

R. Kłós

NURKOWANIA SATUROWANE Z WYKORZYSTANIEM HELIOKSU Część I

W artykule przedstawiono wykorzystywaną przez MW RP helioksovą technologię nurkowań saturovaniych. Jest ona adaptacją technologii używanej przez US Navy do końca lat 80. XXw. z modyfikacjami dokonanyimi przez Włochów i specjalistów krajowych [3]. Była ona wykorzystana podczas prac na platformach PETROBALTIC SA do roku 2000 bez żadnego incydentu nurkowego.

słowa kluczowe: dekompresja, nurkowanie saturowane

HELIOX SATURATION DIVING IN POLAND Part I

This paper presents the Heliox saturation diving technology as used by the Polish Navy. This technology is an adaptation of the technology used by the US Navy until the end of 1980 and includes modifications by Italian and Polish specialists [3]. It was used during work on the PETROBALTIC S.A. Oil Platforms until the year 2000 without a single diving incident.

keywords: decompression, saturation diving

WSTĘP

W nurkowaniach saturovaniych czas dekompresji jest jedynie funkcją głębokości plateau saturacji i nie zależy od czasu przebywania na niej nurków. Dla opisanej tutaj technologii czas saturacji¹ wynosi do 4tyg². Przedłużenie go możliwe jest tylko w przypadku awaryjnym i wymaga rozpatrzenia takiej możliwości przez Kierownika Nurkowania w porozumieniu z Lekarzem Zabezpieczającym. Podczas wykonywania prac bezpośrednio w środowisku wodnym nurek może zmieniać głębokość w pewnym zakresie w stosunku do plateau. Zakres zmian głębokości podany jest w opisie procedury nurkowań³. Głębokość takiego nurkowania uzależniona jest od głębokości plateau i zakłada jego wykonywanie bez konieczności późniejszej dekompresji⁴, ograniczeniu podlega jedynie szybkość powrotu na plateau saturacji. Czas pracy nurka pod wodą przy nurkowaniach saturovaniych może być o wiele dłuższy niż podczas nurkowań poza strefą saturacji, dzięki temu nurek nie musi wykonywać zadań podwodnych pośpiesznie.

Przeprowadzenie nurkowania saturovanego wymaga zastosowania: specjalnych procedur, przystosowanego kompleksu nurkowego wyposażonego w systemy zachowania życia, dokładnego systemu do pomiarów głębokości, ciśnienia cząstkowego⁵ tlenu, ditlenku węgla, temperatury, wilgotności, podczas wykonywania nurkowań z plateau saturacji należy zapewnić aktywną ochronę cieplną nurków itd. Odchylenia od zalecanych zakresów wartości utrzymywanych parametrów mogą być tutaj znacznie groźniejsze niż podczas nurkowań poza strefą saturacji. Utrzymywanie

¹bez uwzględnienia czasu dekompresji

² zgodnie z obowiązującą Ustawą o wykonywaniu prac podwodnych (Dz.U. nr 199 poz. 1936 z 2003 roku) jednorazowy czas ciągłego pozostawiania nurka w warunkach hiperbarycznych (czyli z dekompresją) nie może przekroczyć 672 godzin (28 dni) – art. 14 ust. 2 Ustawy. W omawianej technologii czas dekompresji nie jest wliczony do maksymalnego czasu pobytu pod ciśnieniem (4 tyg.)

³wycieczek

⁴nurkowania z dekompresją zerową [2]

⁵lub/i zawartości

Tabela 1

Dozwolone wycieczki na głębokości większe i mniejsze od plateau saturacji

Głębokość plateau saturacji	Dozwolona zmiana głębokości (w górę)	Graniczna dozwolona głębokość, do której wolno nurkować	Głębokość plateau saturacji	Dozwolona zmiana głębokości (w górę)	Graniczna dozwolona głębokość, do której wolno nurkować
[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]
46	0	46	84	-25	59
48	-2	46	86	-25	61
50	-4	46	88	-25	63
52	-6	46	90	-26	64
54	-8	46	92	-26	66
56	-10	46	94	-26	68
58	-12	46	96	-27	69
60	-14	46	98	-27	71
62	-16	46	100	-27	73
64	-18	46	102	-27	73
66	-20	46	104	-28	76
68	-22	46	106	-28	78
70	-23	47	108	-28	80
72	-23	49	110	-28	82
74	-24	50	112	-29	83
76	-24	52	114	-29	85
78	-24	54	116	-29	87
80	-24	56	118	-30	88
82	-25	57	120	-30	90
Głębokość plateau saturacji	Dozwolona zmiana głębokości (w dół)	Graniczna dozwolona głębokość, do której wolno nurkować	Głębokość plateau saturacji	Dozwolona zmiana głębokości (w dół)	Graniczna dozwolona głębokość, do której wolno nurkować
[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]
46	+23	69	84	+29	113
48	+23	71	86	+29	115
50	+24	74	88	+29	117
52	+24	76	90	+30	120
54	+24	78	92	+30	122
56	+24	80	94	+30	124
58	+25	83	96	+31	127
60	+25	85	98	+31	129
62	+25	87	100	+31	131
64	+26	90	102	+32	134
66	+26	92	104	+32	136
68	+26	94	106	+32	138
70	+27	97	108	+33	141
72	+27	99	110	+33	143
74	+27	101	112	+33	145
76	+28	104	114	+34	148
78	+28	106	116	+34	150
80	+28	108	118	+34	152
82	+29	111	120	+35	155

ich na wymaganym poziomie jest szczególnie istotne z punktu widzenia prowadzonej później dekompresji, gdyż jest ona policzona z uwzględnieniem faktu, że parametry te podczas całej saturacji były utrzymywane na wymaganym poziomie.

Opisana procedura stosowana była podczas nurkowań z wykorzystaniem kompleksu nurkowego typu AF2 i mieszanin helowo-tlenowych⁶ jako czynnika oddechowego podczas prac prowadzonych od 1996 do 2000 roku dla PETROBALTIC SA.

METODA

Przy planowaniu prac podwodnych z wykorzystaniem saturacji należy dobrać najdogodniejszą głębokość plateau. Analizy takiej dokonuje się w oparciu o przewidywane zakresy głębokości, na których będą wykonywane prace nurkowe. Dystanse, na które nurkowie będą odchodzili od dzwonu są także ograniczone ze względów bezpieczeństwa i mają powiązanie z plateau oraz planowanymi głębokościami posadowienia dzwonu nurkowego.

Wycieczki z plateau

W saturacji możliwe są wycieczki zarówno na głębokości większe jak i mniejsze od plateau, przy czym prace należy wykonywać jedynie na głębokościach większych. Tabela dozwolonych zmian głębokości w kierunku mniejszych niż plateau saturacji jest wykorzystywana jedynie w przypadkach awaryjnych. Czas prowadzenia prac na głębokościach większych od plateau jest ograniczony i zależy: od zakresu tej zmiany, czasu trwania ostatniego nurkowania oraz czasu, który upłynął od ostatniego nurkowania. Wycieczki takie są możliwe w zakresie głębokości plateau od 46mH₂O do 120mH₂O z tym, że wycieczki z głębokości plateau saturacji 46mH₂O w stronę głębokości mniejszych nie są możliwe – występuje wtedy bardzo duże zagrożenie chorobą ciśnieniową – DCS⁷. Między innymi z tego powodu saturacje z wykorzystaniem mieszanin helowo-tlenowych praktycznie stosuje się od głębokości ok. 50mH₂O – **tab.1**.

Podczas nurkowań⁸ szybkość zmiany głębokości jest ograniczona i nie powinna przekraczać 10mH₂O·min⁻¹. Jeżeli z jakichkolwiek powodów nurek przemieszczał się w płaszczyźnie pionowej szybciej, należy go natychmiast zatrzymać i zastosować taki czas postoju, jaki musiałby upłynąć gdyby nurek zanurzał/wynurzał się z prawidłową szybkością. Jeżeli zmiana szybkości nastąpiła przy powrocie z głębokości większej na głębokość plateau i istnieje obawa wystąpienia DCS, należy podnieść plateau saturacji do największej głębokości, na której przebywał nurek, ale o wartość nie mniejszą niż o 7,5mH₂O. Jeżeli następnie istnieje potrzeba zmniejszenia głębokości plateau należy postępować jak w przypadku rekompresji leczniczej.

Tab.1 podaje dozwolone nurkowania na głębokości większe i mniejsze od plateau saturacji. W pierwszej kolumnie tabeli podano głębokość plateau saturacji, w drugiej wartość dozwolonej zmiany głębokości, a w trzeciej maksymalną lub minimalną dozwoloną głębokość nurkowania⁹. Nurkowanie w zakresie głębokości podanych w **tab.1** nie pociąga za sobą konieczności stosowania dodatkowej dekompresji

⁶helioksu

⁷Decompression Sickness

⁸wycieczek z plateau saturacji

⁹suma bądź różnica pomiędzy pierwszą i drugą kolumną

podczas powrotu na plateau saturacji¹⁰ – nurkowania bezdekompresyjne¹¹.

Przy wyborze plateau saturacji należy uwzględnić dokładność wykonywania pomiarów głębokości¹², np. jeżeli pomiar wykonywany jest z dokładnością do $\pm 0,5mH_2O$ to można wykonywać nurkowania do głębokości $86,5mH_2O$ z głębokości plateau saturacji zawartych w granicach $62,5-63,5mH_2O$.

Przy planowaniu nurkowania należy ustalić na jak długi dystans może odchodzić nurek roboczy od dzwonu nurkowego¹³. Odległość tę ustala się na wypadek gdyby nurek uzyskał dodatnią lub ujemną pływalność i został wyrzucony ponad dzwon lub spadł¹⁴. W uzasadnionych przypadkach można także zmienić głębokość ustawienia dzwonu tak, aby zminimalizować możliwość wystąpienia wypadku nurkowego podczas wyrzucenia lub opadnięcia nurka¹⁵.

Po wykonaniu nurkowań na głębokości mniejsze i większe niż głębokość plateau saturacji nurkowie muszą odpoczywać przynajmniej $24godz$. W sytuacjach alarmowych czas odpoczynku po nurkowaniu na głębokości większe od plateau może być zmniejszony, lecz wtedy czas dozwolonej pracy ulegnie skróceniu¹⁶.

Czas przebywania nurka na głębokościach większych od plateau saturacji¹⁷ jest ograniczony. W sytuacjach wyższej konieczności¹⁸ można uznać, że czas przebywania nurka na dozwolonych przez **tab.1** głębokościach jest praktycznie ograniczony tylko samopoczuciem nurka. Jeżeli dojdzie do sytuacji przedłużenia pobytu nurka na dozwolonych głębokościach, to nie potrzeba stosować żadnych dodatkowych przystanków dekompresyjnych. Nurek wraca na głębokość plateau saturacji tak, jakby nie nastąpiło przekroczenie dozwolonego czasu pracy. W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie przekroczyć dozwolonej szybkości powrotu nurka na głębokość odpowiadającą plateau. Odpoczynek po nurkowaniu awaryjnym powinien być nie krótszy niż $24godz$. W tym czasie nurkowie powinni być pod szczególną opieką¹⁹ Lekarza Zabezpieczającego.

¹⁰jak wspomniano wcześniej szybkość tego przejścia jest ograniczona do $10mH_2O \cdot min^{-1}$

¹¹Przykładowo, aby określić, do jakiej maksymalnej głębokości można nurkować z plateau $63mH_2O$ należy jej poszukać w **tab.1** – nie ma takiej wartości. Do dyspozycji jest głębokość mniejsza $62mH_2O$ i większa $64mH_2O$. W takim przypadku należy z kolumny 3 **tab.1** wybrać tę maksymalną dozwoloną głębokość nurkowania (odpowiadającą głębokości $62mH_2O$ i $64mH_2O$), która jest mniejsza. W tym przypadku będzie to $87mH_2O$. Na taką maksymalną głębokość można nurkować z plateau saturacji.

