

Potápění ve vodním barometru

Potápěč Shayne Pemberton z Richardsonu v Texasu jednou odpočíval u svého zahradního rybníčku a napadlo jej naplnit zavařovací sklenici vodou a vyzvednout ji dnem vzhůru nad hladinu. Náhodou vplula do sklenice malá rybka. To mu vniklo následující myšlenku: Co kdyby byla taková “sklenice” vysoká 18 metrů, měla průměr 3 metry, byla naplněná mořskou vodou, otevřený konec byl pod vodou a dno nad hladinou moře? Jaký by byl tlak na hladině moře uvnitř takové sklenice? A co by se stalo, kdyby dovnitř vplaval potápěč?

Taková sklenice vody vysoká 18 metrů by byla něco jako rtuťový barometr, který se používá k měření atmosférického tlaku. Skutečný barometr je skleněná trubice o průměru 6,35 mm naplněná rtutí a na jejím dolním konci je otevřená nádržka plná rtuti (viz obr. 1).

Rtuťový sloupec končí asi 2,5 cm pod uzavřeným koncem trubice a jeho celková výška činí asi 76 cm od hladiny rtuti v nádržce. Délka sloupce závisí na atmosférickém neboli barometrickém tlaku, který je u hladiny moře přibližně 1 kg na 1 cm², což se blíží tzv. absolutnímu tlaku (psia).^{*} Když se blíží bouře nebo když se barometr vynese na nějakou horu (jak to prováděli “přírodní filozofové” v 16. století), výška rtuťového sloupce klesá úměrně klesajícímu barometrickému tlaku.

Rtuťový sloupec stojí nad nádržkou rtuti, protože atmosférický tlak působící na hladinu v nádržce vytlačuje rtuť nahoru. “Prázdný” prostor nad rtuťovým sloupcem je ve skutečnosti naplněn rtuťovými parami.

Tato teze by se dala prokázat naplněním barometru mořskou vodou namísto rtuti (pozor na fyzický kontakt se rtutí, neboť ta je jedovatá). Kdyby se trubice naplněná mořskou vodou postupně vyzvedávala uzavřeným koncem nad mořskou hladinu, zůstala by zcela naplněná až do výše 10 metrů. Nad touto výškou by se hladina mořské vody v trubici oddělila od uzavřeného konce trubice a vyzvednout ji výše nad hladinu moře by již nebylo možné, bez ohledu na to, jak vysoko by se trubice zvedala. A kdyby byla trubice dost velká na to, aby do ní vplaval potápěč, zaznamenal by při stoupání vzhůru pokles tlaku.

Jedná se o naprosto stejný princip jako u rtuťového barometru, jediný rozdíl je v tom, že kapalinou je zde voda. Vodní barometry se skutečně vyrábějí (náplní je sladká voda), ale jejich výška musí být místo 76 cm 11 metrů. (11 metrů sladké vody = 1 atmosféra tlaku = 76 cm rtuti = 10 metrů mořské vody.) Prázdný prostor nad sloupcem je ve skutečnosti vodní pára o tlaku 0,05 absolutní atmosféry (ata).

Sací čerpadlo

Vodní barometr a sací čerpadlo mají hodně společného. Jestliže by se otevřel uzavřený horní konec barometru, spadla by voda zpět na hladinu moře. Nyní bychom mohli pro trubici s uzavřeným horním koncem použít vakuové sací čerpadlo k načerpání mořské vody zpět do trubice. Voda by vystoupala do výše 10 metrů a dál by to nebylo možné. U sladkovodních studní nelze vyčerpávat vodu z větší hloubky než jedenáct metrů, neboť platí stejný princip jako u barometru se sladkou vodou – voda prostě nevystoupá výše než 11 metrů.

Potápění ve vysokých polohách

Co se stalo té rybce, která vplavala do sklenice v rybníčku Shayne Pembertona a co by se stalo potápěči ve vodním barometru? Připomeňme si, že tlak na hladině moře činí u dolního konce vodního sloupce 1 ata a tlak v horním prostoru ve výšce 10 metrů je 0,05 ata (tj. tlak vodní páry). Kdyby potápěč vyplaval ve vodním sloupci např. do výše 5 metrů, klesl by absolutní tlak na polovinu absolutní atmosféry (0,5 ata), což

je ekvivalent barometrického tlaku ve výši 5 486 metrů nad mořem.

Kdyby potápěč vyplaval do výše 7 metrů, klesl by tlak na 0,3 ata, tj. ekvivalent 9 144 metrů nad mořem. Vrchol Mt. Everestu je asi 8 839 metrů nad mořem a skafandr kosmonautů vytváří tlak srovnatelný s tlakem ve výšce 9 235 metrů nad mořem.

Tento potápěč by se ocitl v jakémisi umělém světě a byl by vystaven dvěma problémům, s kterými se potápěči při "normálním" potápění nesetkávají. Za prvé: Potápěč dýchající vzduch v sedmi metrech vodního sloupce by upadl do bezvědomí kvůli nedostatku kyslíku (nastala by u něj hypoxie), protože parciální tlak kyslíku ve výšce 9 144 metrů nad mořem činí pouze 0,06 atm, což je pouhých 6 procent tlaku u hladiny moře. Proto jsou skafandry kosmonautů naplněny čistým kyslíkem.

