

Gymnázium, Soběslav, Dr. Edvarda Beneše 449/II



Laboratorní cvičení z fyziky

Stavová rovnice plynu

Autor: Mgr. Ivana Stefanová
Jméno souboru: StavRovnice
Poslední úprava: 2. října 2016

Stavová rovnice plynu

Obsah

Pracovní úkoly.....	1
Teorie.....	1
Protokol o měření.....	2
Pracovní postup.....	2
Izotermický děj.....	3
Izochorický děj.....	5
Izobarický děj.....	7
Upozornění.....	10
Soupiska pomůcek a materiálu.....	10

Stavová rovnice plynu

Úkolem laboratorního cvičení je studium plynu a ověření platnosti stavové rovnice v okolí běžných vnějších podmínek (tj. tlaku blízko atmosférického a snadno dostupných teplotách).

Pracovní úkoly

1. Připravte si pracoviště a měřicí aparaturu dle návodu a pokynů vyučujícího.
2. Proved'te pro vzduch měření izotermického, izochorického a izobarického děje. Každý pokus probíhá na samostatném pracovišti, postupně se na nich vystřídejte.
3. Z naměřených dat (zejména pak z grafů) posuďte, nakolik se výsledky shodují s teoretickou předpovědí.
4. U izotermického děje spočtete látkové množství plynu při pokusu. Z přímkou proložené grafem u izochorického děje vypočtete teplotu, při níž by tlak plynu dosáhl nulové hodnoty. Jakou hodnotu bychom měli obdržet v ideálním případě a čím je takto určená teplota fyzikálně významná?

Teorie

Ideální plyn v termodynamické rovnováze (a v oboru našeho měření totéž předpokládáme i pro použitý reálný plyn—okolní vzduch) se řídí stavovou rovnicí ve tvaru

$$pV = nRT,$$

kde p je tlak plynu uzavřeného v nádobě, V je objem tohoto uzavřeného prostoru, n je látkové množství (tj. z kolika částic vyjádřeno v molech se plyn skládá), R je univerzální plynová konstanta a T termodynamická teplota plynu (měřená v Kelvinech). V některých případech vyjádříme objem jako součet pevné části (zásobník) a proměnné části (nádobu s pohybujičím se pístem) $V = V_0 + V_1$.

Při **izotermickém ději** je konstantní teplota plynu (pokus probíhá pomalu, takže díky probíhající tepelné výměně se teplota plynu průběžně vyrovnává s okolím), při změně objemu dochází ke změně tlaku plynu. Stavovou rovnicí upravíme do tvaru

$$V_1 = nRT \cdot \frac{1}{p} - V_0.$$

Pokud do grafu vynášíme na vodorovnou osu převrácenou hodnotu tlaku a na svislou osu změnu objemu (tj. objem vzduchu v pístu), měli bychom obdržet lineární závislost $V_1 = m \cdot (1/p) + b$, kde pro směrnici m platí $m = nRT$ a úsek b odpovídá záporně vzatému objemu V_0 .

Izochorický děj probíhá při konstantním objemu, nárůst teploty plynu se projevuje nárůstem tlaku, takže v tzv. p - T diagramu (závislosti tlaku na teplotě) bychom měli vidět lineární závislost

$$p = m \cdot T + b \quad \text{se směrnicí} \quad m = \frac{nR}{V}, \quad \text{úsek } b \text{ by měl být ideálně nulový.}$$

Pokud podmínkami pokusu zajistíme, že tlak plynu je konstantní, jedná se o **izobarický děj**. Při nárůstu teploty dochází ke zvětšování objemu plynu. Pokud působí píst proti vnější síle, plyn koná mechanickou práci. Stavovou rovnici pro tento případ můžeme upravit do tvaru

$$V_1 = \frac{nR}{p} \cdot T - V_0,$$

takže závislost přírůstku objemu na teplotě by měla být lineární.

Stavovou rovnici ideálního plynu popisuje Svoboda v *Přehledu středoškolské fyziky* (kapitola 3 *Molekulová fyzika a termika*, str. 150 a následující) nebo učebnice *Fyzika pro gymnázia*, díl *Molekulová fyzika a termika* autorů Bartuška, Svoboda (kapitola 3 *Struktura a vlastnosti plynného skupenství látek*, stavová rovnice je popsána v oddíle 3.6 na str. 81 až 83, následuje rozbor jednotlivých dějů).