¹²ciśnienia

¹³jak długi przewód zasilający można wydać nurkowi z dzwonu

¹⁴gdy nurek pracuje na wraku czy innej konstrukcji, z której może spaść należy tak dobrać odległość miejsca pracy od dzwonu aby uwzględnić możliwość upadku nurka na większą głębokość lub wyrzucenia go ponad dzwon

¹⁵Przykładowo, ustalenie bezpiecznej odległości od dzwonu, na którą może odejść nurek, gdy plateau saturacji wynosi $63mH_2O$ a dzwon nurkowy został zatrzymany na głębokości o $0,5mH_2O$ większej od głębokości plateau saturacji można oprzeć o **tab.1**. Z głębokości plateau saturacji wynoszącej $63mH_2O$ nurek może wykonać wycieczkę w górę o ok. $17mH_2O$ (przy założeniu dokładności pomiarów głębokości na poziomie $\pm 0,5mH_2O$: $63,5mH_2O - 17mH_2O = 46,5mH_2O$). Z **tab.1** wynika, że może on nurkować na głębokość większą od plateau saturacji o $25mH_2O$. Stąd, bezpieczna długość wydanej wiązki nurka nie powinna być większa niż $17m$. Jeżeli istnieje konieczność wykonania nurkowania na większy dystans, nurek musi być poinformowany o tym, że ma wydany dodatkowy odcinek wiązki. Zgodę na taką operację musi wyrazić Kierownik Zmiany.

¹⁶nurkowania powtarzalne – zgodę na ich wykonanie może wyrazić Kierownik Nurkowania, jedynie w sytuacjach szczególnych, jeżeli należy podjąć takie działanie niezwłocznie, decyzję o podjęciu takiego nurkowania może podjąć samodzielnie Kierownik Zmiany

¹⁷mieszczących się w granicach dozwolonych zmian według **tab.1**

¹⁸np. konieczności ratowania życia

¹⁹powinni być obserwowani

Tabela 2

Dopuszczalne czasy pobytu nurka na dozwolonych głębokościach większych niż głębokość plateau saturacji

Dla plateau saturacji zawartego w granicach 45–90mH ₂ O							
Dozwolona zmiana głębokości w stosunku do plateau saturacji	Maksymalny dozwolony czas pracy w wodzie	Względne grupy przesyceń dla nurkowań powtarzalnych ²⁰					
		[mH ₂ O]	[min]	A	B	C	D
+7,5	bez ograniczeń	60	150	300	600	→	b/o
+15,0	270	30	60	100	150	210	270
+22,5	150	20	40	65	90	120	150
+30,0	60	10	20	30	40	50	60
Dla plateau saturacji zawartego w granicach 90–120mH ₂ O							
Dozwolona zmiana głębokości w stosunku do plateau saturacji	Maksymalny dozwolony czas pracy w wodzie	Względne grupy przesyceń dla nurkowań powtarzalnych ¹⁹					
		[mH ₂ O]	[min]	A	B	C	D
+7,5	bez ograniczeń	60	150	300	600	→	b/o
+15,0	270	30	60	100	150	210	270
+22,5	150	20	40	65	90	120	150
+30,0	100	15	30	45	60	80	100
+37,5	75	10	20	30	45	60	75
+45,0	60	10	20	30	40	50	60

Ograniczenia czasu pracy nurka w toni wodnej²¹ podano w **tab.2**. Tabela ta podzielona jest na dwa zakresy głębokości plateau. Pierwsza z nich dotyczy sytuacji, gdy głębokość plateau saturacji zawiera się w granicach 45–90mH₂O a druga, gdy głębokość ta zawiera się w granicach 90–120 mH₂O. Druga z nich zawiera też zmiany głębokości niezalecane, ale możliwe do zastosowania, zaznaczone poprzez zacienione obszary²². Pierwsze kolumny tabeli zawierają zakresy zmian głębokości w dół, w stosunku do głębokości plateau saturacji²³. W drugiej kolumnie podane są maksymalne czasy pracy w wodzie, trzecia kolumna zawiera informacje dotyczące wykonywania nurkowań powtarzalnych²⁴. W kolumnie tej zaznaczone są literami od A do F tzw. „względne grupy przesyceń”. W kolumnach pod tymi literami są zapisane czasy²⁵. Jeżeli podczas nurkowania został wykorzystany maksymalny czas pracy w wodzie²⁶ a czas odpoczynku po tym nurkowaniu jest krótszy niż 2,5godz, to wykonywanie nurkowania powtarzalnego jest zabronione. W innych przypadkach istnieje możliwość wykonania nurkowania powtarzalnego na mniejszą lub taką samą głębokość²⁷, przy czym dozwolony czas jego trwania będzie krótszy.

²⁰ przed upływem 24godz od ostatniego nurkowania

²¹ czas przebywania w dzwonie na zabezpieczeniu nie jest doliczany do dozwolonego czasu pracy

²² mogą być one wykorzystane jedynie w sytuacjach awaryjnych

²³ nie wolno stosować zmian większych niż dozwolone **tab.1**, gdyż jest ona tabelą nadrzędną w stosunku do **tab.2**

²⁴ przed upływem 24godz od ostatniego nurkowania

²⁵ przy czym maksymalny dozwolony czas nurkowania (kolumna 2) jest powtórzony pod literą F

²⁶ kolumna 2

²⁷ nurkowania głębsze nie zawsze są możliwe – patrz dalej

Tabela 3

Grupy nasyceń dla nurkowań powtarzalnych, dla których czas odpoczynku po ostatnim nurkowaniu był krótszy niż 24godz

		Czas odpoczynku po ostatnim nurkowaniu [godz,min]						
←wyjściowa grupa nasyceń←		F	E	D	C	B	A	
zakończono nurkowanie z literą →		F	1,00	2,30	4,00	6,30	12,00	24,00
zakończono nurkowanie z literą →		E	1,20	3,00	5,30	10,00	24,00	
zakończono nurkowanie z literą →		D	2,00	4,00	8,00	24,00		
zakończono nurkowanie z literą →		C	2,30	6,30	24,00			
zakończono nurkowanie z literą →		B	4,00	24,00				

Do wyznaczenia dozwolonego czasu pobytu pod wodą przy ekspozycji powtarzalnej należy posłużyć się **tab.3** i określić, jaką tzw. „względną grupę przesylenia” nurka w odpowiedniej fazie odpoczynku. Liczby wewnątrz **tab.3** oznaczają czas odpoczynku, jaki upłynął od wycieczki. Litery w linii ukośnej oznaczają z jaką względną grupą przesylenia” zakończył nurek poprzednią ekspozycję a litery w linii poziomej²⁸ wskazują aktualną „względną grupę przesylenia”, jaką posiada on po upływie określonego czasu odpoczynku.²⁹

Sposób przeprowadzenia nurkowania powtarzalnego można prześledzić na przykładzie, w którym pierwsza wycieczka odbyła się na głębokość $80mH_2O$ z czasem pobytu $85min$. Głębokość plateau saturacji wynosiła $60mH_2O$. Następnie nurek odpoczywał $4,5godz$ w dzwonie na głębokości równoważnej plateau. Aby określić jak długo będzie on mógł powtórnie pracować na głębokości $80mH_2O$, należy obliczyć różnicę pomiędzy plateau saturacji a głębokością operacyjną, na którą będzie opuszczony nurek: $80mH_2O - 60mH_2O = 20mH_2O$. Ponieważ plateau saturacji zawiera się pomiędzy $45 - 90mH_2O$, należy skorzystać z pierwszej części **tab.2** w linii poziomej odpowiadającej zmianie głębokości wynoszącej $22,5mH_2O$. Z **tab.1** wynika, że dozwolona zmiana głębokości dla plateau saturacji $60mH_2O$ wynosi $25mH_2O$ a maksymalna głębokość nurkowania $85mH_2O$ ³⁰. Pomimo tego, że w **tab.2** możliwe jest nurkowanie na głębokość $30mH_2O$ poniżej plateau saturacji, to jest ono zabronione **tab.1**, która to tabela ma wyższy priorytet³¹. Dla czasu pobytu $85min$ „względna grupa przesylenia” wynosi D ³². Po odpoczynku wynoszącym $4,5godz$ nurek posiada

²⁸u góry tabeli

²⁹Np. po $140min$ na $14m$ poniżej plateau zawartego w granicach $45 - 90mH_2O$ nurek zakończył pracę ze „względną grupą przesylenia” D (litery w linii ukośnej **tab.3** i linii poziomej **tab.2**) i czas jego odpoczynku w habitacie (kompleksie lub dzwonie nurkowym) zawiera się pomiędzy 4 a $8godz$, to posiada on aktualnie „względną grupę przesylenia” C . Jeżeli miałby wykonać nurkowanie powtarzalne, to należy przyjąć, że w chwili startu byłby on w takim samym stadium nurkowania jak po czasie nurkowania zapisanym w kolumnie 3 **tab.2** pod literą C . Czyli, jeżeli plateau saturacji zawiera się w granicach $45 - 90mH_2O$ a nurek wykonuje nurkowanie powtarzalne na głębokość większą niż $7,5mH_2O$, a mniejszą niż $15mH_2O$ w stosunku do plateau saturacji, to może on przebywać pod wodą $170min$ ($270min - 100min = 170min$) – ponieważ „względna grupa przesylenia” pozostała po poprzednim nurkowaniu wynosiła C . Wynika z tego, że nurek jest jeszcze w chwili rozpoczęcia nurkowania powtarzalnego tak „przesycony”, jak byłby „przesycony” gdyby przebywał już pod wodą $100min$.

³⁰**tab.1**; jeżeli uwzględnimy fakt, że zawsze mierzona jest głębokość z jakimś błędem, to należy przyjąć jako maksymalną głębokość nurkowania większą niż $85mH_2O$

³¹wszystkie nurkowania niedopuszczalne przez **tab.1** są zabronione, chociaż byłyby dopuszczalne z punktu widzenia **tab.2**.

³²czas pobytu zawarty pomiędzy 65 a $90min$

Tabela 4

Maksymalne dozwolone szybkości sprężania do głębokości plateau w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Zakres dozwolonych szybkości sprężania	
[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O·min ⁻¹]	[fsw·min ⁻¹]
6,7–90	22–300	0,3–18	1–60
90–120	300–390	0,3–0,9	1–3

względną grupę przesylenia” C³³. Podczas planowania nurkowania powtarzalnego należy posługiwać się pierwszą częścią **tab.2** na poziomie zmiany głębokości w stosunku do plateau saturacji wynoszącej +22,5mH₂O³⁴. Na przecięciu tej linii i linii C kolumny 3 znajduje się czas odpowiadający „względnej grupie przesylenia” pozostałej po pierwszej wycieczce – wynosi on 65min. Wynika z tego, że dozwolony czas pracy nurka na tej głębokości podczas nurkowania powtarzalnego wyniesie: 150min–65min=85min.

Kompresja

Kompresję do plateau saturacji prowadzi się dwuetapowo, początkowo osiągając głębokość 6,5mH₂O, po osiągnięciu której należy dokonać sprawdzenia funkcjonowania wszystkich systemów kompleksu nurkowego. Następnie prowadzi się dalszą kompresję do plateau saturacji.

