

Smrtelná nehoda potápěče v důsledku vadného vysokotlakého manometru

Roman Kudela¹

Abstrakt

V návaznosti na potápěčskou nehodu, při níž došlo k úmrtí potápěče, se článek zabývá příčinou této nehody – nepřesností měření zásoby dýchacího plynu v lahvi během ponoru. Probírá problematiku zkoumání manometru poškozeného potápěče a zabývá se problematikou měření tlaku dýchacích směsí v potápěčských lahvích. Přináší příčinu vzniku této nehody – chybné měření, v jehož v důsledku došlo k úmrtí potápěče.

Klíčová slova

Měření tlaku dýchací směsi, potápěčská láhev, potápění, vysokotlaký manometr.

Abstract

Following a diving accident in which a diver died, the article deals with the cause of this accident - the inaccuracy of measuring the supply of breathing gas in the cylinder during the dive. Article discusses the problem of examining the pressure gauge of a deceased diver and deals with the problem of measuring the pressure of breathing mixtures in diving cylinders. It brings the cause of this accident - an incorrect measuring, as a cause of diver's death.

Keyword

Diving, diving cylinder, high-pressure gauge, measuring of breathing gas pressure.

1. Úvod

Použití nevhodného nebo poškozeného vysokotlakého manometru je příčinou mnoha nehod při pracovních činnostech prováděných s využitím dýchací techniky i při

¹ Mgr. Roman Kudela, CRAA – Ústav bezpečnosti práce ve výškách, z. ú.

potápění. V roce 2017 došlo ke smrtelné nehodě potápěče, způsobené poruchou vysokotlakého manometru, jež měla vliv na špatný úsudek poškozeného potápěče.

2. Vysokotlaký manometr jako hlavní ukazatel množství dýchací směsi v potápěčských lahvích

Pohyb člověka pod vodní hladinou, je pohybem v ne zcela přátelském prostředí. Okolní médium – voda, je pro něj nedýchatelná. Aby nebyl limitován dobou, na níž je schopen zadržet dech, potřebuje, aby mu dýchací médium bylo buď dodáváno z hladiny, anebo aby si jej nesl s sebou v zásobníku.

Jako zásobník dýchacího média se v potápěčské praxi používají tlakové láhve se stlačeným plynem. Měření stavu plynu v zásobníku potápěčem se provádí pomocí měřicích přístrojů, které se nazývají manometry. Jedná se o tlakoměry uzpůsobené k použití pod vodou. Mohou být buď mechanické, nebo elektronické.

2.1 Typy potápěčských vysokotlakých tlakoměrů-manometrů

Potápěčské láhve se plní vysokotlakým kompresorem zpravidla na tlak 200 až 300 bar. Potápěč následně tuto nesenou zásobu plynu spotřebovává dýcháním a také k plnění kompenzátoru vztlaku a popř. k plnění potápěčského suchého obleku.

Potápěčské přístroje se dělí na přístroje s otevřeným okruhem a s uzavřeným okruhem. Podle druhu potápěčského přístroje je kladena důležitost přesnosti měření zejména u přístrojů s otevřeným okruhem zvaných též OC (z anglického výrazu *open circuit*). U těchto přístrojů, používaných hojně rekreačními potápěči, je nadechnutý vzduch následně vydechnut, bez dalšího využití, do okolní vody. Tímto je nevratně ztracen. Zásoba dýchacího média se během ponoru v závislosti na hloubce a času snižuje.

K měření tlaku v potápěčských lahvích se používají vodotěsné vysokotlaké manometry. Z hodnoty tlaku plynu v lahvích lze vypočítat jeho množství, které má potápěč v danou chvíli k dispozici.

Potápěčské vysokotlaké manometry, též nazývané HP (odvozeno od anglického výrazu *high pressure*), případně finimetr nebo fini (z německého *Finimeter* které pro označení „měření konce“ vychází z latinského výrazu pro konec – „*finis*“), atd.

