

Úlohy z termiky pro fyzikální olympioniky (2)

PAVEL KABRHEL – IVO VOLF

ÚK FO, Univerzita Hradec Králové

Na jedné straně se často hovoří o tom, že výuka fyziky je příliš teoretická, málo navazující na reálný život našich žáků i jejich rodičů a má zanedbatelný vztah k životnímu stylu a dalším předmětům přírodovědného a technického zaměření. Problematika zdrojů tepla, o níž se v dřívějších učebnicích autoři vždycky zmiňovali, jakoby z dnešních učebních programů vypadla – na základním stupni vzdělání proto, že je údajně náročná na matematické přístupy, a do učiva středoškolského se časově a rozsahem nevejde. Přesto se domníváme, že žáci právě v tomto tematickém celku se dostanou do reálných situací, které je obklopují, a tím se současně těsně propojují jejich teoretické vědomosti a praktické aplikace.

Jako zdroje tepla slouží jednak produkty přírodní aktivity – sluneční záření, voda z gejzírů, sopečná činnost, paliva aj, jednak výsledky lidské činnosti – rychlovarná konvice, boiler, vařič, tělesa ústředního topení aj. Paliva, jako zdroj tepla, mohou být pevná (uhlí, dřevo, brikety, rašelina), kapalná (petrolej, benzín, nafta, topné oleje) i plynná (metan, vodík, zemní plyn). U paliv je důležitou charakteristikou spalné teplo nebo výhřevnost H . Pod pojmem výhřevnost zvažujeme teplo, které je zmenšeno o hodnotu na odstranění vodní páry z paliva. Různá paliva se tedy liší především výhřevností: např. výhřevnost hnědého uhlí je 11 až 16 MJ/kg, benzínu 46 MJ/kg (asi 33 MJ/l). Protože potřebujeme mít srovnávací pohled na pevná paliva různého původu, zavádíme někdy tzv. měrné palivo, které má výhřevnost asi 30 kJ/kg. Horší palivo má menší výhřevnost, a tedy tepelné zařízení bude mít větší spotřebu tohoto paliva. Dále je třeba znát tepelnou účinnost zařízení, v němž se palivo spaluje (například u elektráren budeme počítat s celkovou účinností 36 % až 45 %).

Problém 1: Jaká je spotřeba měrného paliva?

Různé tepelné elektrárny mohou být porovnávány podle hmotnosti měrného paliva, které by bylo nutno spotřebovat při zajištění 1 kWh elektrické práce. Určete spotřebu měrného paliva.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Výhřevnost měrného paliva je $H = 30 \text{ MJ/kg}$, dále zvolíme tepelnou účinnost na dolní hranici uvedeného intervalu, tj. 36 %. Ke stanovení hmotnosti měrného paliva nutného k získání 1 kWh elektrické práce použijeme rovnice pro určení tepla

$$Q = mH\eta.$$

Řešení. Z rovnosti $Q = mH\eta = 1,0 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ stanovíme hmotnost spotřebovaného paliva, $m = 333 \text{ g} = 0,333 \text{ kg}$. Je jasné, že při použití horšího paliva, např. hnědého uhlí o výhřevnosti 12 MJ/kg nám při stejné účinnosti vyjde spotřeba asi 830 g/kWh = 0,830 kg/kWh. Naopak s lepší technologií spalování a lepším ohřevem vody můžeme zvýšit účinnost na 45 % a při užití hnědého uhlí nám vychází hodnota asi 0,670 kg/kWh.

Problém 2: Denní a roční spotřeba uhlí v české tepelné elektrárně.