Wstępna kompresja prowadzona jest w celu ustalenia ciśnienia cząstkowego tlenu w zakresie od 35–40kPa. Należy ją przeprowadzić powietrzem lub mieszaniną 20%O₂/He. Na głębokości 6,5mH₂O należy skalibrować urządzenia pomiarowe oraz sprawdzić/ustawić poziomy alarmowe. Należy również sprawdzić poprawność działania układów regeneracji atmosfery kompleksu nurkowego oraz działanie podstawowych i awaryjnych systemów, w jakie wyposażony jest kompleks.

Po zakończeniu etapu wstępnego i sprawdzeniu działania wszystkich systemów wchodzących w skład kompleksu nurkowego można przystąpić do fazy sprężania do wybranej głębokości plateau. Kompresję tę prowadzi się przy użyciu czystego helu. Zaleca się, aby podczas tej fazy nurkowie użyli układów awaryjnego oddychania³⁵, aż do chwili ustalenia się parametrów pracy na prawidłowym, niezmiennym poziomie. Szybkość sprężania do plateau saturacji zależy od jej wartości i jest różna w różnych jej fazach. Zalecane szybkości sprężania podano w **tab.4**. Szybsza niż zalecana kompresja może prowadzić do wypadku nurkowego³⁶. Powolna kompresja daje dodatkowo tę możliwość, że jeżeli po jej zakończeniu nurkowie czują się dobrze, to mogą przystąpić natychmiast do pracy, jednak zalecana jest ich 24godz aklimatyzacja na głębokości plateau³⁷.

W trakcie jednego nurkowania saturowanego można zmieniać głębokość plateau saturacji w zależności od potrzeb. Zwiększanie głębokości plateau może być dokonane zawsze³⁸, natomiast zmniejszenie głębokości plateau może być wykonane jedynie stosując standardową procedurę dekompresyjną. W sytuacjach awaryjnych możliwa jest również dekompresja przyspieszona.

³³ należy wejść do **tab.3** na poziomie litery D i odnaleźć czas 4,5godz; jest on zawarty jest pomiędzy 4,00 a 8,00godz – dla 4godz czasu odpoczynku należy przejść do góry i odczytać literę, którą jest C

³⁴ taka sama jak przy nurkowaniu poprzedzającym nurkowanie powtarzalne

³⁵ skład mieszanin awaryjnych podany jest dalej

³⁶ możliwość wystąpienia *High Pressure Nervous Syndrome*

³⁷ z reguły prowadzi się kompresję z szybkością 15m·min⁻¹

³⁸ zachowując dozwolone szybkości kompresji – **tab.4**

Tabela 5

Dozwolone wartości podstawowych wielkości mierzonych podczas saturacji

Wielkość mierzona	Zakres dozwolonych wartości wielkości mierzonych
dzwon nurkowy	
Ciśnienie cząstkowe O_2	w granicach 40–60kPa
Ciśnienie cząstkowe CO_2	poniżej 0,50kPa
Zawartość helu He	pozostałość
Temperatura	zależnie od odczuć własnych nurków
Zawartość wilgoci	zależnie od odczuć nurków ³⁹
kompleks hiperbaryczny	
Ciśnienie cząstkowe O_2	zalecane 33,2kPa dozwolone zaś w granicach 35–40kPa
Ciśnienie cząstkowe CO_2	poniżej 0,25kPa
Ciśnienie cząstkowe N_2	poniżej 135kPa
Zawartość helu He	pozostałość
Temperatura	ok. 27°–28°C zależnie od odczuć własnych nurków
Zawartość wilgoci	wilgotność względna w zakresie 50–80% zależnie od odczuć nurków ³⁹
Zamiast pomiarów ciśnienia cząstkowego można wykonywać pomiary zawartości pod warunkiem, że przeliczenie zawartości na ciśnienie cząstkowe będzie możliwe do wykonania z wymaganą dokładnością	

Skład atmosfery habitatu

Podczas nurkowania saturowanego należy w sposób ciągły kontrolować: ciśnienie całkowite⁴⁰, ciśnienie cząstkowe/zawartość tlenu, temperaturę oraz wilgotność. Nie rzadziej niż co 1godz należy kontrolować zawartość ditlenku węgla – CO_2 . Zawartość azotu powinna być kontrolowana nie rzadziej, niż co 12godz przez pierwsze 5dni, następnie pomiary te można wykonywać co 24godz. Zaleca się także kontrolowanie zawartości helu. Dopuszczalne wartości wyżej wymienionych wielkości zebrano w **tab.5**.

Zabezpieczenie atmosfery kompleksu przed zanieczyszczeniami gazowymi i toksycznymi parami jest bardzo ważne dla zdrowia nurków. Celem sprawdzenia możliwości skażenia atmosfery kompleksu wykonuje się test toksykologiczny. Jest on wykonywany zawsze wtedy, gdy takie skażenie nie może być wykluczone np. po remoncie. W miarę posiadanych możliwości należy oznaczać zawartości wybranych zanieczyszczeń, szczególnie węglowodorowych⁴¹ – patrz dalej.

Tabela 6

Składy awaryjnych helioksów w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Skład awaryjnego helioksu
[mH ₂ O]	[fsw]	
0–60	0–200	16% _v O ₂ +84% _v He
60–120	200–400	5% _v O ₂ +95% _v He

³⁹ przy 50–60% wilgotności względnej złoża wapna sodowanego pracuje najwydajniej

⁴⁰ głębokość nurkowania

⁴¹ np. w przypadku zabrudzenia skafandra nurka olejami

Tabela 7

Składy leczniczych mieszanin oddechowych w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Skład leczniczej mieszaniny oddechowej
[mH_2O]	[fsw]	
0–18	0–60	100% $_vO_2$
18–30	60–100	60% $_vO_2$ +40% $_vHe$
30–60	100–200	36% $_vO_2$ +64% $_vHe$
60–105	200–350	21% $_vO_2$ +79% $_vHe$
105–120	350–400	13% $_vO_2$ +87% $_vHe$

Awaryjne mieszaniny oddechowe

W sytuacjach awaryjnych⁴² mogą być użyte różne mieszaniny helowo–tlenowe, dla których ciśnienie cząstkowe tlenu będzie zawierało się w granicach 16–125kPa. Mieszaniny te podawane są poprzez szczelne układy awaryjnego oddychania. Najczęściej stosuje się mieszaniny wymienione w **tab.6**. Jeżeli nie dysponuje się dostateczną liczbą zbiorników ciśnieniowych można użyć dla zakresu głębokości 0–90 mH_2O mieszaniny 18% $_vO_2/He$, która może być wykorzystywana także przez nurka zabezpieczającego podczas wycieczek. Użycie takiej mieszaniny ograniczone jest jednak, co do czasu – patrz dalej. Każda mieszanina przed podłączeniem do systemów oddechowych musi być sprawdzona.

Lecznicze mieszaniny oddechowe

Do celów leczniczych mogą być użyte różne mieszaniny helowo–tlenowe⁴³ oraz tlen⁴⁴ jako czynnik oddechowy. Mieszaniny te podawane są poprzez szczelne układy awaryjnego oddychania. Najczęściej stosuje się mieszaniny wymienione w **tab.7**. Przy braku dostatecznej liczby zbiorników ciśnieniowych można użyć dla zakresu głębokości 0–90 mH_2O mieszaniny 18% $_vO_2/He$, jednak efektywność leczenia tą mieszaniną jest mniejsza.

Tabela 8

Zalecane zakresy składów roboczych helioksów w funkcji głębokości

Zakres głębokości	Skład helioksu
[mH_2O]	
60–80	(15–12)% $_vO_2/He$
80–100	(12–10)% $_vO_2/He$
100–120	(10–8)% $_vO_2/He$
Przed zdecydowaniem się na zastosowanie konkretnego składu mieszaniny policzyć wartość ciśnienia cząstkowego tlenu uwzględniając głębokość i czas pracy nurka. Nie stosować mieszanin z początku przedziału stężeń dla końca przedziału głębokości.	

⁴²pożar w kompleksie, utrata kontroli nad atmosferą kompleksu, zaburzenia w pracy układów regeneracji itp.

⁴³ciśnienie cząstkowe tlenu w użytej leczniczej mieszaninie oddechowej musi zawierać się w granicach 150–250kPa

⁴⁴czysty tlen może być stosowany tylko w zakresie głębokości 0–18 mH_2O

Szybkość prowadzenia dekompresji w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Szybkość prowadzenia dekompresji		Czas przejścia głębokości jednostkowej	
[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O·godz ⁻¹]	[fsw·godz ⁻¹]	[min·mH ₂ O ⁻¹]	[min·fsw ⁻¹]
90–61,5	300–200	ok.1,8	6	33,3	10
61,5–30,5	200–100	ok.1,5	5	40,0	12
30,5–15,5	100–50	ok.1,2	4	50,0	15
15,5–0	50–0	ok.0,9	3	66,6	20

Mieszanki oddechowe wykorzystywane podczas wycieczek

Mieszanki oddechowe stosowane do zasilania operacyjnych systemów oddechowych nurka powinny być czystym helioksem a ciśnienie cząstkowe tlenu w nich zawartego zależy od zastosowanego systemu obiegu czynnika oddechowego [Kłós 2000]. Podczas opisywanych tutaj nurkowań saturowanych stosowany był jedynie otwarty system obiegu czynnika oddechowego. W takim przypadku ciśnienie cząstkowe tlenu musi zawierać się w granicach 40–120kPa – najczęściej stosuje się helioksy wymienione w **tab.8**⁴⁵.

Temperatura czynnika oddechowego

Minimalna, dozwolona temperatura wdychanego czynnika oddechowego w zakresie głębokości 0–90mH₂O wynosi 2°C⁴⁶. Utrzymywanie temperatury czynnika oddechowego powyżej podanego minimum gwarantuje, że nurek nie będzie czuł dyskomfortu cieplnego. Komfort cieplny powiązany jest także z rodzajem zastosowanego ogrzewania skafandra, czasem pracy w wodzie, temperaturą wody, rodzajem wykonywanej pracy, wyposażeniem dzwonu itp. Należy przyjąć, że jeśli nie stosuje się systemów ogrzewania czynnika oddechowego, głębokość pracy nurków jest ograniczona temperaturą wody w rejonie nurkowania.

Prowadzenie dekompresji

Dekompresja prowadzona jest tylko przez 16godz w ciągu doby z szybkościami podanymi w **tab.9**. Dzienny program dekompresji podano w **tab.10**. Czas do podjęcia dekompresji dany jest formułą:

$$t = \frac{H - H_p}{1,8} \quad (1)$$

- gdzie: t – czas, który musi upłynąć od ostatniego nurkowania do rozpoczęcia dekompresji [godz],
 H – głębokość ostatniego nurkowania [mH₂O],
 H_p – głębokość plateau saturacji [mH₂O],
 $1,8$ – współczynnik 1,8 pochodzi z **tab.9** i jest szybkością prowadzenia dekompresji w zakresie głębokości 90–61,5mH₂O.

⁴⁵ wartości w przedziałach muszą odpowiadać sobie, dlatego nie należy stosować mieszanin z początku przedziału stężeń dla końca przedziału głębokości – przed zdecydowaniem się na zastosowanie konkretnego składu mieszaniny należy policzyć wartość ciśnienia cząstkowego tlenu uwzględniając głębokość i czas pracy nurka.

⁴⁶ przy sprawnym i wydajnym systemie ogrzewania skafandra nurkowego

Tabela 10

Dzienny program dekompresji

Pora dnia	Czynności
0000–0600	Postój na stacji dekompresyjnej
0600–1400	Dekompresja
1400–1600	Postój na stacji dekompresyjnej
1600–2400	Dekompresja

Dekompresji nie wolno rozpoczynać natychmiast po zakończeniu prac nurkowych, lecz należy odczekać minimum $12godz$ ⁴⁷. Obliczenia obowiązkowego czasu odpoczynku według zależności (1) wykonuje się jedynie wtedy, gdy wymagane jest jak najszybsze podjęcie dekompresji. Jeżeli pośpiech nie jest wymagany, zaleca się odczekać $24godz$ po ostatnim nurkowaniu⁴⁸.

