

BADANIA NAD NURKOWANIAMI SATUROWANYMI W POLSCE I ICH WDRAŻANIE. CZĘŚĆ I A. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BADAŃ NAD NURKOWANIAMI SATUROWANYMI W NASZYM KRAJU. CZASY PIONIERSKIE; LATA 1967- 1985

Stanisław Skrzyński

Katedra Technologii Prac Podwodnych , Akademii Marynarki Wojennej

STRESZCZENIE

Artykuł jest pierwszym z cyklu artykułów dotyczących badań i wdrażania technologii nurkowań saturowanych w naszym kraju. Przedstawiono w nim polską specyfikę i osiągnięcia na tle uwarunkowań gospodarczych i historycznych w tej dziedzinie. W związku z tym, że historia badań i wdrażania technologii nurkowań saturowanych w naszym kraju ma ponad półwieczną historię, przypomniano w artykule wybranych animatorów, bohaterów tego okresu z których kilku zniknęło w mrokach dziejów. W specjalistycznej literaturze światowej w pierwszej 6-ce krajów, które badały i wdrażały, tą będącą „high technology” technologicie znajduje się Polska. W I części artykułu autor opisuje polskie konstrukcje habitatów typu Meduza i Geonur i ich zastosowanie do prac podwodnych na polskim szelfie i akwenach przybrzeżnych. Mimo wielkiego postępu w dziedzinie medycyny i techniki oraz organizacji problemy nurkowań saturowanych mimo upływającego czasu wciąż są aktualne, gdyż są to nurkowania najtrudniejsze z punktu widzenia organizacji, fizjologii podwodnej i techniki zabezpieczającej.

Słowa kluczowe: pionierskie wdrożenia nurkowań saturowanych, medyczne i techniczne problemy dekompresji nurków, badania walidacja tabel dekompresyjnych, nurkowania saturowane, parametry nurkowania saturowanego, prace podwodne, system nurkowy, nurkowania saturowane, dekompresja nurków podwodny habitat, tabele dekompresji.

ARTICLE INFO

PoIHypRes 2021 Vol. 77 Issue 4 pp. 53– 72

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2021-0021

Strony: 20, rysunki: 0, tabele: 0

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 13.05.2021 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 14.06.2021 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



INFORMACJE WSTĘPNE O NURKOWA- NIACH SATUROWANYCH

Nurkowanie saturowane uważane jest za „high technology” podwodnych prac komercyjnych. Jest ono niezbędne w ratowaniu ludzi przebywających długotrwale w warunkach podwyższonego ciśnienia, oraz jako „ostatnia deska ratunku” przy skomplikowanych incydentach dekompresyjnych. W zastosowaniu komercyjnym nurkowanie saturowane jest najbardziej efektywną metodą nurkowania, lecz zarazem wymagającą złożonego i skomplikowanego zabezpieczenia techniczno - organizacyjnego oraz wysokich kwalifikacji zespołu je realizującego.

Nasz kraj może się poszczycić historią badań i wdrożeń tych nurkowań sięgającą aż roku 1967, czyli niewiele krótszą od innych, także tych przodujących w dziedzinie technologii morskich krajów na świecie. Jako naród praktyczny, zaledwie dwa lata po pierwszym udanym komercyjnym nurkowaniu saturowanym rozpoczęliśmy własne prace nad tą, jak dziś już wiemy przełomową i niezwykle użyteczną technologią. Problem długotrwałego pobytu człowieka pod zwiększonym ciśnieniem nie jest związany tylko z morzem; w tym samym okresie tematem zajmowali się fizjologowie w ówczesnej Czechosłowacji. Głównym celem jaki stawiała sobie w tym okresie nauka było zapewnienie możliwości przetrwania i pracy człowieka w warunkach zwiększonego ciśnienia przez jak najdłuższy czas, przy jednoczesnym zapewnieniu mu bezpieczeństwa. Cel ten był motywowany także licznymi problemami występującymi na lądzie, takimi jak praca w kesonach. Inny motywator stanowiła katastrofy, podczas których ludzie przebywali przez długi czas w syfonach wodnych w warunkach podwyższonego ciśnienia.

Problem długotrwałej pracy ludzi pod ciśnieniem dotyczy także innych, czasem wręcz newralgicznych dziedzin. Przykładowo budownictwa tuneli, czy mostów. Zaś w najbliższych latach technologia nurkowań saturowanych będzie musiała być stosowana podczas budowy farm turbin wiatrowych na Bałtyku, i to na głębokościach na których polscy pionierzy batynautyki wiercili celem pobierania próbek do badania dna. Problemy te odżyją w naszym kraju po ponad półwieku, i trzeba będzie rozwiązać je formalnie, na drodze administracyjnej i co jest nieuniknione, badawczej nawet w przypadku przyjęcia nowych standardów zagranicznych¹.

Intensywne badania nad możliwościami adaptacyjnymi człowieka do pracy pod wodą, przy pełnym nasyceniu tkanek organizmu gazami obojętnymi, prowadzone były w wielu krajach. W krajach morskich głównie podczas eksploatacji złóż szelfowych, począwszy od lat 60-tych po lata 90-te. Poprzedziły je badania rozpoczęte na początku XX wieku związane z pracami w kesonach przy budowach mostów i podziemnych tras kolei. W różnych ośrodkach badawczych podejście do zagadnienia długotrwałego przebywania człowieka pod ciśnieniem było na tyle zróżnicowane, iż obecnie nie można wskazać jednego powszechnie przyjętego standardu nurkowań saturowanych. Wielu specjalistów za takowy uważa system marynarki amerykańskiej. Istotnym tu jest fakt, iż opracowane za granicą systemy były zastrzeżone i dostosowane do rozwiązań technicznych oraz poziomu techniki hiperbarycznej danego kraju. Podsumowując, rozbieżności w stosowanych na świecie różnych systemach nurkowań saturowanych są wynikiem zarówno zróżnicowania poglądów dotyczących wpływu zjawisk zachodzących w środowisku hiperbarycznym na organizm człowieka, jak i wielkością nakładów finansowych przeznaczonych na badania [1].

Ważną rolę w badaniach i w realizacji nurkowań saturowanych odgrywały i wciąż odgrywają sprzężenia zwrotne nauk wiodących. Przez takowe należy rozumieć medycynę podwodną oraz działy mechaniki dotyczące techniki hiperbarycznej, teorię organizacji, ergonomię a także tzw. dobrą praktykę nurkową. Zastosowane rozwiązania techniczne wpływają na wymagania medyczne i organizacyjne. Rozwiązania techniczne mają też zasadniczy wpływ na podstawowe elementy przyjętego systemu nurkowania saturowanego. Właściwe technicznie przygotowanie nurkowania wymaga rozwiązania niżej wymienionych problemów techniczno organizacyjnych:

- rodzaj zastosowanych mieszanin oddechowych w poszczególnych fazach nurkowania saturowanego;
- parametry składników atmosfery obiektów hiperbarycznych (mikroklimatu);
- sposób podnoszenia ciśnienia, utrzymania ciśnienia i parametrów atmosfery; (kompresji i dekompresji nurków);
- ustalenie bezpiecznej strefy głębokości pracy nurków w odniesieniu do plateau saturacji, (głębokości ciśnienia saturacji tj. przebywania nurków w komarach hiperbarycznych lub habitatu podwodnego);
- określenie czasu przebywania nurków w warunkach podwyższonego ciśnienia oraz ich czasu przebywania w toni wodnej;
- ergonomiczności zastosowania oddechowego sprzętu nurkowego oraz metody ochrony cieplnej organizmu nurka;
- higienę pracy i odpoczynku oraz żywienia nurków w warunkach podwyższonego ciśnienia;
- higienę mikrobiologiczną oraz indywidualną nurków;
- higienę nurków przed i po przebyciu nurkowania saturowanego;
- sposób komunikacji, łączności i obserwacji nurków;
- poziom niezawodności i jej technicznej nadmiarowości dla zabezpieczenia wysokiego poziomu bezpieczeństwa nurkowania saturowanego.

