

Stavová rovnice ideálního plynu

Vojtěch Beneš

- Výstup RVP:** žák měří vybrané fyzikální veličiny vhodnými metodami, zpracuje a vyhodnotí výsledky měření, aplikuje s porozuměním termodynamické zákony při řešení konkrétních fyzikálních úloh
- Klíčová slova:** stavová rovnice, ideální plyn, izoděje, tlak, objem, teplota, Boyle-Mariottův zákon, Charlesův zákon

Laboratorní práce

Doba na přípravu:

15 min

Doba na provedení:

90 min

Obtížnost:

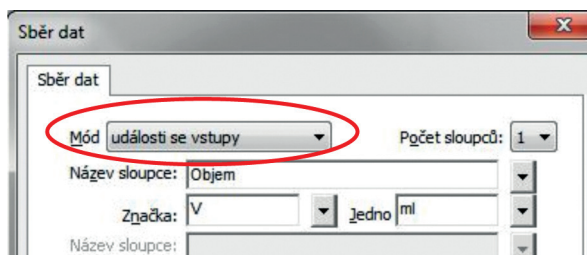
vysoká

- Úkol**
1. Experimentálně ověřte Boyle-Mariottův zákon.
 2. Experimentálně ověřte Charlesův zákon, odvoďte z něj teplotu absolutní nuly.

Pomůcky Tlakoměr Vernier s příslušenstvím, teploměr Go!Temp, LabQuest, počítač s programem Logger Pro, stojan, kónická baňka, nádobka o objemu cca 1 l, varná konvice.

- Teoretický úvod**
- V ideálním plynu se stálým množstvím částic platí následující zákony:
- 1) Boyle-Mariottův zákon: Nemění-li se teplota ideálního plynu, je jeho tlak nepřímo úměrný objemu.
 - 2) Charlesův zákon: Nemění-li se objem ideálního plynu, je jeho tlak přímo úměrný absolutní teplotě.

- Vypracování**
- 1) Boyle-Mariottův zákon**
- Provedeme jedenáct měření pro objemy od 15 ml do 5 ml.



Na stříkačce (je příslušenstvím tlakoměru) nastavte objem 10 ml. Připojte ji takto k tlakoměru zašroubováním o půl otáčky. Zapojte tlakoměr do analogového vstupu LabQuestu a LabQuest propojte s počítačem.

V programu Logger Pro zvolíme **Experiment** → **Sběr dat** a změníme **Mód** na **Události se vstupy**, popis dle obrázku.

Měření zahájíme kliknutím na ikonu  **Sběr dat**. Poté, co na stříkačce nastavíme požadovaný objem, stiskneme  **Zachovat** a do okna, které se otevře, zapíšeme objem v ml. Hodnota odpovídajícího tlaku mu bude automaticky přiřazena. Postupujte od 10 ml do 5 ml a pak od 11 ml do 15 ml vždy po 1 ml.

Pozor, objem nesmí klesnout pod 5 ml!

- Vyhodnocení**
- V nastavení grafu necháme zobrazit jednotlivé body, které nebudeme spojovat. Identifikujte typ křivky $p = f(V)$ a odpovídající matematickou funkci. Prostřednictvím menu **Analýza** → **Proložit křivku** proložte body vhodnou křivkou. Na základě tvaru křivky a rovnice regrese rozhodněte, zda se podařilo ověřit Boyle-Mariottův zákon.

Stavová rovnice ideálního plynu

2) Charlesův zákon

Provedeme sedm měření v teplotním intervalu 20 °C až 90 °C.



Do kónické baňky vsuneme gumovou zátku se dvěma otvory (je příslušenstvím tlakoměru). Do jednoho z nich našroubujeme uzávěr (ponecháme otevřený). Do druhého napojíme hadičku, jejíž druhý konec zašroubujeme do tlakoměru. Tlakoměr je zapojen v LabQuestu, LabQuest do počítače. Baňku připevníme ke stojanu a ponoříme do nádoby s vodou o pokojové teplotě.