Po przeprowadzeniu dekompresji nurkowie nadal są narażeni na wystąpienie DCS, dlatego kompleks nurkowy⁴⁹ musi być przygotowany do podjęcia leczenia przez następne $24godz$ ⁵⁰. W tym czasie nurkowie muszą przebywać w jego pobliżu⁵¹. Nurkowie nie powinni być przenoszeni drogą powietrzną od momentu zakończenia dekompresji aż do upływu $12godz$ na wysokościach pomiędzy 100 a $600m$ i do upływu $4godz$ na wysokościach do $100m$. Przeniesienie samolotem możliwe jest dopiero po upływie $18godz$ od zakończenia saturacji.

DYSKUSJA

DCS podczas saturacji może być skutkiem przekroczenia dozwolonej głębokości nurkowania powyżej plateau saturacji, za szybkim powrotem do dzwonu po wycieczce⁵², wystąpić podczas standardowej dekompresji itp. Przebieg DCS podczas saturacji⁵³ jest taki sam jak w przypadku nurkowań standardowych. Podstawowym objawem są bóle mięśniowo–stawowe mogące wystąpić w obrębie całego ciała. Najczęściej objawy chorobowe narastają stopniowo i mogą wystąpić, gdy nurek jest nadal pod ciśnieniem. Objawy DCS będące skutkiem np. wyrzucenia nurka⁵⁴ mogą być bardzo ostre i mogą spowodować poważne komplikacje w obrębie układu krążenia, układu oddechowego i systemu nerwowego oraz wpływać na funkcjonowanie ważnych

⁴⁷ w pierwszej kolejności należy obliczyć czas według formuły (1) a następnie, jeżeli jest on krótszy niż $12godz$, to należy odczekać $12godz$, jeżeli jest on dłuższy od $12godz$, to należy odczekać obliczony według (1) czas do podjęcia dekompresji

⁴⁸ Przykładowo, czas jaki powinien upłynąć od ostatniego nurkowania na głębokości $88mH_2O$ z plateau saturacji $85mH_2O$ do chwili, kiedy będzie można rozpocząć dekompresję można obliczyć z zależności (1):

$$\begin{array}{l}
 \text{Dane:} \\
 \hline
 H = 88mH_2O \\
 H_p = 85mH_2O \\
 \hline
 t = ?
 \end{array}
 \quad
 t = \frac{H - H_p}{1,8} = \frac{88 - 85}{1,8} \cong 2,22 \text{ godz} \approx 2 \text{ godz } 14 \text{ min}$$

$$[t] = \frac{mH_2O}{mH_2O \cdot \text{godz}^{-1}} = \text{godz}$$

Ponieważ czas obliczony jest krótszy niż $12godz$ przyjmujemy, że obowiązkowy czas odpoczynku pomiędzy ostatnim nurkowaniem a rozpoczęciem dekompresji powinien być nie krótszy niż $12godz$.

⁴⁹ posaturacyjny lub inny

⁵⁰ $48godz$ jeżeli dekompresja przebiegała z zakłóceniami

⁵¹ maksymalny czas dojazdu $30min$

⁵² z głębokości większej niż głębokość posadowienia dzwonu podczas powrotu do niego

⁵³ pod ciśnieniem

⁵⁴ przekroczenia dozwolonej głębokości wycieczki w górę

dla życia organów. Występowanie jedynie objawów mięśniowo–stawowych nazywane jest *typem I DCS*, natomiast występowanie dodatkowo objawów w obrębie centralnego układu nerwowego oraz narządów wewnętrznych *typem II*⁵⁵.

Typ I DCS może być rezultatem wycieczki⁵⁶ lub wystąpić podczas standardowego postępowania dekompresyjnego. Prawie zawsze objawami są bóle mięśniowo–stawowe najczęściej zaczynającymi się od bólu kolan – nurek skarży się na bóle doprowadzające do usztywnienia nóg uniemożliwiającego chodzenie. Efekty te narastają w czasie kilku godzin. Bardzo ważnym jest, aby nurek umiał odróżnić ból będący skutkiem wyęźżonej pracy⁵⁷ od objawów *DCS*.

Przypadek DCS

Objawy *DCS* występują najczęściej natychmiast po wycieczce lub po czasie nie dłuższym niż 1–3godz. Leczenie jedynie stawowych objawów *DCS*⁵⁸ polega na podnoszeniu ciśnienia skokami o wartość $3mH_2O$ z szybkością $1,5mH_2O \cdot min^{-1}$ aż do wystąpienia odczucia ulgi. Z reguły kompresja o 3–9 mH_2O jest wystarczająca.

Typ II DCS jest prawie zawsze rezultatem wycieczki poza dozwoloną głębokość w górę lub skutkiem wyrzucenia nurka – objawy są prawie zawsze natychmiastowe lub występują do 60min po zakończeniu nurkowania. Często, towarzyszy im uraz ucha środkowego objawiający się nudnościami i wymiotami, zawrotami głowy, utratą równowagi, dzwonieniem w uszach i utratą słuchu. Neurologicznymi objawami chorobowymi są najczęściej: osłabienie, paraliż mięśni, utrata pamięci i zborności. Leczenie ostrych objawów *DCS* polega na podjęciu natychmiastowej kompresji z szybkością $9mH_2O \cdot min^{-1}$ na głębokość, na której ostatnio przebywał nurek, lecz nie mniej niż o 7,5 mH_2O . Jeżeli to nie pomoże, to kompresję prowadzi się do wystąpienia ulgi. Decyzję o zakresie kompresji podejmuje Lekarz Zabezpieczający.

Podczas kompresji na głębokości leczniczej można podawać przez układy awaryjnego oddychania helioks, w którym ciśnienie cząstkowe tlenu zawiera się w przedziale 150–250kPa. Czysty tlen może być stosowany od głębokości 18 mH_2O . Podczas oddychania helioksem leczniczym lub tlenem należy, co każde 20min stosować 5min przerwy na oddychanie atmosferą kompleksu.

Czas pozostawiania na głębokości leczniczej wynosi minimum 12godz w przypadku poważnych objawów *DCS*, a minimum 2godz w przypadku jedynie objawów mięśniowo–stawowych. Następnie należy przeprowadzić normalne postępowanie dekompresyjne.

Przerwanie saturacji

Czasami może wystąpić potrzeba przerwania ekspozycji saturowanej i przeprowadzenia jak najszybszej dekompresji⁵⁹ bądź czas dekompresji może nie mieć pierwszorzędного znaczenia⁶⁰.

⁵⁵dokładniejsze omówienie podziału *DCS* podano wcześniej [2]

⁵⁶np. za szybkim powrotem do dzwonu z głębokości większej niż posadowienie dzwonu nurkowego

⁵⁷np. z zatrzymania krążenia poprzez ucisk skafandra, powstały po pracy na kolanach, po uderzeniu w kolano itp.

⁵⁸mogą wystąpić np. podczas standardowej procedury dekompresyjnej

⁵⁹np. jeżeli podczas nurkowania nurek doznał na tyle rozległego urazu ciała, że potrzebna mu jest jak najszybsza pomoc chirurgiczna i wydaje się, że bez niej nurek może umrzeć; przyczyna może być również losowa, np. zbliżający się huragan i przez to konieczność ucieczki

⁶⁰np. jeżeli przerywamy nurkowanie saturowane z powodu awarii wyciągarek dzwonu bo stwierdziliśmy, że naprawa potrwa na tyle długo, że nie ma sensu przetrzymywanie beczynnych nurków w saturacji, to czas dekompresji nie ma pierwszorzędного znaczenia – w tym przypadku można zastosować standardowy sposób postępowania dekompresyjnego

Tabela 11

Czasy i ciśnienia cząstkowe tlenu w funkcji głębokości dla awaryjnej dekompresji przyspieszonej

Końcowa (minimalna) głębokość dozwolonej wycieczki w stronę niższych głębokości		ciśnienie cząstkowe tlenu	Czas postoju na stacjach dekompresyjnych oddalonych o 1fsw	
[fsw]	[mH ₂ O]		(90–60)mH ₂ O	(60–0)mH ₂ O
		[kPa]	[min]	
0–203	0–62	80	11	18
204–272	63–83	70	11	19
273–300	84–90	60	12	21

W pierwszej kolumnie podano zakresy głębokości dozwolonej wycieczki w stronę głębokości niższych, w drugiej kolumnie podane są ciśnienia cząstkowe tlenu wymagane po osiągnięciu głębokości wycieczki, w kolumnie trzeciej podane są czasy postoju na stacjach dekompresyjnych oddalonych o 1fsw (ok. 0,3mH₂O), przy czym kolumna ta podzielona jest na dwie mniejsze, w których podano czasy zależne od przedziału głębokości, na której aktualnie znajdują się nurkowie.

Pomoc lekarska w warunkach hiperbarycznych może być tylko doraźną. W takim przypadku możliwe jest zastosowanie dekompresji przyspieszonej. Postępowanie takie naraża jednak nurka na duże ryzyko zapadnięcia na DCS oraz tlenową toksyczność płucną, dlatego zastosowanie takiego postępowania wymaga głębokiej analizy wszystkich zagrożeń. Decyzję o podjęciu przyspieszonej dekompresji powinien podjąć Kierownik Nurkowania wspólnie z Lekarzem Zabezpieczającym po zasięgnięciu opinii najbardziej doświadczonych specjalistów i jeśli to tylko możliwe wezwać ich do pomocy.

Dekompresję przyspieszoną zaczyna się od wykonania dozwolonej wycieczki w stronę głębokości niższych niż plateau saturacji. Szybkość obniżania ciśnienia nie powinna być większa niż 0,6mH₂O·min⁻¹. Po osiągnięciu minimalnej dozwolonej głębokości należy podnieść ciśnienie cząstkowe tlenu do wartości podanej w **tab.11**. Następnie kontynuuje się postój na minimalnej głębokości wycieczki do 2godz od jej rozpoczęcia. Czas podnoszenia ciśnienia cząstkowego tlenu uznaje się za czas martwy i nie wlicza się go do czasu postoju na stacji. Po upływie wymaganego czasu można zacząć prowadzić stopniową dekompresję⁶¹ ze stacjami co 1fsw. Ciśnienie cząstkowe tlenu jest przez cały czas utrzymywane na wymaganym poziomie aż do chwili, gdy zawartość tlenu w kompleksie nie przekroczy 30%_v. Od tej chwili zamiast utrzymywać wartość ciśnienia cząstkowego tlenu należy utrzymywać zawartość tlenu na poziomie 30%_v.

Podczas awaryjnej dekompresji przyspieszonej nurkowie powinni być dokładnie obserwowani w celu jak najwcześniejszego wykrycia symptomów tlenowej toksyczności płucnej czy objawów DCS. Pierwszymi niepokojącymi objawami może być piekący ból w piersiach i kaszel.

Po awaryjnej dekompresji przyspieszonej nurkowie powinni przebywać pod opieką lekarza przez najbliższe 24godz. Jeżeli w czasie awaryjnej dekompresji przyspieszonej ustanie niebezpieczeństwo, które skłoniło Kierownika Nurkowania wraz z Lekarzem Zabezpieczającym do podjęcia decyzji o jej zastosowaniu należy powrócić do dekompresji standardowej zmniejszając ciśnienie cząstkowe tlenu do granic wymaganych przy standardowym postępowaniu dekompresyjnym.