Instalovaný výkon tepelná elektrárna v Chvaleticích je 800 MW a využívá méně kvalitní uhlí o výhřevnosti 12 MJ/kg. Kdyby elektrárna „běžela na plný výkon“ po celý den, stanovte jednodenní, týdenní a roční spotřebu uhlí, za předpokladu že celková účinnost elektrárny je 36 %.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Nejprve si všimneme podmíněného tvrzení „kdyby elektrárna běžela na plný výkon“. Poté určíme dobu činnosti elektrárny za 1 rok, tedy $t = 365,25 \cdot 24 \text{ h} = 8\,766 \text{ h}$. Odtud stanovíme celkovou práci, kterou elektrárna poskytla za rok, a potom stanovíme hledanou spotřebu uhlí o dané výhřevnosti. Jako reálnou účinnost vezmeme 36 %. Stejně provedeme výpočet pro jeden den a jeden týden.

Řešení. Při spálení 1,0 kg uhlí o výhřevnosti 12 MJ/kg získáme do elektrické sítě práci hodnoty 4,32 MJ = 1,2 kWh. Za 1 den dodá chvaletická elektrárna práci $800 \text{ MJ} \cdot 24 \text{ h} = 19\,200 \text{ MWh}$. Spotřebu uhlí stanovíme

$$m = \frac{19\,200 \cdot 10^3 \text{ kWh}}{1,2 \text{ kWh}} \cdot 1 \text{ kg} = 16 \cdot 10^6 \text{ kg} = 16\,000 \text{ t}.$$

Při nákladu 40 t uhlí ve vagónu to představuje spotřebu 400 vagónů uhlí denně, týdně 2 800 vagónů a 146 100 vagónů za rok, proto se také přistoupilo k lodní přepravě uhlí do chvaletické elektrárny. Plyne z toho také, že je lepší stavět tepelné elektrárny v blízkosti povrchových dolů, kde se těží hnědé uhlí, protože transport elektřiny je oproti transportu uhlí snazší, ekologičtější a také levnější.

Problém 3: Roční spotřeba tepelné elektrárny.

Stanovte denní, týdenní a roční spotřebu hnědého uhlí polské tepelné elektrárny Belchatów, jejíž instalovaný výkon je 5 354 MW, včetně nového energetického bloku o výkonu 858 MW, který byl uveden do provozu v roce 2011. Charakteristický pohled na elektrárnu vidíme na obr. 1.



Obr. 1: Tepelná elektrárna Belchatów, jeden z největších producentů oxidu uhličitého ve střední Evropě

Poznámky k vytvoření modelové situace. Tepelná elektrárna je postavena přímo v blízkosti hnědohelného dolu, proto pro výpočty zvolíme stejné parametry (výhřevnost paliva, celková účinnost) jako v minulé úloze. Když vyhledáme informace na Wikipedii, získáme další údaje – roční výroba elektřiny představuje asi 27,5 TWh a do atmosféry chrlí elektrárna 1,09 kg oxidu uhličitého ovšem při výrobě 1 kWh.

Řešení. Denní výroba elektřiny je $5\,354 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h} = 128\,496 \text{ MWh}$, což představuje spotřebu přibližně 107 000 tun hnědého uhlí denně neboli asi 2 680 vagonů. Současně se však do ovzduší denně dostane asi 140 000 tun oxidu uhličitého. Za týden to představuje asi 18 740 vagonů uhlí a produkci přes 980 000 tun oxidu uhličitého. Roční spotřeba uhlí potom představuje hodnotu přibližně 980 000 vagonů hnědého uhlí, ale také produkci více než 51,1 miliónu tun oxidu uhličitého. Podívejme se však na realitu – skutečná roční produkce elektřiny je $27,5 \text{ TWh} = t \cdot 5\,354 \text{ MW}$, odtud doba činnosti tepelné elektrárny „na plný výkon“ je pouze 5 136 h ročně, denně to je asi 14 h, tedy 58,6 %. Uvedené vypočtené hodnoty musíme tedy násobit

přibližně 0,6, takže dostaneme pro roční údaje spotřebu asi 588 000 vagónů uhlí a přes 30,6 miliónů tun oxidu uhličitého.

Problém 4: Kolik pevného paliva ušetří denně (ročně) jaderná elektrárna?