V tento okamžik zavřeme ventil; tento musí zůstat uzavřený po celou dobu měření. Zátka musí v hrdle baňky držet pevně, aby vzduch nemohl zevnitř uniknout.

Do USB portu počítače vsuneme teploměr Go!Temp.

V programu Logger Pro zvolíme **Experiment** → **Sběr dat** a nastavíme **Mód Vybrané události**.

Postupně budeme měnit teplotu vody v nádobě a budeme sledovat tlak a teplotu plynu. Na  klikneme až poté, co se hodnoty tlaku a teploty ustálí (přibližně 30 s).

Pozor, nádoba s vodou o 90 °C je horká!

Vyhodnocení V programu Logger Pro sestrojíte graf závislosti tlaku na teplotě. Proložte jej vhodnou křivkou. Na základě grafu rozhodněte, zda jste ověřili Charlesův zákon.

Absolutní nula je teplota, při které by se zastavil tepelný chaotický pohyb. V tom případě by i tlak plynu poklesl na nulu. Graficky nebo pomocí rovnice regrese najděte experimentální hodnotu absolutní nuly ve °C a porovnejte ji se známou hodnotou. Učiňte závěr.

Vylepšení (pro šikovné) Oba zákony jste pravděpodobně ověřili se značnou chybou.



V případě Boyleva zákona je chyba způsobena tím, že přírodní hadička ke tlakoměru má nenulový objem V_1 . Přeneste naměřená data do Excelu a najděte, jaký objem V_1 musíme přičíst ke změřenému objemu V , aby byl součin $p \cdot V_{\text{celkový}}$ konstantní.

Provedte kvalifikovaný odhad chyby, s jakou byly zákony ověřeny: vypočítejte aritmetické průměry hodnot $p \cdot V_{\text{celkový}}$ a p/T (teplotu jste si převedli na kelviny) a určete, o kolik procent se liší od aritmetického průměru nejvíce vzdálená hodnota.

Stavová rovnice ideálního plynu

Vojtěch Beneš

Aby nedošlo k poškození přístroje, je třeba hlídat, aby žáci dodržovali pokyny k práci s tlakoměrem. Zejména dejte pozor:

- aby se žáci nesnažili plyn stlačit co nejvíce,
- aby s napojením stříkačky na tlakoměr manipulovali velmi opatrně,
- aby zátka pevně držela, ale nebyla zaražena příliš hluboko,
- aby se hadička vedoucí k tlakoměru nedotýkala horké nádoby,
- aby nebrali nádobu s horkou vodou do ruky atp.

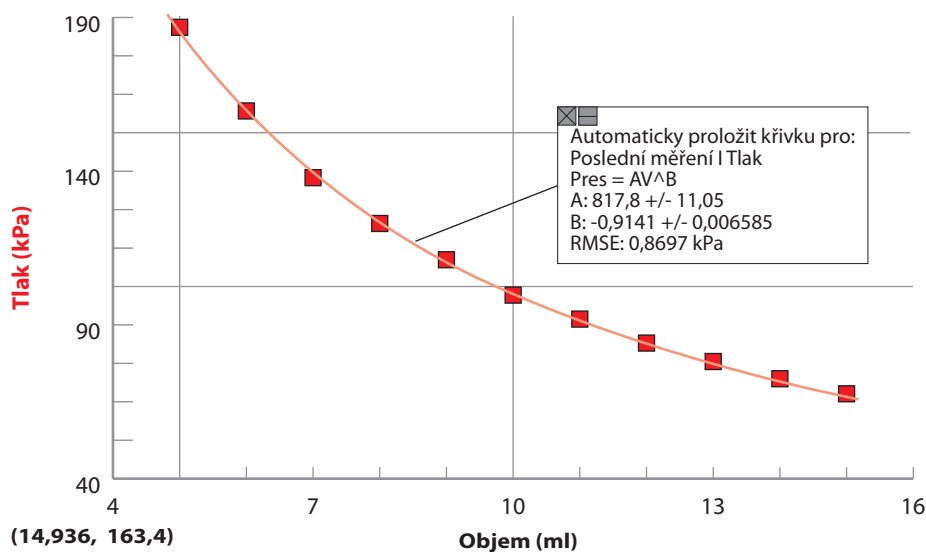
Použití plastové nádoby nedoporučujeme, není zaručena tvarová stálost.

