

GAZY SPOTYKANE W NURKOWANIU

Tomasz Żabierek

We współczesnym nurkowaniu stosuje się wiele gazów, dlatego dla prawidłowego wyboru oraz przygotowania mieszanki oddechowej konieczna jest choćby pobieżna znajomość właściwości fizycznych i fizjologicznych każdego z nich.

Tlen

Tlen jest gazem bezbarwnym, bezwonnym, bezsmakowym, jego liczba atomowa wynosi 8 a masa atomowa 16. W warunkach normalnych występuje w postaci dwuatomowej co oznacza, że pojedyncza molekula składa się z dwóch atomów tlenu (O_2). Tlen jest bardzo popularnym gazem na naszej planecie, zajmuje m.in. 21% powietrza którym oddychamy. Bez tlenu niemożliwe byłoby jakiegokolwiek spalanie oraz podtrzymanie życia ludzkiego. Tlen posiada w warunkach normalnych gęstość $\rho=1.429$ g/l. Punkt wrzenia tlenu wynosi $-183^\circ C$ a przewodność cieplna 26.4 mW/m \cdot K.

Zwiększenie ciśnienia parcjalnego tlenu oraz dłuższe ekspozycje prowadzą do zatrucia tlenem. W zależności od poziomu ciśnienia parcjalnego występują dwa typy toksyczności tlenowej – neurologiczna oraz płucna. Wysokie ciśnienia parcjalne tlenu (powyżej 1.6 ata) prowadzą do wystąpienia objawów neurologicznych (CNS – Central Nervous System), objawiających się drżeniem mięśni (szczególnie twarzy), widzeniem tunelowym, zawrotami głowy, nudnościami lub w przypadku skrajnym konwulsjami. Przy wysokim ciśnieniu parcjalnym tlenu objawy mogą wystąpić po zaledwie kilku minutach.

Wrażliwość na zatrucie tlenem jest różna u różnych osób i zależy od wielu czynników w szczególności od kondycji fizycznej nurkującego oraz poziomu CO_2 we krwi. Nurek może również tolerować wyższe poziomy ciśnienie parcjalnych tlenu w spoczynku aniżeli podczas ciężkiej pracy. Dla nurków zawodowych wykonywany jest test tolerancji tlenowej polegający na wystawieniu organizmu na działanie ciśnienia parcjalnego tlenu na poziomie 2.8 ata przez okres 0.5h. Jeśli wystąpią jakiegokolwiek symptomy zatrucia tlenowego osoba nie może pracować jako nurek zawodowy.

Dla nurków amatorskich stosuje się pojęcie zegara toksyczności tlenowej typu CNS. Na podstawie ciśnienia parcjalnych oraz czasu ekspozycji nurek może określić zakumulowaną dawkę toksyczności. Osiągnięcie dawki 80% uważa się za maksymalne dopuszczalne i nie zaleca się jej przekraczania.

W odróżnieniu od objawów neurologicznych, pierwsze objawy toksyczności płucnej w zależności od czasu ekspozycji występują przy ciśnieniu parcjalnym o wiele niższym. Oddychanie ciśnieniem parcjalnym tlenu powyżej 1 ata przez okres 24h prowadzi do uszkodzenia tkanki płucnej. Zwiększenie ciśnienia parcjalnego powoduje redukcję czasu, po którym zachodzi takie samo uszkodzenie tkanki płucnej. Symptodem wystąpienia zatrucia tlenowego typu płucnego jest narastający ból podczas oddychania oraz kaszel.

Kontynuowanie ekspozycji pomimo symptomów prowadzi do ich nasilenia a w konsekwencji śmierci wskutek uszkodzenia tkanki płucnej i niewystarczającego zaopatrywania organizmu w tlen. Obecnie uznaje się poziom ciśnienia parcjalnego tlenu 0.5 ata jako bezpieczny dla długich ekspozycji.

Poziom dawki skumulowanej określa się w jednostkach UPTD (Unit Pulmonary Toxic Dose). Jedna jednostka UPTD określa uszkodzenie tkanki płucnej na poziomie oddychania tlenem pod ciśnieniem 1 bar przez okres 1min. W przypadku innych ciśnień parcjalnych, ilość jednostek określa się na podstawie tabeli. Skumulowanie odpowiednich ilości jednostek UPTD powoduje uszkodzenie tkanki płucnej a w konsekwencji spadek pojemności życiowej płuc.

