

## **WPLYW METODY PŁUKANIA NA STABILNĄ ZAWARTOŚĆ TLENU W PRZESTRZENI ODDECHOWEJ APARATU NURKOWEGO SCR<sup>1</sup> CRABE W FAZIE DEKOMPRESJI**

Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni

### **STRESZCZENIE**

Utrzymanie stabilnej zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa wykonywania podwodnych działań minerskich. W artykule podjęto tematykę wpływu modyfikacji metod płukania aparatu oddechowego na jakość procesu wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego. Zagadnienie płukania aparatu przedstawiono w świetle zmiany podejścia AMW ze statystycznego na deterministyczne opracowywania rozkładów dekompresji, opartego na modelu: wentylacji aparatu, zagrożenia toksycznością tlenową oraz dekompresji. Poznanie i ustalenie z wymaganą dokładnością metody płukania przestrzeni oddechowej aparatu pozwoliło na ocenę stabilnej zawartości tlenu w fazie dekompresji. Założenia weryfikowano w oparciu o system pomiarowy zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej.

**Słowa kluczowe:** aparat nurkowy, czynnik oddechowy do celów hiperbarycznych, proces płukania, technologia prac podwodnych.

---

### ARTICLE INFO

---

PolHypRes 2020 Vol. 70 Issue 1 pp. 21 – 42

**ISSN:** 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

**DOI:** 10.2478/phr-2020-0002

Strony: 22, rysunki: 16, tabele: 4

**page www of the periodical:** [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

**Typ artykułu:** oryginalny

**Termin nadesłania:** 14.12.2019 r.

**Termin zatwierdzenia do druku:** 25.01.2020 r.

**Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



## WSTĘP

Wycofanie z SZRP aparatów nurkowych FGT I/D<sup>2</sup> spowodowało konieczność wprowadzenia [1]<sup>3</sup> do użytkowania<sup>4</sup> odpowiadających wymaganiom SZRP i NATO<sup>5,6</sup> [2,3] aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE [4]. Pozyskana technologia nurkowania wymagała walidacji<sup>7</sup> z uwzględnieniem uwarunkowań krajowych oraz potrzeb MWRP w zakresie wykonywania podwodnych działań minerskich MCM<sup>8</sup> i EOD<sup>9</sup>. Weryfikacja naukowa przyjętych założeń, opracowanie modelu wentylacji oraz rozkładów dekompresji ze względów obligatoryjnych<sup>10</sup> wymagała zlecenia przez NCBiR<sup>11</sup> wykonania pracy naukowo-badawczej. Walidację nowej technologii wykonywania podwodnych działań minerskich<sup>12</sup> [9] oraz EOD z użyciem SCR CRABE powierzono ZTPP AMW w ramach umowy: DOBR/0047/R/ID1/2012/03 pt. „Projektowanie dekompresji dla nurków MCM”<sup>13</sup>.

W ramach realizacji powyższego zadania projektowego opracowano m.in. na poziomie wynikowym technologie nurkowania z użyciem mieszanin nitroksowych Nx32,5%O<sub>2</sub> w zakresie głębokości 45 – 60m H<sub>2</sub>O<sup>14</sup> z zastosowaniem dekompresji tlenowej i nitroksowej. Kontynuacja przyjętej do realizacji koncepcji badań jest obecnie realizowana w ramach pracy naukowo-badawczej pk. Tulipan IV umowa Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016, pt.: „Projektowanie dekompresji dla nurków MCM/EOD II”. Głównym celem jest opracowanie na poziomie walidacyjnym technologii nurkowania nitroksowych w zakresie 0-60mH<sub>2</sub>O odpowiadającej systemowi II wg. NO – 07 – A010:2010 [6]. Uzyskanie rodzimej technologii pozwoli na przełamanie dotychczasowych barier i ograniczeń wykorzystania aparatu SCR CRABE<sup>15</sup> [10] oraz istotne zwiększenie zdolności operacyjnych MWRP [5] w zakresie realizacji zadań MCM.

## SYTUACJA PROBLEMOWA

W ramach realizowanych badań nad opracowaniem technologii nurkowania wykonano szereg prac mających na celu ustalenie modelu wentylacji aparatu nurkowego. Jak pokazała analiza kontekstu<sup>16</sup> związanego z procesem projektowania dekompresji dla aparatu SCR CRABE należało podjąć działania zmierzające do ustalenia efektywnej metody przepłukania przestrzeni oddechowej aparatu. W trakcie nurkowań eksperymentalnych w przestrzeni oddechowej aparatu obserwowano zmiany zawartości tlenu<sup>17</sup> względem ustalonych granic tolerancji<sup>18</sup>. Obserwację zachodzących zmian minimalnej stabilnej zawartości tlenu wykonano dla premiksowych mieszanin nitroksowych Nx 60,0%vO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Nx 40,0%vO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> oraz Nx 32,5%vO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>. Badania prowadzono w trakcie procesu przepłukania aparatu O<sub>2</sub> w fazie dekompresji realizowanej w toni wodnej od głębokości 15m H<sub>2</sub>O. Jak wiadomo w aparatach o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego występuje względny spadek zawartości O<sub>2</sub> do wartości stabilnej w przestrzeni oddechowej względem pierwotnej zawartości tlenu w premiksie. Zjawisko to spowodowane jest mieszaniami się zregenerowanego czynnika oddechowego ze świeżym premiksem<sup>19</sup>.

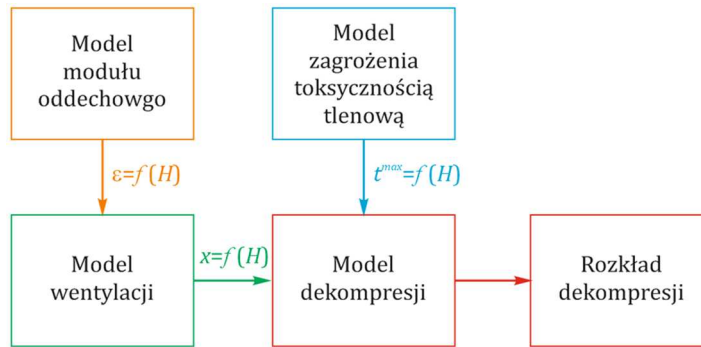
Z opracowanego w trakcie odrębnych badań modelu wentylacji SCR CRABE wynika, że stabilne ciśnienie cząstkowe w przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego zależy m.in. od głębokości nurkowania, natomiast proces płukania przestrzeni oddechowej aparatu jest jednakowo skuteczny na każdej głębokości [8]. W trakcie nurkowania w zależności od rodzaju zastosowanego premiksu ciśnienie cząstkowe nie powinno ulec zmianie poniżej ustalonej granicy fizjologicznej oraz przekraczać ustalonych wartości granicznych wynikających z możliwości wystąpienia tlenowej toksyczności mózgowej CNS<sup>20</sup>.

## CEL PRACY

Opracowany w ramach projektu system dekompresji składa się z następujących tabel:

- Tabeli dekompresji zasadniczej Nx/O<sub>2</sub> i akcelerowanej: Nx i Nx/O<sub>2</sub> dla aparatu Nx/O<sub>2</sub> – SCR CRABE SCUBA zasilanego Nx: 32,5<sup>+0</sup><sub>-0,5</sub>%vO<sub>2</sub> w zakresie głębokości [27 ÷ 60]mH<sub>2</sub>O.
- Tabeli dekompresji zasadniczej Nx/O<sub>2</sub>: Nx i Nx/O<sub>2</sub> dla aparatu Nx/O<sub>2</sub> – SCR CRABE SCUBA zasilanego nNx: 40,0<sup>+0</sup><sub>-0,5</sub>%vO<sub>2</sub> w zakresie głębokości [24 ÷ 48]mH<sub>2</sub>O.
- Tabeli dekompresji bezpośredniej Nx/O<sub>2</sub> dla aparatu Nx/O<sub>2</sub> – SCR CRABE SCUBA zasilanego Nx: 60,0<sup>+0</sup><sub>-0,5</sub>%vO<sub>2</sub> w zakresie głębokości [0 ÷ 24]mH<sub>2</sub>O

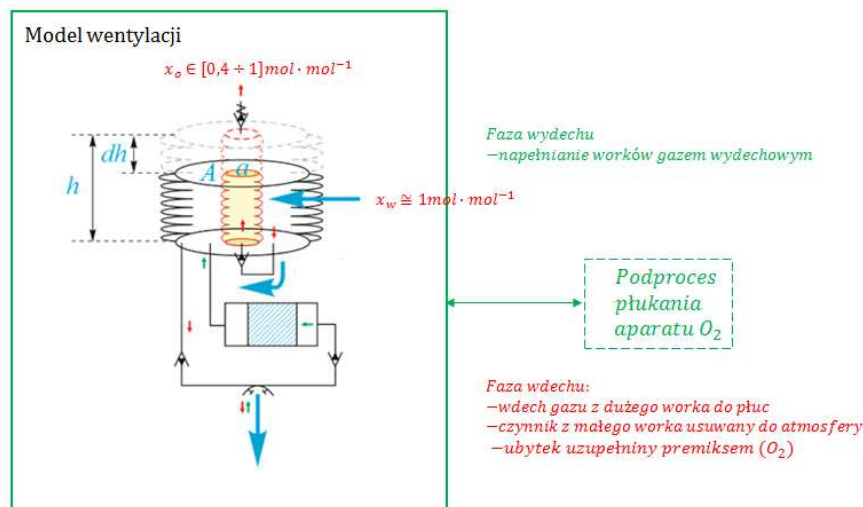
Na pewnym etapie badań projektowych baza wiedzy umożliwiła rozdzielanie modelu wentylacji, planowania dekompresji analizowanego systemu i przebiegających w nim procesów. Ustanowienie modeli pozwoliło na zmianę podejścia statystycznego na częściowo deterministyczne, a podstawą opracowywania rozkładów dekompresji było ustalenie modelu modułu oddechowego, wentylacji, dekompresji i zagrożenia toksycznością tlenową, rys. 1 [11].



