

Míchání dýchacích směsí (nitrox, trimix) revidované vydání

Jan Jahns



Hlučín, 2013

Míchání umělých dýchacích směsí.

1. Úvod.

První otázka, která obvykle napadne laika, který se doslechl o umělé dýchací směsi k potápění je: „ K čemu umělé dýchací směsi, když jsme zvyklí dýchat vzduch a ten se dá snadno stlačit kompresorem do zásobní láhve ?“. Odpovědí by mohlo být: „ano, a většina lidí se se vzduchem i potápí, avšak dusík, který vzduch z převážné většiny obsahuje, není pro potápění příliš příznivý. Proto je za některých okolností vhodné použít dýchací směsi umělé.“

Plyn	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	He	Kr	H ₂
V _i /V (%)	78,03	20,99	0,933	0,030	0,0018	0,0005	0,0001	0,00005

Tab.1. Objemové koncentrace plynů v suchém atmosférickém vzduchu

Jak vidíme, je složení vzduchu přibližně následující: 21 % kyslíku (O₂), 78 % dusíku (N₂) a 1 %, které zbývá do 100 %, tvoří většinou (0,9 %) argon (Ar), malinko (0,03%) oxidu uhličitého (CO₂) a jen stopy dalších vzácných plynů. Běžně se ve vzduchu vyskytuje i nějaké množství vodní páry. Z toho všeho lidský organizmus potřebuje - a v průběhu látkové přeměny také zužitkovává - pouze kyslík. Zbytek, a to je převážně dusík, jen „ředí“ kyslík.

Avšak dusík obsažený ve vzduchu se skutečně projevuje minimálně dvojím nemilým působením:

- rozpouští se v závislosti na velikosti a době expozice jeho parciálnímu tlaku (k vysvětlení pojmu parciálního tlaku viz dále) ve tkáních lidského organismu a při snížení okolního tlaku (například při výstupu z hloubky) se může vylučovat ve formě bublinek, které vyvolávají tzv. dekompresní chorobu.

- z doposud ne zcela probádaných příčin vyvolává při zvýšení jeho parciálního tlaku tzv. hloubkové opojení, tj. stav blízký opojení alkoholickému, prohlubující se s rostoucí hloubkou ponoru. Při dýchání vzduchu je to přibližně od hloubek 30 – 40 metrů. Takový stav organismu rozhodně potápěči v hloubce nemůže svědčit.

Pro potápění do velkých hloubek – už přes cca 50 metrů – je nevhodná i poměrně vysoká měrná hmotnost (hustota) dusíku, která stlačováním narůstá a zvětšuje odpor vůči proudění směsi jak v podpurné dýchací technice, tak v dechových cestách lidského těla a tím znesnadňuje dýchání. To je třetí nesnáz s dusíkem.

Proto je vhodné snížit podíl dusíku v dýchaném médiu k minimu. Minimem by mohla být nula, tzn. dýchali bychom čistý kyslík. Bohužel však ani toto řešení není zcela reálné – obzvláště chceme-li se potápět do hloubek větších než 6 metrů, případně i do menších,

avšak na delší dobu. I kyslík, který k životu potřebujeme, se totiž stává při dýchání pod větším parciálním tlakem jedovatým: podle velikosti parciálního tlaku, pod nímž je dýchán a doby expozice tomuto tlaku vyvolává buďto náhlý epileptický záchvat nebo pozvolna vyřazuje z provozu plíce. Jeho nezdravé působení je širší, avšak už i to stačí k tomu, abychom se snažili tyto vlivy eliminovat.

2. Krátká fyzikálně - fyziologická vložka.

K dalšímu výkladu je nutno objasnit především některé základní fyzikální pojmy a poučky:

1. Atmosférický tlak p_{atm} (u hladiny moře) je tlak, vyvolaný tíhou atmosféry – plynného obalu Země - a je roven přibližně 0,1 MPa = 100 kPa (= 1 bar). Pro převážnou část výpočtů nám tato hodnota vystačí – modifikovat bychom ji museli v případě větších nadmořských výšek (přes 500 – 700 m.n.m.).

2. Hydrostatický tlak p_h , tedy tlak vyvolaný v gravitačním poli Země sloupcem sladké vody v hloubce h , roste o hodnotu 0,1 MPa (tedy o stejný tlak, jaký má vzduch u mořské hladiny) na každých 10 metrů hloubky. Příklad: hydrostatický tlak v hloubce 10 metrů je roven 100 kPa (1 bar), v hloubce 30 metrů 300 kPa (3 bary). V mořské vodě je tento tlak o cca 2 % větší.

3. Celkový tlak v hloubce (p_{ch}) je roven součtu atmosférického tlaku na hladině p_{atm} a tlaku hydrostatického p_h , tedy $p_{ch} = p_{atm} + p_h$ (Pascalův zákon). Pak tedy celkový tlak v hloubce 10 metrů je roven 200 kPa (100 kPa + 100 kPa) a ve 30 metrech 400 kPa (100 + 300 kPa) (= 4 bary).

4. Boyleho – Mariottův zákon. Po stlačení plynu z původního tlaku p_0 na tlak p je jeho objem V tolikrát menší, kolikrát větší je jeho tlak p . Tedy $p \cdot V = p_0 \cdot V_0$, kde V_0 je původní objem plynu. Při snižování tlaku se naopak objem plynu stejným způsobem zvětší.

Příklad: Plyn v láhvi o objemu 10 litrů ($V_0 = 10$ litrů) o tlaku 20 MPa ($p_0 = 20$ MPa) zaujme po rozeptnutí do normálního tlaku ($p = 0,1$ MPa, tedy 200krát menšího) objem $V = 2000$ litrů. To vyplývá také z původní rovnice, ve které osamostatníme V , obdržíme

$$V = \frac{p_0 \cdot V_0}{p}$$

a dosadíme uvedené hodnoty.

Poznámka a) Protože v uvedeném příkladu je tlak p rovný tlaku atmosférickému p_{atm} (0,1 MPa či také 1 bar), můžeme stanovený objem V (2000 litrů) nazvat hladinovým ekvivalentem zásoby vzduchu v uvedené láhvi a označit ho jako V_{atm} . S tímto pojmem se setkáme například tehdy, když budeme stanovovat úbytek tlaku v zásobních lahvích.

Poznámka b) Pro takové výpočty, obzvláště při jejich provádění „z hlavy“, je výhodné počítání tlaku v barech, kdy za normální atmosférický tlak dosazujeme číslo 1 (1 bar). Pak zmíněný hladinový ekvivalent obdržíme prostým vynásobením objemu láhve a tlaku v ní. Přitom zde i v dalším tlak v láhvi znamená měřený přetlak vůči tlaku atmosférickému.

5. Stavová rovnice plynů. Ze zkušenosti víme, že plněná láhev se zahřívá. Horký je totiž vzduch při stlačování (pokud přepouštíme z jiné láhve, pak ta se ochlazuje –zákon zachování energie). O kolik se vzduch zahřeje, není nutno počítat. Důležité však je, že při odstavení láhve a jejím ochlazení na okolní teplotu se mění tlak v ní. Je-li teplota plynu v láhvi po naplnění T_0 a jeho tlak p_0 , pak po ochlazení na teplotu T bude tlak p . Ten stanovíme podle vztahu

$$p = p_0 \cdot \frac{T}{T_0} \quad (\text{zákon Charlesův})$$

Aby to však nebylo zcela jednoduché, je třeba teplotu dosadit v kelvinech (K). Převod mezi teplotou T v kelvinech a teplotou t ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$) je však jednoduchý:

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.$$

Příklad: Láhev zahřátá na teplotu 40°C po naplnění na tlak $p_0 = 20$ MPa (200 barů) se ochladila na 17°C . Jaký tlak p v ní naměříme ?

Řešení: Teplota $T_0 = t_0 + 273 = 40 + 273 = 313$ K. Teplota $T = 17 + 273 = 290$ K.

Pak $p = 20 \cdot (290 / 313) = \underline{18,5 \text{ MPa}}$ (185 barů).

Zákon Boyleův –Mariottův a Charlesův (spolu se zákonem Gay-Lussacovým) spojuje tzv. stavová rovnice ideálního plynu:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$$

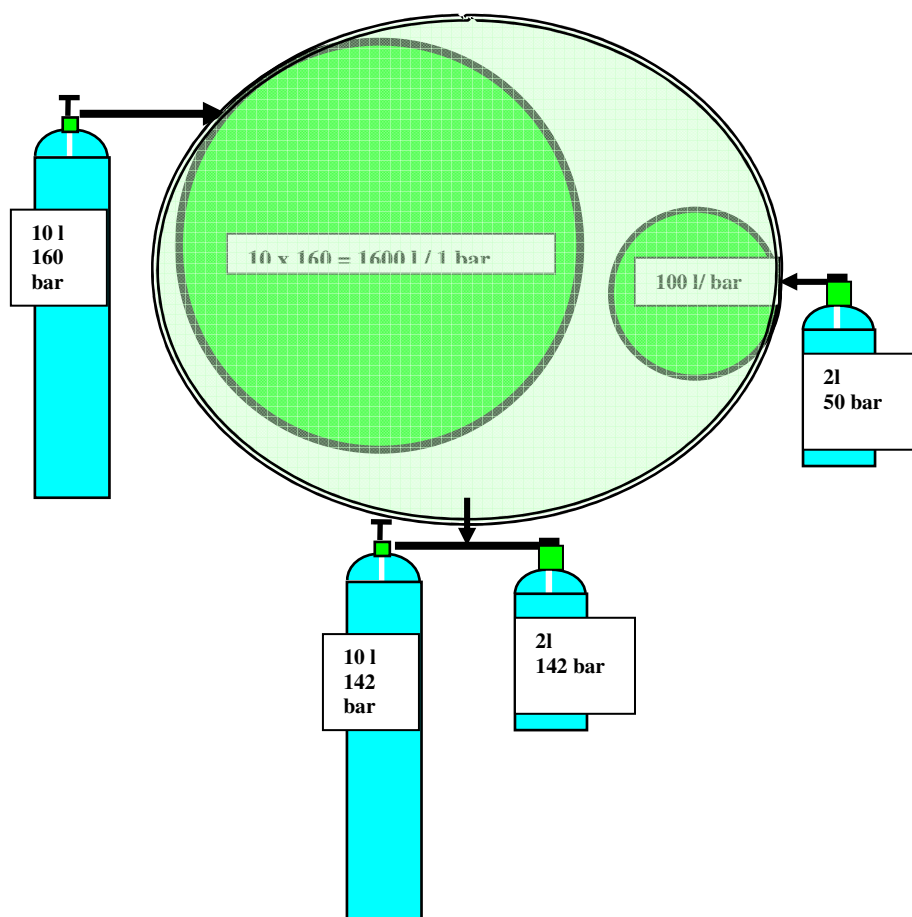
ze které lze ostatní zákony jednoduše získat tím, že jednu z veličin ponecháme konstantní (např. $V = V_0$). Pro míchání nitroxu přiblížení ideálního plynu zcela dostačuje, avšak pro míchání trimixu, kdy do hry vstupuje nejčastěji hélium, je třeba ji, tedy hlavně Boyleho - Mariottův zákon, poněkud modifikovat.

6. Častokrát bývá přístroj plněn tak, že je do něj napouštěn plyn ze zásobních lahví. Například hélium nebo kyslík napouštíme do své láhve do určitého tlaku při míchání směsi

metodou parciálních tlaků. Přitom nás zajímá kolik plynu v zásobníku zůstane. Při plnění argonové láhve ze zásobníku obvykle přepouštíme argon až do vyrovnání tlaků v obou lahvích. Zkusíme nejprve vyřešit tento případ.

Příklad: Máme k dispozici zásobník argonu o objemu 10 litrů a o tlaku 16 MPa (160 barů). Chceme doplnit naši láhev o objemu 2 litry a o zbytkovém tlaku 5 MPa (50 barů). Stanovit výsledný tlak po přepuštění a vyrovnání tlaku v obou lahvích.

Řešení úvahou (viz obr. 1): Po myšleném rozepnutí argonu z obou přístrojů do normálního tlaku p_{a0} bychom z láhve o objemu 10 litrů získali "bublinu" o objemu 1600 litrů (jelikož se objem zvětšil 160krát), kdežto z láhve o objemu 2 litry jen 100 litrů (objem se zvětšil jen 50krát, tedy na $2 \cdot 50 = 100$ litrů).



Obr. 1. K přepouštění plynů.

Sečtením obou objemů dostáváme (při normálním atmosférickém tlaku) výsledný objem $1600 + 100 = 1700 \text{ l}$.

V dalším kroku si představíme, že tento objem vtláčíme do hypotetického přístroje, který má objem rovný součtu objemů obou přístrojů, tedy $10 + 2 = 12$ litrů (přepouštěčkou

jsou skutečně obě láhve propojeny a tvoří dočasně jeden celek). Přitom by muselo dojít ke změně objemu v poměru původního objemu vzduchu (1700 l) na objem této složeniny (12 l), tedy v poměru $1700 / 12 = 141,7$. Podle naší známé poučky se v tomtéž poměru musí zvýšit tlak, a tak dostáváme v přístrojích výsledný tlak asi 142krát větší než normální atmosférický tlak p_{a0} , tzn. výsledný tlak je 14,2 MPa (142 bar).

Označíme-li si objemy přístrojů a příslušné tlaky v nich V_1 , p_1 , V_2 , p_2 , pak pro výsledný tlak p platí vztah

$$p \cdot V = (p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2),$$

ve kterém je

$$V = V_1 + V_2.$$

(Středoškoláci se mohou rozpomenout na zákon zachování energie, jelikož $p \cdot V$ je skutečně výraz pro práci či energii).

Výsledný vztah pro přepouštění mezi dvěma přístroji má tedy tvar

$$p = \frac{(p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2)}{(V_1 + V_2)}.$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu hodnoty z předchozího příkladu, dostaneme shodný výsledek:

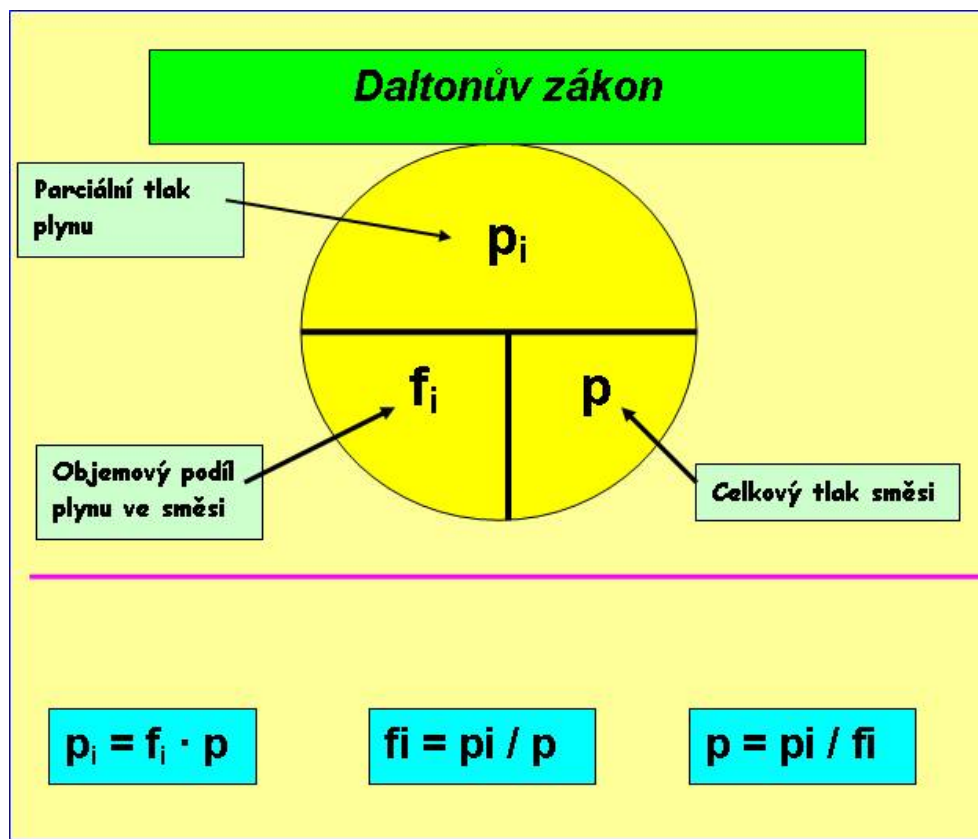
$$p = \frac{(16 \cdot 10 + 5 \cdot 2)}{(10 + 2)} = (160 + 10) / 12 = \underline{14,2 \text{ MPa}}.$$

Podobným způsobem je nutno se rozhodnout tehdy, když k namíchání směsi máme k dispozici zásobníky různých plynů (kyslík, hélium, nitrox). I tady obvykle volíme pořadí podle tlaků v zásobnících.

Upozornění: Uvedené vztahy platí samozřejmě až po vyrovnání nejen tlaků, nýbrž i teplot.

7. Daltonův zákon. Na celkovém tlaku p směsi plynů se každý (i) z plynů, tvořících směs, podílí parciálním tlakem p_i , který je úměrný jeho objemovému podílu $f_i = V_i / V$ ve směsi. Jinými slovy: parciální tlak plynu stanovíme vynásobením jeho podílu ve směsi celkovým tlakem směsi, tedy $p_i = f_i \cdot p$. Odtud také

$$f_i = \frac{p_i}{p}$$



Obr. 2. Pomůcka k výpočtům dle Daltonova zákona

Příklad: dýcháme-li vzduch na hladině (při tlaku 100 kPa), pak parciální tlak kyslíku v něm je 21 kPa (= 0,21 · 100 kPa). V hloubce 30 metrů je pak 84 kPa (= 0,21 · 400 kPa).

Další příklad: Parciální tlaky kyslíku a dusíku v láhvi, naplněné na 22 MPa (220 barů) jsou $p_{O_2} = 0,21 \cdot 22 \text{ MPa} = 4,62 \text{ MPa}$ (42,6 barů) a $p_{N_2} = 0,78 \cdot 22 \text{ MPa} = 17,16 \text{ MPa}$.

Poznámka: používáme – li číselnou hodnotu koncentrace k_i v procentech, nezapomeňme ji v předchozích výpočtech vydělit číslem 100, jelikož $f_i = k_i(\%) / 100$!

Porozumění pojmu parciální tlak je pro míchání směsí nejdůležitější. Při potápění je navíc fyziologické působení téměř všech plynů závislé právě na jejich parciálním tlaku.

8. Působení kyslíku. Jak již bylo řečeno, kyslík je k životu potřebný. Při potápění musí být dodáván do plic pod určitým minimálním parciálním tlakem, a sice pod parciálním tlakem $p_{O_2}^{min} = 16 \text{ kPa} = 0,16 \text{ baru}$. To znamená, že při okolním tlaku 100 kPa musí být v dýchaném médiu obsažen podílem alespoň 16 %. Při snižování jeho parciálního tlaku začíná hlavně mozek strádat nedostatkem kyslíku, dochází k celkové dezorientaci a pod

parciálním tlakem 10 kPa a méně k bezvědomí a k úmrtí. K bezvědomí při nízkém p_{O_2} dochází bez znatelných varovných příznaků a rychle.

Uvedenému stavu se říká hypoxie a směs, ve které je méně než 16 % kyslíku (a při normálním atmosférickém tlaku tedy nedosahuje 16 kPa), se nazývá hypoxická. I když taková směs není použitelná na hladině, je možné ji použít od určité hloubky. Tak například směs s 10 % kyslíku bude dodávat uživateli v 11 metrech (kde je celkový tlak roven 210 kPa) kyslík pod stejným parciálním tlakem jako při dýchání vzduchu na hladině ($p_{O_2} = 0,1 \cdot 210$ kPa = 21 kPa) a přípustného minima $p_{O_2}^{min}$ dosáhne již v 6 metrech (v tlaku 160 kPa).

Naopak směs o podílu kyslíku větším, avšak jen do 21 %, se nazývá normoxická. Normoxickou směsí je především vzduch, avšak i směs 19 % kyslíku a 81 % hélia.

Pokud však směs obsahuje více jak 21 % kyslíku, nazývá se hyperoxická. V normálním prostředí dýcháme kyslík pod parciálním tlakem 21 kPa a dlouhodobě (po více dnů) smí být dýchán pod parciálním tlakem až asi 50 kPa bez škodlivých účinků. Takový parciální tlak kyslíku se nastavuje například při dlouhodobých pobytech pod vyšším tlakem – v podmořských obydlích nebo v přetlakových kabinách používaných při saturačním potápění.

Při zvýšení p_{O_2} nad 50 kPa je při delších pobytech pod vodou potápěč ohrožen otravou kyslíkem. Do cca 100 -120 kPa je to otrava tzv. pomalá, postihující především plíce a projevující se navenek hlavně kašláním a postupným vyřazením velké části plic z funkce. Kyslík pod vyšším parciálním tlakem totiž napadá hlavně výstelku plicních sklípků, které se bortí a přestávají fungovat. Stupeň postižení se pro určitou dobu strávenou pod daným parciálním tlakem kyslíku dá stanovit a při technickém potápění by neměl překročit 300 jednotek OTU (Oxygen Tolerance Unit).

Další zvýšení parciálního tlaku kyslíku již může vyvolat rychlou (akutní) otravu kyslíkem, kyslíkovou intoxikaci CNS, která se po slabých a krátkých varovných příznacích projeví záchvatem velice blízkým epileptickému a který obvykle končí smrtí postiženého, častokrát po rozsáhlé vzduchové embolii.

Pro velmi náročné ponory (s rebreathery nebo přes 100 metrů hloubky) se uvádí jako maximální přípustný parciální tlak kyslíku $p_{O_2}^{max} = 120$ kPa (1,2 baru).

Pro náročné hloubkové ponory (přes 40 metrů) nebo pro zvýšenou fyzickou námahu pod vodou se za hraniční hodnotu bere $p_{O_2}^{max} = 140$ kPa (1,4 baru).

Pro potápění s nitroxem (do 40 metrů) je tato mez $p_{O_2}^{max} = 150$ kPa (1,5 baru).

Pro dekompresi, kdy se namáhat nemusíme, platí $p_{O_2}^{max} = 160$ kPa (1,6 baru).

Při dekompresi prováděné v kabinách je přípustné využít $p_{O_2}^{max} = 220$ kPa (2,2 baru) a léčebné postupy v barokomoře připouštějí i $p_{O_2}^{max} = 280$ kPa (2,8 baru).

Byla vypracována tabulka NOAA, uvádějící maximální přípustné doby pobytu při vystavení jednotlivým parciálním tlakům kyslíku.

Abychom uvedené hodnoty parciálních tlaků kyslíku nepřekročili, musí být pro potápění kyslík rozředěn, tedy smíchán s některým fyziologicky inertním plynem (tj. takovým, který se neúčastní fyziologických procesů), zvaným také diluent.

3. Míchání nitroxu.

Ve vzduchu roli diluentu plní vlastně dusík. Za normálního atmosférického tlaku, ve kterém běžně žijeme, zdraví neškodí. K potápění je ho však ve vzduchu příliš, a proto je snahou nahradit ho alespoň zčásti kyslíkem – alespoň do té míry, aby v hloubce parciální tlak kyslíku nepřekročil přípustnou mez $p_{O_2}^{max}$ (např. dle CMAS 140 kPa (1,4 baru), v SPČR 150 kPa = 1,5 baru). Obohacením vzduchu o kyslík dostáváme směs, kterou nazýváme **nitrox** (takto i čteno, složenina z řeckého **nitrogenium** pro dusík a **oxygenium** pro kyslík).

Název směsi bývá doplněn číselným značením, označujícím procentuální složení směsi. Přitom se obsah kyslíku udává nejčastěji jako první. Tak například Nitrox 36/64 znamená, že jde o směs kyslíku s dusíkem, obsahující 36 % kyslíku a 64 % dusíku. Vzduch je z tohoto hlediska jakýmsi přírodním Nitroxem 21/79: do koncentrace dusíku přitom započítáváme i ten malý podíl argonu, který má vlastnosti velice blízké vlastnostem dusíku. Takto budeme postupovat u nitroxových směsí i nadále.

Obvykle bývá využíváno nitroxových dýchacích směsí o obsahu kyslíku vyšším než v běžném vzduchu. Proto se také někdy hovoří o nitroxové směsi jako o "obohaceném vzduchu" a některé organizace, zabývající se technickým potápěním (TDI, IANTD aj.), používají pro nitroxovou směs označení EANxx (Enriched Air Nitrox, xx je pak podíl kyslíku v procentech a koncentrace dusíku je jeho doplňkem do 100 %, takže nemusí být uváděna). Proto EAN32 je jiné označení pro směs Nitrox 32/68.

Lze se setkat ještě s jedním způsobem pojmenování nitroxu, a sice Nitrox I pro Nitrox 32/68 a Nitrox II pro Nitrox 36/64, vycházející ze studií organizace NOAA.

Jaké jsou tedy důvody pro použití nitroxu místo vzduchu? Při ponorech není zdaleka důležité samotné obohacení vzduchu o kyslík, nýbrž snížení podílu dusíku v dýchaném médiu. Tím se totiž pro danou hloubku oproti vzduchu sníží parciální tlak dusíku v dýchané směsi, a tudíž především i jeho množství rozpuštěné ve tkáních organismu. Samozřejmě se tak zmenší všechny nepříznivé důsledky s tím související.

Použití nitroxu je tedy přirozeným řešením především pro delší ponory, u nichž je žádoucí na maximální možnou míru snížit obsah dusíku v dýchané směsi, aby se snížila všechna dekompresní rizika.

V důsledku použití nitroxu v průběhu ponoru se oproti vzduchu

- prodlouží nulové časy
- zkrátí nutná doba dekomprese
- sníží množství zbytkového dusíku v těle po vynošení a tím se

- zkrátí nutné povrchové intervaly pro opakované ponory
- zkrátí i čekací doby do odletu
- zkrátí nutná doba adaptace na větší nadmořskou výšku
- údajně snižuje stupeň pocitu únavy potápěče po ponoru.