Tlen jest silnym utleniaczem. Utlenianie jest to proces, w którym tlen wchodzi w reakcję z innymi substancjami. Przykładem może być rdzewienie metalu. Jest to proces utleniania (rdza jest to tlenek żelaza) tak jak starzenie gumy w o-ringach czy pokrywanie się aluminium zielonkawym nalotem. Gwałtowne utlenianie wytwarza ciepło lub ciepło i światło i nazywane jest spalaniem. Spalanie jest gwałtowniejsze w atmosferze o zwiększonym ciśnieniu parcjalnym tlenu, a więc tak w środowisku o zwiększonej procentowej zawartości tlenu jak i w środowisku zwiększonego ciśnienia. Substancje takie jak węglowodory wchodzi w tego typu gwałtowne reakcje, co może być powodem wybuchu lub powstania ognia.

Tlen używany do sporządzania sztucznych mieszanin oddechowych musi posiadać klasę czystości nie niższą niż 99.95% oraz niski punkt rosy wody. Następujące klasy tlenu mogą być wykorzystane:

- tlen **medyczny**;
- tlen klasy czystości **4.0** lub lepszej;
- tlen ciekły.

Mieszaniny oddechowe w zależności od frakcji tlenu posiadają odpowiednie nazewnictwo.

- mieszanina **normoksyczna** – frakcja tlenu jest tak sama jak w powietrzu;
- mieszanina **hipoksyczna** – frakcja tlenu jest mniejsza niż w powietrzu;
- mieszanina **hiperoksyczna** – frakcja tlenu jest większa niż w powietrzu;
- mieszanina **anoksyczna** – nie zawiera tlenu.

Azot

Jest bezbarwny, bezwonny, bezsmakowy. Posiada liczbę atomową 7 oraz masę atomową 14. Tak jak tlen występuje w warunkach normalnych w postaci dwuatomowej, dlatego spotykamy się z zapisem „N₂”. Jest następnym po tlenie składnikiem powietrza i zajmuje prawie 79% jego składu. Azot posiada w warunkach normalnych gęstość $\rho=1.2504$ g/l. Punkt wrzenia azotu wynosi -194.6°C a przewodność cieplna 25.9 mW/m*K.

Azot nie uczestniczy w procesie metabolizmu i z punktu widzenia fizjologicznego jest gazem obojętnym. Zwiększenie ciśnienia parcjalnego azotu powoduje wystąpienie objawów narkozy, znanej jako narkoza azotowa, podobnych do objawów po użyciu alkoholu. Pierwsze objawy narkozy azotowej występują przy ciśnieniu parcjalnym azotu na poziomie 3.16 ata, co

odpowiada głębokości 30m przy nurkowaniu powietrznym. Efekty wzrastają w miarę wzrostu ciśnienia parcjalnego azotu i na głębokości 60m zdolności intelektualne człowieka są w znacznym stopniu upośledzone a odpowiedź na bodźce wzrokowe i słuchowe znacznie wydłużona. Efekt narkotyczny mija niezwłocznie po zmianie głębokości na odpowiednio mniejszą.

Istnieje kilka hipotez co do mechanizmu powstawania narkozy azotowej. Jedna z nich bazuje na tym, że gaz narkotyczny powoduje obrzęk komórek nerwowych. Daje to pewną korelację pomiędzy narkotycznością gazu a jego rozpuszczalnością w otaczających neurotransmitery błonach lipidowych. Poniższa tabela przedstawia właściwości poszczególnych gazów stosowanych w nurkowaniu oraz ich potencjał narkotyczny (większa liczba oznacza mniejszy potencjał narkotyczny):

Gaz	Gęstość molekularna	Rozpuszczalność w tkankach	Wsp. rozp. woda-tłuszcz	Potencjał narkotyczny
Hel (He)	4	0.015	1.7	4.26
Neon (Ne)	20	0.019	2.07	3.58
Wodór (H ₂)	2	0.036	2.1	1.83
Azot (N ₂)	28	0.067	5.2	1
Argon (A)	40	0.14	5.3	0.43
Krypton (Kr)	83.7	0.43	9.6	0.14
Xenon (Xe)	131.3	1.7	20	0.039
Tlen (O ₂)	32	0.11	5	???
Dwutlenek węgla (CO ₂)	44	1.34	1.6	???

Analizując właściwości poszczególnych gazów łatwo dojść do wniosku, że najprostszą metodą redukcji narkotycznego oddziaływania gazów obojętnych jest zastąpienie azotu, w typowej mieszance nurkowej jaką jest powietrze, gazem o mniejszym potencjale narkotycznym na przykład helem.

