

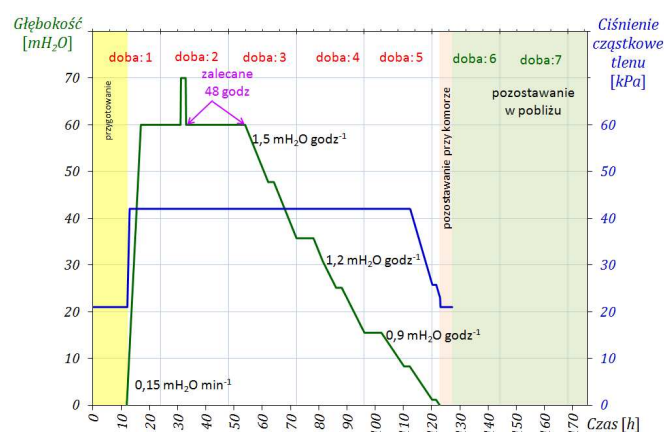
Ryszard Kłos<sup>1</sup>

## Zapotrzebowanie na czynnik oddechowy do realizacji nurkowań saturowanych

### Wstęp

Opisana tutaj sytuacja problemowa powstała po zleceniu przeprowadzenia szkolenia dla nurków Marynarki Wojennej RP przy wykorzystaniu mieszanin helowo-tlenowych nazywanych heliosami  $Hx$  i technologii stosowanej aktualnie przez **US Navy**. Procedura ta nie zawiera jednak problematyki logistycznego zabezpieczenia takiej operacji w materiały eksploatacyjne<sup>2</sup> gdyż logistyczne zabezpieczenie nurkowania saturowanego musi ono być rozwiązywane zależnie od miejsca i czasu realizacji zadania. Akademia Marynarki Wojennej posiada w tym zakresie długoletnie doświadczenie prowadząc, między innymi, część takiego zabezpieczenia podczas ponad 20 letniej współpracy z LOTOS SA<sup>3</sup>.

Artykuł zawiera wybrane aspekty planowania logistycznego zabezpieczenia w niektóre mieszaniny gazowe potrzebne do zrealizowania przykładowego nurkowania saturowanego.



**Rys.1. Propozycja planu pojedynczego szkolenego nurkowania saturowanego na głębokości plateau  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$  z wycieczką na głębokość  $h = 70 \text{ mH}_2\text{O}$  trwającego wraz z procesem dekompresji ok.  $t = 5 \text{ dni}$**   
Źródło: własne

Na potrzeby prowadzonej tutaj analizy zabezpieczenia logistycznego w czynniki oddechowe przyjęty program nurkowania przedstawiono schematycznie na rysunku (Rys. 1).

W obliczeniach korzystano z równania stanu gazu doskonałego stosując następujące oznaczenia:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie gazu,  $n$  – liczba moli gazu,  $V$  – objętość gazu,  $R$  – uniwersalna stała gazowa,  $T$  – temperatura

Jako jednostki stężenia użyto ułamka molowego  $x$ , który dla gazu doskonałego jest równy co do wartości ułamkowi objętościowemu  $x_v$ , lecz w ogólności jest różny od wartości ułamka masowego  $x_m$ :

$$x_i \equiv \frac{n_i}{n} \equiv \frac{V_i}{V} \equiv \frac{p_i}{p} \neq \frac{m_i}{m} \quad (2)$$

gdzie:  $x_i$  – ułamek molowy  $i$ -tego składnika,  $n_i$  – liczba moli  $i$ -tego składnika,  $n$  – całkowita liczba moli,  $V_i$  – objętość cząstkowa  $i$ -tego składnika,  $V$  – całkowita objętość,  $p_i$  – ciśnienie cząstkowe  $i$ -tego składnika,  $p$  – ciśnienie całkowite,  $m_i$  – masa  $i$ -tego składnika,  $m$  – masa całkowita

### Kompresja

Przy planowaniu prac nurkowych należy dobrać najdogodniejszą głębokość plateau saturacji. Analizy takiej dokonuje się w oparciu o przewidywane zakresy głębokości, na których będą wykonywane prace nurkowe i dystanse, na które nurkowie będą odchodzili od dzwonu nurkowego.

<sup>1</sup> Dr hab. inż., Ryszard Kłos, prof. nadzw. AMW, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni.

<sup>2</sup>US Navy diving manual. 2008.

<sup>3</sup>dawniej PETROBALTIC SA

Zadaniem kompresji jest bezpieczne osiągnięcie głębokości plateau oraz stabilizacja parametrów atmosfery oddechowej tak, aby była ona bezpieczna dla nurków. Podstawowe zagrożenia podczas procesu kompresji to indukowanie się bólów w tkance łącznej oraz **HPNS**<sup>4</sup> objawiający się porażeniem centralnego układu nerwowego **CNS**<sup>5</sup>. Oba efekty powstają wskutek oddziaływania wysokiego ciśnienia przy szybkim sprężaniu. Dlatego szybkość dochodzenia do plateau saturacji jest ograniczona (Tab. 1). Powolna kompresja ma dodatkowo tę zaletę, że jeżeli po jej zakończeniu nurkowie czują się dobrze, to mogą przystąpić natychmiast do pracy. Jednak zalecana jest ich **12-24 godz** aklimatyzacja na głębokości plateau saturacji. Decyzję o szybszym przystąpieniu do pracy może podjąć Lekarz Zabezpieczający na wniosek Kierownika Nurkowania.

Tabela 1. Maksymalne dozwolone szybkości sprężania do głębokości plateau w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Zakres dozwolonych szybkości sprężania	
[mH <sub>2</sub> O]	[fsw]	[mH <sub>2</sub> O · min <sup>-1</sup> ]	[fsw · min <sup>-1</sup> ]
0-18,2	0-60	0,15-9,0	0,5-30
18,2-75,8	60-250	0,15-3,0	0,5-10
75,8-227,3	250-750	0,15-0,9	0,5-3
227,3-303,0	750-1000	0,15-0,6	0,5-2

Źródło: US Navy diving manual. 2008

Podczas kompresji należy dążyć także do precyzyjnego otrzymania i utrzymania parametrów plateau saturacji<sup>6</sup> (Tab. 2). Z tego względu może być ona prowadzona dwufazowo przy pomocy powietrza i helu, przy pomocy **Hx** i czystego helu, bądź przy pomocy specjalnie dobranego **Hx**<sup>7</sup>.

Po zamknięciu włazów i podniesieniu ciśnienia przy pomocy powietrza lub **Hx** do uzyskania szczelności<sup>8</sup> należy sprawdzić szczelność i działanie wszystkich systemów wchodzących

w skład kompleksu nurkowego. Następnie można przystąpić do fazy sprężania wstępnego celem otrzymania wymaganego ciśnienia cząstkowego tlenu. Po ustaleniu ciśnienia cząstkowego tlenu na wymaganym poziomie należy sprawdzić powtórnie systemy i można kontynuować sprężanie przy wykorzystaniu czystego helu do wybranej głębokości plateau saturacji.

