

WYBRANE ZAGROŻENIA PROCESU DEKOMPRESJI, CZĘŚĆ I: WYBRANE INHERENTNE RODZAJE RYZYKA REZYDUALNEGO W PROCESIE DEKOMPRESJI

Ryszard Kłós

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

Bezpieczne przejście z atmosfery o wyższym ciśnieniu do atmosfery o niższym ciśnieniu realizowane jest w oparciu o zaplanowany proces dekompresji, najczęściej na drodze zmian ciśnienia i/lub składu czynnika oddechowego w funkcji czasu. Jednak na proces dekompresji ma wpływ większa liczba inherentnych¹ czynników, niż tylko zmiany ciśnienia i składu czynnika oddechowego, których wartości powinny być utrzymywane w pewnych zakresach. Jednak zdarza się, że kontrola nad nimi nie może być dotrzymana i pozostają one elementami rezyduального ryzyka² procesu dekompresji. Bezpieczeństwo dekompresji powinno być szacowane, między innymi, poprzez analizę tego ryzyka dla każdej realizacji procesu dekompresji.

Słowa kluczowe: dekompresja, choroba dekompresyjna, ryzyko, zagrożenie.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2020 Vol. 71 Issue 2 pp. 7 – 36

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2020-0006

Strony: 29, rysunki: 0, tabele: 1

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 25.01.2020 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 27.03.2020 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Każdy eksploatowany system dekompresyjny podlega obserwacjom i ocenom dokonywanym przez użytkowników, czasami także diagnozowaniu³ przez powołane do tego ciała nadzorujące. Analiza zbieranych obserwacji prowadzi do ucięcia się pewnych praktyk, które mogą zacząć składać się na tzw. „dobre praktyki”. Choć wnioski z tak zbieranych obserwacji posiadają zazwyczaj odniesienie do aktualnych teorii, to nie mogą one stanowić dokładnych reguł postępowania, gdyż nie zostały one poddane sprawdzeniu w naukowym procesie poznawczym oraz walidowane⁴. Stąd obserwacje te są niechętnie opisywane w formie zaleceń⁵, choć stanowią ważne przesłanki do analizy rezydualnego ryzyka dekompresji. Jeśli wnioski nie stanowią jeszcze potwierdzonej wiedzy⁶, to przekazywanie ich innym użytkownikom może odbywać się jedynie w systemie praktyk zawodowych.

DEKOMPRESJA

Dekompresja polega na powodowaniu kontrolowanego zaburzenia stanu równowagi prowadzącego do powstania gradientu ciśnień parcyjnych gazów pomiędzy atmosferą oddechową a tkankami. Gradient ten jest siłą napędową procesu dekompresji. Takie postępowanie ma na celu bezpieczne doprowadzenie do stanu równowagi gazowej organizmu z atmosferą odniesienia, do której zmierza proces dekompresji. Atmosferą odniesienia, do której prowadzi proces dekompresji, jest najczęściej poziom morza. Może nią być atmosfera otaczająca akwen wyniesiony ponad poziom morza, gdzie panuje obniżone ciśnienie w stosunku do ciśnienia normalnego panującego na poziomie morza. Może to także być ciśnienie panujące w samolocie rejsowym, gdzie najczęściej ciśnienie jest o $\frac{1}{4}$ niższe od normalnego, lub śmigłowcu⁷, gdzie różnica ta może być jeszcze większa. Atmosferą odniesienia może być podziemna jaskinia, czy podziemny korytarz, w którym ciśnienie może być znacznie wyższe od atmosferycznego⁸. Może to również być habitat, do którego powraca nurek po odbyciu wycieczki z plateau saturacji.

Szybkość dekompresji oraz skład czynnika oddechowego jest tak dobierany, aby gradient ciśnień cząstkowych gwarantował bezpieczny proces dekompresji na wybranej drodze w kierunku atmosfery odniesienia, ale także aby proces był możliwie efektywny. Na drodze dekompresji mogą pojawiać się także przystanki dekompresyjne, wykorzystywane do obniżenia aktualnej wartości gradientu ciśnień cząstkowych przed dalszą drogą w kierunku atmosfery odniesienia.

Do oszacowania wartości kontrolowanego zaburzenia stanu równowagi, prowadzącego do powstania bezpiecznego i efektywnego gradientu ciśnień parcyjnych gazów pomiędzy atmosferą oddechową a tkankami, potrzebne jest określenie stanu nasycenia początkowego. Stan początkowy szacuje się na podstawie profilu przebiegu nurkowania bezpośrednio poprzedzającego moment rozpoczęcia procesu dekompresji. Czasami trzeba uwzględnić także poprzednie nurkowania i ich profil dekompresji. Najczęściej określa się go zgrubnie używając nomogramu w postaci tabeli, uwzględniającego maksymalną głębokość osiągniętą podczas nurkowania oraz przedział czasu pomiędzy rozpoczęciem procesu zanurzenia i chwilą rozpoczęcia dekompresji. Podczas postępu dekompresji czyni się podobnie. Kuszającym jest prowadzenie szacunków dla każdej, nawet najmniejszej zmiany głębokości, jak umożliwia to dekompresjometr elektroniczny, co może być zarówno jego największą zaletą jak i podstawową wadą⁹.

PREWENCJA

Do zapobiegania wystąpieniu choroby dekompresyjnej *DCS* stosuje się specjalne procedury dekompresyjne. Najczęściej ich opisy są lakoniczne. Wymaga się, aby potrzebna wiedza do prawidłowego użytkowania systemu dekompresji była zdobywana i sprawdzona przy okazji obowiązkowych kursów i praktyk na poszczególnych szczeblach rozwoju kariery nurka.

Wyczerpujące komentarze występują w opracowaniach wyników badań nad systemami dekompresji, lecz dostęp do nich nie jest powszechny. Rzadko potrzebna wiedza przekazywana jest w sposób wyczerpujący, jak w przypadku systemu dekompresji opracowanego przez *Bühlmann* [1]. Czasami publikowane są dzieła generalizujące podejście do dekompresji [2,3]. Wiedza przekazywana na szkoleniach zawarta jest w materiałach do prowadzenia kursów [4,5]. Tego typu podręczniki nie są w pełni użyteczne do zdobywania wiedzy poza systemem szkoleń. Czasami są one przypisywane do kursanta z zaznaczeniem, że tylko osoba podpisana na okładce może prawnie korzystać z zawartych tam wiadomości [6,7]. Wynika to nie tylko z chęci ochrony *know-how*, lecz przede wszystkim z ochrony przed niewłaściwą interpretacją zawartych tam informacji przez nieprzeszkolonego użytkownika.

Najczęściej opracowujący system dekompresji zakłada wysoki poziom wiedzy przyszłego użytkownika, co usprawiedliwia zamieszczenie jedynie oszczędnego komentarza [8]. Często jest on zawężony jedynie do wyłączenia odpowiedzialności¹⁰ opracowującego system dekompresji.

Ten szczególnie sposób realizacji procesu wdrażania specjalistów do użytkowania systemu dekompresji jest usprawiedliwiany pewnymi barierami w percepcji. Umiejętności nurka należy traktować raczej w kategoriach wysokokwalifikowanych umiejętności rzemieślniczych¹¹, których nauka przebiega przez odpowiedni system odbywania praktyk. Nie dotyczy to tylko umiejętności użycia sprzętu nurkowego, lecz także systemów dekompresji. Jest możliwe opisanie wielu uwarunkowań dotyczących prawidłowego podejścia do planowania prac podwodnych [9]. Liczba sytuacji szczególnych jest na tyle duża, że nauczanie jej w jednym cyklu byłoby niezmiernie długie i nudne, a egzekwowanie tak zdobytej wiedzy problematyczne. Można to porównać do uczenia się dokładnie wszystkich opcji i możliwości wielofunkcyjnego urządzenia elektronicznego, jak smartfonu. Z reguły użytkownikowi taka kompletna wiedza nie jest przekazywana, gdyż niewykorzystywane na co dzień funkcje ulegną szybkoemu zapomnieniu.

Można sobie wyobrazić, że nurkowie mogą być tak dobierani i trenowani, jak kosmonauci. Kosmonauci, to ludzie z wyższym wykształceniem w kilku dziedzinach wiedzy, z niemałą praktyką w lotnictwie oraz specjalnie trenowani do osiągnięcia nadzwyczajnej kondycji¹². Idąc dalej można sobie na chwilę założyć, że kierowca samochodu powinien być

wykształconym mechanikiem trenowanym podobnie jak to ma miejsce w przypadku zawodowych pilotów samolotów pasażerskich. Postulowanie takiego podejścia spotkałoby się w najlepszym przypadku z ostracyzmem a w gorszym scenariuszu posądzeniem o brak adekwatnego odniesienia do rzeczywistości.

Nowoczesne samochody nie są już zaopatrywane w instrukcje techniczne do ich serwisowania¹³. Nie są nawet zaopatrywane w dokładne opisy techniczne. Podobnie dzieje się z systemami dekompresji. Czasami systemy dekompresji są niejawnie a ich wdrożenie wymaga zaangażowania pomocy ze strony pierwszego użytkownika lub opracowującego system dekompresji. Czasami informacje dotyczące założeń dla systemów dekompresji są patentowane, lecz nawet wtedy zakres ujawnionego *know – how* jest ograniczony [10].

W systemach wojskowych i zaawansowanych technologicznie instytucjach komercyjnych dąży się do jak najdokładniejszego przekazania wiedzy na temat użytkowanych systemów dekompresji. Ale nawet w takich przypadkach nie są zamieszczane wystarczająco szerokie komentarze do tabel. W ich miejsce pojawia się obowiązkowa analiza ryzyka operacyjnego [11]. Zmusza to użytkownika do podjęcia własnych studiów lub uczestnictwa w dodatkowych kursach tak, aby nabyć umiejętności do prowadzenia takiej analizy. W razie zaistnienia wypadku lub sytuacji potencjalnie niebezpiecznej brak takiego dokumentu, lub zdawkowe jego przygotowanie, stanowi czynnik obciążający odpowiedzialnego za planowanie operacji nurkowej.

