

## Úloha VI.3 ... ponorková choroba

5 bodů; (chybí statistiky)

Ponorka s objemem  $V = 6 \text{ m}^3$ , pevnými stěnami z uhlíkových vláken zanedbatelné tloušťky a vnitřní teplotou  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  se ponořila do hloubky  $d = 3 \text{ km}$ . Najednou přestaly stěny držet a ponorka se smrštila. Jaká v ní bude teplota?

Předpokládejte, že se ponorka neroztrhla, ale smrštila (i když z praxe víme, že nejde o realistický předpoklad) a též, že pasažéři a náklad ponorky působí jen zanedbatelným odporem proti smrštění (jedná se o realistický předpoklad). *Xellos předpovídá Darwinovy ceny 2025.*

Keďže je ponorka utesnená, je v nej normálne približne atmosférický tlak  $p_a \doteq 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  bez ohľadu na to, či je ponorená. Tým sa líši napr. od potápača, ktorý sa musí adaptovať na okolitý tlak. Tlak vody v hĺbke  $d$  je súčtom atmosférického a hydrostatického tlaku  $p = p_a + d\rho g$ . Na steny ponorky teda zvonku pôsobí obrovský tlak  $d\rho g$ , kde  $\rho \doteq 1 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  je prakticky konštantná hustota vody.

Zamyslime sa nad tým, aký termodynamický proces tu prebieha. Určite ide o veľmi rýchle zmrštenie, lebo ponorka nekladie skoro žiadny odpor po tom, čo steny povolia. Nemá teda zmysel počítat zmeny teploty počas tohto procesu, ale bude nás zaujímať teplota v novej mechanickej rovnováhe – keď je tlak vnútri rovnaký ako tlak vody  $p$ . Ustálenie tepelnej rovnováhy ale potrvá o dosť dlhšie, takže rýchly dej bude približne adiabatický.

Ďalej predpokladajme, že sa steny pri zmršťovaní pohybujú o dosť pomalšie ako rýchlosť zvuku vnútri ponorky. To znamená, že sa vnútri vždy počas procesu ustáľuje termodynamická rovnováha – tlak a teplota nezávisia na vzdialenosti od stien ponorky. Rýchlosť zvuku je „rýchlosť šírenia informácie“ v materiáli a ak je každá zmena objemu v porovnaní s ňou pomalá, vzduch všade vnútri si o tom okamžite „odovzdá informáciu“, teda vyrovná sa na rovnaký tlak a tiež rovnakú teplotu. Teraz nemusíme riešiť časový vývoj pre nejaký komplikovaný neustálený termodynamický dej, ale stačí nám vedieť začiatkový a koncový stav.

Pre výsledný tlak a objem pri adiabatickom deji platí

$$pV_f^\kappa = p_a V_a^\kappa,$$

kde  $V_f$  je koncový objem v mechanickej rovnováhe a  $\kappa \doteq 1,4$  je adiabatická konštanta pre vzduch, ktorý je hlavným obsahom ponorky (zanedbávame objem pasažierov a nákladu). Za predpokladu termodynamické rovnováhy tiež platí rovnica ideálneho plynu

$$p_a V/T = pV_f/T_f,$$

kde  $T = 293 \text{ K}$  je počiatková a  $T_f$  koncová absolútna teplota. Vyjadríme  $V_f$  z jednej z rovníc, dosadíme do druhej a upravíme na

$$T_f = T \left( 1 + \frac{d\rho g}{p_a} \right)^{1 - \frac{1}{\kappa}}.$$

Výsledná teplota je  $T_f \doteq 1500 \text{ K}$ , teda asi  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Na záver môžeme zistiť, v čom sa realita odlišuje od nášho výpočtu. Po katastrofe ponorky Titan, ktorá inšpirovala túto úlohu, vzniklo niekoľko simulácií s konkrétnym tvarom ponorky a materiálmi, z ktorých bola vyrobená. Odolnosť voči tlaku mal zabezpečovať valec z uhlíkových vláken so zaoblenými koncami z titánu.<sup>1</sup> Titánové konce boli nájdené na morskom

<sup>1</sup>V jednom z nich bol otvor na akrylové okno, ktoré pravdepodobne povolilo prvé, ale z fyzikálneho hľadiska sú také jednoduché slabé miesta nezaujímavé a v simuláciách boli neskôr úmyselne vynechané.

dne celé, zatiaľ čo valec sa pravdepodobne pod tlakom rozpadol na kúsky. Simulácie<sup>2</sup> napätia v týchto materiáloch a schopnosti odolávať jemným deformáciám pri rastúcom tlaku ukázali, že sa ponorka skutočne začne zmršťovať, a to najviac v strede valca z uhlíkových vlákien, ale pred tým, ako by mohol objem výrazne klesnúť, sa tento materiál rozpadne. Rozpad začína blízko pri hrane valca, kde je spojený s kovom. Tu je vždy najväčšia námaha materiálu, takže sa najrýchlejšie opotrebuje a objavajú sa tam prvé praskliny. Zvyšok valca sa potom rozpadne veľmi rýchlo a do ponorky natečie voda počas milisekúnd. Začiatočná deformácia je pomalšia, na malej vzdialenosti tento proces trvá možno desiatky milisekúnd, čo podporuje náš predpoklad že ide o proces pomalší ako rýchlosť zvuku vo vzduchu – každopádne vidno, že tento model sedí iba na veľmi malú časť procesu kolapsu. Objavilo sa aj tvrdenie, že teplota vnútri ponorky dosiahla teplotu na povrchu Slnka<sup>3</sup>, ktoré je možno založené na tomto výpočte, ale je spojené iba s 3D animáciou a nie fyzikálnou simuláciou. Môžeme tiež vypočítať objem v mechanickej rovnováhe  $V_f/V = (p/p_a)^{-\frac{1}{\kappa}} \doteq 0,02$ . Zo simulácií je jasné, že sa k tomuto objemu, a teda ani teplote ponorka zďaleka nepriblíži. Odolnosť kompozitu z uhlíkových vlákien závisí na jeho výrobe a optimistické odhady ukazujú, že by mohol odolať vyžadovanému tlaku. Máme rôzne nejasné informácie o tom, aký materiál použili v ponorky Titan, ale všetko nasvedčuje tomu, že kvalita nebola podstatná. Ponaučenie z tohto príbehu: budujme ponorky z pevnejších materiálov a rátaťme s ich opotrebením!

*Jakub Šafin*  
xellos@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. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.

Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

<sup>2</sup><https://www.engineering.com/story/a-nonlinear-structural-analysis-of-the-titan-submersible-shows-implosion-and-fracturing>, <https://www.youtube.com/watch?v=2N2cCceenZk>

<sup>3</sup><https://www.tiktok.com/@starfieldstudio/video/7247335287162998059>