

**Úloha I.P ... dekompresní nemoc**

5 bodů; průměr 3,50; řešilo 94 studentů

*Jistě jste někdy slyšeli (alespoň třeba ve filmu) o tom, že je nebezpečné se potápět ve velkých hloubkách a ihned poté cestovat letadlem. Pokud člověk toto udělá, hrozí mu tzv. dekompresní nemoc. Popište co nejpřesněji, jaké fyzikální procesy v lidském těle při této „nemoci“ probíhají (jak přesně obecné fyzikální zákony v tomto konkrétním případě působí) a proč jsou pro člověka nebezpečné. Je pro lidi nebezpečná i opačná poslounnost akcí, tedy cestování letadlem a následné potápění? (Při řešení můžete využívat všechny dostupné zdroje informací, ale následně musíte problém popsat vlastními slovy!)*

*Michal cítil náhlý pokles tlaku po úspěšně složené zkoušce z matematické analýzy.*

Kesonová (taktéž dekompresní) nemoc není nemoc v pravém slova smyslu, jedná se spíš o poškození lidského těla vlivem náhlého poklesu tlaku. K dobrému pochopení, co se v lidském těle při této nemoci děje, si nejprve musíme popsat, jak funguje rozpouštění plynů v kapalinách.

**Henryho zákon**

Henryho zákon popisuje závislost koncentrace rozpuštěného plynu v kapalině na tlaku. Vzorcem jde vyjádřit takto:

$$c = \alpha(t)P, \quad (1)$$

kde  $c$  je molární zlomek plynu v kapalině,  $\alpha$  je absorpční koeficient pro danou látku a daný plyn, který je obecně závislý na teplotě kapaliny  $t$ , a  $P$  označuje tlak v kapalině. My se omezíme na případ konstantní teploty, tedy  $\alpha(t)$  pro nás bude konstanta, kterou budeme dál značit jen  $\alpha$ .

**Vznik dekompresní nemoci**

Nyní se můžeme začít zabývat tím, co se děje v lidském těle při potápění a následném vynořování. Před ponořením je v krevním řečišti a tkáňových kapalinách určitý tlak, označme ho  $P_0$  a určitá koncentrace atmosférických plynů  $c_0$  (zejména dusíku  $N_2$ , který je v krevním řečišti zastoupen v nevázané podobě nejvíce ze všech plynů). Při ponořování pod vodu roste tlak, který na potápěče působí, roste tedy i tlak v jeho krevním řečišti a tkáňových mocích, který vystoupá až na hodnotu  $P_1$ . Jelikož je člověk teplokrevný tvor, bude jeho teplota stále stejná (nebo jen zanedbatelně jiná). Co se bude v těle potápěče dít s koncentrací rozpuštěných plynů? Odpověď je jednoduchá, stačí se podívat na vzorec (1). Absorpční koeficient  $\alpha$  je stále stejný, tlak vzrostl, takže musí vzrůst i koncentrace rozpuštěných plynů. Tento proces probíhá postupně, jak potápěč dýchá, postupně se mu v krvi a tkáňových mocích rozpouští více plynů. Co se nyní stane, když se potápěč náhle vynoří? Tlak v jeho těle se vrátí zpět na hodnotu  $P_0$  a aby byl zachován Henryho zákon, musí se i koncentrace rozpuštěných plynů v jeho těle vrátit na hodnotu  $c_0$ , tento proces ovšem probíhá velmi rychle. Část rozpuštěných plynů v potápěčově těle už dále nemůže zůstat rozpuštěna, místo toho se z tělních tekutin uvolní ve formě plynových bublinek. Tyto bublinky mají velmi negativní vliv na fungování lidského těla, zejména na nervovou a oběhovou soustavu.

