

TEPLO NEBO ENERGIE? POZNÁMKY K SLOVNÍMU VYJADŘOVÁNÍ V TERMODYNAMICE

Tomáš MILÉŘ

Abstrakt

Termodynamika patří k obtížným partiím fyziky a u žáků není zrovna oblíbená. Výzkumy prováděné na školách u nás i ve světě opakovaně identifikují žákovské miskoncepce, jako je zaměňování stavových a procesních veličin a pojetí energie nebo tepla coby substance. Příčiny obtížnosti studia termodynamiky však zůstávají nejasné. Domníváme se, že velkým dílem je na vině přirozený jazyk, jímž jsou termodynamické jevy interpretovány. Přirozený jazyk je nástrojem komunikace, ale je i nástrojem myšlení. Jazyk zprostředkovává poznání, ale není-li logicky konzistentní, může být naopak překážkou porozumění fyzice. Informace jsou v jazyce zakódované, ale v případě termodynamiky jsou i zašifrované. Není se co divit našim žákům a studentům, že se při studiu snadno chytí do pastí, protože jazyk, jímž jsou psány moderní učebnice, k tomu poskytuje dostatek příležitostí.

HEAT OR ENERGY? NOTES ON VERBAL EXPRESSION IN THERMODYNAMICS

Abstract

Thermodynamics is a difficult part of physics and is not very popular with pupils and students. Research conducted at schools in the Czech Republic and in the world repeatedly identifies misconceptions, such as confusion of state and process variables and the concept of energy or heat as a substance. However, the causes of the difficulty of studying thermodynamics remain unclear. We believe that the natural language by which the thermodynamic phenomena are interpreted is largely to blame. Language is a tool of communication, but it is also a tool of thinking. Language of thermodynamics is not logically consistent and can be an obstacle to understanding physics. Language in which modern textbooks are written provides various opportunities for students to get trapped.

Úvod

Je známo, že v České republice je akutní nedostatek aprobovaných učitelů fyziky (nejen) pro základní školy. Někteří učitelé z praxe si proto „dodělávají“ učitelství fyziky jako další aprobační předmět. Při výuce didaktiky fyziky na Pedagogické fakultě Masarykovy univerzity mám možnost s nimi hovořit, zjišťovat jejich znalosti a zkušenosti. Setkávám se s tím, že tito učitelé často chápou teplo Q a práci W jako stavové veličiny nebo přímo jako druhy energie. Přitom se odvolávají na učebnice fyziky pro ZŠ, podle kterých učí. Je pochopitelné, že pro neaprobované fyzikáře jsou učebnice základním zdrojem informací o fyzice. Zjistil jsem, že dvě řady fyzikálních učebnic pro 8. ročník, které jsou momentálně na školách používány, skutečně explicitně označují teplo Q a práci W jako druhy energie. Jiné učebnice tak nečiní, avšak používají jazyk, v němž je stavové pojetí obou veličin implicitně zakódováno. Představa Q a W jako

stavových veličin je podporována formulacemi typu „teplo v tělese“, „práce ukrytá v tělese“, „přeměna energie na teplo (nebo práci)“ apod.

Chtěl bych zdůraznit, že tento příspěvek nemá být kritikou žádné z učebnic. Mým cílem je upozornit na problémy samotného jazyka termodynamiky, který je dnes považován za standardní. Mnohé formulace, jež se vyskytují i v moderních vysokoškolských učebnicích, a které by asi většina fyziků označila za správné nebo přijatelné, jsou ve skutečnosti jen těžko srozumitelné, protože jsou příliš vágní a postrádají vnitřní logickou konzistenci. V článku se pokusím objasnit příčiny tohoto stavu a navrhnout řešení.

