

# Ideální plyn v gymnaziálním kurzu fyziky<sup>\*)</sup>

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

*„Netvrdím, že počet hodin vymezený pro výuku je jediným a tedy rozhodujícím prvkem určujícím její kvalitu. Zcela určitě však není prvkem zanedbatelným. Při minimální hodinové dotaci učitel fyziky brzy pozná, že není možné, aby vše, co **by měl**, naplnil. Začne hledat východisko a brzy dospěje k závěru, že musí něco ošidit. Kde začne, záleží na jeho mentalitě a svědomí. Bude to možná experiment, možná řešení úloh nebo prověřování vědomostí studentů či rozsah výkladu. A jde-li o poctivého učitele, začne mít výčitky. Neunes-li je, možná přestane i učit. Nebo, a to je pravděpodobnější, se začne pít po nových metodách výuky, někdy označovaných jako progresivní, které se v posledních letech začínají čím dál více uplatňovat a někdy vyúsťují přinejmenším v povrchnost výuky a následně i znalostí a dovedností.“*

Těmito poměrně zdrženlivými, avšak zcela jednoznačnými, předvídavými slovy upozornil před několika lety krátký článek [1] na jedno z očividných nebezpečí, jimiž začaly na sklonku milénia hrozit českému gymnaziálnímu vzdělávání nezvládnuté liberalizační tendence.

## 1. Gymnaziální fyzika mezi rámcovým a školním vzdělávacím programem

Nutková potřeba novodobých aktivistů zásadně reformovat předlistopadové školství záhy přinesla jednak návrhy na drastické omezení minimální časové dotace řady tradičních předmětů – v případě gymnaziální fyziky šlo o redukci z předchozího 3, 3, 3, 4 (1983) na 2, 2, 2, 0 (1999) vracející rozsah její výuky o sto let zpět [2] – jednak importované „moderní pedagogické trendy“ odmítající kázeň a řád [3]. Zpočátku celkem častý optimistický názor, že se tyto záměry svou absurditou brzy samy diskvalifikují, se bohužel ukázal jako mylný a revoluční změny v českém školství už začínají nést svoje trpké ovoce [4, 5].

Zákonem [6] zaštitěné, a dalšími politickými rozhodnutími protežované, reformní aktivity našly postupně [7, 8] – za důsledného přehlížení nesouhlasných připomínek (např. [9]) – jedno ze svých aktuálních vyústění v *Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia* [11]. Tento kontroverzní (např. [4, 5]) dokument především nastoluje modlu *klíčových kompetencí*, od nichž odvozuje jak *cíle vzdělávání*, tak *vzdělávací obsah* konkretizovaný *očekávanými výstupy a učivem*. Nastavené mantinely – jedny mlhavě obecné (klíčové kompetence, cíle vzdělávání), druhé mnohdy konkrétně zmatečné /alespoň v případě fyziky/ (očekávané výstupy, učivo) – pak doplňuje stejně vágně vymezenou časovou dotací: *Dvěma vzdělávacími oblastmi Člověk a příroda (Fyzika, Chemie, Biologie, Geografie, Geologie) a Člověk a společnost (Občanský a společenskovědní základ, Dějepis, /Geografie/)* je společně přiděleno minimum 36 týdenních hodin za čtyři roky, při čemž povinnost jejich výuky se ukládá jen v prvním dvouletí. A tak je velmi pravděpodobné, že při pochopitelném zájmu všech dílčích předmětů o vyučovací hodiny nebude fyzika na běžném gymnáziu – i přes možnost jistého přilepšení z fondu disponibilních hodin – dotována o mnoho více než likvidačním 2, 2, 2, 0.

S tímto šibeničním zadáním delegují iniciátoři současných změn v českém gymnaziálním vzdělávání nejen svoji zodpovědnost, ale také veškerou práci, jejíž erudované provedení by měli zajistit, na jednotlivé školy – tedy místa, která by nejen neměla být takto zatěžována, ale která k tomu ani nejsou dostatečně kompetentní. První, co se totiž mělo udělat před spuštěním tak rozsáhlé školské reformy, a co by se mělo udělat alespoň před vlastní tvorbou *Školních vzdělávacích programů*, je poctivá důkladná – věcná i pedagogická –

