

UZDATNIANIE POWIETRZA ODDECHOWEGO DO CELÓW HIPERBARYCZNYCH

Artur Woźniak

Zakład Technologii Prac Podwodnych, Akademii Marynarki Wojennej

STRESZCZENIE

Określenie skuteczności oczyszczania powietrza oddechowego, przeznaczonego do stosowania w celach hiperbarycznych, poprzez zastosowanie systemów filtracji, jest istotne zarówno z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia. Jakość powietrza oddechowego oraz otrzymywanych na jego bazie mieszanin oddechowych, ma kluczowe znaczenie ze względu na bezpieczeństwo nurków. Paradoksalnie, zmiana przepisów dotyczących wymagań jakościowych dla czynników oddechowych, wymusiła konieczność weryfikacji bazy technicznej i laboratoryjnej wykorzystywanej do ich produkcji i weryfikacji. W niniejszym materiale przedstawiono zarys tej problematyki, począwszy od przyczyn i zdiagnozowania sytuacji po wejściu nowych przepisów, po wybór kierunku niezbędnych działań korygujących. Skutki ich realizacji będą przedmiotem kolejnej publikacji.

Słowa kluczowe: technologia prac podwodnych, inżynieria morska, nurkowe czynniki oddechowe.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2014 Vol. 48 Issue 3 pp. 49 – 58

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

DOI: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.4](http://dx.doi.org/10.13006/PHR.48.4)

Strony: 10, rysunki: 4, tabele: 3.

page www of the periodical: www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 29.06.2014 r

Termin zatwierdzenia do druku: 17.07.2014 r

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Jakość powietrza oddechowego ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa nurka, w trakcie wykonywania prac podwodnych. W warunkach podwyższonego ciśnienia otoczenia p_h przy założeniu, że nie zmienia się zawartość danego składnika (C_v) w czynniku oddechowym, ciśnienie cząstkowe p_i poszczególnych składników powietrza oddechowego wzrasta.

Powyższe zjawisko dotyczy wszystkich składników powietrza, zarówno pochodzenia naturalnego (np. CO, CO₂, H₂O), jak i pochodzących od źródeł zasilania (np. węglowodory aromatyczne) i systemów wytwarzania powietrza oddechowego. Poniżej przedstawiono zależności (1.1÷1.4), które odzwierciedlają zachowanie się składników powietrza oddechowego w warunkach podwyższonego ciśnienia.

$$p_h \uparrow = p_c \uparrow \quad (1.1)$$

$$C_v = \text{const} \rightarrow p_i = f(p_c) \quad (1.2)$$

$$X_i = \frac{C_v}{100\%} \quad (1.3)$$

$$p_i = p_c \cdot X_i \quad (1.4)$$

gdzie:

p_i - ciśnienie cząstkowe i-tego składnika mieszaniny gazowej [Pa],

p_h - ciśnienie hydrostatyczne [Pa],

p_c - ciśnienie całkowite mieszaniny gazowej [Pa],

X_i - ułamek molowy i-tego składnika mieszaniny [mol/mol],

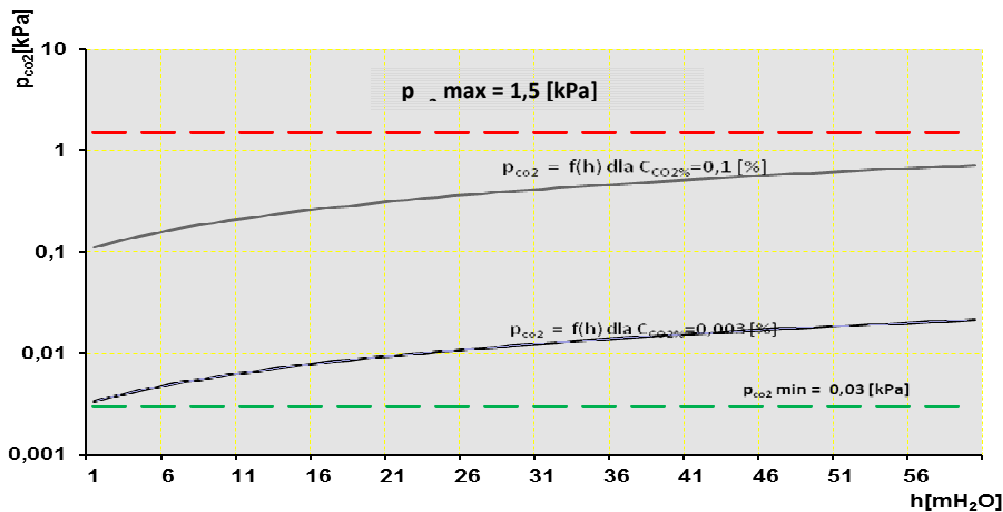
C_v - stężenie procentowe i-tego składnika w mieszaninie gazowej [%].