Należy się zastanowić również nad gazami, które w powszechnym mniemaniu nie odpowiadają za występowanie narkozy – tlen oraz CO₂. Rozpuszczalność w tkankach tlenu kształtuje się poziomie azotu. Na podstawie tych danych obecnie uważa się, że NITROX jako gaz oddechowy nie powoduje redukcji narkozy. Również efekty związane z kumulacją CO₂ potęgują objawy narkozy. Gaz ten jest wg. powyższej analizy bardzo narkotyczny.

Dwutlenek węgla (CO₂)

Dwutlenek węgla jest gazem bezbarwnym, bezwonnym, z gęstością molekularną 44.01. Wypełnia naszą atmosferę w około 0.033% jako produkt uboczny procesu metabolizmu ludzi oraz zwierząt. CO₂ posiada w warunkach normalnych gęstość $\rho=1.977$ g/l, co oznacza, że jest dużo cięższy od powietrza. Punkt wrzenia CO₂ wynosi -78.5°C a przewodność cieplna 16.4 mW/m*K. Dwutlenek węgla bardzo łatwo rozpuszcza się w tkankach.

Z punktu widzenia fizjologii CO₂ jest odpowiedzialny za kontrolę czynności układu oddechowego. Zwiększenie poziomu CO₂ we krwi powoduje zwiększenie szybkości oddechu aż do momentu, gdy zostaną osiągnięte normalne warunki (normalny poziom CO₂). Jeśli poziom CO₂ wzrasta na skutek niewystarczającej wentylacji, przykładowo podczas ciężkiej

pracy z wykorzystaniem masek pełnotwarzowych z dużymi przestrzeniami martwymi lub z wykorzystaniem mało wydajnych automatów oddechowych, zachodzi zatrucie dwutlenkiem węgla. Poziom zatrucia jest uzależniony od ciśnienia parcjalnego oraz czasu ekspozycji. Dla krótkich ekspozycji (do 1h) poziom 3% przy ciśnieniu 1 bar jest tolerowany bez uszkodzeń organizmu. Dla długich ekspozycji (np. nurkowań saturowanych) poziom CO₂ musi być utrzymany poniżej 0.5 % przy 1 bar. Efekty działania podwyższonych ciśnień parcjalnych CO₂ na organizm ludzki przedstawia tabela:

Koncentracja CO ₂ [%Obj.]	PPCO ₂ [bar]	Efekt oddziaływania na człowieka
2	0.02	Początek zwiększenia szybkości oddechu
3	0.03	Pierwsze oznaki dyskomfortu
4	0.04	Dalsze zwiększanie częstotliwości oddechu
4..5	0.04..0.05	Jeśli poziom CO ₂ wzrósł szybko, następuje silne poczucie dyskomfortu, ból głowy, brzęczenie w uszach, bicie serca, zwiększenie ciśnienia krwi, pocenie. Jeśli poziom CO ₂ wzrastał wolno, możliwa jest pewna adaptacja jednak bez poczucia komfortu.
5	0.05	Pocenie, trudności w oddychaniu, lęki, silne bóle głowy.
6	0.06	Jeśli wystąpi nagle możliwa jest nawet śmierć. Jeśli narastał powoli, możliwa adaptacja i pewna tolerancja.
6..10	0.06..0.1	Adaptacja i tolerancja do 1h, przy zdecydowanym ograniczeniu możliwości fizycznych i intelektualnych.
8..10	0.08..0.1	Zdecydowane zwiększenie szybkości oddechu oraz pulsu, trudności w oddychaniu, zawroty głowy, wymioty, apatia, niebieski kolor skóry, utrata świadomości.
20	0.20	Szybka śmierć.

Hel

Jest również gazem bezbarwnym, bezwonnym, bezsmakowym z liczbą atomową 2 oraz masą atomową 4. Zajmuje $5.25 \cdot 10^{-4}$ atmosfery i występuje w postaci pojedynczych atomów. Hel posiada w warunkach normalnych gęstość $\rho=0.179$ g/l, co oznacza że jest 7.25 razy lżejszy od powietrza. Punkt wrzenia helu wynosi -269°C , tylko 4 stopnie powyżej zera bezwzględnego, a przewodność cieplna 150 mW/m*K, 6 razy więcej niż przewodność cieplna powietrza. Z technicznego punktu widzenia wykorzystanie helu jest problematyczne z powodu jego niskiej gęstości. Systemy do sporządzania mieszanin na bazie helu muszą być wykonane jako kompatybilne helowo w rozumieniu odpowiedniej szczelności, w celu zapobieżenia dużych strat gazu.