Za druhé: Potápěč by byl zasažen fatální dekompresní výškovou nemocí (DCS), neboť dusík rozpuštěný v jeho tkáních by se změnil v bubliny. Aby se kosmonauti vyhnuli DCS, musí nejdříve dýchat až čtyři hodiny čistý kyslík (při tlaku shodném s tlakem u hladiny moře), čímž se eliminuje rozpuštěný dusík, a teprve potom si mohou nasadit dekompresní kosmický skafandr.

Představte si tyto hypotetické podmínky: Sloupec stlačitelného tlaku vzduchu vysoký 330 480 m se nahradí sloupcem nestlačitelné mořské vody vysokým 10 metrů. Oba sloupce působí na hladinu oceánu stejným tlakem. Potápění ve vodním barometru by bylo ideální pro výuku naměřeného a absolutního tlaku – ovšem nebýt hypoxie a DCS.

Vřící chlad

Proč je výše sloupce v barometru s mořskou vodou limitovaná na 10 metrů a proč nelze vypumpovat vodu ze sladkovodní studny z hloubky větší než 11 metrů? Je tomu tak kvůli varu. Při pokojové teplotě 22°C činí tlak vodní páry 0,05 atm neboli 0,7 psi. Když se voda zahřeje, tlak páry stoupá a když teplota dosáhne 100°C, činí tlak páry 14,7 psi neboli 1 atm. Voda vře, když se tlak páry rovná absolutnímu tlaku.

Teď se na to podívejme jinak. Když stoupáme do hor, voda vře při nižším tlaku (páry), protože se snižuje atmosférický tlak. Opačný princip platí u tlakového hrnce, kde se zvyšuje tlak, aby se bod varu posunul (oddálil) na vyšší teplotu.

Dekompresní bublinky

Ze všeho shora uvedeného vyplývá důležité ponaučení ohledně bublinek vznikajících během dekomprese. Bublinky vznikají, když parciální tlak všech rozpuštěných plynů (dusíku, kyslíku, oxidu uhličitého, hélia atd.) – plus tlak vodní páry – překročí absolutní tlak. Tento jev je známý jako "supersaturace" (přesycení). Při potápění je na rozdíl od varu tlak vodní páry mnohem nižší než parciální tlak rozpuštěného dusíku, proto k tvorbě bublinek přispívá spíše dusík než vodní pára.

Někteří vědci zabývající se dekompresí tvrdí, že těsně předtím, než se začnou tvořit v krvi a v tkáních bublinky, je možno snést i větší supersaturace, ale takové nadměrné supersaturace jsou spíše malého rozsahu. "Tiché" bublinky, které nezpůsobují žádné příznaky DCS, se mohou vyskytovat prakticky po všech ponorech, kromě těch úplně triviálních. Při ultrazvukových vyšetřeních na bublinky se u lidí běžně objeví bublinky již při tak nízkých supersaturacích jako 0,4 atm (6 psi; 12 metrů mořské vody). Správná je zřejmě dekompresní teorie, která říká, že velké supersaturace mají za následek tiché bublinky, které jsou tak malé a tvoří se v takových místech, že nezpůsobují žádné příznaky.

A co se týče tvorby bublinek, existuje ještě jedno zajímavé ponaučení: Vodní pára opustí hladinu vody

jenom v případě, kdy je nad hladinou plynné okolí. Kdyby ve vodním barometru nebyl nad hladinou plyn, bylo by možné vyzvednout sloupec vody ve vzduchu tisíce metrů vysoko a nechat jej dotýkat se přímo "stropu" trubice. Zní to sice divně, ale tlak na samém vrcholu sloupce by byl o stovky atmosfér nižší než atmosférický tlak. To se také experimentálně prokázalo, a sice s použitím velmi čisté a velmi horké vody, která nevřela, i když tlak páry byl stokrát vyšší než atmosférický tlak. Když se konečně vytvořila bublina čisté vodní páry, znamenalo to, že voda dosáhla hranice své "pevnosti v tahu" a začala se rozpadat. Tento jev se nazývá tvorba bublin "de novo", neboli tvorba bublin "z ničeho". V reálném světě se však bubliny vždy tvoří "z něčeho" a to něco je malá dutina plynu, ať již v mořské vodě nebo v lidském těle. A pak že je fyzika hrozná nuda!

O autorovi

Richard Vann začal pracovat ve Středisku pro potápěčskou medicínu a environmentální fyziologii (Duke Center for Diving Medicine and Environmental Physiology) jako specialista s doktorátem v oboru biomedikální inženýrství. Věnoval se výzkumu tvorby bublin a výměny inertních plynů. Vyvinul dekompresní postupy, které se používají při potápění pro vědecké účely a při volném pobytu kosmonautů v prostoru mimo vesmírnou stanici. Vann je u DAN viceprezidentem pro výzkum.