Na úvod je třeba čtenáře upozornit, že rozlišujeme mezi *pojmy* a jejich *slovním označením*. Pojem definujeme jako představu, která má přesně vymezený obsah. Vědecký pojem je pak označován příslušným *termínem*. Diskutovaná problematika by neměla být zlehčována tak, že jde „pouze“ o terminologii. Přirozený jazyk není jen nástrojem komunikace, ale i nástrojem myšlení. Interpretace fyziky v přirozeném jazyce není primárně *problém lingvistický*, ale *koncepční* (volba klíčových pojmů pro vysvětlování jevů) a *logický* (co do vztahů mezi pojmy). Správné vyjadřování má zásadní význam nejen z hlediska didaktického, ale i z hlediska fyziky jako exaktní vědy.

Jazyk fyziky se vyvíjel spolu s vědou. Termíny se v průběhu evoluce vědy ustálily na základě konsenzu, tj. akceptováním odbornou komunitou. Onen konsenzus byl však často spíše kompromisem než promyšleným aktem. Jazyk fyziky tak v sobě v některých případech dodnes nese představy, jež byly dávno překonány a nahrazeny obecnějšími modely a teoriemi, jež jsou v lepší shodě s realitou. Za nejproblematičtější v tomto ohledu lze považovat jazyk termodynamiky.

Jazyk termodynamiky

Gramatika přirozeného jazyka ovlivňuje způsob, jak o fyzikálních jevech přemýšlíme. Nad vlivem gramatiky na interpretaci termodynamických procesů se zamýšlel držitel Nobelovy ceny za fyziku P. W. Bridgeman (1943): „Neustálý popud zavádět věci, jak dokládá naše potřeba myslet na *energii jako na věc* nebo naše neschopnost hovořit o *toku* bez toho, aniž bychom mluvili o *toku něčeho*, jsou jistě podporovány přirozenou gramatickou strukturou našeho jazyka, jež mění slovesa na podstatná jména. Uvažujme např. setrvačnick na hřidelí spojené s provazem, na jehož druhém konci visí závaží. Otáčení setrvačnicku zpomaluje, provaz se navíjí na hřidel a závaží se zdvihá. Jeden aspekt tohoto systému může být popsán přímo a nezávazně slovy "setrvačnick pracuje na závaží". Ale anglický jazyk je takový, že je to gramaticky ekvivalentní slově "setrvačnick dělá práci na závaží", což lze dále pozměnit na "setrvačnick dává práci závaží" nebo "závaží přijme práci od setrvačnicku". Protože tyto formy jsou gramaticky ekvivalentní, je snadné si myslet, že jsou také fyzikálně ekvivalentní, s řadou důsledků, z nichž některé jsme zkoumali. Většina evropských jazyků má podobnou gramatickou strukturu; je zajímavé spekulovat, jaké by mohly být vlastnosti fyziky vybudované ve zcela odlišném jazykovém prostředí.“

Žákovské a studentské miskoncepce v oblasti termiky a termodynamiky jsou ve světě i u nás poměrně dobře zdokumentovány. Není však mnoho prací, které by se zabývaly příčinami vzniku těchto miskoncepčí. Měli bychom se ptát, odkud se berou a proč jsou tak rozšířené. Výzkumníci Brookes a Etkina (2015) poukázali na to, že miskoncepce mohou mít příčinu právě v nedokonalosti jazykového systému. Konkrétně zkoumali u vysokoškolských studentů vliv jazyka na způsob, jímž řeší úlohy z termodynamiky, přičemž se jim podařilo identifikovat dva hlavní problémy:

1. Způsob, jakým studenti řeší úlohy o teple, souvisí s tím, jak explicitně teplo definují. Ukázalo se, že studenti, kteří teplo definují na základě změny vnitřní energie tělesa (slovním vyjádřením vztahu $Q = m c \Delta T$), nejsou schopni správně řešit úlohy na izotermické děje.
2. Tendence studentů chápat teplo jako stavovou funkci zřejmě souvisí s tím, jaký model tepla je implicitně obsažen v jazyce.

V mnoha evropských jazycích (včetně češtiny) je v jazyce zakódována teorie kalorická (jinak označovaná jako fluidová nebo flogistonová). Představa tepla jako „něčeho“, co při tepelné výměně přechází z jednoho tělesa do jiného, je model totožný nebo velmi blízký kalorické teorii, jenž splnil svou historickou úlohu v objevování zákonů termodynamiky, ale byl opuštěn, protože nedokázal uspokojivě vysvětlit všechny tepelné jevy (Milář, 2017). V současnosti ve fyzice chápeme termín „teplo“ primárně jako označení procesní veličiny Q . V češtině se však s termínem „teplo“ chtě nechtě zachází tak, jako by měl význam stavové funkce.