2.2 Princip manometru

Mezi hlavní konstrukční principy měření tlaku pomocí přístroje zvaného manometr se řadí tzv. Bourdonova trubice². Jedná se o kruhovitě zahnutou dutou trubici, která bývá zpravidla pod ciferníkem. Jedním koncem do ní vstupuje pod tlakem plyn nebo kapalina (používá se taktéž pro měření tlaku kapalin) a na druhém konci je zaslepená. Na zaslepeném konci je umístěn převodní mechanismus, který pohyb Bourdonovy trubice převádí na otáčivý pohyb ručičky, jež na přehledném ciferníku zobrazuje hodnotu tlaku. Při tlakování má Bourdonova trubice tendenci se narovnávat, čímž právě přes ono převodní ústrojí rozpožbuje ručičku stupnice.

Kromě mechanických se používají manometry tvořené elektronickými součástkami. Elektromechanické tlakové čidlo posílá po kabelu či dálkově údaje o tlaku, který na něj působí. Tato hodnota se pak zobrazuje na displeji.

3. Zkoumaný manometr a příslušenství

Potápěčský vysokotlaký kontrolní manometr značky Apeks byl v čase zkoumání připojen k plicnímu regulátoru (potápěčské automaticy) značky Apeks, první stupeň DS4, 300bar. Druhý stupeň dvoustupňové plicní automatiky byl rovněž Apeks, typ TX 40. První stupeň měl připojení do ventilu pomocí šroubení DIN G5/8. K prvnímu stupni byla namontována jedna LP (*low pressure*) středotlaká hadice sloužící k dofukování (v tomto případě) suchého potápěčského obleku, HP (*high pressure*) vysokotlaká hadice s vodotěsným vysokotlakým manometrem zn. Apeks. Uvedený regulátor byl namontován na primární potápěčské tlakové láhvi o objemu 15 litrů (černé barvy).

² Eugène Bourdon (8. dubna 1808 – 29. září 1884) byl francouzský fyzik, hodinář a inženýr. V roce 1849 zkonstruoval dodnes používané zařízení pro měření tlaku, tzv. Bourdonovu trubici.

Bourdon založil společnost *Bourdon Sedeme Company* vyrábějící jeho vynález. Americká patentová práva v roce 1852 koupil Edward Ashcroft.

Ohledáním plicní automatiky byl zjištěn dobrý technický stav 1. a 2. stupně. Při následném namontování plicní automatiky na plnou tlakovou láhev byla přezkoušena její funkčnost. Nebyly shledány žádné závady, plicní automatika byla plně funkční.



Obr. 1: Plicní automatika poškozeného

Pro měření tlaku v láhvi a pro kontrolu funkce vodotěsného HP manometru značky Apeks byl použit digitální manometr zn. Siemens.

V průběhu ohledání vysokotlakého (HP) manometru byla zjištěna závažná závada. Manometr byl funkční jen částečně. Při kontrolovaném plnění (tlakování) potápěčské lahve poškozeného za současné kontroly připojeného vysokotlakého manometru poškozeného (viz tabulka 1), manometr vždy ukazoval hodnotu minimálně o 30 bar vyšší oproti skutečnému tlaku v lahvi!

Tab. 2: Výsledky zkoušky vzestupným tlakováním

Kontrola vzestupným tlakováním	
skutečný tlak v láhvi [bar]	tlak zobrazovaný manometrem poškozeného [bar]
0	30
10	40
20	50
30	60
40	70
50	80
60	90
70	100
80	110
90	120
100	130
110	140
120	150
140	170
160	190
180	200
200	205
220	210

Stejně tak při kontrolovaném vypouštění lahve poškozeného za současné kontroly vysokotlakého manometru ukazoval manometr hodnoty významně rozdílné proti skutečnému tlaku v lahvi (viz tabulka 2).



Obr. 3: Manometr poškozeného

Tab. 2: Výsledky zkoušky sestupným tlakováním

Kontrola sestupným tlakováním	
skutečný tlak v láhvi [bar]	tlak zobrazovaný manometrem poškozeného [bar]
220	240
200	220
180	200
160	185
140	160
120	150
110	130
100	120
90	120
80	120
70	115
60	110
50	110
40	105
30	100
20	95
10	60
1,9	50