Tabela 2. Dozwolone wartości podstawowych wielkości mierzonych podczas saturacji w kompleksie hiperbarycznym i dzwoni nurkowym

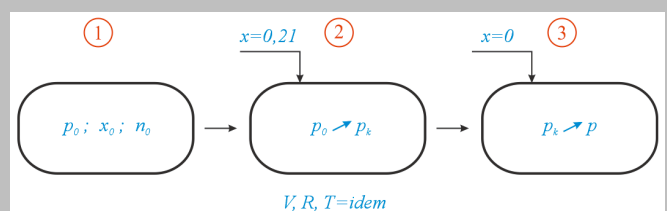
Wielkość mierzona	Zakres dozwolonych wartości wielkości mierzonych
Ciśnienie cząstkowe <b>O<sub>2</sub></b>	w granicach <b>(44- 48)kPa</b>
Ciśnienie cząstkowe <b>CO<sub>2</sub></b>	poniżej <b>0,5 kPa ± 0,5%<sub>szw</sub> ± ± 3,8 mm.Hg</b>
Zawartość <b>N<sub>2</sub></b> i <b>He</b>	pozostałość
Temperatura	ok. <b>(27 - 28)°C</b> zależnie od odczuć własnych nurków
Zawartość wilgoci	wilgotność względna w zakresie <b>(50 - 80)%<sub>R</sub></b> zależnie od odczuć nurków

Zamiast pomiarów ciśnienia cząstkowego można wykonywać pomiary zawartości pod warunkiem, że przeliczenie zawartości na ciśnienie cząstkowe będzie możliwe do wykonania z wymaganą dokładnością

Źródło: US Navy diving manual. 2008

W trakcie jednego nurkowania saturowanego można zmieniać, w zależności od potrzeb, głębokość plateau saturacji. Należy jednak pamiętać, że zwiększania głębokości plateau saturacji można dokonać zawsze, lecz przy zachowaniu dozwolonej szybkości kompresji (Tab. 2). Natomiast zmniejszenie głębokości plateau saturacji można wykonać jedynie stosując standardową procedurę dekompresyjną. W sytuacjach awaryjnych możliwa jest również dekompresja przyspieszona.

Przykład 1. Do jakiego ciśnienia **p<sub>k</sub>** należy napełnić kompleks nurkowy powietrzem tak, aby podnosząc je dalej do wartości plateau saturacji przy wykorzystaniu helu, ciśnienie cząstkowe tlenu **p<sub>O<sub>2</sub></sub>** na plateau saturacji wynosiło **p<sub>O<sub>2</sub></sub>** = 46 kPa.



Korzystając z równana (2), można zapisać:

<sup>4</sup>HPNS – High-Pressure Nervous Syndrome

<sup>5</sup>CNS – Central Nervous System

<sup>6</sup>należy uważać aby nie powstała atmosfera hipoksyczna **p<sub>O<sub>2</sub></sub>** < 21 kPa podczas całego procesu kompresji

<sup>7</sup>ta metoda nie jest zalecana przy nurkowaniach według system **US Navy**, lecz zgodnie z zaleceniami IMCA nie powinno się używać do prac na kompleksie gazów czystych, gdyż może to prowadzić do szybszych zaburzeń w składowaniu atmosfery oddechowej

<sup>8</sup>np. **(1 - 2)mH<sub>2</sub>O**

$x = \frac{n_0}{n} \cdot x_0$ , gdzie:  $n$  – całkowita liczba moli gazu w kompleksie na plateau saturacji ③,  $x$  – ułamek molowy zawartości tlenu na plateau saturacji ③,  $n_0$  – liczba moli powietrza zawarta w kompleksie po wstępnym etapie sprężania ②,  $x_0$  – zawartość tlenu w powietrzu.

Z równania (1) liczba moli  $n$  gazu na plateau saturacji ③ wyniesie:  $n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$ , gdzie:  $V$  – objętość komory. Liczba moli powietrza  $n_0$  dostarczonego do kompleksu na koniec fazy wstępnego sprężania ②, wyniesie:  $n_0 = \frac{p_k \cdot V}{R \cdot T}$ , gdzie:  $p_k$  – ciśnienie końcowe w kompleksie ③. Wstawiając obliczone wartości  $n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$  i  $n_0 = \frac{p_k \cdot V}{R \cdot T}$  do  $x = \frac{n_0}{n} \cdot x_0$  i przekształcając, można zapisać:  $p_k = \frac{p \cdot x}{x_0} = \frac{p \cdot 0,21}{0,21}$ . Wstawiając dane, można obliczyć:  $p \cong 219 \text{ kPa} \cong 11,9 \text{ mH}_2\text{O}$ .

Wykorzystując do sprężania jedynie specjalnie skomponowanego  $\text{Hx}$  należy określić jego skład i zapotrzebowanie. Jednak w rozpatrywanej sytuacji problemowej zdecydowano się na wykorzystanie jedynie technologii sprężania czystym helem, dlatego nie zostaną tutaj przedstawione stosowne obliczenia szacunkowe.

Przykład 2. Ustalić przewidywane zapotrzebowanie na hel potrzebny do otrzymania i utrzymania w ciągu 1 tyg plateau saturacji  $p = 700 \text{ kPa}$  w całym kompleksie nurkowym o pojemności  $V = 43 \text{ m}^3$ . Gazy będą magazynowane w zbiornikach stałych lub w wiązkach butlowych, które mogą być zbudowane z butli o pojemności geometrycznej  $V_z = 40 \text{ dm}^3$  i ciśnieniu roboczym  $p_z = 15 \text{ MPa}$  lub o pojemności geometrycznej  $V_z = 50 \text{ dm}^3$  i ciśnieniu roboczym  $p_z = 20 \text{ MPa}$ .

Przyjmując, że podczas wszelkich operacji z gazami przy otrzymywaniu plateau saturacji na poziomie  $p = 700 \text{ kPa}$  temperatura będzie taka sama  $T = \text{tdem}$ , to równanie (1) można uprościć do postaci:  $p \cdot V = \text{tdem}$ . Stąd zapotrzebowanie odniesione do warunków normalnych  $p_0 \cdot V_0(\text{Hx})$  na  $\text{He}$  w przybliżeniu wyniesie:  $p_0 \cdot V_0(\text{He}) \cong (p - p_1) \cdot V$ , gdzie:  $p$  – ciśnienie plateau saturacji. Wiadomo, że stosując  $\text{He}$  należy podnieść wstępnie ciśnienie w kompleksie nurkowym do ciśnienia  $p_1 \cong 219 \text{ kPa}$ . Stąd zapotrzebowanie  $V_0$  odniesione do warunków normalnych  $p_0, T_0$

na  $\text{He}$  w przybliżeniu wyniesie:  $p_0 \cdot V_0(\text{He}) \cong 215 \text{ Nm}^3$ . Dobrą praktyką jest posiadanie przynajmniej dwukrotnego napełnienia kompleksu nurkowego. Jeśli zapas ten w trakcie cyklu nurkowań nie ulegnie uszczupleniu, jest wtedy liczony tylko raz na cykl nurkowań saturowanych.

