

Úloha č. 3C: Molekulová fyzika a termodynamika

jarní semestr 2022

Obsah

1	Molekulová fyzika	3
1.1	Tepelný pohyb a jeho projevy	3
	E 1 Jednoduché experimenty na difúzi	3
	E 2 Osmóza – cukerný roztok	4
	E 3 Osmóza – vejčička	4
	E 4 Transfúze plynů	5
	E 5 *Viskozita plynů	5
	E 6 *Rozpustnost a difúze plynů v kovu	7
	E 7 Brownův pohyb	7
1.2	Modelové pokusy z kinetické teorie plynů	8
	E 8 Souprava Phywe („třepadlo“)	8
	E 9 Souprava se vzduchovým polštářem	10
	E 10 Simulace druhého zákona termodynamiky na Ehrenfestově statistickém stroji	11
2	Termodynamika	12
2.1	Stavová rovnice a děje v plynu	12
	E 11 Plynový teploměr s čidly Pasco	12
	E 12 Izotermický děj ve stříkačce s čidly Pasco	12
	E 13 pVT přístroj	13
	E 14 Jednoduché experimenty na adiabatický děj	14
	E 15 Aparatura pro studium adiabatického děje v plynu	15
2.2	Tepelné stroje	17
	E 16 Motorek na stlačený oxid uhličitý	17
	E 17 Kolaps plechovky, princip Newcomenova parního stroje	17
	E 18 Newcomenův parní stroj	18
	E 19 Stirlingův stroj	20
	E 20 Peltiérův článek	24
2.3	Fázové změny	24
	E 21 Hustota syté páry	24
	E 22 Sytá a přehřátá pára	25
	E 23 Podchlazení při fázovém přechodu octanu sodného	25



RVP G Fyzika – stavba a vlastnosti látek

- kinetická teorie látek
 - charakter pohybu a vzájemných interakcí částic v látkách různých skupenství
- termodynamika
 - termodynamická teplota
 - vnitřní energie a její změna, teplo
 - první a druhý termodynamický zákon
 - měrná tepelná kapacita
 - různé způsoby přenosu vnitřní energie v rozličných systémech
- vlastnosti látek
 - normálové napětí, Hookův zákon (viz PŠP 2 Mechanika)
 - povrchové napětí kapaliny, kapilární jevy (viz PŠP 1 Mechanika kapalin)
 - součinitel teplotní roztažnosti pevných látek a kapalin (viz PŠP 1 Termika)
 - skupenské a měrné skupenské teplo (viz PŠP 1 Termika)

1 Molekulová fyzika

1.1 Tepelný pohyb a jeho projevy

E 1 – Jednoduché experimenty na difúzi

Rozptýlení částic látky do okolí nemusí být jen důsledkem náhodného tepelného pohybu částic.

Provedení

1. Na navlhčený filtrační papír nakreslíme značky barevným roztokem (např. fixem na vodní bázi). Pozorujeme rozptýlení obrazců.
2. Ve vysokém odměrném válci zalijeme barvivo (krystalky skalice modré, čaj) vodou. V řádech hodin pozorujeme, jak zbarvení kapaliny postupně propaguje vzhůru. Podle zákonů mechaniky by však hustější látka neměla v kapalině stoupat.
3. V jednom rohu neprovětrávané místnosti otevřeme lahvičku s voňavkou. Za určitou dobu voňavku ucítíme po celé místnosti. Půjde o difúzi?

Otázka

Na čem závisí rychlost difúze? Jak závisí na teplotě?

Fyzikální interpretace

Difúze je děj, při kterém dochází vlivem náhodného pohybu částic k přenosu částic určité látky z míst o vyšší koncentraci této látky do míst s její nižší koncentrací. Na rozdíl od jiných procesů, které rovněž mohou stát za transportem látky, je difúze řízena koncentračním gradientem, což vyjadřuje první Fickův zákon

$$\vec{\Gamma} = -D \text{grad } N,$$

kde $\vec{\Gamma}$ je tok částic $\vec{\Gamma} = N\vec{v}$, N je koncentrace a D je koeficient difúze. Ten tedy udává tok, tj. rychlost přemísťování částic, při jednotkovém gradientu koncentrace.

V případě neutrálních částic **plynu** je koeficient difúze částic A v částicích B roven

$$D_{AB} = \frac{\pi}{8} \lambda_{AB} \bar{v}_{AB},$$

kde λ_{AB} je střední volná dráha částice A a \bar{v}_{AB} je střední vzájemná rychlost $\bar{v}_{AB} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi\mu}}$ s redukovanou hmotností μ . Střední volnou dráhu částice A lze určit z účinného průřezu srážky σ a koncentrace částic B

$$\lambda_{AB} = \frac{1}{N_B \sigma_{AB}}.$$

Účinný průřez lze v přiblížení tuhých koulí aproximovat výrazem $\sigma_{AB} = \pi(d_A/2 + d_B/2)^2$, kde d_A , d_B jsou tzv. kinetické průměry částic definované právě přes střední volnou dráhu (viz tabulka 1).

Molekula	Kinetický průměr (10^{-10} m)
H ₂	2,3
O ₂	3,0
CO ₂	3,4

Tabulka 1: Kinetické průměry některých molekul.

Technické problémy

Difúzi může být nesprávně připisován transport částic způsobený jinými ději. Experiment je zapotřebí nastavit zejména tak, aby nedocházelo k transportu vlivem makroskopického proudění.

Otevřeme-li v místnosti okno, je pravděpodobné, že vůni voňavky ucítíme spíše díky „větru“, který ji přivane. Střední volná dráha částice srovnatelné s molekulou dusíku je ve vzduchu za atmosférického tlaku desítky nanometrů. Za 10 s se tedy částice může dostat difúzí řádově do centimetrové vzdálenosti.

Kápneme-li kapku barviva na suchý filtrační papír, může barvivo roznášet kapilarita.

Kápneme-li kapku obarvené vody do sklenice s teplou vodou, barvivo se sice rozptýluje lépe než ve vodě studené, ale příčinou není jen difúze. Pád studené kapky v teplé vodě (o nižší hustotě) ke dnu sklenice nastartuje makroskopický vír, který barvivo promíchá. Ve sklenici se studenou vodou kapka padá jen setrvačností (rychlost lze pak minimalizovat).

E 2 – Osmóza – cukerný roztok

Provedení

Celofánová blána odděluje horní prostor, ve kterém je cukerný roztok ve vodě, od dolního prostoru – vody. K nádobce připevněte trubičku s dílkou, doplňte cukerný roztok k dolnímu dílku a ponořte do vody. Pokus nechejte probíhat dostatečně dlouho, aby vzestup hladiny v trubičce byl přesvědčivý.

Fyzikální interpretace

Osmóza je pronikání molekul rozpouštědla (typicky vody) přes polopropustnou membránu z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem s „cílem“ obě koncentrace vyrovnat. Polopropustná membrána je selektivně propustná pro rozpouštědlo, ale méně propustná či nepropustná pro rozpuštěnou látku. Jednosměrný transport molekul rozpouštědla způsobuje osmotický tlak. Stejný tlak transport zastaví.

Molekuly sacharózy jsou příliš velké a mikroskopickými otvory v celofánové membráně nemožnou projít, ale molekuly vody jimi procházejí.

Osmotický tlak lze určit ze vztahu $p = \frac{n}{V}RT$, kde n/V je molární koncentrace látky způsobující osmózu. Pro případ soli disociované ve vodě je zapotřebí vzít dvojnásobek koncentrace soli (disociace na dva ionty).

Technické problémy

Čím nahradit celofán? Většina takzvaně „celofánových“ obalů je ve skutečnosti tzv. tatrafán, tenká plastová fólie z polypropylenu (PP). Pravý celofán je ale stále možné koupit.

Otázka

Uveďte příklady dějů v živých organismech, při nichž dochází k osmóze. Reverzní osmóza jako metoda získání čisté vody. Vaření párků.

E 3 – Osmóza – vejíčka

Příprava

Dvě vejíčka necháme na noc v octové lázni.

Provedení

Vajíčka osušíme a zvážíme. Poté jedno umístíme do destilované vody, druhé do nasyceného solného roztoku. Děj necháme probíhat aspoň půl hodiny. Pak vajíčka vytáhneme, osušíme a zvážíme.

Fyzikální interpretace

Hmotnost vajíčka v destilované vodě se osmózou zvětšuje, hmotnost vajíčka v solném roztoku se snižuje (vysušuje se).

E 4 – Transfúze plynů

Transfúze plynů je difúze plynů přes průlinčitou nádobu/membránu. Rychlost je pro různé plyny různá, může tak dojít k dočasnému zvýšení i snížení celkového tlaku plynu.

Příprava

Výroba vodíku pro difúzi:

1. Na elektrolyzér naplněný vodou přivedeme 2 V a jímáme vznikající vodík do zásobníku.
2. Vodík vyrobíme rozkladem třicetiprocentní kyseliny sírové v Hoffmanové přístroji. Napětí přivádíme ze DC zdroje (do 8–10 V); rozkladné napětí je asi 1,7 V.

