

# POLSKIE BADAŃIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH I ICH WDROŻENIE. CZĘŚĆ II B. OPRACOWANIE POLSKIEGO SYSTEMU NURKOWAŃ SATUROWANYCH W LATACH 80- TYCH-90-TYCH XX WIEKU

Stanisław Skrzyński<sup>1)</sup>, Grzegorz Grzeczka<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia

<sup>2)</sup>Instytutu Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia

## STRESZCZENIE

Artykuł jest kolejnym z cyklu artykułów dotyczących badań i wdrażania technologii nurkowań saturoowanych w naszym kraju. W tej części przedstawiono polską specyfikę i osiągnięcia na tle uwarunkowań gospodarczych i historycznych. Opisuje ona tworzenie bazy do nurkowań saturoowanych na tle okresu zapaści gospodarczej w naszym kraju. W tym okresie przemysł stoczniowy był napędem badań nurkowań saturoowanych jako podstawy do budowy systemów nurkowych, które miały być przedmiotem eksportu dla zabezpieczenia wydobycia bogactw szelfu morskiego. W poniższym artykule pokazano wysiłek animatorów i bohaterów tego okresu badań podwodnych w naszym kraju, których dzieło jest kontynuowane do dnia dzisiejszego. W II części artykułu autorzy pokazują jak tworzone polski system nurkowań saturoowanych. W artykule uwzględnia się również uwarunkowania techniczne i organizacyjne realizacji pierwszych nurkowań saturoowanych i historię powstawania polskiej metody dekompresji dla nurkowań saturoowanych. W tym trudnym zadaniu kluczową rolę stanowiło utworzenie bazy przemysłu i nauki pracującej na rzecz obronności wspieranej przez właściwe agendy państwa. Utworzono też wieloletni program CPBR cele 9.2.i 9.5. badań medycyny i techniki, którego wynikiem było zbudowanie systemu nurkowego z jego organizacją, zabezpieczeniem medycznym i niezwodną techniką. Owoce tego programu są wdrażane do dnia dzisiejszego. Mimo postępu w dziedzinie medycyny i techniki oraz organizacji, problemy nurkowań saturoowanych są wciąż aktualne, gdyż mimo ich skomplikowania i wysokich kosztów są one najbardziej efektywne i pozwalające na przeprowadzanie bardzo głębokiego nurkowania operacyjnego, aktualnie aż do 400-500m.

**Słowa kluczowe:** nurkowa baza badawcza, wdrożenia nurkowań saturoowanych, medyczne i techniczne problemy dekompresji nurków, walidacja tabel dekompresyjnych, nurkowania saturoowane, parametry nurkowania saturoowanego, systemy podtrzymania życia nurków, system nurkowy, tabele dekompresji, organizacja nurkowania, nitroks, trimiks, pomiary w nurkowaniu.

---

## ARTICLE INFO

PolHypRes 2022 Vol. 80 Issue 3 pp. 7 – 22

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2022-0013

Strony: 16, rysunki: 2, tabele: 3

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

### Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: przeglądowy

Termin nadesłania: 09.06.2022 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 14.07.2022 r.



## BUDOWA BAZY BADAWCZEJ NURKOWAŃ SATUROWANYCH W LATACH 1980-1987

Polska baza badawcza medycyny, techniki i organizacji nurkowania rozwijała się od lat 60-tych ubiegłego wieku. Rozwój bazy odzwierciedlał proces rozwiązywania problemów wraz z wdrażaniem owych rozwiązań. Spektakularnym przykładem są prace badawcze związane z problemami nurkowań saturowanych. Procesy badawcze, rozwoju i wdrożenia dotyczące tych nurkowań oparto o istniejący już w Akademii Marynarki Wojennej zespół komór hiperbarycznych, który przystosowany był do prowadzenia nurkowań standardowych do 60 m. Jego pierwsza modernizacja dotyczyła nurkowań saturowanych z użyciem powietrza do głębokości 20 m.

Następnie bazę rozwijano dla zabezpieczenia nurkowań saturowanych z użyciem mieszanin nitroksowych, co wymagało szerszego rozwoju techniki pomiarowej, zakresu badań medycznych jak i badań techniki zabezpieczającej. Równolegle podnosiły się kwalifikacje kadry badawczej, medycznej, technicznej i nurkowej oraz usprawniano procesy organizacyjne i wymagania formalne. Bazując na wynikach badań i doświadczeniach eksperymentalnych ekspozycji saturowanych z użyciem nitroksu, podjęto pracę nad docelowym rozwiązaniem bazy badawczej dla realizacji całokształtu badań dla osiągnięcia głębokości 100m. W zaistniałej sytuacji zapotrzebowania na nurkowania saturowane na głębokościach szelfu morskiego, przygotowano bazę na fundamentach istniejącego kompleksu nurkowego w Akademii Marynarki Wojennej. Na początku 1988 roku po związanych z perturbacjami gospodarczymi w kraju przerwami w finansowaniu programów, w końcu ukończono budowę doświadczalnego głębokowodnego kompleksu nurkowego do głębokości maksymalnej 120 m (DGKN-120). Maksymalna głębokość pracy 120m st. H<sub>2</sub>O wynikała z charakterystyki ciśnieniowej komór składowych powstałego kompleksu dostosowanej do głębokości morza w polskiej strefie ekonomicznej.

Badania obligatoryjnie wymagały zabezpieczenia technicznego założonych sytuacji i stanów awaryjnych. Wszelkie procedury awaryjne stosowane w technologii nurkowania muszą mieć realne oparcie w strukturach technicznych, medycznych i organizacyjnych działania badawczego kompleksu nurkowego. Tak w załogowych obiektach zanurzalnych, jak i w technologii nurkowej, procedury awaryjne muszą być przygotowywane przed badaniami i szkoleniem ekipy badającej. Do wielowymiarowej współpracy wciągnięto instytucje państwowe, które równolegle z rozwiązywaniem problemów dotyczących uruchomienia DGKN-120, przyjęły na siebie rozwiązanie problematyki technicznej związanej z zaprojektowaniem i praktycznym wdrożeniem układów zabezpieczenia życia dla głębokowodnych kompleksów operacyjnych typu GWK- 200 i LSH-200. Te kompleksy nurkowe były produkowane w Stoczni Szczecińskiej. Pełny cykl badawczo-rozwojowy na te układy przeprowadzono w oparciu o wykorzystanie powstałej m.in. w ramach CPBR- 9,5 cel 31 bazy doświadczalnej komór hiperbarycznych DGKN-120.