Wyżej wymienione aspekty i problemy mają odbicie w przepisach, normach i zaleceniach dotyczących realizacji nurkowań saturowanych. Wymagania tych przepisów dla których bezpieczeństwo nurków jest nadrzędnym celem mają uzasadnienie w badaniach naukowych. Przepisy te są wynikiem skumulowanego wieloletniego doświadczenia, o czym nie należy zapominać.

Podstawowym warunkiem opracowania bezpiecznego systemu nurkowań saturowanych, oprócz zagadnień technicznych, medycznych, organizacyjnych i prawnych, było i jest posiadanie bazy doświadczałnej. Baza ta winna spełniać wszystkie niezbędne wymagania do skutecznego zabezpieczenia realizacji zadań dla nurków doświadczalnych i eksperymentalnych ekspozycji ciśnieniowych na skalę laboratoryjną. Nie mniej ważne jest również posiadanie możliwości wykonania doświadczalnych nurkowań saturowanych w warunkach morskich, co w naszym kraju przez pewien okres było niemożliwe. Przyczyną tego stanu rzeczy były uwarunkowania gospodarczo polityczne oraz brak odpowiedniego państwowego programu w koordynacji działań w dziedzinie działalności podwodnej dla potrzeb obronności i gospodarki narodowej, przy jednoczesnym praktycznie całkowitym braku bazy technicznej do badań dotyczących nurkowania w ogóle

[2].

W nurkowaniu saturowanym, jak w żadnym innym nurkowaniu, widoczny jest bardzo wyraźnie związek trzech wiodących dziedzin tj.: medycyny podwodnej, techniki w szerokim spektrum nauk składających się na tę technikę oraz organizacji, w której decydującym jest sprawne i bezpieczne działanie. Badania nad nurkowaniem saturowanym prowadzone były i są nadal wielotorowo. Wymagają one udziału uczonych i specjalistów wielu nauk i dziedzin życia oraz naukowców i personelu specjalistycznego i inżynierskiego łączących, wykorzystujących i wdrażających wybraną wiedzę wynikającą z badań. W naszym kraju droga badania i wdrażania nurkowania saturowanego bardzo odbiegała od przyjętej sekwencji badań krajów wiodących. Początki nurkowań saturowanych w Polsce rozpoczęły się bez udziału stosownych ośrodków naukowych, a wynikały z bieżących potrzeb gospodarki morskiej i górnictwa oraz związanych z tym badań geologicznych.

Wszystkie liczące się państwa morskie badały i pracowały nad rozwojem i wdrożeniem nurkowań saturowanych nie tylko do zastosowań komercyjnych, ale również dla potrzeb obronności. Rozwój metody rozpoczęła w 1957 r roku grupa naukowców z US Naval Diving Laboratory kierowana przez specjalistów medycyny podwodnej kmdr J. Bonda i R. Workmana. Rozpoczęte przez nich badania nad teorią nurkowania saturowanego wdrażano w latach 60-tych XX wieku. Podstawą prac była teza, iż w tkankach ciała nurka przebywającego w danym ciśnieniu otoczenia, rozpuszczają się gazy obojętne, aż do pełnego nasycenia [3,4]. Po czasie pełnego nasyceniu organizmu nurka gazem obojętnym, niezależnie od tego ile czasu by nurek nie przebywał pod danym ciśnieniem, więcej gazu w jego organizmie się już nie rozpuści. Skutkuje to czasem dekompresji niezależnym od czasu przebywania pod ciśnieniem po przekroczeniu czasu całkowitego nasycenia tkanek (pełnej saturacji). Oprócz tej podstawowej uproszczonej tezy, w nurkowaniu saturowanym należało badać też inne czynniki, takie jak wpływ gazów obojętnych na organizm, oddziaływanie psychofizyczne otoczenia, dobór nurków, higiena przebywania w zamkniętej, ograniczonej przestrzeni, wpływ środowiska hiperbarycznego zawierającego domieszki szkodliwe dla organizmu, florę bakteryjną i grzybiczą, warunki oraz ocenę fizycznego i psychicznego zmęczenia nurka, możliwości wykonania przez niego pracy, a także bezpośrednie i odległe skutki zdrowotne dla organizmu oraz możliwości leczenia specyficznych chorób nurkowych w tym rekompresji leczniczej.

Podstawowym wyzwaniem badawczym od strony technicznej było zabezpieczenie długotrwałego pobytu nurka w warunkach ciśnienia oraz zdolności do relatywnie długiej pracy w toni wodnej. Wiodącymi problemami było tu zapewnienie komfortu przebywania, stosownej habitabilności - przestrzeni życiowej, zapewnienie higieny pracy i odpoczynku, ergonomii, wiarygodnych i niezawodnych pomiarów parametrów nurkowania we wszystkich czterech fazach nurkowania saturowanego (kompresji, pobytu na plateau saturacji, pracy w toni wodnej oraz dekompresji), transferu pod ciśnieniem ludzi i sprzętu, udzielenia pomocy medycznej oraz niezawodności odporności systemu na stany i sytuacje awaryjne z którymi wiąże się problem ewakuacji nurka pod ciśnieniem. Każdy z w/w problemów wymaga współpracy przedstawicieli wielu specjalności technicznych: projektantów, konstruktorów, technologów i techników specjalności mechanicznej, chemicznej, metrologicznej, napędów elektrycznych, hydraulicznych i pneumatycznych, ergonomicznych, sanitarnych itp. [2]

Przeglądając literaturę i bazując na własnym doświadczeniu badawczym oraz zawodowym autor stwierdza, iż rozwiązywanie problemów technicznych i organizacyjnych opisywane jest w literaturze fachowej w bardzo ograniczonej skali. Można by wręcz powiedzieć, że stanowi tam drugoplanowy problem. Problemy medyczne i fizjologiczne narzucały wymagania techniczne parametrów nurkowania. Ich przydatność oceniano tylko z punktu medycznego i w mniejszym stopniu ergonomicznego, poprzez pryzmat bezpieczeństwa zdrowia i życia nurka biorącego udział w eksperymencie danej technologii nurkowania.

Badania medyczne i techniczne nurkowań saturowanych i ich technicznego zabezpieczenia rozpoczęto od budowy „podwodnych domków” - habitatów. W trakcie badań zwiększano głębokość - poziom saturacji oraz przechodzono od powietrza jako medium oddechowego do mieszanin nitroksowych, trimiksowych i helioksowych w strefie głębokości morskiego szelfu. Podwodny habitat spełnił swoją rolę w pierwszym etapie pionierskim nurkowań saturowanych, lecz był niepraktyczny do zastosowania w przemyśle offshore, ratownictwie i badaniach morza. Ponadto, był bardzo niewygodny z punktu widzenia obsługowego i zapewnienia komfortu oraz bezpieczeństwa nurkom. System podwodnych habitatów, takich jak Sealab-1, Sealab-2 i Sealab-3, TEKTITE-1, TEKTITE-2 (USA); Helgoland (FRG) oraz Chernomor (ZSRR) czy nasze polskie rozwiązania Meduza I i Meduza II, pracowały na zasadach, że kompresja, przebywanie na głębokości nurków, oraz ich dekompresja odbywała się w całości w podwodnym domku. Szczególne miejsce w wykorzystaniu domków podwodnych zajmuje metoda Aegir, zastosowana przez M. Runge'a (Hawaje). W tym przypadku sprężanie odbywało się w domku podwodnym stojącym przy pomoście. Po napełnieniu zbiorników balastowych wodą, domek zostawał opuszczony na dno, gdzie pozostawał przez cały czas trwania programu. Po zakończeniu eksperymentu balast był wydmuchiwany, aparat wynurzał się na powierzchnię, a nurkowie pozostawali w nim aż do zakończenia okresu dekompresji. Aegir był więc unikalnym połączeniem cech podwodnego domku, pokładowej komory dekompresyjnej i kapsuły transportowej.