Provedení

Nádobku s průlinčitou membránou (s otvory cca $0,3 \mu\text{m}$) spojíme s tlakoměrem (např. kapalinovou U-trubicí) a překryjeme kádinkou, viz obrázek 1. Na začátku pokusu je v nádobce atmosférický tlak. Když vyrobíme dostatečné množství vodíku, přivedeme ho hadičkou pod poklopenou kádinku. Pozorujeme vzestup tlaku a jeho následné vyrovnání.

Poté odstraníme kádinku. Nyní pozorujeme vznik podtlaku i následné opětovné ustálení tlaku na hodnotě atmosférického tlaku.

Modifikace pokusu

K demonstraci můžete použít i jiný plyn, např. metan (zemní plyn) nebo těžký plyn na čištění (CleanIT – tetrafluor...). Těžký plyn nejlépe napustíme do kádinky a poté do něj nádobku ponoříme. Místo membrány lze spolu plynem na čištění použít křidu s odvrtným středem.

Otázka

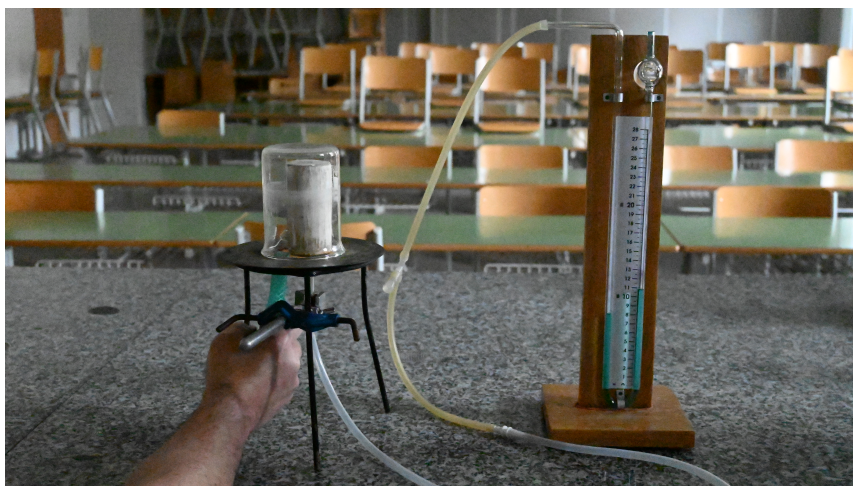
Určete převládající směr difúze molekul vzduchu a vodíku a porovnejte jejich rychlosti. Jak se nazývá doba, po jejímž uplynutí se ustálí v nádobce atmosférický tlak a jaký je její fyzikální význam?

Technické problémy

Dobře pozorovatelné změny vyžadují větší množství plynu. Citlivost U-trubice lze zvýšit jejím nakloněním.

E 5 – *Viskozita plynů

Do skleněné trubice s přesně padnoucí ocelovou kuličkou (viz obrázek 2) nasajeme vzduch, butan nebo čisticí plyn. Poté necháme kuličku v trubici padat (spodní konec s nasávací částí je uzavřen, horní konec jen s malým otvorem). Pozorujeme, že kulička v butanu padá rychleji než ve vzduchu.



Obrázek 1: Transfúze plynů přes průlinčitou stěnu.

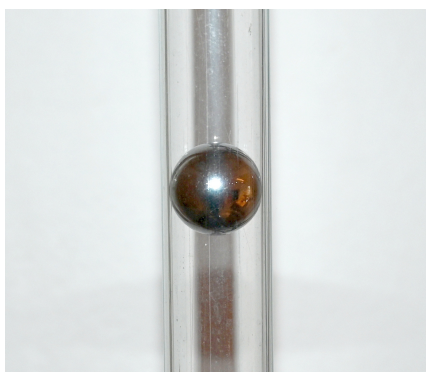
plyn	η (10^{-5} Pa s, 20°C)
kyslík	2,04
helium	1,96
vzduch	1,82
dusík	1,76
metan	1,10
vodík	0,88
butan	0,73

Tabulka 2: Viskozity plynů

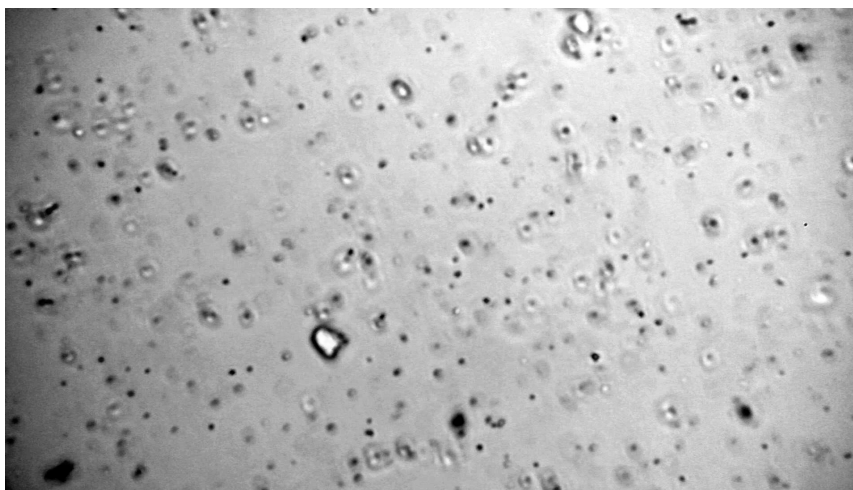
Fyzikální interpretace

Viskozita očividně není dána rozložitostí molekuly. Na čem tedy závisí? Jedním z parametrů je střední volná dráha.

Jak závisí viskozita plynů a kapalin na teplotě? U kapalin se zvýšení teploty projeví větší střední vzdáleností molekul a tedy poklesem viskozity. U plynů jsou ale vzdálenosti velké, zvýšení teploty se projeví zvýšeným přenosem hybnosti. Viskozita tedy s teplotou roste.



Obrázek 2: Viskozita plynů



Obrázek 3: Brownovy částice v mikroskopu.

E 6 – *Rozpustnost a difúze plynů v kovu

Na Petriho misce máme v elektrolytu z kyseliny citrónové/vinné umístěny elektrody z paládia (v podobě tenoučkého plechu) a nerezí. Po připojení 9 V baterie vidíme, že i při vývoji bublin na kladné nerezové elektrodě (kyslík) se na záporné paládiové elektrodě bubliny vodíku neobjevují. Místo toho se elektroda vyhne směrem od nerezové elektrody. Při inverzi napětí se elektroda postupně vrátí zpět.

Fyzikální interpretace

Vyvinutý atomární vodík se dobře rozpouští v paládiu. Zvýšení koncentrace vodíku v paládiu na straně u nerezové elektrody způsobuje její roztazení.

E 7 – Brownův pohyb

Brownův pohyb jako nepřímý důkaz částicové struktury látek a tepelného pohybu částic v kapalinách

Potřeby

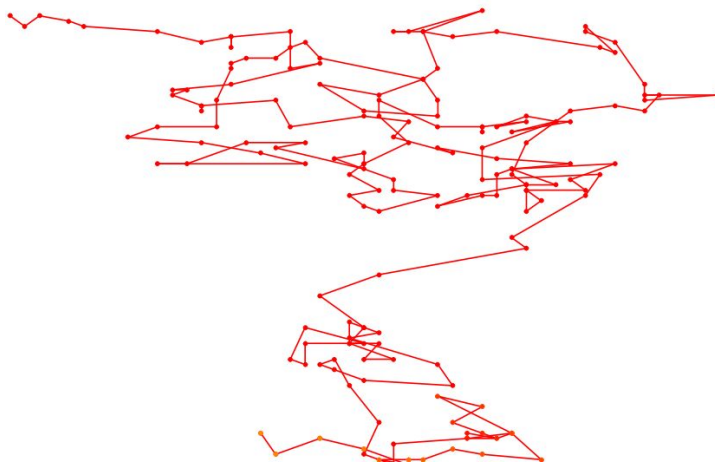
- školní mikroskop s USB okulárem, PC+dataprojektor
- videoanalýza v Pasco Capstone

Příprava

V destilované vodě rozmícháme na hodinovém sklíčku malé množství běloby. Kapku suspenze přeneseme na podložní sklíčko, shora překryjeme krycím sklíčkem a umístíme na stolek mikroskopu.

Provedení

Brownův pohyb částic pozorujeme pod mikroskopem s objektivem se zvětšením asi $50\times$ (viz obrázek 3). Videozáznam můžeme analyzovat v programu Capstone, kde sledování Brownovy částice (obrázek 4) dovolí stanovit střední kvadratické posunutí. Počátek soustavy si dáme do místa Brownovy částice v čase 0. Do grafu vyneseme kvadrát souřadnice $x^2(t)$ nebo $y^2(t)$.



