

Kvantitativní vyhodnocení experimentu „Vejce v lahvi“

VLADIMÍR VOCHOZKA

Pedagogická fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Vejce v lahvi či vejce do skla je tradiční experiment, který je často vzpomínám v učebnicích, sbírkách pokusů, internetových zábavných videích i mezi laickou veřejností. Ve výuce fyziky najde své uplatnění především v učivu mechaniky plynů – o atmosférickém tlaku. Kvalitativní vyhodnocení je možné dohledat v mnoha verzích. [1]

Pro vysvětlení příčin známých důsledků pokusu je sestavena testovací nádoba s bodovým teplotním čidlem a čidlem tlaku plynu. Pokus byl prováděn s různými zdroji tepla: ohřátou vodou, ohřátým olejem, parafínovou svíčkou, papírem zažehnutým zápalkou, vatovou tyčinkou namočenou v lihu. Omezení délky příspěvku umožňuje popsat pouze výsledky nejvhodnějšího vybraného zdroje tepla, 55W halogenové autožárovky [2].

Teorie

Atmosférický tlak

Síla, kterou působí atmosféra planety Země na jednotkovou plochu ve vybraném místě se nazývá *atmosférický tlak*. Průměrný atmosférický tlak se nazývá *barometrický*. Tlak větší než barometrický se nazývá *přetlak*. Tlak nižší než barometrický se nazývá *podtlak*. [3]

Izochorický děj

Termodynamický děj, při kterém zůstává objem termodynamické soustavy konstantní, se nazývá *Izochorický děj*. [3]

$$V = \text{konst.} \quad (1)$$

Izochora je přímka rovnoběžná s osou p v p - V diagramu zobrazující závislost tlaku p na objemu V při izochorickém ději (Obrázek 1a). [4]



Obrázek 1 - (a) p - V diagram ideálního plynu

(b) p - T diagram ideálního plynu

Závislost tlaku na teplotě T při izochorickém ději pro ideální plyn je naznačena v p - T diagramu (Obrázek 1b).

Charlesův zákon

Vztah pro Izochorický děj se nazývá *Charlesův zákon* [5]:

$$\frac{p}{T} = \text{konst.} \quad (2)$$

kde p je tlak plynu a T je termodynamická teplota.

Pomůcky

Vejce, skleněná lahev od mléka, papír a zápalky

Základem pokusu je slepičí vejce. Na provedení nemá vliv kvalita či cena. Během testování nebylo objevené žádné omezení vedoucí k neúspěchu experimentu. Tradiční pojetí experimentu vyžaduje oloupané vařené vejce, umístěné na hrdlo skleněné lahve, do které je vhozen zapálený papír. Doporučena je skleněná lahev od mléka, například 0,75l *Bohemilk* v COOP Ternu za 24,90 Kč (12.6.2019).

Plastová dóza na potraviny

Dominantní částí pro vytvoření soupravy na měření je vzduchotěsná plastová dóza na potraviny o objemu $V = 1,8$ l a rozměrech 151×108×185 mm od firmy *Lock&Lock* (Obrázek 2). [6] Průsvitné tělo je z polypropylenu. Těsnicí guma víčka je ze silikonu. Cena v obchodní síti Albert je 129,90 Kč (26.6.2019).



Obrázek 2 - Dóza na potraviny Lock&Lock o objemu 1,8 l

Bodové teplotní čidlo

K měření změny teploty je využito bodové teplotní čidlo, *Surface Temperature Sensor STS-BTA*, od firmy *Vernier* v hodnotě 1 485 Kč (14. 6. 2019). Podle specifikace výrobce je rozsah čidla -25 – 125 °C s citlivostí 0,1 °C. [7]

Čidlo tlaku plynu

K určení velikosti tlaku je zvoleno čidlo tlaku plynu, *Gas Pressure Sensor GPS-BTA*, v hodnotě 4 980 Kč (14. 6. 2019) měřicího systému *Vernier*. Pro potřeby úlohy má čidlo adekvátní parametry. Podle specifikace výrobce je rozsah čidla 0–210 kPa s citlivostí 0,06 kPa. [8]

Plastová prodlužovací hadička infuze

Pro připojení konce tlakového čidla k nádobě je použit jeden konec plastové prodlužovací hadičky infuze. Společnost *Gama* nabízí za 9,80 Kč (12.06.2019) výrobek *Gamaplus 1,8×450 LL V606301-ND* [9], který je zakončen samicí i samcem typu *Luer Lock*.