Veličinu Q zavedl Clausius (1850) jako „množství tepla“ (německy „warmemenge“) v tělese. Clausius neuvedl žádný důvod, proč zvolil za označení právě písmeno „ Q “, ale je možné, že vyšel z latinského slova pro množství „quantitas“. Krátce na to anglicky píšící fyzikové (např. Rankine, Tyndall) Clausiovo označení i název veličiny převzali jako „quantity of heat Q “. V českých vysokoškolských učebnicích se název „množství tepla“ pro veličinu Q udrželo až do 80. let minulého století. Teprve v té době totiž došlo ke změně pojetí veličiny Q ze stavové veličiny (ztotožněné s „tepelnou energií“ v tělese), na veličinu procesní. Změně paradigmatu v 80. letech předcházela asi dvacetiletá diskuze odborné komunity v československých i zahraničních didaktických časopisech. Název „množství tepla“ byl přijatelný pro stavovou veličinu. Pro procesní veličinu se zjevně nehodí (Mechlová, 1990, s. 130), proto byl opuštěn a nahrazen slovem „teplo“. Odborná skupina pro terminologii Fyzikální pedagogické sekce Jednoty československých matematiků a fyziků zpracovala Slovník školské fyziky, kde je jednoznačně deklarováno, že „teplo Q “ označuje veličinu nestavovou, a že termín „teplo“ nemá být používán v žádném jiném významu (JČSMF, 1988, s. 94). S odstupem času můžeme konstatovat, že požadavek, aby termín „teplo“ byl ve fyzice nadále používán výhradně pro veličinu Q , se neprosadil. Nejen v běžné řeči, ale i ve fyzikálních učebnicích pro ZŠ, SŠ i VŠ se „teplo“ i nadále používá v mnoha různých významech.

Na základě analýzy jazyka učebnic jsem zjistil, že termín „teplo“ je používán nejméně v osmi významech:

1. vjem (pocit tepla)
2. teplota (opak chladu)
3. tepelný pohyb částic
4. tepelná energie (stavová veličina; část vnitřní energie tělesa)
5. teplo Q (procesní veličina)
6. tepelná výměna (děj)
7. tepelný jev (např. „nauka o teple“, „kinetická teorie tepla“)
8. tepelné záření (nebo IR záření)

Kromě koncepční změny v pojetí veličiny Q postupně došlo také k několika dílčím terminologickým změnám: Přestala se používat dříve běžná sousloví „množství tepla“, „tepelná energie“ a „princip zachování tepla“, dále „specifické teplo“ bylo nahrazeno „měrnou tepelnou kapacitou“ a „tepelná roztažnost“ byla nahrazena „teplotní

roztažností“. Tyto změny jsou vesměs pozitivní. Skutečnost, že teplo Q ve smyslu procesní veličiny nelze *přenášet, vést, přijímat* či *odevzdávat*, však zůstala bez povšimnutí.