---

<sup>\*)</sup> Věnováno RNDr. Jaroslavu Veverkovi k jeho 75. narozeninám.

analýza konkrétního obsahu vzdělávání. Dokumenty reformy však o takovém rozboru neobsahují ani zmínku. Odpovědní činitelé by jistě tvrdili, buď že byl udělán, nebo že se naopak – z nějakého vyššího důvodu – nedělá. Skutečností však je, že udělán nebyl (rozhodně ne v potřebném rozsahu a kvalitě), že být udělán musí a že za jeho provedení garanti reformy odpovídají.<sup>1)</sup>

Všechna česká čtyřletá gymnázia (a vyšší stupně gymnázií víceletých) mají povinnost zahájit 1. září 2009 ve svých prvních ročnících výuku podle vlastních (školních) vzdělávacích programů. K jejich sestavení, které je nejdůležitějším, nejkvalifikovanějším – a ovšem také nejobtížnějším – úkolem celého inovačního procesu, přitom však nedostala od školské administrativy o mnoho větší podporu než problematický (závazný) materiál [11], myšlenkově chudou, víceméně propagandistickou, brožuru [12] a možnost vstupovat na portály typu [13], účastnit se diskusních fór či vyslat své učitele do návodných seminářů pojetím i úrovní zpravidla srovnatelných s dokumenty [11, 12]. Někdejší Pedagogická centra, jejichž posláním bývala konkrétní metodická podpora škol, byla zrušena. Jejich „zeštíhlený“ substitut – Národní institut dalšího vzdělávání – nabízí v době vrcholící přípravy ŠVP převážně jen kurzy manažerského typu nebo školení zaměřená na technicko-organizační problémy implementace vzdělávacích programů. A vysoké školy připravující budoucí učitele fyziky mají většinou tendenci věnovat se spíše grantově podporované tvorbě „progresivních metod výuky“ zmiňovaných v úvodním citátu než nevděčné nápravě pochybení a opomenutí již probíhající školské reformy.

Za této neutěšené situace – navíc bez jakýchkoli pracovních úlev (a finančního ohodnocení) – budou učitelské sbory běžných gymnázií při vytváření svých školních vzdělávacích programů zřejmě do značné míry vycházet z příkladu a zkušeností pilotních škol, které pochopily apel doby již dříve. Přirozeným vodítkem jejich úsilí se při tom s největší pravděpodobností stanou současné gymnaziální učebnice a jistě i vlastní názor na vyučovací předmět, jenž ovšem bývá používanou učebnicí zpravidla silně ovlivněn.

Jedním z nebezpečných úskalí takové inspirace je propastný rozdíl mezi časovou dotací gymnaziální fyziky na počátku devadesátých let (dnes již minulého) století, kdy osmidílná – tématicky členěná – řada jejích dnešních učebnic začala vznikat, a restriktivním trendem nastoleným Rámcovým vzdělávacím programem. Na drtivé většině škol tak půjde zřejmě o drastickou redukci fyzikálního učiva, která v sobě však skrývá značná rizika. Především ji není možné provést pouhým vynecháním některých partií, které by se snad – nahlíženo prizmatem RVP – mohly jevit jako málo důležité. Takový postup je totiž téměř jistou cestou k následkům skutečně fatálním, spočívajícím v narušení či dokonce pomnutí podstatných vnitřních a vnějších souvislostí, díky nimž fyzika tvoří logicky provázanou myšlenkovou konstrukci vystihující základní řád okolního světa. Dalším, prakticky nevyhnutelným, důsledkem výrazného omezení obsahu gymnaziální fyziky je pak ztráta možnosti přímé podpory její výuky odlišně koncipovanými stávajícími učebnicemi. A zvažování jejich náhrady učebními texty – byť přepracovanými – původně určenými pro jiný (nižší) typ škol [14] je smutným svědectvím o faktickém směřování české školské reformy.

Ve zbývajících částech tohoto příspěvku je důvodnost předcházejících obav demonstrována na konkrétním příkladu nedávných úprav učebnicového výkladu jednoho důležitého tématu gymnaziální fyziky.

---

<sup>1)</sup> Existuje, samozřejmě, i řada příkladů, jimiž bylo – a stále ještě je – možno se inspirovat: např. pečlivost přípravy podobně hlubokých změn vzdělávacích plánů typu anglického Nuffieldského kurzu či amerického PSSC. A také se ovšem poučit ze zkušeností získaných při jejich zavádění [3, 10].