⁶¹czas dojścia do stacji wlicza się do czasu postoju na stacji, na którą się zmierza

Ochrona przeciwpożarowa

Jeżeli to tylko możliwe kompleks powinien posiadać instalację przeciwpożarową z możliwością tworzenia mgły lub wstrzykiwania wody pod ciśnieniem poprzez odpowiednio rozmieszczone zraszacze do wnętrza kompleksu. W kompleksie należy zabezpieczyć wodę na wypadek zaistnienia pożaru⁶².

W przypadku zaistnienia pożaru należy niezwłocznie uruchomić system zraszania wodą kompleksu od wewnątrz. Należy natychmiast zabezpieczyć systemy tlenowe i wyłączyć systemy grzewcze, nurkowie powinni natychmiast zacząć oddychać z masek awaryjnego oddychania mieszaniną awaryjną. Głębokość plateau saturacji powinna być dokładnie kontrolowana, gdyż podczas pożaru potrafi ona bardzo szybko wzrosnąć. Jeżeli pożar nie ustanie należy podnieść plateau saturacji⁶³ czystym helem przez co zmniejszy się zawartość tlenu w atmosferze kompleksu i zwiększy szybkość odprowadzania z niego ciepła. Strefa zagrożenia pożarem występuje, gdy stężenie tlenu w nim zawartego wynosi $6\%_{v}O_2$ bądź więcej⁶⁴.

W strefie zagrożenia pożarowego wszystko co nie stanowi wyposażenia pierwszej potrzeby powinno być usunięte z kompleksu a liczba pozostałych rzeczy powinna być minimalizowana. Palne przedmioty⁶⁵ powinny być trzymane w małych metalowych kontenerach, walizkach itp. Na głębokościach pomiędzy $50mH_2O$ a powierzchnią materiały do czytania powinny być limitowane do 1 książki na osobę.

Na głębokościach większych niż $50mH_2O$ zapas ubrań osobistych w kompleksie jest limitowany do 1 zestawu na osobę. Na głębokościach mniejszych wszelkie zapasy ubrań powinny być z kompleksu usunięte. Należy używać jako ubiorów tylko rzeczy niepalnych oraz należy usunąć wszelki osobisty sprzęt elektryczny i elektroniczny.

W kompleksie każdy nurek może przechowywać osobiste przybory toaletowe:

- 1 szczotkę do zębów i 1 tubę pasty do zębów,
- 1 maszynkę do golenia i 1 tubę kremu do golenia⁶⁶,
- 1 kostkę mydła i 1 butelkę⁶⁷ szamponu,

⁶²wodę można przechowywać np. w kanistrach, która powinna być zabezpieczona środkami dezynfekcyjnymi lub dostatecznie często wymieniana aby nie rozwijały się w niej mikroorganizmy

⁶³ciśnienie w kompleksie

⁶⁴zawartości takie występują w początkowym etapie kompresji do plateau oraz w końcowym etapie dekompresji – zakres głębokości, dla których występuje zagrożenie pożarowe podczas nurkowania saturowanego prowadzonego przy wykorzystaniu mieszanin helowo-tlenowych można obliczyć:

Dane:

$$pO_2 \in [0,35 ; 0,40]kPa$$

$$C_{\%}(O_2) = 6\%_{v}$$

H=?

$$C_{\%}(O_2) = \frac{pO_2}{p_c} \cdot 100\% \Rightarrow p_c = \frac{pO_2}{C_{\%}(O_2)} \cdot 100\%$$

$$[p_c] = \frac{kPa}{\%} \% = kPa$$

gdzie: $C_{\%}(O_2)$ – maksymalna zawartość procentowa tlenu w atmosferze niepalnej wynosząca $6\%_{v}$,

pO_2 – ciśnienie cząstkowe tlenu w atmosferze kompleksu [kPa],

p_c – ciśnienie całkowite panujące w kompleksie [kPa].

$$p_c(\max) = \frac{40}{6} 100 \cong 670kPa \quad \propto \quad H(\max) = 57mH_2O$$

$$p_c(\min) = \frac{35}{6} 100 \cong 580kPa \quad \propto \quad H(\min) = 48mH_2O$$

Dla głębokości poniżej $60mH_2O$ atmosfera kompleksu może stanowić zagrożenie pożarowe, a zakresie głębokości $(0-50)mH_2O$ zagrożenie to jest rzeczywiste.

⁶⁵np. książki, czasopisma, ubrania itp.

⁶⁶aerozol wykluczony

- 1 grzebień bądź szczotkę do włosów,
- 1 opakowanie nici dentystycznych,
- materiały piśmiennicze w liczbie do 10 kartek papieru,
- 1 ołówek bądź długopis.

Transfer rzeczy palnych do/z kompleksu powinien być dokumentowany. Na podanie do kompleksu rzeczy potencjalnie palnych może zezwolić jedynie Kierownik Zmiany lub Kierownik Nurkowania.

Na skutek wypadku może dojść do utraty kontroli nad ciśnieniem cząstkowym tlenu, wystąpienia wysokiego poziomu zawartości ditlenku węgla, zanieczyszczenia atmosfery kompleksu nurkowego, gwałtownego spadku ciśnienia, utraty kontroli nad temperaturą w kompleksie nurkowym itp.

Stan atmosfery oddechowej

Jeżeli nastąpi utrata kontroli nad ciśnieniem cząstkowym tlenu nurkowie powinni w pierwszej kolejności natychmiast przejść na oddychanie z układów awaryjnych. Jeżeli poziom ciśnienia cząstkowego tlenu jest stabilny i zawiera się w granicach 25–48kPa, to nurkowie mogą normalnie oddychać z atmosfery kompleksu, lecz muszą być gotowi do natychmiastowego użycia układów awaryjnego oddychania. Jeżeli ciśnienie cząstkowe wzrośnie powyżej 48kPa należy odłączyć system tlenowy. Gdy ciśnienie cząstkowe zacznie przekraczać 50kPa, to należy rozpocząć wentylację kompleksu nurkowego⁶⁸, gdyż ciśnienie to staje się niebezpieczne dla nurków przy przedłużającym się czasie ekspozycji⁶⁹. Wentylację taką należy prowadzić ostrożnie, gdyż przy jej stosowaniu może nastąpić niebezpieczna utrata ciepła.

Dawki toksyczności płucnej tlenu *UPTD*⁷⁰ są równoważne, w przybliżeniu, jednoninutowej ekspozycji przy ciśnieniu cząstkowym tlenu równym 0,1MPa. Do dokładniejszych obliczeń służy **tab.12**, w której podano wartości minutowej dawki w funkcji ciśnienia cząstkowego tlenu⁷¹, lub można posłużyć się zależnością funkcyjną:

Tabela 12

Wartości minutowej dawki tlenowej toksyczności płucnej w funkcji ciśnienia cząstkowego tlenu

Ciśnienie [MPa]	Dawka [UTPD·min ⁻¹]	Ciśnienie [MPa]	Dawka [UTPD·min ⁻¹]
0,5	0,000	1,6	1,92
0,6	0,265	1,7	2,01
0,7	0,490	1,8	2,20
0,8	0,656	1,9	2,34
0,9	0,831	2,0	2,48
1,0	1,00	2,1	2,61
1,1	1,16	2,2	2,74
1,2	1,32	2,3	2,88
1,3	1,47	2,4	3,00
1,4	1,62	2,5	3,14
1,5	1,77		

⁶⁷do poj. 250cm³

⁶⁸np. przy użyciu czystego helu

⁶⁹tlenowa toksyczność płucna

⁷⁰unit of pulmonary toxic dose – UPTD, cumulative pulmonary toxic dose – CPTD, oxygen tolerance unit – OTU

⁷¹na przykład: oddychanie przez 30min pod ciśnieniem 150kPa powoduje wystawienie nurka na 53UPTD

Dozwolone dawki UPTD dla nurków podczas wielodniowej ekspozycji tlenowej

Czasookres ekspozycji	Maksymalna dzienna dozwolona dawka tlenowej toksyczności płucnej	Maksymalna sumaryczna dozwolona dawka tlenowej toksyczności płucnej
[dni]	[UPTD]	[UPTD]
1	850	850
2	700	1400
3	620	1860
4	525	2100
5	460	2300
6	420	2520
7	380	2660
8	350	2800
9	330	2970
10	310	3100
11	300	3300
12÷30	300	jak wynika z sumowania

$$OTU = t \left[\frac{p(O_2) - 0,5}{0,5} \right]^{0,83} \quad (2)$$

gdzie: $p(O_2)$ – ciśnienie cząstkowe tlenu [ata];
 t – czas [min].

Tlen zaczyna być toksyczny dla tkanki płucnej jeżeli jego ciśnienie cząstkowe przekroczy $50kPa$ ⁷² – oznacza to, że czas przebywania w atmosferze, w której ciśnienie cząstkowe przekracza $50kPa$ jest ograniczony ze względu na bezpieczeństwo nurka. Podczas nurkowania należy prowadzić obliczenia poziomu UPTD dla nurków. Jeżeli zaistnieje sytuacja, w której nurek może być narażony na przekroczenie maksymalnej, dozwolonej dawki UPTD nurkowanie należy przerwać i wykonać dekompresję. Jeżeli, podczas nurkowania wystąpi jedynie sporadyczne przekroczenie dobowej maksymalnej dawki UPTD nurkowanie może być kontynuowane, jeżeli nie ma zagrożenia, że zostanie przekroczona sumaryczna⁷³ dawka UPTD. Decyzję w sprawie kontynuowania nurkowania lub podjęcia dekompresji musi podjąć Kierownik Nurkowania po konsultacji z Lekarzem. Dokładniejsze omówienie problemu toksyczności tlenowej zostało opisane wcześniej [2].

Maksymalne, dozwolone dawki UPTD zależą od czasookresu ekspozycji – **tab.13**. Powyższe dotyczy ekspozycji przy stosunkowo niskim ciśnieniu cząstkowym tlenu w stosunkowo długim czasie. Przy wyższych ciśnieniach cząstkowych, ważniejszym zagrożeniem jest toksyczność tlenu na ośrodkowy układ nerwowy.

W przypadku utraty kontroli nad zawartością/ciśnieniem cząstkowym ditlenku węgla, należy próbować go usunąć⁷⁴. Oddychanie z układów awaryjnego oddychania oraz

⁷²po przekroczeniu tego ciśnienia zaczyna działać tzw. "zegar tlenowy"

⁷³kumulacyjna

⁷⁴np. poprzez uruchomienie układów regeneracji wewnętrznej, wymianę filtrów ditlenku węgla, rozłożenie mat pochłaniających itp.

użycie pochłaniaczy indywidualnych⁷⁵ stosuje się, gdy ekspozycja nurków może stać się niebezpieczna. Ekspozycja nurków na ditlenek węgla nie może przekroczyć wartości ciśnienia cząstkowego CO_2 powyżej $1,5kPa$ a jej czas w pobliżu tego ciśnienia cząstkowego nie powinien przekroczyć $4godz$. Zwiększenie się zawartości ditlenku węgla w kompleksie jest, z reguły, spowodowane wyczerpaniem się złoża sorbentu CO_2 w układach regeneracji zewnętrznej. Po wymianie wkładów najczęściej sytuacja ulega unormowaniu. Podczas wymiany filtrów powinien być uruchamiany drugi zestaw regeneracji zewnętrznej⁷⁶. Podczas usuwania ditlenku węgla z kompleksu należy utrzymywać wilgotność na poziomie minimum $60\%_R$ oraz temperaturę w granicach komfortu cieplnego odczuwanego przez nurków.