Pokud se nevyužije všech těchto výhod a postupuje se stejně jako při použití vzduchu, je tím značně sníženo riziko vzniku dekompresní nemoci a tím se zvýší dodatečná bezpečnost při ponoru.

Snížený parciální tlak dusíku oproti vzduchu však pravděpodobně snižuje i riziko nástupu hloubkového opojení (doposud totiž není zcela vyřešena otázka vlivu kyslíku na hloubkové opojení, proto slůvko „pravděpodobně“).

Nitrox o vysoké koncentraci kyslíku a případně i čistý kyslík lze rovněž použít jako dýchací směs na dekompresních zastávkách k urychlení dekomprese. Po ponorech se vzduchem nebo s nitroxem snížený parciální tlak dusíku ve vdechované směsi usnadňuje desaturaci dusíku ze tkání. Rovněž po ponorech s hloubkovými dýchacími směsmi, obsahujícími hélium (trimix, heliox), usnadňuje desaturaci hélia.

Podle studie NOAA lze pro nitroxovou směs s podílem kyslíku do 40 % obvykle použít běžné plicní automatiky. Avšak každá nitroxová směs o podílu kyslíku větším vyžaduje použití vybavení, které smí být použito pro čistý kyslík, tj.

- které je zkontrolováno a prohlášeno za kompatibilní pro použití s kyslíkem
- které bylo pro použití s kyslíkem vyčištěno některou z přípustných metod.

Toto ovšem není v souladu s evropskými normami, které vyžadují, aby se jako s kyslíkem zacházelo s nitroxem o obsahu kyslíku větším než 21 %, tedy v principu s každým nitroxem.

3.1. Jaké jsou hloubkové meze pro potápění s nitroxem ?

Bylo řečeno, že při použití nitroxu by parciální tlak kyslíku neměl přesáhnout hodnotu $p_{O_2}^{max} = 150 \text{ kPa}$ (1,5 baru). Přitom dusík začíná působit narkoticky při dýchání vzduchu v hloubkách přes 30 metrů, přičemž v hloubce 30 metrů je jeho parciální tlak p_{N_2} roven $0,79 \cdot 400 \text{ kPa} = 316 \text{ kPa}$ (3,16 baru). Zde 0,79 (= 79 %) je zmíněný podíl fyziologicky inertních plynů ve vzduchu a 400 kPa (= 4,0 baru) je celkový tlak v hloubce 30 metrů. Někdy se však za takovou hraniční hloubku bere nikoliv 30, nýbrž 40 metrů, v nichž je $p_{N_2}^{max} = 0,79 \cdot 500 \text{ kPa} = 395 \text{ kPa}$, tedy přibližně 400 kPa. Tento parciální tlak dusíku by neměl být nikdy překračován. Sečteme – li nyní uvedené maximální přípustné hodnoty $p_{O_2}^{max} + p_{N_2}^{max} = 150 + 400 \text{ kPa} = 550 \text{ kPa}$, dostáváme se k maximální hloubce použití nitroxové směsi **45 metrů**, ve které je celkový tlak $p_{celk} = 550 \text{ kPa}$. Přitom podíl kyslíku f_{O_2} v takové směsi by byl $f_{O_2} = 150 / 550 = 0,27$, tedy by měl být použit **Nitrox 27/73**.

Bezpečnější hodnoty maximálních přípustných parciálních tlaků obou plynů jsou $p_{N_2}^{max} = 320 \text{ kPa}$ a $p_{O_2}^{max} = 140 \text{ kPa}$, které bývají používány v technickém potápění pro maximální cílovou hloubku (target operational depth - TOD). Pak by tato hloubka byla dána celkovým tlakem $(320 + 140) \text{ kPa} = 460 \text{ kPa}$, což odpovídá maximální hloubce **36 metrů** pro podíl kyslíku $140 / 460 = 0,304$ (**Nitrox 30/70**).

Na dekompresních zastávkách, dodržovaných obvykle v menších hloubkách a za poměrně malé fyzické zátěže, se smí dýchat kyslík pod parciálním tlakem 160 kPa ($1,6 \text{ baru}$), a proto se smí např. **Nitrox 50/50** dýchat v hloubce **21 metrů** (kde jeho parciální tlak je $0,50 \cdot 310 \text{ kPa} = 155 \text{ kPa}$) a v hloubkách menších a **čistý kyslík** (tedy Nitrox 100 / 0) od **6 metrů** až k hladině ($1,0 \cdot 160 \text{ kPa} = 160 \text{ kPa}$).

3.2. Výpočty pro potápění s nitroxem.

Výpočty pro potápění s nitroxem zohledňují především přípustné parciální tlaky kyslíku, jelikož v nitroxových hloubkách (do 40 metrů) nebývá dusík vážnou hrozbou. Avšak překročený přípustný parciální tlak kyslíku ano !

Při míchání nitroxové směsi se mohou vyskytnout dvě hlavní zadání:

1. namíchat nitrox dle přání klienta. Nebrání-li tomu technické možnosti a bezpečnostní rizika, je vhodné přání vyplnit a dotyčného případně upozornit na to, že s uvedenou směsí je přípustné se potápět do hloubky, v níž je celkový tlak

$$p_{ch} = \frac{150 \text{ kPa}}{f_{O_2}}$$

Odtud bychom například pro Nitrox 32/68 obdrželi hodnotu celkového tlaku v hloubce $p_{ch} = 150 / 0,32 = 469 \text{ kPa} = 0,469 \text{ MPa}$, což je velikost tlaku v hloubce cca 37 metrů.

Pro takovou – maximální operační hloubku (Maximum Operational Depth -MOD) platí

$$MOD = \left(\frac{1500}{k_{O_2} [\%]} - 10 \right) \text{metrů}$$

Pak pro předchozí směs je skutečně $MOD = (1500 / 32 - 10) = (46,9 - 10) = 37 \text{ metrů}$.

2. namíchat nitrox „na míru“ pro danou hloubku (tzv. „best mix“). Pak je třeba vyjít z hodnoty maximálního přípustného parciálního tlaku kyslíku $p_{O_2}^{max} = 150 \text{ kPa}$ ($1,5 \text{ baru}$) a namíchat směs o koncentraci kyslíku

$$f_{O_2} = \frac{p_{O_2}^{max}}{p_{ch}}, \text{ případně } k_{O_2} = \frac{p_{O_2}^{max}}{p_{ch}} \cdot 100\%$$

kde p_{ch} je celkový tlak v zamýšlené hloubce.

Například pro hloubku 33 metrů, v níž je $p_{ch} = 0,43 \text{ MPa} = 430 \text{ kPa}$, je koncentrace kyslíku v optimálním nitroxu rovna $k_{O_2} = 150 / 430 \cdot 100 = 34,9 \%$. Zaokrouhlujeme k bezpečnější hodnotě a zvolíme Nitrox 34/65.

Maximální operační hloubku lze stanovit rovněž pomocí tabulky Tab.2, ve které se v prvním řádku nachází několik maximálních přípustných hodnot $p_{O_2}^{max}$ a v prvním sloupci procentuální koncentrace kyslíku $k_{O_2} [\%]$ v nitroxu. Tak například pro Nitrox 30/70 (a $p_{O_2}^{max} = 150 \text{ kPa}$) je $MOD = 40$ metrů.

$p_{O_2}^{max} [\text{kPa}]$						
$k_{O_2} [\%]$	140	145	150	155	160	170
20	60	62	65	67	70	75
21	56	59	61	63	66	70
24	48	50	52	54	56	60
26	43	45	47	49	51	55
28	40	41	43	45	47	50
30	36	38	40	41	43	46
32	33	35	36	38	40	43
34	31	32	34	35	37	40
36	28	30	31	33	34	37
38	26	28	29	30	32	34
40	25	26	27	28	30	32
50	18	19	20	21	22	24
60	13	14	15	15	16	18
80	7	8	8	9	10	11
100	4	4	5	5	6	7

Tab.2 : Stanovení maximální operační hloubky v metrech (pro různá složení i přípustné parc.tlaky O₂)

3.3. Technické možnosti míchání nitroxové směsi.

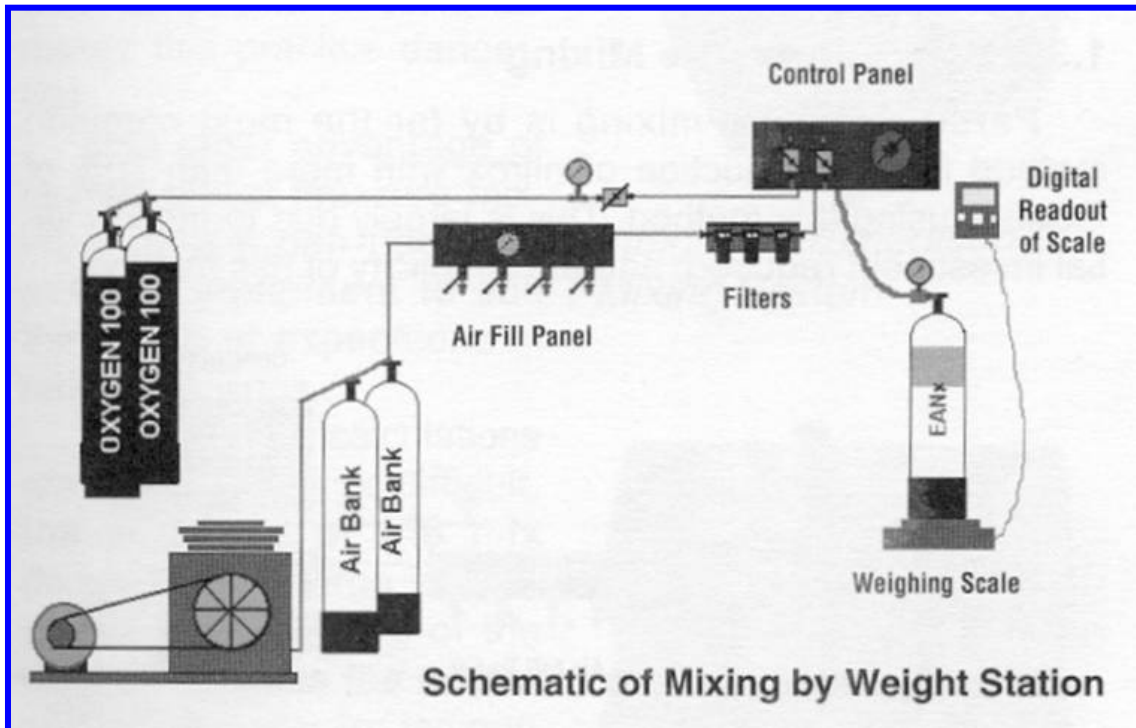
V principu je k přípravě směsi využíváno několika způsobů:

1. míchání na základě molárních hmotností jednotlivých plynů
2. snižování obsahu dusíku využitím molekulárních filtrů
3. míchání směsi na základě parciálních tlaků jejích složek
4. míchání směsi před její kompresí (tzv. míchačkou, kontinuální míchání).

Z hlediska výpočtů je poslední možnost určitou podskupinou varianty č. 3, jelikož i při ní se v principu využívá výpočtů a metod používaných k míchání pomocí parciálních tlaků.

První dvě z uvedených metod nejsou zatím ve větší míře rozšířeny z důvodů poměrně vysokých nároků na přístrojové vybavení.

První metoda (obr. 3) vyžaduje přesné vážení plněného zásobníku směsi. Úloha je ztížena tím, že stanovovaná hmotnost je ovlivňována hmotností a proměnnou tuhostí plnicího zařízení (přepouštěcí hadice či spirály).

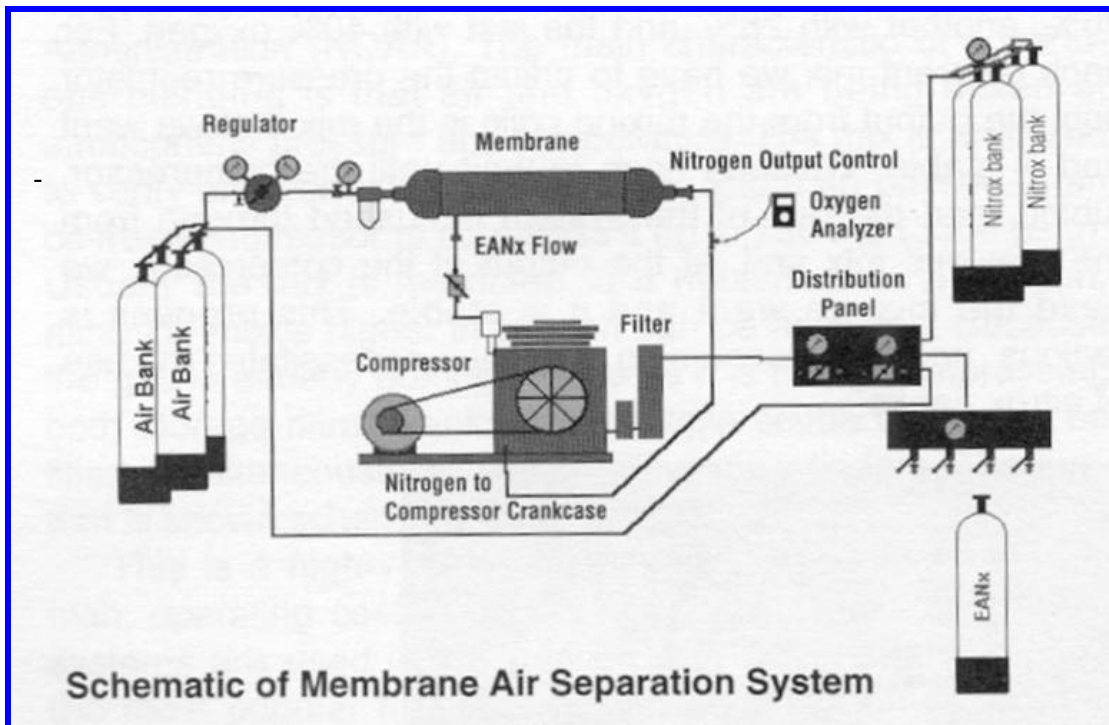


Obr. 3. Míchání na základě molárních hmotností.

Druhá z uvedených metod je pro budoucnost perspektivní. Vychází původně z balicí technologie uplatňované hlavně v potravinářském průmyslu, kde je zapotřebí vnitřek obalu v maximální možné míře zbavit kyslíku a zaplnit dusíkem. Je například využíváno membrány dobře prostupné pro molekuly kyslíku a méně prostupné pro dusík. Využitím takového molekulárního filtru je možno vícenásobnou filtrací ochuzovat původní vzduch o dusík a tím vlastně obohacovat o kyslík. Zařízení klade vyšší nároky na předběžnou čistotu vzduchu, který je pak protlačován skrz molekulární filtr. Nitrox takto získaný bývá někdy označován za vzduch se sníženým obsahem dusíku.

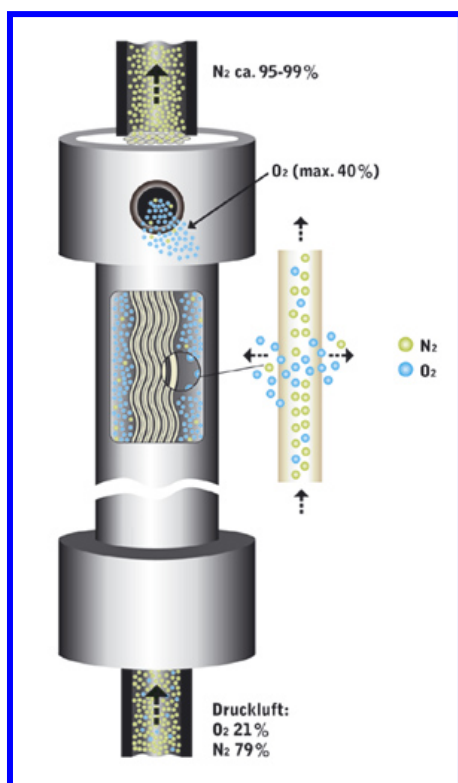
V principu jsou využívány dvě takové metody:

- pomocí membrány z dutých vláken (obr. 4), kterou je protlačován středotlakým kompresorem vzduch.



Schematic of Membrane Air Separation System

Obr. 4. Membránová separace plynů



Obr. 5. Princip membránové separace plynů

Při membránové separaci plynů je využito vyšší rychlosti prostupu molekul kyslíku polymerem membrány oproti dusíku (obr. 5). Takto je získáván vzduch obohacený o kyslík,

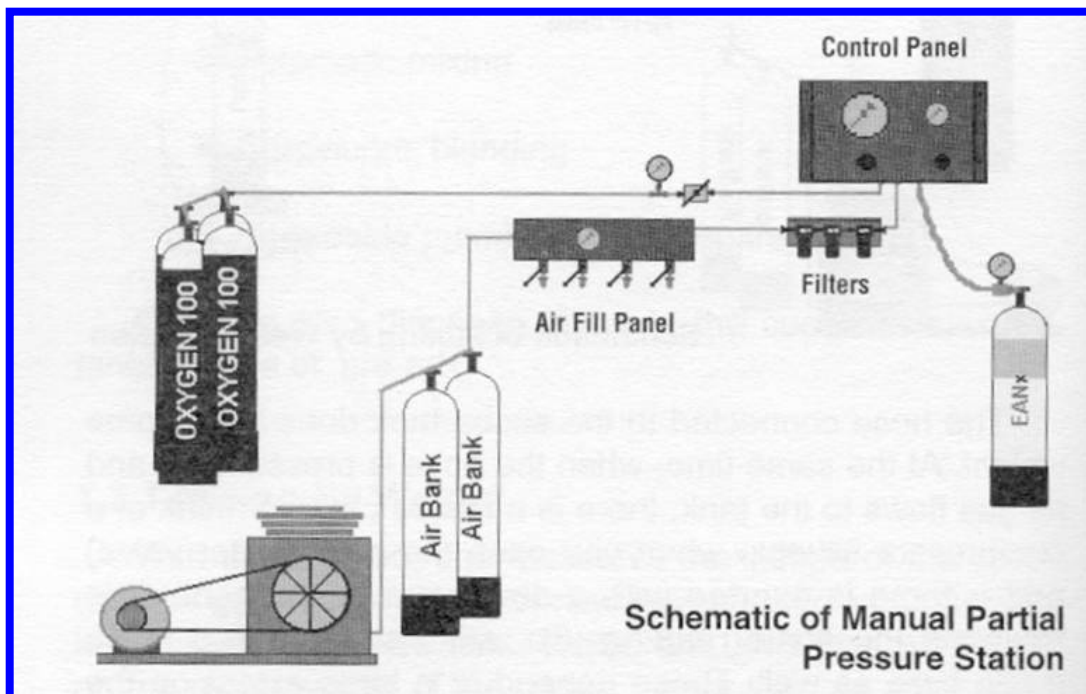
jehož koncentrace je závislá na rychlosti pohybu vzduchu ve vlákne. Maximální dosažitelná koncentrace kyslíku v takto vyrobeném nitroxu je asi 40 % a již pro koncentraci 36 % je zapotřebí asi trojnásobku objemu vzduchu v porovnání s objemem produkovaného nitroxu (pro Nitrox 32/68 je tento poměr 2 :1).

- pomocí molekulárního síta tzv. metodou PSA (Pressure Swing Adsorption –cyklická tlaková adsorpce – obr. 6), při níž je využito různé přilnavosti odlišných molekul k povrchu adsorpčního materiálu (například aktivního uhlí aj.) za určitých tlaků. Sítem zaplněná kolona adsorbuje kyslík při tlaku kolem 8 barů a dusík (o vysoké čistotě) prochází dále, kde je jímán do nádoby. Při snížení tlaku v koloně je naopak uvolňován a jímán kyslík. Tento proces se cyklicky opakuje a aby nedocházelo k prodlevám, je využíváno dvou kolon plněných střídavě. Touto metodou lze získat téměř 100 % kyslíku.



Obr. 6. Princip střídavé tlakové adsorpce

Třetí, nejčastěji využívaná metoda míchání (obr. 7, 8), spočívá v tom, že do plněného zásobníku se nejprve vtačí čistý kyslík do určitého předem stanoveného tlaku. Následně se láhev doplní vzduchem z kompresoru do výsledného tlaku. Jak vidno, při plnění kyslíkem je nutné, aby plněná láhev i její ventily odpovídaly kyslíkovému využití. Navíc je nutno zajistit (dvojnásobným filtrováním) vysokou čistotu vzduchu, přiváděného z kompresoru a rovněž zabránit (zpětným ventilem) možnosti vniknutí kyslíku ze zásobníku ke kompresoru.

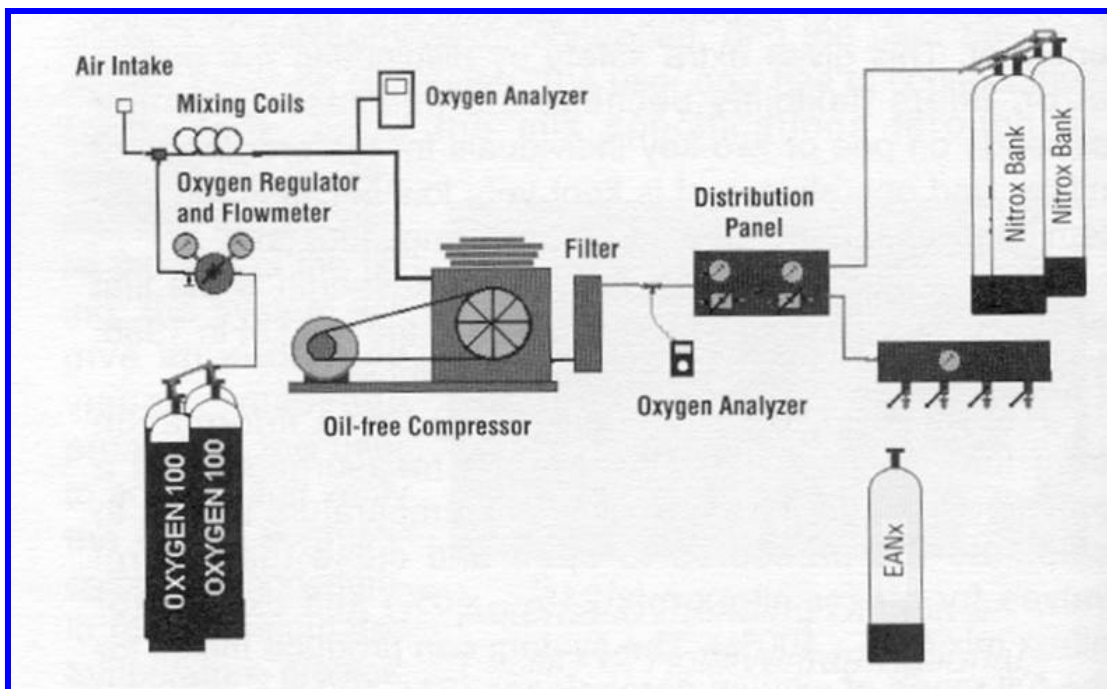


Obr. 7. Míchání metodou parciálních tlaků

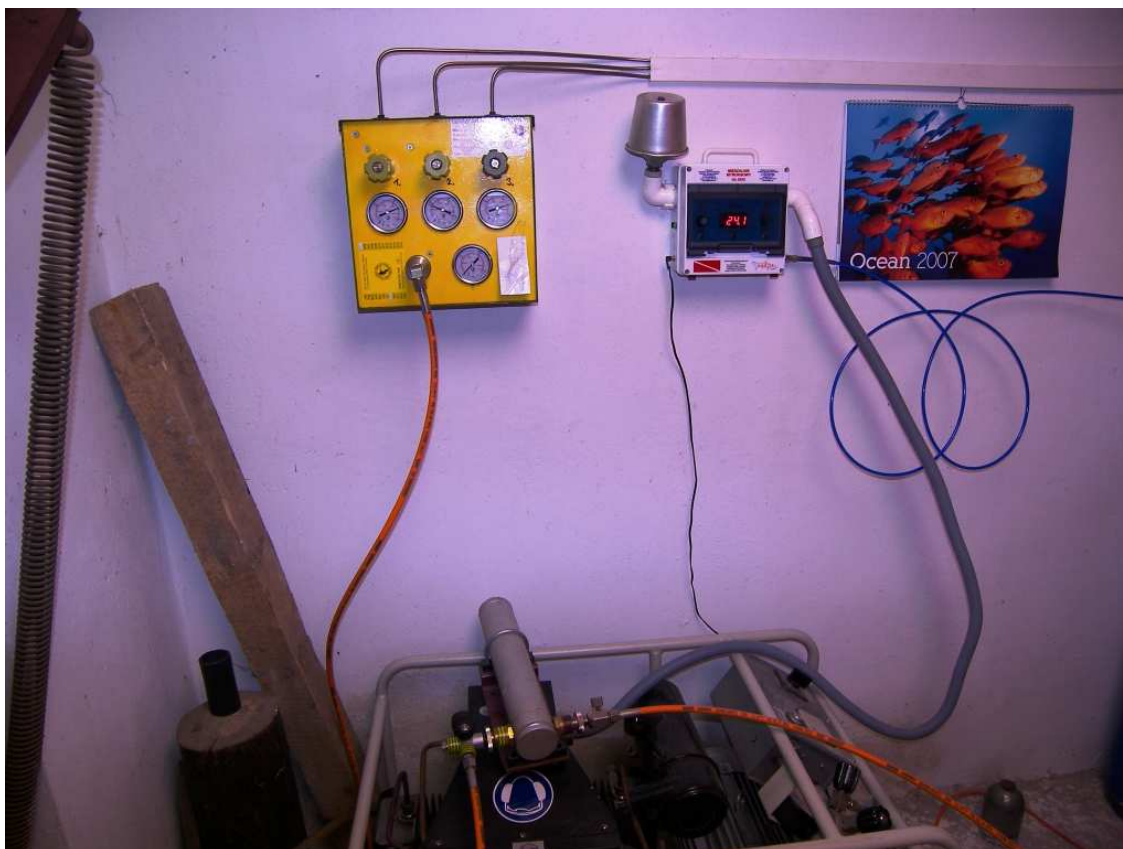


Obr. 8. Metoda parciálních tlaků – přepouštění kyslíku

Poslední metoda (obr. 9, 10) využívá řízeného obohacování vzduchu o kyslík ještě před jeho stlačením tzv. míchačkou.