## 2. Ideální plyn

Ideální plyn je jedním z nejdůležitějších systémů vyšetřovaných termodynamikou a statistickou fyzikou. Jeho výlučnost spočívá v tom, že jeho fyzikální popis (jak makroskopický, tak mikroskopický) nevede jenom k vytvoření správné představy o reálných soustavách, které se dají tímto modelem reprezentovat<sup>2)</sup>, ale má také značný metodologický význam. Na jedné straně je totiž ideální plyn systémem natolik jednoduchým, že se při jeho studiu lze do značné míry opírat o názorné, intuitivně přijatelné představy a jeho vlastnosti lze poměrně snadno vyjádřit i matematicky. Na druhé straně je však současně i dostatečně komplikovaný, aby se u něj projevil rovněž podstatné rysy chování obecných makroskopických soustav. Díky těmto skutečnostem má model ideálního plynu – kromě svého bezprostředního fyzikálního významu – mimořádnou pedagogickou hodnotu, která jej činí nezastupitelným jak v úvodních, tak ve vyspělých fyzikálních kurzech.

Před jakýmkoli komentářem středoškolské prezentace tohoto důležitého tématu je vhodné připomenout jeho základní logickou strukturu na úrovni o stupeň vyšší.

### • Makroskopický (termodynamický) přístup

Z makroskopického hlediska je ideální plyn nejběžnějším reprezentantem t.zv. *jednoduchých homogenních systémů*, t.j. termodynamických soustav, k zadání jejichž rovnovážných stavů stačí znalost dvojice makroskopických veličin, obvykle nazývaných *určující* nebo také *stavové parametry*; zpravidla se za ně volí objem  $V$  a (termodynamická) teplota  $T$ . Soustavy tohoto druhu jsou jednoznačně identifikovány (definovány) dvojicí základních vztahů, t.zv. *stavových rovnic*

$$p = p(V, T), \quad (\text{termická stavová rovnice}) \quad (1)$$

$$E = E(V, T), \quad (\text{kalorická stavová rovnice}) \quad (2)$$

kde  $p$  je tlak a  $E$  vnitřní energie [15].

V nich je zakódována veškerá makroskopická informace o studovanému systému. Prakticky to znamená, že za pomoci těchto rovnic lze obecnými metodami termodynamiky vypočítat jeho libovolnou makroskopickou veličinu. Konkrétní tvary závislostí (1), (2), jejichž znalost je v tomto smyslu „nutnou a postačující podmínkou“ pro úplný makroskopický popis vyšetřované soustavy, však termodynamika svým teoretickým aparátem nalézt nedovede a je tak odkázána na pomoc „zvenci“. Tu jí může poskytnout buď experiment nebo teoretická disciplína, která disponuje informací o mikroskopické struktuře systému.

### • Experiment

Historicky teoretickému popisu makroskopických vlastností látek jejich empirická studia dokonce předcházela. Vůbec první kvantitativní zákonitost tohoto druhu, uvádějící do souvislosti tlak  $p$  a objem  $V$  plynového tělesa (při zafixované teplotě), vyslovili – nezávisle na sobě – na základě vlastního experimentování se vzduchem Robert Boyle (1662) a Edmé Mariotte (1676):

$$pV = \text{konst.} \quad (3)$$

Závislost objemu zředěných plynů na jejich teplotě (při zafixovaném tlaku) pak svými pokusy vyšetřili Jacques Charles (1787) a Joseph Gay-Lussac (1802):

<sup>2)</sup> Kromě obligátně uváděných zředěných běžných plynů je to například i rovnovážné tepelné záření (/ultrarelativistický/ fotonový plyn) nebo třeba soubory kvazičástic v některých pokročilých aplikacích fyziky kondenzovaných látek.