Zmagazynowane zapasy do rozpoczęcia nurkowania mogą być w wiązkach butlowych o pojemności  $V_z = 40 \text{ dm}^3$  i ciśnieniu roboczym  $p_z = 15 \text{ MPa}$ . Stąd potrzebna liczba butli  $k_{\text{He}}$  dla  $\text{He}$  w zbiornikach  $V_z = 0,04 \text{ dm}^3; p_z = 15 \text{ MPa}$  wyniesie:  $k_{\text{He}} = \text{tnt} \left[ \frac{p_z \cdot V_0(\text{Hx})}{p_z \cdot V_z} \right] = \text{tnt} \left[ \frac{43}{0,04} \right] \cong 72$ .

Zmagazynowane zapasy do rozpoczęcia nurkowania mogą być w wiązkach butlowych o pojemności  $V_z = 50 \text{ dm}^3$  i ciśnieniu roboczym  $p_z = 20 \text{ MPa}$ . Stąd potrzebna liczba butli policzona jak poprzednio  $k_{\text{He}}$  dla  $\text{He}$  wyniesie:  $k_{\text{He}} \cong 43$ . Zmagazynowane zapasy do rozpoczęcia nurkowania mogą być w zbiornikach o pojemności  $V_z = 1,0 \text{ m}^3$  i ciśnieniu roboczym  $p_z = 15 \text{ MPa}$ . Stąd potrzebna liczba butli  $k_{\text{He}}$  dla  $\text{He}$  wyniesie:  $k_{\text{He}} \cong 3$ .

Należy rozstrzygnąć czy operacja podnoszenia ciśnienia jest możliwa do przeprowadzenia jedynie przy wykorzystaniu butli transportowych czy wymagane jest połączenie ich w wiązki. Stosując proste obliczenia można dojść do wniosku, że przy powolnym sprężaniu obsługa jest w stanie nadażyć wymieniać butle transportowe na rampie, lecz przy średnim i szybkim sprężaniu proces taki jest niemożliwy i należy wykorzystywać większe zbiorniki lub wiązki butlowe.

Tabela 3. Dozwolone zakresy ciśnień cząstkowych tlenu podczas różnych faz nurkowania saturowanego

Faza nurkowania	Dozwolone ekspozycje	
	Ciśnienie cząstkowe	Czas ekspozycji
pobyt na plateau saturacji	w granicach (44–48)kPa	4 tyg
wycieczka z plateau saturacji	w granicach (40–60)kPa	4 godz
procedury awaryjne	60 kPa†	24 godz

†jeśli ciśnienie cząstkowe tlenu przekroczy wartość > 60 kPa należy przełączyć się na mieszaninę awaryjną podawaną z układów BIBS; ciśnienie cząstkowe tlenu o wartości 60 kPa jest wykorzystywane podczas jednego ze sposobów zainicjowania dekompresji

Źródło: US Navy diving manual. 2008

## Skład atmosfery oddechowej

Podczas nurkowania saturowanego należy w sposób ciągły kontrolować: ciśnienie całkowite<sup>9</sup>, ciśnienie cząstkowe tlenu<sup>10</sup>, temperaturę oraz wilgotność, ciśnienie cząstkowe ditlenku węgla. (Tab. 2 i 3). Można kontrolować także zawartość helu oraz azotu co **12 godz** przez pierwsze **5 dni**, następnie pomiary te można wykonywać co **24 godz**.

## Modyfikacja składu atmosfery

Podczas otrzymywania i utrzymywania składu atmosfery na plateau saturacji może zaistnieć konieczność jej modyfikacji. Najczęściej potrzebna jest korekcja ciśnienia cząstkowego tlenu, gdy nie udało się otrzymać żądanej wartości podczas procesu sprężania. Często też modyfikowana jest zawartość tlenu przed procesem dekompresji<sup>11</sup>. System hiperbaryczny reaguje z kilkuminutowym opóźnieniem na wykonywane korekty większe niż związane z uzupełnianiem metabolizowanego tlenu<sup>12</sup>.

Podniesienie ciśnienia cząstkowego tlenu dogodnie jest wykonywać metodą ciśnieniową. Polega ona na chwilowym, szybkim opuszczeniu o niewielką głębokość plateau saturacji i szybkie wyrównanie tej różnicy tlenem. Jeśli korekta jest znaczna należy proces ten podzielić na części. Sposób prowadzenia obliczeń takiej korekty nie będzie tutaj przedstawiony.

## Zapotrzebowanie na tlen

Podczas pobytu na plateau saturacji atmosfera podlega regeneracji polegającej na usuwaniu

<sup>9</sup>głębokość nurkowania

<sup>10</sup>bądź zamiast pomiarów ciśnienia cząstkowego można wykonywać pomiary zawartości pod warunkiem, że przeliczenie zawartości na ciśnienie cząstkowe będzie możliwe do wykonania z wymaganą dokładnością

<sup>11</sup>w opisywanym systemie nurkowań helioksowych można podnieść ciśnienie cząstkowe tlenu przed dekompresją z wykonaniem wycieczki poniżej plateau saturacji

<sup>12</sup>ubytki tlenu związane z jego konsumpcją przez nurków realizowane mogą być na kompleksie **DGKN-120** przez systemy utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu, lub przez stałą drobną korekcję składu atmosfery

powstającego **CO<sub>2</sub>** pary wodnej i innych zanieczyszczeń, podgrzewaniu lub schładzaniu i uzupełnianiu tlenu.

Przykład 3. Jakie jest zapotrzebowanie na tlen do uzupełniania składu atmosfery kompleksu nurkowego na jednego nurka podczas pobytu na plateau saturacji trwającego  $\tau = 4 \text{ dni}$ .