## CHARAKTERYSTYKA DOŚWIADCZALNEGO GŁĘBOKOWODNEGO KOMPLEKSU NURKOWEGO (DGKN-120) [1]

Kompleks DGKN-120 składa się z zespołu komór hiperbarycznych oraz układów i urządzeń pomocniczych, zapewniających wymagane warunki nurkowań saturowanych. W tym okresie obowiązujące przepisy nurkowe co prawda uwzględniały wykonywanie nurkowań z zastosowaniem sztucznych czynników oddechowych, jednak brak odpowiedniej technologii nie pozwalał na wykonywanie takich nurkowań. Przepisy te nie dotyczyły nurkowań saturowanych, a nawet o nich nie wspominały. Dopuszczona w tym czasie przepisami dekompresja tlenowa, która była i nadal jest podstawą leczenia specyficznych chorób nurkowych rekompresją, nie była ogólnie stosowana ze względów technicznych. Ze względu na bariery wymiany międzynarodowej praktycznie całe wyposażeniowe wykonywano od podstaw korzystając z krajowego zaplecza. Nurkowania głębokie z użyciem helioksu w Marynarce Wojennej były wykonywane na zasadzie nurkowań eksperymentalnych z wykorzystaniem tabel dekompresyjnych US Navy i sprzętu nurkowego firmy Dräger. Były to jedyne doświadczenia z mieszaninami helowymi w naszym kraju.

Zespół komór hiperbarycznych tworzą trzy połączone ze sobą komory, ustawione względem siebie w płaszczyźnie poziomej. Zostały one przystosowane do spełnienia następujących funkcji:

- komora Nr 1- treningowa,
- komora Nr 2- wejściowo-prześciowa i sanitarna,
- komora Nr 3 - mieszkalna (sypialna).

Dla umożliwienia pracy komór przy założonych parametrach techniczno-medycznych opracowano, przebadano i wykonano w Akademii Marynarki Wojennej następujące urządzenia:

- układy pomiarowe parametrów stanu atmosfery komór;
- układy regeneracji i klimatyzacji atmosfery wewnątrzkomorowej;
- wewnątrzkomorowy węzeł sanitarny;
- pulpity sterujące zespołem komór;
- stanowisko kierowania pracą kompleksu nurkowego;
- laboratorium analizy gazów,
- układy awaryjnego oddychania mieszaninami oddechowymi i czystym tlenem;
- układy łączności z korektorami mowy dla atmosfery helowej;
- układy obserwacji TV nurków w komorze;
- układy oświetlenia komór;
- urządzenia pomiaru czasu operacyjnego i astronomicznego;
- układ ciągłej rejestracji parametrów stanu atmosfery komór;
- układy wytwarzania mieszanin oddechowych i ich magazynowania;
- układy doprowadzania do komór mieszanin oddechowych, czystych gazów, powietrza i tlenu;

- układy odprowadzania mieszanin z komór i ich magazynowania;
- układy medycznego monitoringu parametrów życiowych nurków przebywających w komorach;
- układy awaryjnego zasilania kompleksu w energię elektryczną.

W wyniku przeprowadzonych prac projektowych i badawczych osiągnięto następujące parametry techniczne, charakteryzujące DGKN-120 [1,2]:

- maksymalne całkowite ciśnienie zespołu komór - 1,25 MPa;
- zakres prędkości podwyższania ciśnienia - do 100 kPa/min;
- minimalna, zamierzona prędkość obniżania ciśnienia w komorze - 0,2 kPa/ min;
- maksymalna przepustowość układu doprowadzenia tlenu (na jedną komorę) - 42dm<sup>3</sup>/min;
- dokładność utrzymywania ciśnienia cząstkowego tlenu w zakresie (20 - 140) kPa-±(1-2) kPa;
- zakres pomiaru procentowej zawartości CO<sub>r</sub> - (0- 0,5 - 2) %;
- dokładność pomiaru CO<sub>2</sub> - ±0,005 %;
- zakres regulacji temperatury wewnątrz komór (18-25) °C; z dokładnością ± 1°C;
- zakres regulacji wilgotności względnej wewnątrz komór z dokładnością ±10 %- dla zakresu (40 - 80) %;
- czas pracy jednego układu regeneracji atmosfery bez wymiany sorbentów -120 h;
- habitabilność dla długotrwałego przebywania w komorze - 3 nurków;
- ilość stanowisk awaryjnego oddychania mieszaninami - w każdej komorze - 4;
- sumaryczna objętość gazów czystych i mieszanin możliwa do zmagazynowania w zbiornikach stacjonarnych - 3750 Nm<sup>3</sup>;
- ✓ objętość komór - 45 m<sup>3</sup>, w tym:
- ✓ wejściowa - 10 m<sup>3</sup>
- ✓ sypialno-mieszkalna - 10 m<sup>3</sup>
- ✓ treningowo-badawcza w części suchej 23 m<sup>3</sup>. w tym basen mokrej 5 m<sup>3</sup>.

Układ magazynowania gazów i wytwarzania mieszanin oddechowych wyposażony był w:

- 5 zbiorników ciśnieniowych V=1m<sup>3</sup> p=150bar w po 4 w sekcji,
- 4 zbiorniki rozchodowe powietrzne V=10m<sup>3</sup> p=30bar,
- zespół sprężający składający się z:
- ✓ przetłaczarek; helowej i tlenowej,
- ✓ dwóch sprężarek; wysoko ciśnieniowej i średniociśnieniowej dużej wydajności,
- ✓ układ filtrów powietrznych,
- ✓ pulpit rozdziału gazów.

Układ magazynowania gazów i wytwarzania mieszanin umożliwiał:

- 1) przetłaczanie i przechowywanie czystego helu, azotu, powietrza nurkowego, tlenu i dwóch rodzajów mieszanin gazowych o ciśnieniu do 20 MPa,
- 2) sporządzanie mieszanin gazowych (tlenowo-azotowych, tlenowo-helowych i tlenowo-helowo-azotowych) o ciśnieniu do 15,0 MPa,
- 3) uzyskanie sprężonego powietrza nurkowego o ciśnieniu do 15 MPa.

Ilość przechowywanych gazów umożliwiała przeprowadzanie nurkowań przez okres do 30 dni bez konieczności uzupełnienia zapasów gazów, a także minimum dwukrotne szybkie napełnienie zespołu komór do pełnego ciśnienia roboczego.