Z powodu swoich właściwości fizycznych jest wykorzystywany w nurkowaniu jako gaz redukujący efekty narkozy gazów obojętnych. Mieszaninę oddechową składającą się z tlenu, azotu oraz helu przyjęło się nazywać trimiksem, choć z ogólnego punktu widzenia trimiks jest mieszaniną trzech dowolnych gazów. Poprzez dobór odpowiednich proporcji tlenu, azotu oraz helu nurek jest w stanie przygotować dla siebie odpowiednią mieszaninę dla każdej głębokości i osiągnąć wymagane ciśnienie parcjalne tlenu oraz azotu, odzwierciedlające ryzyko toksyczności tlenowej oraz ekwiwalentną głębokość narkotyczną (Equivalent Narcotics

Depth - END). W szczególnym przypadku można na bazie tlenu i helu sporządzić helioks, prawie całkowicie redukujący problem narkozy.

Z powodu fizycznych właściwości helu przy nurkowaniu na mieszaninach helowych należy rozwiązać kilka problemów technicznych oraz fizjologicznych. Niska gęstość helu stwarza nie tylko problemy ze szczelnością systemów, ale również zniekształca głos nurka. Jest to ważne w przypadku wykorzystywania podwodnych systemów łączności i wymaga zastosowania specjalnych urządzeń określanых jako deskramblery. Efekt „kaczora Donalda” powstający przy próbie komunikacji w środowisku helowym w typowych warunkach nurkowania mieszkankowych uniemożliwia skutecznie zrozumienie wymawianych słów. Deskramblery przesuwają widmo głosu, w zależności od potrzeb od kilku do kilkuset herców, co sprawia że nasze ucho odbiera głos w takim zakresie częstotliwości, jakiego oczekuje.

Innym problemem nurkowania z wykorzystaniem mieszanin helowych jest utrata ciepła. Z powodu większej przewodności cieplnej helu wykorzystanie mieszanin helowych jako gazu wypełniającego skafandry suche prowadzi do szybkiego wychłodzenia organizmu poniżej poziomu akceptowalnego.

Utrata ciepła poprzez oddech jest przy wykorzystaniu mieszanin helowych taka sama lub mniejsza niż podczas oddychania mieszaninami bez helu. Wynika to z faktu mniejszej gęstości mieszanin helowych oraz mniejszej pojemności cieplnej helu. Zakładając, że gaz wydychany przez nurka jest zawsze znormalizowany pod względem temperatury i wilgotności, ogrzanie takiej samej objętości mieszaniny helowej wymaga mniejszej ilości energii. Dodatkowo, mieszaniny helowe zgodnie z krzywą Lennarda-Jonesa dla helu posiadają zdecydowanie wyższą temperaturę początkową przy wejściu do pęcherzyków płucnych niż mieszaniny tlenowo-azotowe.

Na większych głębokościach hel powoduje problemy znane jako Syndrom Wysokich Ciśnień – HPNS (High Pressure Nervous Syndrome). Na większych głębokościach, przy dodatkowej stosowanej dużej szybkości kompresji (standardowej w nurkowaniach technicznych SCUBA), dochodzi do zaburzeń centralnego układu nerwowego objawiających się drżeniem rąk, nudnościami, zaburzeniami widzenia, zawrotami głowy. Dla zredukowania efektów HPNS stosuje się nurkowanie na mieszaninach zawierających jakiś, choćby niewielki procent gazu o wyższym potencjale narkotycznym, stosując do głębokich nurkowań zamiast helioxu trimiks o zawartości azotu 5-10%.

Podsumowując, poza licznymi zaletami wykorzystanie helu w nurkowaniu rekreacyjnym ma wiele wad.

- **Hel jest gazem drogim** (Egipt – 0.07 \$ / litr, Polska ok. 0.07 PLN / litr), dlatego też nawet doświadczeni nurkowie wykorzystują mieszaniny helowe bazując na akceptowalnej dla nich END nie wykorzystując ze względów finansowych np. helioksu. Koszt typowego nurkowania z wykorzystaniem trimiksów na głębokość 80m w Polsce waha się, w zależności od metody pozyskania mieszaniny, pomiędzy 100 – 250 PLN.
- **Hel jest gazem a bardzo dużej przewodności cieplnej**, dlatego jego właściwości jako izolatora ciepła są znikome. Nurkowanie z wykorzystaniem mieszanin helowych wymaga zasilania skafandrów suchych z dodatkowych butli nie zawierających helu..
- **Hel jest gazem „szybszym” niż azot**. Odnosi się to do szybkości saturacji oraz desaturacji naszych tkanek podczas nurkowania. Efektem tego jest szybsza saturacja

tkanek podczas fazy dennej. Nurek nie może przekroczyć prędkości wynurzenia, a plan dekompresji przewiduje pierwsze przystanki dużo głębiej niż w przypadku analogicznego nurkowania powietrznego.