Skład mieszaniny gazów w domkach podwodnych był różny [5,4]. Na przykład Sealab i Aegir używały mieszaniny helowo-tlenowej, a TEKTITE, Helgoland i Chernomor mieszaniny azotowo-tlenowej i powietrza (na płytkich głębokościach) podobnie jak polskie Meduza I i Meduza II [5,4,6].

Dla uniknięcia niedogodności domek podwodny wynoszono na powierzchnię gdzie pełnił funkcję komory hiperbarycznej i pozostawiano na jednostce pływającej. Takie rozwiązanie zapewniało mobilność stosowania technologii nurkowań saturowanych bez konieczności transportowania podwodnego habitatu. W tym rozwiązaniu technicznym nurkowie przebywali pod ciśnieniem zbliżonym do panującego na głębokości pracy, „mieszkali” na powierzchni, a na miejsce wykonywania swych zadań udawali się dzwonem nurkowym typu zamkniętego o tym samym wewnętrznym ciśnieniu co w komorze. Było to możliwe dzięki rozwiązaniu technicznemu pozwalającemu na transfer nurków pod ciśnieniem (TUP), jednej z najbardziej niebezpiecznych operacji podczas nurkowania saturowanego. Takie rozwiązania powstawały prawie równoległe do podwodnych habitatów pod koniec lat 60 tych ubiegłego wieku. Wtedy też technikę powiązaną z organizacją dla realizacji nurkowań saturowanych zaczęto nazywać „systemem nurkowym”. Najbardziej technicznie złożonym elementem systemu nurkowania saturowanego był i jest nadal dzwon nurkowy typu zamkniętego, nazywany tak gdyż, podczas operacji zanurzenia panuje w nim ciśnienie plateau saturacji.

Właz dzwonu otwiera się i zamyka po wyrównaniu ciśnienia między otoczeniem a wnętrzem dzwonu, czyli w toni na głębokości zanurzenia -pracy nurków, lub ciśnieniem wewnątrz komory, do której jest podłączany. W budowie dzwonu typu zamkniętego wykorzystano doświadczenia nurkowań głębinowych oraz zastosowano dodatkowe rozwiązania techniczne zapewniające zasilanie aparatów oddechowych nurków, zasilanie ciepłą wodą skafandrów nurkowych i dzwonu, w celu ich ogrzania, utrzymanie łączności i oświetlenia, realizacje pomiarów, czy utrzymanie parametrów atmosfery dzwonu zbliżonej do komory hiperbarycznej na plateau saturacji na powierzchni. Aparaturę zapewniającą te podstawowe funkcje dzwonu trzeba było wkomponować w jego przestrzeń. Wymagania bezpieczeństwa pracy nurków oraz zapewnienie im pomocy podczas prawdopodobnych stanów awaryjnych od strony medycznej i technicznej wymagają umieszczenia w tym celu na dzwonie lub w jego wnętrzu dodatkowych urządzeń i elementów: zapasu gazów, materiałów dla podtrzymania życia i obsługi instalacji gazowych, elektrycznych i hydraulicznych oraz awaryjnych baterii akumulatorów. Ma to na celu uzyskanie założonego poziomu autonomiczności. Czas tej autonomiczności wraz z rozwojem i zwiększeniem głębokości wydłużał się od 12 do 24 godzin, a dla dzwonów pracujących na głębokości 300 m wynosi aktualnie 72 godziny. Autonomiczność dzwonu jest konieczna w przypadku oderwania się wiązki kablowo-wężowej zasilania z powierzchni lub jej uszkodzenia. W sytuacji awaryjnej zerwania liny nośnej dzwon może wypłynąć na powierzchnię samodzielnie po zrzućeniu balastów zapewniających mu ujemną pływalność, oraz ewentualnie odcięciu wiązki kablowo-wężowej. W literaturze niekiedy zamknięty dzwon nurkowy nazywany jest „zanurzalną komorą hiperbaryczną” (SDC - submersible decompression chamber) [7,8].

Metoda nurkowania saturowanego do celów komercyjnych została po raz pierwszy zastosowana przez firmę naftową Westinghouse podczas prac na fałochronie Smith Mountain. Firma korzystała z kompleksu do nurkowania na pokładzie statku Cachalot, na którym nurkowie przebywali pod ciśnieniem w komorze. Byli oni transportowani do komory ciśnieniowej i z powrotem za pomocą kapsuły transportowej, w której również utrzymywano nadciśnienie. Nurkowie spędzili na dnie 800 roboczogodzin w ciągu 12 tygodni. Wykorzystanie kompleksu Cachalot pokazało, że metoda nurkowania nasyconego może znaleźć szerokie zastosowanie. Saturowani nurkowie przebywają pod ciśnieniem w komorze dekompresyjnej umieszczonej na pokładzie statku dostawczego i są transportowani do miejsca pracy również pod ciśnieniem w kapsule transportowej lub podwodnej komorze dekompresyjnej. System ten różnił się od innych opracowanych w tym czasie systemów wykorzystujących zasadę domu podwodnego: (Sealab-1, TEKTITE-1, TEKTITE-2 (USA); Helgoland (FRG) i Chernomor (ZSRR)). W tych systemach kompresja była przeprowadzana na powierzchni, następnie nurkowie byli transportowani do podwodnego domu, gdzie pozostawali aż do zakończenia programu. Po zakończeniu eksperymentu nurkowie wracali do komory dekompresyjnej znajdującej się na powierzchni.

Nowoczesne platformy nurkowe znajdujące się na Morzu Północnym (takie jak Uncle John czy platforma budowana przez Seaforth) są wyposażone w systemy nurkowania saturowanego, pozyskujące nurków całodobowo, 3 razy po 3zespoły trzyosobowe przy użyciu dwóch dzwonów nurkowych. System nurkowy przeznaczony jest dla 28 nurków umieszczanych jednocześnie pod różnymi ciśnieniami plateau saturacji. Na osiągnięcie takiego rozwiązania pozwoliły badania prowadzone z dużą intensywnością do lat 90-tych ubiegłego wieku.

Wynikiem tych badań jest ciągły rozwój pojawiających się od lat siedemdziesiątych przepisów dotyczących budowy systemów nurkowych. Pierwsze przepisy dotyczące budowy systemów nurkowych do nurkowań saturowanych były bardzo szczegółowe i odzwierciedlały wyniki badań i doświadczenia danego kraju, dla którego były tworzone. Do chwili obecnej praktycznie każdy kraj morski eksploatujący szelf posiada takie przepisy. Wymiana międzynarodowa wymusiła, by dla współpracy powstały międzynarodowe zalecenia (IMCA i IMO). Pierwsze przepisy były znacznie bardziej szczegółowe, w porównaniu do aktualnie stosowanych, szczególnie tych międzynarodowych które są na poziomie ogólnych wymagań technicznych [8].

Równoległe z przepisami budowy systemów nurkowych następuje sformalizowanie się przepisów dotyczących nurkowań głębokich i saturowanych. Zawierają one wymagania medyczne, organizacyjne nurkowania i niezbędną technikę do wykonania nurkowania oraz procedury dekompresyjne. Do tych wymagań dołącza się zalecenia procedur postępowania przy wystąpieniu chorób nurkowych i procedury rekompresji leczniczej. W/w przepisy odzwierciedlają specyfikę medyczną i techniczno -organizacyjną danego kraju i chronią jego interesy gospodarcze.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA DEKOMPRESJI W NURKOWANIACH SATUROWANYCH

Mimo upływu ponad stu lat od opracowania pierwszych zaleceń dekompresyjnych, opartych na naukowej interpretacji procesu desaturacji (Paul Bert 1878 r.), do dnia dzisiejszego nie została opracowana metoda dekompresji nawet dla nurkowań przy użyciu powietrza, którą można by było uznać za metodę standardową. Nie dysponujemy również standardem badań weryfikujących poprawność dekompresji. Nie potrafimy także jednoznacznie wskazać, którzy nurkowie będą lepiej tolerować obciążenia dekompresyjne, a którzy gorzej [1].