Protokol o měření

Skupina odevzdá jako výsledek své práce protokol o měření, může být zpracován (i odevzdán) elektronicky nebo ručně, volba je jenom na vás. U dokumentu nebude hodnocena jeho délka, ale správnost, jasnost a fyzikální argumentace. Protokol z tohoto cvičení by měl obsahovat:

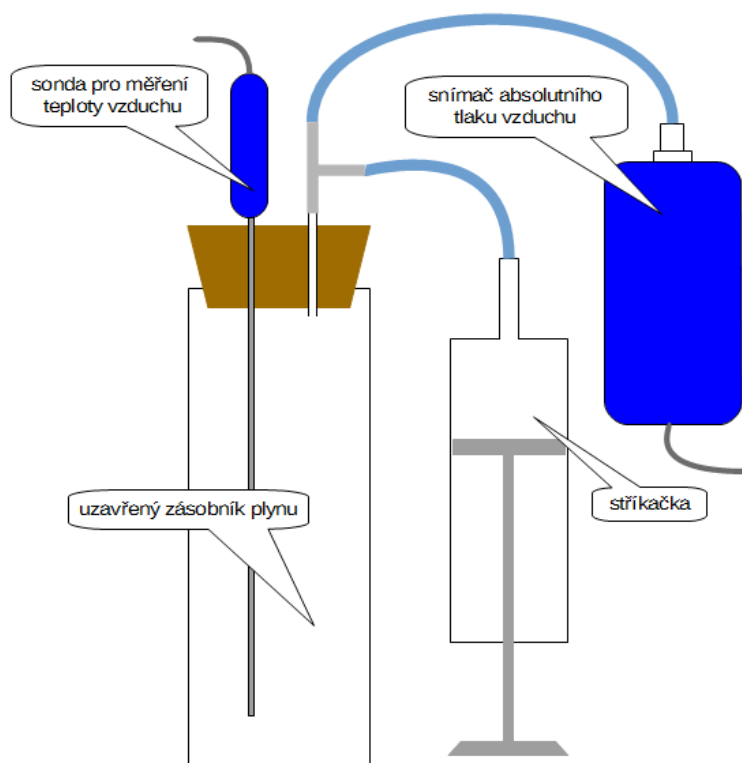
- graf¹ naměřené závislosti přírůstku objemu na převrácené hodnotě tlaku plynu při izotermickém ději a vypočtenou hodnotu látkového množství plynu během pokusu (pozor na použití správných jednotek a jejich převody!) včetně chyby,
- graf závislosti tlaku plynu na termodynamické teplotě při izochorickém ději, dále odhad teploty (v tomto případě nemusíte uvádět chybu výpočtu) při které by tlak plynu dosáhl nulové hodnoty a diskusi této hodnoty (viz pracovní úkoly výše),
- graf závislosti přírůstku objemu v závislosti na termodynamické teplotě při izobarickém ději,
- závěr obsahující celkové shrnutí získaných výsledků, porovnání s očekáváním, možné příčiny odchylek od teorie atp.

Pracovní postup

V průběhu tohoto laboratorního cvičení (dvou vyučovacími hodinami) se vytvoří tři pracoviště (izotermický, izochorický a izobarický děj) a jednotlivé skupiny se na nich vystřídají. První skupina na každém z nich experiment sestaví a připraví vše k činnosti, naopak poslední provede demontáž a závěrečný úklid. Úlohy jsou navrženy tak, aby se vše ve vymezeném časovém rozsahu stihlo—samozřejmě to vyžaduje od žáků předběžnou domácí přípravu, kázeň a aktivní přístup.

1 Vzhledem k následnému zpracování dat počítačem není nutné přikládat tabulku naměřených hodnot v tomto případě, pro účely zpracování protokolu je ale i tabulka důležitá.

Izotermický děj



Sestava pro studium izotermického děje se skládá ze skleněné kádinky (zásobníku plynu) utěsněné gumovou zátkou, plastové stříkačky (nádoby proměnného objemu), [snímače teploty PS-2125](#) s kovovou sondou, [snímače absolutního tlaku vzduchu PS-2107](#) a propojovacích hadiček (viz obrázek). Snímače jsou připojeny k počítači pomocí rozhraní [PowerLink](#).

Sestavte pomůcky podle popisu a obrázku. Tepelnou sondu do gumové zátky zasouvejte opatrně, může pomoci předběžné navlhčení. Silnější hadička z T-kusu vede k ústí stříkačky, tenčí s bajonetovým uzávěrem pak ke snímači tlaku (pro dostatečné těsnění musí rychlospojka slyšitelně „zacvaknout“). Před

uzavřením pneumatické části nastavte píst stříkačky blízko prostřední polohy, např. na hodnotu 70 ml. Zkontrolujte těsnost gumové zátky a napojení hadičky na ústí stříkačky.