Je třeba neztrácet čas, veškerá měření a zpracování je nutno provést v programu Logger Pro, tj. ve škole.

Výsledky Boyle-Mariottův zákon:

V (ml)	p (kPa)
5	186,8
6	159,6
7	137,9
8	123,0
9	111,2
10	99,7
11	91,9
12	84,1
13	78,1
14	72,5
15	67,6

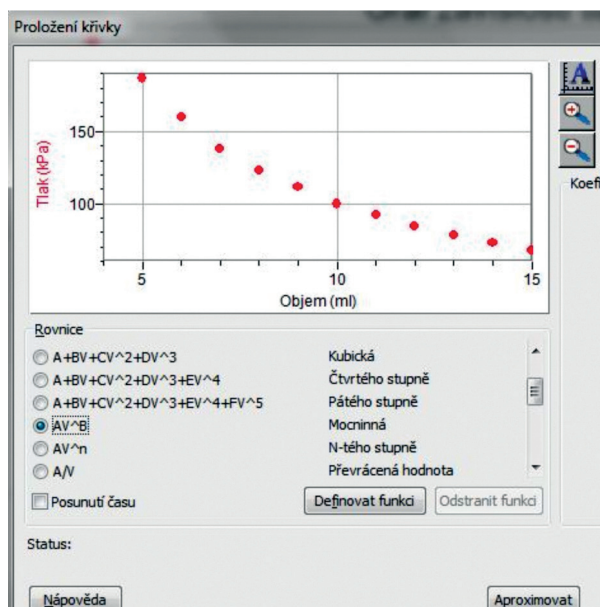
Graf závislosti tlaku na objemu



Boyle-Mariottův zákon říká, že součin tlaku a objemu je pro konstantní množství plynu při stálé teplotě konstantní. Takže p je nepřímo úměrné V . V grafu vidíme rameno hyperboly, budeme tedy prokládat body mocninovou funkcí.

Stavová rovnice ideálního plynu

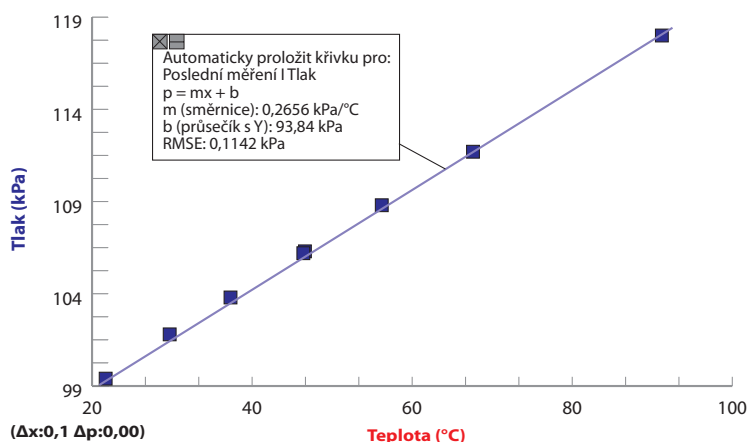
Exponent proložené funkce je blízký -1 , takže experimentálně bylo ověřeno, že tlak je nepřímo úměrný objemu čili byl ověřen Boyleův zákon. Odchylka exponentu o 9 % oproti správné hodnotě je způsobena přítomností parazitního objemu plynu v napojení stříkačky na tlakové čidlo.