<sup>3)</sup> Jak je vyznačeno závorkami, terminologie zde není zcela jednotná. Teoretičtější zaměřené publikace preferují (např. [15]), nebo alespoň uvádějí (např. [16]), širší názvy, zatímco v učebnicové literatuře je zvykem nazývat *stavovou rovnici* (bez přívlastku) jednoduchého homogenního systému jen souvislost mezi jeho tlakem, objemem a teplotou; vyjádření vnitřní energie pomocí určujících parametrů se v ní pak zvláštním názvem neoznačuje.

$$\frac{V}{T} = \text{const.} \quad (4)$$

Tyto dílčí závěry svých předchůdců spojil roku 1824 Sadi Carnot do embryonální – verbální – podoby (termické) stavové rovnice ideálního plynu. Carnotovu slovní formulaci souvislosti mezi jeho tlakem, objemem a teplotou matematicky vyjádřil o deset let později Émile Clapeyron. A konečně roku 1862 Rudolf Clausius zapsal poprvé tento vztah v dnešním tvaru

$$pV = \text{Konst.} \cdot T, \quad (1a)$$

kde  $\text{Konst.} = nR$ ,  $n$  je počet molů a  $R$  je experimentálně určená univerzální plynová konstanta.<sup>5)</sup>

O empirické nalezení závislosti  $E = E(V, T)$  se rozhodujícím způsobem zasloužil James Prescott Joule. Pokusy konanými počátkem padesátých let devatenáctého století nejprve zjistil, že se teplota zředěného plynu při jeho adiabatické expanzi do vakua nemění, z čehož plyne, že jeho vnitřní energie nezávisí na objemu, ale je určena jen jeho teplotou [19]:

$$E = E(T).$$

Zkombinování tohoto výsledku s experimentálním poznatkem, že izochorické tepelné kapacity  $C_V$  zředěných plynů nezávisí na teplotě, následně přivedlo k závěru, že vnitřní energie ideálního plynu je přímo úměrná jeho teplotě [20]:

$$E = C_V \cdot T.$$

Uvážení naměřených hodnot  $C_V$  ( $\frac{3}{2}nR$  pro jednoatomový,  $\frac{5}{2}nR$  pro dvouatomový ideální plyn, ...) pak umožňuje tento výsledek – kalorickou stavovou rovnici ideálního plynu – přepsat do tvaru

$$E = \alpha \cdot \text{Konst.} \cdot T, \quad (2a)$$

kde  $\alpha$  je konstanta, jejíž hodnota je určena strukturou molekul, zatímco koeficient  $\text{Konst.}$ , vystupující i v rovnici (1a), závisí jen na množství plynu.

### • Mikroskopický (statistický) přístup

Z hlediska mikroskopického se ideálním plynem rozumí makroskopický soubor částic (zanedbatelných rozměrů), jejichž vzájemná interakce je tak slabá, že ji lze v celkové energiové bilanci zanedbat. Vnitřní energie  $E$  takového systému je prostým součtem energií  $\varepsilon_i$  všech jeho  $N$  stavebních částic (molekul)

$$E = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i.$$

V často – na středoškolské úrovni výhradně – uvažovaném případě jednoatomových plynů je energie jednotlivých molekul spojena jen s jejich postupným (chaotickým) pohybem a pro celkovou vnitřní energii uvažovaného plynového tělesa pak platí

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 = N \cdot \frac{1}{2} m v_k^2, \quad (2b)$$

kde  $m$  je hmotnost molekuly,  $v_i$  okamžitá rychlost  $i$ -té molekuly a  $v_k$  střední kvadratická rychlost molekul.

Na základě úvah o pohybu jednotlivých molekul je možné vyjádřit rovněž tlak  $p$ , jímž uvažované plynové těleso působí na stěny nádoby, v níž je uzavřeno. Tento relativně

<sup>4)</sup> Je namístě poznamenat, že nejde o autentické matematické vyjádření. Termodynamickou teplotní stupnici  $T$  totiž zavedl až o téměř půl století později (1848) William Thomson (lord Kelvin).

<sup>5)</sup> Další fyzikálně-historické údaje a jejich podrobné komentáře vztahující se k celé této problematice lze najít např. v [17, 18].

jednoduchý postup – nezávislý na vnitřní struktuře molekul (jednoatomové, dvouatomové, ...) – poprvé formuloval roku 1857 Rudolf Clausius [21] a dospěl tak k výsledku

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m v_k^2 \quad (1b)$$

v učebnicové literatuře zpravidla nazývanému *základní rovnice pro tlak ideálního plynu*.<sup>6)</sup>

Střední kvadratickou rychlost  $v_k$  vystupující ve vztazích (1b), (2b) lze vypočítat pomocí Maxwellova rozdělení (odvozeného o tři roky později – 1860) (např. [18, 20]):

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (5)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta.