Obr. 9. Schéma míchání směsi před kompresí (míchačkou)



Obr. 10. Míchání směsi míchačkou

Do vzduchu nasávaného po předběžné filtraci do kompresoru je řízeně přiváděna ze zásobníku kyslíku taková dávka kyslíku, aby analýza směsi, provedená ještě před stlačením,

vyhovovala požadavku na složení směsi. Proto musí být nasávaná směs ještě před měřením dobře promíchána. Pokud tomu tak není, pak vlákno čistého kyslíku v nasávané a stlačované směsi, a to hlavně v kompresorech s olejovým mazáním, může vést k výbuchu.

Ke kompresi samotné je totiž v tomto případě předepsáno používat kompresorů bez olejového mazání. Přesto se lze velmi často setkat s používáním míchačky v kombinaci s kompresorem s olejovým mazáním. Argumentace pro tuto konfiguraci vychází právě ze zjištění NOAA, že s nitroxem o obsahu kyslíku do 40 % lze zacházet jako se vzduchem. Výhodné je, že do zásobníků je vtlačována již namíchaná směs a této okolnosti bývá někdy zcela nerozumně využíváno tak, že nitrox o obsahu kyslíku menším, než 40 %, bývá plněn do lahví nepřipravených pro použití s kyslíkem.

Poznámka: Před použitím směsi je v každém případě nutno provést její analýzu !

3.4. Výpočty pro míchání nitroxových směsí.

Nejprve popíšeme postup míchání směsi na základě parciálních tlaků jejích složek, tedy prítřetí a čtvrté z uvedených metod. Nejsložitější případ je pochopitelně ten, kdy v zásobníku máme „starou“ směs o určitém složení $f_{O_2}^0$ a tlaku p_0 a přejeme si namíchat výslednou (*Target* – cílová) směs o jiném složení $f_{O_2}^T$ a o cílovém tlaku p_T .

Pak pro rozdíl tlaků v láhvi platí vztah

$$\Delta p = p_T - p_0 \quad (1)$$

a pro rozdíly parciálních tlaků kyslíku vztah

$$\Delta p_{O_2} = p_T \cdot f_{O_2}^T - p_0 \cdot f_{O_2}^0. \quad (2)$$

K dosažení požadovaných hodnot tedy potřebujeme doplnit tlakový rozdíl Δp a deficit parciálního tlaku kyslíku Δp_{O_2} .

Je-li láhev prázdná (měl by v ní vždy být určitý zbytkový přetlak, avšak můžeme předpokládat, že jde o láhev nově uváděnou do provozu), je $p_0 = 0$ a předchozí vztahy se nám redukuje na $\Delta p = p_T$ a $\Delta p_{O_2} = p_T \cdot f_{O_2}^T$.

3.4.1. Plnění míchačkou

Pro tento způsob plnění jsou výpočty nejjednodušší. Na míchačce je zapotřebí nastavit správnou koncentraci kyslíku $f_{O_2}^M$, kterou bude láhev plněna.

Je-li láhev prázdná, je již předem jasné, že na míchačce je nutno nastavit tu koncentraci kyslíku $f_{O_2}^M$, která je požadována, tedy $f_{O_2}^M = f_{O_2}^T$ a láhev se naplní zvoleným nitroxem na konečný tlak.

Když je láhev poloprázdná (a ve zbytku obsahu je případně jiná koncentrace kyslíku než požadovaná), je nutné kyslíkový deficit Δp_{O_2} zaplnit v průběhu plnění láhve z původního

tlaku p_0 na p_T , tedy při zvyšování tlaku o Δp . To znamená, že na míchačce musí být nastavena taková koncentrace kyslíku $f_{O_2}^M$, aby platilo $\Delta p_{O_2} = \Delta p \cdot f_{O_2}^M$. Odtud pro nastavení míchačky ($f_{O_2}^M$) dostáváme

$$f_{O_2}^M = \frac{\Delta p_{O_2}}{\Delta p} = \frac{(p_T \cdot f_{O_2}^T - p_0 \cdot f_{O_2}^0)}{(p_T - p_0)} \quad (3)$$

a tímto nitroxem se láhev doplní do požadovaného tlaku p_T .

Příklad: Má se pomocí míchačky naplnit láhev 15 litrů, ve které zůstal Nitrox 28/72 o tlaku 6,5 MPa (65 barů) Nitroxem 32/68 na tlak 22 MPa (220 barů). Jakou hodnotu koncentrace na míchačce nastavíte ?

Řešení: $p_0 = 6,5$ MPa, $p_T = 22$ MPa, $f_{O_2}^0 = 0,28$ (= 28 %), $f_{O_2}^T = 0,32$ (= 32 %). Pak $\Delta p_{O_2} = p_T \cdot f_{O_2}^T - p_0 \cdot f_{O_2}^0 = 22 \cdot 0,32 - 6,5 \cdot 0,28 = 7,04 - 1,82 = 5,22$ MPa a $\Delta p = p_T - p_0 = 22 - 6,5 = 15,5$ MPa. Dosazením do (1) máme $f_{O_2}^M = \Delta p_{O_2} / \Delta p = 5,22 / 15,5 = 0,3368 = 0,34$ a na míchačce tedy nastavíme hodnotu 34 %.

Kontrola: Výsledný parciální tlak kyslíku v láhvi má být $p_{O_2}^T = 7,04$ MPa. Před zahájením plnění je v ní parciální tlak kyslíku $p_{O_2}^0 = 1,82$ MPa. Pomocí míchačky do láhve dostaneme $f_{O_2}^M \cdot \Delta p = 0,34 \cdot 15,5 = 5,27$ MPa a součet s původním parciálním tlakem pak dá $1,82 + 5,27 = 7,09$ MPa (poněkud vyšší hodnota je způsobena zaokrouhlením). Pak ve výsledné směsi je 7,09 MPa kyslíku a zbytek do 22 MPa je dusík. Podíl kyslíku získáme vydělením $7,09 / 22 = 0,322$ (32 %) a tak skutečně jsme obdrželi požadovaný Nitrox 32/68.

Mohlo by se však stát, že v láhvi nám zůstala směs příliš bohatá na kyslík a o vyšším tlaku p_0 a předchozí výpočet by nám pak mohl dát hodnotu podílu kyslíku nastavenou na míchačce menší, než podíl kyslíku ve vzduchu: 21 %. Protože 21 % je nejmenší koncentrace kyslíku, kterou můžeme kompresorem dodávat, je zapotřebí tlak v láhvi o určitý tlak snížit. Samozřejmě by bylo zbytečné směs s kyslíkem vypustit zcela a pak znovu kyslík přidávat. Budeme tedy plnit přístroj bez připojené míchačky – pouze přes kompresor. K tomu je nutné stanovit takový tlak p_{00} , aby hodnota $f_{O_2}^M$ z předchozí rovnice vyšla rovna 0,21.

Za tím účelem dosadíme za $f_{O_2}^M$ číslo 0,21 a vyřešíme rovnici (3) jako pro tlak p_0 , který zaměníme za p_{00} a dostaneme výsledek

$$p_{00} = p_T \cdot \frac{(f_{O_2}^T - 0,21)}{(f_{O_2}^0 - 0,21)} \quad (4)$$

To znamená, že tlak p_0 původní směsi snížíme vypuštěním části směsi na tlak p_{00} .

Příklad: Řešme podobný případ jako v prvním příkladu, avšak pro cílový tlak 20 MPa a cílové složení s 28 % kyslíku, přičemž nám v zásobníku zůstala směs Nitrox 36/64 o tlaku 12 MPa.

Řešení: Z rovnice (3) bychom po dosazení údajů obdrželi

$$f_{O_2}^M = (20 \cdot 0,28 - 12 \cdot 0,36) / (20 - 12) = 0,16 \text{ (16 \%)},$$

a to je koncentrace kyslíku menší než ve vzduchu 0,21 (21 %). Proto musíme původní tlak p_0 snížit na tlak p_{00} podle rovnice (4):

$$p_{00} = 20 \cdot (0,28 - 0,21) / (0,36 - 0,21) = \underline{9,3 \text{ MPa}} \text{ (93 barů)},$$

a pak můžeme přístroj doplnit vzduchem na cílový tlak 20 MPa (200 barů).

Kontrola: Dosazením tlaku 9,3 MPa do rovnice (3) za p_0 dostáváme výpočtem skutečně $f_{O_2}^M = 0,21$.

3.4.2. Plnění kyslíkem a kompresorem (metodou parciálních tlaků).

Tento způsob plnění je nejčastější a právě o něm se hovoří jako o plnění pomocí parciálních tlaků. Metoda spočívá v tom, že se do přístroje připustí nejprve určité množství kyslíku do tlaku p_1 takového, aby přírůstek parciálního tlaku kyslíku ze vzduchu, dotlačeného kompresorem do konečného tlaku p_T pokryl zbývající deficit kyslíku. Podstatné tedy je stanovit, kolik kyslíku přidat, tj. do jakého tlaku p_1 .

Obecně platí, že výsledný parciální tlak kyslíku $p_{O_2}^T$ se rovná součtu parciálního tlaku kyslíku ve zbytkové směsi $p_{O_2}^0$, tlaku připuštěného kyslíku $\Delta p_{O_2}^1$ a parciálního tlaku kyslíku dodaného kompresorem, tj. $(p_T - p_1) \cdot f_{O_2}^K$, kde $f_{O_2}^K$ je případné složení směsi dodané kompresorem (pro vzduch platí $f_{O_2}^K = 0,21$). Tedy výchozí vztah je:

$$p_{O_2}^T = p_{O_2}^0 + \Delta p_{O_2}^1 + (p_T - p_1) \cdot f_{O_2}^K. \quad (5)$$

V něm pro parciální tlaky kyslíku zase platí $p_{O_2}^T = p_T \cdot f_{O_2}^T$, $p_{O_2}^0 = p_0 \cdot f_{O_2}^0$ a dále je $p_1 = p_0 + \Delta p_{O_2}^1$. Po dosazení do rovnice (5) a vyřešení pro $\Delta p_{O_2}^1$ dostaneme

$$\Delta p_{O_2}^1 = \frac{(\Delta p_{O_2} - \Delta p \cdot f_{O_2}^K)}{(1 - f_{O_2}^K)} = \frac{p_T \cdot (f_{O_2}^T - f_{O_2}^K) - p_0 \cdot (f_{O_2}^0 - f_{O_2}^K)}{(1 - f_{O_2}^K)} \quad (6)$$

a budeme-li plnit vzduchem, je $f_{O_2}^K = 0,21$ a pro „přídavek“ kyslíku $\Delta p_{O_2}^1$ dostáváme

$$\Delta p_{O_2}^1 = \frac{p_T \cdot (f_{O_2}^T - 0,21) - p_0 \cdot (f_{O_2}^0 - 0,21)}{(1 - 0,21)} \quad (7)$$

což je nejčastěji používaný vztah. Pro jistotu uveďme tentýž vztah při dosazení koncentrace k v procentech:

$$\Delta p_{O_2}^1 = \frac{p_T \cdot (k_{O_2}^T - 21) - p_0 \cdot (k_{O_2}^0 - 21)}{(100 - 21)} \quad (7a)$$

Příklad: V přístroji 2 x 10 litrů zůstala směs Nitrox 28/72 o tlaku 7 MPa (70 barů) a je požadována směs Nitrox 32/68 o tlaku 22 MPa (220 barů). K dispozici je láhev 50 litrů s kyslíkem o tlaku 15 MPa (150 barů) a kompresor s dodatečným filtrem a zpětným ventilem.

Řešení: Budeme počítat v procentech a do vztahu (5a) dosadíme: $p_T = 22$ MPa, $p_0 = 7$ MPa, $k_{O_2}^T = 32$ %, $k_{O_2}^0 = 28$ %. Pak pro tlak kyslíku $\Delta p_{O_2}^1$, který je nutno připustit, dostáváme $\Delta p_{O_2}^1 = [22 \cdot (32 - 21) - 7 \cdot (28 - 21)] / (100 - 21) = [242 - 49] / 79 = \underline{2,44}$ MPa (tj. 24, 4 barů). Přidáme tedy kyslík do tlaku $p_1 = 7 + 2,44 = \underline{9,44}$ MPa (94, 4 baru). (Pokud bychom nyní měřili koncentraci kyslíku ve směsi, byla by rovna $(p_0 \cdot f_{O_2}^0 + \Delta p_{O_2}^1) / p_1 = (7 \cdot 0,28 + 2,44) / 9,44 = 0,466$ (47 %)). Pak přístroj doplníme vzduchem na požadovaných 22 MPa (220 barů).

Poznámka: k naplnění přístroje jsme spotřebovali 24,4 baru x 20 litrů = 489 hladinových litrů kyslíku a o stejné množství nám ubyl kyslík v plnicí láhvi. Tlak v ní tedy poklesl o $489 / 50 = 9,8 \approx 10$ barů na 140 barů (14 MPa). Tento tlak je vyšší než konečný tlak po napuštění kyslíku p_1 v láhvi a lze tedy přepuštění realizovat. Takový výpočet je třeba provést předem obzvláště v případě, kdy si nejsme zcela jisti, zda nám zásoba kyslíku k naplnění vystačí. Tento výpočet byl proveden v barech, jelikož je číselně jednodušší než v MPa, což vychází z toho, že do výpočtu vstupuje normální tlak 1 bar místo 0,1 MPa.

Kontrola: Nakonec má být v láhvi koncentrace 32% kyslíku a tlak 22 MPa, tedy parciální tlak kyslíku $p_{O_2}^T = 0,32 \cdot 22 = 7,04$ MPa (70 barů). V láhvi byl původně jeho parciální tlak $p_{O_2}^0 = 0,28 \cdot 7 = 1,96$ MPa (20 barů). Přidali jsme $\Delta p_{O_2}^1 = 2,44$ MPa (24 barů) kyslíku a kompresorem jsme dodali $0,21 \cdot (p_T - p_1) = 0,21 \cdot (22 - 9,4) = 2,64$ MPa (26 barů). Součet všech tří parciálních tlaků je tedy $1,96 + 2,44 + 2,6 = 7,04$ MPa, což se shoduje s vypočteným předpokladem.

Po pravdě řečeno je výpočet dle rovnice (6) stejný i pro případ, kdy se místo kyslíku použije bohatší nitrox s koncentrací kyslíku $f_{O_2}^S$ (např. Nitrox 80/20, kdy $f_{O_2}^S = 0,80$, ale pro čistý kyslík je $f_{O_2}^S = 1$, jak uvádí rovnice (6)) anebo místo kompresoru velký zásobník s nějakým „chudším“ nitroxem o podílu $f_{O_2}^K$, například Nitrox 32/68 (pak $f_{O_2}^K = 0,32$).

Vychází se z rovnice (5): $p_{O_2}^T = p_{O_2}^0 + \Delta p_{O_2}^1 + (p_T - p_1) \cdot f_{O_2}^K$, ve které je $p_1 = p^0 + \Delta p_1$, přičemž $\Delta p_{O_2}^1 = \Delta p_1 \cdot f_{O_2}^S$. Pak rovnice (6) nabývá obecnější tvar

$$\Delta p_1 = \frac{p_T \cdot (f_{O_2}^T - f_{O_2}^K) - p_0 \cdot (f_{O_2}^0 - f_{O_2}^K)}{(f_{O_2}^S - f_{O_2}^K)} \quad (6a).$$

Příklad: Potřebujeme namíchat Nitrox 50/50 o 22 MPa v láhvi se zbytkovou směsí Nitrox 36/64 o tlaku 5 MPa a k dispozici máme dostatečné množství Nitroxu 80/20 a Nitroxu 32/68.

Řešení: dle vztahu (6a) je

$$\Delta p_1 = \frac{22 \cdot (0,5 - 0,32) - 5 \cdot (0,36 - 0,32)}{(0,80 - 0,32)} = \frac{22 \cdot 0,18 - 5 \cdot 0,04}{0,48} = \frac{3,76}{0,48} = 7,83 \text{ MPa}$$

To znamená, že k tlaku v láhvi bychom nejprve připustili 7,8 MPa Nitroxu 80/20 (do tlaku 12,8 MPa a pak bychom tlak pomocí Nitroxu 32/64 zvýšili až na 22 MPa.

Kontrola: V Nitroxu 50/50 o tlaku 22 MPa by měl být parciální tlak kyslíku 11 MPa. V láhvi nám zůstal parciální tlak kyslíku $0,36 \cdot 5 = 1,8$ MPa. Napuštěním Nitroxu 80/20 jsme přidali $0,8 \cdot 7,8 = 6,24$ MPa a pomocí Nitroxu 32/64 jsme dodali $0,32 \cdot (22 - 12,8) = 2,94$ MPa. Sečtením parciálních tlaků kyslíku se dostáváme k požadované hodnotě 11 MPa.

I při našich předchozích výpočtech by mohlo dojít k tomu, že zbytková směs v láhvi je natolik bohatá na kyslík, že by bylo nutno něco směsi vypustit, abychom požadované hodnoty koncentrace kyslíku po naplnění dosáhli. Zjistíme to jednoduše tak, že po dosažení parametrů do vztahu (7) nebo (7a) vyjde hodnota $\Delta p^1_{O_2}$ záporná. Tlak p_{00} , na který se musíme vypuštěním dostat, zjistíme zase tak, že jednoduše v uvedených vztazích položíme $\Delta p^1_{O_2} = 0$, tzn. po snížení tlaku doplníme láhev pouze kompresorem, bez přidání kyslíku.

Pak dostáváme rovnost

$$p_{00} \cdot (f^p_{O_2} - 0,21) = p_T \cdot (f^T_{O_2} - 0,21)$$

a odtud

$$p_{00} = p_T \cdot \frac{f^T_{O_2} - 0,21}{f^p_{O_2} - 0,21} \quad (8)$$

Příklad: V láhvi o objemu 12 litrů zůstal Nitrox 50/50 o tlaku 12 MPa (120 barů) a v téže láhvi bychom si přáli mít Nitrox 32/68 o tlaku 20 MPa (200 barů). Máme k dispozici láhev s kyslíkem o tlaku 18 MPa (180 barů) a vhodnou kompresorovou sestavu.

Řešení: Už následující úvahou bychom zjistili, že kyslíku je v láhvi nadbytek, jelikož 32% kyslíku při 20 MPa dává parciální tlak $0,32 \cdot 20 = 6,4$ MPa (64 barů) a my máme v láhvi parciální tlak kyslíku $0,5 \cdot 12 = 6$ MPa (60 barů) už na začátku. Kdybychom pouze přidávali vzduch kompresorem, přidáme na parciálním tlaku $0,21 \cdot (20 - 12) = 1,68$ MPa (17 barů) kyslíku a dostali bychom celkem parciální tlak kyslíku 7,7 MPa (77 barů), což by nám dalo nitrox o 38,5 % kyslíku ($7,7 / 20 = 0,385$). Pokud se tím nehodláme spokojit, musíme něco

směsi vypustit. Podle vztahu (8) až na tlak $p_{00} = 20 \cdot (0,32 - 0,21) / (0,50 - 0,21) = 7,6 \text{ MPa}$ (tedy na 76 barů) a pak můžeme směs pouze doplnit vzduchem na požadovaných 20 MPa.

Kontrola: Po vypuštění části směsi je parciální tlak kyslíku v láhvi $p^{00}_{O_2} = 0,5 \cdot 7,6 = 3,8 \text{ MPa}$ (38 barů). Kompresorem zvýšíme parciální tlak kyslíku o $0,21 \cdot (20 - 7,6) = 2,6 \text{ MPa}$ a součet obojího pak dá skutečně 6,4 MPa (64 barů), potřebných pro zmíněných 32 % kyslíku při 20 MPa.

3.4.3. Usnadnění výpočtů.

Předchozí výpočty využívající míchání metodou parciálních tlaků byly uvedeny proto, aby byl uživatel schopen příslušné hodnoty (obvykle přípuštění kyslíku do plněné láhve) stanovit pomocí jednoduché kalkulačky (či z hlavy). Pokud je při míchání k dispozici počítač, lze použít některého z míchacích programů. Pro zmíněný způsob míchání nitroxu ($O_2 +$ vzduch) je možné rovněž využít jednoduchou tabulku (Tab. 3 a, b) s návodem na způsob jejího využití. Tabulka byla sestrojena na základě vztahu (7a) a podobnou lze sestrojít jednoduše i pro využití směsí o jiném složení (např. kyslík + Nitrox 32/68).

3.4.3.1. Návod k použití tabulek Tab. 3 a, b:

Tabulky slouží ke stanovení tlaku kyslíku, který je nutný k doplnění láhve na požadovaný obsah kyslíku a tlak. Tlaky jsou uvedeny v barech.

1. Změříme původní koncentraci kyslíku $k^0_{O_2}$ a celkový zbytkový tlak p_0 v zásobníku (například $k^0_{O_2} = 32\%$, $p_0 = 50$ barů).
2. Nalezneme v tabulce tlak (číslo) pro tyto údaje ($p^B = 7$ barů).
3. V tabulce nalezneme požadované hodnoty koncentrace $f^T_{O_2}$ a tlaku p^T (například 40 %, 220 barů).
4. Pro tyto hodnoty nalezneme rovněž tlak ($p^A = 53$ barů).
5. Odečteme $\Delta P_{O_2} = p^A - p^B$ (= 46 barů).

O tuto hodnotu ΔP_{O_2} je nutno láhev doplnit kyslíkem (tedy na tlak $p_0 + \Delta P_{O_2} = 96$ barů) a potom doplnit vzduchem z kompresoru (na 220 barů).

6. Vyjde-li hodnota ΔP_{O_2} záporná, je nutno původní tlak p_0 snížit tak, až vyjde $\Delta P_{O_2} = 0$, a pak přístroj doplnit vzduchem.

Doplnění se provádí podle vztahu:

$$\Delta P_{O_2} = [p^T \cdot (k^T_{O_2} - 21) - p^0 \cdot (k^0_{O_2} - 21)] / 79 = p^A - p^B$$

První v tabulce vyhledaná hodnota je druhý člen v tomto vztahu, kdežto druhá vyhledaná hodnota je první člen v uvedené formuli.

% O2	tlak [bar]									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
23	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3
24	0	1	1	2	2	2	3	3	3	4
25	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
26	1	1	2	3	3	4	4	5	6	6
27	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8
28	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9
29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11
31	1	3	4	5	6	8	9	10	11	13
32	1	3	4	6	7	8	10	11	13	14
33	2	3	5	6	8	9	11	12	14	15
34	2	3	5	7	8	10	12	13	15	16
35	2	4	5	7	9	11	12	14	16	18
36	2	4	6	8	9	11	13	15	17	19
37	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
38	2	4	6	9	11	13	15	17	19	22
39	2	5	7	9	11	14	16	18	21	23
40	2	5	7	10	12	14	17	19	22	24
41	3	5	8	10	13	15	18	20	23	25
42	3	5	8	11	13	16	19	21	24	27
43	3	6	8	11	14	17	19	22	25	28
44	3	6	9	12	15	17	20	23	26	29
45	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
46	3	6	9	13	16	19	22	25	28	32
47	3	7	10	13	16	20	23	26	30	33
48	3	7	10	14	17	21	24	27	31	34
49	4	7	11	14	18	21	25	28	32	35
50	4	7	11	15	18	22	26	29	33	37
52	4	8	12	16	20	24	27	31	35	39
54	4	8	13	17	21	25	29	33	38	42
56	4	9	13	18	22	27	31	35	40	44
58	5	9	14	19	23	28	33	37	42	47
60	5	10	15	20	25	30	35	39	44	49
65	6	11	17	22	28	33	39	45	50	56
70	6	12	19	25	31	37	43	50	56	62
80	7	15	22	30	37	45	52	60	67	75
90	9	17	26	35	44	52	61	70	79	87

Tab 3a.

% O2	120	140	160	180	200	210	220	230	240	250
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
23	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6
24	5	5	6	7	8	8	8	9	9	9
25	6	7	8	9	10	11	11	12	12	13
26	8	9	10	11	13	13	14	15	15	16
27	9	11	12	14	15	16	17	17	18	19
28	11	12	14	16	18	19	19	20	21	22
29	12	14	16	18	20	21	22	23	24	25
30	14	16	18	21	23	24	25	26	27	28
31	15	18	20	23	25	27	28	29	30	32
32	17	19	22	25	28	29	31	32	33	35
33	18	21	24	27	30	32	33	35	36	38
34	20	23	26	30	33	35	36	38	39	41
35	21	25	28	32	35	37	39	41	43	44
36	23	27	30	34	38	40	42	44	46	47
37	24	28	32	36	41	43	45	47	49	51
38	26	30	34	39	43	45	47	49	52	54
39	27	32	36	41	46	48	50	52	55	57
40	29	34	38	43	48	51	53	55	58	60
41	30	35	41	46	51	53	56	58	61	63
42	32	37	43	48	53	56	58	61	64	66
43	33	39	45	50	56	58	61	64	67	70
44	35	41	47	52	58	61	64	67	70	73
45	36	43	49	55	61	64	67	70	73	76
46	38	44	51	57	63	66	70	73	76	79
47	39	46	53	59	66	69	72	76	79	82
48	41	48	55	62	68	72	75	79	82	85
49	43	50	57	64	71	74	78	82	85	89
50	44	51	59	66	73	77	81	84	88	92
52	47	55	63	71	78	82	86	90	94	98
54	50	58	67	75	84	88	92	96	100	104
56	53	62	71	80	89	93	97	102	106	111
58	56	66	75	84	94	98	103	108	112	117
60	59	69	79	89	99	104	109	114	118	123
65	67	78	89	100	111	117	123	128	134	139
70	74	87	99	112	124	130	136	143	149	155
80	90	105	119	134	149	157	164	172	179	187
90	105	122	140	157	175	183	192	201	210	218
100	120	140	160	180	200	210	220	230	240	250

Tab. 3 b.