Obrázek 4: Výsledek videoanalýzy v programu Pasco Capstone. Ve „svislém“ směru je patrné tečení.

Technické problémy

Příliš malé i velké množství kapaliny pod sklíčkem způsobí tečení, projevující se driftem Brownových částic v zorném poli. Malá hloubka ostrosti mikroskopu vyžaduje najít správnou rovinu zaostření.

Fyzikální interpretace

Pohyb Brownovy částice je dán zprůměrováním mnoha náhodných silových impulzů ve srážkách s molekulami vody. Střední kvadratické posunutí pro Brownovu částici v roztoku je

$$\overline{x^2} = 2Dt,$$

kde t je doba mezi dvěma pozorováními polohy a D je difúzní koeficient. $\sqrt{\overline{x^2}}$ tedy není úměrné době, ale její odmocnině. Mikroskopický parametr D s pohyblivostí v odporujícím prostředí $\mu = 1/6\pi\eta r$ spojuje Einsteinova rovnice

$$D/\mu = k_B T.$$

Střední kvadratické posunutí tedy závisí jak na teplotě, tak na velikosti Brownovy částice

$$\overline{x^2} = \frac{k_B T}{3\pi\eta r} t.$$

1.2 Modelové pokusy z kinetické teorie plynů

E 8 – Souprava Phywe („třepadlo“)

Potřeby

- Souprava Phywe na modelové pokusy z kinetické teorie plynů

Hlavní část soupravy tvoří základní těleso s elektromotorkem (obrázek 5). Horní část základního tělesa tvoří rám s projekční komorou. Komora je ohraničena úzkými kovovými stěnami, dvěma skleněnými deskami a posuvným pístem, který lze upevnit. Nálevkovitým nástavcem v boční stěně se vsypou do komory kuličky. Ty jsou uváděny do pohybu pohyblivým dnem, ovládaným elektromotorkem a excentrem, jehož frekvenci lze stanovit stroboskopicky. Druhá postranní stěna má



Obrázek 5: Souprava Phywe na modelové pokusy z kinetické teorie plynů. Obrázky převzaty z [Phywe].

dva otvory o průměrech 5 mm a 10 mm, které lze uzavírat zástrčkou. Komůrka vložená do stěny je přidržována šoupátkem.

Běžně používáme jímací komůrku a, pro ověření Maxwellova zákona filtrační komůrku b. Tato komůrka realizuje vodorovný vrh kuliček s různou rychlostí, které zachycujeme do sektorového jímáče s registrační komorou. Dbáme na těsné přiložení jímáče k otvoru komůrky. Sektorový jímáč je rozdělen na prstencovité sektory o šířce 1 cm a registrační komora na otevřené buňky u šířce 1 cm. Kuličky, které se v určitém počtu dostanou do uvažované buňky, jsou mírou četnosti kuliček v jistém intervalu rychlostí.

Příprava

Před uvedením do chodu postavte obě části soupravy na gumovou podložku a vyrovnejte pomocí stavěcích šroubů. Komoru plňte kuličkami nálevkovitým nástavcem. Kuličky musí být čisté a suché. Pokud kuličky opouštějí komoru, přidávejte každou minutu 45 kuliček, tj. udržujeme počet na 400. Po provedení pokusů vyprázdněte komoru vysunutím přední stěny a zachycením kuliček padajících z drážky do kádinky. Pro úplné vyprázdnění je třeba komoru naklonit.

Technické problémy

Nevýhodou této soupravy je značná hlučnost, která neumožní při demonstraci výklad učitele.

Úkoly

1. Demonstrujte izobarický děj, izochorický děj, existenci fluktuace stavových veličin plynu (tlaku, objemu), Brownův pohyb.
2. Demonstrujte Boltzmannovo rozdělení. Použijte optickou závoru jako detektor počtu částic v určité výšce. Předpoklad, že závora detekuje vždy jen průlet jediné částice, není splněn v blízkosti třepadla.
3. Demonstrujte Maxwellovo rozdělení rychlostí částic. Použijte kuličky o menším průměru.

Fyzikální interpretace

Pomůcka složí pouze pro mechanickou nápodobu dějů v plynu.

Otázka

Při demonstraci Maxwellova rozdělení by se zdálo, že naměříme polovinu symetrického rozdělení daného rovnicí (1), výsledek je ale obdobný rovnici (2). Jak je volba tohoto rozdělení technicky realizována?

$$f(v_x)dv_x = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{1/2} e^{-\frac{mv_x^2}{2k_B T}} dv_x \quad (1)$$

$$f(v)v^2dv = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} 4\pi v^2 dv \quad (2)$$

E 9 – Souprava se vzduchovým polštářem

Soupravu tvoří základní deska se vzduchovým polštářem, speciální tělesa (kotoučky s magnety), zdroj stlačeného vzduchu a drobné příslušenství. Základní deska s pravidelně rozmístěnými malými otvory je opatřena obrubou ve tvaru dutého mantinelu. Mantinel tvoří přetlakovou komoru, která je připojena ke zdroji stlačeného vzduchu. Vzduch proudící otvory desky tvoří souvislou vzduchovou vrstvu – vzduchový polštář. Na něm se vznášejí kotoučky na vrchní části opatřené permanentními magnety. Kotoučky mají různou barvu a velikost (druhy molekul). Pro modelování odrazu molekul od stěny nádoby je projekční plocha ohraničena snímatelnými tyčovými magnety.

Příprava

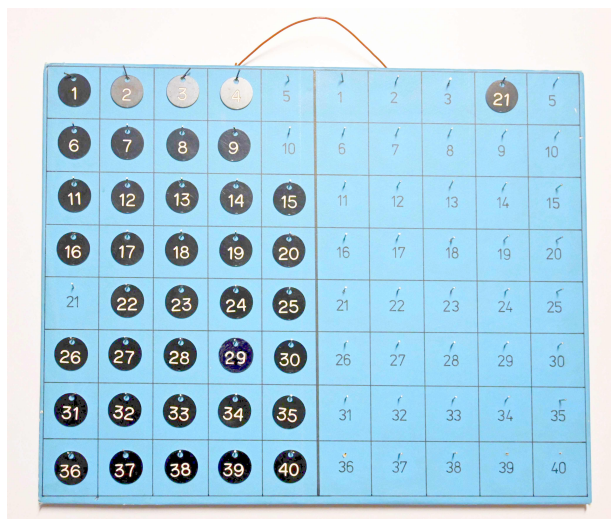
Zkontrolujte průchodnost všech otvorů základní desky - případné nečistoty odstraňte profouknutím. Desku položte na meotar a pomocí stavěcích šroubů nastavte do vodorovné polohy. Přetlakovou komoru spojte hadicí se zdrojem stlačeného vzduchu. Na okraj mantinelu položte tyčové magnety. Kotoučky pro demonstrace pokládejte na desku až po zapnutí přívodu vzduchu.

Úkoly

1. Demonstrujte pohyb jedné a více částic v uzavřené nádobě.
2. Demonstrujte základní částicový model plynu.
3. Demonstrujte rychlosti částic ve směsi plynů.
4. Demonstrujte expanze plynu otvorem v nádobě.
5. Demonstrujte míchání plynů difúzí.
6. Demonstrujte stlačování a rozpínání plynů.
7. Demonstrujte Brownův pohyb v plynu.
8. Vyzkoušejte si další experimenty podle metodické příručky v laboratoři.

Fyzikální interpretace

Pomůcka složí pouze pro nápodobu dějů v plynu či v pevné látce. Magnetické působení mezi částicemi neodpovídá představě ideálního plynu. K simulaci a vizualizaci lze v dnešní době použít webové aplikace nebo program Algodoo.



Obrázek 6: Ehrenfestův statistický stroj upravený podle prof. Černohorského.

E 10 – Simulace druhého zákona termodynamiky na Ehrenfestově statistickém stroji

Ehrenfestův statistický stroj je tvořen dvěma krabicemi, obsahujícími celkem N očíslovaných kuliček, a osudím, ze kterého jsou tažena čísla $1 \dots N$. Při vytažení určitého čísla z osudí kulička se stejným číslem přechází do druhé krabice.

Varianta prof. Černohorského Krabice jsou nahrazeny dvěma poli A, B s pozicemi, na které se umísťují plastová číslíka (viz obrázek 6). Při přesunu mezi poli je navíc zapotřebí zvolit novou pozici.

Příprava

Pro začátek umístíme všechna číslíka do levého pole (A).

Provedení

Opakovaně vytahujeme kuličky z osudí (kuličky vracíme) a provádíme přesun číslíků mezi poli A a B. S ohledem na počáteční velkou obsazenost pole A dochází hlavně k přechodům do pole B. Po chvíli se ustaví rovnoměrné rozdělení, narušované pouze malými fluktuacemi. Možnost, že by se všechna číslíka opět vrátila do pole A (případně B), je vysoce nepravděpodobná. Proces ustavení rovnováhy je tedy nevratný.