Rys. 1 Następnstwo modeli. Źródło: opracowanie na podstawie: R. Kłos. Modeling of the diving systems with semi-closed circuit of the breathing agent. UDWG 2015.

Ze względu na zmiany w składzie czynnika oddechowego wdychanego przez nurka w fazie dekompresji w zależności m. in. od parametrów konstrukcyjnych aparatu nurkowego, z modelu wentylacji w fazie dekompresji wyodrębniono podproces przepłukania aparatu  $O_2$ . Proces ten ze względu na jego przebieg w otoczeniu systemowym stanowiącym kontekst dla analizy zachodzących w nich podprocesów analizowano w ramach podejścia systemowego. Proces powiązano pośrednio z modelem wentylacji jako elementem systemu. Głównym celem było opracowanie efektywnej procedury przepłukania tlenem przestrzeni oddechowej aparatu *SCR CRABE* w ramach przyjętych rozkładów dekompresji dla nurków nitroksowych w zakresie 0 – 60mH<sub>2</sub>O.

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie analizowany układ oddechowy aparatu (konstrukcja worków w worku) wraz z kierunkiem przepływu strumienia gazu w czasie wdechu i wydechu stanowiący podstawę dla analizy zmian procesowych zachodzących w czasie przepłukania przestrzeni oddechowej z *premixsu*<sup>21</sup>, tlenem w fazie dekompresji. Przepłukanie prowadzono w oparciu o implementację zmodyfikowanych<sup>22</sup> wariantów procedury przepłukania tlenem. Modyfikację podprocesu prowadzono w kierunku uzyskania stabilnej wartości ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2}$  względem zdefiniowanej wartości krytycznej.



Rys. 2 Układ oddechowy aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE. Źródło: opracowanie na podstawie: R. Kłos. Modeling of the diving systems with semi-closed circuit of the breathing agent. UDWG 2015.

W czasie płukania aparatu nurkowego zawartość tlenu we wdychanej mieszance nitroksowej należy podnieść płuczając przestrzeń oddechową tlenem. Proces ten polega na sukcesywnej wymianie nitroksu, aż do uzyskania zdefiniowanego stałego i stabilnego poziomu zawartości tlenu o wartości większej niż przyjęte założenia krytyczne<sup>23</sup>. Pierwotnie przyjęta do badań procedura płukania tlenem polegała na wykonaniu 3 wdechów z przestrzeni aparatu i wydechów na zewnątrz, następnie 3 wdechów i wydechów do aparatu. Czynność tą należało powtórzyć do osiągnięcia oczekiwanego efektu, tab. 1.

Rodzaje płukania przestrzeni oddechowej aparatu *SCR CRABE*<sup>24</sup>. Źródło: Kłos R, Szymański R, Konarski M, Woźniak A, Tymczasowe wytyczne do dekompresji dla aparatu  $N_2/O_2$  SCR Crabe Scuba. Gdynia 2018.

płukania	płukania tlenem lub nitroksen polega na wykonaniu 3 wdechów z przestrzeni oddechowej aparatu i wydechów nosem na zewnątrz do wody. Płukanie tlenem lub nitroksen może być wykonywane 1, 2, 3 razy lub więcej w zależności od momentu realizacji nurkowania.
płukania tlenem	płukania tlenem polega na wzbogaceniu aktualnego czynnika oddechowego na mieszaninę o zawartości minimum 90% $O_2$ i wykonywana jest od głębokości 15 $mH_2O$ do pierwszego przystanku dekompresyjnego i na pierwszym przystanku dekompresyjnym, której czas jest wliczany do przebiegu dekompresji przedstawionego w tabeli dekompresyjnej. Procedura płukania przestrzeni oddechowej aparatu tlenem polega na wykonaniu 3 wdechów z przestrzeni oddechowej aparatu i wydechów nosem na zewnątrz do wody. Następnie nurek wykonuje 3 wdechy i wydechy ustami do przestrzeni oddechowej aparatu. Czynność tą, należy wykonać 3 razy.
płukanie nitroksen	płukania nitroksen polega na wzbogaceniu cyrkulującego nitroksu w tlen powyżej zawartości wskazanej w tabelach dekompresyjnych, której czas jest wliczany do przebiegu nurkowania i procesu dekompresji. Procedura płukania przestrzeni oddechowej aparatu nitroksen polega na wykonaniu 3 wdechów z przestrzeni oddechowej aparatu i wydechów nosem na zewnątrz do wody. Czynność tą, należy wykonać jeden raz.

W opracowanej technologii nurkowania dekompresja tlenowa jest prowadzona w toni wodnej zgodnie z przykładowym rozkładem Tab. 2, po przepłukaniu przestrzeni oddechowej tlenem z aparatu nurkowego lub w systemie otwartym z użyciem *XBS*<sup>25</sup>. Założenia procedury dekompresji tlenowej wymagają efektywnego przepłukania przestrzeni oddechowej tlenem od głębokości 15  $mH_2O$  tak, aby na głębokości 12  $mH_2O$  (lub pierwszej stacji dekompresji tlenowej) uzyskać wymagane rozkładem stężenie tlenu w pętli oddechowej aparatu nurkowego. Przyjęto, że dekompresję tlenową należy poprzedzić płukaniem przestrzeni oddechowej aparatu tlenem od głębokości 15  $mH_2O$  niezależnie czy jest ona przewidziana w rozkładzie dekompresji jako stacja dekompresyjna czy też nie [5].

W tabelach do projektowania rozkładów dekompresyjnych przyjęto następujące założenia dekompresji tlenowej:

- ✓ dekompresja akcelerowana jest obliczona tylko jako dekompresja tlenowa,
- ✓ nie jest możliwe całkowite wypłukanie resztkowych zawartości azotu z przestrzeni oddechowej aparatu,
- ✓ dekompresja tlenowa wymaga koncentracji tlenu we wdychanym czynniku oddechowym przynajmniej na poziomie  $\geq [90]\%v O_2$ , dopuszczalne są jedynie chwilowe spadki zawartości tlenu  $< 0,5 \text{ min}$  do zawartości pomiędzy  $[85; 90]\%v O_2$  na pierwszej stacji dekompresji tlenowej. W każdym innym przypadku należy podjąć dodatkowe płukanie tlenem przestrzeni oddechowej aparatu celem podniesienia jego zawartości do poziomu  $\geq [90]\%v O_2$ . Jeśli utrzymanie zawartości tlenu  $\geq 90\%v O_2$  nie jest możliwe należy przejść na dekompresję ekwiwalentną.

Rozkład dekompresji dla aparatu SCR Crabe. Źródło: Klos R, Szymański R, Konarski M, Woźniak A, Tymczasowe wytyczne do dekompresji dla aparatu  $Nx/O_2$  SCR Crabe Scuba. Gdynia 2018.