Podstawowym i wiodącym problemem w nurkowaniach saturowanych i krótkotrwałych, jest rozwiązanie problemu dekompresji nurków w pełnym zakresie, dla wszystkich rodzajów prac podwodnych. Problem ten rozwiązywano i wciąż rozwiązuje się w trzech grupach problemowych, które stanowią całością nurkowania. Najtrudniejsze zadania badawcze stawia się przed medycyną podwodną, począwszy od fizjologii, fizjopatologii, higieny pracy i wypoczynku nurka, doborze pod względem medycznym nurków doświadczalnych, oraz oceny ich kondycji psychofizycznej. Wiąże się z tym problem oceny wpływu dekompresji na stan zdrowia nurka bezpośrednio po nurkowaniu, oraz skutków odległych w długim przedziale czasu. Aktualnie problemy skutków odległych są rozpoznawane badawczo, lecz rzadko opisywane w literaturze.

Drugim problemem wiodącym jest ocena (walidacja) stosowanych tabel dekompresyjnych. Zakres prowadzenia badań w tym temacie zależał od potrzeb przemysłu i obronności, od tradycji danego kraju, środków, które wyasygnowano na badania oraz wyposażenia i możliwości bazy badawczej, którą naukowcy mieli do dyspozycji. Np. badanie dekompresji jednego nurkowania saturowanego na głębokościach 200-300m to nakład rzędu milionów dolarów.

Dekompresja to wciąż najtrudniejsza faza nurkowania. Pomimo lat badań i niemałych nakładów na prace badawcze, proces ten nadal nie jest do końca poznany, oraz nie posiada modelu standardowego, tak w nurkowaniach krótkotrwałych jak i saturowanych. W ostatnich dziesięcioleciach za model porównawczy przyjmowano model nurkowań krótkotrwałych US

Navy, ale głównie w krajach anglosaskich. W dekompresji brakuje ogniwa pośredniego pomiędzy nurkowaniami saturowanymi a krótkotrwałymi. Brak ten wynika głównie z ekonomicznych podstaw, oraz z trudności w opracowaniu racjonalnego pod względem efektywności modelu dla nurków z czasami pobytu na głębokości dłuższym niż 2 godziny, a także z ograniczonym zabezpieczeniem technicznym pracy nurka na średnich i małych głębokościach. Dla tych nurków konieczna jest baza z dzwonem nurkowym oraz aktywna ochrona cieplna pobytu nurka w toni wodnej, co nie jest efektywne z punktu widzenia ekonomicznego.

W latach 70 i 80-tych ubiegłego wieku w naszym kraju istniało pojęcie nurków subsaturowanych tj. dla czasów poniżej czasu pełnego nasycenia organizmu; tkanki wodącej (tj. 5-6 jej czasów połowicznego nasycenia).

Podczas nurkowania krótkotrwałego pełnemu nasyceniu ulegają tylko tzw. tkanki szybkie (np. krew, limfa), o relatywnie krótkim okresie połowicznego nasycenia. Natomiast tkanki średniej prędkości i wolnego półnasycenia, nasycają się częściowo. Relacje tych tkanek dla wybranego czasu pobytu na danej głębokości, tj. oddziaływania ciśnienia, różnią się założonym poziomem ich nasycenia, co implikuje wielorakość modelu dekompresji. W nurkowaniu saturowanym organizm nurka nasycy wszystkie tkanki w 100%, po pewnym okresie czasu przebywania pod danym ciśnieniem, zwanym plateau saturacji lub poziomem saturacji.

W opinii autora artykułu, w polskim środowisku naukowym przyjęło się, że dekompresją zajmują się i opracowują ją lekarze. Istniejące modele dekompresyjne w większości opracowywane były i są przez fizyków i matematyków, ale zawsze z udziałem lekarzy i generalnie dotyczą fizyki zjawiska jakim jest rozpuszczanie, przenikanie i wydzielanie gazów w tkankach człowieka. Historycznie najstarszą i do tej chwili używaną w modelowaniu dekompresji jest hipoteza eksponentialnego nasycania i rozsywania teoretycznych tkanek organizmu, które nie mają bezpośrednio odpowiednika w rzeczywistości [9,10].

Idealny profil dekompresyjny to taki, który z teoretycznego punktu widzenia jest dobrany tak, by utworzyć największy możliwy gradient eliminacji gazu obojętnego z tkanki bez powodowania tworzenia się pęcherzyków [11,9]. Z fizyki zjawiska wiemy, iż prędkość nasycenia tkanek jest tym większa, im większy jest gradient ciśnienia pomiędzy ciśnieniem w tkankach a ciśnieniem zewnętrznym, zależny od głębokości nurkowania, różnicy ciśnienia parcjalnego danego gazu pomiędzy gazem w płucach nurka a poszczególnymi tkankami. W miarę rozpuszczania się gazu w tkankach wielkość gradientu obniża się na skutek zmniejszania się różnic ciśnień parcjalnych pomiędzy krwią a tkankami, co powoduje zmniejszanie się ilości rozpuszczanego gazu aż do momentu zakończenia tego procesu. Ilość gazu rozpuszczonego do czasu pełnego nasycenia będzie również zależna od wentylacji płuc, oraz ilości krwi zasilającej tkanki w jednostce czasu (tętna). Objętości gazów rozpuszczonych w tkankach będą również zależały od rodzaju gazu obojętnego, masy tkanki i jej ukrwienia, czy pozycji nurka w toni wodnej. Dla weryfikacji tabel dekompresji w ostatnich dekadach XX wieku dobierano nurków o wzroście 175cm i wadze 70kg, a w przypadku nurków saturowanych kryteria były jeszcze bardziej ostre. Zartowało się na przykład, że nurek saturowany nie powinien stracić poprzeczki na wysokości 165cm.

Czas pełnego nasycenia tkanek organizmu dla nurków saturowanych przyjmuje się na od 30 do 36 godzin dla azotu jako gazu obojętnego i 26-28 godzin dla helu. W nurkowaniach krótkotrwałych tzw. tkanki szybkie ulegają pełnemu nasyceniu znacznie szybciej (np. przyjmuje się, że krew nasycy się w ciągu 28-30 min dla danego ciśnienia otoczenia) [6].

Czas nasycenia danej tkanki teoretycznej określony jest wielokrotnością okresu półnasycenia, wynikająca z wykładniczej, która jest ciągiem składników szeregu liczb o połowę mniejszych, zbliżających się do zera. Stosując praktycznie zasady teorii dekompresji przyjmuje się jako czas pełnego nasycenia 6 okresów półnasycenia. Jest to 98,5 99,5 % czasu pełnego nasycenia. Na przykład dla tkanki o okresie półnasycenia 40 min, czyli jednej z tkanek wodzących (tj. uwzględnianych w nurkowaniach krótkotrwałych) czas pełnego nasycenia wynosi około 240 min. W przypadku tkanek teoretycznych stosowanych w dekompresji nurków saturowanych, tkanka o okresie półnasycenia 240 min osiąga pełne nasycenie po ponad dobie przebywania pod ciśnieniem. Dla tkanek teoretycznych 480 min pełne nasycenie nastąpi po dwóch dobach, a dla tkanki o czasie półnasycenia 720min po trzech dobach.

Model dekompresji jest odwzorowaniem zjawisk zachodzących w organizmie (w pewnym przybliżeniu), które są zweryfikowane przez fizjologię podwodną i okazały się bezpieczne w praktyce. Półokresy nasycenia od 4 min do 480 min odwzorowują procesy rozsywania i nasycania tkanek w wystarczającym przybliżeniu.