3.5. Technické vybavení pro manipulaci s nitroxem a bezpečnost.

Potápění s nitroxem je poněkud náročnější na technické zázemí než potápění se vzduchem. Vyplývá to z nároků na přípravu potápěčského vybavení, na přípravu (namíchání) nitroxové směsi, její analýzu a její skladování. Nevhodný nebo chybný postup totiž může ohrozit jak osoby, podílející se na míchání směsi, tak uživatele této směsi. Je tedy jen správné pojednat vedle vybavení samotného i o postupech, které riziko ohrožení zmenšují k minimu.

Upozornění: s výjimkou etapy výcviku je potápěč samotný zodpovědný za výběr a kompletaci své osobní výstroje, tedy i za volbu dýchací směsi v láhvi.

Na rozdíl od vžitých standardních postupů při plnění zásobníků vzduchu (tlakových lahví) a při manipulaci s nimi, vyžaduje příprava nitroxové směsi (její namíchání) a manipulace s ní v zájmu bezpečnosti obsluhy míchacího zařízení a potápěče, používajícího nitrox, některé postupy dodatečné či odlišné.

Ohrožení může způsobit

- a) manipulace s vysokotlakým kyslíkem
- b) nesprávně provedená analýza směsi
- c) nesprávné označení směsi v láhvi nebo její záměna za vzduch.

V dalším probereme postupně uvedené body detailněji.

3.5.1. Zařízení pro kyslíkové využití

Kyslík je prvek způsobující oxidaci látek. Oxidační reakce probíhají v našem těle i na povrchu mnoha látek a nejsou nebezpečné, když jsou pomalé. Rychlejší oxidační reakcí je hoření a nejrychlejší oxidace způsobuje výbuch.

Ovšem k hoření či k výbuchu je kromě kyslíku (nebo jeho zdroje) zapotřebí hořlavé látky a zápalné teploty. Soubor všech tří složek bývá také nazýván *požární trojúhelník*. Nepřítomnost jedné ze složek této nebezpečné trojice vylučuje i nebezpečí požáru či výbuchu. Jelikož v našem případě nelze vyloučit kyslík, se kterým pracujeme, je nutno vyloučit či co nejvíce omezit vliv zbývajících dvou faktorů. Ke kyslíku, případně ke směsi bohaté na kyslík, je však zapotřebí ještě podotknout, že při manipulaci s nimi tisíckrát nemusí k ničemu dojít, avšak tisíci prvá manipulace (byť i zcela shodná s předchozími) může způsobit katastrofu.

Známe je upozornění na nebezpečí kyslíku v kontaktu s látkami, obsahujícími tuky (uhlovodíky). K výbuchu (rychlému hoření) však při jejich kontaktu s kyslíkem nemusí vždy dojít. Nicméně při vzájemném kontaktu těchto látek s kyslíkem o zvýšeném tlaku toto nebezpečí hrozí, jelikož se snižuje zápalná teplota těchto látek. Uvádí se, že v čistém kyslíku při tlaku okolo 20 MPa je tato teplota snížena na 1/10 zápalné teploty na vzduchu. Zápalné teploty je pak možno dosáhnout samotným stlačením plynu nebo jiskrou, vzniklou při vysoké

rychlosti třením či nárazem i drobné kovové částičky, která se v zásobnících, ventilech a součástkách plicní automatiky může vyskytnout. Důsledkem pak může být výbuch.

K vyloučení tohoto nebezpečí je především nutné, aby zařízení, které přichází do kontaktu s kyslíkem za nebezpečných okolností (např. pod zvýšeným tlakem), bylo především **připraveno ke kyslíkovému využití** (oxygen service), tj. zbaveno hořlavých látek. Kromě toho je nutné, aby plnicí zařízení bylo konstruováno a provozováno tak, aby **nemohlo dojít k dosažení zápalné teploty** případných zbytků výbušných látek.

3.5.2. Úprava ke kyslíkovému využití.

Na tomto místě je třeba znovu uvést, že bývá uznáváno, ovšem ne všude, že se směsí, obsahující více než 40 % kyslíku, je nutno zacházet stejně jako s čistým kyslíkem a že kyslíkový servis si nevyžadují zařízení, která s takovým podílem kyslíku za žádných okolností do kontaktu nepřijdou. Toto je například stanovisko již uváděného úřadu NOAA. Na druhé straně někteří výrobci rekreačních potápěčských zařízení a zástupci průmyslu se stlačenými plyny i některé výcvikové systémy proklamují, že čistému kyslíku je blízká již směs o obsahu kyslíku větším než 23 %. Pokud ovšem některý z výrobců deklaruje, že jeho výrobek není kompatibilní s jiným dýchacím médiem než se vzduchem, nelze jinak, než brát jeho stanovisko za závazné.

Ke kyslíkovému využití je nutné, aby zařízení splňovalo dva základní požadavky :

- požadavek na jeho **kyslíkovou čistotu**
- požadavek na jeho **kompatibilitu s kyslíkem**.

Požadavek **kyslíkové čistoty** zařízení znamená, že všechny jeho součásti musí být zbaveny nečistot, které by mohly v kontaktu s kyslíkem způsobit výbuch. Všechny jeho součásti musí být očištěny vhodným detergentem a případně rozpouštědlem k odstranění především uhlovodíků, případně zbytků silikonového maziva, avšak i jiných olejů, maziv a těsnicích tmelů i jiných látek, které jsou v kyslíku a obzvláště ve stlačeném, hořlavé.

Menší zařízení, která lze rozebrat na součásti, jako například ventily lahví, propojky či přímo plicní automatiky, je nejprve vhodné zcela rozebrat, co nejvíce zbavit mechanických nečistot a nánosu mazadel důkladným otřením. Rovněž solí a zplodin, vzniklých jejich působením je třeba se zbavit například ponořením do slabšího kyselého roztoku (octa...) Výhodné je použití ultrazvukové čističky, které rychlým odstraňováním zplodin reakce působení chemikálií značně urychlí. Nekovové součástky však mohou být působením chemikálií narušeny, a proto je zapotřebí nejprve zjistit jejich odolnost vůči nim.

Upozornění: součásti z hliníku nebo titanu by neměly být používány se zvýšeným **pO₂**, jelikož jsou náchylnější ke vzplanutí !

Po tomto očištění by mělo následovat důkladné odmaštění – nejprve nejlépe horkým roztokem vhodného detergentu (co nejúčinnější koncentrát prostředku, sloužícího např. k umývání nádobí) a potom důkladné opláchnutí teplou vodou (někdy se hovoří dokonce o deionizované vodě). Účinný, avšak ekologicky závadný, je vodný roztok fosforečnanu sodného (Na_3PO_4).

Na povrchu opláchnuté součásti, položené na čistou podložku, by se neměly bezprostředně po opláchnutí vytvářet perličky vody, které jsou známkou „mastnoty“. Stejně tak je vhodné zkontrolovat samotnou vodu – na částečky v ní plovoucí a rovněž její hladinu na skvrny. Detergent, použitý k odstranění uhlovodíků, na sebe uhlovodíky váže, a je tedy nutné zcela se zbavit i detergentu samotného. Poslední způsob vizuální inspekce je rasantní protřepání odlité části oplachové vody na několik sekund a její kontrola na tvorbu pěny nebo řady bublinek na styku s nádobou, svědčící o přítomnosti detergentu.

Po těchto úkonech by mělo následovat úplné vysušení nejlépe horkým vzduchem (nikoliv proudem běžného stlačeného vzduchu, který obsahuje kapky oleje). K tomu lze například použít fénu. Povrch osušené součásti je možno vždy ještě zkontrolovat na odlesky pod dobrým osvětlením.

Není – li však stále dosaženo patřičné čistoty, je možno použít některé látky rozpouštějící uhlovodíky. Bude-li možno po vyčištění součást zcela látky zbavit (například pod fénem), může být použito i například trichloretylénu, který sice působí karcinogenně, avšak není hořlavý. Bývá použito některého z freonů, které však narušují ozónovou vrstvu, někdy technického benzínu, případně izopropylalkoholu. Obě posledně jmenované látky jsou vysoce hořlavé a je skutečně nutno zajistit jejich úplné odstranění. Izopropylalkohol má dvě výhody: rozpouští zbytky vody a dobře se odpařuje.

Vnitřek lahví dýchacích přístrojů, a to obzvláště starších, je zapotřebí nejprve vizuálně zkontrolovat na výskyt koroze (u ocelových se častokrát vyskytuje koroze bodová) a okují. Je-li patrný velký rozsah koroze, je vhodné láhev spíše použít jinak. Láhev vhodnou k přípravě pro použití s kyslíkem (nejvhodnější je zcela nová) je nutno nejprve mechanicky očistit od zplodin koroze a okují, pod nimiž mohou zůstat zbytky nečistot po opracovávání či tlakové zkoušce. To je možné provést například „vyšleháním“ vnitřku láhve (odmaštěným !) bicyklovým řetězem upevněným na konci tyče nasazené do sklíčidla vrtačky. Místo řetězu je možné použít roztřepený konec lanka z tvrdé oceli. Další možností – poněkud náročnější - je nasypat do láhve vytvrzené broky nebo ještě lépe tvrdokovové, korundové nebo keramické peletky a láhev umístit do přípravku, který jí otáčí a různě naklání.

Po mechanickém vyčištění se láhev podrobí stejné proceduře jako pro výše uvedené součásti. Vyčištění pomocí horkého roztoku detergentu, bez dalších chemikálií, je záležitostí, která do láhve po následném dobrém vypláchnutí nevnese žádné toxické látky. Výplachovou vodu je zase zapotřebí vizuálně kontrolovat a k vysušení použít horký vzduch, který je

možno např. z fénu do láhve zavést trubicou. Použití přehřáté páry k vypláchnutí zbytků detergentu nebo přímo k vyčištění se příliš nedoporučuje u lahví ze slitin hliníku. Je výhodné mít možnost láhev umístit obráceně (dnem vzhůru) na trubicu, do které je vháněna nejprve horká voda, případně pára, a pak horký vzduch k vysušení (obr. 11).



Obr. 11. Přípravek k čištění vnitřku lahví

Je-li nutno použít dalších chemikálií, pak spíše izopropylalkoholu, jelikož trichloretylén a podobná organická rozpouštědla se z láhve dostávají ven velice nesnadno a je spíše zakázáno jich používat vzhledem k jejich toxicitě. K zajištění kyslíkové čistoty musí být na závěr provedena vhodná kontrola čistoty. Může být použito tzv. „černé“ UV světlo, ve kterém některé nečistoty fluoreskují, avšak ne všechny ! (Naopak pod ultrafialovým světlem fluoreskuje i bavlna, a tak pro kontrolu po výtěru (např. závitů) je vhodné použít hadříku z jiného materiálu). Nejvhodnější by tedy bylo provedení chemické analýzy rozpouštědla po aplikaci.

Kritickým místem u láhve jsou závity u hrdla láhve, do nichž se vešroubovává ventil láhve. Naštěstí bývají dobře přístupné i pro mechanické čištění jemnějším kartáčkem.

Co lze považovat za nebezpečné nečistoty ? Běžné jsou mazací oleje pro opracování, z nichž se může vytvořit tenký film, mazadla a oleje na bázi uhlovodíku, avšak rovněž některé čisticí prostředky obsahující organickou složku, prach z kompresorového filtru (uhlí), kovové zbytky jako okuje, otřepy, špony, odpadlé kousky po pokovení, korozní zplodiny, kousky těsnicích hmoty či odloupené kousky těsnicích kroužků, zbytky po detekci netěsností a vlákna z čisticích hadříků. K tomu lze někdy přičíst i veškerý organický materiál, který se do míst dostal určitou nedbalostí, např. z kosmetických přípravků (opalovací krém, make-up atd.), avšak i z popisovacích prostředků nebo prostě části těl hmyzu, který si v nedostatečně chráněném místě našel úkryt. Všechny tyto nečistoty, které nemusí být nebezpečné při kontaktu se vzduchem, byť i stlačeným, mohou být v prostředí vysoké koncentrace a vysokého tlaku kyslíku hořlavinou.

Kompatibilita s kyslíkem zase znamená, že veškeré součásti zařízení (např. plicní automatiky), obzvláště nekovové a měkké, jako například běžné těsnicí "O" kroužky, musí být nahrazeny takovými, které mohou být ve styku s čistým kyslíkem (např. z materiálu Viton-A). Je pravděpodobné, že fungovat bude i vyčištěný a vhodně namazaný běžný pryžový těsnicí kroužek (lépe nitrilový, označovaný jako Buna), který však v kyslíkové atmosféře rychleji degraduje a bude muset být brzy vyměněn. To je důvod k použití kroužku vitonového. Viton má však tu nemilou vlastnost, že zplodiny po jeho případném hoření jsou velice toxické. Proto někteří z výrobců (Apeks, modrá barva O-kroužků) přecházejí na kroužky EPDM (etylen-propylenové). Nicméně pod stálým zvýšeným tlakem p_{O_2} se nachází hlavně těsnicí kroužek ventilu láhve

Rovněž mazadla (např. silikonová vazelína) musí být zaměněna za mazadla kompatibilní s kyslíkem (obvykle mazadla Krytox 240, Kryton, Christo –Lube firmy Dupont). S kyslíkem nejsou rovněž kompatibilní silikonové membrány nebo některá sedla ventilů.

Při potápění s nitroxem o obsahu kyslíku menším, než 40 %, nemusí obvykle plicní automatika a součásti na ni napojené „mít kyslíkový servis“. Pokud ovšem výrobce plicní automatiky neuvádí jinak. Avšak při plnění zásobníků směsí metodou parciálních tlaků, kdy se do láhve nejprve napustí určité množství čistého kyslíku, je zcela nutné, aby k režimu použití s kyslíkem byla připravena láhev samotná a její vypouštěcí ventil. Tato metoda je přitom používána nejčastěji, a proto by se tento pokyn měl vztahovat na **všechny zásobníky nitroxu**.

K použití s kyslíkem připravená láhev by měla být příslušně označena (viz níže). Má-li to tak zůstat, nesmí být v žádném případě plněna vzduchem, u něhož není zajištěna dostatečná čistota. Znamená to, že mezi takové plicní zařízení a láhev je nutno vložit speciální **dodatečný filtr**.

3.5.3. Plicní a míchací zařízení.

Plicní a míchací zařízení musí být nejen připraveno k použití s kyslíkem, avšak navíc musí být konstruováno a provozováno tak, aby v žádné z jeho součástí nedocházelo ke zvýšení teploty k zápalné teplotě případných hořlavin. I po kyslíkovém vyčištění by se mohlo stát, že v zařízení zůstaly některé zbytky nečistot, obzvláště v místech o nesnadném přístupu. A i když není vyvolán požár, mohou po nedokonalém hoření zůstat jeho zbytky, jako například oxid uhelnatý.

Zdrojem zvýšení teploty může být především jiskra, vyvolaná třením nebo nárazem okuje, otřepu, apod. o stěnu nádoby nebo kovového potrubí. Jiskra může způsobit hoření zbytkových nečistot o nižší zápalné teplotě a jejich hořením vznítit i materiál o zápalné teplotě vyšší, například i kov. Je nutno docílit toho, aby zmíněné rychlost zmíněných částic

byla malá. Je však zapotřebí si uvědomit, že v nejužších místech – pod kuželkami či kolem jehel ventilů – je rychlost proudění vždy (pokud tlak před zúžením je přibližně dvojnásobný oproti tlaku za ním nebo větší, což platí téměř vždy) rovna lokální rychlosti zvuku, tj. přes 300 metrů za sekundu. Navíc: proud tekoucí směsí může v potrubí vyvolat tzv. rezonance – vibrace, které mohou mít za následek postupné uvolňování případných usazenin ze stěn potrubí. Je tedy nutné plnění regulovat tak, aby proudění v potrubí bylo pomalé.

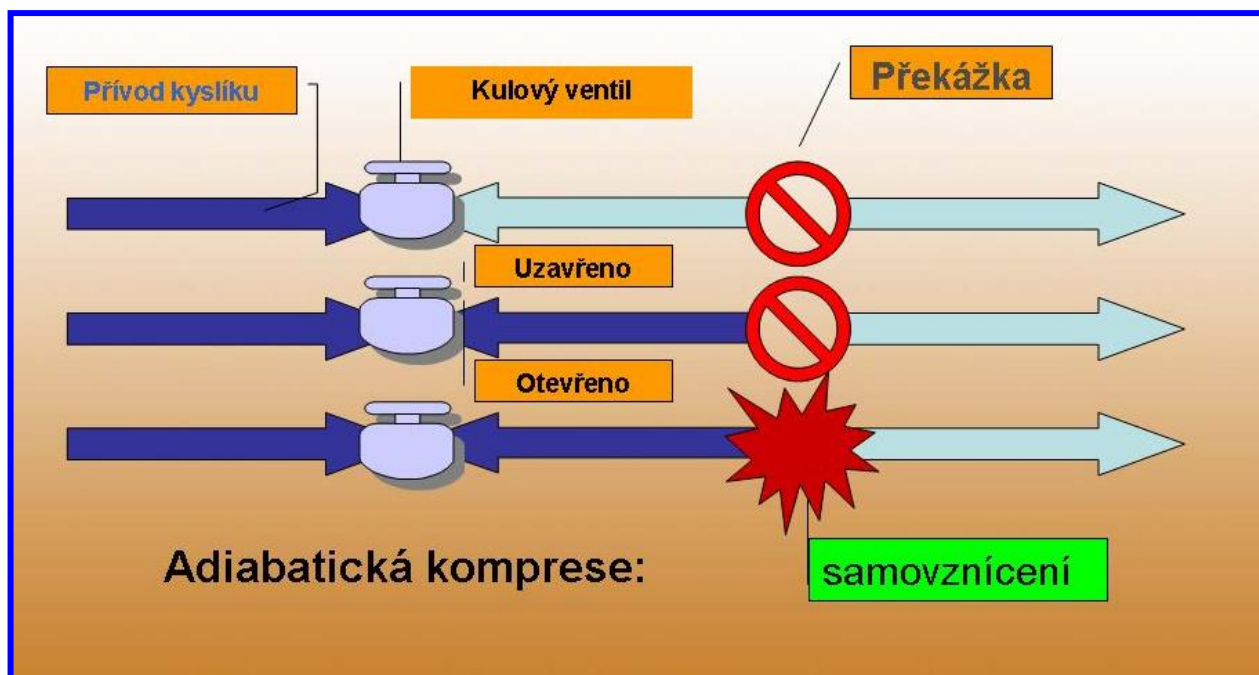
Druhou možností, jak dosáhnout zápalné teploty, je ohřev adiabatickou kompresí – rychlým stlačením plynu, které zvýší jeho teplotu – viz Tab. IV. (Zdálo by se, že stlačením nemůže vzniknout dostatečný ohřev, avšak nemylme se: vznětový – dieselový – motor pracuje právě na principu adiabatického ohřevu vzduchu, do něhož je následně vstříknuto palivo). K adiabatické kompresi dochází tehdy, když větší množství plynu zaplní nádobu tak rychle, že nemůže být dostatečně ochlazována. To způsobí obvykle velký nárůst teploty. Ke stejnému jevu může dojít, jestliže se do cesty takovému toku plynu postaví nějaká překážka (částice, zúžení, uzavřené ventily atd.).

MPa	barů	°C
0,7	7	234
7	70	706
14	140	920
28	280	1181
35	350	1287

Tab. 4: Teplota po adiabatickém stlačení kyslíku z teploty 20°C a tlaku 0,1 MPa (1 bar)

K tomu může dojít například necitlivě rychlým otevřením ventilu a následným stlačením přepouštěného plynu na uzavřeném nebo jen pootvřeném dalším ventilu. Mohou k tomu přispět i nevhodná zakřivení potrubí (malý poloměr zakřivení). Rovněž plnění malých lahví vede k rychlému ohřevu a pak je vhodnější mít případnou směs připravenou ve větší láhvi a přepouštět ji už namíchanou do malé. Adiabatický ohřev (obr. 12) je tedy druhým důvodem pro pomalé plnění.

Pod pomalým plněním rozumíme takové, že nárůst tlaku není větší než asi 0,4 MPa za minutu (4 bary za minutu). Důležité je to především při přepouštění kyslíku. Přepouštěcí hadice (samozřejmě kyslíkově čistá) by měla být kromě výstupních a vstupních koncovek opatřena poměrně přesným manometrem a regulačním jehlovým ventilem, umožňujícím

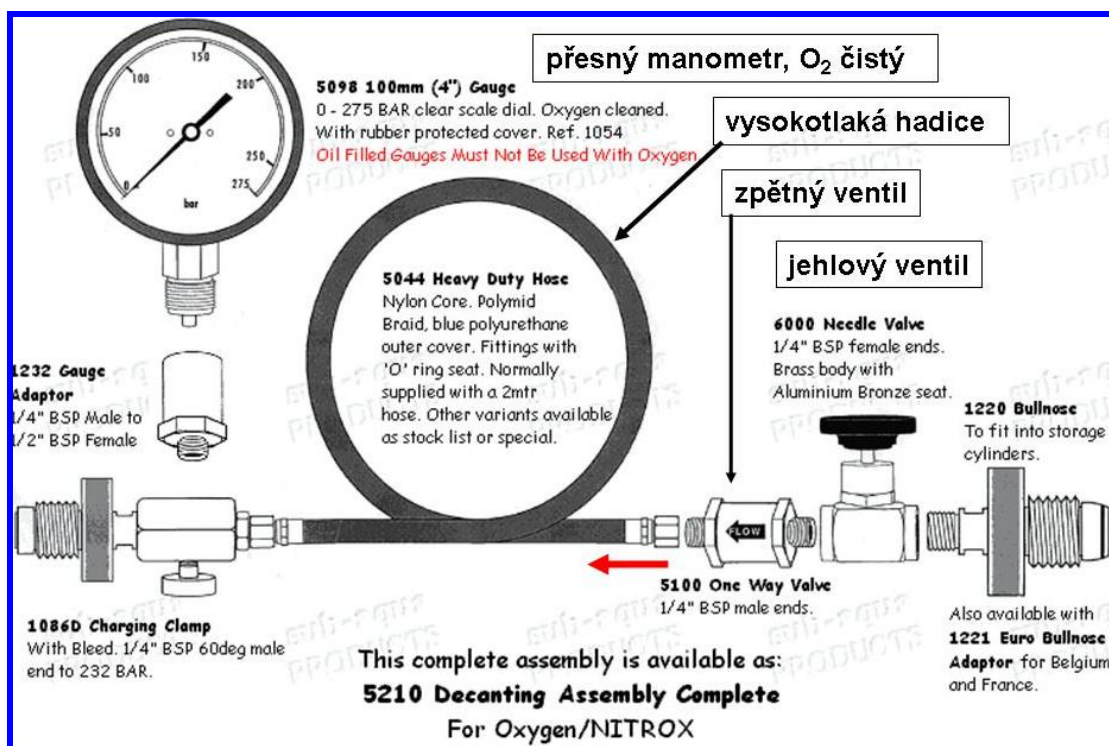


Obr. 12. Vznícení adiabatickou kompresí

jemné otevírání a tudíž i regulaci rychlosti průtoku (obr.13, 14). Uvádí se, že není-li k dispozici tento ventil, reguluje se průtok ventilem z napouštěcí láhve (tedy z té, z níž se kyslík nebo směs odebírá). Přitom ventil napouštěné láhve má být zcela otevřen. Lze však nalézt i opačné tvrzení: regulaci provádět ventilem láhve napouštěné. Každopádně je vhodné průtok regulovat tím ventilem, kterým jde jemněji manipulovat a pamatovat na to, že při zahájení přepouštěcích manévru je nutno i do přepouštěcí hadice napouštět kyslík nebo směs pomalu.



Obr. 13. Přepouštěcí hadice



Obr. 14. Přepouštěcí hadice- součásti

Po napuštění kyslíku doplníme při plnění metodou parciálních tlaků láhev vzduchem. Obvykle je postup plnění: nejprve kyslík, pak vzduch, výhodnější, jelikož kompresorem, případně plněním ze záložních zásobníků, dosáhneme při doplňování vyššího tlaku jednodušeji – jinak můžeme postupovat, máme-li k dispozici kyslíkový booster. Doplnění by mělo být zpočátku rovněž prováděno opatrně, ať nedochází k velkému zahřívání směsi v láhvi, avšak po doplnění o 3,0 - 4,0 MPa (30 – 40 barů) lze již rychlost plnění zvýšit a tím zajistit dokonalejší promíchání složek směsi. I zde platí, že lepšího promíchání docílíme v ležících lahvích.

3.5.4. Analýza směsi.

První analýza směsi se provádí po naplnění přístroje. U nitroxu obvykle dochází k dostatečnému promísení obou složek mechanicky i difusí poměrně rychle a nemělo by dojít k disproporcím vůči očekávání. Přesto se doporučuje nějakou dobu na úplné promísení počkat – některé organizace (včetně NOAA) až 6 hodin. Většinou však plnič provádějí analýzu směsi dříve – např. po čtvrt hodině, aby mohli předat přístroj. Při doplňování pravděpodobně skutečně dochází k rychlému promísení směsi, obzvláště, je-li přístroj položen. Nicméně je nutno o plnění vést deník a pokud by některý předaný přístroj vykázal značně odlišné údaje od požadovaných, zjistit příčinu odchylek a provést patřičnou korekci metodiky plnění.