Fyzikální interpretace

Clausiova formulace druhého termodynamického zákona říká: „Při styku dvou těles o různých teplotách teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na teplejší.“ Pro izolovaný systém pak platí

$$dS \geq 0.$$

Entropie izolovaného systému je podle statistické interpretace termodynamických potenciálů dána neuspořádaností systému

$$S = k_B \ln Z,$$

kde Z je stavová suma. Vztah předpokládá jednotkovou váhu každého mikrostavu v mikrokano-nickém rozdělení. V tomto případě je Z počet mikrostavů, kterými lze makrostav realizovat.

V našem případě, makrostav představovaný žádnou částicí v poli B může být realizován jen jednou konfigurací. Makrostav s jednou částicí v poli B (a $N - 1$ částicemi v poli A) může být



Obrázek 7: Pomůcka PASCO Heat Engine

realizován $Z = N$ konfiguracemi. Rovnovážný makrostav se stejným počtem částic v obou polích může být realizován $Z = \binom{N}{N/2}$ konfiguracemi. Rovnovážný stav je nejpravděpodobnější a má i větší entropii. Při jeho ustavení entropie vzrostla.

Varianta prof. Černohorského kromě demonstrace ustavení rovnovážného stavu, vratnosti a nevratnosti dějů a fluktuací umožňuje ozřejmit pojem mikro- a makrostavu. Na tomto stroji bychom také mohli demonstrovat ustavení Boltzmannova rozdělení částic v tíhovém poli (barometrická formule). Museli bychom ale použít kanonické rozdělení. Váha stavů by pak závisela i na výšce částice. Jak bychom experiment realizovali?

Na závěr zmiňme klasický myšlenkový experiment s Maxwellovým démonem. Předpokládejme, že mezi oběma poli (komorami) je otvor, který hlídá Maxwellův démon. Ten propustí z A do B pouze částice, které mají energii vyšší, než, než je její střední hodnota. Je zřejmé, že se takto střední energie bude snižovat v A a zvyšovat v B, tj. teplejší těleso se bude ohřívat od studenějšího. Není to v rozporu s druhým zákonem termodynamiky?

2 Termodynamika

2.1 Stavová rovnice a děje v plynu

E 11 – Plynový teploměr s čidly Pasco

Na vodní lázni ohřívejte nádobu s plynem (11) a měřte teplotu vodní lázně a tlak plynu čidlem Pasco. Vyneste do grafu tlak jako funkci teploty a porovnejte směrnici změřené závislosti s teorií. Jaký děj v plynu realizujeme? Zjistěte, při jaké teplotě by byl tlak plynu nulový (můžete přitom změnit jednotku teploty ze $^{\circ}\text{C}$ na K). Diskutujte kvalitu této extrapolace.

E 12 – Izotermický děj ve stříkačce s čidly Pasco

Provedení

Ve stříkačce stlačujeme pomalu plyn a v manuálním režimu v Pasco Capstone vynášíme do tabulky a grafu tlak jako funkci objemu. Použijeme bezdrátové čidlo tlaku (pracující do 400 kPa).

Místo stříkačky lze použít precizní pomůcky (viz obrázek 7 nebo [TD-8596As], u které je i teploměr).



Obrázek 8: pVT přístroj

E 13 – pVT přístroj

Ověření stavové rovnice a dějů v plynu na základě porovnání relativních změn stavových veličin.

Přístroj se skládá z dvojité nádoby a dvojice spojených trubic umístěných na posuvných stupnicích (viz obrázek 8). Manometrická trubice se dá po uvolnění rýhovaného šroubu posouvat nahoru a dolů, trubice pro měření objemu se dá posouvat v pružných držácích. Objem jednoho dílku trubice je 1 cm^3 , tlakový rozdíl odpovídající jednomu dílku výškového rozdílu hladin je 1 torr (133,3 Pa, definovaný hydrostatickým tlakem 1 mm vysokého rtuťového sloupce).

Příprava

Do vnější nádoby nalijeme asi litr temperované vody, ve výlevce vodovodu zasuneme vnitřní nádobu do vnější a přístroj sešroubujeme. Dolijeme vodu, aby se celá vnitřní nádobka octla pod vodou. Hladinu kapaliny v manometru nastavíme přesně na nulu. Do nádoby s vodou umístíme teploměr (např. Pasco Wireless temperature).

Provedení

- Před zahájením pokusu si zaznamenáme stavové veličiny – skutečný tlak v laboratoři (Pasco meteorologická stanice), počáteční teplotu vody a objem plynu v nádobce (11).

- Pomocí změny polohy trubic či dodáním tepla se pokusíme zrealizovat různé izoděje (izotermický, izochorický, izobarický) nebo děj obecný.
- Pokud nádobu zahříváme, na elektrickém vařiči použijeme nejnižší stupeň ohřevu a nádobu ohříváme za stálého míchání ruční míchačkou, dokud objem nevystoupí o 5–7 cm³. Pak vypneme vařič, nádobu odstavíme na odkládací podložku a po ustálení údajů na stupnici vyhodnotíme experiment. Pracujeme ve vhodných jednotkách (cm³, torr, K).

Fyzikální interpretace

Logaritmováním stavové rovnice ideálního plynu $pV/T = nR$ obdržíme rovnici

$$\ln p + \ln V - \ln T = \ln(nR) \quad (3)$$

Po diferencování

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} - \frac{dT}{T} = 0. \quad (4)$$

Při malých změnách stavových veličin ve srovnání s jejich hodnotou rovnice přibližně platí i pro diference

$$\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta V}{V} - \frac{\Delta T}{T} = 0. \quad (5)$$

Rovnice (5) je základem pro experimenty s pVT přístrojem.

Jisté úskalí představuje zavedení rovnice (5) bez infinitezimálního počtu. Platnost rovnice lze objasnit následujícím postupem:

$$\begin{aligned} \frac{p_1 V_1}{T_1} &= \frac{p_2 V_2}{T_2} \\ \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{V_2}{V_1} &= \frac{T_2}{T_1} \\ \frac{p_1 + \Delta p}{p_1} \cdot \frac{V_1 + \Delta V}{V_1} - \frac{T_1 + \Delta T}{T_1} &= 0 \\ \left(1 + \frac{\Delta p}{p}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta V}{V}\right) - \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Závorky roznásobíme. Pokud jsou relativní změny veličin malé ($\frac{\Delta p}{p} \ll 1$ a $\frac{\Delta V}{V} \ll 1$), je jejich součin až druhého řádu malosti.

$$\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta V}{V} + \overbrace{\frac{\Delta p}{p} \cdot \frac{\Delta V}{V}}^{\text{zanedbáme}} - \frac{\Delta T}{T} = 0 \quad (7)$$

V experimentu se relativní změny mohou pohybovat kolem procenta.

E 14 – Jednoduché experimenty na adiabatický děj

Neprobíhá-li tepelná výměna s okolím, lze procesy v plynu dosáhnout velmi nízkých i vysokých teplot.

1. Adiabatickou expanzi provedeme jednoduše pomocí tlakového vzduchu z rozvodu (tlak několik barů). Pistolí foukáme na teplotlivou fólii (viz obrázek 9) a pozorujeme snížení teploty fólie. Je potřeba rozlišovat ochlazování suchého a vlhkého povrchu. (Ten druhý se ochlazuje výrazně vlivem odpařování. Zkoušet teplotu plynu rukou tedy není vhodné.) V ose proudění se u povrchu fólie opět zvyšuje tlak, který pohyb plynu zastaví. Na ose se proto objeví oblast bez ochlazení.



Obrázek 9: Adiabatická expanze na teplotlivé fólii.



Obrázek 10: Teplotlivá fólie zachytí změnu teploty plynu při adiabatické kompresi.

2. Nemáme-li tlakový vzduch, použijeme tlakové nádoby (např. plyn pro ofukování, sifonové bombičky), ze kterých necháme unikat plyn. Použijeme z bezpečnostních důvodů hlavu sifonového přístroje, kam bombičku zašroubujeme. Prázdná bombička se ochladí pod bod mrazu.
3. Adiabatickou kompresi a zvýšení teploty plynu demonstrujeme v PET láhvi s proužkem teplotlivé fólie na špejli (obrázek 10): při prudké kompresi dojde ke změně barvy teplotlivé LCD folie.
4. V pomůcce *Compression Igniter* (obrázek 11) lze prudkým stlačením zapálit malý kousek pyrolyzované vaty, papíru nebo bavlněných vláken, která vložíme do spodní části trubice. Pokud nedojde k zapálení, množství materiálu snížíme a materiál lépe rozložíme. Po experimentu necháme z trubice utéct spaliny.

E 15 – Aparatura pro studium adiabatického děje v plynu

Studium adiabatického děje vyžaduje rychlé měření stavových veličin.