W tabelach dekompresji opartych na modelu Haldana lub neohaldanowskich operujemy okresami półnasycenia np. RDP PADI w modelu dekompresji dla nurków krótkotrwałych uwzględniono 14 rodzajów tkanek i przyjęto następujące półokresy nasycenia grupując je w wielokrotności minut: 5', 10', 20', 30', 40', 60', 80', 100', 120', 160', 200', 240', 360', 480'. Tabele US Navy dla nurków krótkotrwałych przyjmują mniejszą ilość tkanek teoretycznych. Ich półokresy nasycenia to 5, 10, 20, 40, 60, 80, 90, 100 i 120 minut. Stosowane modele wykorzystują inne grupowanie czasu i wartości, a te są teoretycznym modelem matematycznego opisu zjawisk bardzo złożonych na poziomie biologicznym. W nurkowaniach krótkotrwałych w zależności od czasu pobytu na głębokości generalnie przywołuje się kilka tkanek wodzących, tj. tych które muszą być uwzględnione w procesie rozsywania tak, by nie przekroczyć dopuszczalnego gradientu różnicy tzw. przesylenia, czyli mówiąc w dużym uproszczeniu różnicy ciśnień pomiędzy tkankami i otoczeniem, które nie spowodują utworzenia pęcherzyków gazowych w tkankach powodujących incydenty i choroby dekompresyjne. Z chwilą gdy gradient ciśnienia rozsywania przekroczy wartość dopuszczalną określamy to fazą przesylenia, i tak ustawiamy dekompresję czasowo by te przesylenie krytyczne zlikwidować. W innych modelach opartych o teorie wzrastania pęcherzyka gazowego lub zjawisk dyfuzji też operujemy ciśnieniami, których nie możemy przekroczyć. Opracowanie procedur dekompresyjnych polega na unikaniu krytycznych przesyceń w tkankach o różnych czasach półnasycenia [9,10].

Pierwszym, który wprowadził metodę obliczenia przesyceń był lekarz R D. Workman w połowie lat 60 ubiegłego wieku. Na podstawie badań dekompresji jakie prowadził dla US Navy Experimental Diving Unit (NEDU) wprowadził „wartość M” (od słowa maksymalny) dla określenia granicznego gradientu ciśnienia maksymalnego gazu obojętnego, jakie dana tkanka toleruje przy danym ciśnieniu otoczenia bez objawów choroby ciśnieniowej. Ta metoda jest stosowana także we współcześnie stosowanych tabelach dekompresyjnych. Obliczenie wartości przesylenia sprowadza się do rozwiązania prostego równania liniowego $M = \Delta M * \text{głębokość} + M_0$, w którym współczynniki M są charakterystyczne dla danej tkanki teoretycznej. M, czyli maksymalne dopuszczalne przesylenie tkanki dla danego gazu obojętnego jest sumą nasycenia zerowego M_0 oraz iloczynu ciśnienia absolutnego i współczynnika ΔM [11].

Dekompresja nurków saturowanych różni się w zasadniczy sposób od tej wykorzystywanej do nurków krótkotrwałych dynamiką rozsycenia tj. powolnym obniżaniem ciśnienia w długim przedziale czasowym. W przypadku nurków saturowanych opracowanie metody dekompresji z zasady opiera się o jedną wiodącą tkankę o relatywnie długim czasie połowicznego rozsycenia zakładając, że w pozostałych tkankach nie wystąpią przesylenia krytyczne, co w niektórych modelach nie jest pewne [11]. Większość modeli dekompresji nurków saturowanych oparta jest o ciągłe, wolne obniżanie ciśnienia ze zmienną szybkością w danych przedziałach ciśnień (np. 1,8mH₂O/godz., 1,5mH₂O/godz. 1,2mH₂O/godz. do 0,90 mH₂O dla tabel US Navy). Modele dekompresji nurków saturowanych stosują klasyczne metody obliczenia, przy czym w tym typie nurkowania przyjmuje się jako wiodącą tkankę teoretyczną o czasach połowicznego rozsycenia/nasylenia 240 min do 480min.

Pierwsze modele dekompresji nurków saturowanych były przystosowane do nurkowania z zastosowaniem podwodnych habitatów utrzymywanych na danej głębokości. Nawyki z modeli dekompresji nurków krótkotrwałych, w których brak jest możliwości płynnej zmiany ciśnienia spowodowały, że pierwsze modele stosowały dekompresję frakcjonowaną, którą z biegiem czasu i zdobywanym doświadczeniem zastąpiono dekompresją ciągłą. Nie rozstrzygnięto, która dekompresja jest bardziej efektywna czy dozująco skokowo gradient rozsycenia, czy płynna zmiana tego gradientu [1]. Pierwsze doświadczenia z zastosowania nurków saturowanych stosujących habitaty wymagały bazy powierzchniowej oraz połączenia z tą bazą, a także podstawowego zasilania zabezpieczającego procesy życiowe nurków. Proces dekompresji nurków-akwonautów związany był z wynurzeniem habitatu, co wymagało dekompresji skokowej. Takie rozwiązanie realizacji dekompresji uzależniało ją od warunków hydrometeorologicznych. Dlatego też większość doświadczalnych nurków saturowanych odbywała się na jeziorach lub osłoniętych akwenach morskich.

WPLYW OKIENKA TLENOWEGO NA DEKOMPRESJĘ W NURKOWANIU SATUROWANYM

Okienko tlenowe jest również wykorzystywane w dekompresji nurków saturowanych. Dwutlenek węgla, jako produkt metabolizmu jest usuwany z organizmu. Jest on 25 razy lepiej rozpuszczalny w osoczu krwi niż tlen i zgodnie z prawem Henry'ego wywiera mniejsze ciśnienie parcjale. Taki rozkład ciśnień parcjalnych w tkankach i układzie krążenia zapewnia różnicę ciśnień pomiędzy ciśnieniem w pęcherzykach płucnych i systemem naczyń włosowatych w tkankach organizmu. W dekompresji nurków saturowanych ważną rolę odgrywa poziom ciśnienia parcjalego tlenu. Jest on ograniczony fizjologicznymi działaniami tlenu w aspekcie ciśnienie parcjale i czas oddziaływania. Podczas kompresji-dekompresji aktywne gazy (tlen, dwutlenek węgla, para wodna) są wymieniane przez gazy obojętne do czasu ustabilizowania się okienka na nowym poziomie ciśnienia otoczenia. Dzięki odpowiedniemu rozłożeniu przystanków dekompresyjnych (przy wzięciu pod uwagę wrodzonego niedosycenia) można utrzymywać całkowitą prężność gazów w tkankach zbliżoną do ciśnienia otoczenia [12]. Takie podejście do dekompresji nosi nazwę „wynurzenie bez przesylenia”. Jest to działanie bardzo bezpieczne, zwłaszcza dla nurków saturowanych, ale zabiera bardzo dużo czasu w porównaniu do wynurzenia z ograniczonym przesyleniem, które zostało wprowadzone w algorytmach dekompresji nurków krótkotrwałych.

Pobyt na plateau saturacji oraz pobyt w toni wodnej i dzwonie wymagają różnych mieszanin oddechowych. Ponadto, ilość rodzajów mieszanin stosowanych różni się w zależności od głębokości i technologii nurkowania saturowanego. Np. podczas kompresji stosuje się tzw. mieszaninę startową lub mieszaniny, które stosowane są w procesie kompresji. Skład mieszanin musi być tak dobrany, by nie przekroczyć określonego ciśnienia parcjalego tlenu tak w procesie pobytu na plateau jak i podczas pracy na głębokości. Następną grupą są mieszaniny awaryjne, stosowane dla procedur leczniczych i stanów awaryjnych. W doborze mieszanin wykorzystujemy okienko tlenowe. Jeśli praca nurka odbywa się na różnych głębokościach niż głębokość plateau saturacji, to skład mieszanin roboczych wykorzystuje okienko tlenowe by powrót nurka do dzwonu nie wymagał stosowania dekompresji, lub w celu jej skrócenia. W istniejących i stosowanych tabelach dekompresji nurków saturowanych na plateau saturacji za ciśnienie parcjale tlenu przyjmuje się od 30kPa do 45kPa (0,3ata do 0,45ata). Podczas dekompresji od 40kPa do 50kPa. W jednym przypadku nawet 60kPa z uwarunkowaniem, że dekompresja nie może trwać dłużej niż 56 godz. W nurkowaniach saturowanych technicznie jest możliwe zastosowanie dekompresji izobarycznej w której na 3-4 godz na plateau saturacji podnosi się ciśnienie parcjale tlenu np. z 40kPa do 50kPa (0,4 do 0,5 ata). Pozwala to na szybsze obniżanie ciśnienia w I fazie dekompresji [13].