Najczęściej użytkownik chciałby, aby instrukcja była możliwie mało obszerna oraz wyczerpująca w takim stopniu, aby wszystkie możliwe sytuacje były w niej opisane zrozumiale. Te wymagania stoją we wzajemnej kontradycji¹⁴ i z tego powodu taka instrukcja prawdopodobnie nie istnieje w jakiegokolwiek dziedzinie¹⁵.

KONSERWATYZM

W przypadku wystąpienia czynników potęgujących możliwość wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS można kompensować powstałe zagrożenie poprzez zastosowanie dekompresji wydłużonej. Taka procedura nazywana jest konserwatywną lub po prostu konserwatyzmem. Konserwatyzm κ może być realizowany w różnej formie. Jako przykład może posłużyć chociażby dobieranie znajdującej się w tabeli następniej, większej głębokości od głębokości ekspozycji. Zalecenie to stosuje się także, jeśli głębokość ekspozycji znajduje się w tabeli. Najczęściej poziom konserwatyzmu dla wybranego rozkładu dekompresji podnosi się poprzez sztuczne przyjęcie dłuższego czasu pobytu dla wybranej głębokości ekspozycji, jak w systemie nurkowań powietrznych użytkowanych w Marynarce Wojennej RP.

Przy badaniach nad dopuszczalnymi wartościami gradientów ciśnień cząstkowych dla procesu dekompresji wprowadza się pojęcie tzw. *szarej strefy*, która zawiera gradienty, które nie powinny doprowadzić do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS pod warunkiem, że nie nałożą się na przebieg dekompresji dodatkowe czynniki obciążające nurka. Kres górny *szarej strefy* stanowią maksymalne dopuszczalne wartości gradientów¹⁶. Rzadko opisuje się dopuszczalne kres dolny dla *szarej strefy*, którą często przyjmuje się w zakresie [75, 80]% kresu górnego¹⁷. W tym miejscu najczęściej ustanawia się tzw. *zerowy konserwatyzm* $\kappa = 0\%$. Maksymalny *konserwatyzm* $\kappa = 100\%$ jest odniesiony do zerowego gradientu ciśnień cząstkowych. Dla $\kappa = 100\%$ dekompresja nie zachodzi. Jeśli zatem dekompresja będzie planowana znacznie poniżej *szarej strefy*, czyli ze znacznym *konserwatyzmem*, to należy się spodziewać, że wpływ materializacji niektórych, dodatkowych czynników obciążających może być skompensowany. Jednak, jeśli dekompresja będzie planowana w pobliżu *szarej strefy* lub w jej obszarze, to pojawiające się dodatkowe obciążenia¹⁸ w konkretnym procesie nurkowania mogą doprowadzić do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS, pomimo prawidłowego dobrania profilu dekompresji na podstawie jego parametrów.

Odpowiedzialnością planującą operację nurkową oraz osoby, która kieruje nurkowaniem jest ocena poziomu zastosowanego konserwatyzmu w odniesieniu do szacowanego rezydualnego ryzyka R dekompresji. Można tego dokonać prowadząc rzetelną analizę tego ryzyka R opartą na wiedzy eksperckiej zdobytej na drodze doświadczenia.

METODA NAJGORSZYCH OKOLICZNOŚCI

Sposób poszukiwania najgorszych okoliczności jest stosowany powszechnie przy szacunkach. W technice nurkowej czasami potrzebne jest nawet jej ograniczenie, gdyż uwzględnienie wszystkich okoliczności powodujących wzrost zagrożenia chorobą dekompresyjną DCS może doprowadzić do braku dobrego rozwiązania. Przykładowo, przy wykorzystaniu *Tabeli 3MW* uwzględnia się maksymalnie dwa czynniki [8]. Materializacja większej liczby czynników zakłócających nie pociąga za sobą konieczności zwiększenia konserwatyzmu przy realizacji dekompresji.

ZMIENNOŚĆ

Proces dekompresji najczęściej kontrolowany jest zmianami ciśnienia otoczenia oddziaływującego w czasie ekspozycji na organizm nurka¹⁹ oraz zmianami stężenia składników czynnika oddechowego. Najczęściej każdy inny czynnik wpływający na stan równowagi pomiędzy prężnością gazów w tkankach a jego ciśnieniem cząstkowym w czynniku oddechowym jest traktowany jako czynnik zaburzający proces dekompresji.

Zmiana oddziałującego ciśnienia odbywa się poprzez kontrolowaną zmianę głębokości w toni wodnej lub obniżenia ciśnienia w habitacie. Zmniejsza to ciśnienie czynnika oddechowego podawanego nurkowi, np. z aparatu oddechowego lub atmosfery habitatu. Wraz ze zmianą ciśnienia zmniejsza się ciśnienie cząstkowe komponentów czynnika oddechowego do poziomu niższego od jego prężności w tkankach. Różnica pomiędzy ciśnieniem cząstkowym składnika czynnika oddechowego oraz prężności tego czynnika w tkankach tworzy potrzebny gradient dla procesów dyfuzyjnych umożliwiających wymianę gazową. Jednak zmianę taką można wywołać także przez zmianę składu czynnika oddechowego. Zmiana składu czynnika oddechowego spowoduje ten sam efekt wytworzenia potrzebnego gradientu ciśnień cząstkowych nawet przy tej samej

wartości oddziaływującego ciśnienia. Sposób prowadzenia dekompresji bez zmiany ciśnienia nazywa się procesem dekompresji izobarycznej, który może przebiegać bez zmiany czynnika oddechowego lub ze zmianą jego składu.

Przykładowo, podanie człowiekowi do oddychania tlenu na poziomie morza, który wcześniej nie nurkował, wytwarza gradient ciśnienia cząstkowego azotu o wartości ok. 78 kPa, powodujący swoiste „wymywanie” azotu z organizmu. Podobnie po zakończeniu nurkowania, z wykorzystaniem powietrza jako czynnika oddechowego, pozostaje pewien ładunek azotu w organizmie. Czyli prężność azotu w tkankach będzie wyższa od ciśnienia cząstkowego azotu w powietrzu atmosferycznym. Powstały w ten sposób gradient ciśnień cząstkowych będzie motorem procesu, który doprowadzi do zniwelowania go podczas powierzchniowej dekompresji izobarycznej bez zmian składu czynnika oddechowego.

Najczęściej podczas nurkowań z wykorzystaniem sztucznych czynników oddechowych stosuje się obie opisane metody wytwarzania gradientu ciśnień cząstkowych. Przykładowo, przy nurkowaniach z wykorzystaniem mieszanin oddechowych na bazie helu można oprócz obniżania ciśnienia stosować jednocześnie dekompresyjne czynniki oddechowe, jak różnego typu mieszaniny azotowo-tlenowe czy powietrze, natomiast do dodatkowej akceleracji procesu dekompresji wykorzystywać tlen w jej końcowej fazie.

Na wytwarzany gradient ciśnień cząstkowych ma jednak wpływ także szereg innych czynników, z których bardzo ważnym jest: temperatura, ćwiczenia fizyczne, opory oddechowe, ucisk, imersja itp. Rzadko zdarza się, że te pozostałe czynniki są wykorzystywane do kontrolowania wytwarzanego gradientu. Zakłada się najczęściej, że powinno się je utrzymywać na stałym poziomie. W niektórych przypadkach jest to niemożliwe i wtedy traktuje się te czynniki, jako dodatkowe obciążenia dekompresyjne.

CZYNNIKI RYZYKA

W Marynarce Wojennej RP tradycyjnie przyjmuje się niektóre czynniki zwiększające zagrożenie chorobą dekompresyjną DCS, gdy:

- nurek wykonuje ciężką pracę,
- nurek zmarzł/uległ przegrzaniu,
- nurkowanie jest jednym w cyklu nurkowań,
- nurek jest niewytrenowany lub posiada osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową DCS,
- nurek jest otyły lub jego masa przekracza 80 kg,
- nurek jest w wieku powyżej 40 lat,

Lista ta nie jest pełna, przykładowo można do niej dodać:

- specyficzne zagrożenia związane z wykorzystywanym wyposażeniem nurkowym, sprzętem pomocniczym, technologią nurkowania itp.,
- opory oddechowe,
- dekompresja do ciśnienia mniejszego od atmosferycznego czy transport powietrzny po nurkowaniu,
- uciski miejscowe powodowane skafandrem i sprzętem,
- wymuszona pozycja podczas pracy lub dekompresji,
- zalanie skafandra,
- dieta,
- zażywanie suplementów diety i leków,
- dehydratacja itd.

Część czynników zakłócających proces dekompresji zestawiono tabelarycznie – tab.1.

Nikt raczej nie kwestionuje wpływu wymienionych wcześniej czynników na zwiększenie ryzyka *R* wystąpienia choroby dekompresyjnej DCS. Jednak interpretacja tych czynników zazwyczaj budzi kontrowersje i stąd żądania ich dokładnego definiowania. Zdefiniowanie wielu czynników podnoszących ryzyko *R* wystąpienia choroby dekompresyjnej DCS w ogólności jest utrudnione, czasami niemożliwe lub wręcz bezzasadne.

