

Praktická energie

Následující text je příspěvkem autora do diskuse o možné podobě nových učebnic fyziky, která se vede na Slovensku. Bezprostředně navazuje na učivo fyziky ve 2. ročníku gymnázia, resp. na jeho podobu v připravovaných textech. [Jiří Dolejší, ÚČJF MFF UK Praha](#)

V předcházejícím textu jste se seznámili s historií ovládnutí páry a tedy s historií ovládnutí mohutného nástroje, který k síle lidí a zvířat přidal sílu strojů. Stalo se to už dávno, takže je nám to samozřejmé. Dnes se prakticky nepotkáme s parním strojem, zato na každém kroku potkáváme různé motory a v pozadí výroby elektřiny figurují parní turbíny. Pojďme se z pohledu fyziky podívat na různé aspekty energie a různých motorů ve světě kolem nás. Tento svět se docela rychle mění a tak vás vyzveme, abyste sami zjistili mnohé konkrétní údaje, například momentální ceny různých energií.

O většině témat se dnes můžete něco dozvědět na webu. Nejefektivnější a současně nejzajímavější obvykle bývá brouzdání po webu, hledání a nacházení nečekaných souvislostí. K tomu vám někdy pomůžeme návrhem klíčových slov, které můžete zadávat do hledače, jako např. www.google.com, někdy vám poradíme zajímavou adresu.

Pojďme nejdříve načrtnout otázky, kterými se budeme zabývat:

- Jaká je energetická bilance člověka, jak a kolik energie získává, jak a kolik jí ztrácí, kolik za energii pro sebe platí?
- Energie ohně. Jak hospodaří s energií běžné auto?
- Kolik energie a v jaké podobě spotřebováváte v běžném životě? Kde se bere a kolik stojí?
- Jak může pokračovat současný trend spotřeby energie?
- Jaké existují alternativní zdroje energie a jak jsou perspektivní?

Odhady, které budeme činit, budou využívat poznatky, které jste potkali v základním textu. Často se stane, že pomocí odhadů dostaneme nějaká orientační čísla, ale budeme vědět, že je to je značně neúplný obrázek situace a že je potřeba započítat další efekty, zpřesnit popis atd. To je standardní postup fyziků.

Energetická bilance člověka

Člověk vydává spoustu energie na to, aby si udržel tělesnou teplotu kolem 37°C, na kterou jsou naladěny pochody v jeho těle. Leží-li v klidu v posteli, pak potřebuje denně minimálně 6 až 7,5 MJ, mimo jiné na pohon srdce a dýchání (basal metabolic rate). Při nevelké aktivitě a lehké práci se obvykle udává denní energetická spotřeba okolo 10 MJ (ve starších jednotkách 2500 kcal), která při těžké práci resp. sportovních výkonech stoupne až na 20 MJ. Ze zkušenosti však asi víte, že naše těla potřebující trénink na to, aby byla schopna podávat větší výkon a zpracovat odpovídající množství stravy – netrénovanému jedinci přejezení k vyššímu výkonu nepřispěje.

- Přepočítejte uvedené hodnoty denní spotřeby na kWh a spočítejte odpovídající výkon člověka.

	<i>Energetická potřeba</i>		<i>Výkon</i>
<i>minimum</i>	<i>6–7,5 MJ</i>	<i>1,7–2,1 kWh</i>	<i>69–87 W</i>
<i>lehká aktivita</i>	<i>10 MJ</i>	<i>2,8 kWh</i>	<i>120 W</i>
<i>těžká práce</i>	<i>20 MJ</i>	<i>5,6 kWh</i>	<i>240 W</i>

- Zjistěte energetický obsah jednotlivých potravin (na některých obalech to najdete napsáno) a přepočítejte denní energetickou spotřebu 10 MJ na denní spotřebu těchto potravin (kdybyste nejedli nic jiného) a odpovídající cenu.

<i>Potravina</i>	<i>Energetický obsah</i>	<i>Množství na pokrytí denní spotřeby 10 MJ</i>	<i>Cena</i>
<i>Coca Cola</i>	<i>180 kJ /100 g(ml)</i>	<i>5,6 l</i>	
<i>Pivo</i>	<i>1,85 MJ /l</i>	<i>5,4 l</i>	

Chléb	1,0 MJ /100 g	1 kg	
Tatranky	2,17 MJ /100 g	0,46 kg / 9 ks	
Slanina	3,4 MJ /100 g	0,3 kg	
...			

- Odhadněte tepelný výkon třídy se třiceti studenty a přepočtěte jej na spotřebu hnědého uhlí o výhřevnosti 10 MJ/kg.
30×120 W = 3,6 kW, energie vyprodukovaná třídou za hodinu je 3,6 kWh = 13 MJ, což odpovídá spotřebě uhlí 1,3 kg/hod.
- Odhadněte, jaký výkon podáváte, když stoupáte s batohem do hor, kolik hodin to vydržíte a jaká je tedy celková spotřeba energie na tuto jasně viditelnou práci.
Například i s batohem máte 80 kg, jste schopni 5 hodin stoupat do výšky rychlostí 500 m/hod ... výkon je $F \times v = 80 \times 10 \times 500 / 3600 \text{ W} = 110 \text{ W}$, za 5 hodin 0,55 kWh = 2 MJ. Je zřejmé, že takto vypočtený výkon, resp. energie je spodním odhadem skutečně vynaložené energie, i při chůzi po rovině spotřebováváme značně více energie než v klidu, při práci uvolňujeme značně více tepla, než v klidu.
- Výše spočtený výkon lze srovnat se standardním koňským výkonem 746 W („koňská síla“, horse power). Předpokládali jsme, že jste mladí, silní a trénovaní, takže Váš výkon bude větší než standardní „lidská síla“ = 1/10 „koňské síly“, tj. 75 W. Uvědomte si, jakou pomoc například při práci na poli znamenal kůň, když byl schopen nahradit 10 lidí.
- Výparné teplo vody je 2,3 MJ/kg. Kolik energie ztratíme tím, že vypotíme a odpaříme 2 l vody?
2 l znamenají 2 kg, tj. E = 4,6 MJ. Porovnejte tuto ztrátu s „užitečně vynaloženou“ prací na stoupaní do kopce.
- Každé těleso (s ideálně absorbujícím povrchem) vyzařuje z jednotky povrchu tepelný výkon $P = \sigma T^4$, kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Jaký výkon vyzařuje naše hlava, budeme-li ji považovat za kouli s obvodem 55 cm, při teplotě 35°C a teplotě okolí 0°C resp. 20°C. Uvažte, že Povrch hlavy nejen vyzařuje, ale také přijímá tepelné záření z okolí.
Bez uvážení krku je povrch hlavy $S = 4\pi (o/2\pi)^2 = o^2/\pi = 0,55 \text{ m}^2/\pi = 0,1 \text{ m}^2$. Vyzářená energie je $E_{\text{ven}} = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,1 \times 308^4 \text{ W} = 51 \text{ W}$, energie přijatá z okolí při 20°C je $E_{20} = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,1 \times 293^4 \text{ W} = 42 \text{ W}$, energie přijatá z okolí při 0°C je $E_0 = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,1 \times 273^4 \text{ W} = 31 \text{ W}$. Tedy tepelným zářením hlavy ztrácíme 9 W resp. 20 W. To je dost podstatná ztráta v porovnání s naší energetickou spotřebou 120 W, i když jsme neuvažovali další mechanismy přenosu tepla.
- Předpokládejme, že při výše zmíněném šplhání do kopce (2500 m stoupaní) jsme vynesli 15 kg batoh. Jaká je naše účinnost, když jsme za celý den více „užitečné práce“ neudělali a když jsme snědli 20 MJ energie? Jaká je tato účinnost, když za „užitečnou práci“ budeme považovat i to, že jsme na kopec vynesli své tělo? Co se podělo se zbytekem snědené energie?
Vynesení 15 kg batohu do výšky 2500 m znamená práci $mgh = 15 \text{ kg} \times 10 \text{ ms}^{-2} \times 2500 \text{ m} = 0,375 \text{ MJ}$. Při spotřebě energie 20 MJ dosahujeme účinnost $0,375/20 = 0,02 = 2 \%$. Již výše jsme spočítali, že vynesení těla i batohu o celkové hmotnosti 80 kg znamená práci 2 MJ. Považujeme-li i vynesení těla za cíl, je účinnost $2/20 = 0,1 = 10\%$. Zbytek snědené energie se použil na teplo, jednak „užitečné“, které udrželo náš organismus při potřebné teplotě, jednak na teplo odpadní, kterého jsme se zvláště během výstupu zbavovali, jednak pocením, jednak tepelným vyzařováním, jednak vedením ve vzduchu kolem nás. Pokud se nám energie v celkové bilanci nedostávalo, spálili jsme trochu svého sádla a zhubli jsme, pokud nám energie přebývala, uložili jsme ji do svých tukových polštářů pro příští použití.

Energie ohně

Hodně dlouho trvalo, než se člověk naučil využít oheň nejen k tomu, aby se u něho ohřál a opekl si na něm ulovenou zvěř, ale také k práci. Kolik energie se dá ale z běžného hoření vyždímat??

- Asi všichni máme své zkušenosti s ohýnkem, s táborákem, někdo s požárem ... Všichni víme, že suché dřevo dobře hoří. Jeho spalné teplo (vysvětlení pojmu viz níže) je průměrně 18 MJ/kg. Problémem je, že ve dřevě je vždy více či méně vody, v tom suchém 10–20%, v čerstvém kolem 60 %. Kolik tepla reálně získáme spálením 1 kg suchého a 1 kg čerstvého dřeva?

V čem je vlastně podstata problému? Jenom v tom, že dřevo s velkým podílem vody obsahuje méně vlastního paliva??? Možná také v tom, že při hoření se voda obsažená ve dřevě vypařuje a na to se investuje jisté množství tepla. Ostatně existenci tohoto efektu napovídá i různost údajů pro spalné teplo a pro výhřevnost v tabulkách – podívejte se do nich.

1 kg suchého dřeva (předpokládejme 10 % vody) dá při spálení výše uvedené teplo 18 MJ/kg. Na vypaření 10 %, tj. 0,1 kg vody je potřeba $0,1 \times 2,3 \text{ MJ} = 0,2 \text{ MJ}$ tepla. To není mnoho. Ale hořením dřeva vzniká jednak CO_2 , jednak voda. Spalné teplo počítá s tím, že vzniklá voda v podobě vodní páry zkondenzuje, výhřevnost počítá s tím, že zůstane párou. To vede k údajům o výhřevnosti okolo 16 MJ/kg. Jak to bude s čerstvým dřevem??? Sušiny je v 1 kg „suchého“ dřeva 0,9 kg, v 1 kg čerstvého dřeva 0,4 kg, tj. spálením dostaneme nikoli 18 MJ, ale jen $0,4/0,9 \times 18 \text{ MJ} = 8 \text{ MJ}$. Navíc musíme odpařit nikoli 0,1 kg, ale 0,6 kg, na což potřebujeme $0,6 \times 2,3 \text{ MJ} = 1,4 \text{ MJ}$. Tak docházíme k odhadu pro výhřevnost 6,6 MJ/kg. S uvážením toho, že vzniklá voda také zůstane párou by to bylo ještě o trochu méně. Tak máme výhřevnost čerstvého dřeva zhruba dvaapůlkrát menší než suchého. Pokud necháme dřevo před topením venku na vzduchu uschnout, dovolíme přírodě, aby nám palivo zkvalitnila ...

- Líh ve vařiči hoří, vodka také hoří, víno už nehoří, natož pivo. Dnes se propaguje alkohol jako palivo pro spalovací motory (spalné teplo skoro 30 MJ/kg); co všechno se asi dá do motoru nalít?

To je téma na konfrontaci teorie a experimentu: Pro získání teoretického popisu je asi možné sledovat logiku předcházejících úvah, tj. definovat podstatnou vlastnost alkoholového paliva – podíl čistého alkoholu α a spočítat výhřevnost jako funkci α . Příklad $\alpha = 0$ znamená čistou vodu a tou se opravdu topit nedá. Příklad $\alpha = 1$ znamená čistý $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. Znalost vzorce nám umožňuje spočítat, kolik vody a kolik CO_2 vznikne a tak spočítat výhřevnost čistého alkoholu. Jak bude α klesat, tak bude ubývat podíl paliva a přibývat podíl vody, kterou hořením odpaříte.

*Dá se očekávat, že nebude hořet směs, jejíž výhřevnost bude nulová. Podstatné údaje ale může přinést relativně snadno proveditelný experiment. **POZOR! V navrhovaném experimentu se pracuje s hořlavými a je potřeba dodržovat příslušná bezpečnostní opatření.** V drogerii je možné koupit technický líh (typicky $\alpha = 0,96$), ředěním vodou připravit směs s libovolným podílem α a vyzkoušet, které směsi je možné zapálit a hoří.*

Jaké efekty mohou být za tvrzením pijáků piva, že je v létě chladí a v zimě hřeje???

Při srovnání výhřevností běžných paliv (např. uhlí 10 až 32 MJ/kg, benzín 43 MJ/kg, propan 50 MJ/kg), resp. méně běžných paliv (vodík 95 MJ/kg) s prací potřebnou při různých činnostech je zjevná potřeba strojů, které by dokázaly tepelnou energii paliv přeměnit na mechanickou práci.

Energie ohně – auto

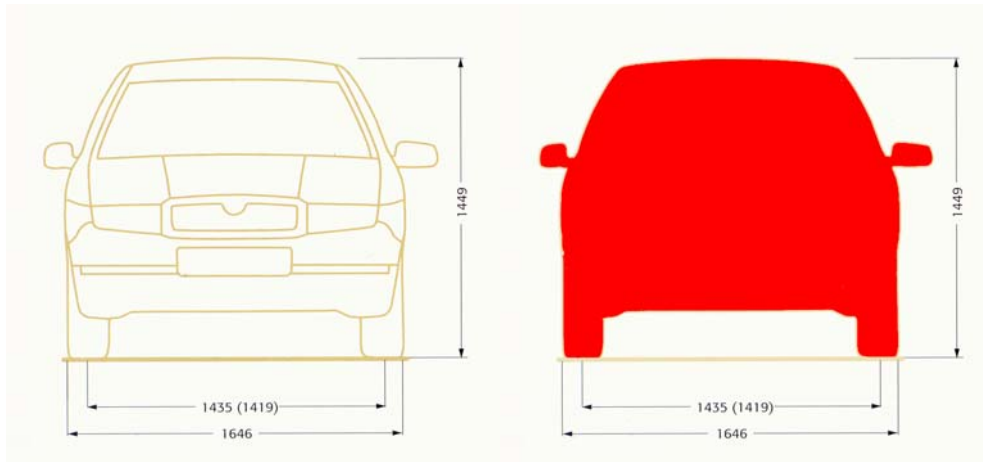
V textu jste prošli dlouhou cestu lidstva k parnímu stroji. Dnes kolem sebe potkáváte různé motory a klíčovou otázkou je jejich účinnost, spotřeba paliva, vliv na okolní prostředí.

Jak účinné je dnešní auto? O kolik rozšiřuje naše lidské schopnosti, např. náš výkon cca 75 W? Pojďme se blíže podívat na běžný současný automobil – jako příklad si vybírám Škoda Fabia sedan s motorem 1,4/50 kW:

- Základní údaje vyčteme z Technického průkazu: Fabia s daným motorem má max. výkon 50 kW při 5000 otáčkách, zdvihový objem 1397 cm^3 (v jiném prospektu najdeme vrtání \times zdvih = $75,5 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$), palivo BA 95 B, hmotnost 1095 kg pohotovostní + 515 kg dovolené zatížení včetně obsluhy, nejvyšší povolená rychlost 162 km/h, spotřeba 9,8/5,6/7,2 (město/90 km/h/ 120 km/h) (podle metodiky EU 1999/100). V dalších prospektech najdeme další údaje: zrychlení z 0 na 100 km/h 15,8 s, emise CO_2 173 g/km, součinitel odporu vzduchu $c_x=0,31$).

- Pokusme se dešifrovat tyto údaje: Výkon motoru by měl být užitečný mechanický výkon, tj. například při maximální rychlosti by měl kompenzovat valivý a aerodynamický odpor. Zkusme spočítat aerodynamický odpor při maximální rychlosti 162 km/h i při rychlostech 90 a 120 km/h, pro které je udána spotřeba paliva.

Aerodynamická odporová síla je dána vztahem $F = \frac{1}{2} \rho c_x S_x v^2$, kde $\rho = 1,28 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu, c_x součinitel odporu vzduchu, S_x čelní plocha automobilu, v rychlost. Čelní plochu se pokusíme zjistit z prospektu, kde je třípohledový obrázek auta:



Trochu násilná, ale velmi snadná a účinná cesta je v grafickém editoru vybarvit plochu auta a spočítat barevné pixely (napočítal jsem jich v daném rozlišení 200 047, zatímco obdélník $1646 \times 1449 \text{ mm}^2$ obsahoval 243660 pixelů). Čelní plochu Fabie pak odhaduji na $2,0 \text{ m}^2$. Pak $F(90 \text{ km/h}) = \frac{1}{2} \times 1,28 \times 0,31 \times 2,0 \times (90/3,6)^2 \text{ N} = 250 \text{ N}$, odpovídající výkon $P(90 \text{ km/h}) = F \times v = 6,2 \text{ kW}$. V následující tabulce jsou hodnoty aerodynamické odporové síly pro různé rychlosti.

Rychlost	50 km/h	90 km/h	120 km/h	162 km/h
Aerodynamická odporová síla	73 N	250 N	420 N	770 N
Výkon aerodynamické odporové síly	1,1 kW	6,2 kW	14,7 kW	36 kW

Budeme předpokládat, že při maximální rychlosti výkon motoru právě kompenzuje výkon všech odporových sil. Tak zjišťujeme, že na výkon valivého tření a odporů v motoru a převodovce zůstává 14 kW. Ale odporová síla valivého tření není v první aproximaci závislá na rychlosti a tření v motoru budeme také předpokládat konstantní, takže je můžeme spočítat z výkonu při maximální rychlosti a použít pro nižší rychlosti, viz následující pokračování tabulky (tj. v tabulce postupujeme zprava doleva)::

Rychlost	50 km/h	90 km/h	120 km/h	162 km/h
Výkon odporové síly valivého tření	4,3 kW	7,8 kW	10,4 kW	14 kW
Odporová síla valivého tření	310 N	310 N	310 N	310 N

Pokud jsou naše odhady rozumné, měli bychom auto na rovině utlačit silou 310 N ... Pokud zařadíme neutrál, pak některé odpory Asi ještě menší, zařadíme-li neutrál a tak vyřadíme odpory v motoru.

Do výpočtu chceme nyní zahrnout spotřebu paliva. Testovací metodika předpokládá jistou dynamiku jízdy, tj. nejen jízdu konstantní rychlostí. Tím, že se omezíme na předpoklad konstantní rychlosti, se dostaneme k závěru, že motor spotřebovává benzín více, než ve skutečnosti. Předpokládejme nyní, že spotřeba paliva je zhruba lineárně závislá na potřebném výkonu motoru, který musí překonávat valivé tření a odpor vzduchu (to je velmi troufalý předpoklad, experti vědí, že chování motoru při různých otáčkách a výkonech je odlišné). Zjevně nestačí uvažovat jen přímou úměrnost, neboť motor spotřebovává palivo, i když se jen líně převaluje na volnoběh a auto nepohání. Podobně jako je výkon vztahován na jednotku času, bylo by rozumné vztahovat na jednotku času i spotřebu: $\text{spotřeba} = A \times \text{celkový výkon motoru} + B$. Z technického průkazu známe spotřebu

při 90 km/h (5,6 l/100 km znamená 5,6 l/100 km × 90 km/hod = 5,04 l/hod) a 120 km/h (7,2 l/100 km × 120 km/hod = 8,64 l/hod). Z těchto hodnot dostaneme $A = 0,324 \text{ l}/(\text{hod.kW})$, $B = 0,51 \text{ l}/\text{hod}$. Tak dostaneme další řádky tabulky:

Rychlost	50 km/h	90 km/h	120 km/h	162 km/h
Celkový výkon motoru	5,4 kW	14,0 kW	25,1 kW	50 kW
Spotřeba benzínu na 1 hodinu	2,26 l	5,04 l	8,6 l	16,7 l
Spotřeba benzínu na 100 km	4,5 l	5,6 l	7,2 l	10,3 l

Všechny tyto odhady jsou velmi hrubé, zkuste najít všechny možné aspekty, které jsme ignorovali. Ale výsledné hodnoty nejsou úplně nesmyslné! Zkuste současně navrhnout, jak by se mohla spotřeba auta snížit.

- Jaká je účinnost motoru, vezmeme-li průměrnou výhřevnost benzínu 43 MJ/kg resp. 61 MJ/l?

To je přece schováno v naší konstantě A , která říká, že na 1 kW výkonu motoru spalují 0,324 l benzínu za hodinu... Tepelná energie dodaná spalováním benzínu/výkon motoru = $0,324 \text{ l}/(\text{hod.kW}) \times 61 \text{ MJ/l} = 20 \text{ MJ}/(\text{hod.kW}) = 20 \text{ MJ}/(3,6 \text{ MWs}) = 5,6$. Tepelná energie je 5,6 × větší než výkon motoru, účinnost = $1/5,6 = 0,18 = 18\%$.

- Dosud jsme předpokládali, že auto jede stálou rychlostí, takže výkon motoru překonává jen jízdní odpory. Jak je to s rozjížděním, předjížděním, jízdou do kopce? Kolik benzínu stojí rozjetí z klidu na 100 km/h?

Rozjetím autu udělíme kinetickou energii – Fabia jenom s řidičem bude mít hmotnost okolo 1200 kg a kinetická energie při 100 km/h je $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 1200 \times (100/3,6)^2 \text{ J} = 0,46 \text{ MJ}$. K tomu je potřeba přičíst ztráty na odpory. Motor s výkonem 50 kW je principiálně schopen tuto energii dodat za čas $460 \text{ kJ}/50 \text{ kW} = 9,2 \text{ s}$, ale ve skutečnosti záleží i na tom, při jakých otáčkách je motor „nejsilnější“ (má tzv. největší krouticí moment – moment síly) a jak pomoci převodovky sílu motoru co nejlépe využít. Proto je skutečný čas na zrychlení z nuly na 100 km/h delší – 15,8 s.

Z druhého Newtonova zákona je jasné, že na stejné zrychlení těžšího auta potřebujeme větší sílu a tím větší výkon motoru. Proto pro srovnávání dynamiky jednotlivých aut může být zajímavé srovnávání poměru výkon motoru/hmotnost auta.

- Kolik „stojí“ jízda do kopce? Například silnice z Tatranské Štrby (900 m n.m.) nastoupá na Štrbské Pleso (1355 m n.m.) zhruba 450 m na vzdálenosti asi 9 km, takže stoupání je zhruba 5%. Jaký výkon je třeba na jízdu s takovým stoupáním ve Fabii s maximální povolenou hmotností (1600 kg)?

Samozřejmě záleží na rychlosti. Například při rychlosti 90 km/h je rychlost stoupání $0,05 \times 90 \text{ km/h} = 4,5 \text{ km/hod} = 1,25 \text{ m/s}$. Hmotnost 1600 kg je třeba zvedat silou 16 kN, výkon při rychlosti 1,25 m/s je 20 kW. Z výše uvedených tabulek pak vidíte, že motor musí při této rychlosti podávat výkon 6,2 kW na překonávání odporu vzduchu, 7,8 kW na překonávání valivého tření a 20 kW na stoupání. Celkem je to 34 kW. Fabia na takovou rychlost stačí, jestliže si ji řidič může vzhledem ke stavu silnice dovolit. Podle výše uvedených odhadů bude spotřeba na daný výkon asi 11,5 l/hod = 13 l/100 km. Kdyby jel řidič jenom rychlostí 50 km/h, bude analogicky výkon na stoupání 11,1 kW, výkon na překonávání odporů 5,4 kW, tj. celkem 16,5 kW. Spotřeba bude 5,9 l/hod = 12 l/100 km.

- Konec konců nejde o to, že někam vyjede auto, ale jde o to, co tam vyveze. Jaká je „praktická účinnost“, kterou definujeme jako podíl užitečné práce (zde zisk potenciální energie nákladu) a energie spotřebovaného paliva?

Při zmiňované jízdě byl náklad 500 kg (včetně řidiče) vyvezen do výše 450 m, čímž získal potenciální energii 2,2 MJ. Auto na to spotřebuje na to 1,1 resp 1,2 l benzínu (při rychlosti 50 nebo 90 km/h) s energií v něm obsaženou 67 resp. 73 MJ. „Praktická účinnost“ je tedy okolo 3 %. Aktuální cenu benzínu si zjistíte a pro praktické posuzování vezměte v úvahu i další náklady na provoz auta. Vlastní jízda by trvala několik minut. Pokusme se nyní odhadnout, jak bychom dopravili náklad 75 kg řidič + 425 kg nákladu do výšky 450 m. Posuďte svou kondici, ale snad byste zvládli vynést 25 kg nákladu oněch 450 m dvakrát nebo třikrát za den. 425 kg je 17 nákladů po 25 kg, takže bys-

te je nosili šest dní. Denně byste snědli 20 MJ, takže byste spotřebovali něco kolem 120 MJ, tedy více, než projede auto. Stálo by vás to určitě více než benzín. Zde je výhoda auta asi nesporná. Diskutabilní je ale situace, kdy si řidič dojede autem půl kilometru do trafiky pro noviny...

Auto je typickým reprezentantem stroje, který je skoro všudypřítomný, který je značně technicky vyvinutý a přitom se stále vyvíjí. Pokuste se sami posoudit, nakolik je reálné snižovat dále spotřebu paliva, jak lze ovlivnit jednotlivé složky potřebného výkonu, které jsme výše diskutovali.

Co se ale děje uvnitř motoru?

V autoškolce se to učí jednoduše – ve čtyřdobém motoru jde o nasátí směsi – stlačení – zážeh, hoření a expanzi – výfuk. Ve čtyřválcovém motoru je každý válec v jiné fázi cyklu, jen při expanzi opravdu pracuje, v ostatních fázích se „veze“.

- Pracovní objem jednoho válce ve Fabii naší ilustrace je $\pi \times (\text{vrtání}/2)^2 \times \text{zdvih} = 350 \text{ cm}^3$. Maximální výkon je udáván při 5000 otáčkách za minutu, kdy 1 cyklus proběhne za dvě otáčky, tedy s frekvencí 2500 cyklů za minutu, tj. 42 cyklů za sekundu. Za sekundu projde jedním válcem $42 \times 350 \text{ cm}^3 = 14700 \text{ cm}^3 = 14,7 \text{ l}$ směsi vzduchu s palivem. Z našich výše uvedených odhadů vyplývá spotřeba při maximálním výkonu 50 kW $16,7 \text{ l/hod} = 4,6 \text{ cm}^3/\text{s} = 3,2 \text{ g/s}$. Na jeden válec je to $0,80 \text{ g/s}$.
- Je poměr vzduchu a benzínu ve směsi vyvážený, tedy takový, který je třeba právě na shoření benzínu, nebo je tam přebytek vzduchu? Podívejte se na stránky <http://www.nastyz28.com/~ericf/tech/gasfaq.pdf>, http://www.chevron.com/prodserv/fuels/bulletin/motorgas/Motor_Gas.pdf

Benzín je uhlovodík typicky se 4–11 C v molekule, počítejme se vzorcem C_nH_{2n} . Hoření znamená $C_nH_{2n} + 3n/2 O_2 \rightarrow nCO_2 + nH_2O$. Bilance atomových hmotností zní $n \times (12+2) + (3n/2 \times 2 \times 16) \rightarrow n \times (12+2 \times 16) + n \times (2+16)$. Tedy $14n$ hmotnostních dílů benzínu shoří se $48n$ díly kyslíku a vytvoří $44n$ dílů CO_2 a $18n$ dílů vody. tento poměr můžeme vykrátit:

benzín : kyslík : CO_2 : voda = 7 : 24 : 22 : 9

resp. nahradit kyslík vzduchem, kterého musí být pětkrát více:

benzín : vzduch : CO_2 : voda = 7 : 120 : 22 : 9

Výše jsme spočítali, že do válce vstupuje $0,80 \text{ g}$ benzínu a $14,7 \text{ l}$ vzduchu za sekundu. Na dokonalé spálení by bylo třeba $0,80 \times 120/7 = 14 \text{ g}$ vzduchu = $10,7 \text{ l}$ vzduchu. Vzduchu, resp. kyslíku je tedy lehký nadbytek. Vznikne $0,80 \times 22/7 = 2,5 \text{ g}$ CO_2 a $0,80 \times 9/7 = 1,0 \text{ g}$ vody za sekundu. Ve čtyřech válcích vzniká za sekundu $4 \times 2,5 = 10 \text{ g}$ CO_2 , za hodinu 36 kg , což při maximální rychlosti je 222 g CO_2/km . Hodnota produkce CO_2 uvedená v technickém průkazu (173 g) odpovídá zjevně nižšímu výkonu a rychlosti, podrobnosti podmínek najdete v metodice měření.

- Na jakou teplotu se ohřeje směs ve válci při stlačení? Předpokládejme, že kompresní poměr u současných motorů je zhruba 10. Takže 350 cm^3 vzduchu s 19 mg benzínu při pokojové teplotě je přibližně adiabaticky stlačeno $10 \times$. Adiabatický předpoklad znamená, že se vzduch nestačí znatelně ohřát od stěn válce.

Pro adiabatický děj platí vztah $pV^\kappa = \text{konst}$, resp. $TV^{\kappa-1} = \text{konst}$, kde Poissonova konstanta pro vzduch je $\kappa = 1,4$. Do vzduchu se ale odpaří ta ké benzín, ale objem jeho par zanedbáme (prověřte, že je to přijatelná aproximace) a zanedbáme také jeho výparné teplo (opět odhadněte přijatelnost této aproximace, výparné teplo je $0,3 \text{ MJ/kg}$). Jestliže $T_1 = 300 \text{ K}$ a $V_1/V_2 = 10$, pak $T_2 = T_1 \times (V_1/V_2)^{\kappa-1} = 300 \times 10^{0,4} \text{ K} = 950 \text{ K} = 680 \text{ }^\circ\text{C}$. To je asi více, než na kolik se směs před zážehem v motoru skutečně ohřeje. Teplota a tlak směsi po kompresi jsou společně s vlastnostmi paliva důležitými faktory hladkého chodu motoru – při dosažení vysoké teploty hrozí samovznícení směsi, specifický způsob hoření (detonace) a tzv. klepání motoru.

- Směs se ve válci zažehuje elektrickou jiskrou svíčky ještě před maximálním stlačáním. Směs hoří rychlostí kolem 20 m/s , na prohoření od svíčky ke kraji válce (cca 4 cm) potřebuje $0,04/20 \text{ s} =$

2 ms. To je třeba srovnat s dobou trvání jedné fáze cyklu, např. expanzní – ta trvá $\frac{1}{4} \times \frac{1}{42} \text{ s} = 6 \text{ ms}$. Směs tedy hoří už před maximálním stlačením a dohořívá během expanze. Hořením benzínu po zážehu se uvolní teplo $19 \text{ mg} \times 43 \text{ kJ/g} = 820 \text{ J}$. K jakým teplotám ve válci to vede?

Původní objem vzduchu, 350 cm^3 , znamená $0,45 \text{ g}$ vzduchu. Uvažme pro zjednodušení, že objem se během hoření příliš nezmění (píst je v okolí horní úvrati) a použijme měrné teplo při stálém objemu $0,71 \text{ kJ/(kg K)}$ – pak ohřátí činí $820 / (0,45 \times 0,71) \text{ K} = 2600 \text{ K}$. Zanedbali jsme ztráty tepla do stěn válce, pístu atd. Hlavně jsme však zanedbali skutečnost, že během hoření již plyny tlačí na píst a odevzdávají práci. Experti říkají, že maximální teploty ve válci jsou $2000\text{--}2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Při jaké teplotě spalin končí expanze otevřením výfukového ventilu?

Předpokládejme, že se výfukový ventil otevírá po dokončení expanze, tj. když se objem zvětšil tolikrát, kolik činí kompresní poměr – 10 v našich úvahách. Budeme zjednodušeně počítat s tím, že maximální teploty bylo už dosaženo při maximálním stlačení a budeme předpokládat zanedbatelnou výměnu tepla s válcem, tj. adiabatický proces. Jako počáteční teplotu zvolíme $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ (místo $680+2600 \text{ }^\circ\text{C} = 3280 \text{ }^\circ\text{C}$). Opět použijeme vztah $T_2 = T_1 \times (V_1/V_2)^{\kappa-1}$. Tak dostaneme $T_2 = 2773 \text{ K} \times (1/10)^{0,4} = 1100 \text{ K} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$. Experti opět připomínají, že se výfukový ventil otevírá již dříve, takže teplota při jeho otevření je $900\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Šlo by odhadnout maximální účinnost spalovacího motoru pracujícího daným způsobem?

Maximální účinnost tepelného stroje je dána rozsahem pracovních teplot média. V našem případě (s uvážením znalostí expertů) berme $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ a $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (po otevření výfukového ventilu už médium nepracuje). Pak je účinnost $\eta = (T_1 - T_2)/T_1 = (2773 \text{ K} - 1173 \text{ K})/2773 \text{ K} = 0,58 = 58 \%$. Jak jsme ale výše odhadli, účinnost motoru je jen 18% . Skutečný motor nemá zdaleka takovou účinnost jako ideální tepelný stroj, na druhé straně naše odhady vázané na interpretaci spotřeby byly dosti hrubé. Expert na motory i fyzik by dále namítl, že účinnost ideálního spalovacího motoru (Ottova motoru) můžeme spočítat i bez vzorečku pro Carnotův cyklus že nám vyjde $\eta = 1 - 1/(\text{kompresní poměr})^{\kappa-1}$, což je kupodivu přesně totéž, co jsme dostali výše.

Stručně shrnutí praktiků zní: třetinu energie z paliva motor využije na pohon, třetina tepla odejde výfukem, třetina chlazením...

Pokud vás naznačená problematika zajímá, zkuste udělat si v provozu aut udělat větší jasno. Možné jsou mnohé cesty: vylepšovat obrázek, který jsme načrtli – ptát se expertů, studovat literaturu, brouzdat po webu, studovat detailně spotřebu, zvláště pokud máte v autě ukazatel okamžité spotřeby,

Kolik energie a v jaké podobě spotřebujete v běžném životě? Kde se bere a kolik stojí?

Nejznazší cesta je podívat se na účty za elektřinu, plyn a případně jiné energie, které doma používáte.

- V případě čtyřčlenné domácnosti autora jde o účet za elektřinu v množství cca 4100 kWh za rok a odběr zemního plynu na topení, vaření a ohřev vody v množství cca 2500 m^3 za rok. Podobně jako jsme se zabývali energií, kterou potřebuje za den člověk dostat v jídle, přepočítejme tyto údaje na osobu a den (zjistíte si doma údaje relevantní pro vaši domácnost): elektřina $4100 \text{ kWh}/(365 \times 4) = 2,80 \text{ kWh}/\text{den}/\text{osoba} = 10 \text{ MJ}/\text{den}/\text{osoba}$. Shodou okolností spotřebujeme doma tolik elektrické energie, kolik sníme.
- Pokuste se zjistit jednotlivé spotřebiče („viníky za spotřebu“), odhalte největší „žrouty energie“ ve vaší domácnosti a popřemýšlejte, zda se nedá někde ušetřit.
- Zemní plyn, kterým topíme, vaříme a hřejeme vodu, má výhřevnost zhruba $34 \text{ MJ}/\text{m}^3$ (je to převážně metan). 2500 m^3 zemního plynu znamená $2500 \times 34 = 85 \text{ GJ} = 23 \text{ MWh}$, při hustotě $0,73 \text{ kg}/\text{m}^3$ (při atmosférickém tlaku) to znamená 1800 kg plynu (ještě že ho nemusíme nosit!). Spotřeba energie přinášené zemním plynem je $230 \text{ MJ}/\text{den} = 65 \text{ kWh}/\text{den}$, děleno počtem členů domácnosti dostaneme $58 \text{ MJ}/\text{den}/\text{osoba} = 16 \text{ kWh}/\text{den}/\text{osoba}$.
- Pokusme se rozšířit měřítko našich odhadů na celý stát – přenásobme uvedený odhad spotřeby počtem obyvatel SR, počítejme s $5,5$ miliónu obyvatel, $2,8 \times 365 \times 5,5 \times 10^6 \text{ kWh} = 5,6 \text{ TWh}$, výroba

elektrické energie na Slovensku činí 21,5 TWh (www.zemepis.com; zkontrolujte údaje s jinými zdroji, např. <http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/geos/lo.html>, <http://geography.about.com>, <http://www.worldfactsandfigures.com>, ... 1 mld. kWh = 10¹² Wh = 1TWh). Vidíme, že produkce energie je zhruba 3,8-násobkem „soukromé spotřeby“ odvozené od jedné konkrétní rodiny. Onu další energii spotřebovává infrastruktura včetně všech možných služeb a průmysl. Obráceně, vyrobená energie přepočtená na den a obyvatele činí 21,5 TWh/(365dní×5,5 Mobyvatel) = 11 kWh/den/obyvatel. Srovnajte tento parametr pro různé země.

Příklad, ve kterém můžete libovolně pokračovat:

Země	Spotřeba elektřiny /rok	Počet obyvatel	Spotřeba elektřiny /den/obyvatel
Slovensko	21,5 TWh	5,5 miliónů	10,7 kWh
Česko	52,9 TWh	10,2 miliónu	14,2 kWh
Německo	495 TWh	83 miliónů	16,3 kWh
Spojené státy	3 450 TWh	278 miliónů	34,0 kWh
Rusko	728 TWh	145 miliónů	13,8 kWh
Čína	1 084 TWh	1 273 miliónu	2,3 kWh
Afgánistán	0,48 TWh	26,8 miliónu	0,049 kWh
Šalamounovy ostrovy	0,028 TWh	0,48 miliónu	0,16 kWh
...			

- Pokuste se získat údaje o spotřebě dalších energií (v podobě plynu, uhlí, benzínu) v různých zemích a různých částech světa a porovnat je.
- Podívejte se na web Slovenských elektrární a.s. <http://www.seas.sk/>, např. na aktuality a zjistěte, v jakých elektrárnách se na Slovensku elektřina získává.

Slovenské elektrárne, a. s. vyrobili v apríli 1 872,8 GWh elektriny. To predstavuje plnenie plánu na 91,8 %. V porovnaní s aprílom minulého roku ide o zníženie výroby o 103,6 GWh, s medziročným indexom 0,95. V rovnakom období sa vývoz Slovenských elektrární pohyboval v diagrame od 390 MW, s maximom 630 MW, 1. 4. 2004.

Najvýraznejšie - s hodnotou 56 %, prispeli do výroby jadrovej elektrárne, ktoré vyrobili spolu 1 047,9 GWh.

Tepelné elektrárne zabezpečili 22,9 % z celkovej aprílovej produkcie Slovenských elektrární a vyrobili 428,8 GWh. Prevádzku týchto zdrojov si vynútila situácia v elektrizačnej sústave Slovenska.

Vodné elektrárne vyrobili 396,6 GWh, čo predstavuje plnenie 21,1 %. Uvedená výroba zodpovedala hydrologickým pomerom, keď najmä v druhej časti mesiaca bolo málo zrážkovej činnosti.

- Pokuste se sami sobě odpovědět na otázky:
 - neparazitujeme svou spotřebou energie na energetickém bohatství Země (například spotřebou zásob uhlí a ropy, které se akumulovaly během dlouhých období)?
 - není spotřeba energie poněkud nerovnoměrně rozdělena po světě?
 - jaký podíl energie získáváme z obnovitelných zdrojů?
 - dokážete si představit život bez energie tak relativně snadno dostupné, jakou ji máme v našich končinách (zkuste si na pár dní vypnout hlavní vypínač elektřiny a zavřít přívod plynu, lidem v našich krajinách se to občas nechtěně stává např. během živelních katastrof jako např. povodní ...)
- Podívejte se na stránky elektrárenských společností doma i v zahraničí (např. <http://www.cez.cz/cez/> .. svět energie) a seznamte se se standardními i alternativními způsoby získávání elektřiny (klíčové slovo je „renewable energy“). Podívejte se také na názory oponentů – ekologických skupin a seznamte se s jejich argumenty.

Například se podívejte na stránky propagující využití větru v Rakousku –

http://www.tauernwind.com/windenergie_e/windenergie_oest_e.htm a uvědomte si, že existují i názory, že pro větrné elektrárny je třeba hledat snesitelná umístění a vyhýbat se chráněným oblastem, viz

http://www.alpenverein.or.at/naturschutz/Alpine_Raumordnung/Windkraft/020_windkraft.shtml?navid=7

- Rozmyslete si hospodaření s energií na výlet do přírody v našich středoevropských podmínkách. Zvažte, jaký civilizační komfort si chcete dopřát a jak to zařídit.

Trochu extrémní plán může počítat s tím, že budete spát pod širákem, jíst kořínky nebo ulovené živočichy a pít vodu z potoků. To je dnes ve Střední Evropě trochu problematické.

Druhý extrémní plán může počítat s pobytem v karavanu přivěšeném za silným autem. energii pro zírání na televizi dodává i v „pustině“, kde snad není přípojka na elektřinu, generátor poháněný malým spalovacím motorem, v karavanu můžete mít skoro všechno, co doma.

Neextrémní plán může počítat se spaním ve stanu někde na tábořišti, s omezeným vařením na malém vařiči a někdy možná na ohýnku z několika nalámaných větví, s jídlem, které si nakoupíte a ponese sebou. Možná budete ještě potřebovat baterku na noční akce, možná mobil na řešení krizových situací. Co víc budete potřebovat?

Jídlo s trochou zkušeností snadno naplánujete a nakoupíte, jen případná expedice do dalekých krajín chce studium zkušeností jiných cestovatelů a dobrou přípravu.

Malý vařič může být na plyn, lih, benzín, ... Výchřevnosti jednotlivých paliv najdete v tabulkách, rozhodují spíš praktické vlastnosti jednotlivých vařičů a dostupnost paliva v místě pobytu. Vařiče dokáží ohřát litr vody k varu typicky za 3-5 minut. Například malý plynový vařič může mít výkon cca 2 kW při spotřebě propan-butanové směsi 150 g/hod, takový vařič je schopen uvést litr vody do varu za 5 minut. Výchřevnost směsi propan/butan (typicky 30/70) je asi 45MJ/kg. Za pět minut spálí $5/60 \times 150 \text{ g} = 12,5 \text{ g}$ plynu, který odevzdá $0,0125 \times 45 \text{ MJ} = 0,56 \text{ MJ}$ tepla. Tepelná kapacita vody je 4,2 kJ/kg/K, takže na ohřátí z 0°C (ze studeného potoka) na 100°C potřebujete 0,42 MJ/kg. V takovém případě využijete $0,42/0,56 = 0,75 = 75\%$ tepla na ohřívání vody. Stačí, aby trochu foukal vítr a účinnost vařiče může dramaticky poklesnout (pomůžete si postavením závětrí). Více energie je třeba na tavení sněhu a ledu v zimě – měrné skupenské teplo vody je 0,33 MJ/kg, takže na roztavení sněhu a zahřátí k varu potřebujete 0,75 MJ/kg neboli 0,75 MJ/l. Počítáte-li pro jistotu jen s poloviční účinností vařiče, pak na každý litr čaje potřebujete 1,5 MJ energie v palivu, tj. 33 g propan-butanu. Snadno pak odhadnete, kolik bombiček potřebujete např. na týden. Odhady pro benzínový vařič se nebudou od plynového prakticky lišit (výchřevnost benzínu je 43 MJ/kg).

Baterie do baterky si můžete nakoupit do zásoby, možný je ale také „alternativní“ zdroj energie – baterie nahradíte akumulátory a pořídíte si solární nabíječku. Reálný proud, který můžete ze solární nabíječky dostat je kolem 100mA při 3 V z 1 dm² fotočlánku při slunečném počasí. Současné tužkové akumulátory mají kapacitu kolem 2000 mAh, takže dvojici akumulátorů s decimetrovým fotočlánkem za den spíše dobijete než úplně nabijete. Solární článek lze použít i na dobítí mobilu, v nouzi je ale možná užitečnější nabíječ na kliku, viz obrázek.



A tak se vracíme zase na začátek. Odhadněte, kolik malin musíte natrhat a sníst, abyste dobili 10% kapacity akumulátoru mobilního telefonu,

Ve všech výše uvedených odhadech jsme samozřejmě a bez komentáře počítali s tím, že se energie zachovává, resp. mění z jedné formy do druhé, používali jsme **zákon zachování energie**. Možná stojí za připomínku, co znamená takový fundamentální zákon ve fyzice.

Zaprvé je třeba připomenout, že to není zákon, který by přijal nějaký parlament a pak by ho lidé museli (alespoň naoko) respektovat, policie a soudy by dohlížely na jeho dodržování (tam, kam dosáhne jejich zrak) a v jiné zemi s jinou kulturou by takový zákon vůbec nemusel platit. **Fyzikálním zákonem** rozumíme koncentrované vyjádření některého aspektu chování přírody, které bylo zformulováno na základě obsáhlé zkušenosti, četných experimentů a které zapadá do teoretického obrazu daného okruhu jevů (srovnejte s výkladem např. v http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_physics). Ze slova „zákon“ trochu čišší historie, svět, ve kterém je přehledný řád, jazyk učebnic. Ve formulaci většiny současných poznatků ve fyzice se slovo zákon příliš nevyskytuje. Ježto ve fyzice nerozhoduje parlament, ale experiment, může se stát, že se objeví třída jevů, které některý zákon narušují. Teorie se s tím časem vyrovná, obrázek přírody se tak zpřesní a může být popsán zpřesněným novým zákonem. Takovou „novelou“ zákona zachování hmoty (hmotnosti) bylo jeho zahrnutí do zákona zachování energie, ke kterému došlo ve speciální teorii relativity. Možnost nových teoretických nápadů, nových experimentálních poznatků a revize starých zákonů otvírá lákavé možnosti. Fyzikální zákony není totiž možné dokázat, je možné je buď vyvrátit nebo stále a stále ověřovat.

Již dávno lidé toužili po perpetuu mobile – stroji, který by se stále pohyboval a pokud možno konal práci bez přívodu energie. Současný fyzik se znalostí objemu fyzikálních poznatků na objevování nového principu perpetua mobile skoro určitě rezignuje a bude to komentovat slovy, že něco podobného odporuje celé dosavadní zkušenosti lidstva. Ambiciózní vynálezce může osvědčené fyzikální zákony ignorovat a snažit se konečně funkční perpetuum mobile vynalézt. Tento vynálezce zpravidla není chopen odlišit **principiální omezení** dané fyzikálními zákony (i když „nedokázanými“) od **technické nerealizovatelnosti**. Vynálezce může argumentovat, že v historii byl „vědecky“ zdůvodněn leccjaký nesmysl. Vůbec argumenty, že něco nejde, nejsou příliš přesvědčivé – možná účinnější je aplikovat porozumění přírodě tak, abychom něco zajímavého, užitečného a efektivního dokázali. Zmíněné ambiciózní vynálezce můžeme upozornit, že se podle našeho nejlepšího vědomí snaží o nemožné, ale pokud na nás nedají, ať tráví svůj život způsobem, který se jim líbí. Jiná situace nastává, když se nějaký šarlatán pokouší prodat magický zdroj energie, který podle jeho slov využívá energii Vesmíru. Poučený fyzik nekoupí, protože s pravděpodobností hraničící s jistotou ví, že je to podvod. Občan, s postmoderním smýšlením, který považuje vědu za přežitek, za nefunkční nesmysl zaplatí. Ostatně je v tom kus spravedlnosti.

Některé fyzikální zákony mohou být i jemnější (resp. temnější). Takový je například **druhý termodynamický zákon**, který v jedné z několika možných formulací říká, že není možné sestrojit periodicky pracující stroj, který by přijímal teplo a přeměňoval ho v souladu se zákonem zachování energie na mechanickou práci. Takovýto stroj se někdy nazývá perpetuem mobile druhého druhu. Tento zákon naopak můžeme zformulovat ve tvaru libém pro daňového úředníka, totiž že libovolný periodicky pracující tepelný stroj přeměňující teplo na mechanickou práci musí část tepla odevzdávat jinému tělesu („chladiči“) jako daň. Probíhají-li procesy v tepelném stroji mezi hraničními teplotami $T_1 > T_2$, pak stroj má účinnost nanejvýše $\eta = (T_1 - T_2) / T_1$ („daň“ je tedy $T_2 / T_1 \times$ dodané teplo). Ideální účinnost má tzv. vratný Carnotův cyklus, prakticky užívané stroje, např. zmíněný spalovací motor, mají účinnost vždy menší.

Pokuste se použít svou fyzikální profesionalitu na zaujetí stanoviska k následujícímu fiktivnímu(?) novinovému článku:

Kolektiv výzkumníků z Ústavu XXX objevil zajímavý efekt neočekávané přeměny energie – přímé přeměny tepla na sádro. Pokus byl proveden s kolektivem dobrovolníků, který byl rozdělen na testovací a referenční skupinu. Obě skupiny dostávaly dva týdny identické přísně kontrolované potravinové dávky a vykonávaly přesně dávkované fyzické aktivity. Testovací skupina byla umístěna v temperovaném prostředí, kde byla udržována maximální teplota příjemná pro účastníky, referenční skupina v temperovaném prostředí, kde byla udržována minimální ještě snesitelná teplota. Po dvou týdnech byla vyhodnocena změna váhy účastníků a byl zjištěn signifikantní přírůstek váhy testovací, v teple umístěné skupiny vzhledem ke skupině referenční. Tento převratný pokus bude mít bezprostřední aplikace. Již se připravuje chov prasat v areálu jaderné elektrárny Mochovce, který bude využívat jen část odpadního tepla k urychlení tloušťnutí čuníků.