Nitroks: $32,5^{+0}_{-0,5}\%O_2$ Szybkość sprężania $v \leq 20 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ Szybkość przejścia pomiędzy stacjami $\cong 3 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$									
Głębokość	Czas pobytu na głębokości	Szybkość wynurzenia do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [ $\text{mH}_2\text{O}$ ]						Całkowity czas dekompresji <sup>③</sup>
			$Nx$ <sup>①</sup>			$O_2$ <sup>②</sup>			
[ $\text{mH}_2\text{O}$ ]	[ $\text{min}$ ]	[ $\text{min}$ ]	18	15	12	9	6	3	[ $\text{min}$ ]
<b>48</b> Dekompresja zasadnicza	10	4	-	-	1	1	1	1	9
	15		-	-	1	1	2	3	12
	20		-	1	2	2	3	7	20
	25 <sup>④</sup>		-	2	3	3	4	14	31
<b>48</b> Dekompresja akcelerowana <sup>⑤</sup>	20 <sup>④</sup>	4	-	1	2	2	3	6	19
	25 <sup>④</sup>		-	2	3	3	4	10	27
	30 <sup>④</sup>		1	3	3	4	6	12	34
	35 <sup>④</sup>		2	4	4	4	9	15	43

Zakres głębokości operacyjnych	Rodzaj mieszaniny	Wymagane użycie inżektora
[27; 60] $\text{mH}_2\text{O}$	$Nx 32,5^{+0}_{-0,5}\%O_2/N_2$	0 - 60 - SZARY
[24; 50] $\text{mH}_2\text{O}$	$Nx 40,0^{+0}_{-0,5}\%O_2/N_2$	0 - 60 - SZARY
[0; 24] $\text{mH}_2\text{O}$	$Nx 60,0^{+0}_{-0,5}\%O_2/N_2$	bez inżektora

Proces płukania przestrzeni oddechowej - założenia dekompresyjne

Uzyskanie zdefiniowanego stałego i stabilnego poziomu zawartości tlenu wynika z przyjętych założeń dekompresyjnych. Najważniejszym z punktu widzenia bezpieczeństwa dekompresji, a zatem i powodzenia realizacji nurkowania jest utrzymanie koncentracji tlenu we wdychanym czynniku oddechowym na poziomie  $\geq [90]\%v O_2$ . Z punktu widzenia realizacji procesu przepłukania aparatu należy zauważyć, że dopuszczono chwilowe spadki  $< 0,5 \text{ min}$  do zawartości pomiędzy  $[85 \div 90]\%v O_2$  na pierwszej stacji dekompresji tlenowej. W przypadku niespełnienia przyjętych do badań założeń wzrasta prawdopodobieństwo materializacji ryzyka w postaci zaistnienia wystąpienia incydentu DCS.

## BADANIA

Jak wspomniano, stabilizacja składu czynnika oddechowego w przestrzeni oddechowej aparatu w fazie dekompresji zależy od procesu dynamicznego mieszania się nitroksu z tlenem. Płukanie tlenem nie gwarantuje, że stan równowagi nastąpi natychmiast. W trakcie eksperymentu zaobserwowano, że skuteczność płukania wzrastała wraz z częstością wykonania procedury płukania, natomiast jego efektywność względna malała wraz ze wzrostem krotności jej wykonania. Podstawę wyprowadzenia zależności [1] zawartości tlenu  $x_j$  w funkcji krotności płukania  $j$  stanowi bilans molowy tlenu i całej objętości czynnika oddechowego. Bilans ten przedstawiono w tab. 3.

$$x_j = x_w + (x_0 - x_w) \cdot \left(\frac{V_z}{V_c}\right)^j \quad (1)$$

gdzie:  $V_c$  – całkowita objętość przestrzeni oddechowej [ $\text{dm}^3$ ],  $V_z$  – całkowita objętość zalegająca w przestrzeni oddechowej [ $\text{dm}^3$ ],  $x_0$  – początkowa zawartość tlenu w worku oddechowym wyrażona ułamkiem molowym [ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ],  $x_w$  – ułamek molowy tlenu w premiksie [ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ],  $j$  – krotność płukania przestrzeni oddechowej.

Z zależności [1] wynika niezależność zawartości tlenu  $x_j$  po  $j$ -krotnym płukaniu przestrzeni oddechowej od głębokości  $x_j \neq f(H)$  [8].

Przedstawiony bilans molowy tlenu i premiksu wynika z procesu wymiany czynnika oddechowego w przestrzeni aparatu nurkowego w fazie jego płukania. Na podstawie bilansu oraz wyprowadzonej z niego zależności zawartości tlenu  $x_j$  w funkcji krotności płukania można dokonać obliczeń teoretycznych stanowiących podstawę do dalszej weryfikacji procesu.

Bilans molowy tlenu i czynnika oddechowego w procesie płukania przestrzeni oddechowej.

		Opróżnianie	Napełnianie
Tlen	przybywa	—	$\frac{p}{p_0} \cdot (V_c - V_z) \cdot x_w$
	ubywa	$\frac{p}{p_0} \cdot (V_c - V_z) \cdot x_i$	—
	pozostaje	$\frac{p}{p_0} \cdot V_z \cdot x_i$	$\frac{p}{p_0} \cdot V_z \cdot x_i + (V_c - V_z) \cdot x_w$
Nitroks	przybywa	—	$\frac{p}{p_0} \cdot (V_c - V_z)$
	ubywa	$\frac{p}{p_0} \cdot (V_c - V_z)$	—
	pozostaje	$\frac{p}{p_0} \cdot V_z$	$\frac{p}{p_0} \cdot V_c$

gdzie:  $V_c$  – całkowita objętość przestrzeni oddechowej [ $dm^3$ ],  $V_z$  – całkowita objętość zalegająca w przestrzeni oddechowej [ $dm^3$ ],  $x_0$  – początkowa zawartość tlenu w worku oddechowym wyrażona ułamkiem molowym [ $mol \cdot mol^{-1}$ ],  $x_w$  – ułamek molowy tlenu w premiksie [ $mol \cdot mol^{-1}$ ],  $j$  – krotność płukania przestrzeni oddechowej [8].

Podczas prac prowadzonych w warunkach laboratoryjnych weryfikowano założenia teoretyczne poczynione dla zmodyfikowanych procedur płukania przestrzeni oddechowej aparatu *SCR CRABE* w oparciu o system pomiarowy *DGKN – 120*, rys. 3. Pomiary stanowiskowe, choć mniej dokładne niż laboratoryjne przyjęto jako dostatecznie wiarygodne dla oceny granic zmienności krytycznej wartości stabilnej tlenu.



Rys. 3 Widok ogólny stanowiska kontrolnego systemu pomiarowego *DGKN – 120* w *ZTPP AMW*. Źródło: opracowanie własne.

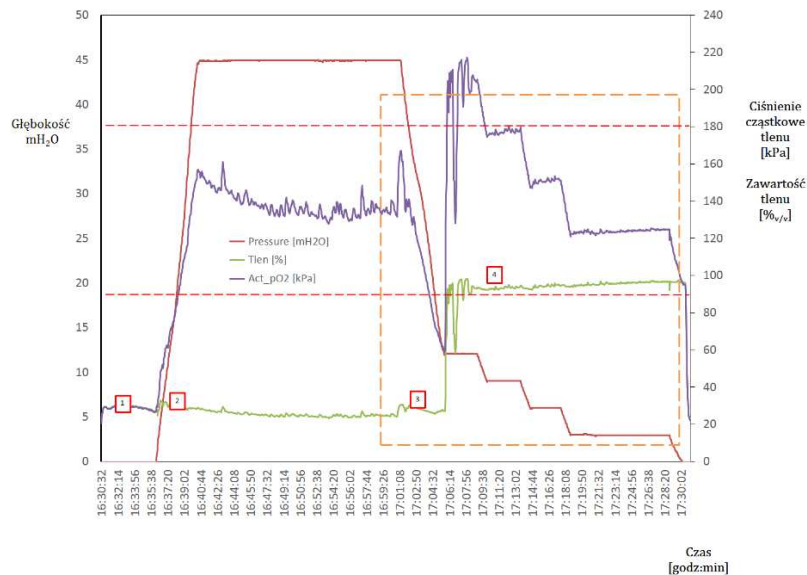
Modyfikacje procesu płukania tlenem przestrzeni oddechowej aparatu *SCR CRABE* przedstawiono w tab. 4. W trakcie eksperymentów wykonano ocenę sześciu wariantów modyfikacji parametrów analizowanego procesu. Obecnie kontynuowane są badania dla wariantu *Nr VI* tab. 4.

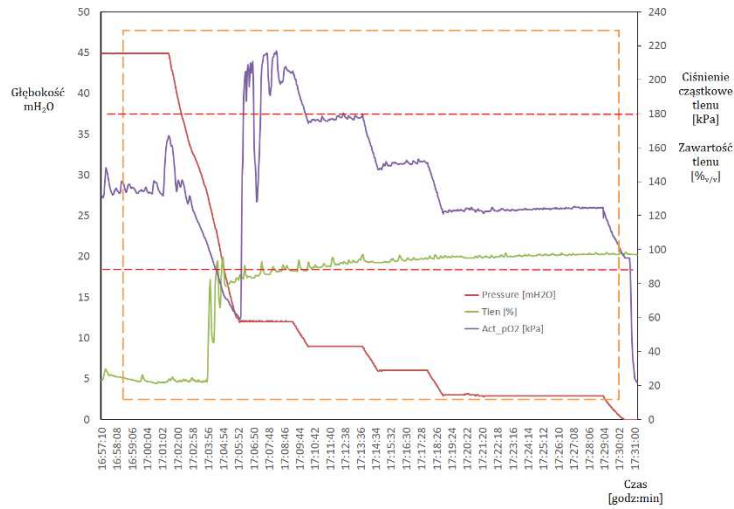
Metody płukania *premiksem* przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego *SCR CRABE*. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016, pt.: „Projektowanie dekompresji dla nurków *MCM/EOD II*”.