Praktycznie pytanie dotyczy objętości tlenu  $V_{O_2}^0 \equiv V_{O_2}$  odniesionej do warunków normalnych. Zakładając, że konsumpcja tlenu  $\dot{v}_0$  nie zależy od głębokości można zapisać, że zapotrzebowanie na tlen  $V_{O_2}$  odniesione do warunków normalnych wyniesie:  $V_{O_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau$ , gdzie:  $\dot{v}_0$  – założona konsumpcja tlenu,  $\tau$  – czas nurkowania,  $V_{O_2}$  – zapotrzebowanie na czynnik oddechowy odniesione do warunków normalnych. Przyjmując, że przy pobycie na plateau saturacji nurek będzie wykonywał wysiłek lekki można przyjąć, że maksymalna konsumpcja tlenu  $\dot{v}_0$  kształtowała się na poziomie<sup>13</sup>  $\dot{v}_0^{\text{max}} \equiv \dot{v}_0 = 0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Stąd zapotrzebowanie na tlen wyniesie:  $V_{O_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau = 4032 \text{ dm}^3 \cong 4 \text{ Nm}^3$ .

Dobłą praktyką je to, że podczas planowania takiego jak tutaj nurkowania zabezpiecza się 100% nadmiaru tlenu. Stąd należy zabezpieczyć  $V_0 = 8 \text{ Nm}^3$  tlenu na jednego nurka.

## Planowanie wycieczek z plateau

W czasie nurkowania saturowanego nurek może zmieniać głębokość zarówno w dół jak i w górę, przy czym jednak należy unikać prac na głębokościach mniejszych niż plateau saturacji. Tabele wykorzystywane do planowania wycieczek z plateau saturacji przy pracach podwodnych limitują zasięg i głębokość.

Procedury nurkowań z plateau saturacji są bezpieczne, jeżeli używa się do oddychania **Hx** o takiej zawartości tlenu, aby ciśnienie cząstkowe tlenu podczas procesu nurkowania zawierało się w przedziale  $p_{O_2} \in [44; 125] \text{ kPa}$ .

<sup>13</sup>Przylipek M., Torbus J. 1981

Przykład 4. Jakie  $Hx$ <sup>14</sup> mogą być wykorzystane do nurkowań z głębokości plateau saturacji  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$  na maksymalną głębokość  $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ .

Korzystając z zależności (2) można zapisać:  $x_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p}$ , gdzie:  $p_{O_2}$  – ciśnienie cząstkowe tlenu,  $p$  – ciśnienie całkowite,  $x_{O_2}$  – ułamek molowy tlenu w mieszaninie.  $Hx$  użyty do oddychania podczas wycieczki z plateau saturacji powinien zawierać taką ilość tlenu, aby ciśnienie cząstkowe podczas procesu nurkowania na głębokości  $h \in [60; 70] \text{ mH}_2\text{O} \triangleq [700; 800] \text{ kPa}$  zawierało się w przedziale  $p_{O_2} \in [44; 125] \text{ kPa}$ . Minimalną wartość ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2}^{\text{min}}$  otrzyma się dla minimalnej zawartości tlenu  $x_{O_2}^{\text{min}}$  i minimalnego ciśnienia na głębokości nurkowania  $p^{\text{min}}$ . Podobnie maksymalną wartość ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2}^{\text{max}}$  otrzyma się dla maksymalnej zawartości tlenu  $x_{O_2}^{\text{max}}$  i maksymalnego ciśnienia na głębokości nurkowania  $p^{\text{max}}$ :

$$x_{O_2}^{\text{min}} = \frac{p_{O_2}^{\text{min}}}{p^{\text{min}}} = 0,063 \frac{\text{m}^{\text{bar}}}{\text{m}^{\text{bar}}} \quad \wedge \quad x_{O_2}^{\text{max}} = \frac{p_{O_2}^{\text{max}}}{p^{\text{max}}} = 0,157 \frac{\text{m}^{\text{bar}}}{\text{m}^{\text{bar}}}$$

. Zatem zakres dozwolonych stężeń tlenu wynosi  $x_{O_2} \in (6,3; 15,6)\%$ .

Przykład 5. Jakie jest zapotrzebowanie  $Hx$  na 2 trwające  $\tau = 30 \text{ min}$  nurkowania z plateau saturacji  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$  na maksymalną głębokość  $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ .

Podobnie jak poprzednio (Przykł. 2) równanie (1) można uprościć do postaci:  $p \cdot V = \text{idem}$ . Stąd dla oczekiwanej wentylacji płuc  $\dot{V}_0$  oraz przy założeniu, że nie ulega ona zmianie podczas zmiany głębokości  $\dot{V}_0 \cong f(H) \rightarrow \dot{V}_0 \equiv \dot{V}$  można zapisać:  $V_0 = \frac{p_H^{\text{max}}}{p_0} \cdot \dot{V} \cdot \tau$ , gdzie:  $p_H^{\text{max}}$  – ciśnienie na maksymalnej głębokości nurkowania,  $\dot{V}$  – założona wentylacja płuc,  $\tau$  – czas nurkowania,  $p_0$  – ciśnienie normalne  $V_0$  – zapotrzebowanie na czynnik oddechowy odniesione do warunków normalnych.

Przyjmując, że przy nurkowaniach z plateau saturacji nurek będzie wykonywał wysiłek umiarkowany można przyjąć, że maksymalna wentylacja płuc będzie kształtowała się na poziomie<sup>15</sup>  $\dot{V}_0^{\text{max}} \equiv \dot{V} = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Stąd zapotrzebowanie na helioks wyniesie:  $V_0 = 14,4 \text{ Nm}^3$ .

Dobrą praktyką podczas planowania jest zabezpieczenie 100% nadmiar czynnika oddechowego. Stąd należy zabezpieczyć  $V_0 = 28 \text{ Nm}^3 Hx$ .

## Dekompresja

Dekompresję można rozpocząć, jako dozwoloną wycieczkę na głębokość mniejszą od plateau saturacji jednak ten przypadek nie będzie tutaj dyskutowany. Można też rozpocząć proces powrotu do normobarii, jako regularną procedurę dekompresyjną bez zastosowania wstępnego przejścia nurków na głębokość dozwolonej wycieczki.

Dekompresja może być realizowana w sposób ciągły lub skokowo, co  $1 \text{ fsw} \triangleq 0,3 \text{ mH}_2\text{O}$  z nieprzekraczalną szybkością zmiany głębokości  $\dot{v} \leq 1 \text{ fsw} \cdot \text{min}^{-1} \triangleq 0,3 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ , np. jeśli dekompresja przebiegać ma z szybkością  $\dot{v} = 5 \text{ fsw} \cdot \text{godz}^{-1} \triangleq 1,5 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ , to można zmieniać głębokość o  $1 \text{ fsw} \triangleq 0,3 \text{ mH}_2\text{O}$  co każde  $12 \text{ min}$  (Tab. 4).