Charlesův zákon:

t (°C)	p (kPa)
21,7	99,4
29,7	101,8
37,3	103,8
46,6	106,3
46,4	106,2
56,2	108,8
67,6	111,7
91,2	118,0

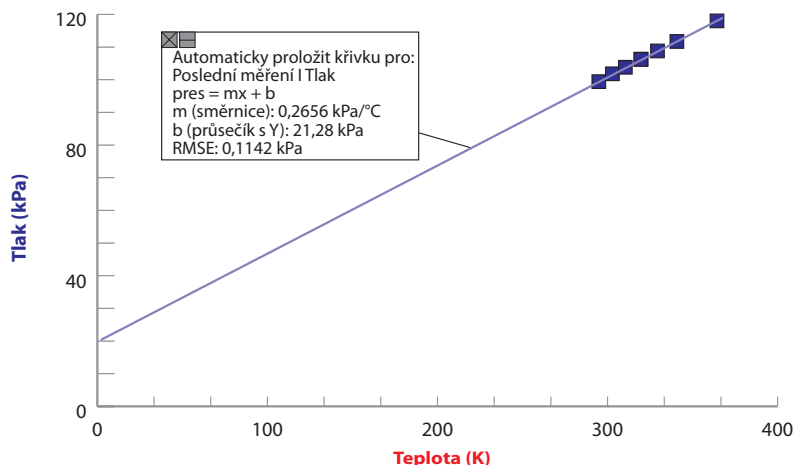
Graf závislosti tlaku na teplotě



Tlak je lineární funkcí teploty ve stupních Celsia. Charlesův zákon byl ověřen.

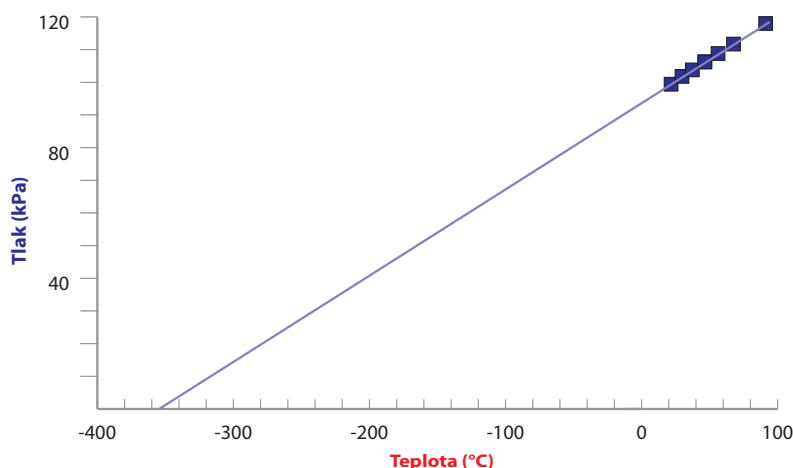
Pozn.: Kdybychom vynášeli teplotu v kelvinech, byl by tlak přímo úměrný této (absolutní) teplotě. Kvůli nepřesnostem měření ovšem většinou regresní přímka neprochází počátkem grafu $p = f(T)$. Je na učiteli, aby rozhodl, kterému grafu dá přednost.

Graf závislosti tlaku na teplotě



Teplotu absolutní nuly získáme z rovnice regrese $p = 0,2656 \cdot t + 93,84$ dosazením za $p = 0$. Vychází $t_{abs} = -353$ °C. Graficky dostaneme tentýž výsledek vhodnou volbou minimální hodnoty na osách:

Graf závislosti tlaku na teplotě



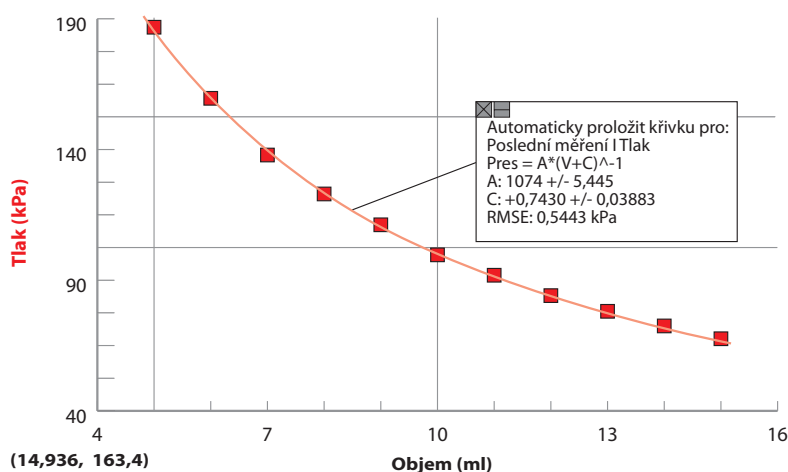
Nesoulad se správnou hodnotou $-273,15$ °C je způsoben především gradientem teploty uvnitř hadičky vedoucí ke tlakovému čidlu.

Vylepšení Parazitní objem hadičky

Výrobce udává hodnotu 0,8 ml.

Hodnotu V_1 lze získat v programu Logger Pro proložením (fitováním) pomocí nově definované funkce (**Analýza**→**Proložit křivku...** / **Definovat funkci**) $f(V) = A/(V+C)$. Potom pro změřené hodnoty vychází (viz graf) $V_1 = C = 0,74$ ml.

Graf závislosti tlaku na objemu



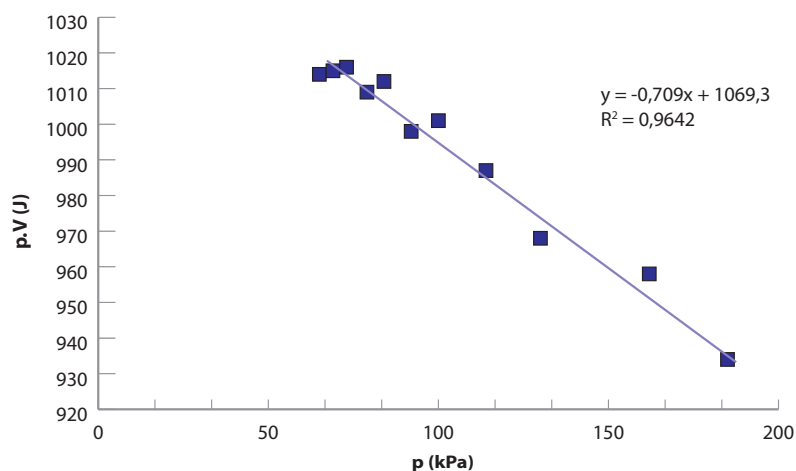


Stavová rovnice ideálního plynu

V Excelu je možné dospět k týmž hodnotám následujícím postupem:

$p(V + V_1) = p \cdot V_{\text{celkový}} = \text{konst}$, takže $p \cdot V = \text{konst} - p \cdot V_1$. Sestrojíme graf závislosti součinu $p \cdot V$ na tlaku a směrnice této klesající přímky je parazitní objem V_1 . Vychází $V_1 = 0,71$ ml.

**Určení
parazitního
objemu
hadičky**



Chyba měření Po opravě objemu o 0,71 ml je aritmetický průměr součinů $p \cdot V_{\text{celkový}} = 1\,069$ J, maximální hodnota 1 080 J, takže zákon byl ověřen s chybou 1 %.

Aritmetický průměr hodnot p/T (použita byla správná hodnota teploty absolutní nuly) činí 0,332 kPa/K, nejmenší hodnota je 0,324 kPa/K, takže zákon byl ověřen s chybou asi 2,4 %.