BADANIA

Najczęściej prace nad dekompresją są wzorowane na klasycznych badaniach w fizyce. W początkowym procesie badawczym czyni się starania do ustalenia możliwie dużej liczby parametrów na zakładanym poziomie, modyfikując jedynie te, które możliwe są do kontrolowania i odtwarzania z dużą dokładnością i precyzją. Następnie stopniowo bada się wpływ zmian innych parametrów na proces dekompresji. Początkowo przy ustalonych wartościach części parametrów, później przy jednoczesnych zmianach coraz większej ich liczby. Podczas badań przyjmuje się różne strategie tak, aby określić możliwie dokładnie zależności funkcyjne określające wpływ poszczególnych parametrów na proces dekompresji.

Niektóre czynniki mogące powodować wypadki dekompresyjne [12].

1. Zmniejszenie cyrkulacji krwi spowodowane: otyłością, przechłodzeniem organizmu, fizjologicznym obniżeniem efektywności krążenia (np. u ludzi w podeszłym wieku), wcześniejszymi chorobami układu krążenia lub nurkowymi, mechanicznym uciskiem (np. poprzez skafander nurkowy, brak zmian pozycji podczas dekompresji) itp.
2. Zwiększenie zawartości ditlenku węgla we wdychanym czynnikiem oddechowym lub jego kumulacji w organizmie (hiperkapnia) spowodowane, między innymi: złą kondycją nurka, wysiłkiem, występowaniem przestrzeni martwych w sprzęcie nurkowym, dużą gęstością czynnika oddechowego itp.
3. Duży wysiłek przed nurkowaniem oraz zakwaszenie mięśni powstałe po wysiłku. Zaleca się stosowanie 3-6 godz odpoczynku przed nurkowaniem (zależnie od warunków przyszłego nurkowania), oraz obowiązuje absolutny zakaz nurkowania nurka zmęczonego.
4. Konsumpcja alkoholu przed nurkowaniem i przed zakończeniem dekompresji (także podczas obowiązkowego odpoczynku na powierzchni, po nurkowaniu, gdy zachodzi powierzchniowa dekompresja izobaryczna). Alkohol zmniejsza napięcie powierzchniowe krwi, przez co ułatwia formowanie się pęcherzy gazowych. Zaleca się, aby 12 godz przed i 12 godz po nurkowaniu, nie spożywać napojów zawierających alkohol.
5. Dehydratacja (odwodnienie) jest często bagatelizowana jako czynnik mogący powodować problemy dekompresyjne. Ignorowanie dehydratacji może jednak doprowadzić do powstania problemów dekompresyjnych, pomimo zachowania innych zaleceń. Najczęściej odwodnienie powstaje w następujących przypadkach:
 - Przy długotrwałym nurkowaniu w słonej wodzie w skafandrze typu mokrego. Następuje wtedy utrata wody poprzez osmozę (szczególnie ważne przy użyciu skafandrów ogrzewanych wodą w systemie otwartym).
 - Ciśnienie hydrostatyczne może powodować zwiększoną diurezę.
 - Przechłodzenie organizmu może powodować zwiększoną diurezę.
 - Nieważkość powoduje wzmożoną diurezę
 - Podczas oddychania suchym czynnikiem oddechowym następuje odwodnienie na skutek parowania.
 - Kofeina, teina i alkohol powodują zwiększoną diurezę.
 - Niektóre grupy leków powodują dehydratację, a wiele zwiększoną diurezę. Nurkujący mogą zażywać lekarstwa jedynie pod kontrolą lekarza.
 - Strach i napięcie nerwowe mogą powodować zwiększoną diurezę.
 Podniesienie poziomu płynów w organizmie (rehydratacja) jest wskazana celem podniesienia bezpieczeństwa nurkowania. Najlepiej w tym celu podawać wodę mineralną lub w ograniczonej ilości soki owocowe. Nurek na kilka godzin przed nurkowaniem powinien dużo pić. Hydratacja przed nurkowaniem powinna uwzględniać warunki nurkowania. Nie zawsze jest możliwe swobodne oddawanie moczu podczas nurkowania czy dekompresji. Jeżeli nurek przechodzi dekompresję w komorze suchej z możliwością oddawania moczu, należy płyny podawać także podczas dekompresji.
6. Urazy typu przerwania ciągłości tkanki. W miejscach uszkodzeń może formować się wolna faza gazowa i to nie tylko w tych oczywistych przypadkach jak przy urazie ciśnieniowym płuc, ale także przy drobnych skaleczeniach skóry.
7. Nurkowanie podczas objawów złej predyspozycji fizycznej lub/i psychicznej, np.: objawy kaca, niewyspanie, zmęczenie, objawy towarzyszące menstruacji, bóle głowy, objawy chorobowe itp. Powodują one zmniejszenie koncentracji uwagi a przez to możliwość zaistnienia pomyłki np. podczas kontroli profilu dekompresji, pomiarów głębokości czy czasu pobytu itp.
8. Zażywanie suplementów diety, środków od bólu głowy, doustnych środków antykoncepcyjnych, środków pobudzających czy antystresowych, aktywnych środków pochodzenia roślinnego, np. herbat ziołowych, może być niezalecane przed nurkowaniem. Jednym z powodów szkodliwego działania takich środków może być „zanieczyszczenie” poprzez utrzymywanie się dużych stężeń środków chemicznych we krwi. Działanie takie może prowadzić do łatwiejszego formowania się w niej wolnej fazy gazowej. Niektóre środki chemiczne takie jak alkohol (alkohol jest składnikiem wielu leków płynnych np. syropów przeciwkaszlowych) powodują zmianę napięcia powierzchniowego krwi ułatwiając w ten sposób formowanie się wolnej fazy gazowej we krwi.
9. Należy uważać na różnego rodzaju implanty, nawet takie typowe środki jak wypełnienia leczonych zębów. Znane są przypadki indukowania się bólu zęba przy źle założonym lub nieprawidłowo dobranym wypełnieniu. W tych przypadkach należy zasięgnąć opinii swojego lekarza na temat możliwości uprawiania nurkowania a przy leczeniu zębów zaznaczać, że uprawia się nurkowanie.

Najczęściej badania nad dekompresją skupiają się jedynie na ustaleniu funkcji wpływu dwóch zmiennych na proces dekompresji: składu czynnika oddechowego oraz profilu dekompresji, rozumianego jako wpływ ciśnienia otoczenia w funkcji czasu. Przy czym najczęściej bada się jedynie proste profile trapezowe²⁰, realizując je w warunkach laboratoryjnych.

Aby określić poziom zagrożenia spowodowany pominięciem wpływu znanych i nieznanymi czynników zakłócających, prowadzi się badania polegające na budowaniu modeli statystycznych na podstawie rezultatów przeprowadzonych nurkowań eksperymentalnych w warunkach symulowanych lub rzeczywistych. Jeśli takie prace prowadzi się w cyklu badań naukowych w warunkach laboratoryjnych to mówi się o badaniach walidacyjnych.

Poza badaniami naukowymi powinno się prowadzić monitoring zagrożeń występujących podczas eksploatacji systemu dekompresji w warunkach rzeczywistych. Na tej podstawie buduje się modele zagrożenia, analogicznie do prowadzenia monitoringu epidemiologicznego. Monitoring prowadzi się w celu ustalenia czy przyjęty poziom konserwatywności jest na tyle wysoki, aby był w stanie zniwelować wpływ czynników zakłócających występujących podczas rzeczywistej



eksploatacji systemu dekompresji, innych niż badane w fazie badań laboratoryjnych. Monitoring musi uwzględniać wpływ elementów systemu, poza systemem dekompresji, lecz mających pośredni wpływ na proces dekompresji.

Przykładowo: program treningów ogólnorozwojowych i ciśnieniowych, cykle stosowanej odnowy biologicznej, ochrony zdrowia i testów fizjologicznych, kontrola higieny, sposobu żywienia, wpływ użytkowanych narzędzi do prac podwodnych, specyfika zadań, osłona relaksacyjna i psychologiczna, wpływ środków transportu nawodnego, podwodnego, lądowego, powietrznego itd.

Należy zwiększyć poziom konserwatywności jeżeli okaże się, że przyjęty niedostatecznie niweluje poziom zagrożenia dla systemu dekompresji, nawet jeśli w tym celu należy powrócić do etapu badań laboratoryjnych.

Jeśli system wydaje się zbyt konserwatywny, to można poziom konserwatywności stopniowo zmniejszać. Zmniejszenia poziomu konserwatywności można dokonać nie poprzez manipulację w doborze dekompresji, lecz raczej badając wpływ czynników systemu nurkowego na bezpieczeństwo dekompresji. Przykładowo, w Marynarce Wojennej RP, podobnie do innych krajów, funkcjonuje system okresowej medycznej kontroli, stanowiący element dopuszczenia do wykonywania zawodu nurka. Taki system nie posiada funkcji służebnej usług medycznych dla nurków, która powinna wzmacniać ochronę ich zdrowia. Stanowi jedynie biurokratyczną barierę wymaganą do kontynuowania pracy w charakterze nurka. Taki system można eksperymentalnie zastąpić opieką dedykowaną lekarza dedykowanego konkretnej grupie nurkowej. Odpowiedzialnością takiego lekarza byłoby utrzymanie grupy nurków w sprawności do wykonywania działań bojowych.