Układ przetaczania i przetłaczania tlenu wyposażony jest w zespół ramp, sekcje zbiorników ciśnieniowych, przetłaczarek tlenowych i spełnia m. in. następujące zadania:

- przetaczanie i przetłaczanie tlenu z butli transportowych do awaryjnych butli przenośnych oraz do innych transportowych,
- przetaczanie i przetłaczanie tlenu z butli transportowych do stacjonarnych zbiorników mieszaninowych w celu sporządzenia mieszanin lub zwiększania ciśnienia dla celów operacyjnych.

Konstrukcja centralnych instalacji gazów oddechowych umożliwia równoległe:

- zasilanie komory w zespole komór hiperbarycznych gazami obojętnymi, tj. helem i azotem,
- gotowymi mieszaninami oddechowymi,
- mieszaninami o wymaganym składzie, sporządzonymi bezpośrednio w komorze, w której przebywają nurkowie. Odbywało się to przy wykorzystaniu zmodernizowanych pulpitów operacyjnych poszczególnych komór.

Zespół komór hiperbarycznych wyposażony jest w awaryjną stację podawania mieszanin oddechowych i gazów czystych do komór, która stanowi układ kolektorów i reduktorów, przystosowany do bezpośredniego podłączenia typowych (jednorazowo 20 szt.) transportowych butli z gazami czystymi lub przygotowanymi w nich mieszaninami. Zlokalizowany jest on bezpośrednio przy budynku zespołu komór, a używany w przypadku wystąpienia sytuacji awaryjnej, zmuszającej do odcięcia od instalacji zasilających, głównych zbiorników stacjonarnych. W czasie prowadzenia „saturacji” w kompleksie, układ ten jest zawsze przygotowany do natychmiastowego użycia.

Dla odzysku helu i mieszanin zainstalowano elastyczne zbiorniki ciśnieniowe. Ich konstrukcja zapewniała odzysk mieszanin odprowadzanych z zespołu komór w czasie obniżania ciśnienia (dekompresji), jak również z układów awaryjnego oddychania - z linii wydechu. „Przepracowane” mieszaniny magazynowane były w stacjonarnych ciśnieniowych zbiornikach odzysku, przy wykorzystaniu specjalnych układów do ich przetaczania i przetłaczania. Istniała też możliwość oczyszczenia



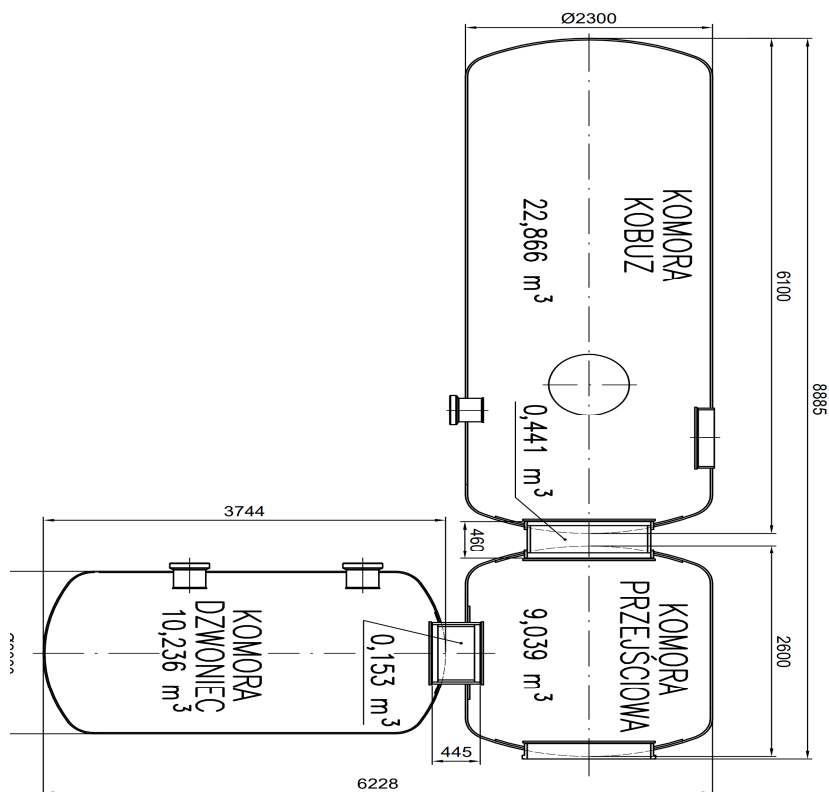
odzyskanej mieszaniny z dwutlenku węgla, wilgoci i innych zanieczyszczeń, będących produktami przemian metabolicznych.

Cała infrastruktura techniczna kompleksu nurkowego DGKN-120 zajmuje obszar około 3000 m<sup>2</sup>.

Kompleks nurkowy wyposażony jest również w urządzenia i instalacje awaryjnego zasilania urządzeń w energię elektryczną. Urządzenia te włączane są do pracy w przypadku zaniku napięcia w sieci miejskiej.

W kompleksie DGKN-120 był zainstalowany układ rejestracji danych, pomiaru czasu astronomicznego i operacyjnego do odwzorowania przebiegu nurkowania a szczególnie dekompresji.

Akademia Marynarki Wojennej posiadała i nadal posiada jedyny w kraju permanentnie modernizowany i adoptowany do zadań badawczych Doświadczalny Głębokowodny Kompleks Nurkowy. Poprzez przeprowadzone prace badawcze i wdrożeniowe oraz projektowo-konstrukcyjne zdołano wyszkolić personel inżynierski, techniczny i medyczny zdolny do badań całokształtu problemów medycznych, technicznych i organizacyjnych związanych z nurkowaniem saturowanymi.



Rys 1 Układ komór hiperbarycznych Doświadczalnego Głębokowodnego Kompleksu Nurkowego DGKN-120 Akademii Marynarki Wojennej.

## BADANIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH Z UŻYCIEM NITROKSU 1985 – 1987

Polska jest jednym z pionierów zastosowania mieszanin azotowo-tlenowych w nurkowaniach saturowanych. Doświadczenia z Meduzami w latach 60-70-tych przeprowadzone w prymitywnych warunkach, z wentylacją ciągłą powietrza przypominały warunki przedziału okrętu podwodnego, czyli ze 100% wilgotnością i powietrzem. W nurkowaniach krótkotrwałych racjonalne jest użycie nitroksu o zawartości tlenu powyżej 20%, dla poprawy i skrócenia dekompresji. Natomiast w nurkowaniach saturowanych z użyciem nitroksu stosujemy mieszaniny nitroksowe hipooksyczne zawierające od 8 do 14% tlenu dla głębokości plateau saturacji 40-20 m. Technologie nurkowania z wykorzystaniem mieszanin azotowo-tlenowych zostały opracowane i wdrożone przez Zakład Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych Instytutu Konstrukcji i Napędu Okrętów AMW, przy współpracy medycznej Zakładu Medycyny Podwodnej IMM WAM. Technologie w zakresie głębokości 20 – 45 m wykonano w ramach CPBR-10.1 – na zlecenie Instytutu Medycyny Morskiej i Tropikalnej w Gdyni, który przygotował ekipę nurków testerów.