Tabela 4. Szybkość prowadzenia dekompresji w funkcji głębokości

Zakres głębokości		Szybkość prowadzenia dekompresji		Czas przejścia głębokości jednostkowej	
$\text{mH}_2\text{O}$	$\text{fsw}$	$\text{H}_2\text{O} \cdot \text{godz}$	$\text{min} \cdot \text{mH}_2\text{O}$	$\text{in} \cdot \text{fsw}$	
485–61,5	1600–200	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

Źródło: US Navy diving manual. 2008

<sup>14</sup>o jakim zakresie zawartości tlenu  $x_{O_2}$

<sup>15</sup>Przylipek M., Torbus J. 1981

Gdy blisko powierzchni trudno utrzymać prawidłowy przepływ pobieranego czynnika gazowego przez analizatory, to można zastosować ostatni przystanek dekompresyjny przed osiągnięciem powierzchni na głębokości  $4 f_{sw} \triangleq \triangleq 1,2 mH_2O$ . Przystanek ten powinien trwać  $\tau = 80 min$  i następnie z szybkością  $\dot{v} = 1 f_{sw} \cdot min^{-1} \triangleq 0,3 mH_2O \cdot min^{-1}$  można wynurzyć się do powierzchni. Podczas dekompresji należy utrzymywać cały czas ciśnienie parcjalne tlenu na poziomie  $p_{O_2} \in [44; 48] kPa$  aż do chwili gdy zawartość tlenu w kompleksie osiągnie  $x_{O_2} = 19\%_v$ . Od tego momentu należy zacząć utrzymywać wartość stężenia w zakresie  $x_{O_2} \in [19; 23]\%_v$ . Jest to bezpieczne z punktu widzenia dekompresji a zmniejsza wydatnie zagrożenie pożarowe.

### Przerwy w dekompresji

Podczas doby należy zastosować dwa przystanki dekompresyjne stanowiące sumarycznie **8 godz** postoju na dowolnie wybranej głębokości. Minimalny czas jednego postoju powinien wynosić **2 godz**. Dobrze jest zaplanować rozkład doby dekompresji tak, aby nie była ona prowadzona podczas snu nurków<sup>16</sup>, nie jest to jednak regułą (Tab. 5).

Tabela 5. Dzienny program dekompresji

Pora dnia	Czynności
0000–0600	Postój na stacji dekompresyjnej
0600–1400	Dekompresja
1400–1600	Postój na stacji dekompresyjnej
1600–2400	Dekompresja
Pora dnia	Czynności
2300–0500	Dekompresja
0500–0700	Postój na stacji dekompresyjnej
0700–0900	Dekompresja
0900–1500	Postój na stacji dekompresyjnej
1500–2300	Dekompresja

Źródło: US Navy diving manual. 2008

<sup>16</sup>nurkowie powinni być świadomi prowadzonej dekompresji, gdyż zdarzyć się może, że brak wyrównywania ciśnienia w uchu środkowym podczas prowadzenia dekompresji podczas snu może po przebudzeniu skutkować objawami bólowymi

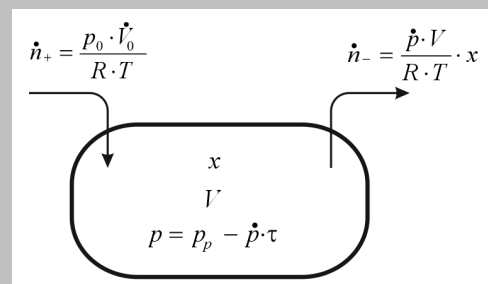
### Zakończenie dekompresji

Po dekompresji nurkowie są nadal narażeni na chorobę dekompresyjną. Stąd powinni oni pozostać w bezpośrednim sąsiedztwie komory przez min. **2 godz** od osiągnięcia powierzchni. Przez dalsze **48 godz** powinni przebywać w miejscu odległym, z którego możliwy jest zawsze transport do komory w ciągu max. **30 min**. Nurkowie nie mogą podróżować drogą lotniczą do **72 godz** od chwili zakończenia dekompresji po saturacji.

### Uzupełnianie tlenu podczas dekompresji

Podczas prowadzenia dekompresji należy utrzymywać cały czas ciśnienie parcjalne tlenu na poziomie  $p_{O_2} \in [44; 48] kPa$  powoduje to konieczność zwiększania zawartości tlenu poprzez jego dodawanie do kompleksu.

Przykład 6. Jakie jest szacunkowe zapotrzebowanie na tlen  $\dot{V}_O$  dla kompleksu nurkowego o pojemności  $V = 43 m^3$  podczas dekompresji z głębokości plateau saturacji  $H = 60 mH_2O$  w celu utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2} = 46 kPa$  na stałym poziomie aż do głębokości  $h = 10 mH_2O$ , gdy jego stężenie osiągnie  $x_{O_2} = 0,23 mol \cdot mol^{-1}$ .



Zakładając, że szybkość zmiany ciśnienia  $\dot{p}$  i strumień dodawanego tlenu  $\dot{V}_O$  są wartościami stałymi  $\dot{p} \neq f(\tau) \rightarrow \dot{p} = idem \wedge \dot{V}_O \neq f(\tau) \rightarrow \dot{V}_O = idem$

można określić zmianę liczby moli tlenu w kompleksie, jako:  $\frac{p - p_p \cdot \tau}{R \cdot T} \cdot V \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau}$ , gdzie: wyrażenie  $p - p_p \cdot \tau$  określa liniową zmianę ciśnienia. Bilans molowy tlenu można zapisać, jako:

$\frac{p-p_0}{R \cdot T} \cdot V \cdot \frac{dx}{d\tau} = \frac{p_0 \dot{V}_0}{R \cdot T} - \frac{p \cdot \dot{V}}{R \cdot T} \cdot x$ , gdzie:  $V$  – objętość kompleksu,  $p$  – ciśnienie,  $\dot{p}$  – szybkość zmiany ciśnienia,  $R$  – uniwersalna stała gazowa,  $T$  – temperatura,  $x$  – ułamek molowy tlenu w atmosferze habitatu,  $\tau$  – czas. Przekształcając i porządkując można zapisać całkowity bilans masy tlenu, jako:  $\int \frac{dx}{p \cdot x - \frac{V_0}{V} \cdot p_0} = \int \frac{d\tau}{p \cdot \tau - p}$ , dla którego rozwiązanie ogólne wynosi:

$\frac{1}{p} \cdot \ln \left| \dot{p} \cdot x - \frac{V_0}{V} \cdot p_0 \right| - \frac{1}{p} \cdot \ln \left| \dot{p} \cdot \tau - p \right| = C'$ . Mnożąc stronami przez szybkość zmiany ciśnienia  $\dot{p}$  i porządkując, można zapisać wyrażenie na wartość stałej całkowania:  $C = \ln \frac{p \cdot x - \frac{V_0}{V} \cdot p_0}{p \cdot \tau - p}$ . Wiedząc, że dla warunków początkowych  $x(\tau = 0) = x_0 \wedge \dot{V}_0(\tau = 0) = 0$  można obliczyć wartość stałej całkowania:  $C = \ln - \frac{p \cdot x_0}{p}$ . Następnie wstawiając ją do rozwiązania ogólnego całki można po opuszczeniu logarytmów zapisać, że:  $x(\tau) = \left(1 - \frac{p}{p_0}\right) \cdot \tau \cdot x_0 + \frac{V_0}{V} \cdot \frac{p_0}{p}$ . Ciśnienie

cząstkowe tlenu  $p_{O_2}$  będzie iloczynem ciśnienia całkowitego  $p(\tau)$  i zawartości tlenu  $x(\tau)$  w funkcji czasu  $\tau$ . Przekształcając poprzez przenoszenie pomiędzy stronami równania i zastępując  $p(\tau) \equiv p - \dot{p} \cdot \tau$ , można otrzymać zapotrzebowanie na tlen wyrażony jego stałym strumieniem  $\dot{V}_0$ :  $\dot{V}_0 = \frac{p}{p_0} \cdot V \cdot \left[ \frac{p_{O_2}}{p(\tau)} - \frac{p(\tau)}{p} \cdot x_0 \right]$ . Dla stanu końcowego iloczyn liniowej szybkości opuszczania ciśnienia i czasu trwania procesu dekompresji jest równy wartości zmiany ciśnienia  $\Delta p \equiv \dot{p} \cdot \tau$ . Ciśnienie całkowite dla chwili zakończenia dekompresji jest wartością końcową dla procesu opuszczania ciśnienia  $p(\tau) \equiv p_k$ , stąd ostatecznie można zapisać:  $V_0 = \dot{V}_0 \cdot \tau = \frac{\Delta p}{p_0} \cdot V \cdot \left( \frac{p_{O_2}}{p_k} - \frac{p_k}{p_0} \cdot x_0 \right)$ , gdzie:  $p_{O_2}$  – ciśnienie cząstkowe tlenu,  $p_0$  – ciśnienie normalne,  $\dot{V}_0$  – dozowanie tlenu,  $\tau$  – czas dekompresji,  $V$  – objętość kompleksu,  $\Delta p$  – różnica ciśnień dekompresji,  $x_0$  – zawartość tlenu,  $p_k$  – ciśnienie końcowe,  $p_0$  – ciśnienie początkowe. Wyznaczając zawartość początkową tlenu  $x_0$  z wartości początkowego ciśnienia cząstkowego  $x_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p_0}$ , zapotrzebowanie na tlen  $V_0$  wyniesie  $V_0 \cong 45,4 \text{ Nm}^3$ .

## Procedury lecznicze podczas saturacji

Najczęściej choroba dekompresyjna **DCS** może wystąpić podczas saturacji po wykonaniu wycieczki i pracy na głębokości mniejszej niż plateau saturacji lub w czasie dekompresji po zakończeniu saturacji. Występują różne typy **DCS** (Tab. 6).

**Typ I** i **typ II** powodowane są powstawaniem wolnej fazy gazowej we krwi i innych tkankach. **Typ III** może powodować wolna faza gazowa, kontrdyfuzja gazu inertnego, oraz podwyższenie ciśnienia płynów ustrojowych w uchu środkowym. **Typ IV** jest mało poznany, możliwe że ma na niego wpływ wolna faza gazowa, niedokrwienie, embolia czy kombinacja tych czynników. Prawdopodobny wpływ na postać tej choroby ma także retencja **CO<sub>2</sub>** i szybka czy powtarzająca się kompresja.

Tabela 6. Podział choroby dekompresyjnej **DCS**

<b>Typ I</b>	<b>choroba ciśnieniowa kończyn</b> objawia się miejscowymi bólami kończyn, swędzeniem skóry, miejscowym zaczerwienieniem skóry, opuchliznami lub zwiótnieniami kolan, bioder, łokci, mięśni lub skóry
<b>Typ II</b>	<b>choroba ciśnieniowa centralnego układu nerwowego</b> objawia się zmieszaniem, niepokojem, paraliżem, dusznością i bólami w klatce piersiowej, trudnością w oddychaniu, utratą przytomności, kłopotami ze skupieniem uwagi, kłopotami z utrzymaniem równowagi i postawy wyprostowanej, szczególnie utrzymaniem kręgosłupa
<b>Typ III</b>	<b>choroba ciśnieniowa ucha środkowego</b> objawia się pogorszeniem słuchu, zawrotami głowy, dzwonieniem i szumieniem w uszach (tinitus) czy nudnościami i jest skutkiem oddziaływania ciśnienia na zachowanie równowagi w organach znajdujących się w uchu
<b>Typ IV</b>	<b>jałowa martwica kości</b> objawia się mechanicznym uszkodzeniem kości, uszkodzeniami strukturalnymi, lokalną mineralizacją, szczególnie atakując kości długie

Zródło: Cole B. 1993

Jeśli u jednego z nurków pozostających w saturacji wystąpią objawy **DCS** najczęściej występuje konieczność leczenia wszystkich<sup>17</sup>, choć występuje szeroka rozpiętość osobniczej odporności na **DCS**.

<sup>17</sup>ze względu na możliwości techniczne – brak możliwości izolowania nurków w różnych komorach kompleksu saturacyjnego

Podczas saturacji **typ I** może wystąpić po wycieczce na głębokości mniejsze niż plateau saturacji lub w czasie dekompresji po zakończeniu saturacji. Objawiając się bólami w obszarze mięśni szkieletowych i stawów<sup>18</sup>. Mogą być one poprzedzone skórnymi objawami powodującymi swędzenie, wysypkę lub plamistość skóry. Najczęściej występuje początkowo zwiększająca się sztywność w obrębie stawów kolanowych utrudniająca poruszanie się. Następnie, w ciągu kilku godzin, występuje stopniowe narastanie bólu w obrębie stawów<sup>19</sup>. Jest mało prawdopodobne, aby bolesność powstała przed rozpoczęciem procesu dekompresji. **Typ I** powstały podczas wycieczki oraz do **60 min** po wycieczce na głębokość mniejszą niż plateau saturacji powinien być traktowany, jak **typ II** ponieważ najczęściej objawy **typu I** są jedynie symptomem poważniejszych komplikacji.

**Typ I** pojawiający się po czasie dłuższym niż **60 min** po odbyciu wycieczki na głębokość mniejszą niż plateau saturacji lub występujący podczas dekompresji z plateau saturacji powinien być poddany powtórnej kompresji ze stopniowaniem co **1,5 mH<sub>2</sub>O (5 fsw)** z szybkością **1,5 mH<sub>2</sub>O · min<sup>-1</sup> (5 fsw · min<sup>-1</sup>)** aż do uzyskania głębokości ulgi. Rekompresja o głębokość większą niż **9 mH<sub>2</sub>O (30 fsw)** nie jest najczęściej wymagana. Z chwilą osiągnięcia głębokości ulgi należy podać nurkowi do oddychania mieszaninę leczniczą poprzez systemy **BIBS**. Mieszaniną leczniczą może być **Hx**, dla którego ciśnienie cząstkowe tlenu zawiera się pomiędzy **p<sub>O<sub>2</sub></sub> ∈ [150; 280] kPa**. Oddychanie leczniczym **Hx** powinno być przerywane co każde **25 min** na **5 min** oddychania atmosferą kompleksu. Leczenie na głębokości leczniczej powinno trwać do ustąpienia objawów, lecz nie krócej niż **2 godz.**

O zakończeniu leczenia decyduje lekarz zabezpieczający. Dekompresja do plateau saturacji przebiega zgodnie z zasadami dekompresji standardowej. Po zaistnieniu **typu I** zabronione są dla nurka dalsze wycieczki na głębokości mniejsze niż plateau saturacji.

Najczęściej **typ II** jest efektem wycieczki na głębokości mniejsze niż plateau saturacji. Typowymi objawami jest osłabienie, porażenie mięśni, utrata zorności i pamięci. Początek objawów jest zwykle nagły i występuje podczas procesu wynurzenia na głębokości mniejsze niż plateau saturacji lub w ciągu pierwszej godziny wycieczki.

**Typ III** przejawia się nudnościami i wymiotami, zawrotami głowy, utratą równowagi, dzwonieniem w uszach i utratą słuchu.

Leczenie objawów **DCS** powstałych podczas wycieczki na głębokość mniejszą od plateau saturacji polega na natychmiastowym powrocie na plateau z prędkością **9 mH<sub>2</sub>O · min<sup>-1</sup> (30 fsw · min<sup>-1</sup>)**.

Jeśli objawy **typu II** nie powstały podczas wycieczki na głębokość mniejszą od plateau saturacji, to należy podnosić ciśnienie z plateau saturacji z szybkością **1,5 mH<sub>2</sub>O · min<sup>-1</sup> (5 fsw · min<sup>-1</sup>)** aż do uzyskania głębokości, gdzie zaobserwuje się wyraźną poprawę stanu nurka. Z reguły obserwuje się na tej głębokości gwałtowne zmniejszenie intensywności objawów. Jeśli nie nastąpi gwałtowna poprawa w ciągu **(5; 10) min**, to przy asyście lekarza zabezpieczającego należy prowadzić dalszą kompresję do głębokości ulgi. Po jej osiągnięciu należy podać nurkowi do oddychania mieszaninę leczniczą poprzez systemy **BIBS**. Mieszaniną leczniczą może być, dla którego ciśnienie cząstkowe tlenu zawiera się pomiędzy **p<sub>O<sub>2</sub></sub> ∈ [150; 280] kPa**. Oddychanie leczniczym **Hx** powinno być przerywane co każde **25 min** na **5 min** oddychania atmosferą kompleksu. Leczenie przy wykorzystaniu mieszanin leczniczych, na głębokości leczniczej, powinno trwać przynajmniej **2 godz.** Po ustąpieniu wszystkich

<sup>18</sup>szczególnie stawów kolanowych

<sup>19</sup>należy jednak uczyć nurków, aby potrafili odróżniać bóle występujące na skutek drobnych urazów czy po wysiłku od bólei nieposiadających przyczyny w przeciążeniu stawów czy urazach mechanicznych powstających podczas pracy - należy w tym celu dokładnie rozważyć historię powstania objawów bólowych oraz ich nasilenia



objawów i zakończeniu leczenia nurek powinien pozostać co najmniej **12 godz** na głębokości leczniczej oddychając atmosferą komory. Dekompresja do plateau saturacji przebiega zgodnie z zasadami dekompresji standardowej. Po leczeniu zabronione są dla nurka dalsze wycieczki na głębokości mniejsze niż plateau saturacji.

Ponieważ mieszaniną leczniczą może być **Hx**, dla którego ciśnienie cząstkowe tlenu zawiera się pomiędzy  $p_{O_2} \in [150; 280] \text{ kPa}$ , to do zabezpieczenia procesu leczenia podczas nurkowań saturoowanych używa się **Hx** i tlenu o określonym dla każdego zakresu głębokości składzie (Tab. 7).

Tabela 7. Czynniki lecznicze

Zakres głębokości		Hx
[fsw]	[mH <sub>2</sub> O]	
0–60	0–18	100% O <sub>2</sub>
60–100	18–30	Hx 0,60 O <sub>2</sub>
100–200	30–60,5	Hx 0,38 O <sub>2</sub>
200–350	60,5–106	Hx 0,21 O <sub>2</sub>
350–600	106–181,5	Hx 0,13 O <sub>2</sub>
600–1000	181,5–303	Hx 0,08 O <sub>2</sub>
1000–1200	303–363,5	Hx 0,05 O <sub>2</sub>

Źródło: US Navy diving manual. 2008

Leczenie objawów **DCS** zaobserwowanych podczas odpoczynku po dekompresji z plateau saturacji odbywa się zgodnie z typowymi zasadami leczenia chorób nurkowych metodami powietrznymi lub tlenowo-powietrznymi i nie będzie tutaj omawiane. Pominięto tutaj także zapotrzebowanie na czynniki oddechowe związane z awaryjnym przerwaniem procesu kompresji.

Przykład 7. Jakie jest orientacyjne zapotrzebowanie na leczniczy **Hx** dla 2 nurków na plateau saturacji  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ .

Z plateau saturacji  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$  możliwa jest wycieczka na maksymalną głębokość  $h^{\text{max}} = 82 \text{ mH}_2\text{O}$ . Należy zatem liczyć się z tym, że maksymalna głębokość leczenia będzie większa od dozwolonej wycieczki  $h^{\text{max}} = 82 \text{ mH}_2\text{O}$ . Przy wystąpieniu objawów **typu I** rekompresja o głębokość większą niż **9 mH<sub>2</sub>O** nie jest najczęściej wymagana, lecz w przypadku objawów **typu II** należy liczyć się z koniecznością głębszej kompresji. Przyjęto tutaj, że będzie to głębo-

kość około trzykrotnie większa niż **9 mH<sub>2</sub>O** czyli zakładana głębokość ulgi nie przekroczy **106 mH<sub>2</sub>O**.

Mieszaniną leczniczą może być **Hx**, dla którego ciśnienie cząstkowe tlenu zawiera się pomiędzy  $p_{O_2} \in [150; 280] \text{ kPa}$ .

Dla głębokości  $h = 106 \text{ mH}_2\text{O}$  należy zabezpieczyć trzy mieszaniny **Hx** (Tab. 7): **Hx 0,21 O<sub>2</sub>**, **Hx 0,38 O<sub>2</sub>** i **Hx 0,60 O<sub>2</sub>**.