W zakresie jego odpowiedzialności byłoby zebranie obligatoryjnych wyników potrzebnych do orzecznictwa i przekazania ich w stosownym czasie do istniejącej kartoteki centralnej. Zleceń na badania mógłby on dokonywać jedynie w akredytowanych placówkach. W ten sposób zastąpiłby centralną komisję kwalifikacyjną dokonując samodzielnie orzeczenia. Jednak w tym przypadku mógłby stosować zabiegi ochrony zdrowia przez dodatkowe badania, nadzór, zalecenia treningowe, zabiegi odnowy biologicznej, kontrolę higieny, żywienia, kierowania na zabiegi rehabilitacyjne lub wykonywanie ich samodzielnie, prowadzenie zajęć antystresowych, organizowania wypoczynku itp., podobnie jak to funkcjonuje w przypadku ochrony zdrowia sportowców. Taki system dałby też możliwość budowy więzi skutkującej powstaniem roli powiernictwa. Stąd wiele z cennych uwag nie byłoby zachowywanych w tajemnicy przed personelem medycznym. Wprowadzenie takiego systemu mogłoby odbywać się pilotażowo w okresie 3 lat w konkretnej jednostce wojskowej, po którym możliwa byłoby jego porównanie z rozwiązaniami tradycyjnymi.

Opisany przykład działania jest typowym elementem badań odporności systemów na zakłócenia. Usuwa się z systemu element, wprowadza nowy lub redundantny lub zamienia się element i sprawdza się wpływ tych zmian struktury systemu na przebiegające w nim procesy, które system powinien sprawnie podtrzymywać. Takie doskonalenie systemów powinno być działaniem prowadzonym permanentnie, gdyż każdy system raczej ma skłonność do degeneracji niż samodzielnego doskonalenia. Najczęściej systemy podlegają degradacji w skutek wprowadzania biurokratycznych elementów strukturalnych, których efekty nie są nadzorowane i oceniane, lecz wprowadzane na prawach arbitralnych decyzji.

Brak podejścia systemowego czasami owocuje nieformalnymi zmianami oddolnymi. Przykładowo, w Marynarce Wojennej RP, nadzór nad bezpieczeństwem operacji nurkowych nie opiera się o metody naukowej oceny czy stosowanie wyżej opisanego podejścia procesowego. Stąd przez całe dziesięciolecie utarła się praktyka nurkowa permanentnego podwyższania konserwatywności przy ekspozycjach powietrznych. W statystycznej ocenie sztabowej skutkuje to opinią, że tabele powietrzne stosowane w Marynarce Wojennej RP są tabelami bardzo konserwatywnymi [8]. Nie potwierdzają tego testy laboratoryjne wykonywane przy prawidłowym planowaniu ekspozycji. W kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, obserwuje się występowanie nadmiernej ilości wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych [13]. Testy te prowadzono przy okazji zabezpieczania prac nad nowymi technologiami, gdy zabezpieczano je nurkami wykorzystującymi tabele powietrzne. Choć nie były to systematyczne badania nad bezpieczeństwem wykorzystywanych tabel powietrznych, jednak z przeprowadzonych pomiarów można wnioskować, że tabele te są raczej opracowane przy założeniu niskiego poziomu konserwatywności. Pobieżna analiza procedur zarządzania konserwatywnością, zalecana przy wykorzystaniu tych tabel wraz z występowaniem ruchomego rozstępu pomiędzy czasami ekspozycji zawartymi w tabelach pokazuje, że był to prawdopodobnie zamiar badawczy przy ich opracowywaniu.

TOKSYCZNOŚĆ TLENOWA

W warunkach prowadzenia nurkowań saturovaniych najważniejszą formą toksycznego oddziaływania tlenu jest tlenowa toksyczność płucna. Przy nurkowaniach poza strefą saturacji oraz nurkowaniach z plateau saturacji istotne jest zagrożenie ośrodkową toksycznością tlenową *CNSyn*. Dla specjalnych procedur²¹, przykładowo nurkowań tlenowych, ważną formą jest także tlenowa toksyczność somatyczna [14].

Przy badaniach nad dekompresją ważne jest zwrócenie uwagi na fakt, że jej planowanie jest swoistym współzawodnictwem pomiędzy zagrożeniem różnymi formami toksyczności tlenowej a zagrożeniem chorobą dekompresyjną *DCS* o możliwie najefektywniejszy profil dekompresji. Widać to w niektórych systemach dekompresji, przykładowo w tabelach *US Navy* dla operacyjnych nurków *Helioksoowych Hx* [11]. Tabele te nie są zaplanowane dla konkretnego²² *Hx*, lecz dla określonego zakresu składu *Hx*. Przy planowaniu nurkowania, w pierwszej kolejności uwzględnia się zakresy maksymalnych, dopuszczalnych ciśnień cząstkowych tlenu oraz czas ekspozycji na nie. Później można rozważać proces nurkowania pod względem ograniczeń związanych z ryzykiem choroby dekompresyjnej *DCS* w oparciu o ciśnienie cząstkowe helu we wdychanym czynnikiem oddechowym.

Efektywność dekompresji rozumiana jako minimalizowanie ryzyka *R*, jest często utożsamiana z minimalizowaniem czasu pobytu w środowisku wodnym. Skracanie czasu pobytu w środowisku wodnym minimalizuje zagrożenie stwarzane przez: możliwe awarie sprzętu i wyposażenia nurkowego, przechłodzenie, stres, utratę kontroli nad pływalnością, niewygodą związaną z stosunkowo niską ergonomizacją sprzętu i wyposażenia nurkowego, nieważkość, zniekształcenie pola widzenia itp. Minimalizacji czasu pobytu pod wodą można dokonać przez specjalne uzbrojenie techniczne, jak nurkowania z dzwonu czy pojazdu podwodnego, przy możliwym szybkim transporcie pod ciśnieniem do habitatu

hiperbarycznego, gdzie można kontynuować dekompresję bez narażenia na utonięcie. Jest to jednak wyposażenie drogie zarówno inwestycyjnie i eksploatacyjnie, stąd niedostępne szerokiej rzeszy nurków.

Przy nurkowaniach bojowych najczęściej nie można zastosować takiego wyposażenia. Zatem podniesienie efektywności dekompresji możliwe jest poprzez jej akcelerację. Dla nurkowań poza strefą saturacji wymaga to operowania tlenem pod stosunkowo wysokim ciśnieniem, stwarzającym zagrożenie wystąpieniem ośrodkowych objawów zatrucia tlenowego CNSyn. Zatem, przy analizie rezydualnego ryzyka R wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS należy brać pod rozwagę także zagrożenie wystąpieniem objawów CNSyn.

PROCEDURY

Specyfika niektórych procedur nurkowych może mieć dodatkowo wpływ na wzrost ryzyka R wystąpieniem nie tylko objawów choroby dekompresyjnej DCS lecz i innych chorób nurkowych DCI.

Przykładowo, takim zagrożeniem towarzyszącym może być nierównoważenie hydrostatyczne. Przy wykorzystaniu specjalnych aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego może dochodzić do efektu ssącego wytwarzanego przez podciśnienie układu oddechowego [15]. Zjawisko ma miejsce w niektórych pozycjach aparatu nurkowego względem centroidy płucnej [12]. Efekt ten powoduje zwężanie się oskrzelików utrudniając wymianę gazową. Przy dłuższym działaniu może doprowadzić do pojawienia się płynu w płucach²³. Efekt ten jest dobrze znany wśród długodystansowych pływaków wyczynowych eksponowanych na intensywne wychłodzenie oraz znaczny wysiłek [16]. Na większych głębokościach może być powodowany zwiększeniem się oporów oddechowych. Taki efekt nie jest ograniczony jedynie do aparatów specjalnych, lecz dotyczy także sprzętu o obiegu otwartym, dla którego nie zostało prawidłowo ustawione wspomaganie procesu wdechu, gdy występuje wyziębienie oraz wydatkowany jest intensywny wysiłek [17].

Innym przykładem może być retencja²⁴ ditlenku węgla CO_2 . Aparaty regeneracyjne stwarzają dodatkowe zagrożenie związane z nieprawidłowym działaniem pochłaniacza ditlenku węgla. Umiarkowane zwiększone ciśnienie cząstkowe ditlenku węgla CO_2 może przeciwdziałać spadkowi akcji oddechowej przy nurkowaniu z wykorzystaniem wysokich ciśnień parcjalnych tlenu. Dlatego pierwotnie aparaty nurkowe były projektowane jako systemy posiadające duże przestrzenie martwe²⁵. Jednak okazało się, że takie rozwiązanie niwelując jedno zagrożenie wprowadza inne. Ditlenek węgla CO_2 kumuluje się w organizmie, gdyż powinowactwo CO_2 do hemoglobiny jest istotnie niższe niż tlenu stąd jego retencja w organizmie, która może prowadzić do hiperkapnii. Jednak, znacznie poniżej progu hiperkapnii pojawia się znaczny wpływ retencji CO_2 na zwiększenie zagrożenia ośrodkową formą zatrucia tlenowego CNSyn. Jest on związany z efektem ograniczenia przez oddziaływanie CO_2 przepływu obwodowego a zwiększeniem przepływu mózgowego krwi. Wpływ retencji CO_2 na możliwość wystąpienia choroby ciśnieniowej DCS jest powodowany tym samym zjawiskiem.

Pasywna ochrona cieplna gazami o małej przewodności może mieć wpływ na zwiększone zagrożenie możliwością wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS. Idea stosowania takiej ochrony cieplnej była propagowana kilkanaście lat temu, lecz czasami wraca także obecnie. Wykorzystanie argonu Ar do pasywnej ochrony przed utratą ciepła w skafandrach typu suchego miało w założeniu przedłużyć możliwość pozostania w środowisku wodnym. Jednak Ar migruje przez skórę, następnie poprzez krwioobieg i płuca, do obiegu oddechowego regeneracyjnego aparatu nurkowego. Jeśli przestrzeń oddechowa aparatu nie jest dostatecznie wentylowana, to retencja Ar może osiągnąć poziom zaburzający procesy dekompresji.