Nr	Etapy płukania aparatu nurkowego	Nurkowanie Nr 2 Nurek ECHO Data:26.10.2017	Nurkowanie Nr 8 Nurek DELTA Data:08.11.2017	Nurkowanie Nr 35 Nurek CHARLIE 2 Data:24.03.2018	Nurkowanie Nr 38 Nurek CHARLIE Data:04.04.2018	Nurkowanie Nr 70 Nurek ALFA Data:10.09.2018	Nurkowanie Nr 71 Nurek BRAVO Data:12.09.2018
1	Oddychanie z aparatu Nx przed zanurzeniem	10min	10min	5min	5min	3min	3min
2	Wydechy od momentu rozpoczęcia sprężania - płukanie Nx	5	5	3	3	3	3
3	Wydechy po przekroczeniu 5m H <sub>2</sub> O - płukanie Nx	-----	-----	5	3	-----	-----
4	Wydechy po przekroczeniu 10m H <sub>2</sub> O - płukanie Nx	-----	-----	-----	-----	3	3
5	Ostatnia minuta pobytu na dnie - płukanie Nx	1 płukanie (1 · 3)	1 płukanie (1 · 3)	1 płukanie (1 · 3)	1 płukanie (1 · 3)	1 płukanie (1 · 3)	1 płukanie (1 · 3)
Płukanie O <sub>2</sub> , h=15 ÷ 12 mH <sub>2</sub> O.							
6	Płukania aparatu O <sub>2</sub> w czasie dojścia do 12 mH <sub>2</sub> O.	3 płukania (3 · 3)					
7	Płukania aparatu O <sub>2</sub> w czasie przejścia od 15 ÷ 12 mH <sub>2</sub> O.		3 płukania (3 · 3)	3 płukania (3 · 3)			
8	Płukania aparatu O <sub>2</sub> od 15 mH <sub>2</sub> O - ostatnia minuta postoju				3 płukania (3 · 3)	3 płukania (3 · 3)	4 płukania (4 · 3)

W trakcie implementacji zmian obserwowano i analizowano otrzymane rozkłady danych pomiarowych zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu. Rozkład zmian zawartości stężenia procentowego tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu, ciśnienia parcjalnego tlenu oraz głębokości nurkowania dla nurka *ECHO* i *Nx* 0,325<sup>26</sup> przedstawiono na rys. 4.

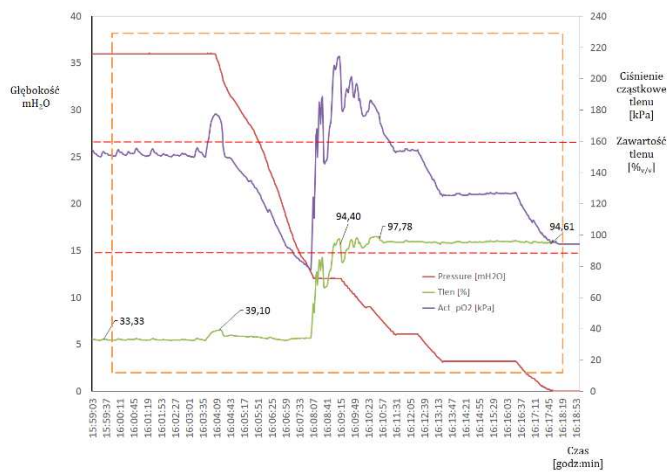
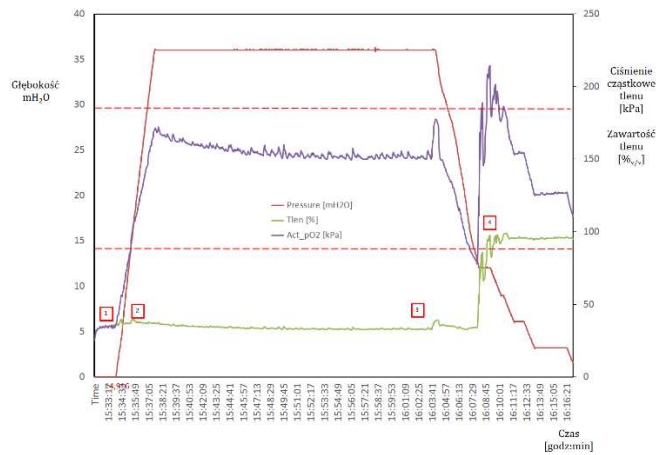
Naniesione punkty charakterystyczne 1 – 4<sup>27</sup> wskazują na kluczowe elementy procesu przepłukania aparatu *premiksem* i tlenem w trakcie nurkowania.





Rys. 4 i 5. Całościowy i fragmentaryczny rozkład parametrów składu czynnika oddechowego w worku oddechowym aparatu *Nx – SCR CRABE* w czasie pobytu na dnie oraz dekompresji dla nurka Echo nurkowanie nr 2 z dnia 26.10.2017 roku, nitroks  $x_{O_2} = 0,325 mol \cdot mol^{-1}$ , płukanie przestrzeni oddechowej w fazie dekompresji tlen  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$ . Profil 45m/25 min, pobyt na dnie 25 minut, czas nurkowania 54 minut. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

Do dalszej analizy przyjęto zakres danych wyznaczony przez granicę ostatniego płukania przed rozpoczęciem wynurzania pkt. 3 rys. 4. Otrzymany fragmentaryczny rozkład dla nurkowania nr 2 (tab. 4) i procedury 3-krotnego powtórzenia procedury przepłukania tlenem przedstawiono na rys. 5.



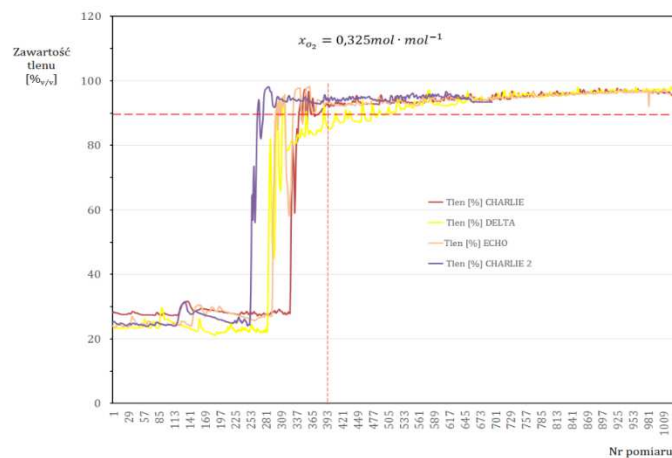
Rys. 6 i 7 Całościowy i fragmentaryczny rozkład parametrów składu czynnika oddechowego w worku oddechowym aparatu *Nx – SCR CRABE* w czasie pobytu na dnie oraz dekompresji dla nurka Bravo nurkowanie nr 71 z dnia 12.09.2018 roku, nitroks  $x_{O_2} = 0,4 mol \cdot mol^{-1}$ , płukanie przestrzeni oddechowej w fazie dekompresji tlen  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$ . Profil nurkowania 36m/30 min, pobyt na dnie 30 minut, czas nurkowania 44 minuty. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.



Na rys. 6. przedstawiono analogiczny rozkład dla modyfikacji procesu przepłukania dla nurkowania nr 71 (tab. 4) i premiksu  $Nx 0,4^{28}$ . Zasadnicze różnice przedstawianych obserwacji są związane z zastosowaniem różnych procedur płukania i składu pierwotnego premiksu w przestrzeni oddechowej aparatu przed wykonaniem procedury. Z uzyskanego rozkładu danych wyodrębniono do analizy zakres danych pomiarowych przedstawiony na rys. 7. Dane pomiarowe odzwierciedlają przebieg procesu dla 4-krotnego powtórzenia procedury przepłukania. W każdym przypadku płukanie tlenem przestrzeni oddechowej aparatu podniosło jego zawartość do poziomu  $\geq [90]\%O_2$ .

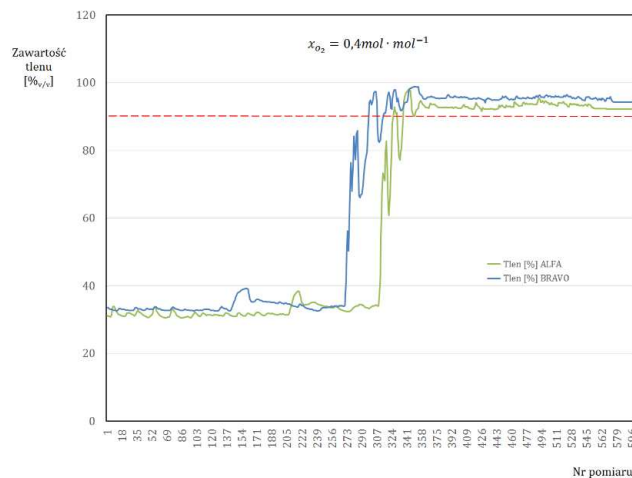
Dokonanie modyfikacji procedury spowodowało zmianę charakterystyki przyrostu zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu. W obu przypadkach różnią się one zarówno czasem przyrostu stężenia tlenu do wartości  $\geq [90]\%O_2$  jak również wartością stabilnej zawartości tlenu w fazie dekompresji tlenowej. Zmiany koncentracji tlenu w poszczególnych etapach procesu przepłukania oznaczono na wykresie. Największa zaobserwowana po zakończeniu procesu płukania tlenem wartość stężenia tlenu wyniosła  $C_{O_2} = 97,78\%v$  w fazie dekompresji następuje sukcesywny spadek tej zawartości do wartości minimalnej  $C_{O_2} = 94,61\%v > C_{O_2, min} = 90\%v$ . Rozkłady zmian zawartości tlenu dla 4 procedur płukania i mieszaniny  $Nx 32,5\%O_2$  w trakcie poszczególnych nurkowań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 8.

Na rysunku oznaczono granicę specyfikacji  $C_{O_2, min} \geq 90\%vO_2$  wynikającą z założeń krytycznych dla rozkładu dekompresji. Linia pionową ograniczono obszar poddany dalszej analizie w zakresie stabilnej zawartości tlenu pod kątem identyfikacji zachodzących zmian procesowych. Przyjęto, że dokonane obserwacje należy traktować jako badania wstępne<sup>29</sup>, które stanowią podstawę do dalszego wnioskowania. Różnice w rozkładach ujawniają się we wstępnej fazie stabilizacji zawartości czynnika oddechowego po wykonaniu przepłukania tlenem. Choć wartość stabilna zawartości tlenu jest zbliżona w końcowej fazie dekompresji tlenowej, to prędkość przyrostu koncentracji tlenu jest różna.



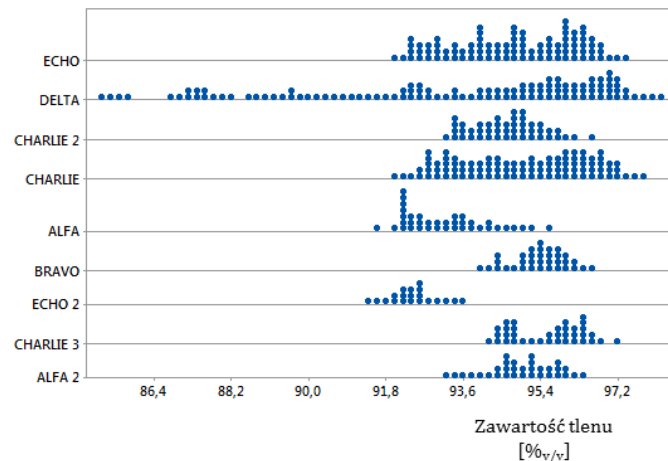
Rys. 8 Parametry składu czynnika oddechowego w worku oddechowym aparatu  $Nx - SCR CRABE$  dla  $n = 4$  nurków dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,325 mol \cdot mol^{-1}$  w czasie płukania przestrzeni oddechowej w fazie dekompresji z użyciem tlenu  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$  przed i po modyfikacji procedury płukania. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

Na rys. 9 naniesiono rozkład zmian zawartości tlenu dla 2 zmodyfikowanych procedur płukania nurków *Alfa* i *Bravo* dla  $Nx 0,4$ . Obserwacje wskazują na występujące różnice przed i po zmianie procedury płukania. W przypadku nurka *Bravo* otrzymany rozkład danych pomiarowych wskazuje na uzyskanie wyższej stabilnej zawartości tlenu w worku oddechowym.



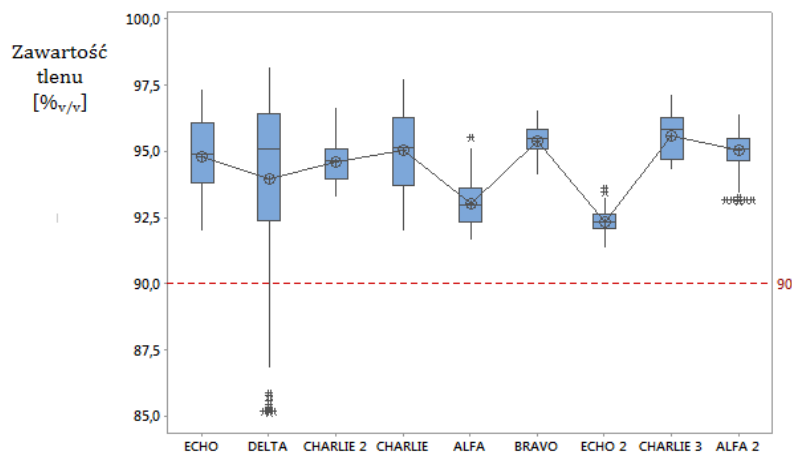
Rys. 9 Parametry składu czynnika oddechowego w worku oddechowym aparatu  $Nx - SCC CRABE$  dla  $n=2$  nurków dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,4 mol \cdot mol^{-1}$ , w czasie płukania przestrzeni oddechowej w fazie dekompresji z użyciem tlenu  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$ , przed i po modyfikacji procedury płukania. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

Rozkłady dla poszczególnych modyfikacji procedury płukania przedstawiono na rys. 10. Rozkłady posiadają różny kształt a w niektórych przypadkach można zidentyfikować szereg pomiarów odstających<sup>30</sup>. Większość z nich wykazuje znaczną asymetrię za wyjątkiem rozkładu *Bravo*.



Rys.10 Diagram punktowy rozkładu danych pomiarowych stabilnej zawartości tlenu w worku oddechowym po zakończeniu płukania przestrzeni oddechowej w fazie dekompresji tlenem  $x_{O_2} = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  oraz  $x_{O_2} = 0,325 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

Na rys. 11. naniesiono zmiany położenia wartości średniej  $\bar{x}$  poszczególnych rozkładów stabilnej zawartości tlenu po zakończonym procesie przepłukania aparatu. Obserwacje pozwalają na poszukiwanie przyczyn deterministycznych występujących różnic w kontekście modyfikacji zmiennych wejściowych i parametrów procesu. Uzyskane rozkłady empiryczne potwierdzają, że najlepsze właściwości reprezentuje rozkład *Bravo*. Potwierdza to wstępnie uzyskanie oczekiwanego kierunku zmian. Prowadząc wnioskowanie należy zwrócić uwagę na porównanie ich dla tego samego rodzaju mieszaniny *premixowej*, gdyż naturalnym jest korzystne przesunięcie wartości średnich zawartości tlenu  $\bar{x}_{O_2}$  w fazie dekompresji w przypadku *premixu* o większym udziale tlenu. W takim przypadku zawartość stabilna tlenu przed rozpoczęciem płukania przestrzeni oddechowej aparatu w czasie pobytu na dnie jest wyższa – zatem i proces płukania jest bardziej efektywny.



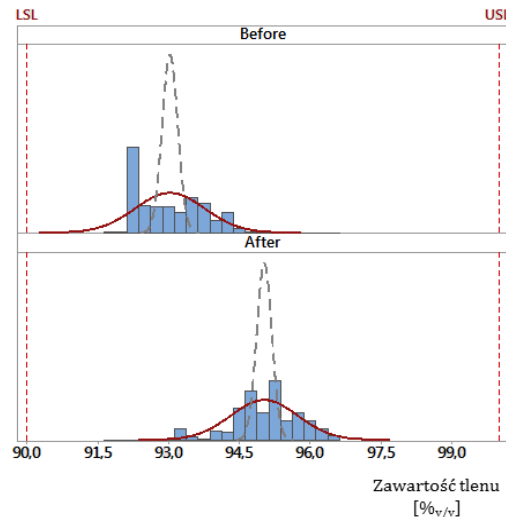
Rys. 11 Rozkład wartości  $\bar{x}$  pomiarów, dolny i górny kwartyl, zakres zmienności pomiarów i punkty odstające stabilnej zawartości  $O_2$  w worku oddechowym po zakończeniu przepłukania przestrzeni oddechowej aparatu tlenem  $x_{O_2} = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  oraz  $x_{O_2} = 0,325 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Rozkład  $n = 6$  procedur płukania aparatu tlenem na głębokości dekompresji od  $h = 12 - 15 \text{ mH}_2\text{O}$ . Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

Dla porównania charakteru zachodzących zmian, na rys. 12 przedstawiono histogram pomiarów  $O_2$  w worku oddechowym *SCR CRABE* dla dwóch nurkowań tego samego nurka oznaczonych jako *Alfa* i *Alfa 2* (adekwatnie: przed i po modyfikacji) procedury płukania aparatu nurkowego. Wykazano, że wartość średnia procesu  $\bar{x}_{O_2}$  uległa korzystnemu i istotnemu przesunięciu w kierunku wyższych wartości stężeń tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu dla przyjętego  $(1 - \alpha = 0,95)$  i liczby stopni swobody  $n > 100$ . Odchylenie standardowe analizowanych rozkładów porównawczych nie zostało w sposób istotny zredukowane. Rozkład zmienności procesu w obu przypadkach znajduje się w ustalonych granicach tolerancji.