Stosowana technologia nurkowania musi być dostosowana do bazy technicznej i do obowiązującego w danym kraju systemu zabezpieczeń. W Polsce system nurkowań standardowych i głębokowodnych dla celów ratowniczych załóg okrętów podwodnych, obejmujący zabezpieczenie techniczne i medyczne oraz bazy nurkowe posiadała Marynarka Wojenna. Nurkowania saturowane z użyciem nitroksu są uzupełnieniem procedur awaryjnych przy stosowaniu nurkowań powietrznych.

W latach 1986-1987 przeprowadzono na mieszaninach azotowo-tlenowych (nitroksach) serię 6ciu nurkowań saturowanych na głębokościach 20-30 m, stopniując głębokości plateau saturacji co 2 m. W tych samych latach przeprowadzono też serię 4 ekspozycji saturowanych na głębokościach 30-45 m, stopniując głębokości plateau saturacji co 5 m. Podczas kompresji używano czysty azot „rozcieńczając” tlen tak, by na plateau dekompresji uzyskać ciśnienie parcjalne tlenu wynoszące 0,4.ata. Pobyt na plateau trwał dwie doby. Następnie rozpoczynano dekompresję. W pierwszej fazie następuje relatywnie „szybkie” obniżenie ciśnienia, a następnie między głębokościami 28 m do 20,5 m obniżenie ciśnienia odbywa się z prędkością 0,5m w ciągu 62 min. między 20,5 m a 15,5 m, 0,5 m w ciągu 64 min. Następnie następuje

spowolnienie dekompresji, by na głębokościach 1,5 m do 1,0 m obniżyć ciśnienie z prędkością 0,5 m w ciągu 134min. (patrz tabela nr 1).

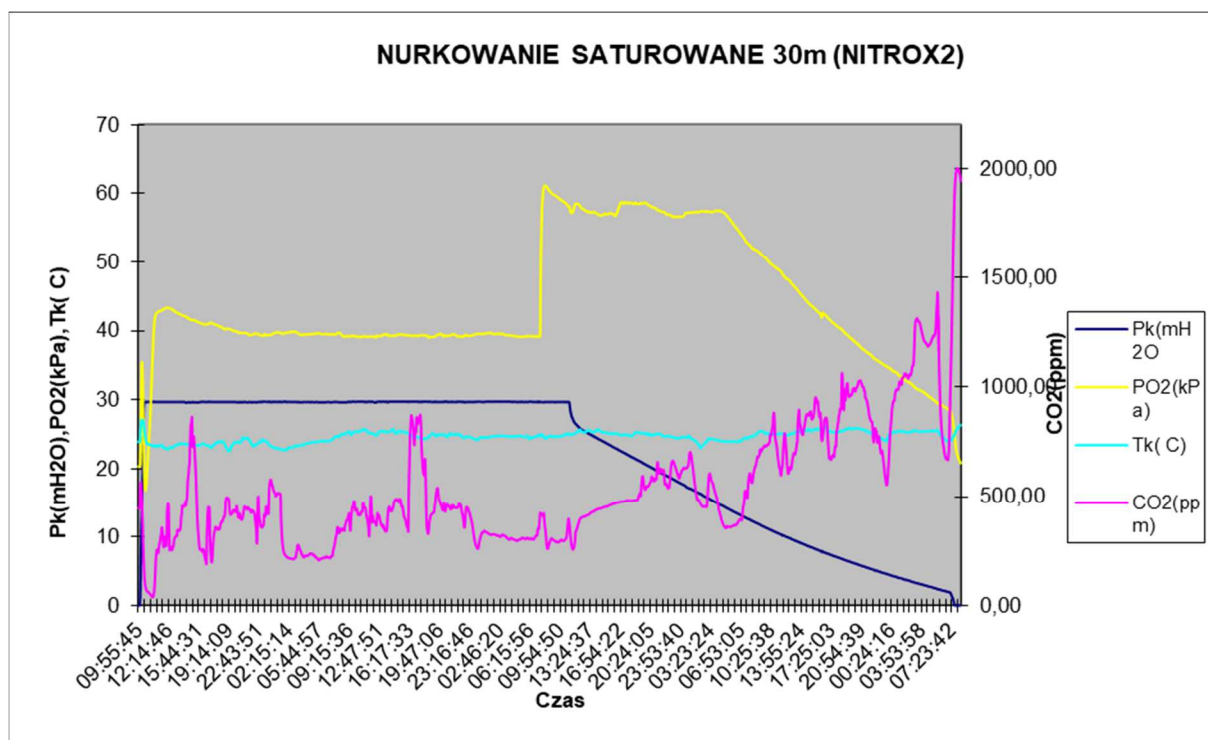
Tab. 1

Tabela dekompresji nurkowników saturowanych z użyciem powietrza z plateau saturacji 18m [3].

<b>Głębokość stacji [m]</b>	<b>Czas przejścia [min]</b>	<b>Czas pobytu na stacji i rodzaj mieszaniny [min]</b>	<b>Łączny czas dekompresji [min]</b>
<b>18,0</b>	<b>15</b>	<b>Powietrze</b>	<b>15</b>
<b>12,0</b>		<b>Powietrze 90 tlen 10</b>	<b>115</b>
	<b>5</b>		<b>120</b>
<b>10,5</b>		<b>Powietrze 165 tlen 20</b>	<b>305</b>
	<b>5</b>		<b>310</b>
<b>9,0</b>		<b>Powietrze 355</b>	<b>665</b>
	<b>5</b>		<b>670</b>
<b>7,5</b>		<b>Powietrze 75 tlen30</b>	<b>775</b>
	<b>5</b>		<b>780</b>
<b>6,0</b>		<b>Powietrze 115</b>	<b>945</b>
	<b>5</b>		<b>950</b>
<b>4,5</b>		<b>Powietrze 115 tlen 50</b>	<b>1115</b>
	<b>5</b>		<b>1120</b>
<b>3,0</b>		<b>Powietrze 165</b>	<b>1285</b>
	<b>5</b>		<b>1290</b>
<b>1,5</b>		<b>Powietrze 105 tlen 60</b>	<b>1455</b>
	<b>5</b>		<b>1460</b>

