



Výfučtení: Teplo a práce

V letošním druhém Výfučtení volně navážeme na první Výfučtení o ideálním plynu.¹ Hlavním tématem textu sice budou úvahy o teple, přesto však doporučujeme si před jeho čtením připomenout poznatky z minulého Výfučtení.

Asi každý má ze školy nějakou základní představu o teple, my si ji upevníme pomocí úvah o částicích tvořících látku. Díky tomu pochopíme, jak probíhá tepelná výměna a jak může látka spotřebovávat teplo a konat tím práci.

Takovéto úvahy jsou velmi důležité, koneckonců se jedná například o teoretické pozadí fungování parního stroje, který sehrál důležitou roli v průmyslové revoluci na přelomu 18. a 19. století.

Co je to teplo?

Jeden z prvních poznatků, se kterým se setkáme na hodinách fyziky již na základní škole, je, že látka je složena z částic, které se neustále neuspořádaně pohybují. Pohybující se částice mají kinetickou energii. V minulém Výfučtení jsme se dozvěděli, že čím větší je tato energie, tím větší má látka teplotu. Přímá úměra při tom platí pokud teplotu vyjádříme v jednotkách Kelvin. Připomeňme, že mezi stupni Celsia a kelviny platí převodní vztah

$$t[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15 \text{ K},$$

Kelvinova stupnice má tedy pouze posunutý počátek. Pokud pracujeme pouze s rozdíly teplot, jsou údaje v obou stupnicích ekvivalentní.

Vraťme se k našim úvahám. Jestliže chceme změnit teplotu látky, musíme nějak zvětšit nebo zmenšit energii chaotických pohybů částic, ze kterých je látka složena. Dva základní způsoby jak toho dosáhnout jsou dodáním tepla a konáním práce. K práci se ještě vrátíme, zaměříme se zatím na teplo.

Mějme dvě tělesa s různými teplotami, například horký čaj a studený hrnek. Když čaj nalijeme do hrnku, dostanou se částice obou látek do kontaktu a vzájemnými srážkami si začnou vyměňovat energii. Celkovou energii, kterou si takto vymění, nazveme předaným teplem. Teplo jako fyzikální veličina se obvykle značí Q a jeho jednotka je joule (stejně jako jednotka energie).

Teplo je rovno energii dodané chaoticky pohybujícím se částicím. Energie chaotických pohybů je ale úměrná teplotě. Platí tedy, že změna teploty látky ΔT je přímo úměrná dodanému teplu Q . Tento zákon je poměrně známý a obvykle se uvádí ve tvaru

$$Q = mc\Delta T,$$

kde m je hmotnost látky a c je jeho *měrná tepelná kapacita*. Jednotka c je

$$[c] = \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

a chápeme ji jako množství tepla, které musíme dodat kilogramu látky, aby se ohřál o jeden stupeň (samí si rozmyslete proč je to též říci, že se látka ohřeje o 1°C a o 1K).

¹https://vyfuk.org/_media/ulohy/r13/s1/vyfucteni1.pdf

Tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je pro různé látky různá, pokusme se si jednoduše ujasnit proč. Teplota látky je úměrná energii částic. Abychom látku ohřáli o $1\text{ }^\circ\text{C}$, musíme každé částici průměrně dodat nějaké teplo Q_1 . Celkové teplo, které látce dodáme, je pak rovno NQ_1 , kde N je počet částic. Ten je evidentně menší, pokud jsou částice látky těžší. Látky složené z těžších částic by tedy obecně měly mít menší tepelnou kapacitu.

Zároveň se však i průměrné teplo Q_1 dodané jedné částici pro různé látky liší. Záleží například na struktuře látky, velikosti molekul atd. Z toho důvodu se zavádí veličina nazývaná *molární tepelná kapacita* c_m , která je rovna teplu, které musíme dodat jednomu molu látky, aby se ohřál o $1\text{ }^\circ\text{C}$

Připomeňme, že 1 mol látky obsahuje

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ částic,}$$

takže molární kapacita již obsahuje pouze informace o teplu dodaném jednotlivým částicím a nezávisí na jejich hmotnosti. K převodu mezi měrnou tepelnou kapacitou a molární tepelnou kapacitou pak stačí v periodické tabulce prvků najít *molární hmotnost* M_m (tj. hmotnost jednoho molu látky), protože platí

$$c_m = c \cdot M_m.$$

Na molární hmotnost si musíme dávat pozor, protože například v periodické tabulce prvků jsou často molární hmotnosti uváděny v gramech na mol. Aby vztah fungoval, je potřeba převést gramy na kilogramy.

Tepelné stroje

Ve zbytku Výfučtení se budeme zabývat otázkou, která sehrála důležitou roli při vývoji naší civilizace: jak lze využít teplo ke konání práce?

