

Názov projektu: CIV – Centrum Internetového vzdelávania FMFI

Číslo projektu: SOP ĽZ 2005/1-046

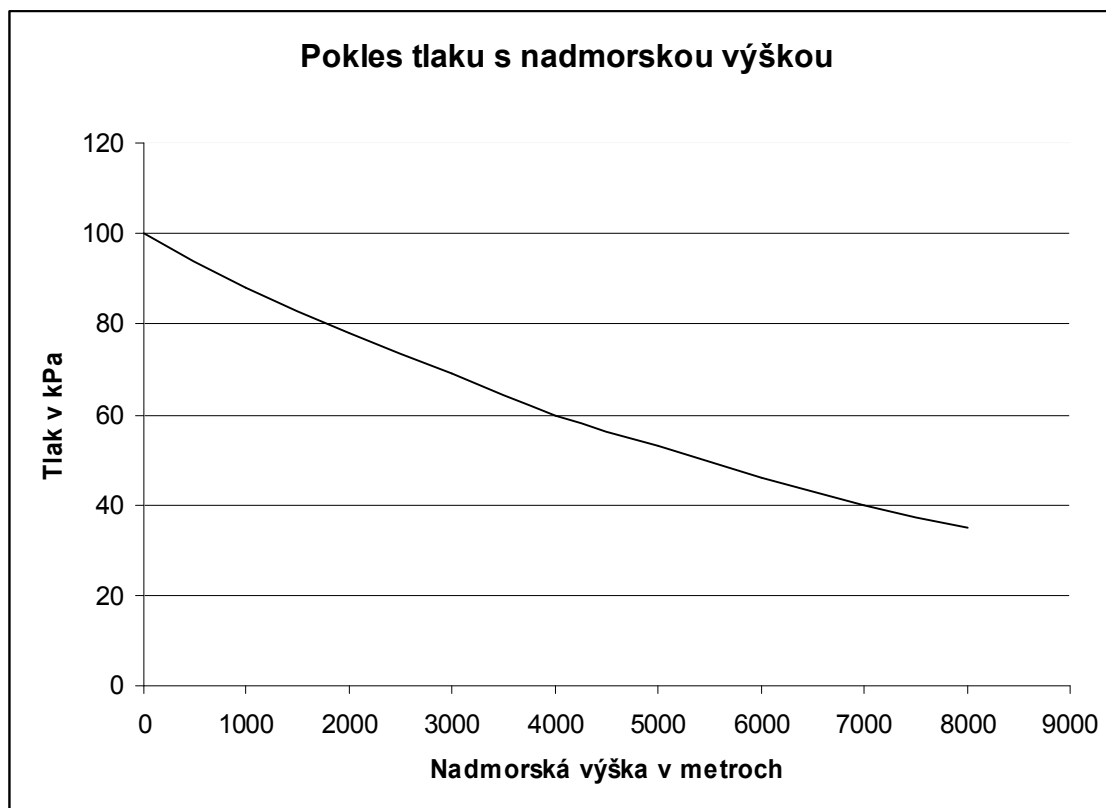
ITMS: 11230100112

## **Ako dýchajú horolezci a potápači**

**Matúš Lazúr**

**FMFI UK**

Na to, že v našom prirodzenom prostredí na nás pôsobí neustály tlak okolitého vzduchu, sme si natoľko zvykli, že si jeho existenciu ani neuvedomujeme. Úplne sme sa životu v takýchto podmienkach prispôbili. To, že sa jedná o krehkú rovnováhu pochopíme, keď sa pokúšame dostať do prostredia v ktorom je okolitý tlak odlišný od toho, na aký sme prispôbení.



Cesta smerom k nižšiemu tlaku vedie smerom do väčších nadmorských výšok. Pri hladine mora má atmosférický tlak hodnotu asi 100 kPa. Teda priestor na jeho znižovanie je ohraničený. Pri zväčšovaní výšky tlak postupne klesá. Na najvyššom bode na povrchu, teda vo výške asi 9000 metrov nad morom, je jeho hodnota už len asi 30 kPa, teda menej ako tretina bežného atmosférického tlaku. V nasledujúcej tabuľke a grafe môžete vidieť ako postupne klesá tlak s nadmorskou výškou. Hodnoty v tabuľke sú zaokrúhlené na desiatky kPa.