Je nutné, aby potápěč, coby uživatel směsi, sám provedl její analýzu nebo se jí osobně účastnil při odběru zásobníku. Svým podpisem na protokolu o převzetí zásobníku se směsí (viz příloha B) by měl stvrdit složení směsi a rovněž uvést maximální hloubku, do níž smí tuto směs s ohledem na kyslíkovou toxicitu CNS použít. Důrazně se doporučuje provést analýzu směsi těsně před ponorem.

Přesnost měření koncentrace kyslíku by neměla překročit hodnotu ± 1 %. To znamená, že označení Nitrox 32 / 68 odpovídá směsím, obsahující kyslík v koncentracích 31- 33 %.

Analyzátoary kyslíku pracují obvykle na dvou principech :

- na paramagnetismu kyslíku
- na principu galvanického článku.

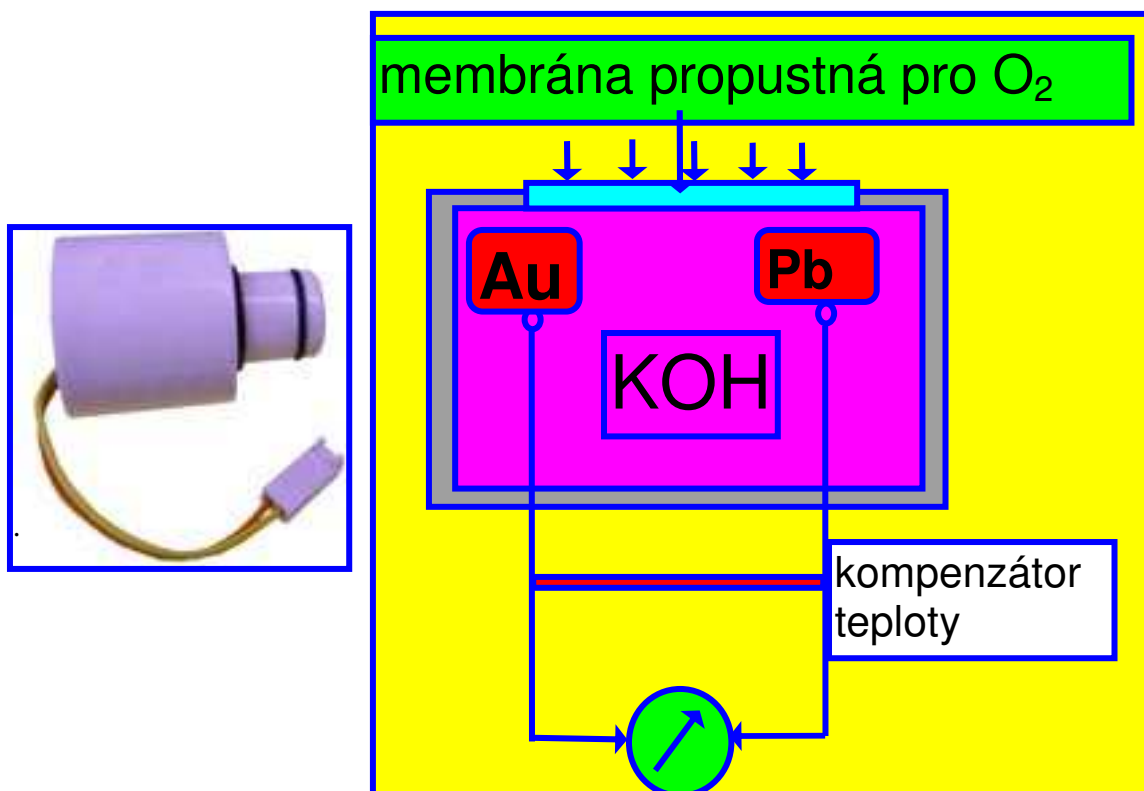
3.5.4.1. Analyzátoary kyslíku založené na jeho paramagnetismu.

Kyslík má ze všech plynů nejvýraznější paramagnetické vlastnosti: jeho molekuly jsou v magnetickém poli přitahovány podstatně silněji než molekuly jiných plynů. Po napuštění plynu, obsahujícího určitý podíl kyslíku, dochází v magnetickém poli k vychýlení zrcátka, osvětlujícího dvě fotobuňky a k rozvážení elektrického signálu v cívce, obklopující prostor, v němž se plyn nachází. Kompenzace velikosti tohoto signálu způsobí vychýlení ručičky měřícího přístroje, které je úměrné obsahu kyslíku ve směsi.

Tento analyzátoar se sice vyrábí i v mobilní verzi, avšak bývá spíše využíván jako stabilní, vzhledem ke své citlivosti na vnější mechanické podněty a na nároky na zdroj proudu. Provádí analýzu statického (neproudícího) plynu.

3.5.4.2. Analyzátoary kyslíku založené na galvanickém článku.

Čidlo (obr. 15, 16) tohoto analyzátoaru funguje jako galvanický článek, v němž elektrolytem je hydroxid draselný, anoda je olověná a katoda zlatá, případně pokrytá slitinou mědi a berylia. Potenciálový rozdíl mezi anodou a katodou je úměrný množství kyslíku, který prostupuje polopropustnou teflonovou membránou. Na katodě pak dochází k redukční reakci, na anodě k oxidaci. Proud z galvanického článku je zesilován a měřen a jeho velikost je úměrná parciálnímu tlaku kyslíku ve směsi. Analyzátoar je elektricky kompenzován na teplotu plynu a přes parciální tlak stanovuje podíl kyslíku v proudící směsi.



Obr. 15, 16. Čidlo analyzátoru kyslíku

3.5.4.3. Praktické provedení analýzy směsi.

Analýza směsi se provádí přenosným analyzátozem obvykle v provedení na principu galvanického článku. Přesnost stanovení koncentrace kyslíku bývá v mezích $\pm 1\%$. Čidlo analyzátoru má zaručenou životnost přibližně 1 rok a v originálním obalu začíná ztrácet své užité vlastnosti asi po 3 měsících. Nicméně jeho skutečná životnost bývá delší – 3 až 4 roky. Je nutno se předem seznámit s návodem k použití přístroje. Příklad je nutno chránit před vlhkostí, která se nesmí dostat do čidla například vystříknutím vody, která se neopatrným zacházením dostala do ventilu láhve.

Postup při analýze směsi je následující:

- provedení kalibrace analyzátoru (obr. 17). Tu je nutno provést vždy před měřením. Kalibraci je nejlépe provést pomocí čistého kyslíku, avšak je možné provést kalibraci i na okolní vzduch. Při této kalibraci se analyzátor zapne a vyčká se alespoň 1 minutu, až se zastaví nárůst odečtu a stabilizuje. Je-li odečet mimo meze 20,8 až 21 %, je nutno provést nastavení kalibračním knoflíkem na tuto hodnotu. Nelze-li to provést, je přístroj vadný a vyžaduje opravu ! Novější analyzátozy provádějí kalibraci zcela automaticky.



Obr. 17. Analyzátor kyslíku-kalibrace



Obr. 18. Provedení analýzy nitroxu

- k láhvi s analyzovanou směsí by měl být připojen redukční ventil, z něhož by měla být vyvedena směs v průtočném množství přibližně 2 litry za minutu do trubičky, do níž ústí čidlo analyzátoru. Při měření se stoupající ručička měřícího přístroje zastaví do 30 sekund na hodnotě, odpovídající podílu kyslíku ve směsi.

Nejčastěji se lze setkat s měřením, kdy se čidlo vloží do trubky vsazené do vývodu ventilu z láhve po předchozím seřízení výtoku směsi ventilem láhve (obr. 18). Při měření je nutno zajistit, aby do proudu plynu nebyl přisáván okolní vzduch – obvykle na vstupu do trubky. Směs musí kolem čidla protékat volně: výstup nesmí být ucpáván a průtočné množství musí být seřízeno k cca 2 litry za minutu. Je třeba si uvědomit, že je měřen parciální tlak, nikoliv koncentrace kyslíku ! Změřená hodnota by pak mohla být nesprávná a navíc hrozí poškození čidla analyzátoru.

Dojde-li k situaci, kdy analýza, provedená dvěma analyzátory, dá dva odlišné výsledky (a oba analyzátory se jeví být v pořádku), je nutno při ponoru postupovat tak, že

- pro účely stanovení maximální hloubky ponoru (MOD) a stupně kyslíkové zátěže se bere v úvahu větší naměřená hodnota obsahu kyslíku ve směsi.

- pro účely stanovení dekomprese se bere v úvahu menší naměřená hodnota podílu kyslíku ve směsi. Pro větší bezpečnost se doporučuje provádět dekompresi jako se vzduchem.

Po provedení analýzy je zapotřebí na lepicí pásku (voděodolnou) napsat složení směsi a nalepit tuto značku na vrchlík láhve. Někteří míchači navíc přelepí páskou výpust ventilu láhve, což má dva významy: láhev je naplněna a zabrání se vniku nečistot do vývodu.

3.5.5. Postup při míchání nitroxu metodou parciálních tlaků.

1. Zkontroluj údaje na láhvi (test, plnicí médium, plnicí tlak, kyslíková čistota).
2. Změř tlak a složení směsi v láhvi. Láhev je lépe položit.
3. Proveď výpočet ke stanovení tlaku kyslíku, který je nutno přidat.
4. Připoj kyslíkovou přepouštěcí hadici na láhev s kyslíkem a na plněnou láhev.
5. Změř tlak kyslíku v plnicí kyslíkové láhvi.
6. Je-li to třeba, vypočti, zda ti bude kyslík v zásobní láhvi stačit k plnění.
7. Pomalu otevři kyslíkový ventil při uzavřeném přepouštěcím / ventilu na láhvi.
8. Reguluj přepouštění (jehlovým ventilem, příp. ventilem na láhvi) tak, aby rychlost stoupání tlaku nepřekročila 0,5 MPa / min (5 barů za minutu).
9. Po dosažení požadovaného tlaku kyslíku uzavři přepouštěcí ventil i ventil láhve.
10. Počkej na ochlazení směsi, změř podíl kyslíku v ní a případně doplň kyslík.
11. Připoj na láhev plnicí hadici od kompresoru.
12. Zkontroluj připravenost kompresoru k plnění.
13. Nastartuj kompresor při uzavřeném plnicím ventilu.
14. Počkej až tlak na výstupu překročí tlak v láhvi.
15. Pak pomalu otevři plnicí ventil a začni plnit vzduch do konečného tlaku.
16. Po jeho dosažení počkej na ochlazení směsi a proměř její složení.
17. Inkasuj, vyplň protokol, nechej ho podepsat, předej láhev.

3.6. Výbava a označení lahví.

V některých evropských zemích hoří legislativní boj o značení zásobníků stlačených plynů vůbec a o pojednání nitroxu jako kyslíkem obohaceného plynu zvlášť. V souvislosti s tím jde rovněž o vhodný způsob napojení plicních automatik k výpustným ventilům lahví, tedy o rozměry případného výstupního šroubení nebo výstupní kostky (INT). Většina technických potápěčů používá ventily se závitovým výstupem G 5/8 ″ jako pro vzduch, zvaný také DIN. Podle většiny norem a některých výrobců dýchací techniky je však nitrox specifické médium, k jehož využití je potřebná i odlišná dýchací technika než k dýchání vzduchu.

Problematika ventilů pro láhve plněné nitroxem je u nás řešena normou ČSN EN 1443 (83 2280) Ochranné prostředky dýchacích orgánů - Ventily lahví na plyny - Část : Závitové spojení na výstupu pro plyny Nitrox a kyslík určené pro potápění (vydána v srpnu 2003).

Tato norma se vztahuje na závitová spojení užívaná pro spojení mezi ventilem tlakové lahve na plyn a redukčním ventilem pro dýchací přístroj pro potápění obsahující směs nitrox s kyslíkem o koncentraci větší než 22% nebo kyslík.

Nově stanovuje, že pro výše uvedené plyny je určeno závitové spojení M 26x2 vnitřní pro plnicí jmenovité tlaky 20 a 30 MPa, přičemž odlišení je provedeno rozdílnou délkou závitu a rozměrem přípojky. Dále určuje, že kromě označení požadovaného dle ČSN EN 144-1 musí být spojení pro výstup z ventilu trvale označeno číslicí "200" pro jmenovitý tlak 20 MPa a spojení pro jmenovitý tlak 30 MPa číslicí "300".

Pro nás je důležité, že i u této normy je stanoveno přechodné období v délce trvání pěti let, během kterého bylo doporučeno postupné zavádění ventilů se závity popsány v této normě - tj. do 08/2008.

Doporučená kombinace uzavíracích ventilů a barevného značení tlakových lahví na nitrox dle aktuálně platných ČSN a ČSN EN:

Uzavírací ventil:

- a) s boční přípojkou W 21,87 vnější - do 08/2008,
- b) ventil INT (kostka) - do 08/2008,
- c) s boční přípojkou M 26x2 vnitřní.

Detailně je související problematika probrána v publikaci Ing. Oldřich Lukš: „Tlakové lahve, uzavírací ventily a plnění dýchacích směsí potápěčských dýchacích přístrojů“, SČP 2006

[\(http://www.svazpotapecu.cz/scp_materialy_a_formulare_ke_stazeni/\)](http://www.svazpotapecu.cz/scp_materialy_a_formulare_ke_stazeni/).

Barevný nátěr:

Celá láhev bílá (možná je i barva žlutá pro válcovou část láhve se dnem), na vrchlíku černé nebo modré písmeno N (=Nový) o výšce rovnající se 0,7 výšky zaoblené části. Na válcové části černý nebo modrý nápis NITROX písmeny stejné velikosti jako písmeno "N". Tento nápis může být doplněn údajem o procentuální koncentraci kyslíku ve směsi. Na láhev by měla být nalepena nálepka nebo přivěšen přívěsek s označením alespoň obsahu kyslíku ve směsi v procentech. Tento údaj může být doplněn údajem o maximální hloubce, do níž může být směs použita (MOD). Nápis musí být provedeny tak, aby se nesmyly vodou.

Láhev vyčištěná a kompatibilní pro použití s kyslíkem (např. pro plnění metodou parciálních tlaků) má být opatřena tento fakt oznamující nálepkou nebo přívěskem (např. "Oxygen Service") spolu s datem provedené údržby a se jménem osoby, která servis provedla.

Důrazně se doporučuje skladovat nitroxové a vzduchové lahve odděleně (nejlépe držet nitroxové lahve pod zámkem v prostorách, do nichž mají přístup pouze osoby znalé nitroxové problematiky), aby za žádných okolností nemohlo dojít k jejich záměně.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem byl vyškolen v používání dýchací směsi Nitrox při potápění a že jsem se seznámil a porozuměl údajům, uvedeným v dalších částech tohoto prohlášení.

Podíl kyslíku ve směsi v zásobníku, kterého se prohlášení týká, jsem proměřil osobně pod dohledem kompetentní osoby a vypočetl jsem i maximální přípustnou hloubku ponoru (MOD) s tím související.

Vím, že po převzetí nesmí být zásobník předán další osobě.

Údaje o zásobníku dýchací směsi :

Číslo láhve Objem láhve....litrů Tlak směsi.....MPa

Kalibrační hodnota analyzátoru před měřením :.....%

Podíl kyslíku stanovený předávajícím :.....%

Podíl kyslíku stanovený uživatelem :.....%. MOD :.....m

Údaje o předání zásobníku :

Jméno předávajícího :..... Podpis:.....

Datum :..... Čas :..... Místo :.....

Údaje o uživateli zásobníku :

Jméno a příjmení uživatele :.....

Rodné číslo :.....

Číslo oprávnění (karty Nitrox Diver) :.....

(pokud byl zásobník předán cvičenci na základní stupeň potápění s nitroxem, uveďte "výcvik" a číslo instruktora)

.....
podpis uživatele

4. Míchání trimixu.

4.1. Úvod.

Jak napovídá sám název, trimixem rozumíme směs tří plynů. Na rozdíl od nitroxu – směsi kyslíku a dusíku – vstupuje do hry další plyn, a sice hélium. Jak totiž bylo řečeno již v kapitole 3.1., s ohledem na přípustné meze parciálního tlaku kyslíku a dusíku bychom se s nitroxem či se vzduchem neměli pouštět hlouběji než do necelých 50 metrů. Přitom jsou už v této hloubce zmíněné hranice posunuty do oblasti vyššího rizika.

V dýchací směsi musí být bezpodmínečně kyslík. V nitroxu je ředěn dusíkem, avšak z důvodu snížení jeho narkotického působení je pro potápění ve větších hloubkách k oběma plynům přidat další, třetí, nejlépe takový, který je -stejně jako dusík při menších tlacích - fyziologicky inertní a nezpůsobuje hloubkové opojení. V principu připadají v úvahu lehké, chemicky inertní plyny hélium a neón a dále plyn sice značně reaktivní, avšak neúčastnící se fyziologických procesů - vodík. Se všemi uvedenými plyny se experimentovalo ve směsi s kyslíkem a obzvláště směs kyslík - hélium byla a je využívána komerčně i vojensky pod názvem **heliox**. Ve směsi kyslík - vodík (**hydrox**) nesmí kvůli hrozbě výbuchu koncentrace kyslíku překročit 5 %, a proto je tato zatím spíše experimentální směs (obvykle s příměsí hélia, hydroliox) určena pro velké hloubky, a to i pro svoji malou hustotu, která usnadňuje její dýchání při velkých tlacích. Neón je nejčastěji využíván jako příměs k héliu, a to rovněž spíše experimentálně. Bylo zjištěno, že výhodnější než použití helioxu je využití směsi kyslíku, hélia a dusíku, tzv. **trimixu**.

4.2. Plyny vyskytující se při směšovém potápění.

Tabulka Tab.5. je přehledná tabulka vlastností všech plynů, které se mohou v dýchací směsi při směšovém potápění vyskytnout, doplněná pro porovnání hlavně narkotického působení i dalšími inertními plyny. Samozřejmě by se ve směsi neměl nacházet oxid uhelnatý, avšak nechtěně se může v dýchacím médiu vyskytnout a v dalším bude stručně pojednáno i tomto nebezpečném plynu.

V tabulce Tab. 6. jsou znovu přehledněji uvedena fyziologická omezení, která jsou kladena na parciální tlaky jednotlivých plynů ve vdechované směsi při potápění. Při míchání směsí bychom měli tyto meze znát a důsledně je také dodržovat. Pravidlo zdravého rozumu navíc říká, že čím hlouběji hodlá potápeč jít, tím konzervativněji by měl mezní parciální tlaky volit.

Název	Chem. značka	Molární hmotnost	Hustota [kg/m ³]*	Tepelná vod. λ_0 *	rozpust. v tucích	narkot. potenciál	podíl ve vzduchu[%]
Kyslík	O ₂	32,0	1,409	23,86	110	???	20,99
Dusík	N ₂	28,01	1,234	23,78	67	1	78,03
Vzduch		28,96	1,2759	23,80	76		
Hélium	He	4,00	0,1762	143,6	15	4,26	0,0005
Neon	Ne	20,18	0,888	53,4	19	3,58	0,0018
Vodík	H ₂	2,02	0,0889	174,2	36	1,83	0,00005
Argon	Ar	39,95	1,759	16,24	140	0,43	0,933
Krypton	Kr	83,80	3,69	-	430	0,14	0,0001
Xenon	Xe	131,29	5,78	-	1700	0,039	0,000009
Oxid uhličitý	CO ₂	44,01	1,951	13,90	-		0,030
Oxid uhelnatý	CO	28,01	1,234	22,69	-	-	

- * při teplotě 0°C,
- tepelná vodivost λ_0 v $10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, rozpustnost v tucích v ml//bar
- narkot. potenciál: podíl rozpustnost dusíku / rozpustnost plynu (v tucích)

Tab. 5. Některé fyzikální vlastnosti vybraných plynů.

Plyn	Minimální parc. tlak	Maximální parc. tlak	Poznámka
Kyslík	16 kPa (0,16 baru)	160 kPa (1,6 baru)	při dekompresi
		140 - 150 kPa (1,4 -1,5 baru)	v hloubce
		do 120 kPa (1,2 baru)	v hloubkách okolo 100 m a větších
		do 50 kPa (0,5 baru)	při dlouhodobých pobytech v přetlaku
Dusík	0	300 - 400 kPa (3 -4 bary)	kvůli hloubkovému opojení
Oxid uhličitý	0	1 -1,5 kPa	v přilbě skafandru

Tab. 6: Minimální a maximální přípustné parciální tlaky vybraných plynů.

4.2.1. Kyslík.

Kyslík je plyn potřebný k životu buněk a tudíž i organismu. Podporuje hoření, které probíhá při jeho zvýšených parciálních tlacích rychleji a může vést k explozi. Ve vzduchu se nachází v koncentraci přibližně 21 %. Do tlaku přibližně 30 MPa (300 barů) se při stlačování chová jako téměř ideální plyn. Jako jediný z dýchaných plynů se účastní metabolických procesů. Jeho parciální tlak v dýchané směsi nesmí překročit 16 kPa (0,16 bar). Při krátkodobých pobytech pod vodou se jeho maximální parciální tlak smí ve větších hloubkách pohybovat v mezích 140 -150 kPa (1,4 - 1,5 bar) a při dekompresi smí dosáhnout maximálně 160 kPa (1,6 bar). Pro dlouhodobé pobyty v přetlaku nesmí jeho parciální tlak překročit 50 kPa (0,5 bar). I tak existují časová omezení pobytu pod jeho zvýšeným parciálním tlakem. Překročení předepsaných mezí může vést buďto k akutní otravě (CNS), projevující se symptomy blízkými k epileptickému záchvatu nebo k "pomalé" otravě, postihující hlavně plíce (viz OTU). Někdy se předpokládá, že může spolu s dusíkem rovněž působit narkoticky. Při dekompresi jeho velký podíl v dýchané směsi (tedy o to menší podíl inertních plynů) zvětšuje gradient inertních plynů (a tím usnadňuje jejich vylučování z těla), avšak současně způsobuje vasokonstrikci (zúžení cév) a tím po určité době zase působí proti vylučování plynů a je nutno jeho dýchání přerušit (Air Breaks). Kromě toho může být příčinou procesů, vyvolávajících tzv. kyslíkovou krátkozrakost a rovněž postižení ucha ("kyslíkové ucho").

4.2.2. Dusík.

Dusík je hlavní diluent, tedy plyn zředující kyslík. Ve vzduchu ho je přibližně 78 %. Do tlaku přibližně 30 MPa (300 barů) se chová jako téměř ideální plyn. Při dýchání je dopravován do organismu, kde se sice neúčastní metabolických procesů, avšak pod zvýšeným parciálním tlakem se rozpouští ve tkáních a při výstupu může být uvolněn ve formě nebezpečných bublin, způsobujících dekompresní nemoc. Kromě toho při zvýšeném parciálním tlaku přes 300 kPa (3 bary) vyvolává stavy hloubkového opojení. Tuto hranici (avšak nejvýše do 400 kPa) je doporučeno nepřekračovat při využití směsí, ve kterých se vyskytuje. Tím, že se nepodílí na metabolismu, je fyziologicky inertní.

4.2.3. Hélium.

Je to chemicky inertní plyn využívaný při potápění jako diluent nahrazující (ve směsi Heliox) nebo doplňující (v trimixu) dusík tak, aby byly dodrženy předepsané parciální tlaky kyslíku a dusíku v zamýšlené hloubce použití. Pro jeho malou hustotu se snadno dýchá i ve velkých hloubkách. Rychlost zvuku v něm je oproti vzduchu přibližně trojnásobná a to rovněž znamená, že snadno protéká sonickými tryskami (např. v plicních automatikách). Při použití telefonu (v celoobličejové masce, v kabině) však dochází ke zkreslení hlasu. Jeho

stlačitelnost je však oproti vzduchu menší -při 20 MPa (200 barů) o cca 10 % , při 30 MPa (300 barů) o cca 15 %, což je nutno brát v úvahu při míchání směsí, v nichž se vyskytuje. Jeho rozpustnost ve tkáních je sice menší, než rozpustnost dusíku, avšak rozpouští se přibližně 2,6krát rychleji. Nutnost desaturace rychlých tkání vede k nutnosti dodržet při jeho použití hluboké zastávky. Jeho narkotické působení na organismus je velmi malé i při vysokých tlacích a tak pro běžné trimixové potápění nebývá uváděna žádná přípustná horní hranice jeho parciálního tlaku. Ve vzácných případech může v důsledku střídání směsi dojít v důsledku různých rychlostí difúze k efektu tzv. izobarické kontradifúze. Jeho vysoká tepelná vodivost vede k mírnému urychlení odvodu tepla z horních dýchacích cest (nikoliv z plic) a při pobytu v atmosféře, která ho obsahuje, i ke zvýšenému odvodu z povrchu těla (nehodí se tudíž k doplňování suchých obleků). Při rychlých sestupech do hloubek okolo 150 metrů a větších se však může projevit tzv. syndrom HPNS (High Pressure Nervous Syndrom) - též "héliový třes" - a někdy i bolesti kloubů (arthralgie). Obojí bylo přičítáno působení hélia, avšak jde spíše o vliv hloubky samotné spolu s jinými faktory. Ve vzduchu se hélium volně téměř nenachází a proto jeho hlavní nevýhodou je jeho vysoká cena.

4.2.4. Neon, argon.

Oba uvedené plyny jsou chemicky inertní a pokusně jich bývá využito i jako diluentů kyslíku. Neon, jehož narkotické působení je velmi malé (je v této řadě ihned po héliu), by byl vhodným diluentem, avšak je příliš drahý. Ve směsi s héliem navíc potlačuje zkreslení hlasu. Argon je z chemicky inertních plynů na Zemi nejrozšířenější - ve vzduchu je ho 0,93 % . Byl použit k dekompresním experimentům, při nichž bylo využito desaturace pomalých tkání, avšak pro praktické využití jeho pomalejšího sycení tkání není dobře použitelný. Navíc je narkotičtější i hustší než dusík. Jeho výhodnou vlastností je však jeho nízká tepelná vodivost (asi o třetinu menší než vodivost vzduchu), a tak bývá při potápění zhusta využíván k tepelné izolaci v suchých oblecích.