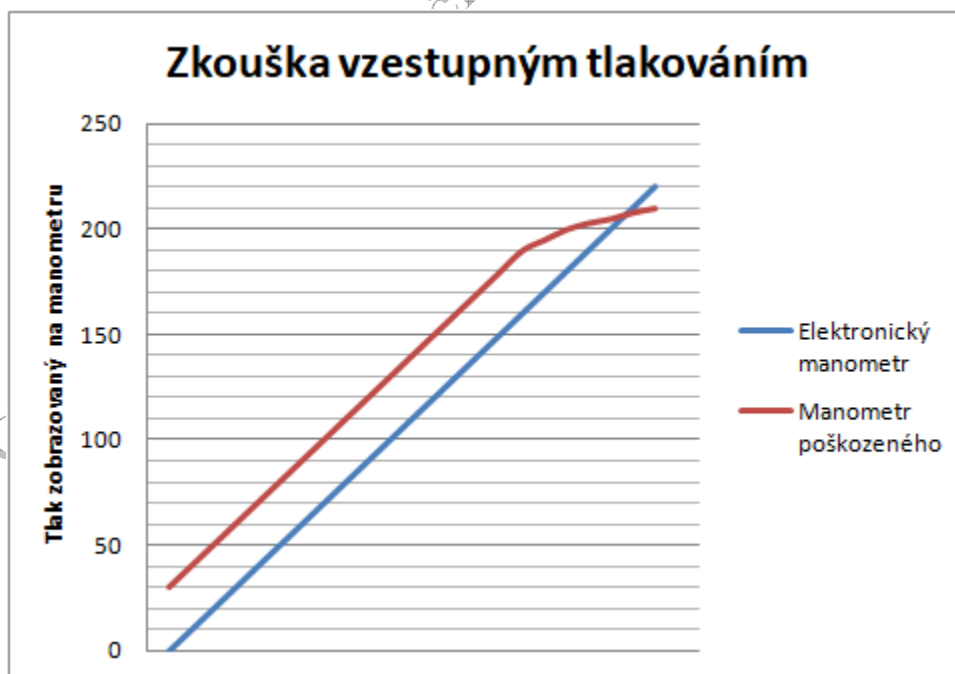
4. Výsledky zkoumání

Výstroj poškozeného byla tovární výroby různých renomovaných světových výrobců potápěčské výstroje. Tu samou hojně používají běžní potápěči. Byla odborně sestavena způsobem, jaký stanovuje výrobce a byla odpovídající prováděnému ponoru.

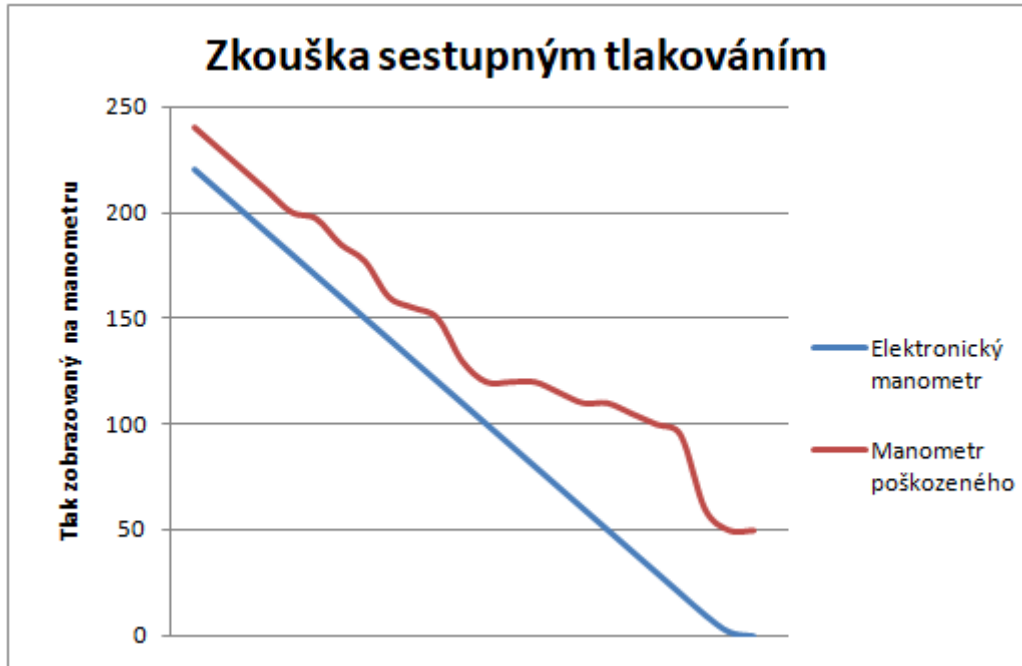
V průběhu zkoumání byly všechny prvky výstroje, zejména dýchací plicní automatiky, zkontrolovány vizuálně a prakticky byla ověřena jejich funkčnost. Také byly přeměřeny parametry podle doporučení výrobce S výjimkou výše probíraného vysokotlakého manometru Apeks nevykazovala žádné závady a v době použití byla plně funkční. Byla v dobrém technickém stavu svědčícím o řádné péči a údržbě. Jednotlivé součásti použité výstroje byly zcela kompatibilní.