Měření

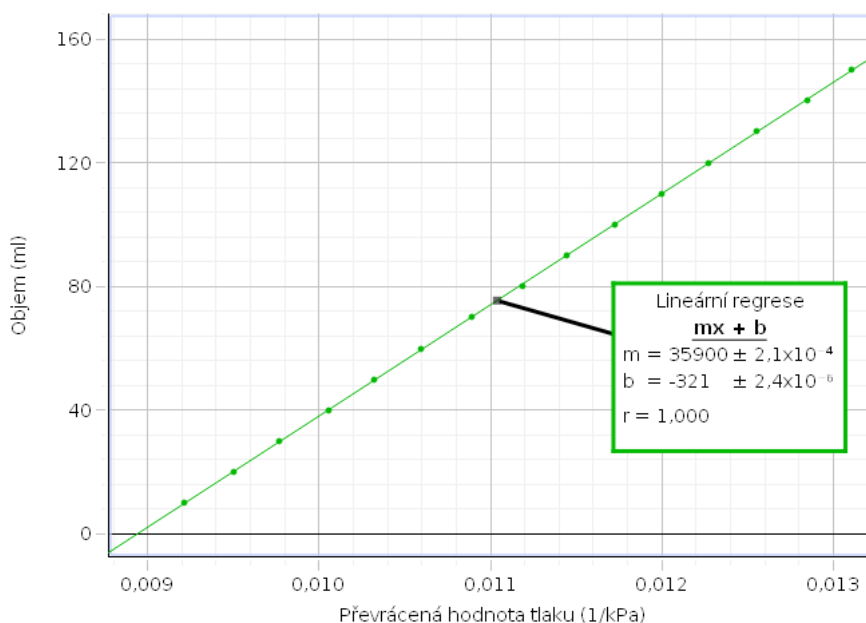
Měření se provádí v programu Pasco Capstone, obvyklým způsobem si otevřete připravený soubor `izotermický_děj.cap` a na titulní stránce vyplňte údaje o vaší skupině a datu měření.

Přepněte se na stránku *Měření*, kde je vaším úkolem naplnit připravenou tabulku naměřenými hodnotami. Hodnoty polohy pístu (sloupec *Objem* v tabulce) budete zadávat ručně, zbylé sloupce budou měřeny pomocí snímačů nebo automaticky dopočteny. Máte-li vše připraveno, spusťte měření pomocí tlačítka *Náhled* na liště ovládacích prvků dole. Pomocí klávesnice vyplňte objem podle stupnice na stříkačce (tj. 70 ml) a kliknutím na tlačítko *Zaznamenat data* se doplní údaje v ostatních sloupcích a měření se přesune na další řádek. Dále postupujte směrem k nižším objemům s krokem 10 ml (tj. 60, 50, ..., 10 ml; hodnotu pro zcela zasunutý píst nepoužívejte, neboť z důvodu mírných deformací plastu vždy zůstane ve stříkačce nějaký vzduch) a obdobným způsobem zaznamenejte data. Směrem k nižším hodnotám je nutno píst silou držet v požadované poloze! Po změně objemu vždy chvíli vyčkejte, aby došlo k vyrovnání teploty (aktuální hodnotu kontrolujte v posledním sloupci, odchylka od počáteční hodnoty by rozhodně neměla překročit několik desetin °C). Nakonec stejně postupujte při měření pro větší objemy opět s krokem po 10 ml (tj. 80, 90, ..., 150 ml), dbejte na udržení pístu v požadované poloze. Pokud dojde k uložení nějaké hodnoty omylem, nic se neděje. Na dalším řádku měření zopakujte a na konci tento řádek vypus-

tíme. Je-li vše hotovo, ukončete měření tlačítkem *Ukončit* na dolní liště. Nyní je možné vymazat případná chybná data: klikněte myší na číslo požadovaného řádku, čímž dojde k jeho zvýraznění. Následně pomocí ikony na nástrojové liště (nahore nad tabulkou) vyberte funkci *Smazat vybraná nebo zvýrazněná data* a proveďte výmaz. Nakonec si do laboratorního deníku uložte kopii úvodní stránky a tabulky naměřených hodnot.