Potřeby

- Aparatura Pasco TD-8565, obrázek 12 [TD-8565]

Pokud chceme v plynu realizovat adiabatický děj, je zapotřebí změnu objemu či tlaku realizovat velmi rychle, aby si plyn nestačil vyměňovat teplo s okolím. Měření tedy vyžaduje použití rychlých



Obrázek 11: V pomůcce *PASCO Compression Igniter* lze adiabatickým dějem dosáhnout zápalné teploty pyrolyzované vaty.



Obrázek 12: Aparatura Pasco TD-8565

čidel. Zejména velmi rychlé měření teploty plynu je problematické, neboť je limitované tepelnou kapacitou čidla. Teplotní čidlo u této aparatury má relaxační dobu cca 30–50 ms.

Aparatura obsahuje tři čidla s převodníky, které měřené veličiny p, V, T převádí na měření napětí

- piezoelektrické čidlo tlaku (100 kPa na 1 V)
- odporové čidlo polohy pístu (kalibrace možná dle stupnice na pístu, průměr pístu cca 4,45 cm. Objem přívodů je navíc 1 cm³, což odpovídá 0,06 cm posuvu)
- niklové odporové čidlo teploty v můstku (kalibrační list)

Pro napájení čidel a elektroniky převodníků je zapotřebí připojit externí zdroj 9–12 V DC, který musí být plovoucí (!). Maximálních 15 V se nesmí překročit. Odběr cca 10 mA. Na výstupy čidel se nesmí přivést žádné napětí, mohlo by dojít ke zničení převodníků.

Příprava

Pokud potřebujeme absolutní hodnoty veličin, je potřeba provést kalibraci čidel, resp. přepočít měřeného napětí na hodnoty p, V, T . Objem lze kalibrovat dvoubodovou kalibrací v polohách s maximálním a minimálním objemem. Objem spočteme ručně z průměru pístu a délky stupnice. Ke kalibraci teploty potřebujeme kalibrační list čidla. Tlak zkalibrujeme ze znalosti citlivosti čidla 1 V/100 kPa.

Pokud používáme jiný plyn než vzduch, před měřením cca 10× naplníme a vyprázdníme objem válce plynem. **Přitom nesmí vzduch do válce expandovat rychle, neboť by mohlo dojít k poškození čidel. Maximální tlak plynu je 35 kPa (5 PSI).**

Provedení

Děje studujeme při kompresi, při které nedochází k ohřevu plynu od trubice ohřáté třením pístu. Zaznamenáme průběh stavových veličin a vyhodnotíme. Máme-li k dispozici plyny s různým počtem stupňů, můžeme porovnat jejich Poissonovu konstantu $\kappa = c_p/c_v$.

2.2 Tepelné stroje

E 16 – Motorek na stlačený oxid uhličitý

Motorek na CO₂ nemá daleko k parnímu stroji.

Potřeby

- modelářský motorek na stlačený CO₂,
- chemický stojan, svorky, kladka, závaží, motouz

Provedení

1. Modelářský motorek, upevněný na dřevěné tyči o průměru 10 mm, upneme pomocí chemické křížové svorky k ose předního náboje cyklistického kola. Tělo tohoto náboje připevníme opět křížovou svorkou k chemickému stojanu tak, že motorek na rameni tvoří kolotoč s horizontální osou. (Stará varianta náboje má malý průměr těla, který se do chemické křížové svorky vejde.) Viz obrázek 13.
2. Kolotoč vyvážíme jinou chemickou křížovou svorkou.
3. Na druhou stranu osy upevníme kladku, na kterou se navíjí motouz se zavěšeným závažím.
4. Nádobku na stlačený oxid uhličitý naplníme podle návodu k motorku a motor spustíme. Kolotoč je roztáčen tahem vrtule motorku. Jak kolotoč rotuje, na kladku na ose se navíjí motouzek a zvedá závaží.

Fyzikální interpretace

Modelářský motorek na stlačený (tlakem zkapalněný) oxid uhličitý je v principu parní stroj, kde nejen kotel, ale celý stroj je na teplotě, při které z kapaliny pohonné látky vzniká plyn.

E 17 – Kolaps plechovky, princip Newcomenova parního stroje

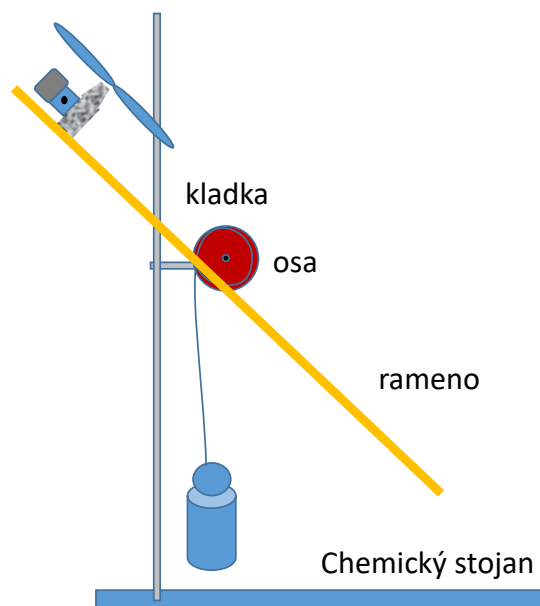
Plechovka od nápoje podtlak téměř 1 atmosféry neudrží a kolabuje. Přitom se koná práce.

Potřeby

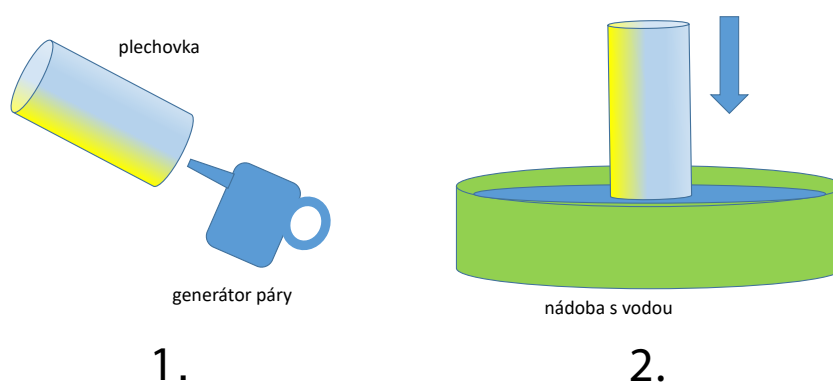
- vyvíječ páry (parní čistič), prázdná hliníková plechovka od nápoje, nádoba s vodou

Provedení

1. Plechovku od nápoje, kterou držíme přes rukavici, obrátíme dnem vzhůru a vzduch z ní vyfoukáme zespodu párou z vyvíječe páry (viz obrázek 14).
2. Bezprostředně potom plechovku ponoříme otevřeným koncem do nádoby s vodou. Plechovka se v mžiku zdeformuje.



Obrázek 13: Modelářský motorek na stlačený oxid uhličitý.



Obrázek 14: Kolaps plechovky

Fyzikální interpretace

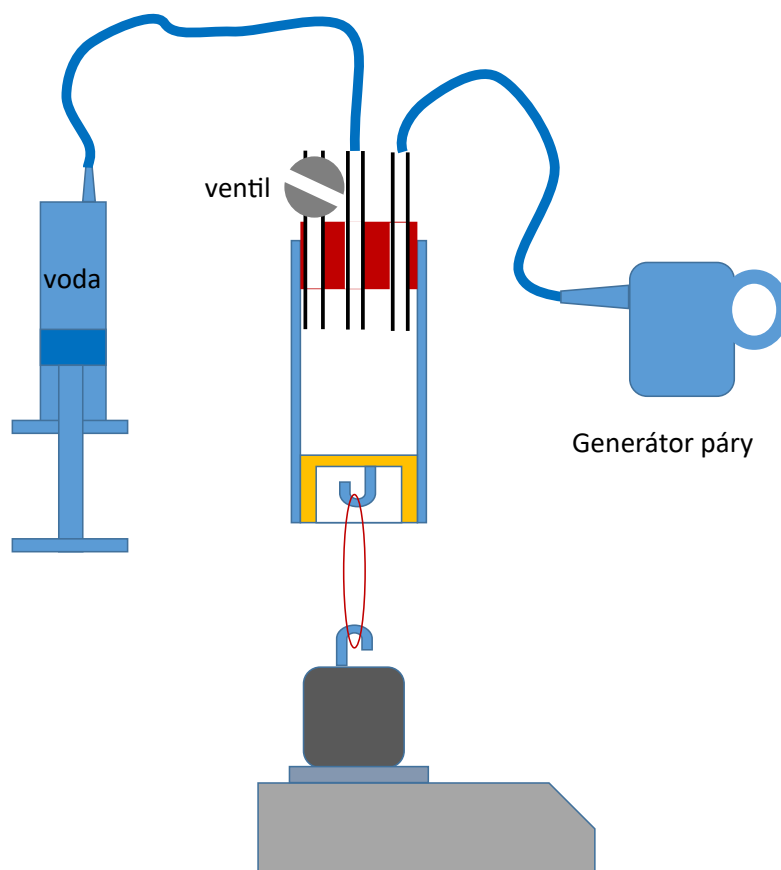
Tlak syté páry při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $2,3\text{ kPa}$. Změna tlaku plynu v plechovce je proto výrazná. Na plechovce je patrné, že při změně tlaku se konala práce.