Praktycznie pytanie dotyczy objętości **Hx** i tlenu  $V_0$  odniesionych do warunków normalnych.

Korzystając z (1) można zapisać:  $n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$ . Przyjmując, że podczas wszelkich operacji z gazami podczas nurkowania z plateau saturacji temperatura będzie taka sama  $T = \text{idem}$ , to:  $p \cdot V = \text{idem}$ . Stąd dla oczekiwanej wentylacji płuc  $\dot{V}_0$  oraz przy założeniu, że nie ulega ona zmianie podczas zmiany głębokości  $\dot{V}_0 \neq f(H) \rightarrow \dot{V}_0 \equiv \dot{V}$  można

zapisać:  $p_H^{\text{max}} \cdot \dot{V} \cdot \tau = p_0 \cdot V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{p_H^{\text{max}}}{p_0} \cdot \dot{V} \cdot \tau$ ,

gdzie:  $p_H^{\text{max}}$  – ciśnienie na maksymalnej dozwolonej głębokości użycia **Hx**,  $\dot{V}$  – założona wentylacja płuc,  $\tau$  – czas leczenia,  $p_0$  – ciśnienie normalne,  $V_0$  – zapotrzebowanie na czynnik oddechowy odniesione do warunków normalnych.

Przyjmując, że podczas leczenia nurek będzie wykonywał wysiłek lekki można przyjąć, że maksymalna wentylacja płuc będzie kształtowała się na poziomie<sup>20</sup>  $\dot{V}_0^{\text{max}} \equiv \dot{V} = 15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

Najkrótsze leczenie trwa min.  $\tau = 2 \text{ godz}$ , zakładając przedłużenie czasu o 50% minimalne zapotrzebowanie na **Hx 0,60 O<sub>2</sub>** dla 2 nurków wyniesie:

$V_0 = \frac{400 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \cdot 15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot 180 \text{ min} \cdot 2 \text{ nurków} = 21,6 \text{ Nm}^3$ , na **Hx 0,38 O<sub>2</sub>**:

$V_0 = \frac{100 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \cdot 15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot 180 \text{ min} \cdot 2 = 37,8 \text{ Nm}^3$ , na **Hx 0,21 O<sub>2</sub>**:

$V_0 = \frac{280 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \cdot 15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot 180 \text{ min} \cdot 2 = 64,8 \text{ Nm}^3$  zaś na tlen, wyniesie:  $V_0 = \frac{280 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}} \cdot 15 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot 180 \text{ min} \cdot 2 \text{ nurków} = 15,1 \text{ Nm}^3$ .

Dobłą praktyką jest planowanie dodatkowo 100% nadmiaru czynnika oddechowego. Stąd należy zabezpieczyć  $V_0 = 130 \text{ Nm}^3$  **Hx 0,21 O<sub>2</sub>**,  $V_0 = 70 \text{ Nm}^3$  **Hx 0,38 O<sub>2</sub>**,  $V_0 = 50 \text{ Nm}^3$  **Hx 0,60 O<sub>2</sub>** oraz  $V_0 = 30 \text{ Nm}^3$  **O<sub>2</sub>**.

<sup>20</sup>Przylipek M., Torbus J. 1981

## Zapotrzebowanie na czynnik oddechowy

W artykule została przeprowadzona kalkulacja zapotrzebowania gazów na podstawowe procesy przykładowego nurkowania saturowanego (Rys. 1) oraz zabezpieczenia leczenia w trakcie saturacji (Tab. 8). Ich zestaw został podzielony na nienaruszalne zapasy awaryjne i zapasy na jedno nurkowanie. Ilości niektórych rodzajów gazów z nienaruszalnych zapasów awaryjnych zostały podzielone sugerując, że ze względów bezpieczeństwa powinny być one zgromadzone przynajmniej w dwóch oddzielnych zbiornikach. Umożliwi to podanie danego czynnika oddechowego do kompleksu po awarii zbiornika lub linii przesyłowej.

Tabela 8. Podstawowe zapotrzebowanie materiałowe na saturację helioksovą na głębokości plateau  $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$  z wycieczką na głębokość  $h = 70 \text{ mH}_2\text{O}$  trwającego wraz z procesem dekompresji ok.  $\tau = 5 \text{ dni}$  (Rys. 1)

Faza	Nienaruszalne zapasy awaryjne					
	$H_e$	$H_x$				$O_2$
		0,60	0,38	0,21	0,13	
[Nm <sup>3</sup> ]						
Kompresja	2×110			51		4
Nurkowanie					2×14	
Dekompresja						45
Leczenie		2×50	2×70	2×130		2×30
<b>Razem</b>	<b>215</b>	<b>579</b>				<b>109</b>
Zapasy na jedno nurkowanie						
Kompresja	215			51		4
Nurkowanie					14	
Dekompresja						45
<b>Razem</b>	<b>215</b>	<b>65</b>				<b>49</b>

Źródło: własne

Nienaruszalne zapasy awaryjne mogą zabezpieczać kolejne nurkowania, jeżeli ich stan nie został uszczuplony podczas poprzedniego nurkowania a jakość zgromadzonych mieszanin została sprawdzona przed podjęciem kolejnego nurkowania. Najczęściej są one gromadzone tylko raz zabezpieczając cały cykl nurkowań.

## Wnioski

Już wstępne kalkulacje pokazują, że z punktu widzenia optymalizacji dostaw, przy chęci minimalizacji ich kosztowności, przedstawiona

sytuacja problemowa stanowi dość skomplikowane zagadnienie optymalizacyjne.

Problemy optymalnego zabezpieczenia logistycznego nurkowań saturowanych nie są opisywane ze względu na dużą liczbę uwarunkowań, na które należy zwrócić uwagę podczas planowania takich operacji. Rodzi to niesłuszne przekonanie, że skoro nie poświęca się im obszernych publikacji to nie stanowią one problemu w procesie planowania. Jak starano się pokazać w artykule jest to przekonanie błędne, lecz niestety powszechne wśród specjalistów służby nurkowej i logistycznej.

## Streszczenie

W artykule pokazano sytuację problemową związaną z planowaniem podstawowego zabezpieczenia logistycznego w czynniki oddechowe nurkowania saturowanego.

## Abstract

*In this article has been presented the logistic plan for supplying of basic breathing gases for saturation diving process.*

## Literatura

1. Cole B. *Decompression and computer assisted diving*. Dive Information Company, 1993. ISBN 0-9520934-0-5.
2. Przyłipiak M., Torbus J. *Sprzęt i prace nurkowe - poradnik*. Warszawa: Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1981. ISBN 83-11-06590-X.
3. US Navy diving manual. *Praca zbiorowa (revision 6)*. The Direction of Commander: Naval Sea Systems Command, 2008. 0910-LP-106-0957.