Výška v m nad morom	atmosférický tlak v kPa
0	100
1000	88
2000	78
3000	69
4000	60
5000	53
6000	46
7000	40
8000	35

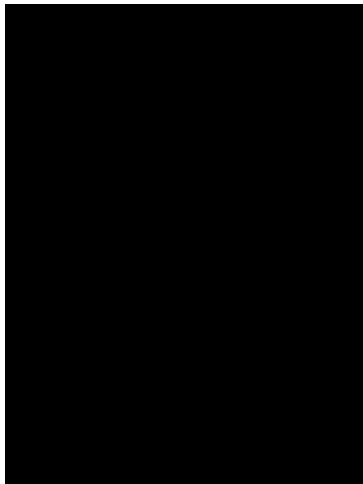
Z predošlej tabuľky je vidno, že už vo výške okolo 5000 metrov má hodnota tlaku len polovičnú hodnotu. Aj napriek tomu tam môže bežný človek bez väčších problémov pracovať. Vo väčších výškach však už nastupujú pomerne vážne problémy s nedostatkom kyslíka. Človek totiž potrebuje stále množstvo kyslíka pre organizmus, no dýchaním dostávame do pľúc stále približne rovnaký objem vzduchu. Pri nižšom tlaku je v tomto objeme samozrejme stále menej kyslíka a tak sa nám zrýchľuje a prehľbuje dýchanie, nastupuje tzv. výšková choroba z nedostatku kyslíka (hypoxia). Preto horolezci používajú kyslíkové prístroje ktoré im obohacujú dýchaný vzduch o čistý kyslík. Napriek tomu boli zdolané aj najvyššie hory sveta bez použitia kyslíkového prístroja. Podobne v lietadlách sú pre prípad ak by došlo k porušeniu tesnosti kabíny kyslíkové masky. Dopravné lietadlá sa bežne pohybujú vo výškach okolo 10 000 metrov, kde je tlak okolitého vzduchu menej ako 25 kPa.

Oveľa zložitejší ako pobyt v riedkom vzduchu však je pobyt v prostredí s tlakom vyšším ako je atmosférický tlak. Už aj kôli tomu, že priestor na jeho zmenu je zhora oveľa menej ohraničený. Človek sa s takýmto problémom stretol vtedy, keď chcel vymyslieť zariadenie pomocou ktorého by mohol pracovať pod hladinou vody. Mal na to rôzne dôvody. Od lovu morských živočíchov, cez stavebné práce pod vodou až k záchrane nákladu z potopených lodí. Voľné potápanie, teda len s nádychom, samozrejme fungovalo už storočia. No ak chcel človek zostať pod vodou dlhšie, musel vynájsť spôsob, ako by mohol dýchať pod vodou.

Možno mnohých z vás napadlo použiť potápačskú trubicu ktorú používame, aby sme pri plávaní mohli mať hlavu ponorenú pod vodou. Čo ju takto predĺžiť aby sme sa mohli dýchať aj hlbšie pod vodou? Toto riešenie má jeden zásadný problém. Atmosférický tlak na nás pôsobí nielen zvnútra, ale aj zvonku. Samozrejme tlak vzduchu v pľúcach a vonkajší tlak sú rovnaké. Na hladine vody je tlak ktorý na nás pôsobí tlak rovný atmosférickému tlaku, no pod hladinou vody sa k tomuto tlaku pripočítava aj hydrostatický tlak vody. Podľa známeho vzťahu si môžeme overiť že celkový okolitý tlak rastie každých 10 metrov o 100 kPa. Teda už 10 metrov pod hladinou vody je tlak dvojnásobný oproti tlaku na hladine. Najväčšia hĺbka pod hladinou je vyše 10 000 metrov. Výsledný tlak v tejto hĺbke je teda približne 1000 krát väčší ako atmosférický. Okolité tlak vo vode na nás teda tlačí veľkou silou už od pomerne malej hĺbky. Ak by sme sa chceli nadýchnuť z trubice v ktorej je tlak rovnaký ako na hladine, museli by sme pľúcami prekonať tento vonkajší tlak, aby sme sa mohli vôbec nadýchnuť. A na to nie sú naše pľúca usposobené. Takouto metódou by sme nemohli dýchať ani 1 meter

pod hladinou. Podstatou dýchania pod vodou teda je, že musíme dýchať vzduch s rovnakým tlakom ako je okolitý tlak.

Najjednoduchším zariadením ktoré umožňovalo prácu pod vodou bol potápačský zvon tzv. kesón. Je to v podstate nádoba obrátená hore dnom. Po ponorení do vody hladina vnútri zvona stúpne do takej výšky aby sa tlak vzduchu vnútri zvona rovnal okolitému tlaku vody. Potápač stál vo zvone tak, aby mal hlavu v priestore v ktorom bol vzduch a mohol vykonávať pod vodou rôzne činnosti. Čas zotrvania pod vodou bol úmerný objemu zvona. Vzduch vnútri zvona postupne strácal kyslík a obohacoval sa vydychovaným oxidom uhličitým. Po istom čase sa musel zvon vytiahnuť aby sa vzduch v ňom vymenil. Potápačský zvon opísal už Aristoteles v 4. stor p. n. l. Používal sa bežne v stredoveku na práce pod vodou.