FAZY NURKOWANIA SATUROWANEGO

FAZA KOMPRESJI

Dla sprzężenia nurków do ciśnienia plateau saturacji w określonym czasie operacja ta jest wykonywana wolno z dwóch względów. Po pierwsze faza kompresji jest ściśle programowana tak, by utrzymać wymogi fizjologiczne. Trwa to w stosunku do nurków standardowych bardzo wolno, od 10 do 15 m/godz. lub nawet wolniej w przypadku nurków bardzo głębokich (czas określony dobami ze względu na zespół neurologiczny wysokich ciśnień HPNS). Drugim czynnikiem są techniczne możliwości systemu nurkowego, oraz konieczność zapewniania parametrów komfortu atmosfery komory. Komora musi być technicznie przygotowana do homogenizacji podawanych mieszanin startowych i kontroli składu atmosfery poprzez wymuszoną cyrkulację gazów dla ciągłej regeneracji oraz utrzymania parametrów przy zwiększającym się ciśnieniu, tak by po osiągnięciu plateau dekompresji i czasu adaptacji nurków (od 12 do 24 godzin) mogli oni przystąpić do wykonywania zadań podwodnych, tj. przejść do dzwonu i zanurzyć się.

POBYT NA PLATEAU

Pobyt na plateau wymaga utrzymania parametrów z określoną dokładnością przy cyrkulacji strumienia regeneracji, zmiennych stanach eksploatacyjnych komory takich jak sen nurków, przygotowanie nurków do pracy, zabiegi higieniczne, odpoczynek itp. Czynniki życiowe mają istotny wpływ na parametry atmosfery komory. Np. wysiłek fizyczny zwiększa

zużycie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla, podczas kąpieli zwiększa się wilgotność, podobnie jak po powrocie z pracy w toni wodnej suszenie skafandrów i ocieplaczy. Parametrami stanu atmosfery są ciśnienie plateau, saturacja, temperatura, wilgotność, ciśnienie parcjale tlenu i CO₂. Komfort cieplny w warunkach atmosfery helowej narzuca dokładność pomiaru w/w parametrów, ale organiczny jest z kolei wielkością strumienia regeneracji tak, by w atmosferze szczególnie helowej nurkowie nie odczuwali dyskomfortu cieplnego przy silnym strumieniu oraz hałasu spowodowanego przepływem gazu.

DEKOMPRESJA

Dekompresja jest z reguły procesem wielodobowym. Może być realizowana w sposób ciągły lub skokowy (frakcjonowany). W tym procesie dynamicznym muszą być utrzymane na stałym poziomie parametry np. pO₂, pCO₂, co przy równoczesnym zabezpieczeniu potrzeb socjalnych nurków komplikuje proces jej przeprowadzenia. Dla przykładu, szybkość obniżania ciśnienia podczas dekompresji zmienia się od 1,8 do 0,6 m/godz., lub przy dekompresji skokowej od 0,6 do 1,8 - 2m skok na godzinę. Podczas dekompresji utrzymujemy stałe ciśnienie parcjale tlenu, co wiąże się z jego dozowaniem. Obniżanie ciśnienia właściwości gazów, które wpływają na układy pomiarowe. Np. dopuszczalna zawartość dwutlenku węgla i tlenu przy obniżeniu ciśnienia ogólnego rośnie, co wymusza utrzymywanie zapasów wielu gazów wzorcowych dla kontroli wskazań analizatorów tych gazów. Po osiągnięciu 15m H₂O ze względu na zagrożenie pożarowe utrzymuje się zawartość tlenu w granicach 20-22%, co wydłuża proces dekompresji, gdyż obniża się działanie okienka tlenowego.

WERYFIKACJA I WALIDACJA TABEL DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH

Zgodnie z postanowieniami Deklaracji Helsińskiej po uzyskaniu pozytywnych wyników badań wpływu ciśnienia na zwierzętach rozpoczęcie badań dekompresji z udziałem ludzi wymaga zgody specjalnego gremium oceniającego ryzyko utraty zdrowia i/lub życia osób biorących udział w tym eksperymencie. Takową zgodę na badania na ludziach należy uzyskać dla prowadzenia badań dekompresji nurków. Kodeks Etyki Lekarskiej, UZL – Ustawa z dnia 5 grudnia 1996 r. o zawodach lekarza i lekarza dentysty, określa w Art. 41a. „Lekarz przeprowadzający badania naukowe, a w szczególności eksperymenty medyczne, powinien przestrzegać norm i obowiązków wynikających z Kodeksu Etyki Lekarskiej oraz ogólnie przyjętych zasad etyki badań naukowych”. Badania medyczne prowadzone z udziałem ludzi można podzielić na dwa główne rodzaje – badania interwencyjne i obserwacyjne. W badaniach interwencyjnych ocenia się oddziaływanie na ich uczestników różnych czynników. W przypadku nurków jest to stres dekompresyjny. Po ekspozycji ciśnieniowej przeprowadza się z kolei obserwację oraz zbieranie i analizę danych. Badania interwencyjne i obserwacyjne mogą być kierowane zarówno przez lekarzy, jak i przez badaczy niebędących lekarzami. W polskich badaniach dekompresji kierowali nimi lekarze [2].

Każde tabele dekompresji wprowadzane do nurkowania (nie tylko komercyjnego) obligatoryjnie muszą być weryfikowane i walidowane w celu zapewnienia ich dokładności, odpowiedniości i najważniejszego wskaźnika tj. bezpieczeństwa. Dla każdego tabel określa się warunki fizjologiczne i techniczne ich realizacji. Przy tworzeniu modeli dekompresyjnych wymaga się określenia kinetyki wymiany gazowej oraz kryteriów jakości dekompresji. Kinetyka wymiany gazowej jest funkcją, w której przelicza się profil nurkowania na skumulowaną dawkę dekompresyjną, którą jest prężność gazu rozpuszczonego w tkance teoretycznej [14]. Teoria i doświadczenie pokazuje nam, że nie istnieją tabele dekompresyjne w 100% bezpieczne, a bezpieczeństwo tabel określa się poprzez podanie prawdopodobieństwa wystąpienia incydentu dekompresyjnego. Takie podejście pomija zjawisko bardzo mało zbadane, jakim są odległe skutki nurkowania. W odniesieniu do nurków saturoowanych od początku ich stosowania nie znano metody umożliwiającej porównawczą ocenę systemów z punktu widzenia narażenia w nich nurków na wczesne lub późne objawy choroby ciśnieniowej Ponadto, do lat osiemdziesiątych wiarygodność systemów dekompresyjnych nie była oceniana statystycznie [13]. Prężność gazu w tkance teoretycznej jest głównie funkcją głębokości, czasu, ciśnieniu cząstkowego tlenu, rodzaju gazu obojętnego, temperatury wody i wysiłku nurka. Weryfikacje dekompresji opiera się o dwa modele, deterministyczny lub statystyczny.

Procedury dekompresyjne nurkowań saturoowanych są weryfikowane w oparciu o modele deterministyczne. W tej metodzie określa się kryteria brzegowe dla badanych metod i procedur dekompresji, które nigdy nie mogą być przekroczone. W modelach deterministycznych nie określa się poziomu ryzyka, jakim jest przekroczenie założonych kryteriów dekompresyjnych. Deterministyczne kryteria dekompresji zwykle składają się z zestawu wartości maksymalnych kilku krytycznych zmiennych. Każdy program dekompresji, który utrzymuje te wartości poniżej wartości maksymalnej jest dopuszczalny. Ostatecznego wyboru profilu dekompresji dokonuje się poprzez powszechnie stosowanie zasady minimalizacji czasu dekompresji.

Modele deterministyczne są tak skonstruowane, że nie zezwalają na odstępianie od zaproponowanych profili dekompresji. Dopuszczają jedynie ekspozycje przy różnych, z góry znanych, poziomach ryzyka. Najczęściej stosowaną funkcją modelującą model wymiany gazowej jest zależność eksponentialna. Założenia dotyczące kinetyki wymiany gazowej mogą być takie same zarówno dla modeli deterministycznych jak i statystycznych. Różnica pomiędzy tymi dwoma podejściami leży w przyjętych kryteriach dekompresji. Przyjętym wskaźnikiem prawidłowości dekompresji jest brak symptomów choroby ciśnieniowej. Symptomy tej choroby nigdy nie występują podczas zanurzania-sprężania i pobytu pod ciśnieniem, a powstają dopiero jako rezultat wynurzenia, lub zmniejszenia ciśnienia otoczenia.

Statystyczne modele dekompresyjne, w przeciwieństwie do deterministycznych, oparte są na obliczaniu prawdopodobieństwa ryzyka wystąpienia choroby ciśnieniowej DCS (skrót choroby ciśnieniowa z ang. decompression sickness). Weryfikacja statystyczna określa poziom ryzyka, który jest do przyjęcia dla bezpieczeństwa pracy nurka. Ogólnie, kryteria dekompresji ograniczone są przede wszystkim wartościami zmiennych, które określają jak należy rozłożyć głębokości i czasy postojów na stacjach dekompresyjnych, tak by ograniczyć maksymalną wartość ciśnienia parcjale gazu obojętnego w tkankach teoretycznych podczas dekompresji.

Statystyczne kryteria dekompresji ograniczone są poprzez dopuszczalny poziom ryzyka dla dowolnego rozkładu dekompresji. Każdy rozkład dekompresji, który nie przekracza określonego poziomu ryzyka, jest do zaakceptowania. Zastosowanie modeli statystycznych opiera się na obliczaniu aktualnego prawdopodobieństwa zaistnienia DCS. Prawdopodobieństwo to nie jest wykorzystywane jedynie do oceny i zatwierdzenia modelu, ale także daje ilościową miarę jakości dopasowania matematycznego modelu teoretycznego do danych eksperymentalnych pod względem przewidywania zagrożenia DCS [13].

Akceptację danego sposobu dekompresji opiera się o ilość incydentów dekompresyjnych lub ilości i wielkości pęcherzyków gazowych występujących we krwi żyłnej. Opis zjawisk towarzyszących dekompresji jest sprawą złożoną ze względu na brak precyzyjnych, jednoznacznych metod pomiarowych, mierzących procesy zachodzące w tkankach żywego organizmu. Matematyczne sposoby opisu dekompresji opisują tylko przybliżone procesy zachodzące podczas dekompresji. Opis taki polega najczęściej na możliwie jak najdokładniejszym dopasowaniu do danych eksperymentalnych stosunkowo prostej funkcji matematycznej. Takie modele matematyczne należy traktować jedynie jako sposób antycypowania sposobu bezpiecznej dekompresji, nie zaś jako odbicie procesów fizjologicznych [15]. Powszechnie stosowany sposób oceny tabel dekompresyjnych opiera się nie na kryteriach fizjologicznych, lecz na patofizjologicznych, czyli na objawach choroby ciśnieniowej. W następstwie tego wykładnikiem przydatności tabel jest w zasadzie dowolnie akceptowana częstotliwość przypadków choroby ciśnieniowej I-go typu [1]. Natomiast, każda nowa technologia nurkowania wymaga opracowania właściwego dla niej systemu dekompresji, a co za tym idzie, przeprowadzenia określonych badań z udziałem ludzi. Badań, które mają zdecydowanie charakter „narażających zdrowie badań doświadczalnych”. Np. klasycy dekompresji Homer i Weathersby określają dla potwierdzenia, że w ocenianym systemie dekompresji nie wystąpi więcej aniżeli 7% przypadków choroby ciśnieniowej. Przy 95% wymaganym przedziale ufności, należy przeprowadzić 40 bez incydentalnych prób. Przy tym samym przedziale ufności pomyślny przebieg 20-tu prób dekompresyjnych pozwala jedynie przewidywać, że rzeczywista zapadalność na chorobę ciśnieniową będzie się mieścić w przedziale do 17%. Natomiast uzyskanie potwierdzenia, że częstotliwość przypadków w badanym systemie dekompresji nie przekroczy 5% wymaga przeprowadzenia setek badań.

Na tej podstawie badacze problemu wyrazili pogląd, że nie da się walidować tabel dekompresyjnych nurkowań saturowanych z wymaganą wiarygodnością bez „wielkich zasobów finansowych i ludzkich”. Konsekwencją podanych zależności jest długotrwałość takiego cyklu badań, którą potwierdza również cykl naszych kolejnych programów. Okres takiego testowania trwać powinien 15 lat przy stosowniu dużych nakładów finansowych [3].

Przedstawione metody statystycznej oceny dekompresji (redukujące liczbę prób) stały się niezaprzeczalnym osiągnięciem, jednakże problem oceny narażenia nurków na chorobę ciśnieniową rozwiązują tylko częściowo. Po pierwsze, nie pozwalają na wyrażenie opinii o metodzie dekompresji saturowanej bez równoczesnej znajomości liczby przypadków choroby ciśnieniowej i liczby nurkowań (które to dane są zwykle niedostępne). Po drugie przy nie stwierdzeniu przypadków choroby ciśnieniowej w porównywalnych systemach dekompresji nawet przy znacznej liczbie prób (10 – 20) nie pozwalają na ustalenie, który z nich jest poprawniejszy. Z powyższego wynika, że porównawcza ocena bezpieczeństwa nurków w systemach dekompresji znajduje się często poza zasięgiem metod statystycznych. Poza ich zasięgiem znajduje się również ocena nowoprojektowanych systemów [1].

Przed rozpoczęciem programu badań na realizatorach ciąży obowiązek odpowiedzi na pytanie czy odpowiedzialność moralna i prawna związana z realizacją programu badania eksperymentalnego nad nową technologią nurkowań i sposobem dekompresji zostanie zrównoważona osiągniętymi wynikami. Podejmując badania mieliśmy w Polsce dylemat podobnie jak w innych krajach, czy rozpocząć badania własne o trudnym do przewidzenia wyniku, czy też wybrać najlepszą z już stosowanych metod dekompresji saturowanych. Polskie badania nad dekompresją w pionierskiej fazie opierały się o dane zdobywane z Zachodu, przy braku pełnej informacji ze względu na brak dostępu do wyników badań (tzw. „żelazna kurtyna”).

OGÓLNE PROBLEMY BADAWCZE TECHNICZNE I ORGANIZACYJNE WDROŻENIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH

Aby nurkowie mogli w bezpieczny sposób penetrować i eksplorować dna mórz i oceanów, używają coraz bardziej skomplikowanego sprzętu oraz rozbudowanych układów i systemów wspomaganie ich pobytu w toni wodnej. Do grupy podstawowych urządzeń wspomagających pracę nurków należą zestawy urządzeń zwane dawniej kompleksami, lub współcześnie systemami nurkowymi. Głównymi ich elementami są komory dekompresyjne zwane też hiperbarycznymi.

System nurkowy jest miejscem, w którym nurkowie odpoczywają i regenerują siły. Muszą im zatem zostać stworzone odpowiednie warunki mikroklimatu i komfortu cieplnego, zbliżone do tych, jakie panują w warunkach normobarycznych. Jednocześnie przestrzeń systemu nurkowego musi zapewnić miejsce na ubranie sprzętu nurkowego, transport nurka do pracy, jego powrót na plateau saturacji oraz wykonanie czynności po nurkowaniu takich jak sprawdzanie i konserwacja sprzętu oraz przygotowanie sprzętu do następnego nurkowania.

Na mikroklimat środowiska hiperbarycznego składa się:

- ciśnienie panujące w komorze hiperbarycznej,
- wilgotność panująca w komorze hiperbarycznej,
- temperatura panująca w komorze hiperbarycznej,
- prędkość przepływu czynnika oddechowego,
- rodzaj stosowanego czynnika oddechowego, określającego ciśnienie parcjale tlenu i jego zawartość w dolnych i górnych granicach,
- zanieczyszczenia - szczególnie CO₂ (powstający w wyniku wydalania przez nurka jako produkt przemian metabolicznych. Jest to istotny parametr, który mówi o potrzebie wentylacji i regeneracji atmosfery).