Složení plynu v láhvi se nepodařilo zjistit z důvodu, že použitá láhev byla v době zajištění po nehodě téměř prázdná.

Při zkoumání vysokotlakého manometru zn. Apeks byla zjištěna závada (viz výše), kdy manometr při tlaku 0 bar ukazuje hodnotu 30 až 50 bar, tedy hodnotu výrazně vyšší, než je skutečný tlak plynu v láhvi. Porucha manometru se projevuje lineárně pouze s rostoucím tlakem (tedy při plnění lahve). Situace je ovšem jiná při snižování tlaku v láhvi (tak jak se tomu děje v průběhu ponoru, kdy potápěč plyn v láhvi průběžně spotřebovává), kdy docházelo ke skokovému pohybu ručičky manometru (k jejímu zasekávání) a tedy k chybnému ukazování skutečného tlaku plynu v potápěčském přístroji (viz tabulka provedeného měření).



Obr. 4: Graf zkoušky vzestupného tlakování. Zobrazuje rozdíl mezi skutečným tlakem v láhvi změřený elektronickým manometrem a hodnotami, které ukazoval manometr poškozeného.



Obr. 5: Graf zkoušky sestupného tlakování. Zobrazuje rozdíl mezi skutečným tlakem v láhvi změřený elektronickým manometrem a hodnotami, které ukazoval manometr poškozeného.

5. Diskuse

Při zjišťování příčiny nehody byl, kromě technického stavu výstroje zkoumán i dekompresní počítač poškozeného. Ten poskytl údaje o průměrné hloubce, době ponoru, tlaku v láhvi na počátku a konci ponoru a poskytl údaje o spotřebě plynu poškozeného.

Množství spotřebovaného vzduchu potápěčem je závislé na jeho minutové ventilaci plic a ve vztahu k tlaku okolního prostředí, resp. tlaku plynu, který nadechuje. Z Boyleova-Mariottova (fyzikálního) zákona³ je známo, že spotřeba potápěče v hloubce 10 metrů je dvojnásobná oproti spotřebě na hladině. V hloubce 20 metrů je trojnásobná, ve 30 metrech čtyřnásobná atd. V potápěčské praxi se průměrná spotřeba potápěče přepočítává na spotřebu při atmosférickém tlaku, aby vypočtené hodnoty byly navzájem porovnatelné. Spotřeba přepočtena na atmosférický tlak je označována akronymem SAC⁴, kdy se u zkušeného potápěče pohybuje okolo 20 litrů za minutu. U nováčků,

³ Tlak × objem = konstanta

⁴ *surface air consumption*, případně *surface air consumption rate* je tzv. „hladinová spotřeba plynu“, tedy změřené množství plynu, které potápěč spotřebuje na povrchu za jednu minutu. Její znalost umožňuje potápěči naplánovat si dobu ponoru v závislosti na množství plynu v láhvi a hloubce, v níž se pohybuje.

stejně jako u potápěče ve stresu, je tato hodnota značně vyšší. Pro teoretické výpočty a praktické použití se používá konstanta spotřeby dýchacího plynu 30 litrů/min.

Po nehodě byl v primární láhvi poškozeného zjištěn tlak 1,9bar (láhev byla téměř prázdná). Láhev měla být před ponorem naplněna na tlak 200 bar, tedy v okamžiku zahájení ponoru obsahovala 3.000 litrů plynu. Standardním obsahem tlakových lahví je stlačený vzduch.