Obr. Potápačský zvon

Pri práci pod vodou v potápačskom zvone sa u mnohých potápačov vyskytli i pri zachovaní dostatku kyslíka v zvone zdravotné problémy ktoré sa prejavovali prudkými bolesťami svalov a často sa táto choroba končila trvalými následkami až smrťou potápača. Tejto chorobe dali názov kesónova choroba. Jej podstata nebola dlho známa. Objasniť si ju môžeme nasledovne:

Určite ste si už všimli, že keď otvárate fľašu s nejakým sýteným nápojom, pri jej otvorení počujete syčanie unikajúceho plynu. Vnútri fľaše bol teda vyšší tlak ako atmosférický. Zároveň sa v nápoji vo fľaši objaví množstvo bubliniek. Ak ponecháme napríklad fľašu sýtenej minerálky otvorenú, po čase z neč všetok plyn unikne. To znamená že časť plynu sa uvoľní hneď pri otvorení fľaše (znížení tlaku) a časť postupne. Ak máte v škole vývevu, môžete si vyskúšať nasledovný pokus. Zoberte pohár sýtenej minerálky a položte ho pod zvon vývevy. Po zapnutí vývevy sa v kvapaline hneď objaví veľké množstvo bublín unikajúceho plynu a kvapalina akoby vri. O var nejde, pretože únik plynu je najprudší na začiatku a so znižovaním tlaku pomaly ustáva (pretože všetok plyn už unikal). Kvapalina teda môže obsahovať rozpustené plyny a tieto sa z nej pri zníženom tlaku uvoľňujú v podobe väčších alebo menších bubliniek.

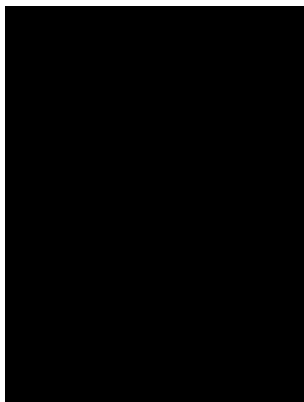
Množstvo rozpusteného plynu v kvapaline závisí od teploty a tlaku. Pri nižšej teplote a vyššom tlaku sa v kvapaline dokáže rozpustiť viac plynu. Závislosť popisuje Henryho zákon o ktorom sa môžete dozvedieť viac v chémii. Preto z vychladených nápojov unikajú bublinky pomalšie. Rozpustnosť samozrejme závisí od druhu plynu. Pri normálnom tlaku a teplote 20°C sa v litri vody rozpustí 1,7 g oxidu uhličitého, 0,04 g kyslíka, 0,02 g dusíka, 0,0017 g hélia a len 0,0016 g vodíka.

Ako teda dochádza ku kesonovej chorobe. Potápač pod vodou dýcha vzduch pod tlakom, aký je v okolitom prostredí. Ten je tým vyšší, čím hlbšie sa potápač ponorí. Pri tom dochádza k rozpúšťaniu vdychovaných plynov v krvi. Kým kyslík sa chemicky viaže na hemoglobín, dusík sa rozpúšťa v krvi. Pokiaľ je potápač pod vodou, nič sa nedeje. No keď sa náhle vynorí, dôjde k rýchlemu poklesu tlaku, podobne ako pri otvorení fľaše a dusík sa začne vylučovať z krvi v podobe bubliniek ktoré sú tým väčšie, čím výraznejší je pokles tlaku. Bublínky dusíka upchávajú drobné alebo aj väčšie cievy čo môže v prípade postihnutia ciev zásobujúcich mozog alebo srdce skončiť smrťou. Príčinou kesonovej alebo dnes už nazývanej dekompresnej choroby je teda prudké zníženie tlaku pri vynorovaní. Preto sa potápači vynárajú postupne a podrobujú sa tzv. dekompresii pričom sa dusík z krvi vylúči pomaly a nevznikajú nebezpečné bublinky plynu. Počas vynorovania sa potápači zastavujú vo vopred vypočítanej hĺbke na určený čas – tzv. dekompresná zastávka. Jej dĺžka závisí od hĺbky ponoru a aj času stráveného v nej, pretože rozpúšťanie dusíka v krvi prebieha postupne. Vynáranie sa z väčších hĺbok potom trvá kôli dekompresii aj niekoľko hodín.

S pobytom pri vyššom tlaku sú však spojené aj iné problémy. Obyčajný vzduch ktorý dýchame obsahuje asi 78 % dusíka a 21% kyslíka. Dusík vo vzduchu sa však pri vdychovaní pri vysokom tlaku stáva narkotickým, teda má omamné účinky čo samo o sebe nie je nebezpečné ale vedie k strate sebakontroly čo môže viesť následne k nehode. Tento jav sa nazýva opojenie z hĺbok. Preto sa so stlačeným vzduchom potápa len do hĺbok asi 30 metrov.