Takie prędkości przy niskich ciśnieniach rodziły liczne problemy techniczne. Począwszy od zapewnienia szczelności włączów, która zależy od ciśnienia w komorze (większe ciśnienie to większa siła docisku przy uszczelnieniu uszczelką płaską z gumy o dużej twardości i włązie o dużej średnicy), poboru próbek do analizy gazu, pracy urządzeń sanitarnych oraz pomiaru spadku ciśnienia z prędkością 6 mm słupa wody H<sub>2</sub>O na minutę. Dekompresja dla nitroksu jest dekompresją ciągłą, czyli bez przerw czasowych na sen nocny w trakcie jej realizacji, które aktualnie mają wszystkie dekompresje stosowane z użyciem helioksu. Wymagała ona bardzo czułych manometrów, gdyż obniżenie ciśnienia w komorze o 0,5 m słupa wody w czasie 85min na najniższych stopniach jest prawie nieodczuwalne. Jest to poza skalą czułości współczesnych manometrów stosowanych w systemach nurkowych do dekompresji kl 0,2 i zakresie 0-25 m w których to manometrów błąd pomiaru wynosi  $\pm 5$  cm. Przy dekompresji ciągłej zmiana powinna wynosić 0,6 cm na minutę. Spełniono wymagania dekompresji mimo, iż na małych głębokościach występują trudności pomiarowe. Dla rozwiązania tego problemu opracowano manometr rezonatorowy. Mierzył on z dokładnością do 10 Pa i wskazywał do 0,1 Pa. Jednak nie mógł być on użyty ze względu na zbyt wysoką czułość; wskazywał wszelki ruch w komorze i na zewnątrz niej (cyfry biegały po wskaźniku cyfrowym jak szalone, dlatego do realizacji pomiarów zaklejano 5 ostatnich cyfr). Osobnym problemem są trudności pobierania próbek dla zapewnienia określonego przepływu przez czujniki analizatorów gazów, i zapewnienie pracy węzłów sanitarnych, które działają tylko przy pewnym nadciśnieniu [4].

Badania objęły całą strefę głębokości przewidzianą dla nitroksu (od 20 do 45 m). Poniżej podano przykładowe tabele dekompresji systemu (który nigdy nie był zastosowany w praktyce) o plateau saturacji i ciśnieniu parcjalnemu tlenu = 40 kPa. Realizacja tabel wymagała utrzymania ciśnienia parcjalnemu dwutlenku węgla poniżej 0,5 kPa i temperatur od 25 do 27°C przy uwarunkowaniach zanieczyszczeń domieszek szkodliwych określonych w dokumencie ABS (amerykańskiego towarzystwa klasyfikacyjnego). Czas dekompresji z plateau saturacji 40 m. wynosił 83 godz. 25 min. (czyli 3,5 doby). Zaś z 45 m były to 93 godz. 32 min. tj. prawie 4 doby. Dla plateau saturacji 30m dekompresja trwała ponad 48 godz. Opracowujący dekompresje postawili wysokie wymagania, które spełniono, a które trzeba było potem przetransponować na operacyjne systemy nurkowe, nie posiadające takich możliwości technicznych i pomiarowych.



Rys. 2 Zarejestrowany wykres przebiegu dekompresji z użyciem nitroksu. Plateau saturacji 30 m. Rejestracja pokazuje przebieg całej eksperymentalnej ekspozycji saturowanej. Stabilne są przebiegi ciśnienia temperatur. Natomiast skompresowany wykres przebiegu dwutlenku węgla odzwierciedla stan aktywności nurków w komorze. Przebiegi ciśnien parcjalnych tlenu wskazują przekroczenia wartości w momencie rozpoczęcia dekompresji izobarycznej, tj. podwyższenia ciśnienia parcjalego tlenu. Jest to wynik niestabilnej pracy prototypu czujnika elektrochemicznego, do której dochodziło w fazach zwiększonego dozowania tlen, ze względu na miejsce jego umieszczenia w komorze.

Tab. 2

Przykład opracowanych tabel dekompresji nitroksowej o plateau saturacji 40m s<sub>l</sub> H<sub>2</sub>O dla przedziału głębokości 40,0m do 33 m.[4].

Nr	Zakres głębokości [m]	Czas przejścia [min.]	Czas sumaryczny [godz.]
1	2	3	4
<b>1</b>	<b>40.0 - 39.0</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>
<b>2</b>	<b>39.0 - 38.0</b>	<b>11</b>	<b>0.16</b>
<b>3</b>	<b>38.0 - 37.0</b>	<b>16</b>	<b>0.32</b>
<b>4</b>	<b>37.0 - 36.0</b>	<b>22</b>	<b>0.54</b>
<b>5</b>	<b>36.0 - 35.5</b>	<b>32</b>	<b>1.26</b>
<b>6</b>	<b>35.5 - 35.0</b>	<b>61</b>	<b>2.27</b>
<b>7</b>	<b>35.0 - 34.5</b>	<b>61</b>	<b>3.28</b>
<b>8</b>	<b>34.5 - 34.0</b>	<b>61</b>	<b>4.29</b>
<b>9</b>	<b>34.0 - 33.5</b>	<b>61</b>	<b>5.30</b>
<b>10</b>	<b>33.5 - 33.0</b>	<b>61</b>	<b>6.31</b>

Ekspozycje saturowane z użyciem nitroksu przetestowały technikę i organizację zespołów, oraz przygotowały ekipę medyczną do podjęcia problemów związanych z badaniami nurków saturowanych z użyciem trimiksu. Badania dekompresji od strony medycznej nie odnotowały żadnych incydentów dekompresyjnych ani zmian w stanie zdrowia nurków.

W budowie tabel dekompresji prof. Doboszynski i dr Łokuciejwski wykorzystali bardzo ważną rolę, jaką odgrywało zjawisko fizjologiczne zwane „okienkiem tlenowym”. Już na 4-godziny przed czasem rozpoczęcia dekompresji zastosowano dekompresję izobaryczną, zwiększając ciśnienie parcjale tlenu z 0,4ata do 0,5 ata.

Przykład opracowanej dekompresji nitroksowej o plateau saturacji 40m sł H<sub>2</sub>O dla przedziału głębokości 15,0m do 0 m [4].