Argon był używany w doświadczeniach nurkowych do symulowania zmian gęstości czynnika oddechowego, stąd parametry dekompresyjne dla tego gazu są poznane. Argon towarzyszy też nurkowaniom powietrznym, gdyż jego udział w powietrzu atmosferycznym jest istotny, stąd jest on uwzględniany przy opracowywaniu powietrznych tabel dekompresyjnych. Lecz już przy nieznacznym wzroście jego zawartości w czynniku oddechowym, zwłaszcza przy długich czasach pobytu, dekompresja dla mieszanin argonowych musi być istotnie przedłużana. Stąd stosowanie Ar do ochrony cieplnej stanowi istotny problem do planowania poprawnych rozkładów dekompresji.

Ważnym elementem scenariusza operacyjnego nurkowania jest zmiana obciążenia czynnika oddechowego i powodowane tym zjawiska kontrdyfuzji mające istotny wpływ na bezpieczeństwo dekompresji. Problemy te zostały opisane wcześniej i nie będą tutaj szerzej dyskutowane [18].

Jedne ze scenariuszy nurkowych stwarzają większe zagrożenie chorobą dekompresyjną DCS niż inne. Do stwarzających potencjalnie większe zagrożenie DCS należą nurkowania o profilu piłokształtnym, typu yo-yo, wielopoziomowe, czy częste powtarzanie ekspozycji. Dobór nieodpowiedniej sekwencji nurkowań, przy stosowaniu procedury nurkowań powtarzalnych czy powtórzeniowych także może stwarzać dodatkowe zagrożenie DCS. Potencjalne zwiększenie zagrożenia przez wymienione procedury wiąże się z zakłóceniami procesu dekompresji. Główną drogą dekompresji jest wymiana gazowa pomiędzy tkankami a płucami za pośrednictwem krwi²⁶.

Najlepiej jeżeli wymiana ta przebiega w fazie związanej²⁷ lub rozpuszczonej²⁸. Jednak część tej wymiany przebiega także w fazie gazowej stanowiącej jądra wydzielonej fazy gazowej we krwi. Płuca nie zawsze są w stanie odfiltrować powstającą fazę gazową, która może przeniknąć przez zespolenie tętniczo-żylny w płucach IPAV²⁹ [19].

Takie niezakłócone fizjologiczne działanie płuc popularnie nazywane jest filtrem płucnym. Powiększenie jąder wolnej fazy gazowej do pewnych rozmiarów powoduje aktywację kaskady wykrzepiania wewnątrznaczyniowego powodując krzepnięcie krwi, podobnie jak przy zapoczątkowaniu gojenia się rany. Proces ten nazywany jest aktywacją dopełniacza [20]. W wymienionych typach nurkowań, w pewnych fazach realizacji jego scenariusza może dochodzić do cykli sprężenia i rozprężenia wolnej fazy gazowej wyłączającej filtr płucny i przedostawanie się wolnej fazy gazowej poprzez płuca i serce do tętnic. Przyjmuje się, że podczas dekompresji może dojść do wydzielania wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych w rozmiarach niepowodujących aktywacji dopełniacza. Zaś dla tych samych warunków nie powinny doprowadzić do wydzielania wolnej fazy gazowej w naczyniach tętniczych ze względu na różnicę ciśnień pomiędzy obiegiem żylnym i tętniczym.

Szybkie manipulowanie zmianami głębokości może spowodować jednak przejście wolnej fazy gazowej do tętnic a tam nawarstwić się i aglomerować do rozmiarów szkodliwych dla organizmu. Przykładem mogą być obserwacje zaskakującego

wzrostu niezrozumiałego występowania objawów choroby dekompresyjnej DCS u nurków pracujących na farmach rybnych [21,22]. Było to zaskakujące ponieważ wykonywali oni jedynie krótkie nurkowania na małe głębokości [12].

W tabelach dekompresji spotyka się najczęściej odniesienie do głębokości³⁰ wyrażonej w mH₂O dla wody słodkiej³¹, jednak nurkowanie w wodzie morskiej czy zawieszinach³² eksponuje nurka na wyższe ciśnienie niż sugerowałyby nawet dokładny pomiar głębokości.

Najczęściej głębokość określa się przy pomocy pneumatometru³³ mierząc bezpośrednio ciśnienie wywierane na nurka na głębokości nurkowania. Jak każdy pomiar, tak i ten jest obarczony inherentnym błędem. Dodatkowo istnieje rozbieżność przy interpretacji miejsca pomiaru ciśnienia ekspozycji³⁴. Dlatego, jeśli nawet zmierzona pneumatometrem głębokość nurkowania istnieje w tabelach dekompresji, to zaleca się przyjęcie następnej większej od niej do określenia profilu dekompresji³⁵.

WYNIESIENIE

Często systemy dekompresji są dedykowane jedynie do zastosowań morskich, gdzie ciśnieniem odniesienia dla dekompresji izobarycznej na powierzchni jest ciśnienie normalne. Jeśli ciśnienie odniesienia jest inne, to dla systemu opracowanego na warunki morskie rozkłady dekompresji mogą być nieadekwatne. Z takim procesem można się spotkać przy nurkowaniach w górskich jeziorach. Problem ten występuje także, gdy bezpośrednio po nurkowaniu planowany jest transport powietrzny.

Niektóre tabele uwzględniają wyniesienie akwenu ponad poziom morza podając różne rozkłady dekompresji dla przyjętych zakresów wysokości wyniesienia akwenu. W stosunku do tabel nieposiadających takich opcji mogą być proponowane różne formy kompensacji [23].

Systemy dekompresji do zastosowań wojskowych powinny precyzować możliwość natychmiastowego transportu lotniczego po nurkowaniu, gdyż umożliwia to planowanie odzyskania nurków drogą powietrzną [24].

Obniżanie wartości ciśnienia, jak podczas lotów samolotami rejsowymi czy śmigłowcami transportowymi, może powodować na tyle poważne zaburzenia równowagi w prężnościach gazu w tkankach, że może dojść do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS. Zmiany ciśnienia atmosferycznego podczas lotu samolotem³⁶ lub śmigłowcem mogą naruszyć warunki równowagi po dekompresji ze względu na spadek ciśnienia na wysokości przelotu³⁷. Może to spowodować zachwianie równowagi i wydzielenie się wolnej fazy gazowej, prowadząc do wystąpienia objawów DCS. Procedury szacowania dekompresji powinny precyzować pułap, na którym będzie zachodzić powierzchniowa dekompresja izobaryczna.

PRACA

W niektórych przypadkach przeprowadzenie dokładnych badań naukowych nie przekłada się na możliwości ich wykorzystania w praktyce. Przykładem może tu być limitowanie wydatkowanej pracy. Jeśli nawet udałoby się ustalić wartość procentową wzrostu zagrożenia chorobą ciśnieniową DCS w funkcji obciążenia pracą w jednostce czasu, to kierownik nurkowania czy nurek nie dysponują możliwością prowadzenia pomiarów wydatkowanego wysiłku podczas procesu nurkowania. Dodatkowo, wydatkowana bezpiecznie praca silnie zależy od osobniczych predyspozycji, wykazując jednocześnie wahania dla tego samego osobnika, zależne od jego nastawienia czy stanu aktualnego wytrenowania³⁸.

Wpływ wysiłku na wzrost zagrożenia chorobą ciśnieniową DCS powodowany jest zazwyczaj przejściem na przemianę beztlenową i wydzieleniem się kwasu mlekowego w mięśniach³⁹, jako metabolitu biochemicznej przemiany beztlenowej. Kwas mlekowy z mięśni przenika do krwi powodując spadek wykładnika jonów wodorowych *pH* we krwi, powodując istotne zmiany w efektywności przenoszenia tlenu przez krew [14]. Spadek efektywności przenoszenia tlenu powoduje zaburzenia wymiany gazowej pomiędzy tkankami a krwią. W ten sposób tworzy się bariera biochemiczna dla eliminacji nadmiaru gazów rozpuszczonych w tkankach podczas procesu dekompresji. W takim przypadku, proces bezpiecznej akceleracji dekompresji tlenem czy mieszaninami dekompresyjnymi nie jest zgodny z modelem przyjętym w badaniach prowadzonych w celu opracowania rozkładów bezpiecznej dekompresji, przez co może on być nieadekwatny. Wpływ spadku efektywności transportu tlenu przez hemoglobinę na zagrożenie chorobą ciśnieniową DCS byłby trudny do wiarygodnego modelowania, stąd efekt ten nie jest uwzględniany ilościowo przy badaniach nad dekompresją.

Pracę ciężką można wydatkować jedynie podczas nurkowań saturowanych, gdyż po zakończeniu prac można dać odpocząć nurkom na plateau saturacji, przywracając ich normalną *homeostazę*. Następnie można przystąpić do standardowej dekompresji. W nurkowaniach poza strefą saturacji taka możliwość nie istnieje, stąd wysiłek przy takich nurkowaniach jest limitowany.

Dla zaburzeń przebiegu dekompresji nie ma znaczenia na jakiej drodze doszło do powstania kwasu mlekowego w mięśniach. Odległe efekty mogą pochodzić od poprzedniego nurkowania, aktualnego nurkowania lub od innego wysiłku wydatkowanego przed nurkowaniem. Nawet normowanie czasu odpoczynku przed nurkowaniem na niewiele się zda, gdy poza tym limitem wydatkowano nadmierny wysiłek, przy niedostatecznym wytrenowaniu, doprowadzając do rozległego wydzielenia kwasu mlekowego w mięśniach. Dzieje się tak dlatego, że skutki wydatkowania pracy na przemianę beztlenową mogą utrzymywać się nawet kilka dni. Stawianie wymagań, że czas odpoczynku po nurkowaniu powinien wynosić kilka dni jest nierealne i niepotrzebne. Stan gotowości nurka musi ocenić kierownik nurkowania, który może się wspierać pomiarami na obecność kwasu mlekowego we krwi.