Jaderná elektrárna získává teplo ochlazováním reaktorů, které se pak využívá k ohřevu vody a ke vzniku přehřáté páry. Jaderná elektrárna Temelín má instalovaný výkon $2 \times 1\,000$ MW a koeficient využití asi 79 %, jaderná elektrárna Dukovany má instalovaný výkon 1 877 MW a koeficient využití asi 85 %. Pomocí spotřebovaného tzv. měrného paliva stanovte spotřebu tepelné elektrárny, která by nahradila obě jaderné elektrárny, a vyjádřete výsledek i spotřebou hnědého uhlí o výhřevnosti 12 MJ/kg.



Obr. 2: Jaderná elektrárna Temelín

Poznámky k vytvoření modelové situace. Tento problém můžeme řešit pomocí kombinace úloh předcházejících. Koeficient využití nám stanoví, kolik elektrické práce lze získat během roční činnosti elektráren. Určíme také, kolik oxidu uhličitého by se při stejné produkci do ovzduší dostalo z tepelných elektráren o stejném výkonu. Podle informací na internetu můžeme zjistit, že v elektrárně Dukovany se vyrobilo v roce 2011 celkem 14 369 GWh, v Temelíně 13 914 GWh.

Řešení. Ověříme nejprve reálnost koeficientu využití obou elektráren. Kdyby elektrárny měly aktivní produkci po dobu plného roku, tedy 365,25 dne po 24 h, tj. 8 766 h, potom při výkonu 2 000 MW v Temelíně by museli produkovat celkem 17 532 GWh, koeficient využití je $13914/17532 \doteq 0,79$, pro Dukovany vycházejí hodnoty 16 454 GWh, koeficient přibližně 0,87, což je poněkud více než uváděná hodnota. Celková produkce elektriny v obou

dvou jaderných elektrárnách představuje asi 28 280 GWh \doteq 28,3 TWh. Na základě řešení problému 1 jsme zjistili, že na produkci 1 kWh je třeba 0,333 kg měrného paliva. Protože celková roční produkce obou jaderných elektráren je 28,3 TWh = 28,3 · 10⁹ kWh, byla by spotřeba měrného paliva v tepelné elektrárně asi 9,4 · 10⁹ kg, neboli 9,4 milionů tun. Pokud jde o produkci oxidu uhličitého, v tepelných elektrárnách připadá na 1 kWh asi 1,09 kg CO₂. Produkce 28,3 TWh v jaderných elektrárnách představuje skutečnost, že se do ovzduší na rozdíl od tepelných elektráren nedostane za rok skoro 31 milionů tun tohoto tzv. skleníkového plynu, z něhož mají ekologové stále větší hrůzu.

Problém 5: Spotřeba paliva u osobního automobilu.

Spotřeba paliva se udává pomocí objemu benzínu (nafty), který by motor vozidla spotřeboval při ujetí vzdálenosti 100 km, tedy například 8 litrů/100 km. Zjistěte, jak se mění spotřeba paliva u osobního automobilu, který jede po dálnici stálou rychlostí mezi 90 km/h a 130 km/h.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Pohyb osobního automobilu jako reálného silničního vozidla je velmi složitý, a proto musíme tento problém řešit v modelové situaci. Budeme předpokládat, že automobil pojede po určité dobu stálou rychlostí v , při čemž na něj působí stálá tahová síla, překonávající síly odporové (odpor vzduchu a valivý odpor). Po spotřebě objemu V paliva získáme teplo $Q = VH$, kde H je výhřevnost udávaná v MJ/l. Toto teplo je využito k mechanické práci pouze částečně (závisí na účinnosti η) a automobil vykoná práci $W = Fs$, kde F je celková síla nutná k udržení rovnoměrného pohybu. Příslušné hodnoty najdeme ve fyzikálně-technických tabulkách, případně na internetu.