E 18 – Newcomenův parní stroj

První parní stroje na čerpání vody z dolů byly atmosférické.

Potřeby

- aparatura pro demonstraci stroje (viz obrázek 15)
- parní čistič
- injekční stříkačka
- váhy, závaží 2 a 5 kg



Obrázek 15: Demonstrace principu Newcomenova parního stroje.

Provedení

1. Píst ve válci posuneme do dolní úvrati a zavěsíme na něj 2kg závaží.
2. Parou z generátoru páry (parní čistič) vypláchneme vzduch z válce a zavřeme ventil.
3. Poté vstříkneme injekční stříkačkou do prostoru válce vodu. Píst zvedne závaží.

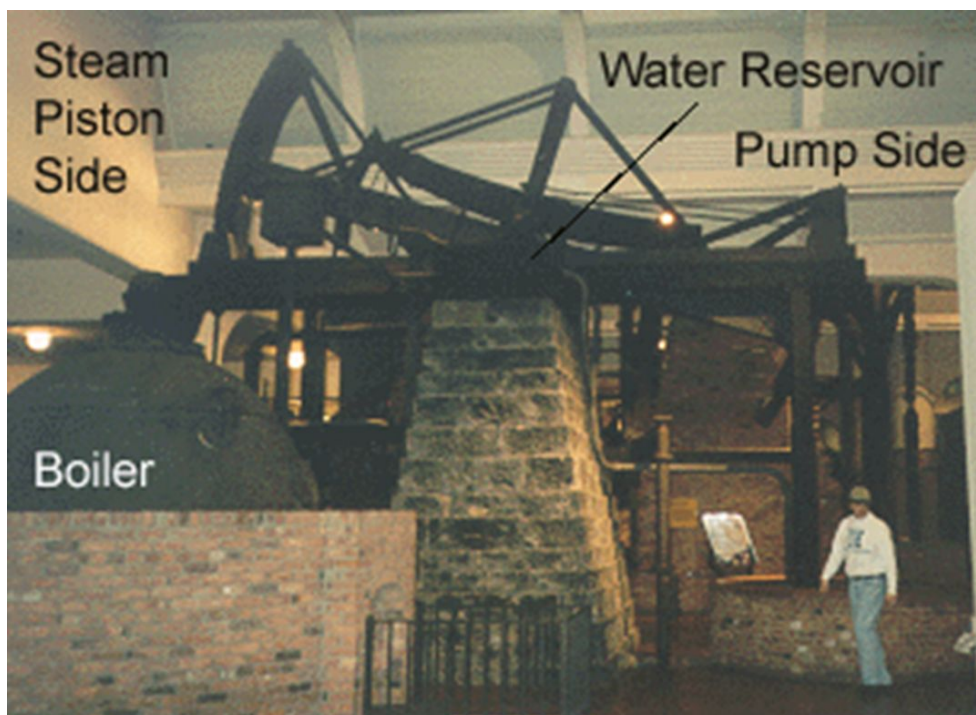
Modifikace pokusu

Na závěs zavěsíme 5kg závaží a umístíme na váhu podle obrázku. Váhy vynulujeme. Další postup je stejný jako v předchozím bodu. Po nastříknutí vody ukazuje váha, jakou silou táhne píst závaží vzhůru. Z tohoto údaje a průřezu pístu určete tlakovou sílu působící na píst.

Fyzikální interpretace

Newcomenův parní stroj (sleduj obrázek 16) funguje tak, že páru, která se nachází ve válci s pístem v horní úvrati a má přibližně atmosférický tlak, zkondenzujeme vodou nastříknutou do prostoru válce. Tím převládne na píst působící tlaková síla atmosférického tlaku a při pohybu do dolní úvrati píst koná práci. Předpokládejme, že výsledný kondenzát má teplotu 30°C . V dolní úvrati se vypustí z válce voda a následně mírně přetlakovou párou se píst posune do horní úvrati. Tím se cyklus uzavře.

Za předpokladu, že objem pístu je $V = 200\text{l}$ a poloměr pístu je $r = 0.317\text{m}$, spočítejte maximální sílu, která působí na píst, a účinnost stroje. Předpokládejme, že stěny válce a pístu mají tak dobrou tepelnou izolaci a tak malou tepelnou kapacitu, že teplo potřebné na ohřev stěn válce s pístem a tepelné ztráty jsou zanedbatelné.



Obrázek 16: Skutečný Newcomenův parní stroj.

Řešení: Velikost síla působící na píst je rovna

$$F = S \cdot (p_{\text{atm}} - p_{\text{s},30^{\circ}\text{C}}) = \pi r^2 (10^5 - 4248) \doteq 30 \text{ kN}.$$

Práce vykonaná během cyklu

$$W = pV = p_{\text{atm}}V \doteq 0,2 \cdot 10^5 \text{ J}.$$

Přijaté teplo

$$Q = m \cdot L = \rho_p \cdot V \cdot L = 0,59 \cdot 0,2 \cdot 2257 \cdot 10^3 = 266 \text{ kJ},$$

kde $L = 2257 \text{ kJ/kg}$ je skupenské teplo výparné vody. Účinnost stroje je

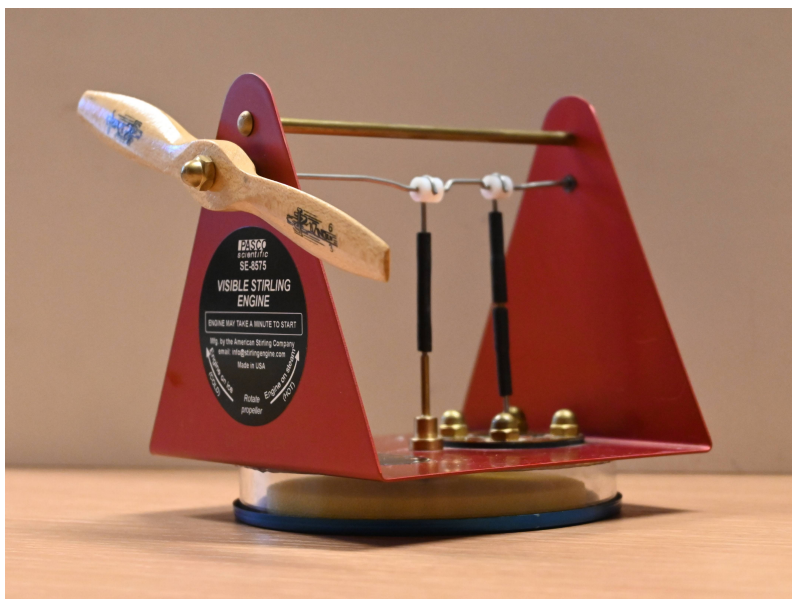
$$\eta = W/Q \doteq 8 \%.$$

E 19 – Stirlingův stroj

Funkční tepelný stroj nemusí být složitý.

Potřeby

- Pasco SE-8575 Visible Stirling Engine či obdoba (obrázek 17)
- Peltiérův článek s termostatickou deskou
- zdroj proudu pro Peltiérův článek
- drátové termočláňkové teplotní sondy



Obrázek 17: Školní verze Stirlingova stroje Pasco SE-8575.

Stanovení minimální teplotní difference potřebné pro chod Stirlingova stroje

1. Položte Stirlingův stroj na Peltiérův článek napájeného ze zdroje proudu (viz obrázek 18). Na obě strany stroje přikontaktujte termočlávkové sondy lepící hmotou Kores Gumfix.
2. Zvyšováním proudu Peltiérem postupně zvyšujte teplotu T_h spodní části Stirlingova stroje a souběžně s tím zkoušejte dopomoci k rozběhu otáčením vrtule v jednom a v druhém směru, dokud se Stirling nerozběhne.
3. Proměřte a objasněte vývoj teplot T_h a T_c . Jak by se měly teploty vyvíjet u ideálního Stirlingova stroje?