Pri dosahovaní čoraz väčších hĺbok sa používali nové zmesi plynov ktoré mali obmedziť alebo zabrániť horeuvedených problémom. Jednou z možností bolo nahradiť dusík vo vzduchu iným vhodným plynom. Takýmto plynom sa stalo hélium. Nespôsobí na organizmus a jeho rozpustnosť v krvi je oveľa menšia. Takáto zmes sa nazýva HELIOX. Jej použitie je obmedzené vzhľadom na veľmi vysokú cenu hélia. Preto sa komerčne najviac používa čiastočná náhrada dusíka héliom pod názvom TRIMIX. Použitie vodíka do zmesi je možné, ale z technických príčin sa nepoužíva. Zmesi vodíka s kyslíkom sú vysoko výbušné čo zabránilo rozšíreniu tejto kombinácie. Obmedzenie nežiadúcich účinkov dusíka sa dosahuje aj lacnejším spôsobom - obohatením vzduchu kyslíkom. Takáto zmes pozostáva z približne 34 % kyslíka a zvyšok tvorí dusík. Takáto zmes sa však môže podľa obsahu kyslíka používať len do určitej hĺbky.

Pri ponoroch do väčších hĺbok sa okrem dusíka stáva nepriateľom aj samotný kyslík. Pre dýchanie ho samozrejme potrebujeme stále, no ak je ho vo vdychovanom plyne viac ako potrebujeme, stáva sa škodlivým, ba dokonca jedovatým. Pri dýchaní totiž stále vdychujeme približne rovnaký objem plynu. Naše telo však potrebuje stále rovnaké množstvo kyslíka nezávisle od okolitého tlaku. Pri zvyšovaní tlaku však vdychované množstvo plynu obsahuje stále viac kyslíka ktorý telo už nepotrebuje. Naopak kyslík sa stáva toxickým a môže vážne poškodiť pľúca. Naše telo je teda veľmi závislé na podmienkach v zemskej atmosfére a ich narušenie pri zvyšovaní tlaku spôsobuje mnoho problémov. Kôli tomu musia dýchacie zmesi pre veľké hĺbky obsahovať menej kyslíka, napríklad len 4%. Takáto zmes je však nepoužiteľná pri nižšom tlaku, teda v menších hĺbkach. – kde by viedla prakticky behom minúty k uduseniu. Potápanie do väčších hĺbok napríklad až do 300 metrov je spojené s použitím postupne niekoľkých druhov zmesí s rôznym zložením vrátane zmesí používaných počas dekompresných zastávok. Takýto ponor potom trvá niekoľko hodín a presný postup pobytu v rôznych hĺbkach a čas potrebný na dekompresiu musí byť vopred naplánovaný. Čo i len pár sekúnd navyše strávených vo veľkej hĺbke predlžuje výrazne čas potrebný na dekompresné zastávky a môže viesť k problémom s nedostatkom dýchacej zmesi.



Obr. Potápačský prístroj

Podrobnejšie si to ukážeme na nasledujúcom príklade. Potápač má zásobu vzduchu v oceľových alebo hliníkových tlakových fľašiach. Typický tlak vo fľaši je až 30 MPa, teda 300 krát viac ako je hodnota atmosférického tlaku. Človek pri bežnej činnosti spotrebuje za minútu 20 litrov vzduchu. Potápačské fľaše majú rôzne objemy a môžu byť spájané do sérií. Pre jednoduchosť si zoberme fľašu s objemom 10 litrov. V nej je teda asi 3 000 litrov vzduchu ktorý nám pri atmosférickom tlaku vystačí na 150 minút. No už v 10 metroch je to polovica a v 100 metrovej hĺbke je to len 15 minút ! Preto si potápači musia presne strážiť čas a zásobu zmesi na dýchanie. Do výbavy patrí aj špeciálny počítač , ktorý na základe hĺbky a času dokáže presne vypočítať ďalší postup. Každý potápačský prístroj je vybavený signalizáciou rezervného objemu vzduchu ktorý sa dá použiť len manuálnym prepnutím ventilu.

Potápači majú oprávnenia podobne ako vodiči automobilov. Najbežnejšie je rekreačné potápanie so stlačeným vzduchom do hĺbky maximálne 30 metrov. Súčasný (z roku 2005) rekord v potápaní s dýchacím prístrojom je 330 metrov pri ktorom potápač zotrval v maximálnej hĺbke 10 minút a celkový čas potrebný na dekompresiu bol 529 minút. V záverečnej fáze ponoru niesol sedem fliaš so stlačeným plynom a dvadsať ďalších fliaš s rôznymi dýchacími zmesami bolo pripravených v miestach určených na dekompresné zastávky.