Řešení. Najdeme nejprve potřebné hodnoty: $H = 46$ MJ/kg = 34 MJ/l, velikost síly valivého odporu je $F = \xi mg/r$, ξ pro pohyb pryžové pneumatiky po asfaltu je 0,0016 m, hmotnost automobilu vezmeme 1 200 kg, velikost tíhového zrychlení 9,80 m/s², poloměr pneumatiky asi 0,30 m. Odtud velikost síly valivého odporu je přibližně 63 N a nezávisí dle výše uvedeného vztahu na rychlosti pohybu vozidla (což bude zase jeden z předpokladů v našem modelu). Síla spojená s překonáváním odporu prostředí se stanoví $F = \frac{1}{2}CS\rho v^2$, kde tvarový součinitel C zvolíme podle tabulárních hodnot 0,36, obsah příčného kolmého čelního řezu S určíme podle lineárních rozměrů vozidla (šířka 1,6 m, výška 1,5 m) asi 2,4 m², hustotu vzduchu $\rho = 1,25$ kg/m³, takže vztah pro velikost odporové síly napíšeme $F = kv^2$, kde $k = \frac{1}{2}CS\rho$, $k = 0,54$ N · s²/m². Velikost odporové síly bude

potom závislá jen na rychlosti pohybu vozidla oproti nehybnému vzduchu, neboli závisející na vzájemné rychlosti pohybu vozidla a proudění vzduchu ve směru či proti směru pohybu automobilu. Jednotlivé rychlosti zvolíme 25 m/s a 36 m/s. Síla, jíž působí vzduch na automobil, je potom rovna 338 N a 700 N, síly nutné k udržení pohybu vozidla stálou rychlostí jsou přibližně 400 N a 763 N. Mechanická práce získaná motorem při účinnosti 22 % na základě spotřeby objemu V paliva je $W = \eta VH$, ale současně $W = Fs$, kde za dráhu, po níž by stála síla působila, zvolíme 100 km. Vykonaná mechanická práce bude v krajních případech rovna 40 MJ a 76,3 MJ. Musíme zajistit teplo 182 MJ, 347 MJ, čemuž odpovídá spotřeba 5,4 litru/100 km, při větší rychlosti 10,2 litru/100 km. Zatímco rychlost se zvýšila 1,44 krát (a doba nutná k dosažení určité vzdálenosti se 1,44 krát snížila), spotřeba paliva se zvýšila 1,9 krát. Lze říci, že rychlost se zvýšila o necelou polovinu (a doba jízdy se zkrátila asi o třetinu), spotřeba se však zvýšila na dvojnásobek. Majitel vozidla pak musí svou volbu přizpůsobit okolnostem, zda mu zvýšené náklady stojí za to.

Problém 6: Jak lze snížit spotřebu paliva při jízdě automobilu?

Majitel vozidla se snaží zmenšit ekonomické nároky na jeho provoz. Vymezte podmínky a stanovte, jak se mu to může podařit. Prostudujte si řešení Problému 5 a uvažte, které hodnoty se dají jednoduchým způsobem snížit.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Snížit hodnotu síly, překonávající valivý odpor, je možno volbou jiné pneumatiky, případně jiné vozovky (obojí je málo reálné), dále zvětšením průměru pneumatiky (což naruší design vozidla a prodraží výrobu) a nakonec zmenšením hmotnosti vozidla, což má zase určitá omezení, spojená s jízdními vlastnostmi. Nebudeme se proto o snížení této síly snažit. Ponecháme-li obě krajní rychlosti stejné, můžeme snižovat jen hodnotu $k = \frac{1}{2}CS\rho$, tedy zmenšovat obsah příčného řezu (zúžit vozidlo či zmenšit jeho výšku) nebo snížit hodnotu odporového součinitele – jsou již známa vozidla, u kterých je $C = 0,29$, tedy o 20 % nižší, což vede ke snížení odporové síly. Další cestou je zvýšení mechanické i tepelné účinnosti vozidla z 22 % na 25 %, tedy zvýšení tahové síly a užitečné mechanické práce, která se využije pro pohon vozidla.