Należy pamiętać, że po nurkowaniu, podczas pobytu na powierzchni zachodzi nadal powierzchniowa dekompresja izobaryczna, która ma bezpośredni wpływ na bezpieczną możliwość wydatkowania wysiłku po nurkowaniu. Stąd system dekompresji powinien zawierać wiarygodne limity rekomendowanego czasu odpoczynku po nurkowaniu w fazie dekompresji izobarycznej po nurkowaniu. Jednak wskazania pochodzące z walidacji systemu należy traktować jedynie jako wartość uśrednioną, gdyż zależnie od warunków nurkowania czy stanu wytrenowania może on wymagać wydłużenia. Także osobnicze zdolności do kompensacji zachodzących zmian po nurkowaniu mają niebagatelne znaczenie. Należy jednak zwrócić uwagę, że mogą one ulegać fluktuacji zależnie od okoliczności i stanu aktualnego wytrenowania.

Ogólnie uważa się, że ćwiczenia fizyczne podczas dekompresji wywierają negatywny wpływ na proces dekompresji [25]. Istnieją także wiarogodne przesłanki sugerujące coś zupełnie odmiennego [26]. Niewątpliwie ruch podczas dekompresji powoduje dodatkową emisję wolnej fazy gazowej do naczyń żylnych. Mając dostęp do przyrządu do detekcji wolnej fazy gazowej czy typowego ultrasonografu można się o tym łatwo przekonać. Przy prowadzeniu detekcji wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych, przy wykorzystaniu ultrasonograficznej techniki dopplerowskiej, prowadzi się dwa rodzaje pomiarów: w fazie spoczynku i zdefiniowanego ruchu [13]. Ruch ma za zadanie specjalnie wymusić zwiększanie udziału wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych.

Jak wspomniano wcześniej, przy szacowaniu dopuszczalnych wartości gradientów ciśnień cząstkowych gazów podczas procesu dekompresji przyjmuje się istnienie tzw. *szarej strefy*. Obejmuje ona gradienty ciśnień cząstkowych, które nie powinny doprowadzić do wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej *DCS* pod warunkiem, że nie nałożą się na przebieg dekompresji nadmierne, dodatkowe czynniki obciążające organizm nurka. Jeśli dekompresja będzie planowana poniżej *szarej strefy*, to praca mięśni podczas dekompresji powodująca wzrosty i spadki ciśnienia w tkance mięśniowej, powodujące mechaniczne „wyciskanie” dodatkowej porcji gazu z tkanek do krwi. Będzie to intensyfikować proces dekompresji. Jednak, jeśli dekompresja będzie planowana w pobliżu *szarej strefy* lub w jej obszarze, to dodatkowe „wyciskanie” gazu do krwi może przyczynić się do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej *DCS*.

TEMPERATURA

Ogólnie, zmiany temperatury otoczenia mają istotny wpływ na homeostazę organizmu człowieka, więc mają też niebagatelny wpływ na stan równowagi gazowej w organizmie nurka. Każda zmiana temperatury w procesie nurkowania ma wpływ na proces wymiany gazowej. Przykładowo podczas badań nad dekompresją stosuje się szybki gorący prysznic po nurkowaniu do prowokowania skórnych objawów choroby dekompresyjnej *DCS*. Wpływ ten czasami nie jest łatwy do przewidzenia, przykładowo dla nurków powietrznych najlepsze efekty osiągnano gdy nurkowanie odbywało się w stosunkowo zimnym a dekompresja w ciepłym otoczeniu [27]. Jednak dla innych nurków zależność ta może być odmienna.

Wpływ temperatury można tłumaczyć na gruncie fizyki. Najczęściej występuje zjawisko zmniejszenia się rozpuszczalności gazów w płynach wraz ze wzrostem temperatury. Mechanizm indukowania objawów choroby dekompresyjnej *DCS* jest jednak bardziej skomplikowany, przykładowo podgrzaniu skóry podczas brania kąpieli towarzyszy rozszerzenie naczyń krwionośnych skóry właściwej oraz powierzchniowych warstw tkanki podskórnej i spadek ogólnego ciśnienia krwi, powodując zachwianie równowagi gazowej w tkankach oraz krwi, tworząc sprzyjające warunki do powstawania wolnej fazy gazowej. W *Marynarce Wojennej RP* wykorzystuje się technikę transportu nurka w dzwonie suchym po nurkowaniu głębokim. Po ewakuacji wody z dzwonu i jego uszczelnieniu jest on transportowany do podłączenia z kompleksem hiperbarycznym, do którego nurek przechodzi pod aktualnie panującym ciśnieniem. Już w trakcie transportu obserwuje się pierwsze skórne objawy choroby ciśnieniowej *DCS*, zwłaszcza w okolicy dłoni i twarzy⁴⁰. Objawy te potęgują się podczas nurkowania zabezpieczonego przez sztuczne czynniki oddechowe na bazie helu⁴¹, gdy komfort nurka był zabezpieczony jedynie przez pasywne środki ochrony cieplnej. Objawy te nasilają się po przejściu do ciepłego środowiska komory kompleksu hiperbarycznego. Później stopniowo zanikają. Tego efektu nie obserwuje się podczas nurkowań saturowanych, gdy komfort zapewniają aktywne środki ochrony cieplnej nurka⁴².

Zmiany komfortu cieplnego nurka towarzyszą zazwyczaj różnym fazom procesu przygotowania do nurkowania, okresu przebywania w środowisku wodnym oraz czasu po nurkowaniu. Komfort cieplny często podlega czasami dość nieoczekiwanym zmianom. Przykładowo, podczas przygotowań do nurkowań w wodach zimnych bez aktywnych środków ochrony cieplnej, istotnym staje się dobór odpowiedniej odzieży ochronnej. Przy szacowaniu doboru cieplnej ochrony protektorowej należy uwzględnić poziom planowanego wysiłku i czasu pobytu. Przy planowaniu stosunkowo długiego pobytu nie można założyć długotrwałego wysiłku, stąd dobiera się stosunkowo efektywny ubiór pod skafander nurkowy. Jednak przy konieczności wydatkowania znacznego wysiłku, przykładowo przy przeciwdziałaniu długotrwałemu znoszeniu nurka przez głęboki prąd wodny następuje nieoczekiwane przegrzanie nurka. Na powierzchni człowiek może się częściowo rozebrać⁴³ a później ubrać, pod wodą najczęściej jest to utrudnione⁴⁴. Przegrzanie potęguje wyczerpanie fizyczne nurka podczas procesu nurkowania, co bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo dekompresji.

Inna nieoczekiwana zmiana komfortu cieplnego może nastąpić w skutek zalania skafandra suchego wodą. Jeśli zalanie nastąpi podczas zanurzenia czy pobytu na głębokości zazwyczaj można przerwać bądź skrócić nurkowanie celem uniknięcia eskalacji warunków utrudniających. Jeśli zalanie skafandra nastąpi podczas procesu dekompresji, to zazwyczaj nie istnieje łatwa możliwość przeciwdziałania powstałej sytuacji problemowej. Jeśli tabele dekompresji są projektowane do wykorzystania dekompresji powierzchniowej, to istnieje droga do skrócenia dekompresji w wodzie. Dekompresja powierzchniowa wymaga posiadania w bezpośredniej bliskości komory dekompresyjnej, gdyż procedury dekompresji powierzchniowej gwarantują czas nie dłuższy niż [5,7] min. na szybkie wynurzenie z głębokości, transport do komory, częściowe rozebranie i powrót pod ciśnienie w komorze dekompresyjnej [28]. Czas ten jest niezwykle krótki, stąd jeśli planuje się wykorzystać procedurę dekompresji powierzchniowej, to należy przećwiczyć czynności łączne do jej przeprowadzenia, gdyż powstałe na skutek błędu przedłużenie tego czasu może spowodować poważne objawy choroby dekompresyjnej *DCS* (NOAA, 1976).

Niebezpieczne skutki przegrzania obserwuje się u nurków zabezpieczających. Nurek zabezpieczający nie może być całkowicie rozebrany, stąd może ulec przegrzaniu na powierzchni. Z chwilą wejścia do wody doznaje szoku termicznego. W czasie nurkowania interwencyjnego może być narażony na dalsze przegrzanie lub wręcz przeciwnie na stosunkowo szybkie wychłodzenie, zależnie od czynności, które musi podjąć podczas interwencji.

SUKCESYWNOŚĆ

Przy podejmowaniu nurkowań powtórzeniowych powinno się uwzględnić stan przesylenia pozostały po poprzednim nurkowaniu. System dekompresji powinien uwzględniać czas przerwy na zmniejszenie przesylenia podczas dekompresji izobarycznej zachodzącej na powierzchni podczas odpoczynku po nurkowaniu. Lecz proces dekompresji powierzchniowej nie jest jedynym czynnikiem limitującym podjęcie następnego nurkowania. Ważnym czynnikiem limitującym jest mechanizm przejścia na przemianę beztlenową, który został opisany wcześniej. Często efekt przesylenia zanika już po 3 godz⁴⁵, lecz efekty wyjątkowo wysiłku potrafią być dokuczliwe przez 2 – 3 dni. Jeśli zatem nurek w poprzednim nurkowaniu ciężko pracował, to typowe wskazania systemu dekompresji dotyczące limitów wypoczynku na powierzchni mogą być nieadekwatne.

Pomiary *pH* krwi⁴⁶, mogą jedynie eliminować nurka przy badaniu wstępnym dopuszczającym do nurkowania, gdyż nie istnieje wiarogodny model uwzględniający ten parametr przy planowaniu bezpiecznych operacji nurkowych.