4.2.5. Vodík.

Na rozdíl od chemicky inertních plynů je vodík vysoce reaktivní, a to obzvláště s kyslíkem. Obsahuje -li směs vodík a více než 5 % kyslíku, může dojít i při normální teplotě k její explozi. Proto je nutno se držet pod touto hranicí. Vodík má však tři vlastnosti, které ho přímo předurčují k tomu, aby byl používán coby diluent kyslíku při potápění. Jeho narkotické působení s rostoucím tlakem je poměrně malé (nachází se na třetím místě za neonem a působení je srovnáváno s účinky LSD). Jeho hustota je nejmenší ze všech známých látek, čímž zlepšuje průtok tryskami i dýchacími cestami. Je přitom levnější než hélium.

Proto s ním byly konány pokusné ponory jak skutečné tak simulované. Arne Zetterström v roce 1945 dosáhl se směsí vodíku a 4 % kyslíku hloubky 162 metrů, nicméně

zahynul po chybě povrchové obsluhy, která ho bez dekomprese a bez výměny plynu vytáhla k hladině. Hydrox je použitelný do hloubek okolo 150 metrů. Výbušnost směsi s vodíkem ho však (zatím ?) vylučuje z řady plynů pro běžné využití k potápění.

Simulované ponory se směsemi Hydreliox byly prováděny v přetlakových komorách do hloubek přes 700 metrů (!). Vodík se údajně projevil jako velice slibný plyn pro dekompresi, jelikož je - proslýchá se - schopen se v organizmu vázat s kyslíkem na vodu. Tato reakce vede k jakési "biochemické dekompresi", která by mohla výstup z velkých hloubek značně urychlit.

4.2.6. Oxid uhličitý.

Při potápění jde o plyn, který je produkován v průběhu metabolismu v organizmu pomalým spalováním živin, obsahujících uhlík. Podle složení stravy je na 1 litr spotřebovaného kyslíku vyprodukováno 0,8 - 0,9 litru CO₂ - tzv. respirační kvocient. Při normálním tlaku je ho v nadechovaném vzduchu 0,03 %, ve vydechovaném vzduchu už přibližně 4 %. Je důležitý především pro řízení dýchání - jeho větší produkce zvyšuje kyselost krve a tím i dráždění k nádechu a zvětšení dechové ventilace. Nedostatečná ventilace nebo závada na případném pohlcovači CO₂ může vést ke zvětšení jeho koncentrace v nádechovém prostoru přístroje. Pak se projevuje toxicky. Ve vdechované směsi by neměl být obsažen, jeho maximální přípustný parciální tlak v zařízeních, z nichž nemůže být zcela odstraněn (skafandr přilbového potápěče, potápěčský zvon), je 1- 1,5 kPa. Do tlaku 4 kPa by však neměl působit toxicky (4 % ho jsou ve vydechovaném vzduchu při ožívání). Přispívá k nástupu hloubkového opojení, způsobuje vasodilataci a tím zvětšuje množství inertních plynů rozpuštěných v lépe prokrvených tkáních. Rovněž se podílí na zvýšení citlivosti ke kyslíkové toxicitě. I při malém parciálním tlaku však může přivodit slabé bezvědomí (black-out), avšak při překročení mezní hodnoty se jeho toxicita rychle znásobuje.

Za běžné teploty je při tlaku cca 5 MPa (50 barů) kapalný. To poněkud znesnadňuje jeho využití jako tepelně izolačního plynu: jeho tepelná vodivost je totiž ještě menší než tepelná vodivost argonu. Přesto bývá někdy k tomuto účelu používán.

4.2.7. Oxid uhelnatý.

Oxid uhelnatý je podobně jako oxid uhličitý ve vdechované směsi zcela nežádoucí. Může se do ní dostat obvykle v průběhu plnění zásobníku při nasávání vzduchu s obsahem motorových spalin nebo v důsledku mazání kompresoru nevhodným olejem. Je rovněž obsažen v cigaretovém kouři. Vzniká při nedokonalém spalování uhlíku. Je prudce toxický tím, že se na hemoglobin váže 200 - 300krát dychtivěji než kyslík a tím vyblokuje červené

krvinky pro přenos kyslíku. Jeho nebezpečí tedy není dáno jeho zvýšeným parciálním tlakem, nýbrž jeho koncentrací v porovnání s koncentrací kyslíku. Při jeho 200násobně větší afinitě k hemoglobinu oproti kyslíku totiž již 0,1 % CO ve vzduchu vyblokuje 50 % krvinek ($200 \cdot 0,1 = 20 \%$) na hladině ($p_{CO} = 0,1$ kPa) stejně jako v 10 metrech ($p_{CO} = 0,2$ kPa). Avšak ve směsi, ve které se nachází 60 % kyslíku a 0,2 % CO vyblokuje "pouze" 40 % krvinek, a to přesto, že jeho parciální tlak je větší ($p_{CO} = 0,2$ kPa na hladině a $p_{CO} = 0,4$ kPa v 10 metrech).

4.3. Směsi používané při ponorech s trimixem.

Při trimixových ponorech je obvykle zapotřebí využít několika dýchacích směsí. Jde především o směs, která se použije v cílové hloubce (hloubková směs, bottom mix). Ta může, ale nemusí být **normoxická, tj. dýchatelná na hladině**. O tom rozhoduje koncentrace kyslíku ve směsi: je-li větší nebo rovna 16 %, je směs normoxická. Obzvláště v případě, že směs normoxická není, je nutno použít k dýchání od hladiny jinou, postupovou směs (travel mix), která obvykle slouží při výstupu jako směs dekomprese.

Dekompresních směsí může být více - některé pro hlubší zastávky, které mohou být trimixové (například tzv. Triox, obsahující kolem 30 % z každého z konstituentů), některé nitroxové (častokrát Nitrox 50/50 = EAN 50) a v 6 metrech již bývá využíváno čistého kyslíku.

4.3.1. Standardizované směsi.

Je výhodné používat pro různá rozmezí hloubek standardizované hloubkové směsi, obzvláště již ověřené. Stejně tak je dobré standardizovat směsi pro dekompresi. Použití standardizovaných směsí kromě bezpečnějších (rozuměj: již ověřených) postupů navíc snižuje pravděpodobnost omylu při výběru směsi, avšak i při plánování dekomprese. Především je to výhodné při činnosti v týmu, kdy je každému členu týmu jasné, jakou směs partner používá. Tak například ve Spojených státech se hojně využívá směsí organizace GUE (Tab. 7).

Standardizované hloubkové směsi: Nitrox 32/68 (= EAN 32), Triox 30/30, Tmx 21/35, Tmx 18/45, Tmx 15/55, Tmx 10/70. Tyto směsi umožňují navíc jednoduché míchání.

Rozmezí metrech	hloubek	v	Směs	MOD pro $p_{O_2}^{max} = 140\text{kPa}$
0 - 30m			EAN 32	33 m
24 - 36m			Triox 30/30	36 m
36 - 48m			Tmx 21/35	56 m
48 - 60m			Tmx 18/45	67 m
63 - 75m			Tmx 15/55	83 m
78 - 121m			Tmx 10/70	130 m

Standardizované dekompresní směsi: Kyslík, EAN 50, Tmx 35/25-30 , Tmx 21/35
Tx 50/35-50??

Rozmezí v metrech	hloubek	Směs /plyn	MOD pro $p_{O_2}^{max} = 160kPa$
6m – 0m		kyslík	6 m
21m – 0 /6m		EAN 50	22 m
36m - 21m		Triox 35/25-30	36 m
57m – 36m		Tmx 21/35	66 m

Tab. 7. Standardizované hloubkové a dekompresní dýchací směsi GUE

4.3.2. Stlačování a expanze reálných plynů.

Platnost Boyleova-Mariottova zákona $p_2 \cdot V_2 = p_1 \cdot V_1$ při různých tlacích byla ověřována experimentálně. Výsledky pro teplotu 0 °C (a pro $p_1 \cdot V_1 = 1$) jsou vyneseny v tabulce Tab. 8.

$$p \cdot V (p, 0^\circ C)$$

p (MPa / bar)	N_2	O_2	vzduch	H_2
0.1 / 1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10 / 100	0.9941	0.9265	0.9730	1.0690
20 / 200	1.0483	0.9140	1.0100	1.1380
50 / 500	1.3900	1.1560	1.3400	1.3565
100 / 1000	2.0685	1.7355	1.9920	1.7200

Tab. 8. Tabulka demonstrující stlačování reálných plynů. Plyn byl stlačován z původního objemu (např. 10 litrů při 0,1 MPa) různými tlaky a pokaždé byl měřen jeho objem při tomto tlaku. Vynásobením tlaků a objemů při nich naměřených byla získána uvedená čísla.

Jak vidno, změna objemu při stlačování plynů je závislá na druhu plynu. Tak například kyslík (O_2) při 10 i 20 MPa (100 i 200 barech) zaujímá menší objem, než předvídá Boyleův - Mariottův zákon, avšak již při 50 MPa (500 barech) je jeho objem větší o 15,6 % ($p \cdot V = 1,156$) a při 100 MPa (1000 barech) již téměř o 74 %, než bychom předpokládali na základě uvedeného zákona. Vzduch při tomto tlaku zaujímá oproti předpovědi téměř dvojnásobný objem, avšak při tlacích 10 a 20 MPa, běžných při potápění, jsou uvedené odchylky zanedbatelné (-3 % a +1 %) a naše výpočty, provedené na základě stavové rovnice ideálního plynu, jsou tudíž použitelné. Ovšem při tlacích vyšších než asi 30 MPa (300 barů) je vytváření zásoby vzduchu již méně ekonomické: vypustíme-li například vzduch z láhve o objemu 10 litrů naplněné na 50 MPa (500 barů) do normálního tlaku, nezaujme objem 5000 litrů, jak bychom očekávali, nýbrž pouze 3731 litrů ($5000/1,34$), tedy objem jen o málo větší než při tlaku 30 MPa.

Příčinou odchylek od Boyleova - Mariottova zákona a rovněž od stavové rovnice ideálního plynu jsou určitá zanedbání, provedená při odvození zákonů pro **ideální plyn**. Předpokládalo se, že se molekuly při nárazech chovají jako zcela pružné kuličky, které se silově ovlivňují pouze v okamžiku nárazu. Ve skutečnosti na sebe molekuly silově působí stále a toto působení se prohlubuje při stlačování plynu. Navíc byly zanedbány rozměry samotných molekul, tzn. nebyl brán v potaz jejich vlastní objem v nádobě. Model ideálního plynu je pro převážnou většinu našich úvah dostačující. Jen výjimečně se při potápění setkáme s jevy, pro jejichž popis toto přiblížení nestačí a pak je nutno použít modelu plynu **reálného**, který bere v úvahu silové působení mezi molekulami a jejich vlastní objem.

Nejčastěji bývá k popisu reálného plynu používána rovnice, která se dle svého tvůrce nazývá rovnice van der Waalsova:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = R \cdot T . \quad (9)$$

Tato rovnice popisuje podmínky při stlačování plynu podstatně lépe než rovnice pro ideální plyn. Tak například při stlačení dusíku při 0° C na 100 MPa (1000 bar) je odchylka od skutečnosti rovna necelým 2% (0,983 místo 1), kdežto rovnice pro ideální plyn dává odchylku větší než 100% (2,0685 místo 1). Konstanta **a** v uvedené rovnici souvisí s existencí mezimolekulárních sil, kdežto konstanta **b** s konečným (tj. nenulovým) objemem molekul.

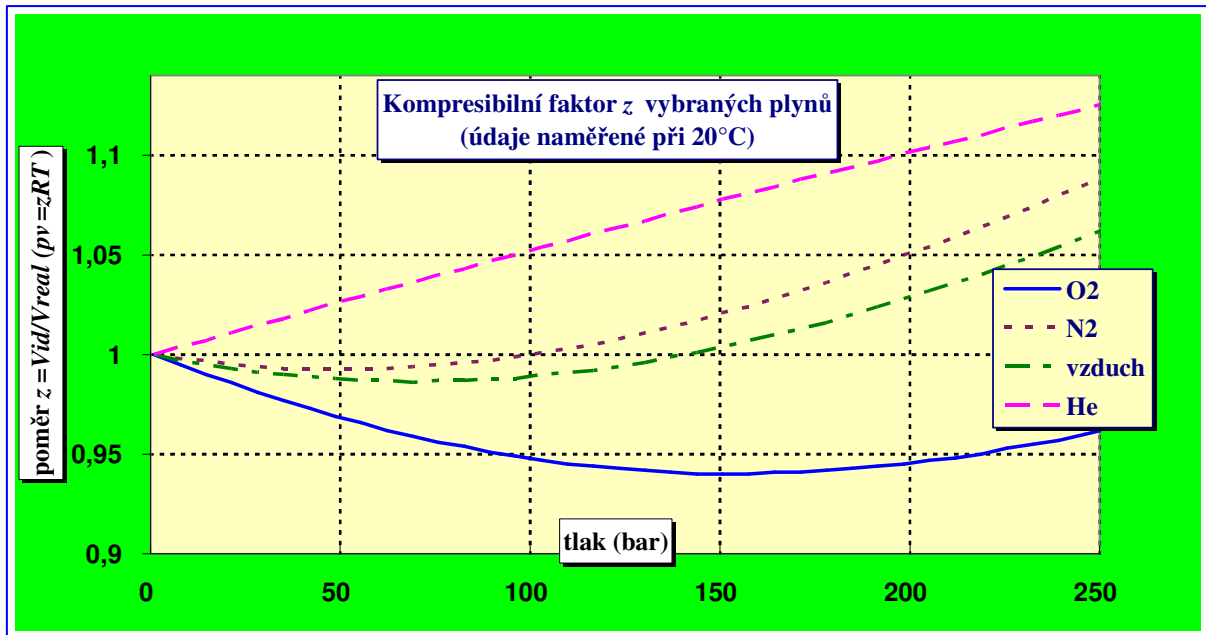
Van der Waalsovy rovnice je možno využít k poměrně přesnému míchání trimixových směsí, ve kterých hlavně stlačitelnost hélia může při využití metody parciálních tlaků v přiblížení ideálního plynu způsobit značné odchylky od předpokládaných hodnot. Výpočet však zahrnuje i objem zásobníku (počet kilomolů) a vyžaduje několikanásobnou iteraci a bývá tudíž prováděn například pomocí tabulkového procesoru.

Další z možností, jak stlačování reálných plynů v námi používaných mezích tlaků jednoduše, i když méně přesně, popsat, je použití tzv. kompresibilního faktoru – faktoru stlačitelnosti **z**. Velikost tohoto faktoru je jiná pro každý z plynů a je navíc závislá na jeho tlaku. Takto modifikovaný Boyleův –Mariottův zákon pak zní:

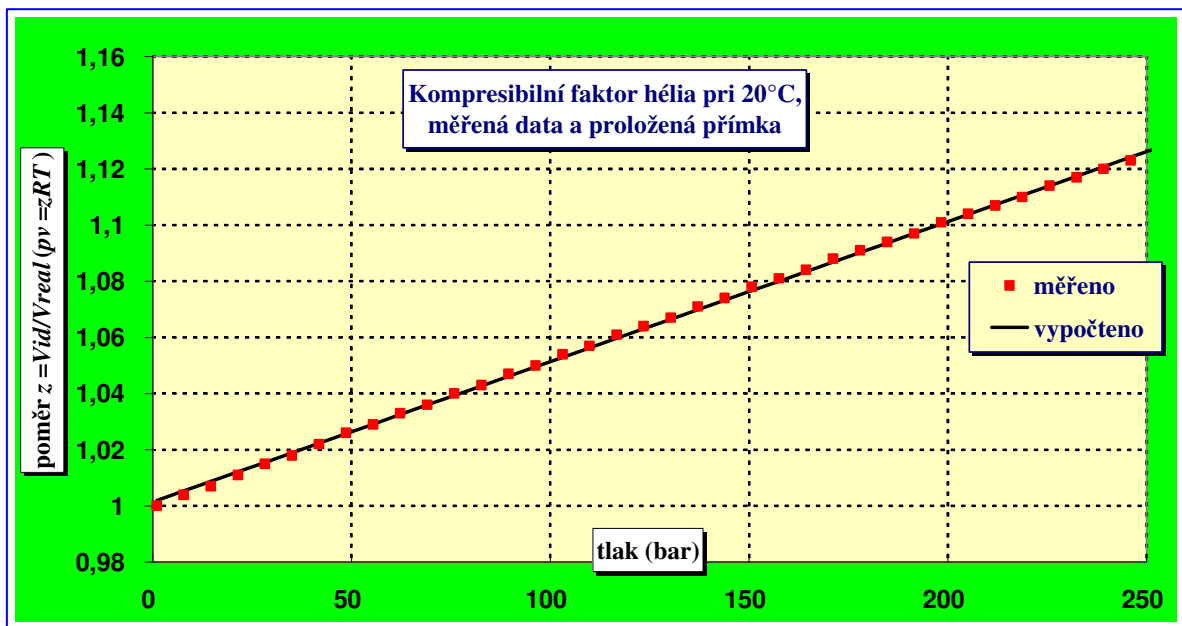
$$p_2 \cdot V_2 / z(p_2) = p_1 \cdot V_1 / z(p_1) \quad (10)$$

a faktor stlačitelnosti je vlastně tabelován na začátku této kapitoly v tabulce Tab. 8. pro velké rozmezí tlaků.

V grafu (obr. 19) jsou vyneseny stlačitelnosti plynů, používaných při potápění, ve využívaném rozmezí tlaků. Potvrzuje se to, co bylo řečeno na počátku: kyslík se v rozmezí 0 – 25 MPa stlačuje snadněji, než ideální plyn (faktor **z_{O2}** je menší než 1, např. při 20 MPa je roven 0,946), dusík se stlačuje hůře (faktor **z_{N2}** je větší než 1, při 20 MPa činí 1,05) a hélium je z uvedených plynů stlačitelné nejhůře (při 20 MPa je **z_{He}** = 1,103). V praxi to znamená, že při míchání směsí metodou parciálních tlaků musíme k dosažení správné koncentrace plynu



Obr. 19. Stlačitelnost obvyklých trimixových plynů



Obr. 20. Kompresibilní faktor hélia z pro různé tlaky (experiment a regrese)

ve směsi po expanzi do okolního tlaku oproti výpočtům pro ideální plyn tlaky poněkud modifikovat (u hélia při jeho parciálním tlaku 10 MPa -100 barů - zvětšit asi o 5 %, obr. 20).

Kromě van der Waalovy stavové rovnice existují i další, přesnější, avšak složitější. Příkladem by mohla být starší rovnice Beattieho – Bridgmanova, která obsahuje teplotu v mocninné funkci a v níž vystupuje více koeficientů. Tato rovnice je využita například

v míchacím programu firmy Atomox (<http://www.atomox.com/mixing.html>) přes výpočty faktorů kompresibility jednotlivých plynů (viz dodatek 5.4).

4.4. Výpočty při míchání trimixových směsí.

K přesnému namíchání požadované trimixové směsi je především zapotřebí zkušeností. Zde detailněji pohovoříme o výpočtech při míchání metodou parciálních tlaků, využívané i při použití míchačky. Jiné metody míchání, stejně jako bezpečnost při zacházení s kyslíkem a měření koncentrace kyslíku byly probrány v nitroxové části této publikace. Při ponorech s trimixem do větších hloubek (přes 60 metrů) bývá sice koncentrace kyslíku menší než ve vzduchu, avšak doplňování se může provádět čistým kyslíkem nebo nitroxem o vyšším obsahu kyslíku, a proto musí být láhev i ventil připraveny pro použití s kyslíkem.

Stejně jako pro nitrox je možno i pro trimix nalézt míchací programy

4.4.1. Míchání metodou parciálních tlaků.

Nejsložitější případ je pochopitelně ten, kdy v zásobníku máme „starou“ směs o určitém složení ($f_{He}^0, f_{O_2}^0, f_{N_2}^0$) a tlaku p_0 a přejeme si namíchat výslednou (Target – cílová) směs o jiném složení ($f_{He}^T, f_{O_2}^T, f_{N_2}^T$) a o cílovém tlaku p_T .

Pak pro rozdíl tlaků platí vztah

$$\Delta p = p_T - p_0$$

a pro rozdíly parciálních tlaků vztahy

$$\Delta p_{He} = p_T \cdot f_{He}^T - p_0 \cdot f_{He}^0 \quad (11a)$$

$$\Delta p_{O_2} = p_T \cdot f_{O_2}^T - p_0 \cdot f_{O_2}^0 \quad (11b)$$

Potom můžeme zvolit následující postup:

1. přidat hélium do tlaku $p_2 = p_0 + \Delta p_{He} \cdot z$ ($z = \text{kompresibilní faktor } 1,03 - 1,1$).

Hélium připustíme tak, že tlak zvýšíme o stanovený rozdíl Δp_{He} . Vzhledem k jeho horší stlačitelnosti oproti kyslíku a dusíku by měl být tento tlak zvýšen příslušným násobkem kompresibilního faktoru. Obdržíme tlak p_2 . Pokud bychom nyní měřili koncentraci kyslíku ve směsi, měli bychom obdržet hodnotu

$$f_{O_2}^2 = p_0 \cdot f_{O_2}^0 / p_2 \quad (12)$$

Jelikož však k dostatečnému promíchání složek ve směsi je potřebný určitý čas, mohla by se hodnota $f_{O_2}^2$ od očekávané lišit. Promíchání urychlíme válením láhve i uskladněním vleže, aby se co nejrychleji odbourala případná gravitační stratifikace vyvolaná řídkým héliem.

Samotné plnění je možné při malém tlaku hélia v zásobníku provést pomocí kompresoru nasávajícího místo obvyklého vzduchu právě hélium. Hélium je nasáváno

z utěsněného prostoru (např. ze sudu), do kterého je přiváděno ze zásobníku plicní automatikou. Automatika reaguje na podtlak při nasávání a doplňuje hélium v soudku.

2. Označíme
$$\Delta p_1 = p_T - p_2. \quad (13)$$

3. Nyní můžeme postupovat více způsoby, podle zdroje kyslíku:

a) máme k dispozici míchačku, na níž lze nastavit podíl kyslíku ve směsi $f^M_{O_2}$

Pak na míchačce nastavíme podíl kyslíku $f^M_{O_2} = \Delta p_{O_2} / \Delta p_1$ a přes kompresor láhev doplníme požadovanou směsí do konečného tlaku p_T .

b) máme k dispozici „bohatý“ nitrox nebo čistý kyslík o koncentraci kyslíku $f^N_{O_2}$ (v případě čistého kyslíku je $f^N_{O_2} = 1$) a zdroj (čistého) vzduchu (kompresor, zásobník) nebo „chudého“ nitroxu (podíl kyslíku $f^K_{O_2}$, v případě vzduchu je $f^K_{O_2} = 0,21$).

Pak tedy nejprve přidáme „bohatý“ nitrox (příp. kyslík) až do tlaku $p_1 = p_2 + \Delta^N p$, kde

$$\Delta^N p = \frac{\Delta p_{O_2} - f^K_{O_2} \cdot \Delta p_1}{f^N_{O_2} - f^K_{O_2}} \quad (14)$$

Pro $\Delta^N p$ po dosažení za Δp_{O_2} a Δp_1 z předchozího dostáváme:

$$\Delta^N p = \frac{p_T \cdot (f^T_{O_2} - f^K_{O_2}) - p_0 \cdot (f^0_{O_2} - f^K_{O_2}) + f^K_{O_2} \cdot \Delta p_{He}}{f^N_{O_2} - f^K_{O_2}} \quad (15)$$

Po opatrném napuštění kyslíkem nebo „bohatým“ nitroxem na tlak p_1 pak přístroj doplníme vzduchem či „chudým“ nitroxem na požadovaný cílový tlak p_T .

Používáme-li čistý kyslík a doplnění vzduchem, což je nejčastější případ, nabývá předchozí vztah pro přidavek čistého kyslíku tvar

$$\Delta^N p_{O_2} = \frac{p_T \cdot (f^T_{O_2} - 0,21) - p_0 \cdot (f^0_{O_2} - 0,21) + \Delta p_{He} \cdot 0,21}{0,79} \quad (15a)$$

Může ovšem dojít k tomu, že hodnota

$$\Delta^N p < 0,$$

je záporná. To pak svědčí o tom, že podíl kyslíku $f^K_{O_2}$ v dodávané směsi je příliš vysoký na to, aby uvedeným způsobem splnil požadavek správného podílu $f^T_{O_2}$ konečné směsi.

Proto část původní směsi musí být vypuštěna –samozřejmě ještě před dodáním drahého hélia – a sice tak, že původní tlak p_0 musí být snížen na hodnotu p_v podle vztahu

$$p_v = \frac{p_T \cdot [f_{O_2}^T - f_{O_2}^K \cdot (1 - f_{He}^T)]}{[f_{O_2}^0 - f_{O_2}^K \cdot (1 - f_{He}^0)]}, \text{ příp. } p_v = \frac{p_T \cdot [f_{O_2}^T - 0,21 \cdot (1 - f_{He}^T)]}{[f_{O_2}^0 - 0,21 \cdot (1 - f_{He}^0)]} \quad (16)$$

Pro další výpočty pak hodnota p_v již nahradí v předchozím výpočtu tlak p_0 .

Poznámka: Výpočet byl veden tak, že hélium bylo do přístroje vtlačeno jako první. Ve skutečnosti to však není nutné – na pořadí plnění příliš nezáleží, avšak je nutno dodržet patřičné rozdíly tlaků.