Lp.	Głębokość dekompresji [m]'	Czas obniżenia głębokości o 0,5mH <sub>2</sub> O [mim]	Czas od startu dekompresji [godz:min]
47	15.0 - 14.5	64	44.24
48	14.5 - 14.0	64	45.28
49	14.0 - 13.5	64	46.32
50	13.5 - 13.0	64	47.36
51	13.0 - 12.5	64	48.40
52	12.5 - 12.0	64	49.44
53	12.0 - 11.5	64	50.48
54	11.5 - 11.0	66	51.54
55	11.0 - 10.5	68	53.2
56	10.5 - 10.0	69	54.11
57	10.0 - 9.5	71	55.22
58	9.5 - 9.0	73	56.35
59	9.0 - 8.5	75	57.50
60	8.5 - 8.0	78	59.8
61	8.0 - 7.5	80	60.28
62	7.5 - 7.0	83	61.51
63	7.0 - 6.5	85	63.16
64	6.5 - 6.0	88	64.44
65	6.0 - 5.5	91	66.15
66	5.5 - 5.0	95	67.50
67	5.0 - 4.5	98	69.28
68	4.5 - 4.0	102	71.10
69	4.0 - 3.5	106	72.56
70	3.5 - 3.0	111	74.47
71	3.0 - 2.5	116	76.43
72	2.5 - 2.0	121	78.44
73	2.0 - 1.5	127	80.51
74	1.5 - 1.0	134	83.5
75	1.0 - 0.5	20	83.25

Utrzymywane ciśnienie parcjale tlenu 0,5ata do momentu, w którym zawartość tlenu w komorze osiągnie 22%, pozwoliło na zwiększenie okienka tlenowego, podobnie jak przy realizacji dekompresji krótkotrwałych nurkowań głębokich. Nazywa się to rozszerzonym okienkiem tlenowym (extended oxygen window).

Charakterystyczną oznaką rozszerzonego okienka tlenowego jest kształt profilu w pierwszej fazie dekompresji, w którym zwiększa się prędkość obniżania ciśnienia wywołując większy gradient „ssanie” dla usuwania azotu, co z kolei przyśpiesza jego usuwanie (patrz rys. 2 i tabela nr. 1). Zjawisko to przyczynia się do wytworzenia bezpiecznego gradientu różnicy ciśnień parcjalnych azotu w uproszczeniu w tkankach i otoczeniu.

Ten sposób dekompresji od strony medycznej sprawdził się w ekspozycjach saturovaniach z użyciem nitroksu, o czym świadczył brak incydentów dekompresyjnych. O marginesie bezpieczeństwa dekompresji nitroksowej świadczy to, że wśród nurków testerów znalazł się nurek z nie wykrytym *foramen ovale*, który wykryto mu kilka lat później podczas incydentu dekompresyjnego po nurkowaniach krótkotrwałych na małych głębokościach.

Do badań dekompresji nurków nie stosowano żyłnej metody wykrywania pęcherzyków we krwi z dwóch względów. Po pierwsze pomiar uważano za mało wiarygodny i subiektywny. Po drugie zabrakło środków na zakup aparatu Dopplera [4].

W tym czasie dr Romuald Olszański podjął pionierską pracę wykrywania zagrożeń dekompresji w oparciu o inne symptomy patofizjologiczne. Podczas nurkowań w fazie dekompresji nurkowie mogą być narażeni na następstwa przesyceń gazem obojętnym. W dużym uproszczeniu, wynikiem tych przesyceń jest pojawienie się śródnaczyniowych pęcherzyków gazowych, działających jak ciało obce. Wpływa to między innymi na układ krzepnięcia krwi. Pobudzenie układu krzepnięcia aktywuje trombinę, prowadząc do agregacji płytek krwi i uwolnienia ich zawartości. Ocena bezpieczeństwa tabel dekompresyjnych i osobniczej wrażliwości na chorobę ciśnieniową opiera się głównie na wykrywaniu jej objawów patofizjologicznych. Badanie miało na celu opracowanie takich metod diagnostycznych, które pozwoliłyby na ocenę stosowanego systemu dekompresji. W pierwszej fazie badana była ocena aktywacji płytek krwi i wybranych elementów hemostazy osoczowej jako wskaźnika zagrożenia chorobą dekompresyjną.

## **BADANIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH Z UŻYCIEM MIESZANIN TRIMIKSOWYCH 1987– 1994. BADANIA DLA OPRACOWANIA BEZPIECZNEGO SYSTEMU NURKOWAŃ SATUROWANYCH W STREFIE GŁĘBOKOŚCI 30- 120 M**

Wymagania bezpieczeństwa nurkowania saturowanego muszą być adekwatne do złożoności problemu długotrwałego przebywania człowieka w warunkach podwyższonego ciśnienia, z zapewnieniem niezbędnej odporności na zakłócenia i stany awaryjne. Nurkowanie saturowane charakteryzuje się największym stopniem ryzyka i jest porównywalne do warunków kosmicznych. Ekspozycja saturowana jest ostateczną procedurą rekompresji leczniczej. W tym czasie procedura ta była dopiero na etapie badań doświadczalnych na świecie.

Wyniki badań dotyczących nurkowań saturowanych w przedziale głębokości 30-120 m, konieczne były dla:

- realizacji prób zdawczych u producenta systemów nurkowych dla celów eksportowych produkowanych w Polsce, (cztery kompleksy GWK-200 z perspektywami na dalsze dostawy);
- utworzenia w Polsce bazy badawczej technologii nurkowania dla celów badań medycznych i komercyjnych, z równoległym utworzeniem centrum ratownictwa hiperbarycznego. Taki cywilny ośrodek organizował się w IMMiT w Gdyni, bez zaplecza kadrowego.
- zwiększenia możliwości potencjału awaryjno - ratowniczych działań podwodnych Marynarki Wojennej, szczególnie w ratowaniu załóg okrętów podwodnych,
- zabezpieczenia prac podwodnych rozwijającego się w naszym kraju morskiego przemysłu wydobywczego ropy i gazu.