Zwrócenie uwagi na wpływ wysiłku, zwłaszcza przy serii nurkowań, stanowi ważną przesłankę do procesu planowania operacji nurkowych. Ignorowanie tego faktu stanowi błąd w sztuce. Podjęcie stosownej drogi postępowania w takim przypadku można powierzyć jedynie wiedzy, doświadczeniu i rozsądkowi decydenta, stanowiąc jego jednoosobową odpowiedzialność w tym zakresie⁴⁷.

PREDYSPOZYCJE

Podczas trenowania nurka powinno się zebrać dane antropometryczne i fizjologiczne związane z bezpieczeństwem dekompresji. Do podstawowych należy stan odżywienia, ogólna masa ciała, masa mięśniowa, masa tkanki tłuszczowej. Niebagatelną rolę odgrywa stan zadbania pielęgnacyjnego uzębienia, skóry, wzroku, gardła, uszu itd. Ważny jest aktualny, ogólny stan wytrenowania organizmu ze szczególnym uwzględnieniem gibkości, reakcji na obciążenie długotrwałym wysiłkiem czy pracą w wymuszonej pozycji, wiek biologiczny itd. Poważną rolę odgrywają parametry oddechowe jak: pojemność życiowa płuc, pułap tlenowy⁴⁸, stosunek konsumpcji tlenu do wentylacji płuc itp. Także powiązane z nimi inne parametry, jak: tętno tlenowe, oddech tlenowy czy bradykardia związana z zanurzeniem. Czasami, ze względu na specyfikę pełnionej służby nurkowej nie wszystkie parametry są tak samo istotne.

Użyteczne może być zebranie wyników różnych testów. Oprócz testów kondycyjnych użytecznym może być test odporności na szybkie sprężanie oraz tolerancji na ekspozycje tlenowe. Obecnie coraz częściej podnoszona jest konieczność badania celem wykluczenia wad serca, jak np. obecność przetrwałego otworu owalnego w przegrodzie międzyprzedsionkowej serca⁴⁹.

Stosunkowo często pomija się rolę stanu wytrenowania psychicznego. Istnieje wiele dowodów na to, że stan wytrenowania psychicznego odgrywa ważną, o ile nie podstawową, rolę w uprawianiu sportów ekstremalnych czy wykonywaniu prac niebezpiecznych. Niejednokrotnie spotkaniu wybitnych osób sprawdzonych w ekstremalnych warunkach towarzyszy zaskoczenie, że często są to ludzie, których budowa ciała, rysy twarzy czy zachowanie nie spełniają utartego archetypu. Widać stąd, że ich wyróżnikiem jest bardziej budowa mentalna niż fizyczna. Istotna jest także predyspozycja przed nurkowaniem. Nie chodzi jedynie o stan wypoczęcia organizmu, brak efektów wysiłku, przestrzeganie zakazu wykonywania pracy przed nurkowaniem itp., ale także nastawienie wynikające z analizy sytuacyjnej, aktualnej kondycji oraz obciążenia psychicznego zdarzeniami leżącymi poza problematyką nurkową⁵⁰.

MASA

Istnieje ogólne przekonanie, że nurek otyły jest bardziej zagrożony wystąpieniem objawów choroby dekompresyjnej *DCS* niż szczupły. Przekonanie to wiąże się z większą rozpuszczalnością gazów obojętnych w tkance tłuszczowej niż np. w tkankach mięśniowych. Istnieje też przekonanie, że doskonale zbudowany atleta jest bardziej odporny na forsowną dekompresję niż o przeciętnej rozbudowie mięśniowej, co prawdopodobnie ma umocowanie w ogólnym archetypie utartym w społeczeństwie. W niektórych przypadkach takie pojmowanie rzeczywistości może być nieadekwatne.

Wszystkie ssaki nurkujące posiadają znaczne zasoby tkanki tłuszczowej. Potrafią one nurkować na znaczne głębokości, jak foki do 500 m a niektóre walenie nawet do 3000 m. Foki pozostają pod wodą ok. 20 min a walenie średnio do 50 min. Ich budowa anatomiczna, zwłaszcza „ożebrowanie” płuc, jest inne niż człowieka, stąd mogą one nurkować na tak znaczne głębokości⁵¹. Lecz zjawiska fizyczne towarzyszące procesowi nurkowania są takie same. Zwierzęta te prawdopodobnie zapadają na chorobę dekompresyjną *DCS*, podobnie jak prawdopodobnie zapadały na *DCS* nurkujące dinozaury. Teorie te oparte są na badaniach szkieletów tych zwierząt i stwierdzeniu występującej u nich jałowej martwicy kości. Jeśli uznać tę przesłankę, to należy także przyjąć, że takie obserwacje mogą dotyczyć jedynie osobników starszych, o ile nie sędziwych. Obserwacji ssaków morskich nie da się jednak przenieść bezpośrednio na ludzi, a to ze względu na całkowicie odmienną budowę i funkcję obwodowej części układu krążenia. Gruba warstwa tkanki tłuszczowej stanowi zasadniczą izolację termiczną tych ssaków. Na drodze ewolucji wytworzyły one umiejętność odcinania dopływu krwi do tkanki podskórnej w związku z czym nie jest ona nasycana podczas zanurzenia.

Wydaje się, że większa rozpuszczalność gazów obojętnych w tłuszczach niż w wodzie ma podstawowe znaczenie w indukowanej chorobie ciśnieniowej *DCS* przez proces kontrdyfuzji [18]. Różnica w rozpuszczalności gazów obojętnych przy znacznym ukrwieniu tkanki tłuszczowej wydaje się mieć już mniejsze znaczenie. Jednak, w przeciwieństwie do zwierząt zapadających w sen zimowy, ukrwienie ludzkiej tkanki tłuszczowej jest słabe i osobniczo niezbyt zmienne.

Ze względu na ochronę cieplną wymagania od nurka odchudzania się celem znacznej eliminacji tkanki tłuszczowej czasami jest niecelowe.

Mocna budowa ciała może być elementem dodatkowo obciążającym przy rozpatrywaniu zagrożenia chorobą dekompresyjną *DCS*. Rozbudowana tkanka mięśniowa zużywa więcej tlenu przy wysiłku. Parametr zużycia tlenu na jednostkę masy ciała jest jednym z typowych, branych pod uwagę, przy ocenie wydolności ogólnej. Wysokie wartości tego parametru są ważną przesłanką braną pod uwagę przy ocenie stanu wytrenowania sportowców. W nurkowaniu dobre wytrenowanie

ogólne i duża masa mięśniowa może być przesłanką występowania zwiększonego zagrożenia możliwością wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej *DCS*. Może mieć to miejsce wtedy, gdy rozbudowa tkanki mięśniowej nastąpiła na skutek treningu innego niż pływacko/nurkowy. Mocna rozbudowa mięśni wymaga sprawnej wymiany gazowej. Jeśli rozbudowa mięśni spowodowana była powierzchniowym treningiem wysiłkowym to możliwe jest, że wydolny układ oddechowo-kръżeniowy na powierzchni może jednak być niedostatecznie wydolny przy oddziaływaniu ciśnienia zewnętrznego. Ćwiczący według treningu siłowego, zwłaszcza izometrycznego, stosunkowo łatwo potrafią przejść na przemiany beztlenowe. Szkodliwy wpływ tego zjawiska na proces dekompresji został opisany przy analizie obciążenia pracą.

Mięśnie stosunkowo łatwo potrafią forsownie oddać znaczne ilości rozpuszczonego w nich gazu podczas skurczu. W taki sposób wymusza się emisję gazu z mięśni do krwi podczas oceny zagrożenia dekompresyjnego metodą pomiaru ilości wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych [13]. Rozbudowana tkanka mięśniowa może na skutek wysiłku uwolnić znaczne ilości gazu obojętnego do krwi powodując zwiększenie zagrożenia chorobą dekompresyjną *DCS*.

Zasady działania aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego opierają się na modelach wentylacyjnych zaś bezpieczna dekompresja planowana jest w oparciu o maksymalne zmniejszenie zawartości tlenu w czynniku oddechowym wdychanym przez nurka. Zatem model opiera się na założeniu maksymalnej konsumpcji tlenu przez nurka. Dopuszczenie do nurkowania z użyciem takiego sprzętu nurka o zawyżonej konsumpcji tlenu powoduje, że założony dla niego rozkład dekompresji może być nieadekwatny.

OBCIĄŻENIA

Na obciążenie nurka składa się nie tylko wykonywana przez niego praca użyteczna, lecz także obciążenie związane z:

- oporami oddechowymi,
- obciążeniami ergonomicznymi, jak obciążenie: oporami skafandra, narzędziami, gabarytami aparatu nurkowego itp.,
- parametrami środowiska wodnego: wyporem, pływalnością itp.,
- obsługą i innymi obciążeniami związanymi z koniecznością ciągłej koncentracji,
- obciążeniami psychologicznymi itp.

Poważny wkład w obciążenie nurka pracą stanowią opory oddechowe. Nie da się ich uniknąć przy nurkowaniu, chociażby ze względu na wzrost gęstości czynnika oddechowego⁵². Ich wpływ jest uwzględniany podczas procesu opracowywania i walidowania rozkładów dekompresji dla danego sprzętu nurkowego⁵³. Przy czym szczególnie szkodliwe są opory wdechowe, zaś umiarkowane opory wydechowe mogą mieć pozytywny wpływ na proces nurkowania i dekompresji.