Připomeňme, že práce je mechanická veličina definovaná jako

$$W = F \cdot s,$$

kde s je dráha, o kterou se posune těleso působením síly F ve směru této síly. O práci dále víme, že ji lze například měnit na mechanickou energii a obráceně.

Uvažujme, že chceme přeměnit kinetickou energii chaoticky pohybujících se částic látky na práci. Jednotlivé částice působí na okolní částice silami. Síly vznikají například v důsledku vzájemných nárazů, to je typické pro kapaliny a plyny, kromě toho mezi nimi existují i přitažlivé síly. U kapalin je příkladem důsledku těchto přitažlivých sil povrchové napětí – částice kapaliny se shlukují a vytvářejí kapky, u pevných látek je přitažlivá síla tak velká, že si látka udržuje svůj tvar.

Na konání práce navíc potřebujeme, aby se částice přesouvaly podél směru síly, kterou působí. Jeden ze způsobů, jak toho dosáhnout, je změna objemu látky. Přesně na tomto principu funguje například parní stroj. Spalováním uhlí se uvolní teplo, které se předá vodě. Ta se ohřeje a začne se měnit na páru. Pára je však plynné skupenství, přitažlivé síly mezi jejími molekulami jsou tedy mnohem menší než v případě vody. V důsledku toho začnou molekuly častěji a silněji narážet do stěn nádoby, ve které je pára držena. Částice pak můžeme nechat narážet například na pohyblivý píst. Při srážce částice s pístem se píst trochu rozpohybuje a částice ztratí část své energie. Kinetická energie částic se tedy přemění na roztláčení pístu, což chápeme jako vykonanou práci.

Práci lze konat i na úkor potenciální energie částic látky. Například když na napnutou gumu pověsíme závaží, gumu natáhneme a opět uvolníme, tak závaží vystoupá nahoru, čímž je vykonána práce, ale částice gumy se k sobě přiblíží, takže jejich celková potenciální energie klesne.

Vnitřní energie

V předchozích odstavcích jsme v různých úvahách o přenosech tepla a konání práce mluvili o mechanické energii jednotlivých částic látky. V termodynamice se jedná o tak důležitou veličinu, že si zaslouží vlastní název. Proto se zavádí pojem *vnitřní energie* tělesa U a je definována jako součet kinetických a potenciálních energií všech jednotlivých částic, ze kterých se těleso skládá:

$$U = \sum_{i=1}^N (E_{ki} + E_{pi}) ,$$

kde E_{ki} a E_{pi} jsou kinetická a potenciální energie i -té částice. Symbol Σ značí součet přes všech N částic, ze kterých se dané těleso skládá.

Pomocí vnitřní energie nyní můžeme přehledněji formulovat naše předchozí úvahy. Viděli jsme, že dodáním tepla Q látce její vnitřní energie vzroste. Pokud látka koná práci W , tak její energie klesne. To lze zapsat do jedné rovnice jako

$$\Delta U = Q - W .$$

Tomuto vztahu se říká *první termodynamický zákon*. Poznamenejme, že při používání vztahu je třeba dávat pozor na znaménka. Pokud je látce odebráno teplo, tak do vztahu dosazujeme Q záporné, stejně tak pokud okolí koná práci *na* látce (například stlačování plynu) tak dosazujeme W záporné. Proto je občas možné vidět zákon ve tvaru $\Delta U = Q + W$, který platí, pokud prohodíme znaménko u práce, tedy práce konaná látkou bude záporné číslo. My budeme v textu výhradně používat tvar $\Delta U = Q - W$.

Plyn koná práci

Na chvíli nyní odbočíme od úvah o vnitřní energii a najdeme vztah pro práci konanou ideálním plynem. Uvažujme válcovou nádobu naplněnou ideálním plynem, na jejímž jednom konci je pohyblivý píst o ploše S . Nádobu i píst dokonale izolují, z druhé strany pístu se nachází vzduch s atmosferickým tlakem p_a . Jelikož je píst pohyblivý, má i plyn uvnitř tlak $p = p_a$. Nechť má dále plyn počáteční teplotu T_1 a objem V_1 . Z předchozího Výfučtení víme, že pro ideální plyn platí *stavová rovnice*

$$\frac{pV}{T} = nR = \text{konst} ,$$

kde n je látkové množství plynu, které je v našich úvahách konstantní (plyn z nádoby neuniká), $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ je molární plynová konstanta a T je termodynamická teplota (dosazujeme ji tedy v kelvinech).