Rozkład przed modyfikacją jest bardziej przesunięty w kierunku dolnej granicy tolerancji  $LCL^{31} = 90\%_v O_2$ . Takie zachowanie nie jest sprzyjające dla przyjętych wcześniej założeń dekompresyjnych, gdyż możliwość obniżenia oczekiwanej stabilnej zawartości tlenu w kierunku zbliżonym do dolnej granicy, może wywołać negatywny wpływ na skuteczności prowadzonej dekompresji. Z rozkładu po modyfikacji wynika, że istnieje potencjalna możliwość osiągnięcia wyższej zdolności

procesu po identyfikacji czynników deterministycznych wpływających na jego przesunięcie oraz niestabilność<sup>32</sup> Redukcja zmienności i rozproszenia jest istotna z punktu widzenia zdolności procesowej, a zatem i jego utrzymania w pobliżu oczekiwanych wartości nominalnej<sup>33</sup> w kontrolowanych granicach. Z przedstawionych rozkładów rys. 9 należy wnioskować, że modyfikacja procedury polegająca na wprowadzeniu 4-krotnego płukania tlenem aparatu powoduje istotne zmiany w zachowaniu procesu przepłukania aparatu wykonanego przez tego samego nurka z użyciem takiej samej mieszaniny premiksowej.

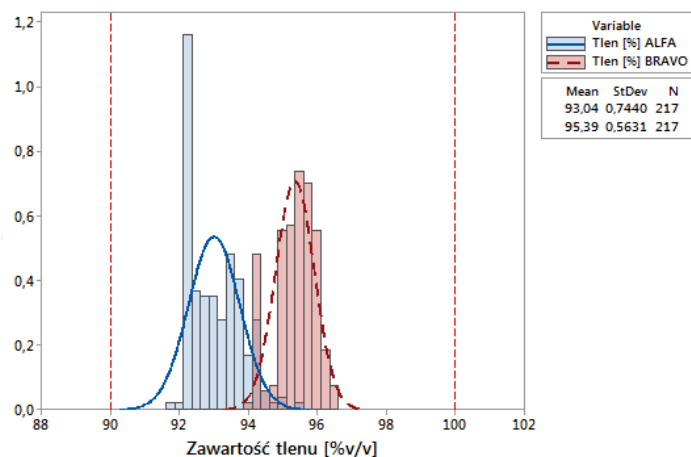
Po identyfikacji i wyeliminowaniu występujących przyczyn deterministycznych zakłócających rozpatrywany proces istnieje możliwość dalszej poprawy jego zdolności. Możliwość poprawy uwidacznia różnica pomiędzy zmiennością potencjalną i obserwowaną<sup>34</sup> rys. 12.



Rys. 12 Rozkład empiryczny pomiarów  $O_2$  w worku oddechowym względem granic tolerancji procesu ( $DGT x_{O_2} = 90\%_{v/v}$   $n = 25$ ,  $GGT = 100\%_{v/v}$ ) po zakończeniu płukania przestrzeni oddechowej tlenem  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$  dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,4 mol \cdot mol^{-1}$  przed i po wprowadzeniu zmian procesu przepłukania aparatu nurkowego. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

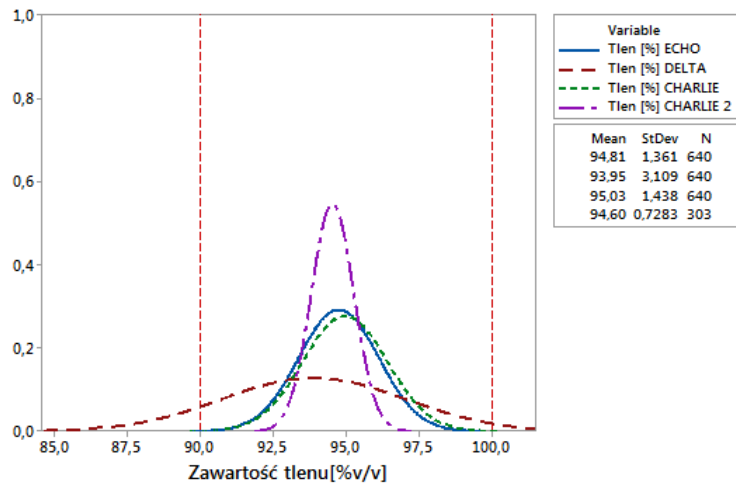
Na rys. 13 przedstawiono histogram danych pomiarowych zawartości tlenu w *SCR CRABE* dla nurków *Alfa*<sup>35</sup> i *Bravo*. Rozkład wskazuje na możliwość utrzymania stabilnego rozkładu zawartości tlenu w zdefiniowanych granicach tolerancji, a zatem uzyskania lepszej odpowiedzi analizowanego procesu po modyfikacji danego parametru<sup>36</sup>. Uzyskany rozkład zmienności posiada najwyższą  $\bar{x}_{O_2}$  po wykonaniu procedury płukania przestrzeni oddechowej tlenem. Zmiany przebiegu są zbliżone do rozkładów przedstawionych na rys. 12.

W obu przypadkach wykazano istotne różnice zdolności<sup>37</sup> analizowanego procesu. Jak wiadomo, na każdy proces wpływają różne czynniki zależne i niezależne, które mogą zakłócać jego przebieg gdy mają one charakter wyłącznie losowy można stwierdzić, że proces jest stabilny i pod kontrolą. Pomimo uzyskania poprawy<sup>38</sup> nie można stwierdzić, aby zidentyfikowano wszystkie przyczyny deterministyczne zakłócające jego przebieg. Uzyskane dane stanowią jedynie podstawę do dalszych badań i muszą zostać potwierdzone. Wnioskowanie deterministyczne prowadzono na podstawie badań empirycznych, gdyż na nie ma wystarczających podstaw<sup>39</sup> do wnioskowania statystycznego.

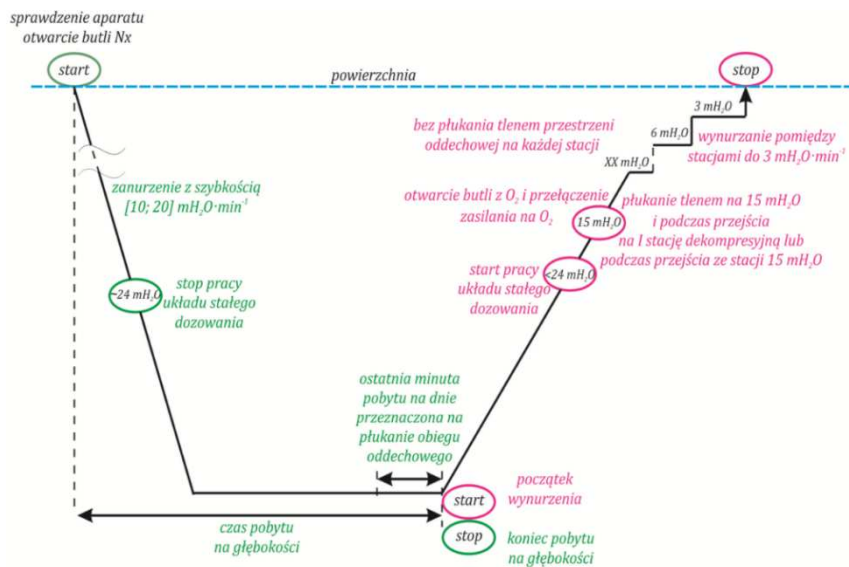


Rys. 13 Histogram rozkładu empirycznego pomiarów  $O_2$  w worku oddechowym z granicami tolerancji ( $DGT x_{O_2} = 90\%_{v/v}$   $n = 25$ ,  $GGT = 100\%_{v/v}$ ) po zakończeniu płukania przestrzeni oddechowej tlenem  $x_{O_2} = 1,0 mol \cdot mol^{-1}$  dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,4 mol \cdot mol^{-1}$ . Wariant VI płukania. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

W celu obserwacji zachodzących zmian wynikających z wprowadzenia modyfikacji parametru  $p$  – procedury przepłukania tab. 4, uzyskane wybrane rozkłady zmienności ujawniające istotne różnice na etapach pośrednich implementacji zmian procesowych naniesiono na rys. 14. Rozkłady uwidaczniają zmianę ich charakteru w zakresie położenia wartości średniej zawartości tlenu  $\bar{x}_{O_2}$  oraz odchylenia standardowego próby względem wyznaczonych granic procesu.