Příklad: V láhvi máme směs TMX 20/40 o tlaku 50 barů (5 MPa). Chceme ji naplnit na 200 barů (20 MPa) směsí TMX 16/50, a sice

- pomocí míchačky a kompresoru
- pomocí kyslíku a vzduchu
- pomocí Nitroxu 50/50 a vzduchu.

Řešení:

Vstupní údaje: $p_0 = 50 \text{ barů}$, $f_{O_2}^0 = 0,20$, $f_{He}^0 = 0,4$ (TMX20/40), $p_{He}^0 = 20 \text{ barů}$

$p_T = 200 \text{ barů}$, $f_{O_2}^T = 0,16$, $f_{He}^T = 0,5$ (TMX16/50)

$\Delta p_{He} = p_T \cdot f_{He}^T - p_0 \cdot f_{He}^0 = 200 \cdot 0,5 - 50 \cdot 0,4 = \underline{80 \text{ barů}}$

(se započtením kompresibilního faktoru $z = 1,05$: $\Delta p_{He} = 80 \cdot 1,05 = \underline{84 \text{ barů}}$).

Přidáme hélium: pak $p_2 = 50 + 80 = 130 \text{ barů}$, ($p_2 = 50 + 84 = 134 \text{ barů}$)

a naměříme: $f_{O_2}^1 = p_0 \cdot f_{O_2}^0 / p_2 = 0,077 = \underline{8\%}$ ($0,075 = 7,5\%$).

Pro další výpočty je

$\Delta p_{O_2} = p_T \cdot f_{O_2}^T - p^0 \cdot f_{O_2}^0 = 200 \cdot 0,16 - 50 \cdot 0,2 = 22 \text{ barů}$

a $\Delta p_1 = p_T - p_2 = 70 \text{ (66) barů}$.

Nyní varianty:

a) kontinuální míchání (míchačka):

nastavíme na $f_{O_2}^M = \Delta p_{O_2} / \Delta p_1 = 22 / 70 = 0,31$ (31%) (příp. 22 / 66 dá 33%)

a doplníme na $p_T = 200 \text{ barů}$!

b) O₂ + vzduch: $\Delta^N p = (\Delta p_{O_2} - f_{O_2}^K \cdot \Delta p_1) / (f_{O_2}^N - f_{O_2}^K) =$

$= (22 - 0,21 \cdot 70) / (1 - 0,21) = \underline{9,2 \text{ barů (10,3 barů)}}$

kyslíku dodat nejprve,

pak doplnit kompresorem do $p_T = 200 \text{ barů}$.

$$\text{c) Nitrox 50/50 + vzduch: } \Delta^N p = (\Delta p_{O_2} - f^K_{O_2} \cdot \Delta p_1) / (f^N_{O_2} - f^K_{O_2}) = \\ = (22 - 0,21 \cdot 70) / (0,5 - 0,21) = \underline{25,2 \text{ barů (28,0 barů)}}$$

Nitroxu 50/50 dodat nejprve,

pak doplnit kompresorem do $p_T = 200 \text{ barů}$.

Kontrola výsledku:

Chceme –li zjistit výslednou koncentraci f^{atm}_i plynu i ($f^{atm}_i = V^{atm}_i / V^{atm}_{celk.}$) měřením při normálním atmosférickém tlaku p^{atm}_0 , je třeba si uvědomit, že vycházíme z Daltonova zákona. Pro ideálně stlačitelný plyn je poměr objemů při vysokém tlaku a při normálním dán dle Boyleho – Mariottova zákona obráceným poměrem těchto tlaků: $V^p_i / V^{atm}_i = p^{atm}_i / p_i$. V případě reálného plynu, popisovaného pomocí kompresibilního faktoru z^p_i , je

$$z^p_i = p_i \cdot V^p_i / (p^{atm}_i \cdot V^{atm}_i),$$

a pak je

$$V^p_i / V^{atm}_i = p^{atm}_i / p_i \cdot 1 / z^p_i.$$

He: původní parciální tlak hélia $p_0 \cdot f^p_{He} = 20 \text{ barů}$, přidáno $\Delta p_{He} = 80 \text{ barů}$ (84 barů),

Přes parciální tlaky: $f_{He} = (20 + 80) / p_T = 100 \text{ barů} / 200 \text{ barů} = \underline{0,50 = f^T_{He}}$

Při stlačitelnosti z je $f_{He} = (20 + 84 / 1,05) / p_T = 100 / 200 = \underline{0,50 = f^T_{He}}$

tedy výsledná koncentrace hélia je v pořádku.

Nyní O₂: jeho původní parciální tlak byl $p^0_{O_2} = p_0 \cdot f^p_{O_2} = 50 \cdot 0,2 = 10 \text{ barů}$

a) míchačka: $f^M_{O_2} = 0,31$, $\Delta p_{O_2} = 0,31 \cdot 70 = 22 \text{ barů}$

$f_{O_2} = (10 + 22) / p_T = 32 \text{ barů} / 200 \text{ barů} = \underline{0,16 = f^T_{O_2}}$

b) kyslík + vzduch: $p_2 = p_0 + \Delta p^2_{He} = 130 \text{ barů}$

kyslík:

$\Delta^N p_{O_2} = (22 - 0,21 \cdot 70) / (1 - 0,21) = 9 \text{ barů}$, $p_1 = 139 \text{ barů}$

vzduch:

$f^K_{O_2} = 0,21$, $\Delta p_1 = 200 - 139 = 61 \text{ barů}$, $p^1_{O_2} = 0,21 \cdot 61 = 13 \text{ barů}$

$p_{O_2} = 10 + 9 + 13 = 32 \text{ barů}$, $f_{O_2} = 32 \text{ barů} / 200 \text{ barů} = \underline{0,16 = f^T_{O_2}}$

c) nitrox 50/50 + vzduch: $p_2 = p_0 + \Delta p^2_{He} = 130 \text{ barů}$

nitrox:

$$\Delta^N p = (22 - 0,21 \cdot 70) / (0,5 - 0,21) = 25 \text{ barů,}$$

$$\Delta^3 p_{O_2} = \Delta^N p \cdot f^N_{O_2} = 25 \cdot 0,5 = 12,5 \text{ barů, } p_3 = 155 \text{ barů}$$

vzduch:

$$f^K_{O_2} = 0,21, \Delta p_3 = 200 - 155 = 45 \text{ barů, } \Delta^3 p_{O_2} = 0,21 \cdot 45 = 9 \text{ barů}$$

$$p_{O_2} = 10 + 13 + 9 = 32 \text{ barů, } f_{O_2} = 32 \text{ barů} / 200 \text{ barů} = 0,16 = f^T_{O_2}$$

Ve všech případech bylo tedy dosaženo i požadované koncentrace kyslíku.

4.4.2. Usnadnění výpočtů pro míchání trimixu.

Porovnáme-li rovnici (7), použitou pro nitrox k výpočtu přípouštěného tlaku kyslíku před doplněním vzduchem (kompresorem) se vztahem (15a), používaným pro trimix, zjistíme, že se oba vztahy liší pouze tím, že ke tlaku z rovnice (7) je nutno přičíst ještě další člen

$$\Delta^{N1} p_{O_2} = + \frac{\Delta p_{He} \cdot 0,21}{0,79} \quad (17)$$

Přitom rovnice (7) byla využita k vypracování tabulek Tab.3 a, b. K míchání trimixu stejnou metodou je možné těchto tabulek využít rovněž. Pro koncentrace kyslíku, které jsou nižší než 21 %, však bylo nutno vypracovat tabulku Tab. 10. Postup ke zjištění potřebného přípouštěného tlaku čistého kyslíku $\Delta^N p_{O_2}$ je shodný s metodou použitou k míchání nitroxu za předpokladu, že k získanému výsledku se přičte tlak stanovený pomocí vztahu (17) nebo z tabulky Tab. 9.

$\Delta p^{N1} He (bar)$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\Delta p_{O_2}(bar)$	1	3	4	5	7	8	9	11	12	13
$\Delta p^{N1} He (bar)$	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$\Delta p_{O_2}(bar)$	15	16	17	19	20	21	23	24	25	27
$\Delta p^{N1} He (bar)$	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$\Delta p_{O_2}(bar)$	28	29	31	32	33	35	36	37	39	40
$\Delta p^{N1} He (bar)$	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
$\Delta p_{O_2}(bar)$	41	43	44	45	47	48	49	51	52	53

Tab. 9. Přídavek $\Delta^{N1} p_{O_2}$ k tlaku napouštěného kyslíku získaného z Tab. 3 nebo 10.

% O2	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	-1	-3	-4	-6	-7	-8	-10	-11	-13	-14
11	-1	-3	-4	-5	-6	-8	-9	-10	-11	-13
12	-1	-2	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
12	-1	-2	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
14	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-6	-7	-8	-9
15	-1	-2	-2	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-8
16	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6	-6
17	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5
18	0	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-4
19	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3
20	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	p (bar)									
% O2	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
10	-15	-17	-18	-19	-21	-22	-24	-25	-26	-28
11	-14	-15	-16	-18	-19	-20	-22	-23	-24	-25
12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-21	-22	-23
13	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20
14	-10	-11	-12	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18
15	-8	-9	-10	-11	-11	-12	-13	-14	-14	-15
16	-7	-8	-8	-9	-9	-10	-11	-11	-12	-13
17	-6	-6	-7	-7	-8	-8	-9	-9	-10	-10
18	-4	-5	-5	-5	-6	-6	-6	-7	-7	-8
19	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-5
20	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	p (bar)									
% O2	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
10	-29	-31	-32	-33	-35	-36	-38	-39	-40	-42
11	-27	-28	-29	-30	-32	-33	-34	-35	-37	-38
12	-24	-25	-26	-27	-28	-30	-31	-32	-33	-34
13	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28	-29	-30
14	-19	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27
15	-16	-17	-17	-18	-19	-20	-21	-21	-22	-23
16	-13	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-18	-18	-19
17	-11	-11	-12	-12	-13	-13	-14	-14	-15	-15
18	-8	-8	-9	-9	-9	-10	-10	-11	-11	-11
19	-5	-6	-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-8
20	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-4
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 10. Tabulka ke stanovení přípouštěného tlaku kyslíku (pro jeho nízké koncentrace)

Pro stejné údaje jako v předchozím příkladě bychom z Tab. 10 obdrželi $p_A = -13$ barů a $p_B = -1$ bar a tedy $\Delta P_{O_2} = p^A - p^B = -12$ barů. Pro $\Delta p_{He} = 80$ barů z Tab. 9 vychází

$\Delta^N p_{O_2} = +21$ barů a po připočtení k ΔP_{O_2} dostáváme $\Delta^N p_{O_2} = 9$ barů. Tabulka vychází z aproximace ideálního plynu (nebere v úvahu stlačitelnost jednotlivých frakcí).

Pokud se míchání provádí do prázdné láhve a mají –li být současně dodrženy podmínky, kladené na **END** (= 30 metrů) a na $p_{O_2}^{max}$ ($p_{O_2}^{max} = 140$ kPa do 80 m, $p_{O_2}^{max} = 130$ kPa do 100 m a $p_{O_2}^{max} = 120$ kPa přes 100 m), lze k míchání použít tabulky Tab.11.

p_T -požadovaný konečný tlak v láhvi (bary, **END** = 30 m, $p_{O_2}^{max} = 1,4 \mid 1,3 \mid 1,2$ baru)

h	p_T	bar	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
30	Oxygen	35%	26,6	28,4	30,1	31,9	33,7	35,4	37,2	39	40,8	42,5	44,3	46,1	47,8	49,6	51,4	53,2
m	Helium	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	Oxygen	31%	23	24,5	26	27,6	29,1	30,6	32,2	33,7	35,2	36,8	38,3	39,8	41,4	42,9	44,4	45,9
m	Helium	10%	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
40	Oxygen	28%	20,9	22,3	23,6	25	26,4	27,8	29,2	30,6	32	33,4	34,8	36,2	37,6	39	40,3	41,7
m	Helium	19%	28,5	30,4	32,3	34,2	36,1	38	39,9	41,8	43,7	45,6	47,5	49,4	51,3	53,2	55,1	57
45	Oxygen	25%	18,4	19,6	20,8	22	23,3	24,5	25,7	26,9	28,2	29,4	30,6	31,8	33	34,3	35,5	36,7
m	Helium	27%	40,5	43,2	45,9	48,6	51,3	54	56,7	59,4	62,1	64,8	67,5	70,2	72,9	75,6	78,3	81
50	Oxygen	23%	17	18,1	19,2	20,3	21,5	22,6	23,7	24,9	26	27,1	28,3	29,4	30,5	31,7	32,8	33,9
m	Helium	33%	49,5	52,8	56,1	59,4	62,7	66	69,3	72,6	75,9	79,2	82,5	85,8	89,1	92,4	95,7	99
55	Oxygen	22%	17,1	18,2	19,3	20,5	21,6	22,7	23,9	25	26,1	27,3	28,4	29,6	30,7	31,8	33	34,1
m	Helium	38%	57	60,8	64,6	68,4	72,2	76	79,8	83,6	87,4	91,2	95	98,8	103	106	110	114
60	Oxygen	20%	14,8	15,8	16,8	17,8	18,8	19,8	20,8	21,8	22,8	23,8	24,7	25,7	26,7	27,7	28,7	29,7
m	Helium	42%	63	67,2	71,4	75,6	79,8	84	88,2	92,4	96,6	101	105	109	113	118	122	126
65	Oxygen	19%	14,5	15,5	16,5	17,5	18,4	19,4	20,4	21,3	22,3	23,3	24,2	25,2	26,2	27,1	28,1	29,1
m	Helium	46%	69	73,6	78,2	82,8	87,4	92	96,6	101	106	110	115	120	124	129	133	138
70	Oxygen	18%	14,2	15,2	16,1	17,1	18	19	19,9	20,9	21,8	22,8	23,7	24,7	25,6	26,6	27,5	28,5
m	Helium	50%	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
75	Oxygen	16%	11,6	12,4	13,2	14	14,7	15,5	16,3	17,1	17,8	18,6	19,4	20,2	21	21,7	22,5	23,3
m	Helium	53%	79,5	84,8	90,1	95,4	101	106	111	117	122	127	133	138	143	148	154	159
80	Oxygen	14%	8,64	9,22	9,79	10,4	10,9	11,5	12,1	12,7	13,2	13,8	14,4	15	15,6	16,1	16,7	17,3
m	Helium	55%	82,5	88	93,5	99	105	110	116	121	127	132	138	143	149	154	160	165
85	Oxygen	14%	9,84	10,5	11,1	11,8	12,5	13,1	13,8	14,4	15,1	15,7	16,4	17	17,7	18,4	19	19,7
m	Helium	58%	87	92,8	98,6	104	110	116	122	128	133	139	145	151	157	162	168	174
90	Oxygen	13%	8,73	9,32	9,9	10,5	11,1	11,6	12,2	12,8	13,4	14	14,6	15,1	15,7	16,3	16,9	17,5
m	Helium	60%	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180
95	Oxygen	12%	7,63	8,14	8,65	9,16	9,67	10,2	10,7	11,2	11,7	12,2	12,7	13,2	13,7	14,2	14,8	15,3
m	Helium	62%	93	99,2	105	112	118	124	130	136	143	149	155	161	167	174	180	186
100	Oxygen	11%	6,13	6,54	6,95	7,36	7,77	8,18	8,59	8,99	9,4	9,81	10,2	10,6	11	11,4	11,9	12,3
m	Helium	63%	94,5	101	107	113	120	126	132	139	145	151	158	164	170	176	183	189
105	Oxygen	10%	5,03	5,37	5,7	6,04	6,37	6,71	7,04	7,38	7,72	8,05	8,39	8,72	9,06	9,39	9,73	10,1
m	Helium	65%	97,5	104	111	117	124	130	137	143	150	156	163	169	176	182	189	195
110	Oxygen	10%	5,43	5,79	6,15	6,52	6,88	7,24	7,6	7,96	8,33	8,69	9,05	9,41	9,77	10,1	10,5	10,9
m	Helium	66%	99	106	112	119	125	132	139	145	152	158	165	172	178	185	191	198
115	Oxygen	10%	6,23	6,64	7,06	7,47	7,89	8,3	8,72	9,13	9,55	9,96	10,4	10,8	11,2	11,6	12	12,5
m	Helium	68%	102	109	116	122	129	136	143	150	156	163	170	177	184	190	197	204
120	Oxygen	9%	4,73	5,04	5,36	5,67	5,99	6,3	6,62	6,93	7,25	7,56	7,88	8,19	8,51	8,83	9,14	9,46
m	Helium	69%	104	110	117	124	131	138	145	152	159	166	173	179	186	193	200	207

Tab. 11 Plnění původně prázdné láhve héliem a kyslíkem před doplněním vzduchem pro uvedené podmínky.

4.4.3. Míchání trimixu do prázdné láhve s použitím známého nitroxu.

Je to úsporná a přesná metoda, která nevyžaduje bezpodmínečně analýzu výsledné směsi analyzátozem hélia. Poměr kyslíku a dusíku ve směsi je totiž znám (z použitého nitroxu) a změříme-li koncentraci kyslíku, umíme stanovit i koncentraci hélia. Při samotném míchání, podobně jako v předchozím, napustíme nejprve do láhve hélium na požadovaný tlak, tzn. na tlak takový, abychom získali jeho výslednou požadovanou koncentraci: např. při požadované koncentraci $f_{He}^T = 0,18$ a tlaku $p^T = 23 \text{ MPa}$ (230 barů) to bude na $p_{He} = 0,18 \cdot 23 = 4,14 \text{ MPa}$ (41,4 baru) (*se započtením kompresibility hélia to bude $4,14 \cdot 1,1 = 4,55 \text{ MPa}$*). Potom láhev doplníme zvolenou směsí na plný tlak p^T .

Pokud jsme použili například Nitrox 32/68 (EAN 32), pak víme, že poměr koncentrace dusíku ke kyslíku je vždy $68 / 32 = 2,125$. Naměříme –li ve směsi 15 % kyslíku, pak se v ní musí nacházet $2,125 \cdot 15 = 32 \%$ dusíku. Součet koncentrací kyslíku a dusíku dá $15 + 32 = 47 \%$ a doplněk do 100 %, tj. $(100 - 47) = 63 \%$ je koncentrace hélia. Tedy jde o směs TMX 15/63. Navíc lze pro zvolenou hodnotu $p_{O_2}^{max}$ stanovit přímo i ekvivalentní vzduchovou hloubku, jelikož parciální tlak dusíku bude 2,125 krát větší. Pro $p_{O_2}^{max} = 140 \text{ kPa}$ (1,4 baru) bude $p_{N_2} = 297,5 \text{ kPa}$ (2,975 baru). Vydělíme – li tento tlak podílem dusíku ve vzduchu (0,79), dostáváme tlak $p = 297,5 / 0,79 = 376,6 \text{ kPa}$ (3,77 baru), což je tlak vzduchu v hloubce 27,7 metrů a tedy END = 28 metrů.

Tentýž výsledek obdržíme s uvedenou směsí Nitrox 32/68 pro každý podíl hélia.

Nejznámější směsí získávanou touto metodou je tzv. **heliar** – směs hélia se vzduchem – obvykle z kompresoru. Poměr koncentrací dusíku a kyslíku je pak $0,79 / 0,21 = 3,76$ a pro hloubku, ve které je parciální tlak kyslíku 140 kPa je parciální tlak dusíku $p_{N_2} = 140 \cdot 3,76 = 526,4 \text{ kPa}$. Při dýchání vzduchu by dusík tohoto tlaku dosáhl v hloubce o tlaku $526,4 / 0,79 = 666,3 \text{ kPa}$, tj. v hloubce END = 57 metrů. Takový tlak dusíku je již daleko za bezpečnou hranicí a **použijeme-li kterýkoliv heliair, nemůžeme plně využít přípustnou horní mez p_{O_2}** . Budeme-li např. považovat za ještě bezpečnou ekvivalentní narkotickou hloubku 40 metrů, tj. takovou, ve které má dusík ve vzduchu tlak 395 kPa, pak kyslík v ní bude mít parciální tlak pouze $p_{O_2} = 395 / 3,76 = 105 \text{ kPa}$.

Naopak, chceme – li do hloubky 80 metrů, musíme si nejprve stanovit podíl kyslíku pro $p_{O_2}^{max} = 140 \text{ kPa}$ jako $f_{O_2}^{max} = 140 \text{ kPa} / 900 \text{ kPa} = 0,155$ (15,5 % O_2). Má – li být v hloubce END = 30 metrů, musí být parciální tlak dusíku v ní roven $p_{N_2}^{max} = 400 \cdot 0,79 = 316 \text{ kPa}$ a podíl dusíku ve směsi pak činí $316 \text{ kPa} / 900 \text{ kPa} = 0,351$ (35,1 % N_2). Směs by tedy měla obsahovat 15,5 % kyslíku a 35,1 % dusíku. Zbytek do 100 %, tedy 49,4 %, by mělo tvořit hélium. Nejprve tedy láhev naplníme na příslušný tlak héliem (pro $p^T = 23 \text{ MPa}$,

tedy 230 barů, naplníme láhev héliem na $p_1 = 0,494 \cdot 1,05 \cdot 23 = 11,9$ MPa (119 barů)). Zde jsme použili faktor kompresibility $z = 1,05$.

Chceme –li nyní stanovit jakým nitroxem zásobník doplnit, popřípadě jakou hodnotu koncentrace kyslíku nastavit na míchače, pak si především musíme uvědomit, že součet podílů kyslíku a dusíku ($15,5 \% + 35,1 \% = 50,6 \% = 0,506$) v zásobníku představuje v doplňovaném nitroxu 100 %. Podíly kyslíku a dusíku v této směsi tedy získáme vydělením požadovaných podílů tímto číslem: $f_{O_2}^N = 0,155 / 0,506 = 0,306$, $f_{N_2}^N = 0,351 / 0,506 = 0,694$ (jejich součet skutečně dává 1, tedy 100 %). Použijeme tedy k doplnění Nitroxu 31/69 nebo míchačku nastavíme na koncentraci kyslíku 31 %.

V tabulce Tab. 12. jsou uvedeny meze pro plnění pomocí různých nitroxových směsí.

END v metrech při $p_{O_2}^{max} = 140$ kPa (1,4 baru).

Pro MOD >80 m je $p_{O_2}^{max} = 130$ kPa, MOD > 100 m: $p_{O_2}^{max} = 120$ kPa.

%O ₂	21		26		30		32		36	
END	57		40		31		28		22	
%He	O ₂ %	MOD	O ₂ %	MOD	O ₂ %	MOD	O ₂ %	MOD	O ₂ %	MOD
5	20	60	25	46	29	38	30	37	34	31
10	19	64	23	51	27	42	29	38	32	34
15	18	68	22	54	26	44	27	42	31	35
20	17	72	21	57	24	48	26	44	29	38
25	16	78	20	60	23	51	24	48	27	42
30	15	83	18	68	21	57	22	54	25	46
35	14	83	17	72	20	60	21	57	23	51
40	13	90	16	78	18	68	19	64	22	54
45	12	98	14	83	17	72	18	68	20	60
50	11	108	13	90	15	77	16	78	18	68
55	9	123	12	98	14	83	14	83	16	78
60	8	140	10	110	12	98	13	90	14	83
65	7	161	9	123	11	108	11	108	13	90
70	6	190	8	140	9	123	10	110	11	99
75	5	230	7	161	8	140	8	140	9	123

Tab. 12. Míchání hélia a nitroxu do prázdné láhve.

4.5. Analýza trimixu.

K analýze trimixu jsou používány analyzátoři, umožňující stanovit koncentraci kyslíku (stejně jako pro analýzu nitroxu) a koncentraci hélia. Koncentrace hélia se obvykle stanovuje

sondou, pracující na principu odlišné tepelné vodivosti (obr. 21). Plyn při této metodě musí být nehybný – napouští se do komůrky, v níž se pak tepelná vodivost měří.

Méně obvyklá je metoda, při níž se měří rychlost zvuku ve směsi. Rychlost zvuku v hélíu je totiž přibližně trojnásobná oproti rychlosti zvuku ve vzduchu a v trimixové směsi lze tedy z naměřené rychlosti zvuku dobře usuzovat na koncentraci hélia.



Obr. 21. Analyzátoři trimixu.

4.6. Reference.

Podíváte-li se na stránky <http://www.combro.co.uk/nigelh/diver/index.html> (nově rovněž na <http://www.nigelhewitt.co.uk/>) Nigela W. Hewitta, najdete pěkný výklad o plynech a jejich rozpouštění a v neposlední řadě i návod, jak sestrojít míchací program pro nitrox a trimix, který bere v úvahu van der Waalsovo přiblížení. Odkaz na takový program tam dokonce je a např. uživatelé Windows ho naleznou přímo na stránkách <http://www.nigelhewitt.co.uk/diving/windows.html>. Kromě toho i pár užitečných vztahů a rad.

Podobně jsou pojaty stránky <http://www.mindspring.com/~divegeek/mixhistory.htm>, na kterých Larry "Harris" Taylor probírá stručně historii směsového potápění. Rovněž na http://cisatlantic.com/trimix/AQUAcorps/mix/MIX_Diving.htm lze v přehledovém článku nalézt množství informací.

Zájemci by měli nahlédnout i do <http://www.cisatlantic.com/trimix/AQUAcorps/mix/mixcont.htm>, kde naleznou kromě několika přehledových článků a krátkých tabulek například i pojednání o podceňované roli vzrůstající koncentrace CO₂ v organismu při nástupu otravy kyslíkem a hloubkového opojení : (<http://www.cisatlantic.com/trimix/AQUAcorps/mix/CO2Build-up.htm>).

O výhodách a míchání směsi heliair se lze dovědět na <http://www.deepimage.co.uk/downloads/heliair.pdf>.