Na stránce *Graf* byste měli nalézt grafickou reprezentaci naměřených dat: na vodorovné ose je vynesena převrácená hodnota absolutního tlaku, na svislé ose pak objem vzduchu v pístu. Příklad je uveden na obrázku. Není vyloučeno, že budete chtít upravit měřítko grafu (pomocí funkcí na

Dodatečný objem potřebný k dosažení tlaku vzduchu



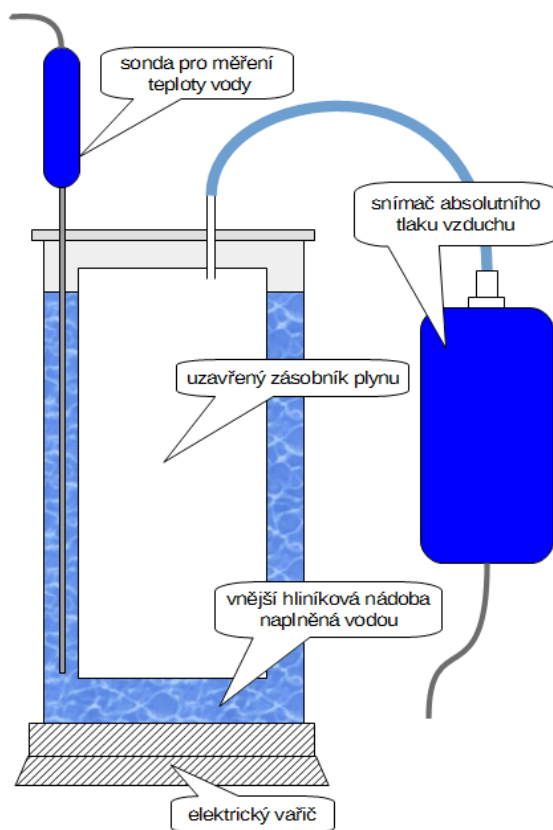
nástrojové liště nahore), změnit barvu měřených dat (pomocí tlačítka *Přehled dat* na liště nástrojů vlevo) nebo dokonce vyloučit některý evidentně chybný bod ze zpracování (smazáním z tabulky výše popsaným způsobem). Nyní je ta vhodná chvíle. Jste-li s výsledkem spokojeni, uložte si stránku s grafem do laboratorního deníku. Rozpojte pneumatický systém (např. odpojením snímače tlaku). Pracovní soubor programu Pasco i laboratorní deník si uložte pro odevzdání a zpracování protokolu a odešlete si je na vaše úložiště, ukončete program a odstraňte všechny své soubory z počítače.

Zpracování

Dle teoretického rozboru by vykreslená závislost měla být lineární se směrnicí $m = nRT$. Hodnota směrnice m je vypočtena pomocí lineární regrese a je uvedena v rámečku uvnitř grafu. Při znalosti termodynamické teploty T a plynové konstanty R již můžete vyčíslit látkové množství plynu n uzavřeného v nádobě, přitom buďte důslední v převodu všech veličin na základní jednotky SI!

Izochorický děj

Uspořádání pokusu je patrné z obrázku. Uzavřená hliníková nádoba sloužící jako zásobník plynu je ponořena do vody ve vnější hliníkové nádobě, která je postavena na malý elektrický vaříč. Teplotní sonda PS-2153 připojená k [převodníku PS-2125](#) měří teplotu vody, díky velkému povrchu zásobníku plynu, dobré tepelné vodivosti hliníku a relativně pomalým změnám teploty předpokládáme, že teplota vzduchu v zásobníku je prakticky stejná. Plastovou hadičkou máme připojen [snímač PS-2107](#) pro měření absolutního tlaku vzduchu.



Otevřete tepelný výměník pomocí tří šroubů na jeho víku, hadičku odpojte od snímače tlaku (bajonetovým uzávěrem otáčejte proti směru hodinových ručiček). Pokud jsou nádoby teplé, ochlaďte je v proudu tekoucí vody (dbejte, aby do zásobníku plynu a hadičky **nevnikla voda!**). Do vnější nádoby nalijte vhodné množství studené vody (pomocí kádinky odměřte cca 1 litr) a uzavřete víko. Buďte pečliví, aby v průběhu pokusu

nedošlo k samovolnému uvolnění víka. Vložte teplotní sondu a oba snímače připojte k počítači pomocí rozhraní [PowerLink](#). Zkontrolujte stažení ovladače elektrického vaříče na pozici 0, pak jej můžete připojit do elektrické sítě. Tlakový snímač prozatím nepřipojujte a celý tepelný výměník ponechte mimo vaříč.