Datalogger

Data zaznamenává logger *LabQuest Mini*, LQ-MINI, v hodnotě 8 195 Kč (14.6. 2019), který je připojen přes USB rozhraní s počítačem. K vizualizaci dat a jejich uložení běží

v počítači program *Vernier Logger Pro* (3.15) Vzorkovací frekvence rozhraní je až 100 000 Hz. [10]

Autožárovka

K ohřevu vzduchu je použita autožárovka *PX26d* od firmy *Economy*, která stojí 26 Kč (17. 06. 2019). Žárovka je pro napětí 12 V, příkon 12 W a patici H7. [11]

Patice žárovky

Keramická patice *H7* značky *Carface* pro napětí 12 V či 24 V se prodává v balení po dvou kusech za 109 Kč (13.06.2019), například v *Auto Kelly*. [12]

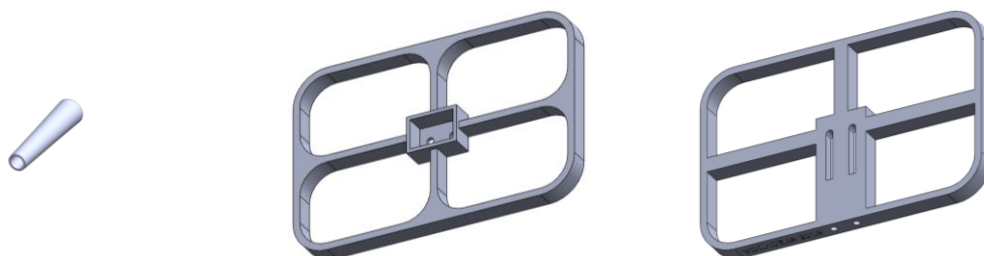
Otvor pro vejce s objímkou, přechodka pro teplotní čidlo, držák patice, podstavec pro vodiče a chránící síťka

Ve strojírenském 3D CAD softwaru *SolidWorks* (2018) pro platformu Microsoft Windows jsou vymodelovány části doplňující uzavíratelnou dózu.

Díly jsou tištěny na 3D tiskárně *Prusa i3 MK3S* z PETG (PolyEthylene Terephthalate Glycol) bez nutnosti podpor, tryskou s průměrem 0,4 mm, s výškou vrstvy 0,10 mm a hustotou výplně 50 %.

Sestavení a testování soupravy pro měření

Do boku nádoby jsou vyvrtány otvory pro umístění samce závitu Lock Luer pro připojení tlakového čidla a vložení vytisknuté přechodky pro bodový teploměr. Cena teplotního čidla není zanedbatelná, a proto je umístěno v přechodce kónického tvaru (Obrázek 3a), který je i u závitu Lock Luer.