A dosazením tohoto vyjádření do (1b), (2b) se dostane explicitní tvar obou stavových rovnic

$$pV = NkT, \quad (1c)$$

$$E = \frac{3}{2} NkT. \quad (2c)$$

Poněvadž při vyvození první z nich bylo kromě základních předpokladů molekulárně-kinetické teorie využito jen obecných úvah klasické mechaniky, platí tato rovnice pro libovolný klasický ideální plyn (bez ohledu na případnou vnitřní strukturu jeho molekul). Druhá rovnice, jejíž odvození využívá vztahu (2b) spočívajícího na předpokladu, že molekuly nemají vnitřní strukturu, vyjadřuje vnitřní energii klasického ideálního plynu, jehož molekuly jsou jednoatomové.

### 3. Úvodní výklad základních vlastností ideálního plynu

#### • Gymnaziální učebnicový obraz

Výklad základních vlastností ideálního plynu prezentovaný současnou českou učebnicí fyziky pro gymnázia [28] vychází z **mikroskopického pojetí**. Prakticky v témže tvaru byl formulován již v experimentální předchůdkyni [25] této publikace a od té doby – jen s malými změnami – využit i v [26, 27].

Logickou strukturu jeho původní verze [25, 26] lze – v označení použitým výše v tomto textu – shrnout do následujících bodů:

- sestavení vztahu (2b) – na základě fyzikální argumentace,
- odvození vztahu (1b) – Clausiovou metodou,
- uvedení vztahu (5) v hotovém tvaru,
- ▶ získání (1c) – dosazením (5) do (1b),
- ▶ získání (2c) – dosazením (5) do (2b).

Ze tří fundamentálních vztahů (1b), (2b), (5) jsou tedy dva výchozí / (1b), (2b) / podloženy detailním fyzikálním zdůvodněním a jeden (5) – fungující ovšem jako „šém oživující Golema teoretického aparátu kinetické teorie“ – je předložen v hotovém tvaru. Obě základní charakteristiky ideálního plynu (1c), (2c) jsou tedy (téměř) uspokojivě vyvozeny. (Termická) stavová rovnice ideálního plynu je následně využita k odvození *zákonů pro ideální plyn* (Boyleova-Mariottova, Charlesova, Gay-Lussacova). Příslušné experimenty jsou při tom prezentovány ve své ověřovací funkci.

<sup>6)</sup> Základní ideová linie tohoto odvození se záhy dostala i do českých gymnaziálních učebnic fyziky [22]. A v různých modifikacích (a stupních zjednodušení) je Clausiův postup užíván také v novějších učebních textech [24-28].

V učebnici [27] byla použita – z hlediska logických návazností – jen mírně odlišná varianta tohoto postupu:

- sestavení vztahu (2b) – na základě fyzikální argumentace,
- odvození vztahu (1b) – Clausiovou metodou,
- uvedení vztahu (2c) v hotovém tvaru,
- ▶ získání (5) – zkombinováním (2b), (2c),
- ▶ získání (1c) – dosazením (5) do (1b).

Velmi podstatnou změnou je však přesun odvození vztahu (1b) do učiva tištěného petitem, „*teré ve třídách s menším počtem hodin věnovaných fyzice lze vynechat*“. Výklad v těchto třídách tak totiž přichází o druhý ze svých tří pilířů (na druhém řádku předchozí tabulky ●→○) a samo použití čistě mikroskopického přístupu tím ztrácí mnoho ze svého smyslu.

Redukce provedená v [28] je pak z tohoto hlediska již fatální: „*rozšiřujícím a doplňujícím učivem*“ se zde totiž stává nejen odvození vztahu (1b), ale i sám jeho tvar (a rovněž větší část komentáře pojmu střední kvadratická rychlost včetně matematické formulace směřující ke vztahu (2b)). Z původní verze postupu se tak stává pouhé torzo:

- uvedení vztahu (2b) /prakticky/ v hotovém tvaru,  
– absence vztahu (1b),
- uvedení vztahu (2c) v hotovém tvaru,
- ▶ získání (5) – zkombinováním (2b), (2c)  
/tento vztah se však nikde v dalším textu,  
který není *doplňující* či *rozšiřující*, nepoužije/,  
– nemožnost vyvození (1c).