Náš potápěč bude cítit bolesti svalů a kloubů, při výraznějším poklesu tlaku (a tedy větším množstvím uvolněného plynu) se dostaví svalové obrny a selhávání smyslových vjemů, nakonec i ztráta vědomí. Asi největším rizikem je vzduchová embolie (tj. zablokování cév vzduchovými bublinami), která může vyústit až v potápěčovu smrt. Náš potápěč trpí dekompresní nemocí.

*Odhad množství uvolněného dusíku*

Nyní si zkusíme jen přibližně vypočítat, jaký objem dusíku se v potápěčově těle uvolní, pokud se rychle vynoří z hloubky 50 m pod vodní hladinou. Děláme jen řádový odhad, proto místo s absorpčním koeficientem pro lidskou krev budeme počítat s absorpčním koeficientem pro dvojici dusík  $N_2$  a voda, který je přibližně  $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ , což lze najít v tabulkách. Henryho zákon si můžeme upravit do tvaru

$$\Delta c = \Delta P \cdot \alpha \quad (2)$$

Rozdíl tlaku v hloubce 50 m pod vodní hladinou a atmosférického tlaku můžeme odhadnout na  $h \rho g = 0,5 \text{ MPa}$ . Když tato čísla dosadíme do vzorce (2) dostáváme, že rozdíl molárních zlomků dusíku v potápěčově těle je přibližně  $\Delta c = 9 \cdot 10^{-5}$ . Když si uvědomíme, že v lidském těle je přibližně 5 l krve, tedy přibližně 280 molů krve (hustotu i molární hmotnost krve aproximujeme hustotou a molární hmotností vody, která je přibližně  $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ). Nakonec tedy dostáváme, že se v potápěčově těle uvolní přibližně  $280 \cdot 9 \cdot 10^{-5} = 0,025$  molů dusíku, který ovšem při atmosférickém tlaku zaujme objem  $V = 24 \cdot 0,0251 = 0,61$ , kde jsme využili znalost toho, že ideální plyn při atmosférickém tlaku zaujímá objem přibližně 24 l.

Vidíme tedy, že objem uvolněného dusíku v potápěčově těle zdaleka není zanedbatelný.

*Ochrana proti dekompresní nemoci*

Náš potápěč se proti dekompresní nemoci mohl ochránit, kdyby se z velké hloubky (tedy z oblasti velkého tlaku) vynořoval postupně a dělal v průběhu vynořování bezpečnostní zastávky. V takovém případě by totiž pokles tlaku v jeho těle nebyl tolik skokový, koncentrace rozpuštěných plynů v jeho těle by se snižovala postupně a přebytečný plyn by se mohl přes jeho dýchací soustavu odvést pryč z těla.

Dekompresní nemoc nenastává jen u náhlého vynořování, ale obecně při náhlém poklesu tlaku v lidském těle, tedy například při porušení přetlakové komory letadla ve velké nadmořské výšce atd.

Léčba dekompresní nemoci je velmi jednoduchá, je jen potřeba člověka vrátit do prostředí se zvýšeným tlakem, aby se bublinky plynu v jeho těle opět rozpustili v jeho tělních tekutinách a následně snižovat tlak postupně až na hodnotu atmosférického tlaku. K tomu se používají přetlakové (hyperbarické) komory.

Při opačné posloupnosti akcí, tedy při náhlém zvyšování tlaku uvnitř potápěčova těla mu dekompresní nemoc nehrozí, neboť se žádný plyn v jeho těle neuvolňuje. To ale neznamená, že by to nebylo pro lidské tělo nebezpečné. Při náhlém zvyšování tlaku, který na lidské tělo působí, mohou být nevratně poškozeny různé orgány, zejména ty, které obsahují dutiny naplněné vzduchem (např. hrozí protržení ušních bubínků nebo poškození plic). Je nutné si ale uvědomit, že v tomto případě je lidské tělo poškozeno v důsledku naprosto jiných fyzikálních zákonů, než v případě dekompresní nemoci.

*Michal Nožička*  
nozicka@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/>.