Řešení. Ponecháme tedy sílu valivého odporu na hodnotě 63 N, odporová síla způsobená vzduchem při pohybu vozidla se sníží o 20 %, tedy na hodnoty 270 N, 560 N, celková síla nutná pro udržení pohybu vozidla bude 333 N a 623 N, práce při jízdě po dráze 100 km nám vychází 33,3 MJ

(snížení na 0,83 původní hodnoty), 62,3 MJ (snížení na 0,82 původní hodnoty). Zvýšení účinnosti motoru vozidla z 22 % na 25 % znamená snížení spotřeby na hodnotu 0,88 původní hodnoty. Budeme-li počítat s průměrnou hodnotou 82,5 %, vyjde nám 72,6 %, a tedy celkové snížení spotřeby paliva vychází pro nižší hodnotu rychlosti asi 3,9 litru na 100 km, pro větší hodnotu rychlosti 7,4 litru/100 km.

Problém 7: Proč je v České republice tolik tepelných elektráren?

V České republice se vyskytují elektrárny různého druhu – tepelné, vodní, větrné, jaderné atd., které mají různý vliv na znečišťování životního prostředí. Proč nevystačíme třeba s vodními elektrárnami? Odhadněte, jak ekologicky nevýhodná je například nepříliš výkonná elektrárna v Opatovicích nad Labem, jejíž výkon na výstupu je 363 MW a ročně vyrobí 2 116 GWh, poté určete parametry hydroelektrárny s objemovým tokem 50 m³/s při účinnosti 80 %, která by ji mohla nahradit.



Obr. 3: Tepelná elektrárna Opatovice nad Labem

Poznámky k vytvoření modelové situace. Nejprve stanovíme střední dobu, po kterou vyrábí elektrárna ročně na plný výkon:

$$\frac{2\,116\,000 \text{ MWh}}{363 \text{ MW}} = 5\,830 \text{ h,}$$

tedy využitelnost elektrárny na plný výkon je 66,5 %. Protože má elektrárna Opatovice oproti Chvaleticím instalovaný výkon asi poloviční, bude

asi také spotřeba uhlí i zatížení ovzduší poloviční. Jestliže elektrická práce této elektrárny představuje 2 116 GWh, potom elektrárna dosahuje středního dlouhodobého výkonu jen 241 MW.

Řešení. Jestliže elektrická práce této elektrárny představuje 2 116 GWh, pak tato elektrárna dosahuje středního dlouhodobého výkonu jen 241 MW. Při objemovém toku $50 \text{ m}^3/\text{s}$ je hmotnostní tok $50\,000 \text{ kg/s}$, poté výkon hydroelektrárny o výškovém rozdílu jen 1 m bude

$$P = 50\,000 \cdot 9,8 \cdot 0,8 \text{ W},$$

tedy pouze 392 kW. K dosažení příslušného výkonu by musela být postavena přehradní hráz o výšce $h = 615 \text{ m}$. Takto vysokých přehradních hrází nelze v horní části našich řek dosáhnout.

Literatura

- [1] Výhřevnost. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: <http://http://cs.wikipedia.org/wiki/Výhřevnost>
- [2] Měrné palivo. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Měrné_palivo
- [3] Elektrárna Chvaletice. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrárna_Chvaletice
- [4] Elektrownia Bełchatów. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_Bełchatów
- [5] Jaderná elektrárna Temelín. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jaderná_elektrárna_Temelín
- [6] Jaderná elektrárna Dukovany. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jaderná_elektrárna_Dukovany
- [7] Elektrárna Opatovice nad Labem. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrárna_Opatovice_nad_Labem

Zdroje vyobrazení

- Obr. 1: Belchatow power station by Petr Štefek
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20051029_Belchatow_power_station.jpg
- Obr. 2: Jaderná elektrárna Temelín by Japo
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JETE2.JPG>
- Obr. 3: Tepelná elektrárna Opatovice nad Labem by Vojtech.dostal
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opatovice_nad_Labem_power_plant_Czech_republic.jpg?uselang=cs