Za těchto okolností tedy musí být i (termická) stavová rovnice ideálního plynu prezentována v hotovém tvaru. A Rámcovým vzdělávacím programem [11] *očekávaný výstup*: „*žák využívá stavovou rovnici ideálního plynu stále hmotnosti při předvídání stavových změn ideálního plynu*“ tak může stěžít spočívat v něčem jiném než ve víceméně mechanickém zacházení s tímto „vzorcem“.

Předcházející srovnání vede ke zřejmému „poučení z krizového vývoje“: jakékoli krácení – původně rozsáhlejšího – výkladu<sup>7)</sup> má svoje meze, jejichž překročení jak jeho věcný, tak vzdělávací obsah značně poškodí či dokonce zcela znehodnotí.

### • Alternativní způsob výkladu

Nastíněný přehled různých přístupů k fyzikálnímu popisu ideálního plynu vybízí ke zvážení možnosti koncipovat výklad jeho základních vlastností odlišným způsobem. Skutečnost, že jak mikroskopické, tak makroskopické pojetí má kromě svých nesporných předností i určité rysy, které jsou z fyzikálně-pedagogického hlediska méně příhodné, dává naději, že vhodným zkombinováním obou těchto „čistokrevných“ variant bude možné vytvořit postup, který by v maximální míře využíval jejich předností a současně minimalizoval jejich nevýhody.<sup>8)</sup>

<sup>7)</sup> Při uvažování o důvodech popisované redukce je zajímavé provést orientační odhad s ní související „časové úspory“: Ze zhruba 33 stran kapitoly 3. *Struktura a vlastnosti plynného skupenství látek* [26-28], obsahující výklad diskutované problematiky, je v [28] jako *rozšiřující a doplňující učivo* označen text v rozsahu asi 18 stránek, t.j. přibližně 55% původního rozsahu. Tato hodnota velmi dobře odpovídá snížení celkové týdenní dotace gymnaziální fyziky – z předreformního  $3 + 3 + 3 + 4 = 13$  na obávaných  $2 + 2 + 2 + 0 = 6$  – připomínanému v první části tohoto článku.

<sup>8)</sup> Koncepce kombinující v přiměřených proporcích mikroskopický a makroskopický pohled (a ovšem i odkaz na experiment) odpovídá modernímu přístupu ke studiu makroskopických systémů a v současných vysokoškolských kurzech termodynamiky a statistické fyziky (např. [18-20]) je preferována. V obecné

Nejjednodušší cestou vedoucí k (termické) stavové rovnici ideálního plynu je společné uvážení Boyleova-Mariottova a Charlesova (Gay-Lussacova) zákona připomínané v historických souvislostech ve druhé části tohoto textu. Prakticky takové spojení znamená, že se nejprve uvažuje o izotermickém přechodu studovaného plynového tělesa ( $n$  molů) z počátečního stavu, charakterizovaného hodnotami tlaku  $p_0$ , objemu  $V_0$  a teploty  $T_0$ , do mezistavu ( $p', V', T'$ ), z něhož je následně izobaricky převedeno do koncového stavu, ve kterém tyto veličiny mají hodnoty  $p, V, T$ . Z předpokládaného charakteru obou dílčích procesů při tom vyplývá, že popisované plynové těleso má v mezistavu stejnou teplotu  $T_0$  jako ve stavu počátečním ( $T' = T_0$ ) a týž tlak  $p$  jako ve stavu koncovém ( $p' = p$ ):

|                                   |                                    |                          |                                   |                           |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| počáteční stav<br>$p_0, V_0, T_0$ | $\xrightarrow{\text{izotermicky}}$ | mezistav<br>$p, V', T_0$ | $\xrightarrow{\text{izobaricky}}$ | koncový stav<br>$p, V, T$ |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|

Užití (3), (4) postupně dává

$$p_0 V_0 = p V', \quad \frac{V'}{T_0} = \frac{V}{T},$$

odkud se vyloučením  $V'$  dostane rovnice (1a):

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p V}{T} = \text{Konst.}, \quad \text{resp.} \quad pV = \text{Konst.} T = nRT. \text{ } ^9)$$

(Je zřejmé, že fyzikálně-pedagogická hodnota tohoto postupu velmi závisí na způsobu uvedení obou výchozích zákonů (3), (4). Tato problematika je v novodobé české učebnicové literatuře [23-29] dobře zpracována a dokonce i v redukováném textu [28] zůstala součástí základního učiva. Popisovaná organizace výkladu ovšem vyžaduje, aby příslušné experimenty byly prezentovány – na rozdíl od [25-28] – nikoli v ověřovací, ale ve své heuristické funkci.)