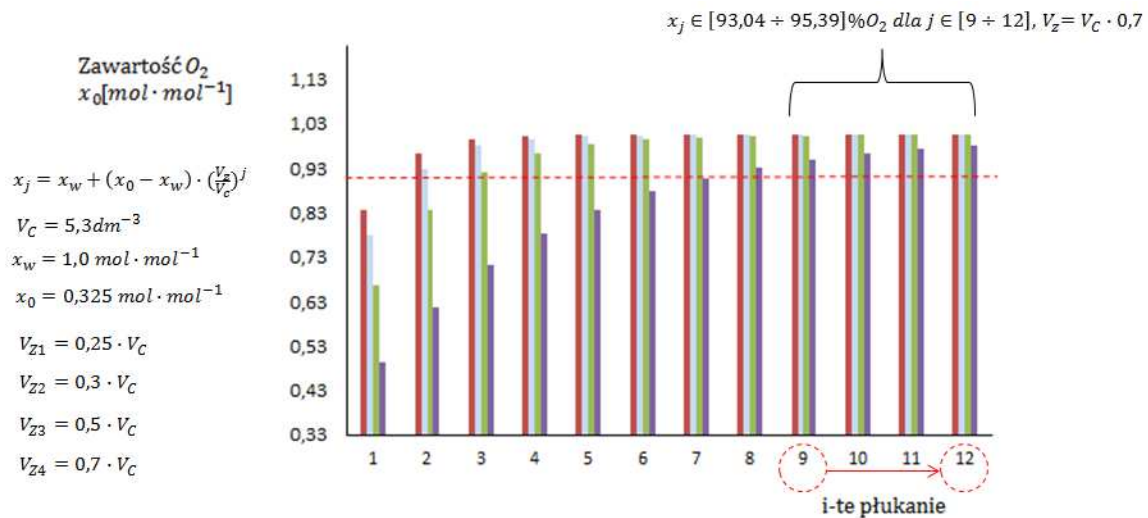
Rys. 14 Rozkład empiryczny pomiarów  $O_2$  w worku oddechowym z granicami tolerancji ( $DGT x_{O_2} = 90\%_{v/v}$ ,  $n = 25$ ,  $GGT = 100\%_{v/v}$ ) po zakończeniu płukania przestrzeni oddechowej tlenem  $x_{O_2} = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  dla nitroksu  $x_{O_2} = 0,325 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Wariant I – V płukania tab. 4. Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.



Rys. 15 Zmodyfikowany proces płukania dla premiksowej mieszaniny nitroksowej, zasada zasilania i wentylacji przestrzeni oddechowej SCR CRABE. Źródło: wyniki badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

W konsekwencji do dalszych badań zaproponowano przedstawiony na rys. 15 zmieniony algorytm postępowania dla procedury przepłukania SCR Crabe tlenem zgodny z rozkładem Bravo. W wyniku ewaluacji procesu w trakcie realizacji zadania projektowego dokonano znacznych modyfikacji procedur wynikających zarówno z prowadzonego wnioskowania jak i potrzeb operacyjnych prowadzenia podwodnych działań minerskich<sup>40</sup>.

Na podstawie otrzymanych rozkładów można stwierdzić, że istnieje możliwość osiągnięcia wyższej niż wartość krytyczna  $CTQ^{41} C_{O_2 \text{ min}} = 90\%_{v}$  dla stabilnej minimalnej zawartości tlenu w granicach  $C_{O_2} \in [93,04 \div 95,39]\%_{v}$ . Wymaga to zgodnie z procedurą wykonania co najmniej  $n = 9 \div 12$  płukań układu oddechowego aparatu. Potwierdzają to przedstawione na rys. 16 obliczone teoretyczne zawartości tlenu w worku oddechowym w funkcji  $i$  – tego płukania tlenem. Wykres opracowano dla różnych stosunków objętości całkowitej do zalegającej w przestrzeni oddechowej aparatu  $V_Z/V_C$ .



Rys. 16 Skład czynnika oddechowego  $x_j$  w worku oddechowym aparatu  $Nx - SCR CRABE$  w funkcji  $i - te$ go płukania przestrzeni oddechowej tlenem dla różnych  $V_z/V_C$ . Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań Nr: DOBR-BIO8/09/01/2016.

## WNIOSKI

Kierunki dalszych badań to kontynuacja wykonywania pomiarów procesu płukania aparatu i utrzymywania stabilnej zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej *SCR CRABE*. Weryfikacją trwałego charakteru zmian dla zmodyfikowanego procesu płukania tlenem *SCR CRABE* należy prowadzić w oparciu o uzyskane wyniki badań eksperymentalnych  $x_j \geq x_{j,min} \in [93,04 \div 95,39]\%v$  oraz dalszą eksplorację i analizę danych, ocenę zmienności i stabilności nadzorowanego procesu. Stabilna zawartość tlenu w przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego musi zapewniać podtrzymanie funkcji życiowych organizmu nurka w określonych warunkach nurkowania oraz spełniać krytyczne wymagania dla projektowanej dekompresji ze względu na minimalizację ryzyka związanego z zagrożeniem *DCS*. Dekompresję zaprojektowano dla systemu *II*<sup>42</sup> nurkowań nitroksowych wg NO-07-A010 redundantnie<sup>43</sup> uwzględniając nadmiarowość wynikająca z niedoszacowania minimalnej zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej.

Mając na uwadze fakt, że opracowana technologia przeznaczona jest do wykonywania nurkowań punktowych, w warunkach uwzględniających wykonywanie wysiłku pod wodą należy rozważyć możliwość implementacji dodatkowych systemów zabezpieczających, zarówno w formie prostej, jak i w postaci systemów wyposażonych w systemy sensoryczne, ekspertowe<sup>44</sup> i akulatory<sup>45</sup>. W układach oddechowych aparatów nurkowych implementacja takich rozwiązań spełnia rolę informacyjną w zakresie aktualnej koncentracji lub ciśnienia cząstkowego tlenu. Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia zapobiegania hipoksji (niedotlenieniu) oraz zagrożeń wynikających z oddziaływania toksycznego tlenu na organizm nurka<sup>46</sup> w czasie pobytu na dnie i podczas dekompresji. Technologie nurkowania do zastosowań militarnych<sup>47</sup> akceptują większy poziom ryzyka wykonywania podwodnych działań<sup>48</sup>, niż np. technologie przeznaczone do nurkowań cywilnych lub rekreacyjnych. Zatem ze względów operacyjnych mogą one akceptować wyższe wartości maksymalne ciśnienia parcjalego tlenu oraz dłuższe czasy ekspozycji.

Zastosowane w celu kontroli parametru systemy wskaźnikowe, mogą informować operatora poprzez sygnalizację ostrzegawczą o przekroczeniu ustalonej wartości progowej koncentracji tlenu na każdym etapie nurkowania. Monitoring procesu, z punktu widzenia możliwości minimalizacji jego zmienności, powinien być zorientowany na pomiar wartości procesowych, które na etapie nurkowania i dekompresji pozwalałyby na kontrolę efektywności przepłukania. Stosunkowo niewielkiego nakładu wymaga implementacja sensorycznych systemów analitycznych zorientowanych na parametry wyjściowe procesu. Istnieje możliwość prowadzenia monitoringu *online* przestrzeni oddechowej aparatu, poprzez dostępne wyspecjalizowane systemy pomiarowe. Ze względów bezpieczeństwa<sup>49</sup> wykonywania podwodnych działań minerskich należy to rozważyć szczególnie w czasie nurkowań na średnich i dużych głębokościach oraz przy długich czasach pobytu na dnie. Przed zastosowaniem ewentualne zabezpieczające systemy sensoryczne<sup>50</sup> powinny zostać poddane ocenie zdolności systemu pomiarowego<sup>51</sup> w zakresie oszacowania własności metrologicznych oraz stabilności względem wyznaczonych granic tolerancji procesu.

Publikując niniejszy materiał chciałbym serdecznie podziękować kierownikowi projektu Panu profesorowi AMW – dr hab. inż. Ryszardowi KŁOSOWI, za możliwość współpracy i uczestnictwa w realizacji niniejszego zadania projektowego. Pragnę równocześnie podziękować wszystkim współpracownikom z grupy realizującej badania a w szczególności – Panu dr med. Maciejowi KONARSKIEMU odpowiedzialnemu za realizację nadzoru i zabezpieczenia medycznego projektu oraz kierownikowi nurkowań eksperymentalnych Panu mgr Romanowi SZYMAŃSKIEMU, których praca, zaangażowanie oraz profesjonalizm w wykonywaniu badań były inspiracją do napisania niniejszego artykułu.

## LITERATURA

1. Dz.Urz.MON Nr 6 poz. 44. Decyzja Nr 75/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 01 kwietnia 2005 roku. Instrukcja o wprowadzaniu do Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej uzbrojenia i sprzętu wojskowego oraz wycofywaniu uzbrojenia i sprzętu nieodpowiadającego wymaganiom wojska. Warszawa : MON, 2005;
2. AMP-15. Standards for Naval Mine Warfare Acoustic Measurements - STANAG 1097 /1418/ 1431. Bruksela : NSO, 2013;
3. AODP-07 EOD. Equipment requirements and equipment - STANAG 2897. Bruksela : NSO, 2007;
4. Polecenie Nr 106. Szefa Inspektoratu Wsparcia Sił Zbrojnych z dnia 17 listopada 2010r.w sprawie wprowadzenia do SZRP Apartu nurkowego mieszaninowego CRABE. brak miejsca : IWSZ, 2010;
5. Kłos R. Konarski M. Szymański R. Woźniak A. Tymczasowe wytyczne do prowadzenia nurkowań nitroksowych z możliwością dekompresji tlenowej dla aparatu nurkowego CRABE (INSTUKCJA ver. 4.11 – 12.05.2011r.). Gdynia : ZTPP AMW, 2011;
6. NO-07-A010. Nurkowanie w celach ilitarnych. Nurkowanie z wykorzystaniem nitroksu. Wymagania. Warszawa : WCNJK, 2011;
7. R. Kłos. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu Crabe. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0;
8. —. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu Amphora. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2012. ISBN 978-83-924989-8-8;
9. NO-07-A118. Nurkowanie w celach militarnych. Terminologia i klasyfikacja. Warszawa : WCNJK, 2015;
10. NO-07-A057:2003. Nurkowanie w celach militarnych – Niszczenie min przez pletwonurków minerów w działaniach przeciwminowych. Warszawa : WCNJK, 2003;
11. R. Kłos. System trimiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu Crabe. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5;
12. List Intencyjny. pomiędzy Ministrem Obrony Narodowej Rzeczypospolitej Polskiej a Ministrem Obrony Republiki Francuskiej Dotyczący Wzmocnienia Współpracy w Dziedzinie Morskiej. Warszawa : MON, 2013;
13. R. Kłos. Dekompresja stanardowa. Tymczasowe wytyczne do prowadzenia dekompresji trimiksowej Tx dla aparatu nurkowego typu Crabe. Gdynia : ZTPP AMW, 2018.

## dr inż. Arkadiusz Woźniak

Katedra Technologii Prac Podwodnych  
Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni  
ul. Śmidowicza 69  
81-103 Gdynia  
tel. 261262746  
ar.wozniak@amw.gdynia.pl

<sup>1</sup> SCR – ang. semi - closed rebreather,

<sup>2</sup> brak części zamiennych, wysokie koszty dostaw, brak zestawu zasilania awaryjnego, technologia nurkowania i parametry *U*i*S*W** nie spełniające oczekiwań SZRP po wejściu do NATO,

<sup>3</sup> Instrukcja o wprowadzaniu do Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej uzbrojenia i sprzętu wojskowego oraz wycofywaniu uzbrojenia i sprzętu nieodpowiadającego wymaganiom wojska", Decyzja Nr 75/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 1 kwietnia 2005 r. (Dz. Urz. MON Nr 6, poz. 44 oraz z 2006 r. Nr 407, poz. 251),

<sup>4</sup> Poleceniem Nr 106 Szefa Inspektoratu Wsparcia Sił Zbrojnych z dnia 17 listopada 2010 roku,

<sup>5</sup> AMP-15 Standards for Naval Mine Warfare Acoustic Measurements - STANAG 1097 /1418/ 1431,

<sup>6</sup> AODP-07 EOD Equipment requirements and equipment - STANAG 2897,

<sup>7</sup> analogicznie jak np. opracowane wcześniej dla aparatów: FGT I/D, OXY-NG, AMPHORA itp.,

<sup>8</sup> ang. *mine countermeasure, MCM* – obrony przeciwminowej,

<sup>9</sup> ang. *explosive ordnance disposal, EOD*-niszczenie amunicji wybuchowej - wykrywanie, identyfikacja, ocena na miejscu, rozbrajanie, odzyskiwanie i niszczenie niewybuchów. Może również dotyczyć amunicji wybuchowej, która stała się niebezpieczna ze względu na uszkodzenie lub obniżenie jakości,

<sup>10</sup> przepisy bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych w SZRP,

<sup>11</sup> Narodowe Centrum Badań i Rozwoju,

<sup>12</sup> podwodne działania minerskie - czynności związane z poszukiwaniem, identyfikacją pod wodą wszelkich przedmiotów wybuchowych i niebezpiecznych w tym związane z przenoszeniem ich na powierzchnię lub niszczeniem za pomocą materiałów wybuchowych, a także rozbrajaniem, neutralizacją ich pod wodą lub na powierzchni w czasie nurkowania i prac podwodnych,

<sup>13</sup> realizowany w latach: 2012÷ 201,

<sup>14</sup> ang. *maximum operating depth, MOD*= 60m H<sub>2</sub>O - maksymalna głębokość operacyjna głębokość wyrażona w metrach słupa wody równoważna ciśnieniu maksymalnemu, dla którego system nurkowy został zaprojektowany,

<sup>15</sup> wynikających z systemu I nurkowań nitroksowych opartego na wykorzystaniu EAD,

<sup>16</sup> kontekst rozumiany jest tutaj jako otoczenie systemowe, czyli nadsystem dla systemu wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego,

<sup>17</sup> oprócz monitorowania innych istotnych parametrów przebiegu nurkowania,

<sup>18</sup> wynikających z przyjętych założeń dekompresyjnych,

<sup>19</sup> w tym przypadku tlenem,

<sup>20</sup> CNS - ang. *Central Nervous System*,

<sup>21</sup> w tym przypadku mieszaniny nitroksowej,

<sup>22</sup> w zakresie ilości wykonanych cykli i krotności wykonanych powtórzeń,

<sup>23</sup> dla rozkładu dekompresji,

<sup>24</sup> procedury płukania aparatu:

1. Procedury nurkowania z aparatem oddechowym Crabe AQUALUNG Nice 2010.
2. Technologia nurkowania Marynarki Francuskiej FN La Cellule Plongée Humaine et Intervention Sous la Mer (CEPHISMER).
3. Kłos R. Konarski M. 2011. Tymczasowe wytyczne do prowadzenia nurkowań nitroksowych z możliwością dekompresji tlenowej dla aparatu nurkowego CRABE (INSTUKCJA ver. 4.11 – 12.05.2011r.). Gdynia : ZTPP AMW, 2011.
4. Kłos R. 2011. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE. Gdynia 2011: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej; ISBN 978-83-924989-4-0.
5. Kłos R. System trimiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE: Gdynia 2016: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej; ISBN 978-83-938322-5-5.

<sup>25</sup> XBS - ang. External Breathing System,

<sup>26</sup> 32,5%v O<sub>2</sub>,

<sup>27</sup> obrazujące poszczególne etapy płukania aparatu,

<sup>28</sup> 40%v O<sub>2</sub>,

<sup>29</sup> tzw. *primery*,

<sup>30</sup> *outliers*,

<sup>31</sup> *LCL*-ang. Lower Control Level,

<sup>32</sup> którą można ujawnić również za pomocą kart kontrolnych po dopasowaniu odpowiedniego rozkładu np. *Weibulla*,

<sup>33</sup> im wyższa zawartość tlenu w fazie dekompresji tym skuteczniejszy proces desaturacji gazów obojętnych z organizmu nurka,

<sup>34</sup> krótko i długoterminową,

<sup>35</sup> przed zmianą procedury,

<sup>36</sup> modyfikacja procedury przepłukania aparatu,

<sup>37</sup> stabilności i wycentrowaniu względem wartości nominalnej,

<sup>38</sup> po identyfikacji i modyfikacji tylko jednego parametru,

<sup>39</sup> nie zgromadzono wystarczającej ilości rozkładów elementów próby. Próba nie jest reprezentatywna,

<sup>40</sup> np. ograniczenie ilości wykonywania procedur przepłukania przestrzeni oddechowej aparatu w trakcie pobytu na dnie w celu minimalizacji sygnału akustycznego na czas realizacji zadania,

<sup>41</sup> CTQ - ang. Critical to Quality,

<sup>42</sup> jest to system oparty na stałym określonym składzie mieszaniny nitroksowej odpowiadającej maksymalnej głębokości nurkowania. Dla tego systemu opracowuje się tabele dekompresji z odpowiadającymi im składami nitroksu,

<sup>43</sup> nadmiarowo,

<sup>44</sup> np. zastosowanie systemu komputerowego, który emuluje proces podejmowania decyzji przez człowieka,

<sup>45</sup> elementy wykonawcze,

<sup>46</sup> tlenowa toksyczność płucna i mózgową,

<sup>47</sup> technologie do zastosowań militarnych zakładają istnienie efektywnego nadzoru nad doбором i wytrenowaniem nurków np. mcm/eod. ponadto uwzględniają podstawowe wytyczne do kwalifikacji, przygotowania i utrzymania w kondycji nurków, dla których technologia nurkowania jest przeznaczona

<sup>48</sup> inżynierskich, ratowniczych, bojowych lub minerskich,

<sup>49</sup> Rozporządzenie Ministra Obrony Narodowej z dnia 21 czerwca 2012 roku w sprawie bezpieczeństwa wykonywania prac podwodnych w jednostkach organizacyjnych podległych lub nadzorowanych przez ministra obrony narodowej (dz.u. nr 1 poz. 810 z późn. zm.),

<sup>50</sup> o ile dotychczas nie zostały wykonane,

<sup>51</sup> *MSA* - ang. measurement system analysis,