Všimaví si hned všimnou, že graf závislosti objemu od teploty⁶ je přímka (obr. 1).

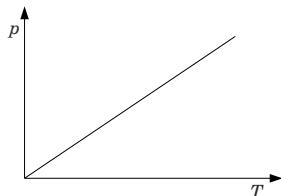
Užitečné je si zapamatovat, že izobarické zvýšení teploty plynu na dvojnásobek⁷ způsobí zvýšení objemu plynu rovněž na dvojnásobek.

Izochorický děj

Tento děj popisuje ohřívání plynu při konstantním objemu. Na dosažení podmínek nám stačí nějaká uzavřená *nestlačitelná* nádoba. V stavové rovnici bude tedy s konstantami n , R konstantní i objem a rovnice bude mít podobný tvar jako v minulém případě

$$p = \frac{nR}{V}T.$$

Graf této závislosti se označuje jako pT diagram a jak se můžeme přesvědčit, je to též přímka (obr. 2).



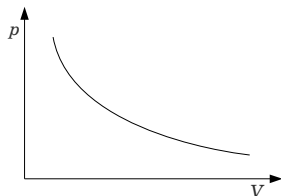
Obr. 2: pT diagram izochorického děje

Izotermický děj

Při izotermickém ději se nemění teplota. K uskutečnění takového děje v laboratoři musíme děj provádět opravdu velmi pomalu. To nám zaručí, že jakékoliv vyprodukované teplo se ztratí v okolí a jakékoliv ztracené teplo se z okolí nahradí. V stavové rovnici budou konstantami n , R a T a rovnici budeme psát ve tvaru

$$p = \frac{nRT}{V}.$$

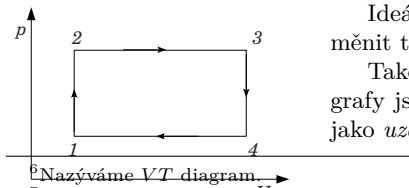
Graf závislosti tlaku na objemu – pV diagram je znázorněn na obrázku 3.



Obr. 3: pV diagram izotermického děje

Cyklické děje

Představme si následující myšlenkový experiment s trpaslíky. Ti vymysleli speciální výtah. Skládá se z pístu, na kterém se trpaslíci vozí. Pod pístem je v nádobě uzavřen ideální plyn a pod nádobou zdroj tepla. Zdroj ohřívá plyn, ten se izobaricky rozpíná a posouvá píst s trpaslíky směrem nahoru. Trpaslíci vystoupí, plyn necháme vychladnout, píst klesne na původní výšku a je připravený vyvézt další trpaslíky směrem nahoru. Všimněme si, že díky tomuto zařízení se zvyšuje potenciální energie trpaslíků, která vznikla z tepla!



⁶Nazýváme VT diagram.

⁷POZOR! Teplota musí být v Kelvinech.

⁸Často sa používá název makroskopická práce.

Obr. 4: Cyklický děj

Ideální plyn nám tedy v jistých situacích může *opakovaně* měnit teplo na mechanickou energii.⁸

Takovéto opakovatelné děje nazýváme *cyklickými ději*. Jejich grafy jsou zajímavé, protože každý cyklický děj se dá znázornit jako *uzavřená* křivka. Stejně jako na obrázku 4.

Jak lze vidět, děje $1 \rightarrow 2$ a $3 \rightarrow 4$ jsou izochorické⁹ a děje $2 \rightarrow 3$ a $4 \rightarrow 1$ jsou izobarické.¹⁰

Z tohoto pV diagramu můžeme jednoduše určit makroskopickou práci, kterou plyn během cyklu vykonal. Je to *plocha* obdelníku 1234. Zajímavé je, že toto pravidlo platí úplně všeobecně. Jestliže máme *libovolný* cyklický děj, je makroskopická práce rovná ploše útvaru opsaného křivkou tohoto děje v pV diagramu.

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁹Všechny body na úsečce [1, 2] a [3, 4] mají stejnou vodorovnou souřadnici, plyn má tak v tuto dobu děje stejný objem.

¹⁰Zde mají všechny body na úsečce [2, 3] a [1, 4] stejnou svislou souřadnici – tlak.