Druhým stěžejním bodem předkládaného alternativního postupu je odvození *základní rovnice pro tlak ideálního plynu* (1b):

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m v_k^2. \text{ } ^6)$$

Pouhé uvedení tohoto vztahu v hotovém tvaru (či dokonce jeho úplné vynechání) totiž studentům značně ztěžuje (případně zcela znemožňuje) uvědomit si a pochopit podstatné fyzikální souvislosti takového úvodního výkladu základních vlastností ideálního plynu. Jeho zařazení/odvození naopak dává možnost – po zkombinování (1b) se snadno vyvoditelným (2b)

$$E = N \cdot \frac{1}{2} m v_k^2$$

– vyjádřit součin tlaku  $p$  a objemu  $V$  studovaného plynového tělesa jako

$$pV = \frac{2}{3} E. \quad (6)$$

Porovnání tohoto vztahu s (1a) vede přímo ke (kalorické) stavové rovnici ideálního plynu (2a):

formulaci je tato problematika samozřejmě komplikovanější, v konkrétním případě ideálního plynu lze však takový statisticko-termodynamický přístup realizovat i na středoškolské úrovni.

<sup>9)</sup> Poznamenejme, že tento Carnotův-Clapeyronův-Clausiusův způsob vyvození (termické) stavové rovnice ideálního plynu z empirických zákonitostí nalezených jejich předchůdci byl použit již v učebnici [22] (v tehdejší terminologii je ovšem vztah (1a) ještě nazýván „*spojeným zákonem Gay-Lussacovým a Mariottovým*“); frekventován je však i v novější učebnicové literatuře [23, 24, 29].

$$E = \frac{3}{2} n R T$$

a po zavedení Boltzmannovy konstanty  $k$  vztahem  $nR = \frac{N}{N_A} R = N k$  (kde  $N_A$  je Avogadrova konstanta) i k jejímu tvaru (2c):

$$E = \frac{3}{2} N k T. \text{ }^{10)}$$

Z dodatečného srovnání tohoto vztahu s (2b) pak bezprostředně vyplyne i výraz (5) pro střední kvadratickou rychlost.

Závěrem je vhodné zpřehlednit logickou linii navrhovaného alternativního způsobu výkladu základních vlastností ideálního plynu ve formě heslovitých bodů:

- odvození vztahu (1a) – z empiricky zjištěných zákonů<sup>10)</sup>,
- odvození vztahu (1b) – Clausiovou metodou,
- sestavení vztahu (2b) – na základě fyzikální argumentace,
- ▶ získání (6) – zkombinováním (1b), (2b),
- ▶ získání (2a), (2c) – zkombinováním (1a), (6),
- ▶ získání (5) – zkombinováním (2b), (2c).

## Literatura

- [1] *Veverka, J.*: K hodinové dotaci gymnaziálního kurzu fyziky. Ve: *Svoboda, E., (red.)*: Aktuální problémy výuky fyziky na gymnáziu (sborník ze semináře). MAFY, Hradec Králové 2002, str. 8. Školská fyzika **VIII**, č. 1 (2004) 95.  
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/hoddot.pdf>
- [2] *Lepil, O.*: Fyzikální vzdělávání ve 20. století – a jak dále? Matematika - fyzika - informatika **10**, č. 5 (2000/2001) 277.
- [3] *Lacina, A.*: Moderní trendy v českém fyzikálním vzdělávání. Školská fyzika **VIII**, č.3 (2005) 83. <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/aktprobl.pdf>
- [4] *Bečvář, J.*: Naše žhavá současnost. Přednáška na konferenci „Matematika – základ evropské vzdělanosti. (Hradec Králové, září 2007).  
<http://schol-methodicus.eu/Apel-k-verejnosti.htm>
- [5] *Pitřha, P.*: Velká iluze českého školství. Přednáška na Pedagogických dnech na Univerzitě Hradec Králové, duben 2008.  
<http://www.stolzova.cz/stolzova/view.php?cislocclanku=2008041701>
- [6] Zákon ze dne 24. září 2004 o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělávání (školský zákon).
- [7] *Svoboda, E.*: Teorie a praxe tvorby vzdělávacích programů. Ve: *Rauner, K., (red.)*: Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 3 – Rámcové vzdělávací programy (sborník z konference – dodatek). ZČU, Plzeň 2007.
- [8] Předchozí verze Rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia – RVP G  
<http://www.vuppraha.cz/sekce/80>