Měření

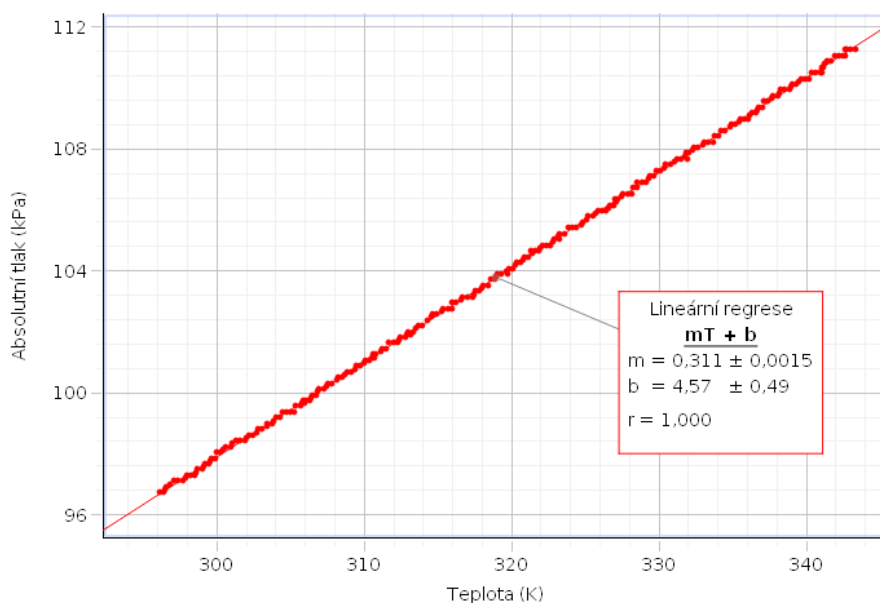
Připravte si počítač a propojte jej s veškerým příslušenstvím. Pro měření a zpracování použijte program Pasco Capstone s připraveným pracovním sešitem `izochorický_děj.cap` a zadejte potřebná data na titulní stránce, následně si ji uložte do laboratorního deníku.

Přepněte se na stránku *Měření*, na které vidíte digitální ukazatele—tlak plynu v nádobě a teplota vody ve výměníku. Na základě řady zkoušek se osvědčil následující postup, který poměrně spolehlivě vede k dobře přijatelným výsledkům. Nádobu výměníku vložte na elektrický vaříč a připojte tlakový snímač k hadičce pomocí bajonetové spojky. Ovladač vaříče nastavte na stupeň 2. Počkejte asi 1 minutu a pomocí tlačítka *Zaznamenat data* na dolní liště spusťte měření (digitální ukazatele začnou ukazovat aktuální hodnoty obou měřených veličin). Teplota vody by měla pomalu narůstat, v návaznosti na ni pak i tlak plynu. Přibližně při dosažení teploty 50 °C zvyšte výkon vaříče na 2,5 a v blízkosti 60 °C pak až na stupeň 3. Účelem této regulace je dosáhnout mírného rovnoměrného nárůstu teploty v měřeném rozsahu. Při dosažení teploty asi 70 °C záznam dat ukončete (tlačítkem *Ukončit* na liště ovládacích prvků dole). Stáhněte ovladač vaříče zpět na stupeň 0. Odpojte hadičku

od tlakového snímače. **Velmi opatrně** doneste horkou nádobu k umyvadlu a pomocí tří šroubů pomalu uvolněte víko. Dejte pozor: víko má vlivem vztlakové síly tendenci prudce vyskočit a mohlo by vás popálit! Pomalu vylijte horkou vodu z nádoby, oba její díly vychlaďte pod proudem tekoucí vody (do hadičky při tom nesmí vniknout voda). V tomto případě není potřeba ukládat kopii stránky s měřením do laboratorního deníku.

Po přechodu na stránku *Graf* byste měli vidět závislost tlaku plynu v nádobě na jeho termodynamické teplotě, typický příklad je uveden na obrázku. Dle potřeby a na základě osobních

Závislost tlaku plynu na jeho teplotě



preferencí můžete vzhled grafu upravit vám již známým způsobem (výběr barvy pro měřené body tlačítkem *Přehled* dat vlevo nebo škálování os pomocí tlačítka na nástrojové liště grafu).² Vhodně upravený graf si uložte do laboratorního deníku a celý deník nezapomeňte vyexportovat pro vypracování protokolu. Uložte si také pracovní soubor pro odevzdání. Pak již můžete program ukončit, potřebné soubory si zkopírujte do vašeho úložiště a následně všechny pracovní soubory po sobě vymažte.