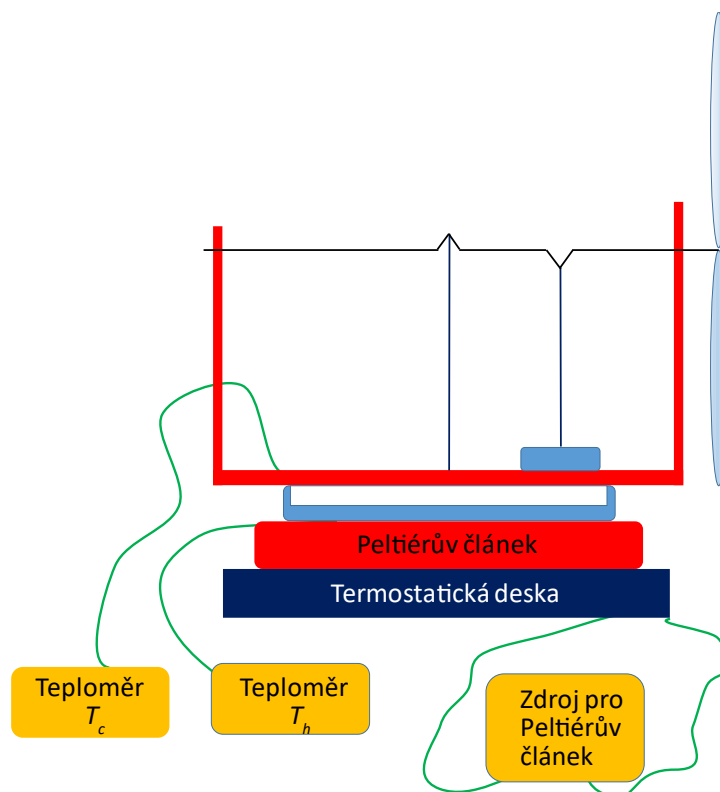
Stanovení vratnosti/ nevratnosti Stirlingova stroje

1. Na Stirlingově stroji ponechte teplotní čidla z předešlého experimentu, odstraňte ale Peltiérův článek.
2. Vrtuli Stirlingova stroje spojte přes gumičku s elektrickým motorkem (viz obrázek 19).
3. Po vyrovnání teplot ($\Delta T = T_h - T_c = 0$) roztočte Stirlingův stroj do otáček cca 120/min ve stejném směru, jakým se točí, pokud je spodní část ohřívána a horní studená.
4. Pozorujte teploty T_h a T_c . Jak by se měly vyvíjet u ideálního Stirlingova stroje?

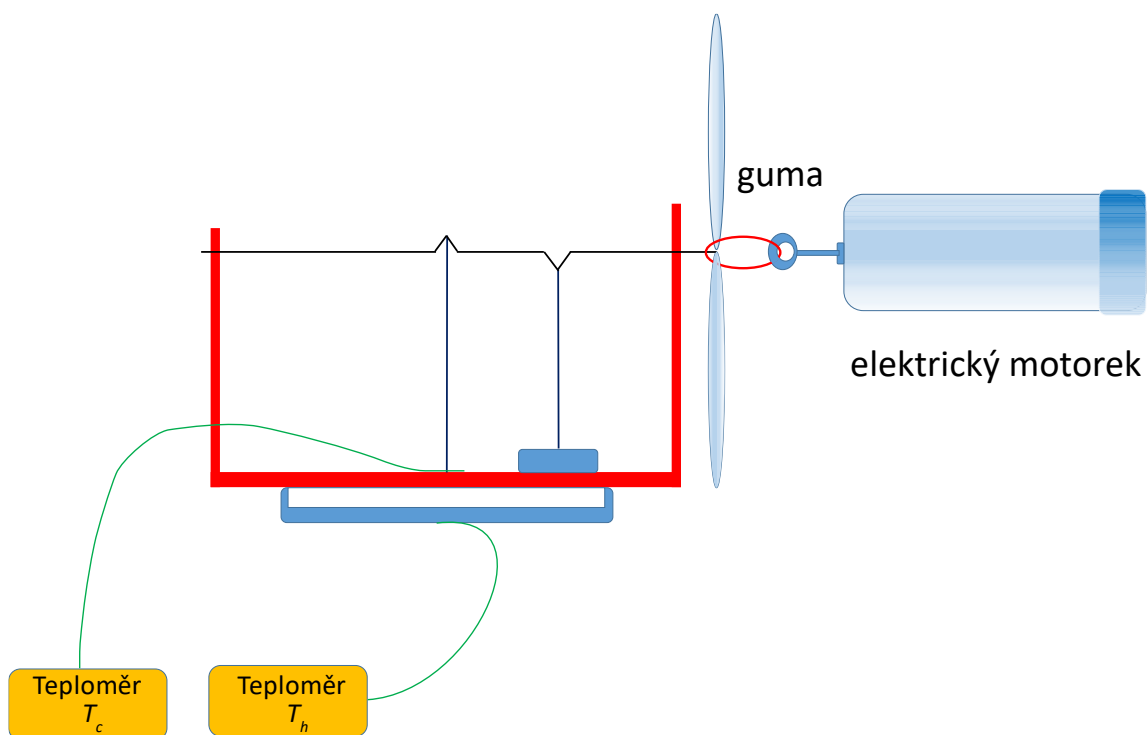
Fyzikální interpretace

Stirlingův motor je tepelný stroj se stálým pracovním médiem a vnějším spalováním. Konstrukce válce motoru obvykle obsahuje teplejší část (ohříváč o teplotě T_h) a chladnější část (chladič o teplotě T_c). Tepelná energie pro ohříváč může být získávána libovolně, např. spalováním paliva, případně solárním ohřevem. Pracovní médium ve válci (obvykle vzduch, dusík, vodík, helium) je během cyklu střídavě přesouváno mezi ohříváčem a chladičem přes tzv. regenerátor (vnitřní výměník tepla), který dovoluje část tepelné energie plynu uschovat a následně využít pro jeho pozdější ohřev.

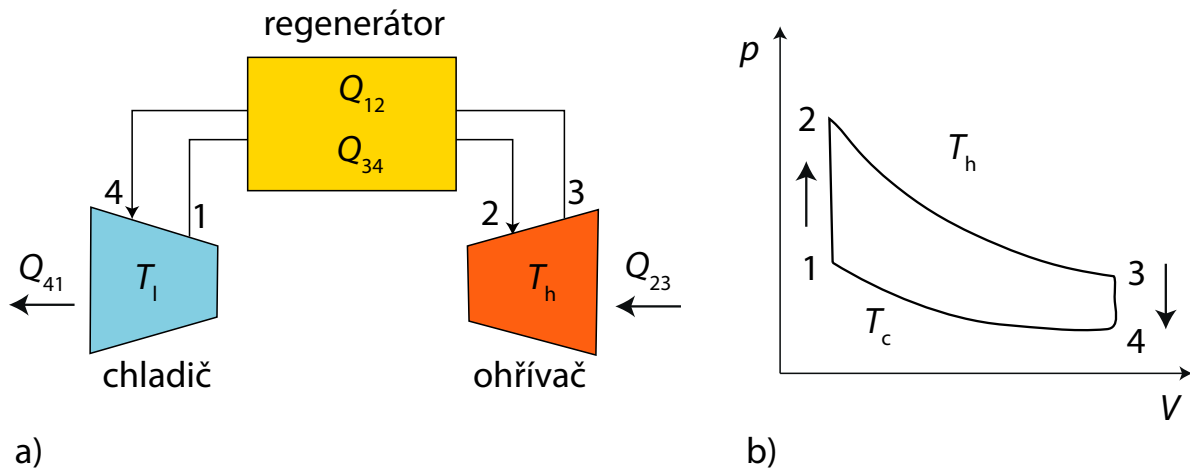
Ideální Stirlingův stroj pracuje podle obrázku 20. Ideální cyklus je složen ze dvou izotermických a dvou izochorických dějů:



Obrázek 18: Měření minimálního teplotního rozdílu pro chod Stirlingova motoru.



Obrázek 19: Stanovení vratnosti/ nevratnosti Stirlingova stroje.



Obrázek 20: Ideální Stirlingův stroj a) schéma, b) pV diagram. Inspirováno [CACE 2014].

1→2 Při izochorickém ději je plyn prohnán přes regenerátor, od kterého získá teplo

$$Q_{12} = \int_{T_c}^{T_h} C_V dT = C_V(T_h - T_c) > 0. \quad (8)$$

Práce se při izochorickém ději nekoná, získané teplo je použito na zvýšení vnitřní energie plynu.

2→3 Při izotermickém ději, kdy je plyn ve styku s ohříváčem o teplotě T_h , se vnitřní energie nezvyšuje, dodané teplo se tedy využije na konání práce během expanze

$$\delta Q = dE + pdV = C_V dT + pdV = pdV. \quad (9)$$

$$Q_{23} = W_{23} = \int_{V_2}^{V_3} pdV = nRT_h \ln \frac{V_3}{V_2} > 0, \quad (10)$$

kde n je látkové množství plynu ve stroji.