<sup>10)</sup> Pomocí vztahu  $nR = Nk$  lze samozřejmě dodatečně přepsat také rovnici (1a), vyvozenou výše na základě makroskopických úvah, do tvaru (1c).



- [9] *Svoboda, E., (red.):* Aktuální problémy výuky fyziky na gymnáziu (sborník ze semináře). MAFY, Hradec Králové 2002.
- [10] *Arons, A.,B.:* Achieving Scientific Literacy. Deadulus, Spring 1983. (Český překlad: Cesty k přírodovědné gramotnosti. Školská fyzika **VII**, č. 3 (2001) 61.
- [11] Rámcový vzdělávací program pro gymnázia – RVP G. VÚP Praha, 2007.  
[http://www.vuppraha.cz/soubory/RVPG-2007-07\\_final.pdf](http://www.vuppraha.cz/soubory/RVPG-2007-07_final.pdf)
- [12] Manuál pro tvorbu ŠVP na gymnáziích. VÚP Praha, 2007.  
[http://www.rvp.cz/soubor/Manual\\_G.pdf](http://www.rvp.cz/soubor/Manual_G.pdf)
- [13] Metodický portál RVP – portál vzdělávání. <http://www.rvp.cz/>
- [14] *Lepil, O.:* Současnost a budoucnost učebnic fyziky pro gymnázia. Matematika - fyzika - informatika **12**, č. 2 (2002/2003) 84.
- [15] *Bazarov, I., P.:* Termodinamika. Vysšaja škola, Moskva 1983.
- [16] *Obdržálek, J., Vaněk, A.:* Termodinamika a molekulová fyzika. Pedagogická fakulta UJEP, Ústí nad Labem 1996.
- [17] *Zajac, R., Šebesta J.:* Historické pramene súčasnej fyziky 1. Alfa, Bratislava 1990.
- [18] *Zajac, R., Pišút, J.:* Štatistická fyzika. Univerzita Komenského, Bratislava 1995.
- [19] *Lawden, D., F.:* Principles of Thermodynamics and Statistical Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester 1987.
- [20] *Lacina, A.:* Základy termodynamiky a statistické fyziky. SPN, Praha 1990.
- [21] *Lacina, A.:* Vznik a vývoj termodynamiky a statistické fyziky. Školská fyzika **II**, č. 4 (1994/1995) 13. <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/vznikt.pdf>
- [22] *Müller, P., J., Simonides, J.:* Fyzika pro vyšší třídy škol středních (vydání pro gymnasia). František Borový, Praha 1884.
- [23] *Šoler, K., Fuka, J., Lehar, F.:* Fyzika pro desátý ročník. SPN, Praha 1958.
- [24] *Vanovič, J. a kol.:* Fyzika pro II. ročník střední všeobecně vzdělávací školy. SPN, Praha 1965.
- [25] *Svoboda, E. a kol.:* Fyzika. Experimentální učební text pro II. ročník gymnázia. SPN, Praha 1980.
- [26] *Svoboda, E. a kol.:* Fyzika pro II. ročník gymnázií. SPN, Praha 1985.
- [27] *Bartuška, K., Svoboda, E.:* Fyzika pro gymnázia – Molekulová fyzika a termika (1. vydání). Galaxie, Praha 1993. (2. a 3. vydání, Prometheus, Praha 1994 a 1996).
- [28] *Bartuška, K., Svoboda, E.:* Fyzika pro gymnázia – Molekulová fyzika a termika (4. přepracované vydání). Prometheus, Praha 2000.
- [29] *Lepil, O., Bednařík, M., Hýblová, R.:* Fyzika pro střední školy I. Prometheus, Praha 2001.