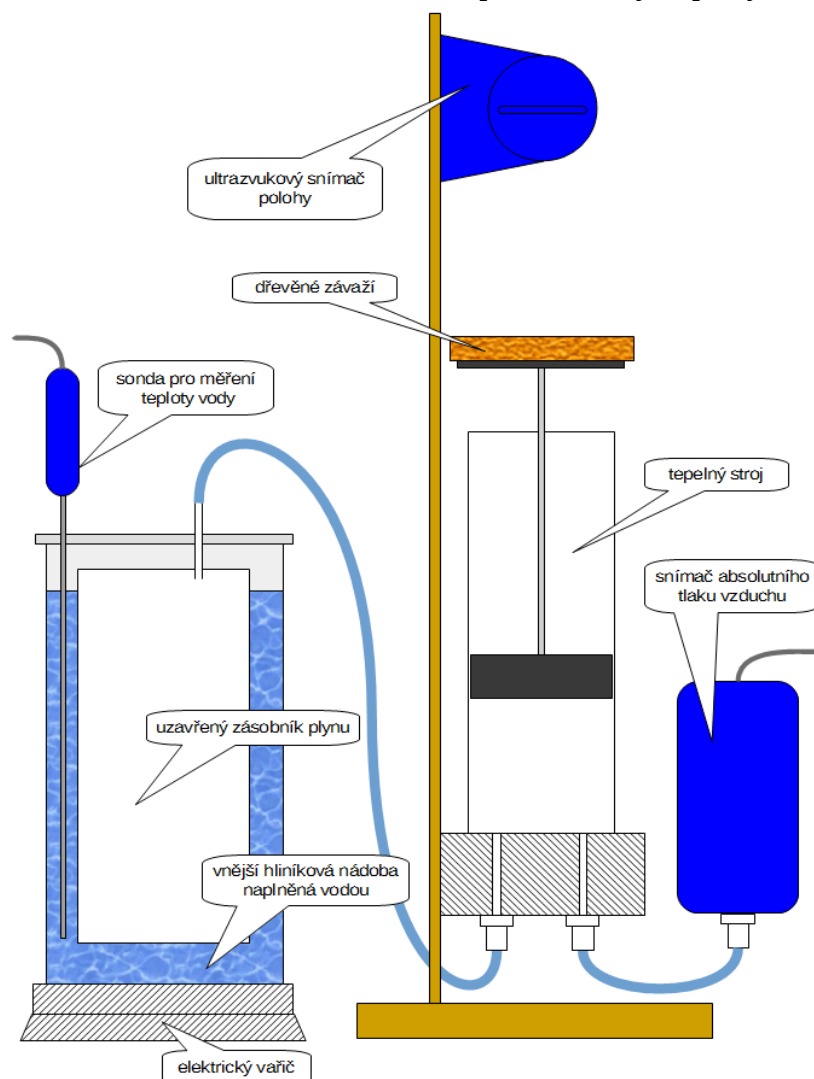
Zpracování

V teoretickém úvodu jsme odvodili, že závislost tlaku plynu na termodynamické teplotě by při konstantním objemu měla být lineární. Proto program proložil naměřenými body regresní přímku, jejíž parametry (směrnice m a úsek b) jsou uvedeny v rámečku uvnitř grafu. Pokud oprášíte své znalosti o lineární funkci či z analytické geometrie, nemělo by vám činit problém nalézt termodynamickou teplotu, při které by tlak plynu dosáhl nulové hodnoty. Zamyslete se nad tím, jaký má taková hodnota fyzikální význam a čím je důležitá.

² V případě, že naměřená data se v nějaké oblasti výrazně odchylojí od očekávané závislosti, je možné na nástrojové liště grafu použít nástroj pro výběr části dat pro další numerické zpracování. Tento vytvoří v grafu obdélníkovou oblast, kterou je možné myší posouvat a měnit její velikost. Body uvnitř vybrané oblasti jsou zvýrazněny žlutě a jsou dále použity pro statistické výpočty.

Izobarický děj

Celkové uspořádání vychází ze sestavy pro izochorický děj (viz výše), nově je přidán [tepelný stroj TD-8572](#) (viz obrázek)³. Jedním přípojným bodem je pomocí hadičky připojen k zásobníku plynu, na druhém pak měříme tlak [snímačem PS-2107](#). Pro lepší stabilitu je tepelný stroj upevněn na labo-



ratorní stojan, který je k lavici zajištěn truhlářskou svěrkou. Pozice dřevěného hranolu na podložce spojené s pístem je měřena ultrazvukovým [snímačem PS-2103A](#), který je rovněž upevněn na tyč stojanu nad pístem (dodržte rozestup okolo 30 cm mezi hranolem na podložce při zasunutém pístu a snímačem). Tepelný výměník připravte obdobným způsobem jako u izochorického děje (dle potřeby ochlaďte před měřením tekoucí vodou, pomocí skleněné kádinky odměřte cca 1 litr a opět dejte **pozor na vniknutí vody** do hadičky a zásobníku). Prozatím jej ponechte stát mimo vaříč, hadičku k tepelnému stroji ještě nezapojujte. Všechny snímače připojte k modulu [PowerLink](#) a ten