Z punktu widzenia wpływu fizjologicznego, zanieczyszczenia powietrza oddechowego mają kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa nurka pod wodą oraz w trakcie ekspozycji w obiektach hiperbarycznych [1,2].

Jak wspomniano powyżej, wraz ze wzrostem głębokości, ze względu na ciśnienie parcjalne danego rodzaju niepożądanych zanieczyszczeń czynnika oddechowego, zwiększa się wpływ negatywnego oddziaływania gazów na organizm nurka.

Dopuszczalna zawartość danego składnika (np. CO₂), zgodnie z zależnością (1.4), już na głębokości 10m jest o połowę mniejsza, niż w warunkach normobarycznych (dla ciśnienia atmosferycznego). Porównując tą samą zawartość (CO₂) w czynniku oddechowym należy stwierdzić, że na głębokości 90m jest już ona dziesięciokrotnie mniejsza.

W celu zobrazowania zasadniczych zmian zachodzących pod zwiększonym ciśnieniem, dla określonego stężenia C_{CO_2} w czynniku oddechowym, poniżej przedstawiono wpływ (na rys. 1) zmian ciśnienia hydrostatycznego na ciśnienie parcjalne p_{CO_2} .



Rys. 1. Wpływ zmiany ciśnienia hydrostatycznego na ciśnienie parcjalne CO₂.

Na wykresie powyżej rozpatrzono przypadek, gdzie stężenie pierwotne CO₂ w powietrzu oddechowym dla nurka, w jednym przypadku wynosi C_{CO2}=0,003[%] czyli jest w granicach dopuszczalnej normy, natomiast w drugim przypadku stężenie pierwotne wynosi C_{CO2}=0,1[%], czyli znacznie przewyższa ustalone wymaganiami normatywnymi kryteria progowe [3].

Za graniczną, dopuszczalną wartość ciśnienia parcjalego CO₂, dla warunków hiperbarycznych, zgodnie z obowiązującymi przepisami, przyjęto wartość p_{CO2}=1,0[kPa] [4]. Różnica pomiędzy stężeniami wejściowymi wynosi tylko 0,07[%], pomimo tego, w drugim przypadku ciśnienie parcjale CO₂, przy głębokości nurkowania (około 60m H₂O), zbliża się niebezpiecznie do dozwolonej granicy, określonej dla CO₂. W pierwszym przypadku, osiąga P_{CO2}=0,709[kPa] natomiast w drugim P_{CO2}=0,021[kPa], co jest wartością około 33 razy mniejszą.

W warunkach nurkowania, czynnik po rozprężeniu w drugim stopniu automatu oddechowego, jest podawany nurkowi pod ciśnieniem odpowiadającym głębokości nurkowania. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych zawartości domieszki szkodliwej (np. CO₂), w takim czynniku oddechowym może powstać sytuacja, w której nurkowi podawany jest oddziaływujący toksycznie na jego organizm gaz oddechowy.

Sytuacja ta może bezpośrednio przyczynić się do zaistnienia wypadku. Patogeneza takich sytuacji została dość szeroko opisana w literaturze, na przykład w pozycjach autorstwa prof. Olszańskiego [1].

A zatem, jakość czynnika oddechowego ma istotny wpływ na standard bezpieczeństwa nurkowania, a dbałość o zachowanie tej jakości jest ważnym elementem profilaktyki unikania wypadków nurkowych.

PODSTAWOWE WYMAGANIA DLA JAKOŚCI CZYNNIKÓW ODDECHOWYCH

Zawartości domieszek szkodliwych w czynniku oddechowym, powinny być zgodne z określonymi wymaganiami jakościowymi, które określono w przepisach normatywnych [3].

Przepisy precyzują szczegółowo wymagania jakościowe dla gazów czystych i mieszanin oddechowych, stosowanych w pracach podwodnych. Ogólnie należy przyjąć, że powietrze dla nurków nie powinno:

- zawierać substancji szkodliwych;
- mieć żadnego zapachu;
- zawierać żadnych zanieczyszczeń pyłowych;
- zawierać domieszek szkodliwych większych niż określone w tabeli 1.

W tabeli 1 przedstawiono wymagania dla powietrza oddechowego, zgodnie z wymaganiami określonymi w NO-07-A005:2010.

Zawartość poszczególnych domieszek szkodliwych, określa maksymalną dopuszczalną wartość danego zanieczyszczenia, która nie powoduje negatywnego oddziaływania fizjologicznego na nurka, pod warunkiem zastosowania powietrza, w ramach dopuszczalnego zakresu głębokości (p_{CO2}<160kPa).

Wylimowanie niepożądanych zanieczyszczeń, poprzez proces filtracji na etapie produkcji powietrza oddechowego do akceptowalnego poziomu, powoduje wylimowanie czynnika oddechowego jako potencjalnego zagrożenia, mogącego być przesłanką do zaistnienia wypadku nurkowego.

Przedstawione w tabeli 1 wymagania jakościowe odniesiono dla dwóch klas powietrza. Klasa pierwsza jest przeznaczona do nurkowania oraz stosowania jako komponent do przyrządzania mieszanin oddechowych - dwu- i trójskładnikowych. Klasa druga powietrza odpowiada tylko wymaganiom w zakresie jego zastosowania do nurkowania i wykonywania prac podwodnych.

Przedstawione poniżej wymagania to aktualnie obowiązujące przepisy.

Tab. 1

Wymagania dotyczące czystości powietrza [3].

Lp.	Składniki podstawowe i domieszki szkodliwe	Zawartość wymagana lub dopuszczalna		Dopuszczalny względny błąd oznaczenia zawartości dopuszczalnej
		Kl. II	Kl. I	%
1.	Tlen, w % ¹	20 - 22	20 - 22	0,5
2.	Azot, w %	78 - 80	78 - 80	0,5
3.	Gazy szlachetne, w %, nie więcej niż	0,9	0,9	nie oznacza się
4.	Dwutlenek węgla, w %, nie więcej niż	0 - 0,05	0 - 0,01	5
5.	Tlenek węgla, w ppm ² , nie więcej niż	10	3	20
6.	Tlenki azotu, w ppm, nie więcej niż	1,0	0,5	20
7.	Pary węglowodorów w przeliczeniu na CH ₄ , w mg/m ³ , nie więcej niż	5,0	1,0	10
8.	Para wodna, w zależności od ciśnienia sprężania:			
	do 20 MPa, w mg/m ³ nie więcej niż	50	35	10
	od 20 MPa do 30 MPa, w mg/m ³ , nie więcej niż	30	20	10
9.	Pył o wymiarach drobiny do 5 μm	brak	brak	oznaczenie
10.	Zapach	bez zapachu	bez zapachu	-

UWAGA 1 Wszystkie wartości odnoszą się do warunków normalnych, tj. ciśnienia atmosferycznego równego 101,3 kPa i temperatury otoczenia równej 20°C.

SYTUACJA PROBLEMOWA

Wejście Sił Zbrojnych RP w 1999 roku do paktu NATO, wymusiło konieczność zapewnienia wzajemnego współdziałania wojskowych ekip nurkowych. Polega to na przykład na zagwarantowaniu przez polskie jednostki wsparcia logistycznego odpowiedniej jakości czynnika, zgodnego ze standardami NATO dla amerykańskiej ekipy nurkowej, wykonującej wspólne działania.

W związku z powyższym, istotnym warunkiem zapewniającym kompatybilność wymaga jakościowych dla czynników oddechowych, było dostosowanie krajowych przepisów do wymaga obowiązujących w ramach NATO. To spowodowało konieczność wdrożenia w Polsce przepisów obowiązujących w strukturach paktu, np. STANAG-u 1458¹ dotyczącego czynników oddechowych.

W tabeli 2 przedstawiono różnice pomiędzy nowo wprowadzonymi w kraju przepisami (NO), wymaganiami NATO (STANAG) i obowiązującymi przed wejściem do NATO przepisami (PN-W).

Tab. 2.

Wymagania jakościowe dla powietrza oddechowego dla nurków.

LP	Wymaganie normatywne	Składniki podstawowe i domieszki szkodliwe						
		O ₂ [%]	CO ₂ [%]	CO [ppm]	H ₂ O [mg/m ³]	NO, NO ₂ [ppm]	Pary węglowodorów w przeliczeniu na CH ₄ [mg/m ³]	Gazy szlachetne [%]
1.	NO-07-A010:1999 kl.II	20÷21	0,03÷0,05	30	50 ¹ 30 ²	1,0	5,0	0,9
2.	NO-07-A010:1999 kl.I	20÷21	0÷0,01	20	35 ¹ 20 ²	0,5	1,0	0,9
3.	NO-07-A010:2010 kl.II	20÷22	0÷0,05	10	50 ¹ 30 ²	1,0	5,0	0,9
4.	NO-07-A010:2010 kl.I	20÷22	0÷0,01	3	35 ¹ 20 ²	0,5	1,0	0,9
5.	PN-W - 88503 kl.I	<21	0÷0,6	30	50 ¹ 30 ²	1,0	1,0	0,9
6.	PN-W - 88503 kl.II	<21	0÷0,01	20	35 ¹ 25 ²	0,5	0,5	0,9
7.	STANAG 1458 kl.A	20÷22	0,05	5	35	-	12,47	1,0
8.	STANAG 1458 kl.B	20÷22	0,1	50	500	-	14,97	1,0

Uwaga:
 - 1- do 20MPa;
 - 2- do 30MPa.
 - powietrze oddechowe bez zapachu

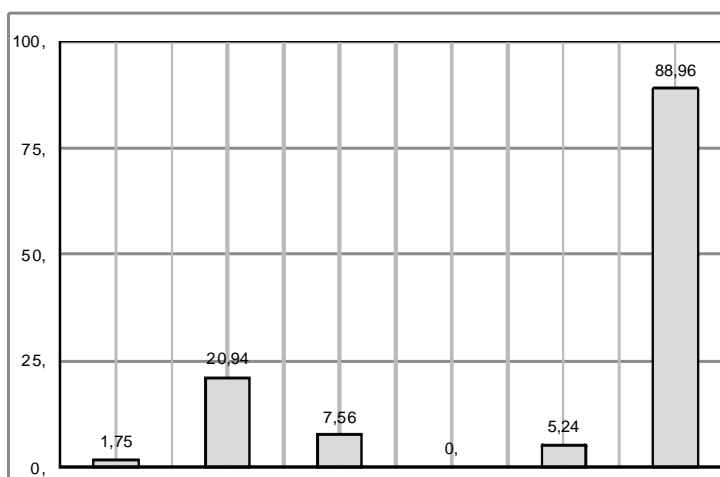
Biorąc pod uwagę konieczność wprowadzenia powyżej opisanych wymagań, w okresie 2002÷2004 przystąpiono do analizy stanu dostosowania krajowych źródeł zasilania powietrzem oddechowym, do wymagań wynikających z postanowień normatywnych STANAG 1458.

WSTĘPNA ANALIZA ŹRÓDEŁ ZASILANIA CZYNNIKIEM ODDECHOWYM

W pierwszej fazie prac, zgromadzono i poddano ocenie wyniki badań laboratoryjnych, uzyskanych w laboratorium fizykochemicznym gazów oddechowych Centralnego Zakładu Sprzętu Ratowniczego Marynarki Wojennej, które realizowało chemiczną ocenę jakościową² i ilościową³ powietrza oddechowego zgodnie z kryteriami określonymi w NO-07-A005.

Z przeprowadzonych analiz wyników pomiarów laboratoryjnych wynika, że jakość powietrza oddechowego przeznaczonego do celów hiperbarycznych dalece odbiega od nowych wymagań.

Na rys. 2 przedstawiono graficznie wyniki tej oceny.



*Składniki podstawowe i domieszki szkodliwe.

Rys. 2. Udział procentowy wyników badań powietrza oddechowego nie spełniających wymagań jakościowych w latach 2002-2003.

Niemal 89[%] całości wykonanych pomiarów na zawartość H₂O w powietrzu oddechowym przekraczało dopuszczalne wymagania oraz prawie 21[%] pomiarów nie spełniało wymagań w zakresie dotyczącym dopuszczalnej zawartości CO₂.

WNIOSKI

Ze względu na wymiar negatywnej skali omawianego zjawiska, należało odpowiedzieć na pytanie, jakie są jego przyczyny i dlaczego tak dużo próbek powietrza oddechowego nie spełnia nowych wymagań. Istotnym było znalezienie odpowiedzi na pytanie, czy i jaki błąd jest popełniany w trakcie procesu pozyskiwania czynnika oddechowego i/lub w czasie oceny jego jakości. W konsekwencji, ażeby osiągnąć poprawę jakości, należało dążyć do identyfikacji i stopniowej eliminacji występowania potencjalnych błędów.

W pierwszej kolejności, w celu eliminacji nieprawidłowości pomiarów postanowiono dokonać przeglądu i modernizacji (doposażenia) aparatury pomiarowej, wykorzystywanej do fizykochemicznej analizy czynników oddechowych.

Takie postępowanie zapewniło możliwość otrzymania miarodajnego narzędzia do monitorowania jakości czynników oddechowych. Analizując technologie produkcji powietrza oddechowego, otrzymywanego z różnego rodzaju źródeł zasilania, proces jego uzdatniania zidentyfikowano jako kluczowy element zapewniający wymaganą jakość.

W dominującej mierze, pozyskiwanie w ówczesnym okresie powietrza oddechowego dla nurków, opierało się na zastosowaniu sprężarek powietrza oddechowego, przedstawionych na rys. 3 i rys. 4.

Jak się okazało, prezentowane na tych fotografiach urządzenia nie były w stanie sprostać nowym wymaganiom, ponieważ były wyposażone w proste układy filtrujące, przygotowane na inne (starsze) standardy jakości czynnika oddechowego. W porównaniu do

nowoczesnych źródeł zasilania np. sprężarek SAUER@SOHN typ. WP5000 charakteryzowały się dużą zawartością oleju na wylocie oraz niską jakością uzyskiwanego powietrza oddechowego.

Dla porównania, zawartość resztkowa oleju na odlocie sprężarki WP5000 przed filtracją w warunkach normalnych, tj. w temperaturze 20°C i przy ciśnieniu 1013[mbar] wynosi około 3÷5[ppm] +/-5%. Jest to wartość wielokrotnie mniejsza niż w EK 2-150.

Oznacza to, że w pierwszej kolejności należało dążyć do eliminacji przyczyn mających największy wpływ na przebieg procesu, który zidentyfikowano jako zanieczyszczenia pochodzące od źródeł zasilania, którego miarą była zawartość resztkowa oleju na wylocie.



Rys. 3. Sprężarka powietrza nurkowego EK 7,5-3 produkcji ZSRR.



Rys. 4. Zestaw zasilania bazy zabezpieczenia prac podwodnych "ORTOLAN" wraz ze sprężarkami powietrza nurkowego EK 2-150 produkcji ZSRR.

Niewystarczająca konfiguracja systemu uzdatniania powietrza oddechowego oraz stosowanie filtrów oczyszczających wypełnionych np. tylko jednym z rodzajów substancji absorbujących⁴ i adsorbujących⁵ (np. węgiel aktywny lub wapno sodowane) nie mogło zapewnić oczekiwanej jakości.

Biorąc pod uwagę fakt, że uzyskiwane powietrze oddechowe ze sprężarek smarowanych olejem pochodzenia petrochemicznego ulega zanieczyszczeniu w trakcie procesu sprężania nasycając się oparami oleju, zanieczyszczając rdzą i opiłkami oraz absorbując dwutlenek węgla (w sprężarkach napędzanych silnikiem spalinowym), istotnym elementem był właściwy dobór aktywnych metod usuwania poszczególnych zanieczyszczeń [9].

Usuwanie niepożądanego rodzaju substancji zanieczyszczających odbywa się poprzez ich sukcesywną eliminację za pomocą różnego rodzaju materiałów sorbcyjnych zarówno w procesie chemisorpcji (adsorpcja chemiczna) jak adsorpcji fizycznej [10,11,12]. Do najczęściej obecnie stosowanych (rozpowszechnionych) należy zaliczyć wypełnienia wkładów filtrujących na bazie substancji przedstawionych poniżej w tabeli 3.

Tab. 3

Rodzaje substancji wykorzystywanych w wypełnieniach filtrów oczyszczających powietrze oddechowe do celów hiperbarycznych.

LP.	Rodzaj substancji	Rodzaj usuwanego zanieczyszczenia
1	Sita molekularne (krzemian tytanu)	Woda i para wodna w zależności od rozmiaru, również węglowodory aromatyczne
2	Węgiel aktywny	Pochłanianie olejów i zapachów
3	Hopkalit (mieszanka $MnO_2, CuO, CO_2O_3, Ag_2O$)	Umożliwia utlenienie CO do CO_2
4	Wapno sodowane (mieszanka $NaOH, Ca(OH)_2, H_2O$ i krzemiany)	Pochłanianie CO_2
5	Sylikazel (żel krzemionkowy)	Woda i para wodna
6	Sofnocat ¹ (mieszanka ZnO, Pt, Pd)	Wodór i CO, lotne związki organiczne

Stosowany dotychczas najczęściej węgiel aktywny i wapno sodowane były jednymi z najbardziej rozpowszechnionych adsorbentów.

Pełniły jednak ograniczoną rolę ze względu na to że, nie pochłaniały wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń występujących w powietrzu oddechowym. Ponadto, należy zauważyć, że dotychczas stosowane układy filtracyjne współpracowały z manualnym separatorem wodno-olejowym sprężarki pozwalającym w sposób mechaniczny na usunięcie gromadzącego się kondensatu wodno-olejowego.

W przypadku nie systematycznego odwadniania separatora powstający w czasie pracy kondensat nie był usuwany w odpowiedni sposób, a w konsekwencji nasycał złożę elementu filtrującego skracając znacznie czas jego ochronnego działania.

Z powyższego wynika, że zastosowane rozwiązanie techniczne było zawodne i nie umożliwiała zapewnienia odpowiedniej jakości czynnika oddechowego zgodnie z nowymi standardami.

Z tych względów należało rozważyć zastosowanie innego rodzaju urządzeń technicznych pozwalających na kompleksowe rozwiązanie sytuacji problemowej związanej z niewłaściwą jakością wytwarzanego powietrza oddechowego do celów nurkowych.

Powyższe działania, będą tematem kolejnego artykułu, poświęconemu omawianej tematyce.

BIBLIOGRAFIA

1. Olszański R, Siermontowski P, Supeł M: Zatrucia płetwonurków zanieczyszczonym sprężonym powietrzem, Gdynia 1997;
2. Olejnik A: Wentylacja Komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych Gdynia 2007;
3. NO-07-A005:2010 Nurkowanie w celach militarnych - Czynniki oddechowe - Klasyfikacja, wymagania;
4. 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);
5. NO-01-A026:2001 Nurkowanie w celach militarnych – Badanie medyczne w wypadkach nurkowych;
6. PN-W-88503:1998 Technologia prac podwodnych - Powietrze dla nurków;
7. STANAG 1458 - Diving Gas Quality;
8. Kłos R: Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego Poznań 2002
9. Ościk J: Adsorpcja: Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 1973;
10. Jankowska H, Świątkowski A, Choma J: Węgiel aktywny Wydawnictwo naukowo-Techniczne Warszawa 1985;
11. Kłos R: Wapno sodowane w zastosowaniach wojskowych Gdynia 2009.

¹ STANAG 1458 - Diving Gas Quality – dokument standaryzacyjny NATO, odpowiednik Normy Obronnej (NO), które obowiązują w SZRP,

² Chemiczna analiza jakościowa - to zespół technik umożliwiających poznanie składu chemicznego badanych mieszanin związków chemicznych,

³ Chemiczna analiza ilościowa - to zespół technik umożliwiających poznanie liczbowej wartości (w odpowiednich jednostkach miary, np. w gramach, lub innych i ich (pod)wielokrotnościach) składu chemicznego badanych mieszanin,

⁴ Adsorpcja- pochłanianie gazu przez ciecz lub - rzadziej – pochłanianie gazu lub cieczy przez ciało stałe, zachodzące w całej masie absorbentu,

⁵ Adsorpcja- pochłanianie gazu przez ciecz lub - rzadziej – pochłanianie gazu lub cieczy przez ciało stałe, zachodzące na powierzchni absorbentu,

mgr inż. Artur Woźniak
Zakład Technologii Prac Podwodnych
Akademii Marynarki Wojennej
ul. Śmidowicza 69
81-103 Gdynia
tel. 262746
ar.wozniak@amw.gdynia.pl