Obrázek 3 - (a) Přechodka pro teplotní čidlo

(b) Držák patice

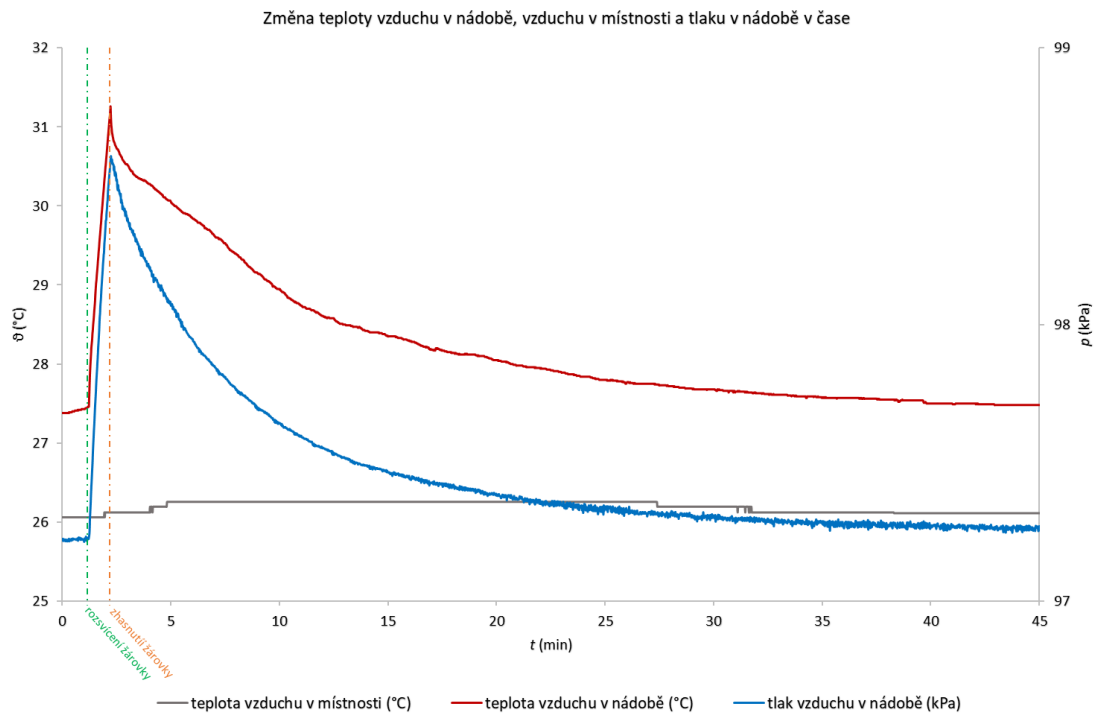
(c) Podstavec pro vodiče

Utěsnění teploměru uvnitř přechodky je zajištěno materiálem z tavné pistole, které je možné odstranit. Kónický tvar umožňuje postupné vtlačení k zachování nepropustnosti. Obě části jsou navíc zalepeny sekundovým lepidlem.

Do víka jsou vyvrtány otvory pro oba vodiče vycházející z patice. Keramická patice je přilepena k vytisknutému držáku patice (Obrázek 3b) a ten poté přilepen k vnitřní straně víka. Vodiče jsou protaženy otvory ve víku, utěsněny a na druhé straně vsunuty do podstavce pro vodiče (Obrázek 3c), který je přilepen k vnější straně víka.

Do patice je umístěna žárovka a nádoba je uzavřena víkem. Vodiče jsou připojeny ke 12 V zdroji napětí. S nádobou jsou spojeny čidla tlaku a teploty, které jsou dále propojeny přes logger s počítačem.

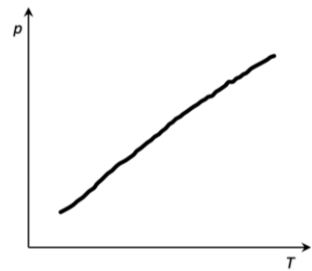
V programu Logger Pro je nastaven *Sběr dat* na *Trvání* 50 min a *Vzorkovací frekvence* 120 vzorků/min. V programu je spuštěn záznam hodnot tlačítkem *Zahájit sběr dat*. Po přibližně 1 minutě je uzavřen obvod a žárovka začne ohřívat objem nádoby. Po 3 minutách od začátku (2 minutách ohřevu) je obvod rozpojen. Naměřené hodnoty po 50 minutách shrnuje následující graf (Obrázek 4).



Obrázek 4 - Graf změny teploty vzduchu v nádobě, vzduchu v místnosti a tlaku vzduchu v nádobě v čase

V grafu můžeme pozorovat minimální změny hodnot pro všechny tři veličiny od začátku do dosáhnutí svislé čerchované úsečky **rozsvícení žárovky**. Úsečka *rozsvícení žárovky* protíná časovou osu v okamžiku sepnutí obvodu. Ohřev vzduchu žárovkou probíhá do dosáhnutí svislé čerchované úsečky **zhasnutí žárovky**, v tomto okamžiku dochází k rozpojení obvodu.