Zásoba vzduchu při předpokládané spotřebě potápěče 30 litrů/min. a předpokládané maximální hloubce 29 metrů, by měla použitímí zohlednění známých fyzikálních zákonů vydržet na dobu cca 19 minut, a to tak, aby v lahvi zůstala bezpečnostní rezerva 50 bar. Jelikož průměrná hloubka ponoru činila 18,6 metrů, je předpokládaná možná doba delší a to teoreticky 28 minut (maximálně 38 min. do vydýchání celé lahve bez ponechání rezervy). Celková doba ponoru postiženého byla téměř 30 minut. Spotřeba dýchací směsi u poškozeného v tomto případě zcela odpovídala realitě. Podle množství vzduchu, které měl poškozený v láhvi po nehodě lze usoudit, že jeho minutová spotřeba byla o něco vyšší než 30 l/min.

V průběhu ponoru (nebo již před ním) došlo k závadě na vysokotlakém manometru, a ten ukazoval (zejména při vyprazdňování lahve) významně vyšší tlak než byl skutečně v lahvi poškozeného. Pravděpodobně vlivem stresu, možná v důsledku bezmezné víry v údaj na vysokotlakém manometru, si poškozený neuvědomil, že skutečný čas strávený pod vodou neodpovídá tlaku v lahvi. Proto pokračoval v ponoru až do úplného vydýchání vzduchu v láhvi. Tuto situaci následně řešil okamžitým (krizovým) výstupem na hladinu, který ale nezvládl.

6. Závěr

Vyhodnocení všech dostupných materiálů, rozbor výpovědí svědků a ohledání zajištěné výstroje s jistotou vyloučilo cizí zavinění. V tomto případě se jednalo o chybné vyhodnocení údaje na pokazeném vysokotlakém manometru a na něj navazující špatnou kalkulaci zásoby vzduchu potápěčem.

Jako nejpravděpodobnější průběh nehody se jeví vyčerpání veškerého dýchacího média ještě v hloubce, kdy poškozený v důsledku závady na vysokotlakém manometru domníval, že stále disponuje dostatečným množstvím plynu. V reakci na to, kdy při

nádechu namísto očekávaného vzduchu narazil na značný nádechový odpor, pravděpodobně zpanikařil a zprudka vyrazil k hladině.

Nezvládnutí krizového výstupu se projevilo jeho přílišnou rychlostí. Značná výstupová rychlost vedla ke vzniku plynové embolie. Ta byla příčinou úmrtí, což potvrdil i pitevní protokol.

Z hlediska potápěčských zkušeností poškozeného lze uvést, že se jednalo o certifikovaného potápěče, ovšem s nevelkým počtem ponorů a s ne zcela dostatečnými praktickými zkušenostmi. Zkušenější potápěči znají svou spotřebu vzduchu, v závislosti na hloubce a době ponoru mají představu o aktuálním stavu vzduchu v láhvi a manometr jim slouží pouze k ověření výpočtu.

Každý ponor je nezbytné plánovat – s ohledem na množství plynu v láhvi a hloubku ponoru stanovit takový čas, aby měl potápěč dostatečnou rezervu plynu pro výstup i pro řešení mimořádných situací. V základních kurzech bývá začínajícím potápěčům vštěpována zásada, ukončit ponor a zahájit výstup jakmile manometr ukáže 50 bar. V tomto případě ukazoval manometr 50 bar i při prázdné láhvi (viz tabulka 2), takže „začátečnická zásada“ by poškozenému nestačila. Proto je nutné každý ponor plánovat a následně se podle toho plánu potápět.

Celý článek s fotografiemi ve větším rozlišení je na webu:

<https://craa.cz/2024/03/01/smrtena-nehoda-potapece-v-dusledku-vadneho-vysokotlakeho-manometru/>

Použití zdroje

- [1] PIŠKULA, František; ŠTĚTINA, Jiří a PIŠKULA, Michal. *Sportovní potápění*. Svazarm. Praha: Naše vojsko, 1985.
- [2] VRBOVSKÝ, Vladimír; JAHNS, Jan a kol. *Potápění s přístrojem*. Praha: Svaz potápěčů České republiky, nedatováno.
- [3] JAHNS, Jan. *Fyzika*. Praha: Svaz potápěčů České republiky, 2008.
- [4] KATZ, Pavel. *Potápěčská technika*. Knihnice Svazarmu (Naše vojsko). Praha: Naše vojsko, 1979.