W wyniku wymiany gazowej w płucach, nurkowie wydychają dwutlenek węgla do wnętrza komory. Ze względu na określoną objętość habitatu zanieczyszczenie to gromadzi się, powodując zagrożenie dla zdrowia nurków.

Zasadniczym celem regeneracji jest więc oczyszczanie atmosfery oddechowej i utrzymywanie warunków mikroklimatu poprzez wymianę określonych objętości zużytego gazu na świeży.

Do podstawowych funkcji urządzeń systemu nurkowego należą:

- usuwanie zanieczyszczeń powstających na drodze fizjologicznej, w tym dwutlenku węgla i innych produktów metabolizmu,
- usuwanie zagrożeń biologicznych, spowodowanych florą bakteryjną i grzybiczną,
- usuwanie zanieczyszczeń powstających w czasie eksploatacji kompleksu,
- uzupełnienie konsumowanego przez nurków tlenu poprzez jego dozowanie i rozprzestrzenianie w habitacie,
- utrzymywanie jednorodnego składu atmosfery oddechowej w całej objętości kompleksu,
- zastosowanie sprzętu oddechowego o minimalnym zużyciu mieszanin oddechowych,
- dobór mieszanin oddechowych do plateau saturacji, pracy nurka w strefie głębokości zadania podwodnego dopuszczalnego ze względów fizjologicznych oraz oporów oddechowych sprzętu oddechowego,
- utrzymanie i regulowanie komfortu cieplnego nurków oraz mikroklimatu przestrzeni hiperbarycznej dzwonu i komory,
- zastosowanie aktywnego ogrzewania skafandrów nurków, pozwalającego na kilkugodzinne przebywanie nurka w toni wodnej [16,17].

Badania i opracowanie oraz zbudowanie bezpiecznego i utylitarne systemu nurkowego do nurkowań saturowanych wymagały i wymagają szerokiego spektrum specjalizacji. Mowa tu o udziale naukowców, inżynierów, techników, organizatorów-menedżerów, teoretyków i praktyków z takich nauk jak medycyna (w tym medycyna podwodna), mechanika, inżynieria materiałowa, ergonomia, specjalistów do spraw systemów bezpieczeństwa, łączności, hydroakustyki, metrologii, psychologii itp.

Polska historia jest jakby zaprzeczeniem wyżej podanych uwarunkowań. W polskiej odświeżeniu badań ważnym był element wolicjonalny, w którym najważniejszym i podstawowym elementem są ludzie zafascynowani batyanutyką. Ich upór i zdolność pokonywania trudności oraz realizowanie swojej wizji były i są na najwyższym poziomie przy równoczesnej bierności lub czasami wręcz całkowitym braku zaangażowaniu ze strony ludzi nauki zajmujących się tą problematyką. Problem podjęli ludzie głównie zajmujący się nurkowaniem amatorsko, do których dołączyli nieliczni specjaliści i nurkowie zawodowi. Byli to entuzjaści, pasjonaci nurkowania, pracujący pod wodą z godną podziwu odwagą. Ludzie ci byli siłą napędową dla ekipy rozwiązującej problem nurkowań nowego typu. Do tej ekipy dołączyli ludzie pragmatyczni, żądni sukcesu nie tylko finansowego, lecz i chęci przeżycia przygody, oraz zwykli zjadacze chleba, których pociągał udział w programie wprowadzenia postępu. W takich warunkach odbywały się pierwsze w naszym kraju nurkowania saturowane, podziwiane na świecie, a zarazem przyjmowane ze zdziwieniem ze względu na przyjęte parametry plateau saturacji na zbyt dużych głębokościach przy użyciu powietrza. Jeszcze większe zdziwienie budził fakt, że przed eksperymentem w warunkach naturalnych nie było badań laboratoryjnych ani w warunkach naturalnych (w komorach na głębokościach plateau 12m stopniowo zwiększając czas i głębokości), jak to odbywało się w krajach przodujących w tej dziedzinie [5,4,7].

BIBLIOGRAFIA

1. Doboszyński T. „Problematyka badań doświadczalnych z udziałem ludzi a wdrażana technologia nurkowania” IV Sympozjum – Nurkowanie-Problematyka Techniczna. Akademia Marynarki Wojennej. Gdynia 1994.
2. Dokumentacja techniczne i organizacyjna CPBR - 9.5 „Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą, Systemów podtrzymania życia kompleksu nurkowego GWK- 200”. Akademia Marynarki Wojennej. Stocznia Szczecińska im. A.Warskiego 1990r
3. R.D Vann “Comprehensive strategy for saturation decompression with nitrogen-oxygen” Workshop on Decompression from NITRIX Saturation Diving January 8-9 1985 Institute for Environmental Medicine University of Pennsylvania
4. Miller J.W ,Koblick I.G Living and Working in the sea VanNostrand Reinhold Company ISBN 0-442-26084-9 1984,
5. Miller J NOAA Diving Manual Diving of Science and Technology. 2-end edition US Government Printing Office Washington DC 1979.
6. Zespół autorów p.k.S.A.Guliar „Organizm człowieka i podwodna sroda” Zdorowie Kijew 1977
7. US Navy Diving Manual, 1991
8. Przepisy Towarzystw Klasyfikacyjnych DNV, ABS , Lloyd RS MRS z powstałych w II połowie XX wieku.
9. Bennet P.B and.Elliot B.H.,The Physiology and Medicine of Diving` 2, 3 edition London, Philadelphia, Toronto, Tokyo 1993
10. Vann R D „Comprehensive Strategy For Saturation Decompression with Nitrogen-Oxygen Duke Univ Medical Center Durham 1984 Feb
11. Wienke B.R. „Basic Decompression Theory and Application”. Best Publishing Company, Flagstaff. USA 1991.
12. Lambertsen N C.J.: Basic Requirements for Improving Diving Dept. and Decompression Tolerance, 21 Proceedings from Conferense “Potential Advances in Deep Diving”. Baltimore, 1967.
13. Doboszyński T., Łokuciejewski B. „Tabele dekompresyjne dla trimiksowych nurkowań saturowanych do 120 m. wraz z zasadami rekompresji leczniczej”, CPBR-9.5. „Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą”, Katedra Medycyny Morskiej WAM, Gdynia 1990.
14. Kenny J.E.: Business of diving. Gulf Publishing: Houston 1972 .
15. Dębski A. „Niektóre problemy batynautyczne w służbie potrzeb gospodarczych” Biuletyn Informacyjny 1-2 1975 Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
16. HAUX G.: „Underwater engineering. Balliere Tindell ISBN 0-7020-0749-8. London 1982.
17. Wymagania dotyczące parametrów technicznych kompleksu nurkowego” Centralny Program badawczo-rozwojowy 95 cel 31.Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej. Gdynia 1987.

¹ Uwaga Dla celów tego artykułu za „długotrwałe przebywanie człowieka pod ciśnieniem przyjmuje się czas większy od dopuszczalnych czasów pobytu na głębokości nurków przewidzianych w tabelach dekompresyjnych dla nurkowań krótkotrwałych, w tym tabel dla przypadków awaryjnych w których nastąpiło pełne nasycenie gazem obojętnym wszystkich tkanek organizmu człowieka dla danego ciśnienia otoczenia. W odróżnieniu od wykładni ustawy o wykonywaniu prac podwodnych z dnia 17 października 2003 r., długotrwałe prace podwodne to – „prace podwodne, których czas trwania przekracza 8 godzin, polegające na jednorazowym, ciągłym pozostawianiu nurka pod wpływem podwyższonego ciśnienia w czasie wykonywania prac pod powierzchnią wody i w czasie przebywania na powierzchni w komorze hiperbarycznej”. Takie określenie włącza nurkowania krótkotrwałe z użyciem powietrza i mieszanin oddechowych.

Stanisław Skrzyński
Akademia Marynarki Wojennej
im. Bohaterów Westerplatte 81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
tel.: +58 626 27 46.
e-mail: skrzynski@interecho.com