Úsek mezi úsečkami *rozsvícení žárovky* a *zhasnutí žárovky* ukazuje závislost změny tlaku vzduchu v nádobě na teplotě vzduchu v nádobě. p - T diagram vybraného úseku ukazuje podobné chování vzduchu v nádobě jako pro ideální plyn (Obrázek 5) při izochorickém ději popsané Charlesovým zákonem (2).



Obrázek 5 - p - T diagram vybraného úseku při ohřevu autožárovkou

Další část grafu zachycuje změny měřených veličin, tepelnou výměnu mezi vzduchem v nádobě, nádobou a vzduchem v místnosti. Se snižující se teplotou vzduchu v nádobě pozorujeme snižující se tlak vzduchu v nádobě. Křivka změny teploty vzduchu v místnosti v čase dokazuje, že okolní prostředí neovlivňuje zásadně průběh měření.

Na základě naměřených výsledků lze konstatovat, že nádoba je vhodná pro experimentování, je vzduchotěsná, nedochází u ní k zásadní výměně částic s okolím.

Úprava nádoby pro pokus

Pro pokus je dominantním dílem *otvor pro vejce* (Obrázek 6a), který je vložen zevnitř nádoby do její dolní podstavy a nahoře stažen *objímkami* (Obrázek 6b).



Obrázek 6 - (a) Otvor pro vejce



(b) Objímka s otvory pro šroub



(c) Řez sestavou otvoru a objímky

K zvýšení těsnosti je před umístěním na stykové plochy přidáno plastické mazivo. Objímky se spolu spojí šroubem M4×10 s maticí M4. Sestavení obou dílů naznačuje vymodelovaný řez (Obrázek 6c), kde prázdný prostor při montáži zabírá dolní stěna nádoby.