Od lat osiemdziesiątych w Polsce okręty ratownicze Marynarki Wojennej jako jedyne dysponowały technologią do nurkowania głębokowodnego z zastosowaniem mieszanin helowo-tlenowych. Używało się aparatów o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, wzorując się na informacjach firmy Drager i stosując tabele US Navy dla tego sprzętu oddechowego. Przy nurkowaniu wykorzystywano bazę nurkową z głębokowodnym dzwonem nurkowym zainstalowanym na okrętach typu ratowniczych Piast. Realizowane na rzecz obronności i dla przemysłu offshore nurkowania sprowadzały się do głębokości 60-80 metrów, tj. nurkowań interwencyjnych o czasie pobytu nurka na głębokości roboczej do 30 min. [5]

Przy opracowywaniu systemu nurkowań saturowanych na głębokości 30-120 m postawiono cele, które należało rozwiązać i sprawdzić praktycznie [6,7]. System powinien zapewniać:

- Maksymalne bezpieczeństwo nurków w odniesieniu do następstw bezpośrednich i późniejszych pośrednich.
- Zwiększenia czasu efektywnej pracy nurka w wodzie do kilku godzin – kilkunastokrotnie dłużej niż w nurkowaniach krótkotrwałych.
- Uzyskanie komfortu wypoczynku fizycznego i psychicznego nurka w czasie pomiędzy kolejnymi nurkowaniem, z równoczesnym zapewnieniem odnowy biologicznej.
- Sprawdzenie konstrukcyjnych i technicznych krajowych urządzeń oraz sprzętu nurkowego kompleksów DGKN-120, GWK-4200, LSH-200. dla głębokości 100m gdyż taka była wymagana głębokość prób zdawczych kompleksów GWK-200 (50% głębokości operacyjnych) [8].
- Prace związane z wdrożeniem nurkowego sprzętu oddechowego o obiegu zamkniętym GAK 450 produkcji firmy Drager. Wiązało to się z ergonomicznym wmontowaniem do dzwonu oraz infrastruktury kompleksu o GWK-200 oraz szkoleniem nurków i personelu obsługi [8].

Ze strony medycznej uznano, że opracowanie systemu nurkowania saturowanego dla mieszanin helioksydowych wymagało nowego podejścia. Z fizjologicznego punktu widzenia należało wypracować określone wymagania uwzględniając:

- cechy fizyczne, stan zdrowia i stopień wytrenowania nurków,
- skład mieszaniny oddechowej i warunków komfortu przebywania pod ciśnieniem,
- sposób kompresji i dekompresji z plateau saturacji,
- program dnia z uwzględnieniem obciążenia pracą, sposobu odżywiania, warunków odpoczynku (snu) i odnowy biologicznej nurków,
- zasady zabezpieczenia badawczo-medycznego ekspozycji, a następnie weryfikowania wymienionych elementów systemu podczas kolejnych wielodniowych ekspozycji hiperbarycznych w kompleksie nurkowym DGKN-120 [3].
- wykorzystanie własnego doświadczenia uzyskanego podczas realizacji programów badawczych, ukierunkowanych na problematykę nurkowań saturowanych przy użyciu powietrza i nitroksu [9].

### **WERYFIKACJA OPRACOWANYCH TABEL DEKOMPRESJI. OGÓLNY MODEL BEZPIECZEŃSTWA NURKOWAŃ**

Sposób weryfikowania opracowanych tabel został oparty na koncepcji dozowania obciążeń dekompresyjnych, polegającej na przechodzeniu w kolejnych ekspozycjach od obciążeń mniejszych do większych. W pierwszych ekspozycjach stosowano tabele ustalone dla odpowiednio niższego ciśnienia parcjalnego tlenu przyjętego na plateau saturacji. Ten sposób postępowania pozwalał na utrzymanie marginesu bezpieczeństwa z uwzględnieniem możliwych błędów w pomiarze ciśnienia parcjalnego tlenu. Błędy systematyczne analizy gazów w określaniu składu mieszaniny oddechowej, oczyszczania jej, niejednorodność, niedokładność pracy operatorów, oraz zwiększoną podatność osobniczą na stres dekompresyjny po raz pierwszy uwzględniono w badaniach u nurków uczestniczących w tym typie ekspozycji [10].

Przebieg weryfikacji nurkowań saturowanych był zgodny z założeniami badawczymi, rozkładem dnia nurków i weryfikowanymi programami dekompresji. Z założenia dekompresje rozpoczynano po 35 – 57 godzinnym pobycie na plateau. Podczas ekspozycji niektóre parametry środowiska gazowego habitatu odbiegały od zaleconych wartości (wpływ tych odchyleń na przebieg dekompresji został uwzględniany w kolejnych ekspozycjach):

- odchylenia od ciśnienia cząstkowego tlenu były większe od wymaganych i wynosiły do 3 – 5 kPa / ± 6 – 10 %/,



- odchylenia od pożądanej temperatury były większe od wymaganych i wynosiły od 2 – 3 °C. Pozostałe parametry lub wartości były zgodne z ustalonymi wymaganiami ( $P_{abs}$ ,  $pCO_2$ , wilgotność względna, ruch mieszaniny, zanieczyszczenia toksykologiczne i mikrobiologiczne).

## PODNOSENIE CIŚNIENIA W HABITACIE DO POZIOMU PLATEAU SATURACJI [11]

Sprężanie do ciśnienia plateau realizowano w dwóch etapach. W etapie pierwszym nurkowie są sprężani mieszaniną startową, której skład był dobierany do poziomu saturacji. Mieszaninę startową stosowano do połowy głębokości plateau z zabezpieczeniem inhalatorami z mieszaniną awaryjną. W drugim etapie, w którym istotnym był udział nurków, podnoszono ciśnienie ze stabilizacją składu mieszaniny w komorze. Np. dla plateau saturacji 100mH<sub>2</sub>O mieszaniną startową był helioks o zawartości tlenu 3%. Sprężanie do głębokości 50 m (600 kPa) przeprowadza się z szybkością 2-4 m/min. Podczas sprężania nurkowie oddychają z układów indywidualnych mieszaniną tlenowo-helową o zawartości 20 % tlenu. Po osiągnięciu ciśnienia równoważnego głębokości 50 m wstrzymuje się sprężanie.

- Po stwierdzeniu, że ciśnienie cząstkowe tlenu w komorze jest wyższe od 20 kPa, nurkowie odłączają się pojedynczo od indywidualnych układów (w odstępach minutowych) i przechodzą na oddychanie atmosferą komory.
- Po przejściu wszystkich nurków na oddychanie z atmosfery komory rozpoczyna się dalsze sprężanie do głębokości 100 m, z taką samą szybkością jak poprzednio, tj. 2-4 m/min.
- Od głębokości 50 m do indywidualnego układu oddychania podłącza się mieszaninę tlenowo-helową o zawartości tlenu 6%.