- **Helioks nie zawiera powietrza**, dlatego sporządzenie takiej mieszaniny wymaga albo ograniczenia docelowego ciśnienia, albo wykorzystanie dodatkowych pomp umożliwiających przetłoczenie helu z butli o niższym ciśnieniu do butli o ciśnieniu wyższym. W przypadku sporządzania trimiksu lub nitroksu zawsze elementem kończącym procedurę jest włączanie do butli powietrza z wykorzystaniem sprężarki. Dla takiej procedury konieczne ciśnienie w butlach źródłowych helu i tlenu może być zdecydowanie niższe. W szczególnym przypadku możliwe jest wykonanie mieszaniny z wykorzystaniem jedynie helu oraz powietrza. Powstała w ten sposób mieszanina zawsze będzie hipoksyjna.

Neon

Neon ma właściwości podobne do helu. Ze względu na koszty znacznie większe od kosztów helu jest wykorzystywany głównie jako wypełniacz w aparatach o obiegu zamkniętym

Wodór

Jest również gazem bezbarwnym i bezwonnym z liczbą atomową 1 i masą atomową 1. Występuje w warunkach normalnych w postaci dwuatomowej, dlatego spotykamy się z zapisem H_2 . Jest podstawowym składnikiem wszechświata i zajmuje prawie 99% jego składu. Wodór posiada w warunkach normalnych gęstość $\rho=0.090$ g/l i jest najlżejszym składnikiem na ziemi. Punkt wrzenia wodoru wynosi $-253^\circ C$ a przewodność cieplna 181 mW/m \cdot K – 7 razy większa niż powietrza i bardzo podobna do helu.

Wodór wchodzi w reakcję z tlenem, tworząc mieszaninę wybuchową jeśli stężenie tlenu przekroczy 4%, dlatego jeśli jest stosowany do sporządzania mieszanin oddechowych stężenie tlenu musi być dużo mniejsze niż 4%. Potencjał narkotyczny wodoru leży pomiędzy azotem a helem, dlatego zachodzi znaczna redukcja narkozy gazów obojętnych. Niska gęstość wodoru jest wykorzystywana do bardzo głębokich nurkowań, gdzie gęstość mieszaniny oddechowej jest problemem. Wodór został wykorzystany z powodzeniem w nurkowaniach francuskiej firmy Comex podczas eksperymentu HYDRA do głębokości 534m, a w listopadzie 1992 podczas eksperymentu HYDRA 10 została przez Comex przełamana głębokość 686m oraz 701m w nurkowaniu w komorze w Marsylii. Nurkowanie zajęło 47 dni a jako mieszanina oddechowa został użyty hydreliox (H_2-He-O_2). Ciśnienie parcjalne tlenu utrzymywane było na poziomie 0.4 bara, co odpowiadało zawartości procentowej tlenu około 0.5%.

Wodór był pierwszym gazem stosowanym jako wypełniacz z powodu braku helu oraz neonu w początku lat 40' oraz możliwości pozyskania wodoru poprzez elektrolizę. Ze względu na wybuchowość mieszaniny wodoru oraz tlenu obecnie zaniechano stosowania wodoru w nurkowaniu.

Argon

Jest gazem bezbarwnym i bezwonnym. Ze względu na swoją gęstość jest stosowany jako gaz do wypełniania suchych skafandrów, zapewniając zdecydowanie lepsze właściwości izolacyjne. Nie stosuje się argonu jako gazu do mieszanin oddechowych za wyjątkiem rzadkich przypadków stosowania w płytkich mieszaninach dekompresyjnych. Jego gęstość bardzo utrudnia oddychanie już na małych głębokościach oraz powoduje szybkie wystąpienie narkozy gazów obojętnych. Jest gazem wolnym, więc wykorzystany na małych głębokościach bardzo wolno rozpuszcza się w tkankach.

O autorze:

Tomasz Żabierek jest inżynierem robotykiem, kierownikiem pracowni projektowej w warszawskiej firmie inżynierskiej PRO-CONTROL. Jego hobby to nurkowanie techniczne, posiada stopień Instruktor Trainera Normoxic Trimix IANTD oraz wszystkie stopnie instruktorskie tejże organizacji. Od wielu lat zajmuje się analizą algorytmów dekompresyjnych oraz technikami dekompresyjnymi stosowanymi w nurkowaniach technicznych. Założyciel grupy Hogarthian Diver (<http://www.hogarthian.pl>).