3→4 Při izochorickém ději je plyn prohnán zpět přes regenerátor, kterému odevzdá původně dodané teplo

$$Q_{34} = \int_{T_h}^{T_c} C_V dT = C_V(T_c - T_h) = -Q_{12} < 0. \quad (11)$$

4→1 Při izotermickém ději je plyn v kontaktu s chladičem o teplotě T_c , kterému odevzdá teplo odpovídající práci, která je potřeba na jeho izotermické stlačení

$$Q_{41} = W_{41} = \int_{V_4}^{V_1} pdV = nRT_c \ln \frac{V_1}{V_4} = nRT_c \ln \frac{V_2}{V_3} = -nRT_c \ln \frac{V_3}{V_2} < 0. \quad (12)$$

Zatímco dodané teplo je rovno Q_{23} (případě 100% regenerace tepla v regenerátoru), vykonaná práce strojem během jednoho cyklu je

$$W = W_{23} + W_{41} = nR(T_h - T_c) \ln \frac{V_3}{V_2}. \quad (13)$$

Výsledná účinnost ideálního Stirlingova stroje je rovna

$$\eta = \frac{W}{Q_{23}} = 1 - \frac{T_c}{T_h}, \quad (14)$$

a je tedy rovna účinnosti Carnotova cyklu pracujícího na stejných teplotách chladiče a ohříváče.

Příklad: Spočítejte výkon idealizovaného Stirlingova stroje pracujícího se vzduchovou náplní při atmosférickém tlaku mezi rezervoáry o teplotách $T_h = 50^\circ\text{C}$ a $T_c = 25^\circ\text{C}$. Školní Stirlingův stroj Pasco SE-8575 pracuje při minimálním rozdílu teploty $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ při 100 ot/min, maximální dovolená teplotní diference je $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. Objem vzduchu ve stroji je $V = 50\text{ cm}^3$ a zdvih pístu představuje $\Delta V = 2,5\text{ cm}^3$.

Řešení: Výkon školního stroje lze stanovit z práce vykonané během jednoho cyklu a doby trvání cyklu τ (otáčky)

$$P = \frac{W}{\tau} = nR \frac{T_h - T_c}{\tau} \ln \frac{V + \Delta V}{V - \Delta V}. \quad (15)$$

Po číselném dosazení (s průměrnou molární hmotností vzduchu $M = 28,97\text{ g/mol}$) dostaneme teoretickou účinnost stroje $\eta \doteq 7,7\%$ a výkon $P \doteq 65\text{ mW}$.

E 20 – Peltiérův článek

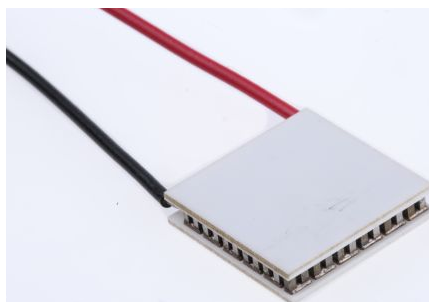
Peltiérův článek dovoluje jednoduše chladit různá zařízení bez složitých chladicích strojů s cirkulujícím chladicím médiem.

Potřeby

- Peltiérův článek, zdroj proudu 1 A

Provedení

Peltiérův článek (viz obrázek 21) připojíme ke zdroji stejnosměrného proudu. Na zdroji pomalu zvyšujeme napětí (provozních 12 V pro 60 W článek $4 \times 4\text{ cm}^2$ nelze použít bez další tepelné kapacity), sledujeme proud procházející obvodem. Po chvíli ucítíme, že jedna strana se ohřívá, druhá ochlazuje. Práce elektrického proudu dovoluje čerpat teplo ze studenější strany na stranu teplejší.



Obrázek 21: Peltiérův článek.

2.3 Fázové změny

E 21 – Hustota syté páry

Je sytá pára těžší nebo lehčí než vzduch?

Potřeby

- parní čistič, nafukovací balónek, digitální váhy

Provedení

Do nafukovacího balónku napouštíme sytou páru z vyvíječe páry. Balónek se téměř vznáší a výrazně hřeje. Proč?

Fyzikální interpretace

Ze silové rovnováhy $m_b g = \rho_{\text{air}} g V$ určíme objem syté páry při dané teplotě a tlaku. Poté, co se balónek vychladí a pára zkondukuje, určíme hmotnost vody v balónku. Z obou údajů můžeme určit hustotu páry.

E 22 – Sytá a přehřátá pára

Je pára vidět?

Potřeby

- parní čistič, spirálový ohříváč, plynový vaříč
- meotar či jiný silný zdroj světla

Příprava

Propojíme vyvíječ páry a spirálový ohříváč páry umístěný na plynovém vaříči. Ohříváč má na výstupu trysku. Tu nasměrujeme do světelného pole nad meotarem.

Provedení

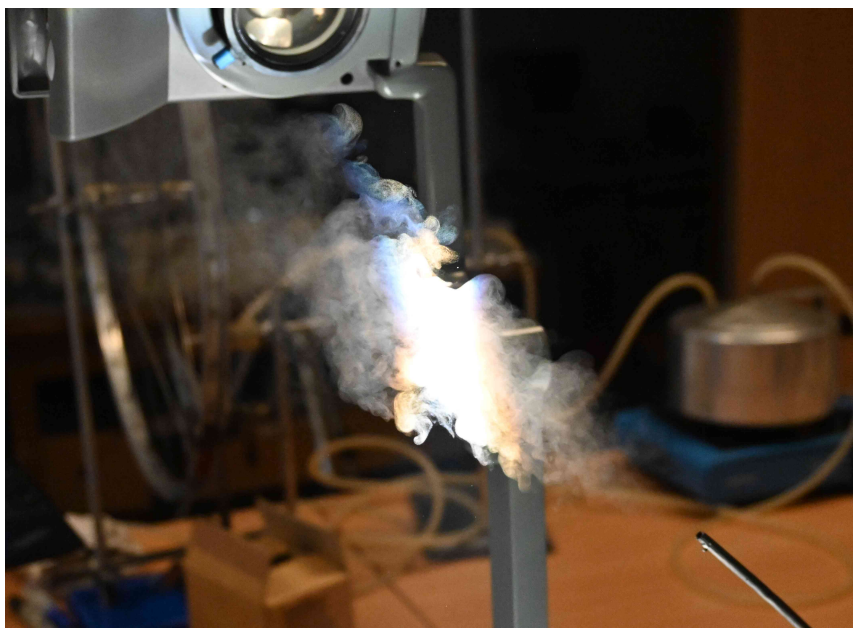
Nejprve z trysky pustíme jen sytou páru z vyvíječe páry. Pozorujeme rozptýl na kondenzovaných kapičkách vody (viz obrázek 22). Po spuštění plynového vaříče parní svazek zakrátko zmizí. Vložením zápalky k ústí trysky však zápalku snadno zapálíme. **Počínáme si velmi opatrně, aby nás přehřátá pára nespálila!**

E 23 – Podchlazení při fázovém přechodu octanu sodného

Teplota látky pod hodnotou teploty jejího tání a tuhnutí automaticky nezaručuje, že látka musí být v kapalném stavu.

Potřeby

- zkumavka s octanem sodným
- teplotní čidlo se záznamem (např. čidlo Pasco, program SparkVue, tablet)
- horkovzdušná pistole



Obrázek 22: Sytá pára nad meotarem.

Provedení

1. Horkovzdušnou pistolí nastavíme na 100°C a postavíme ji pod zkumavku s octanem sodným. Počkáme, až se octan rozpustí.
2. Do zkumavky zavedeme teplotní čidlo. Čidlo připojíme k PC/tabletu a spustíme záznam měření teploty. Horkovzdušnou pistolí vypneme.
3. Pozorujeme vývoj teploty. Pokud ke krystalizaci nedojde, do zkumavky vhodíme krystalek octanu sodného či zkumavkou prudce zatřeseeme.

Fyzikální interpretace

Krystalizace za běžných podmínek nastává cestou tzv. heterogenní nukleace, při které nukleační centra (zárodky, na kterých látka začíná krystalizovat) vznikají na nečistotách či defektech. Velmi čisté látky krystalizují homogenní nukleací, při které může být počáteční růst krystalků zastaven potenciální bariérou spojenou s mezifázovou (povrchovou) energií nově vzniklého rozhraní kapalina-pevná látka. Více k teorii nukleace lze nalézt např. v [Bochníček 2009].

Podchlazení kapalné fáze octanu sodného nastává v hřejivých polštářcích do kapsy určených k ohřevu rukou během pobytu venku.

Literatura a další odkazy

[Bochníček 2009] Bochníček Z. 2009 Experimentální studium náhlého zmrznutí podchlazené vody. In *14. veletrh nápadů učitelů fyziky*. Brno 2009. Dostupné z <https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/14-05-Bochnicek.html>

[TD-8596As] PASCO Ideal Gas Law Apparatus <https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/thermodynamics/gas-laws/td-8596>

[TD-8565] PASCO Adiabatic Gas Law Apparatus <https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/thermodynamics/gas-laws/td-8565#documents-panel>

Zdroje obrázků

[CACE 2014] Dimian A C 2014 *Computer Aided Chemical Engineering* vol. 35, figure 14.3.

[Phywe] Phywe www.phywe.com [on-line]