Plyn v naší nádobě má tlak p , proto tlačí na píst silou $F = p \cdot S$. Uvažujme, že plyn trochu zahřejeme. Pak tlak nepatrně vzroste, překoná vnější atmosférický tlak a píst se trochu posune, řekněme o malou vzdálenost Δx . Celkem tedy plyn vykoná práci

$$\Delta W \approx F \cdot \Delta x = p\Delta V .$$

V rovnici jsme použili symbol \approx , protože při pohybu pístu je tlak ve skutečnosti nepatrně větší než p . Pokud však dodáme dostatečně malé množství tepla, je rozdíl těchto tlaků zanedbatelný.

Z první termodynamické věty dále víme, že konáním práce začne plyn ztrácet vnitřní energii, částice plynu se tedy budou pohybovat pomaleji (nárazem na píst částice ztratí energii) a tlak v plynu klesne. Píst se tedy posune o takovou vzdálenost Δx , aby se tlak opět vyrovnal s okolním atmosférickým tlakem.

Když budeme takto pomalu plynu dodávat teplo, bude se píst pomalu posouvat, ale tlak bude po celou dobu stále přibližně stejný (jedná se tedy o *izobarický* děj). Celková práce, kterou plyn vykoná, je rovna

$$W = p \cdot (V_2 - V_1).$$

Pomocí stavové rovnice můžeme rozdíl objemů vyjádřit i pomocí počáteční a konečné teploty, což pro nás bude užitečné za chvíli. Máme například

$$V_1 = \frac{nRT_1}{p},$$

odkud dostaneme

$$W = nR(T_2 - T_1).$$

Práce konaná plynem lze spočítat i pro případy jiných dějů (například izotermický nebo adiabatický, viz předchozí Výfučtení). Je to však matematicky mnohem náročnější, protože při těchto dějích se tlak plynu nezanedbatelným způsobem mění.

Tepelná kapacita plynu

V předchozím Výfučtení jsme se dozvěděli, že pro vnitřní energii ideálního plynu platí

$$U = \frac{f}{2}nRT,$$

kde f je počet stupňů volnosti. O stupních volnosti si můžete více přečíst rovněž v předchozím Výfučtení, nám zde bude stačit pouze to, že pro plyn tvořený jednoatomovými molekulami (například helium, neon, argon atd.) platí $f = 3$ a plyn tvořený dvouatomovými molekulami (typicky vodík, kyslík, dusík) má $f = 5$.

Uvažujme, že plynu v uzavřené nádobě dodáme teplo Q . Objem plynu se nemění, tedy veškeré teplo se přemění na vnitřní energii:

$$Q = \Delta U = \frac{f}{2}nR\Delta T.$$

kde $\Delta T = T_2 - T_1$ je rozdíl teplot na konci a začátku ohřívání. Máme tedy, že molární tepelná kapacita plynu *za konstantního objemu* je rovna

$$C_V = \frac{Q}{n\Delta T} = \frac{f}{2}R.$$

Tepelná kapacita tedy pro ideální plyn závisí pouze na počtu stupňů volnosti jeho molekul! Reálné plyny se samozřejmě od zjednodušeného modelu ideálního plynu liší, tedy skutečné tepelné kapacity jsou nepatrně odlišné, přesto však takto jednoduchým výpočtem získáme relativně přesný výsledek.

Všimněme si, že jsme zde udělali něco zvláštního. O molární tepelné kapacitě jsme řekli, že výsledek platí pokud je objem konstantní. Co by se stalo, pokud by se při ohřívání plynu objem měnil? Pak by plyn konal práci a podle prvního termodynamického zákona by jeho vnitřní energie na konci celého děje byla menší než v případě konstantního objemu.

Spočítejme tepelnou kapacitu pro případ konstantního tlaku (který jsme studovali v předchozí kapitole). Platí

$$Q = \Delta U + W = \frac{f}{2}nR(T_2 - T_1) + nR(T_2 - T_1) = \frac{f+2}{2}nR\Delta T.$$

Molární tepelná kapacita *za konstantního tlaku* je tedy rovna

$$C_p = \frac{f+2}{2}R = C_v + R.$$

Podle očekávání je větší než C_v , neboť ohřát rozpínající se plyn je energeticky náročnější než ohřát plyn s konstantním objemem.

Veličina C_p je obvykle ta, se kterou se setkáme, pokud hledáme tepelné kapacity na internetu. Například na Wikipedii² zjistíme, že molární kapacita kyslíku je za normálních podmínek přibližně rovna $29,4 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Kyslík tvoří dvouatomové molekuly a pro ideální dvouatomový plyn můžeme snadným dosazením vypočítat $C_p = 29,1 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Vidíme, že přestože je model ideálního plynu velmi zjednodušený, stále dokáže předpovědět tepelné kapacity plynů za normálních podmínek řádově s jednoprocentní chybou.

Jiří Kohl
jirkak@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

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

²<https://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen>