

**Úloha IV.P ... klimatické změny feat. letadla**

10 bodů; průměr 6,69;

řešilo 32 studentů

*Létání letadlem ovlivňuje atmosféru nejen dobře známými emisemi uhlíku. Diskutujte, jaký vliv má letecký průmysl na oteplování atmosféry Země.*

*Katčino nové letadlo neprošlo emisní kontrolou.*

Letecká doprava patří medzi významné antropogénne činitele vplývajúce na klímu Zeme. Komerčné lety sú čoraz populárnejším spôsobom prepravy aj napriek ich výraznejšej uhlíkovej stope v porovnaní s ostatnými spôsobmi prepravy.

**Priame zohrievanie**

Letecký priemysel za rok 2008 spotreboval 56 TWh energie,<sup>1</sup> teda  $2,02 \cdot 10^{17}$  J. Pri hmotnosti atmosféry<sup>2</sup>  $5,148 \cdot 10^{18}$  kg a mernej tepelnej kapacite vzduchu<sup>3</sup>  $1,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  sa atmosféra za daný rok iba vplyvom leteckej dopravy ohriala o

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} \doteq 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}.$$

Efekty ako ohrev runway-e trením pri vzlete a brzdení sú rádovo ešte menšie. Teda na ohrev klímy od lietadiel samotných nie je táto energia dostatočná. Pôvod ohrevu preto musíme hľadať mimo Zeme.

**Skleníkový efekt**

Konkrétne ide o slnečné žiarenie dopadajúce na Zem. Mnohé štúdie naznačujú, že dlhodobé otepľovanie klímy Zeme je spôsobené najmä skleníkovým efektom predovšetkým ľudského pôvodu. Podstatou vplyvu je práve emisia skleníkových plynov, aerosólov a zmena oblačnosti v hornej časti troposféry. Pri prelete lietadla dochádza k tvorbe kondenzačných stôp a následnému vzniku cirrových oblakov. Tie taktiež prispievajú k zmienenému javu.<sup>4</sup>

Vďaka dominancii oxidu uhličitého ako produkovaného skleníkového plynu, je jeho vplyv na zvyšovanie teploty atmosféry najlepšie preskúmaný. Preto je pre nás výhodne využiť koncept CO<sub>2</sub> ekvivalentu. Myšlienka je jednoduchá - namiesto toho, aby sme počítali efekt každého plynu či zmeny oblačnosti na atmosféru osobitne, nahradíme ich objemom oxidu uhličitého, ktorý by mal pri vypustení do atmosféry rovnaký efekt. Z podstaty myšlienky vyplýva linearita riešenia. Ak vieme, v akom pomere sú jednotlivé emisie, vieme nájsť multiplikatívny koeficient objemu vypusteného CO<sub>2</sub>, ktorý bude reprezentovať všetky vplyvy. V prípade, že započítavame tvorbu cirrových oblakov, je multiplikatívny koeficient produkovaného oxidu uhličitého približne 1,7<sup>5</sup> Dopad tvorby cirrov je znateľný – ak by sme vylúčili takéto zmeny oblačnosti, koeficient poklesne na úroveň asi 1,3.

V roku 2019 z objemu vyprodukovaného oxidu uhličitého patrili 2%, teda  $9,15 \cdot 10^{11}$  kg, práve leteckému priemyslu. Z celkového objemu emisií CO<sub>2</sub> z dopravy to tvorí 12%.<sup>6</sup> Pre porovnanie, množstvo uvoľneného CO<sub>2</sub> na osobu na kilometer je pre vnútroštátne lety (133 g) nižšie

<sup>1</sup><https://cs.wikipedia.org/wiki/Letectví>

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Earth](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth)

<sup>3</sup>[https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property\\_tables/air/air\\_Cp\\_Cv.html](https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/air/air_Cp_Cv.html), merná tepelná kapacita vzduchu sa v skutočnosti mení s výškou, nám ide však len o odhad

<sup>4</sup><https://www.nature.com/articles/nclimate1068>

<sup>5</sup><https://doi.org/10.1007/s10584-011-0168-8>

<sup>6</sup><https://www.atag.org/facts-figures.html>

ako pre auto s jedným pasažierom (171 g). Lety medzištátne (102 g) sú porovnateľné s autobusovou dopravou (104 g). Auto so štyrmi cestujúcimi či vlak sú výrazne efektívnejšie, a to na úrovni 40 g.<sup>7</sup> Nesmieme však zabúdať, že osobná preprava nie je jediným druhom prepravy. V bežný deň je v Spojených štátoch amerických realizovaných viac ako 87 000 letov. Z toho je približne 28 500 komerčných letov (veľkých a regionálnych leteckých spoločností), 27 200 letov všeobecného letectva (súkromné lietadlá), 24 600 letov leteckých taxíkov (lietadlá na prenájom), 5 300 vojenských letov a 2 100 nákladných letov (Federal Express, UPS atď.).<sup>8</sup> Využitím ekvivalentu CO<sub>2</sub> dostávame efektívne množstvo emisií oxidu uhličitého  $1,7 \cdot 9,15 \cdot 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{y}^{-1} = 1,55 \cdot 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{y}^{-1}$ .

Citlivosť atmosféry na zmeny jej zloženia je *horúcou* témou fyziky atmosféry. V súčasnosti sú tu tri hlavné ukazovatele, ktoré vedci využívajú. Rovnovážna citlivosť klímy (ECS - equilibrium climate sensitivity) sa vzťahuje k rovnovážnym zmenám globálnej priemernej teploty vzduchu v blízkosti zemského povrchu, ktorá by zodpovedala trvalému zdvojnásobeniu atmosférickej koncentrácie oxidu uhličitého oproti pre-industriálnej ére (280 ppm). Vyplýva to z faktu, že zmeny klímy v závislosti na zmenách koncentrácie CO<sub>2</sub> vyžadujú čas. Oceán funguje ako veľký zásobník tepla a navyše sa vo vode oxid uhčitý rozpúšťa, preto by pri zdvojnásobení jeho objemu nastali rovnovážne podmienky až za niekoľko desiatok rokov. Postupná klimatická odozva (TCR - transient climate response) zodpovedá zmene teploty, opäť pri zdvojnásobení koncentrácie, avšak pri postupnom zvyšovaní o 1% za rok. Od ECS sa líši práve tým, že ešte nedošlo k termodynamickej rovnováhe. Senzitivita zemského systému (ESS - earth system sensitivity) zahŕňa dlhodobé reakcie systému, ako zmeny hrúbky ľadovej pokrývky, distribúcie vegetácie a mnoho ďalšieho. Medzivládny panel o zmene klímy (The Intergovernmental Panel on Climate Change) pri Organizácii spojených národov vo svojej piatej (šiesta je na programe roku 2022) hodnotiacej správe predpovedá ECS v rozmedzí 1,5 °C až 4,5 °C a TCR 1 °C až 2,5 °C.<sup>9</sup>

Ak poznáme hmotnosť Zemskej atmosféry  $m_{\text{atm}}$ , jej molárnu hmotnosť  $M_{\text{atm}}$  a počet molekúl CO<sub>2</sub> na milión častíc  $k_{\text{CO}_2}$ , dokážeme zistiť počet častíc oxidu uhličitého v atmosfére ako

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{k_{\text{CO}_2} m_{\text{atm}}}{1 \cdot 10^6 M_{\text{atm}}}.$$

Hmotnosť oxidu uhličitého v atmosfére potom dostaneme ako

$$m_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2},$$

kde  $M_{\text{CO}_2}$  je molárna hmotnosť CO<sub>2</sub>. Zemská atmosféra má hmotnosť približne  $m_{\text{atm}} = 5,15 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ , molárnu hmotnosť<sup>10</sup>  $M_{\text{atm}} = 28,96 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  a  $M_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  je molárna hmotnosť oxidu uhličitého.<sup>11</sup> V súčasnosti je v atmosfére  $k_{\text{CO}_2} = 413,31 \text{ ppm}$ . Dostávame teda, že v atmosfére je približne  $3,23 \cdot 10^{15} \text{ kg CO}_2$ . Táto koncentrácia dosiahne dvojnásobok pre-industriálnej hodnoty  $m_{\text{CO}_2} = 2,19 \cdot 10^{15} \text{ kg CO}_2$ , ak vypustíme ešte ďalších  $1,15 \cdot 10^{15} \text{ kg}$ . Súčasnou ročnou produkciou  $3,62 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{y}^{-1}$  takúto koncentráciu dosiahneme za 31,8 rokov.<sup>12</sup> V prípade, že by sme prestali využívať letecký priemysel, rovnaký efekt docielime za 32,6 rokov.

<sup>7</sup><https://www.bbc.com/news/science-environment-49349566>

<sup>8</sup><https://sos.noaa.gov/datasets/air-traffic/>

<sup>9</sup><https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

<sup>10</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Earth](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth)

<sup>11</sup>[https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_uhličitý](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhličitý)

<sup>12</sup><https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#annual-co2-emissions>

Táto predpoveď ale nezahŕňa prirodzený cyklus koncentrácie  $\text{CO}_2$ , nárast či naopak možnú sprísnenú redukciu emisií a ani iné skleníkové efekty. Vidíme však, že letectvo má síce malý, ale nezanedbateľný vplyv na klímu Zeme.

*Tomáš Červeně*

tomas.cerven@fykos.cz

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace 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/>.