Zanieczyszczenie atmosfery kompleksu nurkowego często jest odczuwane przez nurków jako nienormalny zapach, drażnienie oczu lub płuc, kaszel, ból głowy itp. Jeżeli objawy wymagają użycia układów awaryjnego oddychania należy niezwłocznie ich użyć. W tym czasie należy rozstrzygnąć jaki rodzaj zanieczyszczenia wywołuje sytuację problemową. Jeżeli nie można nad nią zapanować i usunąć zanieczyszczenie z atmosfery kompleksu nurkowego, to nurkowie powinni być przeniesieni⁷⁷ do komory ewakuacyjnej celem transferu do innego kompleksu nurkowego lub odizolowani hermetycznie w części kompleksu nurkowego gdzie nie nastąpiło skażenie a następnie powinni rozpocząć dekompresję. Jeżeli wykryte zanieczyszczenie nie doprowadziło jeszcze do poważnych objawów, to należy zanalizować sytuację w kompleksie pod względem toksykologicznym i jeżeli to konieczne zmniejszyć ciśnienie całkowite do takiego poziomu, aby nie były przekroczone limity skażenia⁷⁸. W **tab.14** podano dopuszczalne stężenia równoważne substancji szkodliwych przy ekspozycjach $1godz$, $24godz$ i $90dni$ [1]. Jeżeli akcja usuwania zanieczyszczenia została przeprowadzona na tyle sprawnie, że nie istnieje zagrożenie przekroczenia 90 -dniowego limitu zawartości równoważnej zanieczyszczenia⁷⁹ podczas dalszego nurkowania, a źródło zanieczyszczeń zostało wykryte i usunięte, to po konsultacji z Lekarzem Zabezpieczającym Kierownik Nurkowania może podjąć decyzję o kontynuacji prac nurkowych⁸⁰. Po zapanowaniu nad składem atmosfery kompleksu nurkowego należy wymienić wszystkie złoża w układach regeneracji i jeśli to konieczne w pochłaniaczach osobistych. Wyposażenie wewnętrzne i kompleks musi być wymyty i jeśli to konieczne zdezynfekowany.

Utrata kontroli temperatury

Wahania temperatury w helowej atmosferze hiperbarycznej są bardzo intensywnie odczuwane przez nurków. Wahania temperatury w zakresie $2^{\circ}C$ mogą być odczuwane przez nurków jako stres termiczny. Gdy temperatura w kompleksie zacznie spadać, to należy zastosować pasywne⁸¹ i aktywne⁸² sposoby ochrony cieplnej nurków aby nie dopuścić do wychłodzenia. Jednak taka ochrona w długim okresie czasu jest

⁷⁵zastosowanie masek indywidualnych o konstrukcji, dla której wydech kierowany jest na pochłaniacz stanowi efektywny sposób oczyszczenia atmosfery habitatu

⁷⁶nie zaleca się uruchamiania w tym czasie wewnętrznych układów regeneracji – jeżeli jednak musiały być one użyte, to należy później ich wypełnienia bezwzględnie wymienić niezależnie od przepracowanego przez nie czasu

⁷⁷w warunkach hiperbarycznych

⁷⁸na czas oczyszczania atmosfery kompleksu nurkowie mogą przebywać w komorze ewakuacyjnej

⁷⁹pojęcie wartości równoważnej zostało opisane wcześniej [1]

⁸⁰o powtórnej kompresji nurków do głębokości plateau jeżeli zastosowano dekompresję w celu obniżenia ciśnienia cząstkowego/zawartości równoważnej zanieczyszczenia

⁸¹do pasywnych środków ochrony cieplnej należą np. ubrania i śpiwory ze specjalnej tkaniny, np. Polar+

⁸²do aktywnych środków ochrony cieplnej nurka należą np. chemiczne ogrzewacze wykorzystujące ciepło krystalizacji np. tiosiarczanu sodowego

Tabela 14

Maksymalne dopuszczalne stężenia substancji toksycznych w obiektach hiperbarycznych

Związek chemiczny	Źródło zanieczyszczenia	Maksymalne dopuszczalne stężenie dla czasu ekspozycji		
		1godz	24godz	90dni
acetylen C ₂ H ₂	dania smażone	6000 ppm	6000 ppm	6000 ppm
akroleina CH ₂ CHCHO	dania smażone	—	0,1 ppm	—
arsenowodór AsH ₃	gazowanie baterii	—	0,1 ppm	0,1 ppm
amoniak NH ₃	przemiany metaboliczne	400 ppm	50 ppm	25 ppm
benzen C ₆ H ₆	rozpuszczalnik	-	100 ppm	1,0 ppm
ditlenek węgla CO ₂	przemiany metaboliczne	2,5 kPa	1,0 kPa	0,5 kPa
tlenek węgla CO	palenie papierosów	200 ppm	200 ppm	0,1 ppm
chlor Cl ₂	polietylen	—	1,0 ppm	0,1 ppm
etylen C ₂ H ₂	dania gotowane	—	—	—
formaldehyd HCOH	dania gotowane	5 ppm	5 ppm	5 ppm
węglowodory aromatyczne oprócz benzenu	rozpuszczalniki farb	—	—	10 mg m ⁻³
węglowodory alifatyczne oprócz metanu	rozpuszczalniki farb	—	—	10 mg m ⁻³
wodór H ₂	gazowanie baterii	1000 ppm	1000 ppm	1000 ppm
fluorowodór HF	rozkład freonu	8 ppm	1,0 ppm	0,1 ppm
chlorowodór HCl	rozkład freonu	10 ppm	4,0 ppm	1,0 ppm
alkohol metylowy H ₃ OH	palenie papierosów	—	200 ppm	10 ppm
metan CH ₄	sanitariaty	1,3 %	1,3 %	1,3 %
ditlenek azotu NO ₂	sprężarki	10 ppm	1,0 ppm	0,5 ppm
tlenek azotu NO	sprężarki	10 ppm	1,0 ppm	0,5 ppm
ozon O ₃	silniki komutatorowe	1,0 ppm	0,1 ppm	0,02 ppm
fosgen COCl ₂	rozkład freonu	1,0 ppm	0,1 ppm	0,05 ppm
antymonowodór SbH ₃	gazowanie baterii	—	0,05 ppm	0,01 ppm
ditlenek siarki SO ₂	sanitariaty	10 ppm	5,0 ppm	1,0 ppm

niewystarczająca – należy dążyć do jak najszybszego naprawienia usterek układu grzewczego⁸³.

Utrata kontroli ciśnienia

Utrata kontroli nad ciśnieniem w kompleksie może być spowodowane awarią urządzeń pomiarowych bądź rozszczelnieniem się kompleksu⁸⁴. W pierwszym przypadku należy przejść na awaryjny pomiar ciśnienia/głębokości a następnie wymienić uszkodzony przyrząd pomiarowy. W drugim przypadku należy stwierdzić czy niekontrolowany spadek/wzrost ciśnienia mieści się w zakresie dozwolonych wycieczek z głębokości plateau saturacji. Jeżeli spadek/wzrost ciśnienia nie spowodował urazu ciśnieniowego to powrót na głębokość plateau odbywa się na zasadach opisanych w procedurze wykonywania nurkowań z plateau saturacji. Jeżeli tak nie jest, to należy niezwłocznie podjąć leczenie nurków. Niezależnie od tego jaki jest powód wystąpienia utraty kontroli nad ciśnieniem w kompleksie nurkowym i jakie są sposoby opanowania sytuacji⁸⁵ to pierwszą czynnością jest rozpoczęcie przez nurków oddychania z układów awaryjnego oddychania. Należy jednak uwzględnić tutaj ewentualną hipoksycyzość awaryjnego czynnika oddechowego przy spadku ciśnienia oraz toksyczność tlenu w awaryjnym czynniku oddechowym przy nagłym wzroście ciśnienia.

⁸³ z reguły kompleks posiada awaryjne układy grzania/chłodzenia

⁸⁴ rzadziej niekontrolowanym sprężeniem do głębokości większej od głębokości plateau

⁸⁵ np. uzupełnianie atmosfery kompleksu, upuszczanie atmosfery kompleksu itp.

Zabezpieczenie medyczne

Zabezpieczenie medyczne nurków saturowanych ma na celu ochronę zdrowia nurków przed działaniem czynników, które mogą wywoływać objawy zagrożenia bezpośredniego, opóźnionego czy kumulacyjnego. Zasady zabezpieczenia medycznego obejmują wytyczne i zalecenia dotyczące: obsady medycznej, badań nurków, przygotowania kompleksu i sprzętu nurkowego, oraz przebiegu nurkowania. Nietypowe zagrożenia o mniejszym znaczeniu powinny być rozwiązane zgodnie z zasadami ujętymi w ogólnych przepisach nurkowych i stosowanymi w dobrej praktyce nurków.

Obsada lekarska.

Zabezpieczenie medyczne nurków saturowanych sprawuje przynajmniej jeden Lekarz stale przebywający w obrębie kompleksu nurkowego oraz konsultant, pełniący dyżur pod telefonem na czas saturacji. Lekarz Zabezpieczający bezpośrednio nurkowania saturowane powinien posiadać specjalizację oraz staż w tym zakresie, odpowiedni stan zdrowia oraz dobrą tolerancję obciążeń dekompresyjnych i wysokich ciśnień cząstkowych tlenu.

Lekarz Konsultant powinien posiadać specjalizację i odpowiednio duże doświadczenie, dobrą znajomość zagadnień dotyczących problematyki nurków saturowanych oraz zaplecze mogące służyć jako pomoc dla Lekarza Zabezpieczającego⁸⁶.

Kwalifikacja medyczna nurków

Kwalifikowanie medyczne nurków posiadających wymagane do nurkowania saturowanych przeszkolenie przeprowadza wstępnie Lekarz odpowiedzialny za zabezpieczenie medyczne nurków saturowanych. Kwalifikowanie wstępne przeprowadza się na podstawie wywiadu. Zakwalifikowanych nurków kieruje się na badania specjalistyczne do odpowiedniej komisji lekarskiej⁸⁷ – **tab.15**.

Przygotowanie kondycyjno–adaptacyjne

Przygotowanie kondycyjno–adaptacyjne opiera się na treningu ogólno–rozwojowym, specjalistycznym oraz komorowym prowadzonym na trzy tygodnie przed planowaną saturacją. W okresie tym nurkowie powinni prowadzić ustabilizowany i higieniczny tryb życia. Podczas treningów nurkowie nie powinni uprawiać urazowych dyscyplin sportu prowadzących do mikrourazów stawów, więzadeł, mięśni, skóry itp.

Zasady higieny

Przygotowanie kompleksu nurkowego do saturacji powinno być przeprowadzone w sposób staranny gdyż podczas ekspozycji nurków stosunkowo wysoka temperatura i wilgotność stwarzają korzystne warunki do rozwoju flory bakteryjnej i grzybiczej.

Przed wejściem nurków kompleks powinien zostać dokładnie odkurzony. Powierzchnie wewnętrzne, urządzenia sanitarne powinny być zdezynfekowane odkażalnikiem⁸⁸. Do odkażania powierzchni wewnętrznych kompleksu należy stosować odkażalnik z niewielkim dodatkiem detergentu⁸⁹. Maski układów oddechowych należy zdezynfekować 70% roztworem wodnym alkoholu etylowego.