³ Poloha pístu tepelného stroje je dána rovnováhou mezi tlakovou silou plynu uvnitř nádoby a vnější silou působící na píst (tlak okolního vzduchu a tíha pístu se závažím), která se při pokusu nemění. Proto je během pokusu tlak plynu v nádobě udržován konstantní a se zvyšující se teplotou roste pouze objem plynu. Popsané experimentální uspořádání tak skutečně umožňuje studium izobarického děje.

pomocí kabelu USB k počítači s programem Pasco Capstone. Snímač tlaku připojte hadičkou k tepelnému stroji, elektrický vaříč můžete zapojit do zásuvky, ale zkontrolujte pozici ovladače na stupeň 0 (tj. vaříč nehřeje).

Ověření činnosti aparatury

Pokus při konstantním tlaku provádějte pomocí pracovního sešitu `izobarický_děj.cap`, podobně jako u ostatních úloh nejprve vyplňte titulní stránku a uložte její kopii do laboratorního deníku.

Po sestavení aparatury je třeba nejprve ověřit správnou činnost měření polohy pístu. Ultrazvukové čidlo musí být natočeno dolů a snímač přepnut pro měření kratších vzdáleností (symbol vozíku). Po přepnutí pracovního sešitu na stránku *Měření* vidíte tři digitální ukazatele—poloha pístu, teplota vody ve výměníku a tlak plynu v nádobě. Snímač polohy je nastaven tak, že při spuštění měření se uloží první hodnota a následující hodnoty (čtené dvakrát za sekundu) se od ní odečítají. Zobrazená hodnota pak přímo odpovídá vysunutí pístu vzhledem k počáteční poloze. Spustíme měření (tlačítkem *Zaznamenat data* na spodní liště) a na ukazatelích bychom měli vidět aktuální hodnoty veličin (u polohy pístu velmi blízké nule). Nyní pomalu a velmi opatrně začneme rukou vytahovat píst, ale nesmíme narušit prostor mezi dřevěným závažím a čidlem. Poloha pístu na obrazovce by měla narůstat a měla by korespondovat se skutečným vysunutím pístu odečítaným na stupnici tepelného stroje. Pracovní sešit je nastaven tak, že zpočátku se data nezaznamenávají do paměti, jejich ukládání začne až po dosažení 10 mm (v tu chvíli se změní barva ukazatelů—u polohy pístu na modrou, u teploty na červenou a u tlaku na černou). Po dosažení vysunutí 90 mm se měření automaticky ukončí. Potom nechte píst samovolně se vrátit do spodní polohy. Zkušební data vymažte pomocí tlačítka na spodní liště. Pokud zkouška neproběhla podle popsaného scénáře, upravte nastavení aparatury a test opakujte. Nyní byste měli mít všechno připraveno k zahájení měření.