Explicitní identifikování veličiny Q jako veličiny procesní bylo jednoznačně správným krokem. Nahrazení názvu „množství tepla“ za „teplo“ se však z dnešního pohledu jako správná volba jevit nemusí. Dříve se dalo spolehnout, že sousloví „množství tepla“ označuje výhradně veličinu Q (ať už ve stavovém nebo procesním pojetí). Ačkoliv je název „množství tepla“ pro procesní veličinu nevhodný, bylo by snad menším zlem jej ponechat, protože akceptováním názvu „teplo“ se vágnost a nelogičnost vyjadřování v termodynamice prohloubila. Za název veličiny Q bylo lépe zvolit slovo zcela nové, nezátžené jiným významem. Změna názvu však sama o sobě nestačí. Pojetí veličiny Q jako veličiny procesní vyžadovalo zásadní změnu ve způsobu vyjadřování, k čemuž dosud nedošlo. Např. slovní spojení „šíření tepla“ má smysl jen tehdy, jestliže „teplem“ rozumíme teplotu, tepelný pohyb, nebo stavovou veličinu. Procesní veličina nemá smysl pro určitý čas a místo, nelze ji tedy šířit, přenášet, vyměňovat, vést apod. Proto ani ve větě „*teplo přechází samovolně z tělesa teplejšího na těleso chladnější*“ nemůže mít slovo „teplo“ význam procesní veličiny. Tato věta pak zcela ztrácí smysl, nahradíme-li v ní slovo „teplo“ explicitnějším výrazem „teplo Q “. Stejně nesmyslné jsou slovní spojení „přenos tepla Q “, „šíření tepla Q “, „těleso přijalo teplo Q “ apod. Zavedením termínu „teplo“ (resp. „teplo Q “) ve smyslu procesní veličiny, aniž by současně byla stanovena pravidla pro jeho použití ve větách, se jazyk termodynamiky dostal do vážných logických problémů. Např. je na místě se ptát: „*Jestliže těleso přijalo teplo, jak to, že ho nemá?*“

Autoři fyzikálních učebnic běžně zavádějí termín „teplo“ asi takto: „*Předá-li teplejší těleso chladnějšímu tělesu tepelnou výměnou energii, říkáme, že chladnější těleso přijalo od teplejšího tělesa teplo.*“ Termíny „energie“ a „teplo“ jsou tak zavedeny jako synonyma, a jako se synonymy se s nimi skutečně nakládá. Není však lhostejné, zda se mluví o veličině stavové nebo procesní. V tomto způsobu zavedení termínu „teplo“ je zřejmě klíčové slovo „říkáme“. Proč to ale říkáme? Důvod je zřejmě historický: takto se ustálilo vyjadřování, dokud ještě termín „teplo“ neměl význam procesní veličiny. Druhý důvod je praktický: sousloví „přenos tepla“ je kratší než např. „tepelný přenos energie“. Nevýhodou však je, že tento způsob vyjadřování není logicky konzistentní a stává se tudíž zdrojem miskoncepcí.

Zaměňování termínů pro stavové a procesní veličiny vede k logickým rozporům. Ukážeme si to na příkladech: Běžně mluvíme o *přenosu (výměně) tepla*, ale současně tvrdíme, že *teplo je přenesená (vyměněná) energie*. Znamená to, že se *přenáší přenesená energie*, resp. že se *vyměňuje vyměněná energie*? Obdobně mluvíme o *spotřebované práci*, ale také tvrdíme, že *práce je spotřebovaná energie*. Znamená to, že konáním práce se *spotřebovává spotřebovaná energie*? Podobné příklady v anglickém jazyce uvedl Slisko (1997) a okomentoval je velmi trefně takto: „Věda má být koherentním obrazem světa, proto se očekává, že její terminologie bude mít vnitřně konzistentní logickou strukturu. Pokud při použití tak jednoduché logiky naše terminologie vede k matoucím pojmovým konstrukcím, není fér požadovat od studentů, aby logicky mysleli a chápali to, co je v této terminologii napsáno nebo řečeno.“

Nedůslednost a nesystematičnost ve slovním vyjadřování může být významnou překážkou ve studiu termodynamiky. Pečlivý student při četbě učebnice může mít pocit, že ačkoliv se opravdu snaží porozumět, něco mu stále uniká. Učitelé zase mohou pociťovat rozpaky či nejistotu, zda se při výuce vyjadřují „správně“. Termodynamika je

krásná, ale obtížná oblast fyziky. Je žádoucí, aby přirozený jazyk, jímž termodynamické děje popisujeme a vysvětlujeme, byl co nejsrozumitelnější.