⁸⁶posiadać bazę medyczną, hiperbaryczną i intelektualną służącą do wypracowania decyzji i ewentualnego przyjęcia poszkodowanych nurków na leczenie

⁸⁷np. Wojskowej Komisji Morsko–Lekarskiej 7 Szpitala Marynarki Wojennej w Gdańsku Oliwie

⁸⁸nietoksycznym, chemicznie obojętnym, niealergizującym, nietłym, niepalnym, nie powodującym korozji i uszkodzeń materiałów oraz bezwonny

⁸⁹detergent nie może reagować z odkażalnikiem

Cechy dyskwalifikujące kandydatów na nurków saturowanych

Lp.	Cechy dyskwalifikujące kandydatów	Uwagi
1	Niedostateczna sprawność fizyczna	Maksymalne zużycie tlenu $<45\text{cm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
2	Niedostateczna tolerancja stroju na podwyższone ciśnienie	Negatywny wynik próby komorowej
3	Nadwrażliwość na tlen w hiperbarii	Negatywny wynik testu tolerancji tlenowej
4	Obniżona sprawność w zakresie funkcji poznawczych i psychomotorycznych	Podatność na narkozę azotową
5	Zaburzenia emocjonalne	Negatywny wynik próby komorowej
6	Martwica aseptyczna kości	Zmiany w kościach długich potwierdzone radiologicznie lub scyntygraficznie
7	Choroby skóry	Potwierdzone przez specjalistę dermatologa
8	Zmiany chorobowe zatok bocznych nosa	Potwierdzone przez specjalistę laryngologa
9	Braki w uzębieniu obejmujące zęby od 1 do 3 obustronnie	Potwierdzone przez specjalistę stomatologa
	Wiek powyżej 35 roku życia	Dotyczy tylko kandydatów
10	Wiek poniżej 21 roku życia	
11	Dodatni wynik badania surowicy krwi w kierunku przeciwciał anti-HIV	Kontrola coroczna
12	Nosicielstwo drobnoustrojów chorobotwórczych i obecność pasożytów przewodu pokarmowego	Kontrola coroczna

Na 24godz przed rozpoczęciem saturacji, lekarz odpowiedzialny za jej przebieg przeprowadza badania – do nurkowania mogą być dopuszczeni tylko zdrowi nurkowie⁹⁰. Bezpośrednio przed wejściem do kompleksu nurkowie powinni być poddani powtórnie rutynowym badaniom lekarskim połączonym z krótkim wywiadem. Podczas nurkowania saturowanego prowadzony jest nadzór medyczny zmierzający do wykrycia dolegliwości i zdarzeń⁹¹, które mogłyby mieć niekorzystny wpływ na samopoczucie, stan zdrowia i bezpieczeństwo nurków.

Żywnienie nurków opiera się na ogólnych zasadach żywienia osób ciężko pracujących. Posiłki powinni otrzymywać regularnie i ze względu na szybką utratę ciepła w środowisku helowym, posiłki podawane przez służbę powinny mieć odpowiednio wysoką temperaturę. Kaloryczność dobowej racji nie może być niższa niż 3800kcal. W skład posiłku nie powinny wchodzić produkty ciężko strawne oraz wzdymające. W okresie bezpośrednio poprzedzającym dekompresję posiłki powinny być lekkostrawne⁹². Do komory nie mogą być podawane substancje stwarzające zagrożenie pożarowe⁹³ a resztki posiłków powinny być natychmiast usuwane.

Podczas saturacji obowiązuje przestrzeganie ogólnie przyjętych zasad higieny osobistej. Ponadto po każdym nurkowaniu i zdjęciu skafandra nurek powinien opłukać ciało pod strumieniem ciepłej wody. Namydlenie ciała może mieć miejsce nie częściej niż raz dziennie. Po każdym opłukaniu ciała lub kąpieli należy jak najstaranniej osuszyć zewnętrzny kanał słuchowy oraz miejsca bezpośredniego stykania się dwóch

⁹⁰ niedopuszczalne są nawet niewielkie dolegliwości, np. zmęczenie, pobudzenie, podwyższona ciepłota ciała, skaleczenia, infekcje itp.

⁹¹ w tym psychologicznych

⁹² np. nie zawierać znacznych ilości tłuszczu

⁹³ np. tłuszcze luzem czy sproszkowane substancje organiczne – cukier puder, kawa, kakao itp.

powierzchni ciała⁹⁴. Uszy należy zakropić wskazanym do stosowania przez lekarza zabezpieczającym preparatem odkażającym zewnętrzne przewody słuchowe po każdej kąpieli, nie rzadziej jednak niż dwa razy dziennie⁹⁵.

Mokre ręczniki powinny być wymieniane na suche zaraz po kąpieli. Bieliznę osobistą powinno się wymieniać przynajmniej raz na dobę a pościel co trzy dni. Wnętrze kompleksu powinno być utrzymywane przez nurków w porządku i czystości. Codziennie należy myć toalety, umywalki, brodzik prysznic, stoły, siedziska krzeseł a do sanitariatów należy wlewać ok. $0.5dm^3$ soku cytrynowego lub pomarańczowego itd. Co trzy dni powinno być przemywane całe wnętrze kompleksu. Bezpośrednio po nurkowaniu wszystkie możliwe do śluzowania części ubiorów nurkowych⁹⁶ powinny być prane i suszone bezpośrednio po użyciu.

Lekarz zabezpieczający nurkowania obowiązany jest do codziennego przeprowadzania wywiadu o stanie zdrowia nurków. W wywiadzie powinien uzyskać informacje dotyczące samopoczucia, apetytu, snu, oceny mikroklimatu, jak również wysłuchać ewentualnych skarg. Szczególną uwagę powinien zwrócić na schorzenia najczęściej występujące u nurków saturowanych, np.: choroby wewnętrzne, schorzenia grzybicze skóry, zewnętrzne schorzenia uszu, infekcje górnych dróg oddechowych itp.

Prowadzenie dokumentacji

Podczas każdego nurkowania saturowanego należy prowadzić odpowiednią dokumentację. Dodatkowo należy dokładnie opisywać przypadki wystąpienia wypadków nurkowych, jakie miały miejsce podczas saturacji oraz wnioski płynące z ich analizy. Materiały te powinny służyć i być wykorzystywane w celu zapobiegania podobnym wypadkom w przyszłości.

Dziennik Zdarzeń jest oficjalnym i podstawowym dokumentem z nurkowania saturowanego. Prowadzi się w nim chronologiczne zapisy wszystkich ważniejszych zdarzeń, które zaszły podczas przygotowań, trwania i podczas obowiązkowego dyżuru po zakończeniu dekompresji ze szczególnym uwzględnieniem stosowanych procedur nurkowych. Rozpoczęcie i zakończenie wachty powinno być potwierdzone własnoręcznym podpisem Kierowników Zmian zdającej i obejmującej. Przejrzenie zapisów z każdej wachty powinien potwierdzać Kierownik Nurkowania specjalnym wpisem wraz z komentarzami. Do ważniejszych zapisów, które należy prowadzić w Dzienniku Zdarzeń należą czasy pracy systemów zachowania życia oraz czasy wymiany wkładów zarówno w zewnętrznych jak i wewnętrznych układach regeneracji. Wszelkie działania serwisowe powinny znaleźć swoje odzwierciedlenie stosownymi zapisami⁹⁷. Również Lekarz Zabezpieczający powinien umieszczać swoje uwagi i zalecenia w Dzienniku Zdarzeń przynajmniej raz na dobę. Część istotnych wpisów powinna być dokonywana⁹⁸ na podstawie zapisów w Brudnopisie, Dzienniku Laboratoryjnym i Maszynowym.

Zeszyt poleceń jest dokumentem, w którym powinny być zapisywane plany nurkowań i prac wykonywanych w czasie późniejszym⁹⁹.

⁹⁴ np. fałdy poślądkowe, pachwiny, pachy, przestrzenie między palcami stóp, małżowiny uszne itp.

⁹⁵ nurkowie biorący w danym dniu udział w pracach podwodnych powinni niezależnie od powyższego na 5min przed i po nurkowaniu zakropić uszy preparatem

⁹⁶ wewnętrzne skafandry, wewnętrzne wykładziny hełmów nurkowych itp.

⁹⁷ np. naprawy, śluzowania, ilości dodanego tlenu, zmiany podłączeń zbiorników z czynnikiem oddechowym, czas pracy sprzężarek itp.

⁹⁸ dublowana

⁹⁹ zapisy te powinny, między innymi, zawierać opisy planowanych prac, detaliczny plan rozchodu gazów oddechowych, postępowanie podczas zaistnienia sytuacji awaryjnej podczas prac, dozwolone zakresy głębokości pracy i dystanse, na które może nurek odchodzić od dzwonu, planowany czas wykonywania operacji, procedury przygotowawcze, zalecenia po nurkowaniu itp.

Dziennik Laboratoryjny jest dokumentem, w którym należy umieszczać zapisy pomiarów ciśnienia komorowego, temperatury, wilgotności, zawartości/ciśnienia cząstkowego tlenu i ditlenku węgla itp. Pomiaru powinny być opatrzone datą, godziną i czasem operacyjnym¹⁰⁰ ich wykonania. Każdy pomiar powinien być podany z niepewnością jego wyznaczenia. Jeżeli dokładność ta musi być policzona to stosowne obliczenia powinny znaleźć się w Dzienniku Laboratoryjnym. Dodatkowo, powinien zawierać analizy zawartości zanieczyszczeń atmosfery kompleksu nurkowego, wyniki wykonanych pomiarów ciśnień, zawartości tlenu, wyniki testu toksykologicznego itp., dla zgromadzonych mieszanin oddechowych w zbiornikach magazynowych i aparatach nurkowych. Do Dziennika Laboratoryjnego należy wklejać atesty mieszanin gazowych, gazów czystych, wypełnień i innych materiałów eksploatacyjnych używanych podczas nurkowania saturowanego. Należy również wykonywać zapisy i analizę pracy układów regeneracji, terminy ich wymian oraz dokonywać wpisów komentarzy do wykonywanych pomiarów. Każdy pomiar powinien być sygnowany podpisem osoby, która go wykonała oraz podpisem Kierownika Zmiany przy zdaniu wachty¹⁰¹.

Dziennik Maszynowy powinien zawierać dwa typy informacji. Pierwszą, stanowią zapisy dotyczące czasu pracy urządzeń takich jak urządzenia podnośne, sprężarki, podgrzewacze wody, agregaty awaryjne, układy regeneracji itp. Zapisy te stanowią podstawę do obliczania ich rezerw międzyremontowych. Drugą grupę zapisów stanowią rozliczenia zapasów gazów zawierające: ich ciśnienia, rodzaj mieszaniny, nr atestu¹⁰², aktualne podłączenia itp. Zapisy dotyczące drugiej grupy powinny być robione co godzinę i powinny być sygnowane podpisem osoby, która je wykonała oraz Kierownika Zmiany. Zapisy pierwszej grupy powinny być dokonywane na bieżąco a podpisywane przez Kierownika Zmiany i sporządzającego je przy rozliczeniu wachty.

Osobiste karty pracy nurka są raportami z prowadzonych nurkowań. Stanowią one dokumentację prowadzonych przez nurka prac oraz stosowanych przez niego procedur nurkowych.

Szczelność kompleksu nurkowego

Szczelność komory hiperbarycznej, wraz z zamontowanymi na niej układami, sprawdza się zazwyczaj poprzez 24godz próby ciśnieniowe. Proces ten polega na podniesieniu ciśnienia helem w kompleksie wraz z systemami a następnie na zmierzeniu ciśnienia po tym okresie czasu. Próbom tym towarzyszą nieuniknione zmiany temperatury. Oznaczając zmierzone ciśnienie p_1 i temperaturę T_1 jako parametry po napełnieniu komory oraz p_2 i T_2 : jako parametry stanu, po 24godz, można na podstawie równania stanu gazu doskonałego zapisać wzór na wartość ciśnienia końcowego:

$$p_2^* = \frac{T_2}{T_1} p_1 \quad (3)$$

gdzie: p_2^* – ciśnienie końcowe jakie panowałoby w obiekcie hiperbarycznym, gdyby był on całkowicie szczelny¹⁰³ [Pa].