## WYMAGANE WARUNKI ŚRODOWISKA NA PLATEAU SATURACJI [11]

Warunki środowiska na plateau saturacji są uzależnione od ciśnienia oraz przewidywanego okresu pobytu nurków i różnią się od warunków wymaganych podczas sprężania czy dekompresji. Podczas pobytu nurków na plateau saturacji odpowiadającym głębokości 100 m z użyciem trimiksu jako czynnika oddechowego, powinny być utrzymywane następujące parametry środowiska:

$$P_{abs} = 1100 \text{ kPa} \pm 1; \quad pO_2^{\ast} = 40 \text{ kPa} \pm 2 \quad pN_2 \leq 80 \text{ kPa} \pm 4; \quad pHe \approx 980 \text{ kPa}$$

$pCO_2 \leq 0.3 \%$  równoważnego, temperatura  $30^{\circ}C \pm 1$ ; wilgotność względna 40-60%, ruch mieszaniny  $\leq 15 \text{ cm/sek}$ ; hałas  $\leq 70 \text{ dB/A/}$ , krótkotrwałe 100 dB/A; drobnoustroje / do 350 kol/m<sup>3</sup> przy braku flory patogennej. Lotne związki chemiczne poniżej DNS<sup>\*/</sup>.

<sup>\*/</sup>W mieszaninie rozprężonej.[12]

## REALIZACJA DEKOMPRESJI

Zasady zabezpieczenia technicznego dekompresji nurkowań saturowanych ze względów organizacyjnych ujęte były w poniższych problemach badawczych [13]:

1. jak najdokładniejsze odwzorowanie dekompresji z ciągłą zmianą ciśnienia z określoną prędkością wyrażaną w m/godz. i obligatoryjne utrzymywanie stałego ciśnienia parcjalnego tlenu przy zachowaniu określonego komfortu cieplnego i wilgotności w komorze,
2. ciągłość dekompresji nie powinna zakłócić rytmu przebywania i życia w komorze. Szczególnie ważnym problemem był fakt, że dekompresja trwała podczas snu nurków. W tym przypadku dla nadzoru bezpieczeństwa jeden z nurków był podłączony do monitora serca i oddechu, oraz w ciągu nocy po 4 godzinach snu sprawdzano samopoczucie nurków,
3. postępowania interwencyjnego w przypadkach wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej lub innych schorzeń. Dla tych celów przygotowywane były mieszaniny lecznicze i tlen stosownie do głębokości, dla realizacji procedur leczniczych ewentualnej choroby ciśnieniowej

Trzy godziny przed rozpoczęciem dekompresji, ciśnienie cząstkowe tlenu w mieszaninie oddechowej habitatu, należało podwyższyć z 40 kPa do 50 kPa.

1. W chwili rozpoczęcia dekompresji spod ciśnienia odpowiadającego głębokości 100 m skład gazowy mieszaniny powinien odpowiadać następującym wartościom:  $pO_2 = 50 \text{ kPa} \pm 2$ ;  $pN_2 \leq 80 \text{ kPa} \pm 4$ ;  $pHe \approx 970 \text{ kPa}$ .
2. Od głębokości 100 m do 14 m ciśnienie cząstkowe tlenu powinno być utrzymane niezmiennie na poziomie 50 kPa.
3. Wyniki oznaczeń kontrolnych tlenu, azotu oraz helu należy podawać w kPa, dwutlenku węgla w procentie równoważnym.
4. Od głębokości 14 m do powierzchni zawartość tlenu w mieszaninie należy podawać w procentach, a stężenie tego gazu powinno wynosić  $22 \% \pm 0.8$ .
5. Indywidualny układ oddychania od głębokości 100 m do głębokości 50 m powinien być zasilany mieszaniną tlenowo-helową o zawartości 6 % O<sub>2</sub>.
6. Indywidualny układ oddychania od głębokości 50 m do powierzchni powinien być zasilany mieszaniną tlenowo-helową o zawartości 20 % O<sub>2</sub>. Od głębokości 18 m do powierzchni powinien również umożliwiać oddychanie czystym tlenem.
7. Podczas dekompresji mikroklimat habitatu powinny charakteryzować podane wyżej parametry temperatury, wilgotności i ruchu mieszaniny gazowej (tab. 1).

## LITERATURA

1. Pleszewski M., Skrzyński S., "Technical Base of Saturation Diving" at the Naval Academy III Symposium "Saturation Diving - Technical Issues," AMW 1991;
2. M. Przyłipiak, "Ventilation of Hyperbaric Chambers Using External Control Systems," Paper presented at the Symposium "Saturation Diving - Technical Issues," Naval Academy, Gdynia 1985;
3. "Technical Parameters Requirements for the GWK-200 Diving Complex," Central Research and Development Program 95 Target 31, Naval Academy, Gdynia 1987;
4. Doboszyński T., Łokuciejewski B., "Principles of Security for Nitrox Dives with Saturation Plateau at 20-40m," KMM WAM Gdynia 1988;
5. HAUX G., "Underwater Engineering," Balliere Tindell, ISBN 0-7020-0749-8, London 1982;
6. "Guidelines for the Organization of Training and Conducting Underwater Descents with the Methods of KP and DP," Mingazprom, USSR Moscow 1986;
7. Doboszyński T., Łokuciejewski B., "Oxygen-Helium-Nitrogen Environment of the Hyperbaric Habitat - Hygienic and Toxicological Requirements," CPBR 9.5 Technical, Medical, and Legal Issues of Prolonged Human Presence at a Depth of 120m, Target 31 Phase I, Gdynia 1987;
8. Skrzyński S. and Team, "Selected Technical and Organizational Problems of Implementing Saturation Diving," PK Work "SATURN," AMW 1998;
9. Technical and Organizational Documentation CPBR - 9.5 "Technical, Medical, and Legal Problems of Prolonged Human Stay Underwater," Life Support Systems of the GWK - 200 Diving Complex, Naval Academy, A. Warski Shipyard 1990;
10. Doboszyński T., "Issues of Experimental Research Involving Humans and Diving Technology Implementation," IV Symposium - Diving Technical Issues, Naval Academy, Gdynia 1994;
11. Doboszyński T., Łokuciejewski B., "Decompression Tables for Trimix Saturation Diving to 120m with Principles of Medical Recompression," CPBR-9.5 "Technical, Medical, and Legal Problems of Prolonged Human Presence Underwater," Department of Maritime Medicine, WAM, Gdynia 1990;
12. T. Doboszyński, B. Łokuciejewski, "Oxygen-Nitrogen-Helium Environment of the Hyperbaric Habitat. Hygienic and Toxicological Requirements," Department of Underwater Medicine, IMM WAM Gdynia 1987. For official use;
13. Doboszyński T., Łokuciejewski B., "Selection of the Optimal Saturation Diving System for Depths up to 120m in National Conditions," Department of Underwater Medicine, Department of Maritime Medicine, WAM Gdynia 1986.

**dr inż. Stanisław Skrzyński**  
Katedra Technologii Prac Podwodnych  
Akademii Marynarki Wojennej  
s.skrzynski@amw.gdynia.pl