Héliové a kyslíkové analyzátoři se nacházejí na stránkách <http://www.helyzer.de/> , <http://www.temc.it/deoxsubeng.htm> , http://www.divesoft.cz/cs/analyzer_about.php, z nichž poslední odkaz je na stránky A. Procházky, jehož analyzátor využívá netradičního principu: měření rychlosti zvuku ve směsi.

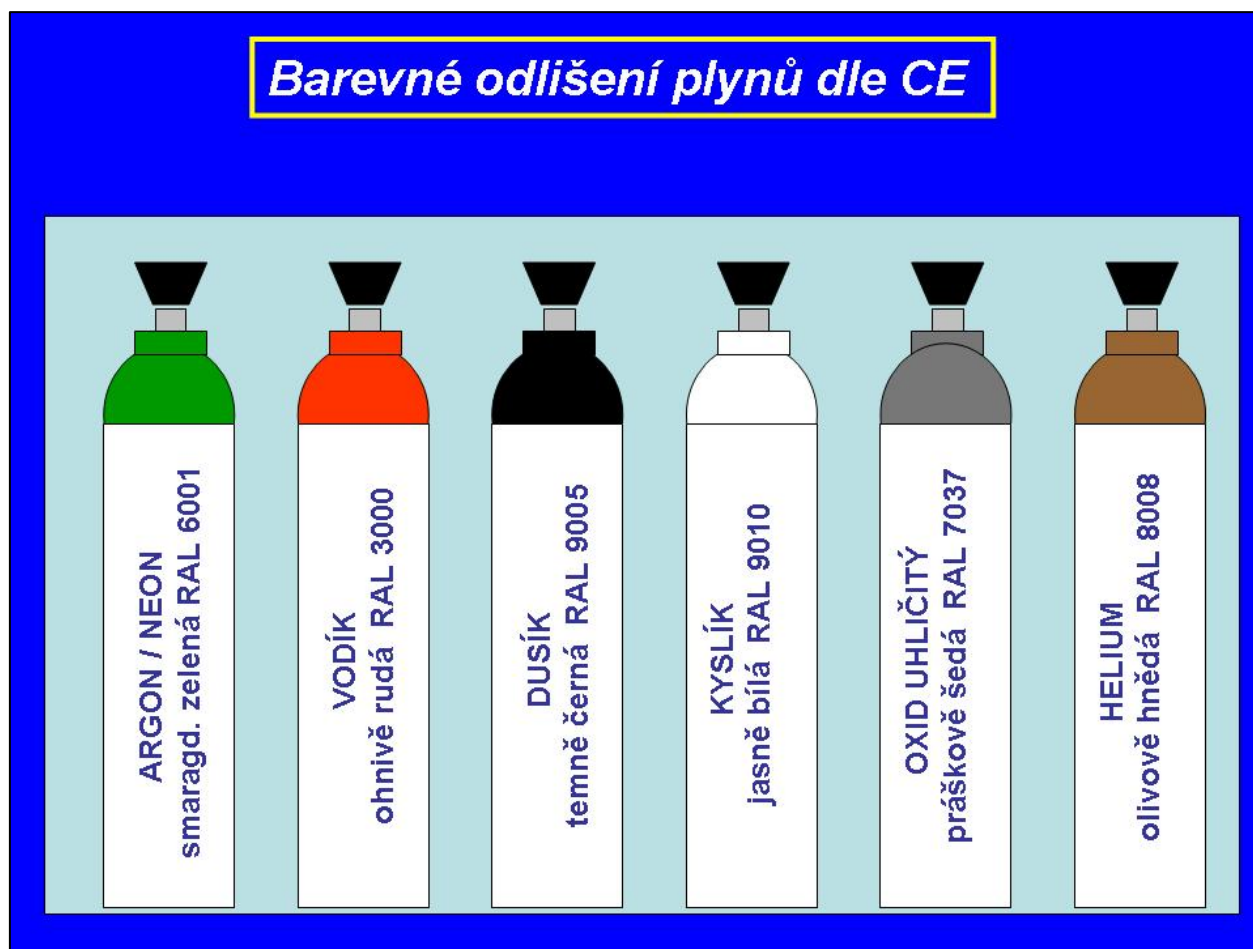
Návod k míchání trimixu pomocí kompresibilních faktorů naleznete na stránkách <http://www.atomox.com/mixing.html>

Na následujících stránkách lze přímo nalézt míchací software:

<http://personal.redestb.es/jep/trimix/trimix.htm>

<http://www.liquidarchaeology.com/Resources/blend.php> (PSI)

5. Dodatky.



Obr. 22. Barevné odlišení plynů.

5.1. Stavová rovnice vztažená na 1 kilomol plynu.

Stavová rovnice ideálního plynu, uvedená na začátku, je použitelná na jakékoliv stálé hmotové množství plynu. Vztáhneme-li ovšem tuto rovnici k určitému definovanému množství m plynu (např. k $m = 1$ kg), pak při určité „normální“ teplotě T_0 (obvykle 273,15 K) a při „normálním“ tlaku p_0 (obvykle 0,1013 MPa) zaujímá toto množství objem V_0 (ten stanovíme tak, že hmotnost m vydělíme hustotou ρ_0 při zmíněných podmínkách - pro vzduch je $V_0 = 1\text{ kg} / 1,276\text{ kg/m}^3 = 0,784\text{ m}^3$). Pak výraz $p_0 \cdot V_0 / T_0$ je konstantní a původní stavovou rovnici (avšak s modifikovanými indexy)

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} \quad (17)$$

můžeme přepsat do tvaru $p \cdot V = R_0 \cdot T$, (18)

kde $R_0 = p_0 \cdot V_0 / T_0$ je konstanta úměrnosti (pro 1 kg vzduchu je pak $R_0 = 286,9\text{ N} \cdot \text{m} / \text{K}$).

Tvar uvedené rovnice je jednodušší, avšak konstanta R_0 se mění s množstvím a druhem plynu. Aby se rovnice stala univerzálnější, vztáhneme ji k hmotovému množství **1 kilomolu**. 1 kilomol (1 kmol) látky (jakékoliv, i pevné nebo kapalné) je takové množství dané látky, že se jeho hmotnost rovná jeho molární hmotnosti v kg. Tak např. 1 kmol kyslíku (O_2) je přibližně 32 kg kyslíku (atomová hmotnost kyslíku je 16, molekulová je přibližně dvojnásobná: 32). Za střední molekulovou hmotnost vzduchu se obvykle bere číslo 29. Pak jedním kilomolem vzduchu rozumíme 29 kg vzduchu. Jednou z výhod této komplikace (pro nás nyní snad nesrozumitelné) je fakt, že jeden kmol jakékoliv látky obsahuje vždy stejný počet molekul zmíněné látky, a sice $N = 6,023 \cdot 10^{26}$ (Avogadrovo číslo). Navíc má v plynném stavu při normálním tlaku a při normální teplotě stejný objem $v_0 = 22,41 \text{ m}^3 / \text{kmol}$ - a to platí pro všechny plyny. (V dalším budeme fakt, že úvahy se vztahují k 1 kilomolu látky vyznačovat použitím znaku v (malé v) pro objem).

Pak můžeme předchozí rovnici nahradit rovnicí

$$\boxed{p \cdot v = R \cdot T}, \quad (19)$$

ve které R je nyní tzv. **univerzální plynová konstanta**. Její hodnotu lze určit z podmínky, že při $T = T_0 = 273,15 \text{ K}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) a při tlaku $p = p_{a0} = 0,1013 \text{ MPa}$ je objem roven $v_0 = 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ a vychází:

- nejčastěji používaná hodnota $R = 8314 \text{ J/K/kmol} = 8314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{K} / \text{kmol}$
($1 \text{ J} = 1 \text{ joule} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ je jednotkou práce)
- pro nás poněkud výhodnější tvar $R = 8,314 \text{ MPa} \cdot \text{litr} / \text{K} / \text{kmol}$,
- případně $R = 0,8209 \text{ bar} \cdot \text{litr} / \text{K} / \text{kmol}$ pro výpočet vedený v barech a litrech.

Tato konstanta má velmi široké uplatnění všude tam, kde se používají termodynamické výpočty. Stavovou rovnici vztáženou k 1 kilomolu plynu sice pro naše běžné výpočty není nutno používat, avšak pro některé speciální účely je její použití vhodnější. Rovnice se dá rovněž použít pro jiné množství plynu o hmotnosti m , uvážíme-li, že μ kg plynu (μ je molární hmotnost plynu) má za daných podmínek objem v , pak m kg plynu má za týchž podmínek objem $V = v \cdot m / \mu$ a stavová rovnice pro toto množství má tvar

$$p \cdot V = m / \mu \cdot R \cdot T = n \cdot R \cdot T, \quad (20)$$

ve které n je vlastně počet kilomolů látky, které bereme v úvahu.

Z této rovnice můžeme mj. i stanovit hustotu plynu ρ při daném tlaku a teplotě z rovnice

$$\rho = m / V = p \cdot \mu / (R \cdot T). \quad (21)$$

Příklad: Stanovte hustotu vzduchu ($\mu = 29 \text{ kg} / 1 \text{ kmol}$) při teplotě $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a při normálním atmosférickém tlaku $0,1013 \text{ MPa}$.

Řešení: $\rho = p \cdot \mu / (R \cdot T) = 1,013 \cdot 10^5 \text{ (Pa)} \cdot 29 \text{ (kg / kmol)} / (8314 \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{K} / \text{kmol)} \cdot 283,15 \text{ (K)}) = 2937700 / 2354109,1 \text{ (kg} / \text{m}^3) = 1,248 \approx 1,25 \text{ kg} / \text{m}^3$.

5.2. Jednoduchý model stavových změn plynu.

Jevy při změnách stavů plynu lze velmi dobře zdůvodnit pomocí jednoduchého modelu, vycházejícího z molekulárně - kinetické představy o plynu podobně, jak jsme si znázornili platnost Boyleova -Mariottova zákona. Připomeňme, že v plynech se jejich molekuly pohybují rovnoměrně přímočaře do doby, pokud nenarazí na jinou molekulu plynu, případně na stěny nádoby, od nichž se pružně odrazí a letí dále (obr.23). Nárazy na stěnu nádoby se projevují navenek jako tlak plynu, jehož velikost je určena střední rychlostí molekul - čím je větší, tím je větší i náraz na stěnu - a dále četností nárazů (počtem nárazů za jednotku času), která je větší při vyšší rychlosti molekul, jelikož vyšší rychlost způsobí rovněž častější nárazy.

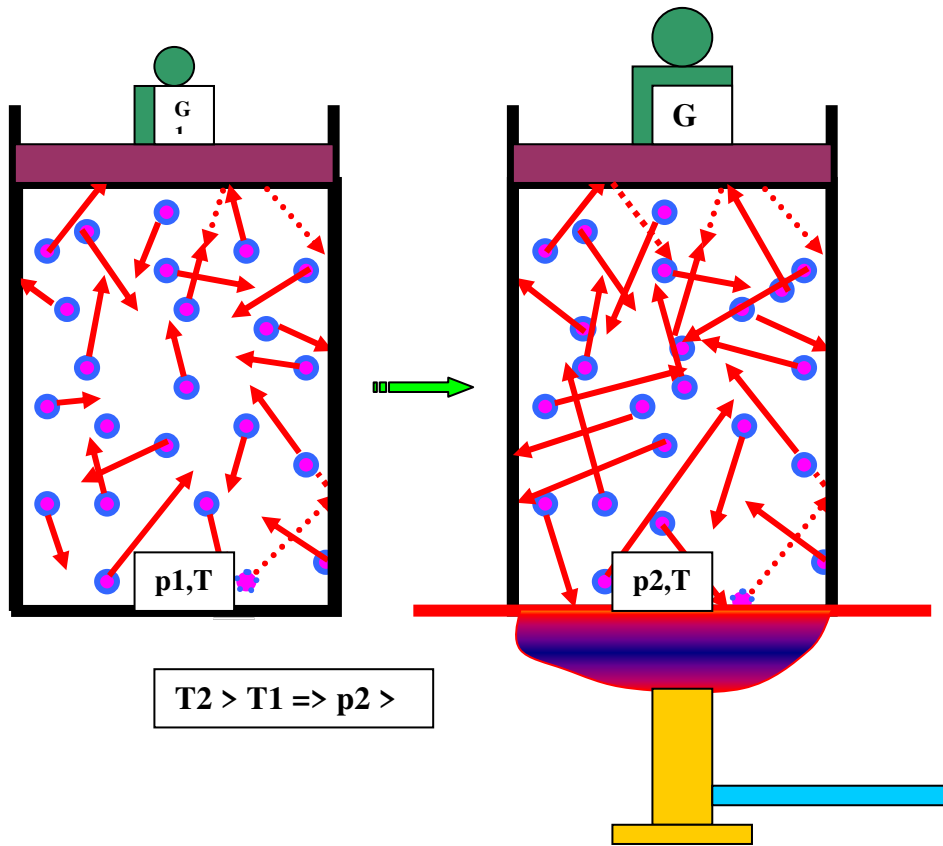
Z hlediska molekulárně-kinetické teorie látek součet kinetických energií uvedeného pohybu všech molekul v určitém množství ideálního plynu dává tzv. vnitřní energii, která je současně reprezentována veličinou zvanou **teplo** plynu. Její velikost nejsme schopni měřit přímo, pouze její změny. Teplo navíc souvisí s množstvím a tepelnými vlastnostmi látky.

Častěji se však setkáváme s lépe měřitelnou veličinou, a sice s **teplotou** plynu. Teplota je pak měřítkem průměrné kinetické energie všech molekul v tělese. Protože kinetická energie molekuly je závislá na její rychlosti (je úměrná čtverci této rychlosti), je zřejmé, že vyšší teplota látky znamená i vyšší střední rychlost molekul v ní (obr. 23).

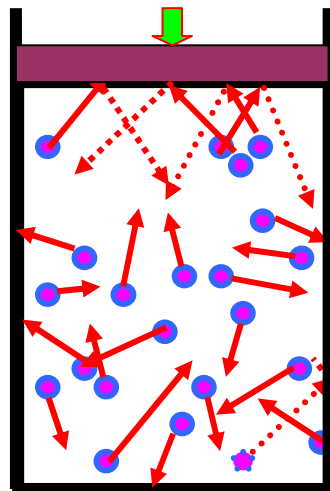
Teplota však sama o sobě nevypovídá nic o množství tepla a není závislá na množství ani druhu látky.

Pokud se zvýší teplota plynu a píst, uzavírající nádobu, je volný, bude počet nárazů na něj i předaný impuls z vnitřní strany nádoby větší (tzn. tlak bude větší), než zvenčí, a píst se bude pohybovat tak dlouho, dokud se silové působení z obou stran nevyrovná. To by byl model izobarického děje. Chceme-li však plyn po zahřátí udržet ve stejném objemu (děj izochorický), musíme počítat s tím, že píst bude nutno více zatížit (obr. 23), jelikož se v nádobě zvětší tlak.

Z uvedené představy vyplývá i další skutečnost (obr.24): Při stlačování plynu molekuly, narážející na pohybující se píst, získávají při odrazu od něj dodatečnou rychlost. Tím se zvyšuje jejich kinetická energie a tudíž i teplota plynu. Podobně při rozpínání píst část předané energie odnáší a dochází tedy k poklesu vnitřní energie a tím i k ochlazení plynu. Takto lze při určitém zjednodušení vysvětlit jevy při ději adiabatickém, tedy při ději, k němuž dochází při rychlém stlačování nebo rozpínání plynu.



Obr. 23. Ohřev plynu zvětší jeho tlak v uzavřené nádobě.



Obr. 24: K adiabatickému stlačování plynu. Molekuly narážející na pohybující se píst získávají při odrazu přídatnou rychlost a plyn se tudíž ohřívá.

5.3. K van der Waalsově stavové rovnici pro reálné plyny

Použité korekce **a** a **b** mají pro různé plyny různé hodnoty. V literatuře bývají častěji publikovány jiné konstanty, z nichž pak lze hodnoty **a** a **b** stanovit. Jde o kritickou teplotu T_k a kritický tlak p_k . Kritická teplota T_k je teplota, nad kterou nelze plyn žádným stlačováním převést do kapalného stavu (p_k je pak největší tlak, potřebný ke zkapalnění plynu při T_k).

Látka	voda	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂	He	Ar	Ne
t_k [°C]	374,1	31	-118,8	-147	-240	-267,9	-122,4	-228
a *	0,5479	0,3596	0,1351	0,1346	0,02407	0,003358	0,1342	0,2212
b **	0,0306	0,0427	0,0316	0,0386	0,0263	0,023638	0,0322	0,0177

* **a** v [MPa·m⁶/kmol²], ** **b** v [m³/kmol]

Tab. 13: Kritická teplota a van der Waalsovy koeficienty některých plynů.

Jde - li o směs plynů, stanoví se koeficienty **a** a **b** jako modifikované součty koeficientů všech zúčastněných plynů:

$$\mathbf{a} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathbf{a}_{ij} \cdot \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \quad \mathbf{b} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathbf{b}_{ij} \cdot \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j, \text{ kde}$$

$$\mathbf{a}_{ij} = \sqrt{(\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{a}_j)} \quad \mathbf{b}_{ij} = \sqrt{(\mathbf{b}_i \cdot \mathbf{b}_j)} .$$

Přitom $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ jsou molární zlomky jednotlivých plynů.

5.4. Míchání směsí se započtením kompresibility plynů.

Stlačitelnosti různých plynů se liší a navíc závisejí na jejich tlacích (viz Obr. 19). Pokud je kompresibilní faktor daného plynu při určitém tlaku **p** větší než 1 ($z_i(\mathbf{p}) > 1$), je plyn hůře stlačitelný než plyn ideální (při 100 barech je $z_{He}(100) = 1,05$), je-li menší než 1, je lépe stlačitelný ($z_{O_2}(100) = 0,95$) a je-li roven 1, je (při daném tlaku !) stlačitelný jako ideální plyn ($z_{N_2}(100) = 1$). Při míchání více plynů tato skutečnost situaci dodatečně komplikuje.

Mějme například kyslík, stlačený v litrové láhvi na 100 barů a dále hélium, stlačené v láhvi o shodném objemu rovněž na 100 barů. Choval-li by se každý z obou plynů jako ideální plyn, dostali bychom dle běžného Boyleova-Mariottova zákona při vypuštění do normálního tlaku (kdy $z_i(1\text{bar}) = 1$) po 100 litrech z každého z nich a po jejich smísení bychom očekávali směs Heliox 50/50, tzn. směs, ve které by oba plyny byly zastoupeny stejným dílem.

Bohužel to není pravda. Použijeme modifikovaného Boyleho –Mariottova zákona (10) a zjistíme, že objem V_{He}^0 vypuštěného hélia je

$$V_{He}^0 = p_1/p_0 \cdot V_1/z_{He}(p_1) = 100/1 \cdot 1/1,05 = \underline{\underline{95,2 \text{ litru}}}.$$

Podobně pro kyslík obdržíme

$$V_{O_2}^0 = p_1/p_0 \cdot V_1/z_{O_2}(p_1) = 100/1 \cdot 1/0,95 = \underline{105,2 \text{ litru}}$$

a smícháním obou množství získáme objem 200,4 litru, ve kterém je však hélium zastoupeno 95,2 / 200,4 = 47,5 % a kyslík 105,2 / 200,4 = 52,5 %, tedy směs Heliox 52,5/47,5. Odchylka 2,5 % není, obzvláště v případě kyslíku, zcela zanedbatelná a při expanzi ze 150 barů by byla ještě větší.

Parciální tlaky jednotlivých plynů ve směsi nacházející se pod tlakem p_T v láhvi je možné stanovit tak, že vezmeme v úvahu jejich podíly ve směsi f_i a jejich stlačitelnosti z_i (při jejich parciálním tlaku, vycházejícím z přiblížení ideálního plynu, tedy při $p_i = f_i \cdot p_T$) a budeme předpokládat, že celková stlačitelnost směsi Z_T je dána součtem dílčích stlačitelností jednotlivých plynů $f_i \cdot z_i$. V trimixu je pak

$$Z_T = f_{O_2} \cdot z_{O_2} + f_{He} \cdot z_{He} + f_{N_2} \cdot z_{N_2}.$$

Například v trimixu TX 15/55 (15% O₂ a 55% He) namíchaném za aplikace modelu ideálního plynu by měly být při celkovém tlaku $p_T = 200$ barů parciální tlaky jednotlivých plynů $p_{O_2}^{id} = 0,15 \cdot 200 = \underline{30 \text{ barů}}$, $p_{He}^{id} = \underline{110 \text{ barů}}$ a $p_{N_2}^{id} = 200 - 30 - 110 = \underline{60 \text{ barů}}$.

Stlačitelnosti jednotlivých složek při jejich parciálních tlacích jsou (viz tabulka Tab. 14) $z_{O_2} = 0,980$, $z_{He} = 1,057$, $z_{N_2} = 0,993$ a celková stlačitelnost směsi je $Z_T = 0,15 \cdot 0,980 + 0,55 \cdot 1,057 + 0,3 \cdot 0,993 = \underline{1,026}$.

Vzhledem ke stlačitelnosti jednotlivých plynů jsou však jejich parciální tlaky p_i^{kor} ve stlačené směsi rozděleny jinak. Vztah mezi korigovanými a našimi ideálními tlaky lze vyjádřit jako $p_i^{id} = p_i^{kor} \cdot z_i / Z_T$ a odtud bychom pro rozdělení parciálních tlaků plynů ve stlačené směsi obdrželi vztah $p_i^{kor} = p_i^{id} \cdot Z_T / z_i$, tedy $p_{O_2}^{kor} = 30 \cdot 1,026 / 0,980 = 31,4$ baru, $p_{He}^{kor} = 110 \cdot 1,026 / 1,057 = 106,8$ baru a $p_{N_2}^{kor} = 60 \cdot 1,026 / 0,993 = 62,0$ baru. (Součet všech parciálních tlaků je 200,2 baru, tedy poněkud odlišný od zadaného. Odchylka je v našem případě zanedbatelně malá a pokud by byla větší, bylo by nutno provést iteraci přepočtem stlačitelností na nově zjištěné parciální tlaky). Z podílů parciálních tlaků a celkového tlaku obdržíme výsledné složení směsi: $f_{O_2} = 31,4 / 200,2 = 0,157$ (16 %), $f_{He} = 0,533$ (53 %) a $f_{N_2} = 0,31$ (31 %).

Chceme-li tedy dosáhnout předepsaného složení, musíme ve výše uvedených vztazích nahradit korigované tlaky p_i^{kor} požadovanými ideálními p_i^{id} , tedy $p_i = p_i^{id} \cdot z_i / Z_T$. Pak v našem případě obdržíme $p_{O_2} = 30 \cdot 0,980 / 1,026 = 28,6$ baru, $p_{He} = 110 \cdot 1,057 / 1,026 = 113,3$ baru a $p_{N_2} = 60 \cdot 0,993 / 1,026 = 58,1$ baru a pak součet parciálních tlaků skutečně dává 200 barů a $f_{O_2} = 28,6 / 200 = 0,143$ (14 %), $f_{He} = 0,566$ (57 %) a $f_{N_2} = 0,29$ (29 %). Od předchozího se sice tento výsledek příliš neliší, avšak pro jiná složení trimixu je rozdíl přesvědčivější.

p[psig]	p _{abs} [bar]	Z _{O2}	Z _{N2}	Z _{He}	Z _{vzduch}
0	1	1	1	1	1
100	7,8	0,995	0,998	1,004	0,997
200	14,6	0,99	0,997	1,007	0,995
300	21,4	0,986	0,995	1,011	0,993
400	28,2	0,981	0,994	1,015	0,991
500	35	0,977	0,993	1,018	0,99
600	41,8	0,973	0,993	1,022	0,989
700	48,6	0,969	0,993	1,026	0,988
800	55,4	0,966	0,993	1,029	0,987
900	62,2	0,962	0,993	1,033	0,987
1000	69	0,959	0,994	1,036	0,986
1100	75,9	0,956	0,995	1,04	0,987
1200	82,7	0,954	0,996	1,043	0,987
1300	89,5	0,951	0,997	1,047	0,988
1400	96,3	0,949	0,999	1,05	0,988
1500	103,1	0,947	1,001	1,054	0,99
1600	109,9	0,945	1,003	1,057	0,991
1700	116,7	0,944	1,005	1,061	0,992
1800	123,5	0,943	1,008	1,064	0,994
1900	130,3	0,942	1,011	1,067	0,996
2000	137,1	0,941	1,014	1,071	0,999
2100	143,9	0,94	1,017	1,074	1,001
2200	150,7	0,94	1,021	1,078	1,004
2300	157,5	0,94	1,024	1,081	1,007
2400	164,3	0,941	1,028	1,084	1,01
2500	171,1	0,941	1,032	1,088	1,013
2600	177,9	0,942	1,036	1,091	1,016
2700	184,7	0,943	1,041	1,094	1,02
2800	191,5	0,944	1,045	1,097	1,024
2900	198,3	0,945	1,05	1,101	1,028
3000	205,1	0,947	1,054	1,104	1,032
3100	211,9	0,948	1,059	1,107	1,036
3200	218,7	0,95	1,064	1,11	1,04
3300	225,6	0,953	1,069	1,114	1,045
3400	232,4	0,955	1,074	1,117	1,049
3500	239,2	0,957	1,08	1,12	1,054
3600	246	0,96	1,085	1,123	1,059
3700	252,8	0,963	1,091	1,127	1,064
3800	259,6	0,966	1,096	1,13	1,069
3900	266,4	0,969	1,102	1,133	1,074
4000	273,2	0,972	1,107	1,136	1,079

Tab 14. Stlačitelnosti plynů. (tlak přepočten z psig jako 1 bar = 14, 696 psi),
(psig = libra na čtvereční palec jako přetlak vůči 1 baru, g - gauge).