¹⁰⁰ czasem liczonym od rozpoczęcia saturacji

¹⁰¹ potwierdzającym zapoznanie się z treścią dokonanych zapisów

¹⁰² odnośnik do Dziennika Laboratoryjnego

¹⁰³ gdyby straty ciśnienia spowodowane byłyby jedynie na skutek zmian temperatury

Procentową nieszczelność komory hiperbarycznej wraz z układami, można zapisać jako¹⁰⁴:

$$N = \frac{P_2^* - P_2}{P_1} 100\% \rightarrow N = 100\% \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4)$$

gdzie: N – procentowa nieszczelność systemu hiperbarycznego [%].

Test toksykologiczny

Zabezpieczenie atmosfery kompleksu nurkowego przed zanieczyszczeniem gazami i parami toksycznymi jest bardzo ważne dla zdrowia nurków. Zanieczyszczenia te mogą pochodzić: z gazów stosowanych do sporządzania czynnika oddechowego, ze środków technicznych stykających się z czynnikiem oddechowym¹⁰⁵ czy źródłem ich może być sam organizm ludzki. Z większością zanieczyszczeń wchodzących w skład ostatniej grupy zanieczyszczeń muszą sobie poradzić układy regeneracji. Natomiast emisja zanieczyszczeń wchodzących w skład grupy pierwszej i drugiej musi być minimalizowana. Wszelkie materiały używane do napraw oraz gazowe komponenty czynnika oddechowego powinny posiadać atesty. Przed ich zastosowaniem należy dokładnie sprawdzić czy odpowiadają one normom toksykologicznym.

W celu sprawdzenia poziomu skażenia kompleksu nurkowego oraz zgromadzonego w zbiornikach czynnika oddechowego wykonuje się test toksykologiczny¹⁰⁶. Test należy rozpocząć od sprawdzenia czy wszystkie elementy, w które normalnie jest wyposażony kompleks znajdują się wewnątrz. Jeżeli kompleks składa się z kilku komór to wszelkie przejścia pomiędzy nimi powinny być otwarte¹⁰⁷ oraz należy podłączyć wszystkie układy regeneracji¹⁰⁸. Następnie należy wykonać kompresję przy użyciu czystego helu do ciśnienia absolutnego $0,4\text{MPa}$. Po kompresji kompleks pozostawiany jest pod ciśnieniem przez okres $24\text{--}72\text{godz}$ ¹⁰⁹. W tym czasie nie należy uzupełniać ewentualnych ubytków atmosfery. Jeżeli ciśnienie w kompleksie spadnie więcej niż o 10% ciśnienia początkowego, to test należy powtórzyć. Na dwie godziny przed pobraniem próbek należy włączyć zewnętrzne układy regeneracji bez sorbentów celem dokładnego wymieszania atmosfery kompleksu. Po upływie $24\text{--}72\text{godz}$ należy pobrać próbki atmosfery kompleksu do butli ciśnieniowych o pojemność przynajmniej 500cm^3 . Butle te powinny być specjalnie przygotowane jak na warunki tlenowe¹¹⁰. Dodatkowo ich wnętrze powinno być wyczyszczone, wygrzane oraz po zmontowaniu powinny być one wyewakuowane do ciśnienia 50mtor lub niższego. Pobrana do butli próbka powinna być zanalizowana w przeciągu czasu nie dłuższego niż 1mies . Pobór próbki musi być dokonany jak najkrótszą drogą z kompleksu i powinien być tak usytuowany, aby nie zassawał atmosfery z ewentualnych tzw. „martwych przestrzeni”. Czas pobierania próbki nie powinien być za krótki. Najlepiej pobierać ją wolno przez ok.

¹⁰⁴ podczas 24godz prób szczelności komór hiperbarycznych, do jej szybkiej oceny przyjmuje się przybliżoną zasadę mówiącą o tym, że w przedziale ciśnień $2\text{--}3\text{MPa}$ i dla temperatur w zakresie $20\text{--}30^\circ\text{C}$, spadek temperatury o 3°C w przybliżeniu powoduje spadek ciśnienia o 1%

¹⁰⁵ np. lotne składniki farb używanych do malowania habitatów, lotne składniki środków do konserwacji, smarów, klei itp.

¹⁰⁶ jest on wykonywany zawsze wtedy, gdy takie skażenie nie może być wykluczone, np. po wykonaniu remontu; badania te należy łączyć z próbami szczelności oszczędzając potrzebny do tego hel

¹⁰⁷ przejście do dzwonu nurkowego powinno także zostać otwarte

¹⁰⁸ nie należy napełniać układów regeneracji sorbentami

¹⁰⁹ preferowany jest czas dłuższy

¹¹⁰ powinny one posiadać zawór bezsmarowy

5min¹¹¹. Należy pobrać dwie próbki atmosfery kompleksu. W ten sam sposób należy pobrać próbki ze zbiorników gazu poprzez reduktor z metalową membraną, napełniając butle do ciśnienia 0,4MPa.

Próbkę należy opisać podając: datę, czas i miejsce przeprowadzenia testu, ciśnienie panujące w kompleksie, datę i czas pobrania próbki oraz miejsce, z którego nastąpił pobór próbki. Należy także pokrótce scharakteryzować kompleks¹¹². Próbki należy przesłać do laboratorium i zanalizować je przy użyciu chromatografu gazowego wyposażonego w detektory FID¹¹³ i katarometryczny lub przy zastosowaniu innych metod i procedur pomiarowych pod warunkiem, że zapewniają tę samą lub lepszą czułość i precyzję pomiaru¹¹⁴ [1]. Dobór parametrów pracy chromatografu¹¹⁵ powinny zapewniać wymaganą dokładność. W pobranej próbce należy oznaczyć następujące grupy zanieczyszczeń organicznych: wysoko lotne¹¹⁶, cięższe¹¹⁷, wysokopolarne¹¹⁸. Wymienione zanieczyszczenia są tylko reprezentantami grup związków, które mogą być obecne w kompleksie nurkowym.

Chromatograf gazowy¹¹⁹ musi być w stanie oznaczyć 0,5ppm Freonu113 w pobranej próbce. Dokładność oznaczenia musi być lepsza niż 5%¹²⁰ przy wzorcowaniu chromatografu na gaz wzorcowy. Jako wzorca można użyć mieszanin o zawartości 5–10ppm Freonu113 lub toluenu¹²¹. Dla tego przypadku zawartości zanieczyszczeń będą odnoszone do zastosowanego wzorca. Wszystkie piki, dla których zawartość czynnika zanieczyszczającego przekracza 1ppm¹²² powinny być identyfikowalne podczas procesu pomiarowego. W celu osiągnięcia większej koncentracji czynnika zanieczyszczającego dopuszcza się stosowanie koncentratorów¹²³. Gaz ze zbiorników powinien być analizowany na zawartość wyżej wymienionych grup zanieczyszczeń oraz gazów trwałych¹²⁴. Ze względu na trudności w oznaczaniu tlenku węgla można jego koncentrację określić wspólnie z ditlenkiem węgla po metanizacji próbki. System pomiarowy musi być w stanie oznaczyć 5ppm tlenku węgla. Do oznaczania reszty gazów trwałych może być wykorzystany chromatograf z detektorem katarometrycznym¹²⁵ – dokładność metody powinna być lepsza od 1%. Stosowana przy oznaczaniu zawartości gazów trwałych mieszanina wzorcowa powinna być otrzymana z dokładnością nie gorszą niż 1%¹²⁶.

¹¹¹ostatnia minuta przeznaczona jest na wyrównanie mikro różnic ciśnienia – nie słycać przepływu gazu

¹¹²typ, rodzaj wyposażenia itp.

¹¹³detektor płomieniowo–jonizacyjny

¹¹⁴jeśli to możliwe, to analiz należy dokonać stosując jako detektor spektrometr masowy

¹¹⁵tj. typ kolumny chromatograficznej, temperaturę dozownika, kolumny i detektora, dobór gazu nośnego i jego przepływu itp.

¹¹⁶np. Freony: 11, 12, 114, 113

¹¹⁷średnio lotne, np.: benzen, toluen, ksylen itp.

¹¹⁸np. alkohole

¹¹⁹lub inna alternatywna metoda pomiarowa

¹²⁰tzn. dla powtórnego nastrzyku odchylenie standardowe musi być mniejsze niż 5% wartości średniej

¹²¹gazy wzorcowe muszą posiadać certyfikat stwierdzający, że względny błąd ich wykonania jest nie większy niż 2%

¹²²np. względem Freonu113

¹²³substancje chemiczne mogące adsorbować zanieczyszczenia; po zaadsorbowaniu zanieczyszczenia można go desorbować termicznie

¹²⁴tłenu, azotu, helu, ditlenku węgla, tlenku węgla itp.

¹²⁵przewodności cieplnej

¹²⁶błąd względny

Wyniki pomiarów chromatograficznych powinny być zapisane w formie: identyfikacja pików, wielkość pików w stosunku do pików Freonu 113¹²⁷. Dla gazów butlowych należy dodatkowo oznaczyć gazy trwałe:

- tlen, azot, hel z błędem względnym nie większym niż 0,1%,
- dinitlenek węgla z błędem bezwzględnym nie większym niż 1ppm,
- jeżeli zawartość tlenku węgla przekracza 5ppm należy go oznaczyć z błędem bezwzględnym nie większym niż 1ppm.

Wyniki pomiarów powinny być skorygowane w stosunku do ciśnienia panującego w kompleksie w chwili pobierania próbki i nie powinny przekraczać normy ekspozycji 90dniowej na zanieczyszczenia wybranymi toksycznymi substancjami organicznymi – **tab.16**. Zawartości substancji zanieczyszczających w gazie pochodzącym ze zbiorników służą do określenia maksymalnej głębokości, jaką można osiągnąć przy jego wykorzystaniu. Podczas nurkowania należy dokładnie kontrolować wszystkie przedmioty, jakie są słuzowane do kompleksu oraz, jeśli to możliwe, okresowo pobierać próbki do analizy laboratoryjnej na zawartość zanieczyszczeń. Idealnym rozwiązaniem byłoby ciągle monitorowanie zawartości zanieczyszczeń.

Metody otrzymywania helioksu

Bezpieczeństwo nurków w warunkach hiperbarycznych zależy bezpośrednio od jakości wykorzystywanego czynnika oddechowego. Wieloskładnikowe mieszaniny gazowe, służące jako czynnik oddechowy, można otrzymać metodami grawimetrycznymi, objętościowymi, dynamicznymi, ciśnieniowymi itp. Powyższa problematyka została szeroko opisana dalej w niniejszym numerze PHR w: R. Kłós, A. Olejnik „Metodyka sporządzania mieszanin oddechowych w nurkowaniach saturowanych” na str. 43.

OŚWIADCZENIA

Praca finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczo-rozwojowy nr R00–O0014/3 pt.: „Metodyka nurkowań saturowanych”.

PIŚMIENNICTWO

1. Kłós R.: Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego: COOPgraf Poznań 2000
2. Kłós R.: Niektóre problemy związane z wyborem sposobu dekompresji: Polish Hyperbaric Research **18**(2007)33
3. Praca zbiorowa: US Navy diving manual: Best Publishing Co. Carson California 1980

Recenzent: *prof. dr hab. med. Kazimierz Dęga* – Wojskowy Instytut Medyczny, Warszawa

Autor:

kmdr dr hab. inż. Ryszard Kłós

*Akademia Marynarki Wojennej
Zakład Technologii Nurkowań i Prac
Podwodnych*

*81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
tel.: +58 626 27 46
fax.: +58 625 38 82
e-mail: skrzyn@wp.pl*

¹²⁷oznaczeniu podlegają jedynie piki o wartości powyżej 0,1ppm; dla innych metod w przyjętej ogólnej lub normatywnie formie