Inspirace britským kurikulem

V prestižních přírodovědně-didaktických časopisech (Physics Education, The Physics Teacher, atd.) od počátku 70. let minulého století probíhala diskuze k slovnímu vyjadřování i ke koncepčním otázkám výuky termodynamiky. Příspěvatelé si často vyměňovali názory na to, zda je či není vhodné na nižších stupních vzdělávání zavádět energii jako substanci a zda je lepší hovořit o *přeměně forem energie* nebo o *přenosu energie*. Tato mezinárodní diskuze naštěstí nevyzněla na prázdno. Konkrétních výsledků bylo dosaženo zejména ve Velké Británii. Britský Institute of Physics zařadil tvorbu nového kurikula (www.stem.org.uk/rxtofof), založeného na novém způsobu vyjadřování o energii. Je zde znatelný odklon od vysvětlování termodynamických dějů pomocí přeměn forem energie, ale základním kamenem se stal koncept přenosu energie. Přijaté změny nebyly provedeny ad hoc, ale jsou založeny na dlouhodobých výzkumech (Boohan, 2014). Za průkopníka koncepčních a terminologických změn výuky o energii je považován prof. Robin Millar, jehož články lze doporučit jako úvod do dané problematiky – např: (Millar, 2005).

Domnívám se, že je na čase přenést tuto diskuzi i do prostředí České republiky. Vyjadřování o energii se u nás zabývá prof. Bohumil Vybíral, který navrhl nahradit termín „energie“ ve smyslu stavové veličiny termínem „energita“ (Vybíral, 2016). Domnívám se, že takové přímočaré opatření by vůbec nic nevyřešilo. Slovní vyjadřování v termodynamice je velmi komplexní problém, který vyžaduje komplexní řešení založené na důkladné analýze a didaktických výzkumech. Přesto se pokusím určité řešení navrhnout.

Návrh řešení

V tomto článku jsem popsal jen vybrané problémy slovního vyjadřování v termodynamice. Můj návrh řešení se proto týká primárně používání či spíše nepoužívání termínu „teplo“. Návrh by měl být v souladu s nosným konceptem přenosu energie, který podle mého názoru je vhodné od britských kolegů převzít nebo se jím alespoň nechat inspirovat. Ať už se po britském vzoru pustíme do zásadní revize jazyka termodynamiky či nikoli, doporučuji **přejít od vyjadřování o přenosu tepla k přenosu energie**, což by řešilo mnohé problémy s logickou konzistencí jazyka. Jde vlastně jen o malou terminologickou změnu, která by však mohla být prvním krokem k tomu, abychom učinili z *přenosu energie* centrální téma.

K ustálenému sousloví „tepelná výměna“ se běžně používá jako synonymum sousloví „výměna tepla“. Jenže to, co se při tepelné výměně přenáší, není teplo (procesní veličina), ale energie! Ani „výměna“ se příliš nehodí pro jednosměrný přenos, protože toto slovo obvykle chápeme jako „něco za něco“. Sousloví „tepelná výměna“ se nemusíme nutně vzdávat, ale měli bychom vždy důsledně uvádět, co si vlastně tělesa vyměňují. Explicitnější než „tepelná výměna“ je proto „tepelná výměna *energie*“, ale ještě vhodnější je sousloví „tepelný *přenos energie*“. Slovo „tepelný“ zde jednoznačně odlišuje specifický děj od jiných dvou způsobů přenosu energie, které bychom mohli nazvat: „mechanický *přenos energie*“ a „elektrický *přenos energie*“ (v současné terminologii „mechanická práce“ a „elektrická práce“).

Dále navrhuji jako opatření proti vágnosti vyjadřování v termodynamice výrazně **omezit používání termínu „teplo“**. Toho lze dosáhnout trojím způsobem:

1. **Přejmenovat procesní veličinu Q** – Jak jsem argumentoval výše, termín „teplo“ je až příliš mnohoznačný. Dosud mě nenapadl žádný vhodný název, ale mělo by jít o zcela nové slovo uměle vytvořené nebo lépe slovo převzaté z latiny či řečtiny, jež v češtině dosud nebylo používáno. Pracovně lze používat alespoň prosté označení „veličina Q “.
2. **Důsledným rozlišováním různých významů** – Tzn. nepoužívat slovo „teplo“ pro *tepelný pohyb částic* (lépe by bylo říkat „teplotní pohyb částic“), *vnitřní energii* nebo její část, *tepelnou výměnu*, *tepelný jev*, *tepelné záření* nebo *infračervené záření* (pozn.: tepelné a IR záření snad všechny naše ZŠ učebnice ztotožňují, což není opodstatněné). Jde o jednoduché pravidlo: V první řadě je potřeba různé významy slova „teplo“ znát a pak důsledně používat jejich jednoznačná označení. Např.: Mám-li na mysli infračervené záření, prostě řeknu „infračervené záření“, nikoliv „teplo“. Termika je nauka o tepelných jevech, nikoliv o teple, apod. Původní významy slova „teplo“ jsou *vjem* („Je mi teplo.“) a poněkud vágní označení *teploty* („Je tu teplo.“) Takto se „teplo“ používá po staletí a těžko na tom něco změníme. Tyto významy jako jediné doporučuji pro slovo „teplo“ ponechat.
3. **Změnou slovosledu** – Dvouslovné výrazy (viz níže) jsou dnes používány jako synonyma, ale můžeme se naučit upřednostňovat přídavné jméno „tepelný“ před podstatným jménem „teplo“:
 - tepelná výměna = ~~výměna~~ **tepla**
 - tepelný výměník = ~~výměník~~ **tepla**
 - tepelný přenos = ~~přenos~~ **tepla**
 - tepelný tok = ~~tok~~ **tepla**
 - tepelný vodič = ~~vodič~~ **tepla**
 - tepelné ztráty = ~~ztráty~~ **tepla**

Závěr

Přirozený jazyk má být branou k poznání. Jazyk termodynamiky má však vážné problémy s vnitřní logickou konzistencí a vágností základních termínů. Dokonce i texty učebnic jsou proto jen obtížně srozumitelné, což pro mnohé žáky a studenty může být nepřekonatelnou překážkou. V příspěvku jsem se pokusil odhalit příčiny tohoto stavu a nastínit možná řešení.

Literatura

1. BOOHAN, Richard. Making Sense of Energy. *School Science Review*, 2014, 96.354: 33-43.
2. BRIDGMAN, P. W. The Nature of Thermodynamics. *Philosophy of Science*. Vol. 9, no. 3, 1942. s. 281–281. Dostupné z: tinyurl.com/y5ld2t92
3. BROOKES, David T.; ETKINA, Eugenia. The importance of language in students' reasoning about heat in thermodynamic processes. *International Journal of Science Education*, 2015.
4. CLAUSIUS, Rudolf. Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. *Annalen der Physik*, 1850, 155.3: 368-397.
5. JČSMF. *Slovník školské fyziky*. Praha: SPN, 1988.
6. MECHLOVÁ, Erika. *Fyzikální pojmy*. Ostrava: Pedagogická fakulta v Ostravě, 1990. ISSN 0371-2001.

7. MILÉŘ, Tomáš. Miskoncepce ve fyzice vlivem historického vývoje fyzikálních pojmů a terminologie. In: *11. mezinárodní vědecká konference – Didaktická konference 2017* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2017. s. 94–101 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: tinyurl.com/y65vzhzz
8. MILLAR, Robert Hamilton. *Teaching about energy*. University of York, 2005. Dostupné z: tinyurl.com/y59hnt19
9. SLISKO, Josip; DYKSTRA J.R., Dewey I.. The role of scientific terminology in research and teaching: Is something important missing? *The Official Journal of Research in Science Teaching*. Vol. 34, no. 6, 1997. s. 655–660. Dostupné z: tinyurl.com/y5t3kz8u
10. VYBÍRAL, Bohumil. Zamyšlení nad pojmem energie. *Matematika – fyzika – informatika* [online]. Vol. 25, no. 3, 2016. s. 189–202 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: www.mfi.upol.cz/index.php/mfi/article/view/271.

Kontaktní adresa

Mgr. Tomáš Miléř, Ph.D.
Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání, PdF MU
Poříčí 7, 603 00 Brno
Telefon: +420 724 161 236
E-mail: tomas.miler@mail.muni.cz