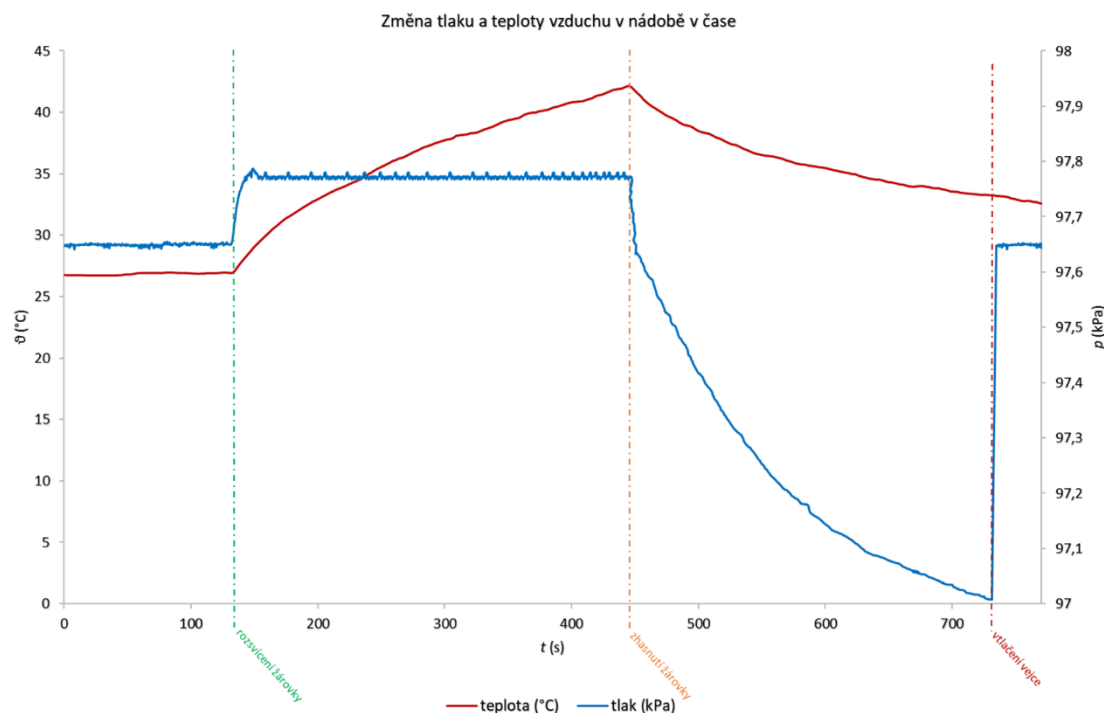
Ohřev halogenovou autožárovkou

Postup

1. Vařené a oloupané vejce bylo umístěno do otvoru nádoby.
2. *Sběr dat* byl spuštěn na 30 minut a *Vzorkovací frekvence* nastavena na 120 vzorků/minutu.
3. Po 130 sekundách od spuštění měření byla **rozsvícena žárovka**, v grafu můžeme pozorovat změny teploty a tlaku vzduchu v nádobě. Teplota postupně roste. Tlak se zvýšil o cca 6 kPa a poté se jeho změna relativně ustálí. Tento jev je doprovázen unikáním vzduchu okolo vejce, jeho postupným nadnesením a následným uzavřením otvoru.
4. Po uplynutí 445 sekund je **žárovka zhasnuta**. Teplota a tlak začnou okamžitě klesat.
5. Ve 720. sekundě je **vejce vtlačeno** dovnitř nádoby.
6. Tlak je po otevření nádoby shodný jako na začátku experimentu. K vyrovnání teploty dochází postupně.

Naměřené hodnoty

Popsaný průběh pokusu je možné pozorovat v následujícím grafu (Obrázek 7).



Obrázek 7 - Graf změny teploty vzduchu v nádobě a tlaku vzduchu v nádobě v čase

Výsledky

Z analýzy naměřených hodnot při ohřevu halogenovou žárovkou můžeme konstatovat, že dominantním jevem způsobujícím vtažení vejce do nádoby je chladnutí vzduchu v uzavřeném prostoru, vedoucí k podtlaku.

Závěr

Pokus by měl být jednoduchý, opakovatelný a srozumitelný. Pro kvalitativní vysvětlení je varianta se zapáleným papírem vhozeným do skleněné nádoby ideální. Kvantitativní ověření vyžaduje složitější přípravu experimentu, ale dokazuje obdobný průběh, který lze pozorovat přímo a nalézt shodu s naměřenými hodnotami.

Literatura

- [1] ROJKO, Milan. *Omyly, které ovládly svět*. Praha: Pražské centrum vzdělávání pedagogických pracovníků, 1993. ISBN 80-7015-240-0.
- [2] KOUDELA, Zdeněk. *Termoregulační zařízení – návrh, konstrukce a měření*. České Budějovice, 2019. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce Mgr. Pavel ČERNÝ, Ph.D.
- [3] HLAVIČKA, Alois, ed. *Fyzika pro pedagogické fakulty*. 2. vyd. Praha: SPN, 1978. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.

- [5] VOLF, Ivo a Miroslava JAREŠOVÁ. *Fyzika je kolem nás (Molekulová fyzika a termika): Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku.*
- [6] Lock & Lock dózy na potraviny. *Lock & Lock dózy na potraviny* [online]. Dostupné z: <http://locklock.eu/>
- [7] Vernier CZ – Vybavení pro výuku přírodovědných oborů – bodové teplotní čidlo. [online]. Copyright © 2019 [cit. 14.06.2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2KNWwzB>
- [8] Vernier CZ – Vybavení pro výuku přírodovědných oborů – čidlo tlaku plynu. [online]. Copyright © 2019 [cit. 14.06.2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2IJ31B9>
- [9] *GAMAPLUS 1,8 x 450 LL* | GAMA GROUP a.s. [online]. Copyright © 2007 [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2XACHMO>
- [10] Vernier CZ – Vybavení pro výuku přírodovědných oborů – LabQuest Mini. [online]. Copyright © 2019 [cit. 14.06.2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2IUTNIF>
- [11] Žárovka H7 12V 55W PX26d ECONOMY | Svetzarovek.eu. *Světžárovek.eu - LED žárovky, LED pásky, úsporné žárovky* [online]. Copyright © 2007 [cit. 14.06.2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2KP2pMX>
- [12] Patice keramická H7 2 ks – DO CFCP08396 | E-shop Auto Kelly a.s. *Náhradní díly, autodíly – Auto Kelly E-Shop* [online]. Dostupné z: <https://bit.ly/305gcnc>