

Úloha V.P ... metrová

5 bodů; průměr 2,73; řešilo 40 studentů

Jak všichni víme, v jeskyních střední Evropy je docela zima, okolo 4 °C. Proč je v metru docela teplo celý rok? Uvolňuje se více tepla z přítomných lidí, nebo spíše z technického zázemí?

Napadla Lukáše při čekání na metro.

Nejprve se zamysleme, jak je to s těmi jeskyněmi. Když dohledáme teploty¹ v českých jeskyních, zjistíme, že se pohybují zhruba od 6 °C do 14 °C. V jeskynních systémech tedy zřejmě může být i poměrně vysoká teplota. Důvod, proč jsou jedny chladnější a jedny teplejší, je celkem prostý. Je to dáno propojením s venkovním prostředím. Pokud se v jeskyni nachází podzemní část toku řeky, budou v jeskyni velké teplotní výkyvy v průběhu roku, neboť v zimě se teplota vody nachází v intervalu od 0 °C do 4 °C, zatímco v létě může bezpečně přesahovat 20 °C. Bez podobných vnějších vlivů se teplota v jeskyních udržuje na dlouhodobém teplotním průměru venkovního vzduchu,² který v České republice činí 7,5 °C.³ Geotermální energie v rozumných hloubkách ještě nehraje roli, neboť její nárůst v zemské kůře činí přibližně 0,025 °C·m⁻¹.⁴

Nyní se podívejme na situaci v pražském metru. Čím se liší? V prvé řadě si musíme uvědomit, o jakých částech metra se bavíme. V povrchových či mělce hloubených stanicích se nebude teplota příliš lišit od venkovního prostředí. Jde tedy především stanice metra ve větší hloubce, jaké nacházíme např. na lince B (nejhlubší je stanice Náměstí Míru, jejíž nejnižší bod je v hloubce⁵ 51 m). Pro fyzika to může být trochu zklamání, ale zdůvodnění vyšších teplot v metru je poměrně prosté – zajišťuje ho vzduchotechnika. V metru jsou jednak větrány služební a technologické místnosti kvůli komfortu zaměstnanců (to není pro naše účely příliš zajímavé) a jednak je tam zřízeno tzv. hlavní větrání. Funguje v letním a zimním režimu. V chladných obdobích je vzduch z mezistaničních prostorů odváděn do stanic, zatímco v létě se směr větrání obrátí. Z toho nijak neplyne, že se v létě v metru zchladíme. Skutečně, v metru může být i větší horko než na povrchu. To by nás nemělo překvapovat, v hornických šachtách tomu není jinak. Ochladit nás může leda proudící vzduch tlačенý blížící se vlakovou soupravou.

Zbývá však zjistit, odkud se bere teplo v mezistaničních úsecích. Geotermální energii jsme již zavrhlí – blíže k povrchu se sice můžeme dostat ohřátá spodní voda (znáte např. geotermální jezírka), ale z metra je veškerá průsaková voda odsávána.⁶ Potřebujeme tedy odhadnout, kolik tepla se vytvoří při provozu metra. Celková roční spotřeba elektřiny metra je⁷ 225 GWh. Jelikož metro v dlouhodobém průměru nepřekonává žádný výškový rozdíl, převede se veškerá energie v důsledku na teplo, ať už při překonávání třecího odporu, brzdění nebo při Jouleově ohřevu vodičů – budeme počítat s přibližnou hodnotou 8 · 10¹⁴ J za rok. Tunely v metru pojmu zhruba 8 · 10⁵ m³ vzduchu,⁸ který má tepelnou kapacitu $C = 10^9$ J·K⁻¹. Kdyby se ohříval v metru pouze vzduch, zvedla by se jeho teplota za pouhý den o zhruba 200 °C. Je však zřejmé, že velké množství tepla pojmu stěny – jakou část, to nedokážeme dobře odhadnout. Spokojíme se tedy s tím, že energie k tvorbě tepla máme dostatek.

Proč není tedy teplo i ve stanicích? To můžeme zdůvodnit tím, že se metro pohybuje a tedy i spotřebovává energii především mimo stanice – to však není příliš silný argument. Protiar-

¹Převzato z řešerše https://is.muni.cz/th/327651/prif_b/Novakova_reserse.pdf.

²https://en.wikipedia.org/wiki/Volumetric_heat_capacity#Thermal_inertia

³<http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_gradient

⁵<https://www.metroweb.cz/metro/TECH/vzduchotechnika.htm>

⁶<http://www.enviweb.cz/clanek/doprava/89645/odpadove-hospodarstvi-prazskeho-metra>

⁷<http://www.dpp.cz/dopravni-podnik-mezirocne-usetril-na-energiich-167-mil-kc/>

⁸<http://fykos.cz/rocnik26/reseni/reseni5-5.pdf>

gumentem nám jest prostě rozlehlost stanic. Jednoduše řečeno v nich je obsažen větší objem vzduchu, jehož ohřátí trvá i díky jeho špatné tepelné vodivosti déle.

Ještě musíme zmínit jeden aspekt, a tím jsou lidé. Člověk vyzařuje jako černé těleso s výkonem 100 W; tuto přibližnou hodnotu lze získat ze Stefanova-Boltzmannova zákona.⁹ Pražské metro přepraví v průměru $1,6 \cdot 10^6$ osob denně. Pokud odhadneme, že každý člověk stráví v metru zhruba 15 min $\sim 1\,000$ s, zjistíme, že za rok vyzaří energii $6 \cdot 10^{13}$ J. To je o řád méně než teplo vyprodukované metrem. Jako nezanedbatelný se vliv vyzařování lidských těl projeví až ve vozu metra, kde se stísněný prostor vyhřeje rychleji. Zde naopak dominuje před teplem z technického provozu.

Naše poznatky jsou tedy následující – zvýšená teplota v metru oproti jeskyním je dána odvodem teplého vzduchu z mezistaničních prostor, kde byl vzduch ohřát v důsledku disipace tepla při provozu metra. Teplo vyzařované lidmi nabývá významu pouze ve stísněných prostorech, jako je například vůz metra.

Miroslav Hanzelka
mirek@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁹Podle https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation#Human_body_emission zodpovídají další způsobem ztráty tepla (především konvekce) za méně než polovinu celkového ztrátového výkonu, náš odhad je tedy postačující.