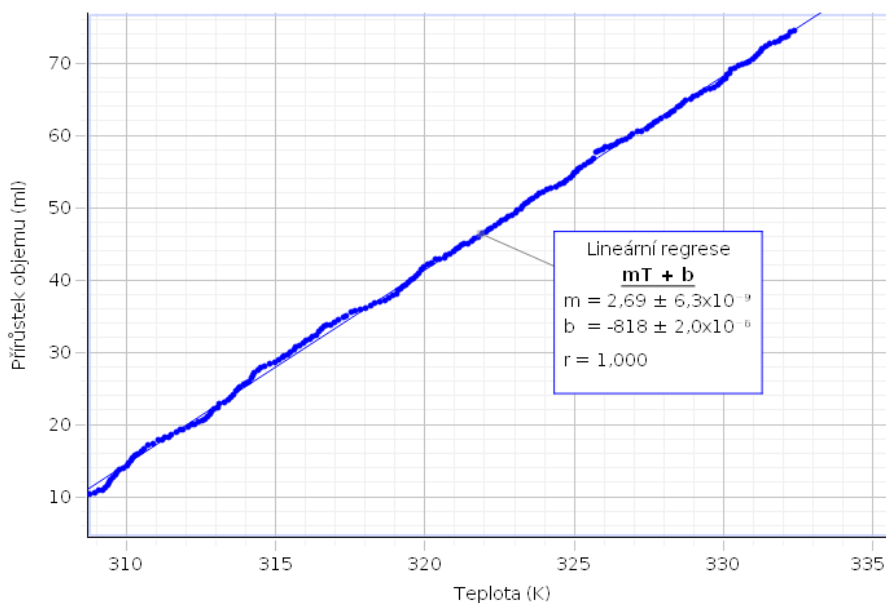
Měření

Nádobu s výměníkem postavte na elektrický vaříč a připojte hadičkou k tepelnému stroji. Regulátor vaříče nastavte na stupeň 1,5 a spusťte měření. Data se zobrazují, ale zatím neukládají. Po chvíli se píst začne pomalu zvedat. V této chvíli odpojte tlakový snímač a vzápětí jej opět připojte (plyn se při tom neochladí, ale vyrovná se jeho tlak s okolím), zároveň snižte příkon vaříče na stupeň 1. Po chvíli začne píst znovu stoupat, po dosažení meze 10 mm se začnou zaznamenávat měřená data. Na vaříči nastavte stupeň 1,5. Sledováním ukazatele tlaku můžete kontrolovat, zda podmínky pokusu skutečně odpovídají izobarickému ději a jak se v průběhu experimentu liší tlak od okolního atmosférického tlaku. Po dosažení zdvihu asi 60 mm zvyšte příkon na stupeň 2. Počkejte na automatické ukončení měření (při vysunutí 90 mm) a stáhněte regulátor vaříče na 0. Četné zkoušky ukázaly, že takovým způsobem se daří dosáhnout poměrně rovnoměrného nárůstu objemu v čase, což vede k uspokojivým výsledkům pokusu. Bylo zjištěno, že měření je poměrně citlivé na různé rušivé vlivy jako jsou mechanické ořesy, změny okolní teploty vlivem silného průvanu apod. Snažte se jich proto vyvarovat. Nyní můžete odpojit hadičku výměníku od tepelného stroje a **velmi opatrně** výše popsaným způsobem odnést nádobu k umyvadlu, otevřít ji, vylít horkou vodu a

ochladit ji. Stránku pracovního sešitu pro vlastní provádění měření není nutné ukládat do laboratorního deníku.

Na stránce *Graf* je ze zaznamenaných dat vykreslena závislost přírůstku objemu plynu (snadno spočteného pomocí známého průměru pístu) na termodynamické teplotě. Výše popsanými způsoby můžete upravit měřítko os grafu nebo barvu naměřených bodů tak, abyste zvýšili vypovídací hodnotu grafu. Výsledek může vypadat například jako na přiloženém obrázku. Na základě teore-

Přírůstek objemu plynu v závislosti na jeho teplotě



tického rozboru očekáváme, že objem plynu při izobarickém ději s teplotou lineárně narůstá. Proto je do grafu programem zakreslena i proložená regresní přímka. Můžete tak sami posoudit míru shody vašich dat s očekáváním. Stránku s grafem si uložte do laboratorního deníku.

Před ukončením měřicího programu nezapomeňte na export laboratorního deníku a uložení pracovního sešitu. Tyto soubory si pak odešlete na své úložiště a nakonec proveďte na počítači závěrečný úklid.

Upozornění



Žáci jsou povinni dodržovat veškerá bezpečnostní pravidla, se kterými byli seznámeni v úvodní hodině. Při práci dbají pokynů vyučujícího a chovají se tak, aby zabránili jakékoliv újmě na zdraví i na svěřeném materiálu. Zvýšenou pozornost věnujte manipulaci s horkou vodou a vyvarujte se popálení horkým vařičem! Uvědomte si prosím, že zvláště tepelný stroj, počítače a elektronická zařízení jsou z hlediska rozpočtu školy poměrně nákladné položky, které by měly sloužit jako učební pomůcky i pro vaše spolužáky a následovníky.

Soupiska pomůcek a materiálu

Všechna pracoviště:

- počítač (netbook) s programem Capstone, napájecí adaptér,
- rozhraní PowerLink PS-2001, napájecí adaptér, USB kabel,
- teplotní snímač PS-2125 s kovovou sondou,
- snímač absolutního tlaku vzduchu PS-2107.

Pracoviště pro **izotermický děj**:

- skleněná baňka s pryžovým uzávěrem, T-kusem a propojovacími trubičkami,
- vyplachovací stříkačka 150 ml.

Pracoviště pro **izochorický děj**:

- velký kalorimetr použitý jako uzavřený výměník ve vodní lázni,
- malý elektrický regulovatelný vařič,
- skleněná kádinka 500 ml.

Pracoviště pro **izobarický děj**:

- velký kalorimetr použitý jako uzavřený výměník ve vodní lázni,
- malý elektrický regulovatelný vařič,
- skleněná kádinka 500 ml,
- tepelný stroj TD-8572, hadička s bajonetovými uzávěry,
- ultrazvukový snímač polohy PS-2103A,
- stojan pro fyzikální pokusy, truhlářská svěrka na upevnění,
- vhodná zátěž (např. dřevěný hranol).