Drzewo oskrzelowe od tchawicy do oskrzeli średniego kalibru jest dzięki obecności sprężystych chrząstek oskrzelowych w ścianach na tyle sztywne, że przy możliwych do wytworzenia przez przeciętnego człowieka podciśnieniach wdechu⁵⁴ nie występuje zjawisko ich zapadania się. Oskrzeliaki typu mięśniowego i oskrzeliaki końcowe już są na tyle elastyczne, że możliwe jest ich przewężenie a nawet zamknięcie, zwłaszcza jeśli dodatkowo występuje efekt wytwarzania podciśnienia związany z szybkim przepływem gazu. Zamknięcie oskrzelików prowadzi do częściowego zatrzymania wymiany gazowej i w efekcie do miejscowej *hipoksji*.

Wzrost oporów oddechowych może łatwo spowodować zaburzenie w wymianie gazowej. Efekty te nie są uwzględnione przy szacowaniu procedury dekompresyjnej. Nurkowie powinni być trenowani w świadomym oddychaniu tak, żeby nie zaburzyć procesu dekompresji. Wdech powinien odbywać się powoli w sposób kontrolowany, zaś przy wydechu można zwiększyć opory przez zaciskanie ust i wykonać forsowny wydech jak w sposób zalecany w przypadkach astmy.

Sprzęt oddechowy zarówno przeznaczony do nurkowania, jak i inhalacji powinien być możliwie często sprawdzany, nie tylko na szczelność, lecz przede wszystkim ze względu na stawiane opory oddechowe.

Wszelkie uciski, powodujące zazwyczaj ograniczenie przepływu krwi, mogą prowadzić do skórnych objawów choroby ciśnieniowej⁵⁵ *DCS*. Przy niektórych typach sprzętu nurkowego nie da się ominąć miejscowych ucisków, jak przy uszczelnieniach szyjnych i rękawków skafandra nurkowego typu suchego, czy uszczelnieniach szyjnych hełmu nurkowego itp. Badania prowadzone w celu opracowania procesu dekompresji nie uwzględnia tego faktu.

Nurek najczęściej wykonuje prace podwodne w skafandrze, który ograniczając jego ruchy powoduje wzrost obciążenia pracą. Może podawać on także obciążenie na tyle istotne, że powoduje spływanie oddechu i efekty duszenia⁵⁶. Często powoduje on także miejscowe uciski mogące prowadzić do ograniczenia cyrkulacji krwi. Może to doprowadzić do lokalnych, bólowych objawów choroby dekompresyjnej *DCS*. Niektóre miejscowe uciski są trudne do wyeliminowania, jak wspomniane już uszczelnienia rękawków czy uszczelnienie szyjne skafandra, stąd należy optymalizować ich ucisk. Najczęściej nurek obciążony jest aparatem nurkowym, który jak skafander krępuje jego ruchy i powoduje lokalne uciski.

Można i należy przeciwdziałać lokalnym uciskom ciała podczas dekompresji w komorze dekompresyjnej. Nurkowie często o tym zapominają, dlatego zadanie przypominania o tym fakcie leży na obsłudze.

Wykonując prace podwodne nurek musi asystować przy przemieszczaniu różnych elementów konstrukcji wykorzystując niejednokrotnie różne narzędzia. Narzędzia projektowane są najczęściej z zachowaniem zasad ergonomii, lecz przemieszczane elementy konstrukcyjne już nie. Narzędzia podwodne są z reguły cięższe niż te użytkowane na powierzchni.

Wykonywanie cięższej pracy pod wodą wymaga stabilizacji sylwetki nurka w toni i w tym przypadku nie istnieją proste metody, które uwzględniłyby zasady ergonomii. Stabilizacja pozycji nurka najczęściej jest osiągnięta przez dociążanie go różnie rozmieszczonymi dodatkowymi obciążnikami, jak: ciężarki piersiowe, pasy balastowe, specjalne buty czy inne miejscowe obciążniki. Wszystkie te elementy powodują ograniczenia ruchów, konieczność wydatkowania dodatkowego wysiłku oraz ucisk miejscowy.

Wykorzystanie niektórych elementów wyposażenia i narzędzi jest absorbujące dla nurka, stąd nie może on całkowicie koncentrować uwagi tylko na pracy użytecznej, lecz także na kontroli elementów wyposażenia i parametrów nurkowania. Przykładowo, brak prawidłowego ustawienia oporów oddechowych na reduktorze zapotrzebowania może spowodować niewielki wzrost oporów oddechowych i w rezultacie konieczność wydatkowania dodatkowej pracy oddechowej. Podobnie jak

brak dostatecznej kontroli nad pływalnością prowadzi do wydatkowania dodatkowej pracy potrzebnej do jej utrzymania. Może to w efekcie spowodować przejście na przemianę beztlenową z całymi konsekwencjami dotyczącymi tego faktu.

Absorbującymi czynnościami jest kontrola parametrów nurkowania i dekompresji. Czynności te wymagają odpowiedniego skupienia uwagi a błędy mogą być znaczące. Proces koncentracji jest zaburzany toksycznym oddziaływaniem komponentów czynnika oddechowego. Przy planowaniu nurkowania należy zwrócić uwagę na to utrudnienie dając odpowiedni czas nurkowi na zastanowienie oraz jeśli to możliwe kontrolować jego poczynania⁵⁷.

Zaniedbania w prawidłowym ułożeniu sprzętu mogą powodować uciski miejscowe i w konsekwencji prowadzić do miejscowych, najczęściej skórnych, objawów choroby ciśnieniowej DCS.

Dopuszczenie do wykonywania prac podwodnych powinno być poprzedzone przygotowaniem się do nich przez odpowiednio dobrany trening zakładający możliwe scenariusze prac podwodnych. Zaś przystąpienie do wykonywania prac powinno być poprzedzone przygotowaniem polegającym na sprawdzeniu wszystkich elementów wyposażenia i aktualnych parametrów nurkowania.

MENTALNOŚĆ

Zawód nurka wymaga poruszania się w środowisku, do którego człowiek nie jest przystosowany. Stąd wynika konieczność kontroli procesu nurkowania przy pomocy przyrządów pomiarowych, skupienia uwagi na zagrożeniach, przy jednocześnie ograniczonym zabezpieczeniu, opartym w dużej mierze jedynie na możliwościach samo-ratowania. Nurkowanie może odbywać się w miejscach powodujących *agorafobię*, działania w odosobnieniu przy ograniczonej możliwości komunikacji, utrudnionej orientacji przestrzennej, czasami w przestrzeniach zamkniętych i niejednokrotnie ciemności potęgującej *klaustrfobię* itd. Powoduje to stany lękowe, potęgowane przez złe samopoczucie związane z uczuciem nieważkości, zniekształceniem obrazu i wymiarów, ekspozycji na zimno, czasami na uczucie gorąca itp. Czynniki te prowadzą do zaburzeń fizjologicznych, najczęściej podobnych do choroby morskiej. Utrudnia to koncentrację i zaburza stan emocjonalny nurka.

Przy nurkowaniach wojskowych dochodzą dodatkowo problemy natury psychologicznej związane z pracą z materiałami wybuchowymi, w bezpośredniej bliskości przeciwnika, przy świadomości występowania barier przeciw nurkom, aktywnych form ich zwalczania itp.

Najczęściej obserwuje się dwa skrajne typy adaptacji psychologicznej. Jeden polega na wyparci myślenia kategoriami zagrożenia, lansujący duże możliwości różnorodnej kompensacji osobniczej. Drugi polega na pragmatycznym podejściu do zagrożeń, lansujący flegmatyczny sposób reakcji na ryzyko. Pierwszy daje dużą pewność siebie i pozwala przetrwać czasami znaczne nagromadzenie stresu, lecz gdy bariera odporności zostanie przekroczona, to napad reakcji lękowych jest eksplozywny i najczęściej nie można go już zatrzymać. Drugi styl adaptacji daje także możliwości pracy w stresie, lecz przekroczenie granicy wytrzymałości powoduje wpadnięcie w zniechęcenie i rezygnację. Jednak z tego letargu jest możliwe przebudzenie przy zaistnieniu odpowiedniego impulsu. Często zdarza się, że zależnie od rozwoju sytuacji stresowej w człowieku mogą aktywnie istnieć dwie natury jak w powieści Stevensona: *Doktor Jekyll i pan Hyde*. Można starać się przesunąć granice pomiędzy nimi przez trening adaptacyjny, lecz jest to proces pracochłonny.

Wydaje się, że trening psychologiczny ma duży wpływ także na bezpieczeństwo dekompresji. Teoretycznie mechanizm ten można tłumaczyć chociażby wpływem na proces wydzielania *hormonów stresu*. Działanie ich polega na bezpośrednim pobudzeniu receptorów powodując skurcz naczyń krwionośnych i stąd wzrost ciśnienia tętniczego krwi. Towarzyszy temu przyspieszenie akcji serca, zwiększenie jego pojemności rzutowej, zwiększenie ciśnienia rozkurczowego w aortcie oraz zwiększenie przepływu mózgowego i wieńcowego krwi, rozszerzenie żreńnic i oskrzeli. Mobilizuje także spalanie tkanki tłuszczowej, hamuje perystaltykę jelit, wydzielanie soków trawiennych i śliny, oraz obniża napięcie mięśni gładkich. Oczywiście nie wszystkie te zmiany muszą powodować bezpośrednio lub pośrednio zwiększenie zagrożenia wystąpieniem objawów choroby dekompresyjnej DCS, jednak wszelkie zaburzenia równowagi w organizmie są niepożądane z punktu widzenia bezpieczeństwa dekompresji. Kontrolowanie granicy pomiędzy procesem mobilizacji a wybuchem paniki w stresie tworzy *handicap*⁵⁸ w oparciu o mobilizację organizmu ułatwiający proces prawidłowej dekompresji oraz utrudnienie dla wystąpienia objawów DCS.

TRENING

Zakres treningu nurkowego oprócz utrzymania ogólnej kondycji⁵⁹ psychofizycznej i zdrowotnej powinien obejmować także specjalistyczny trening nurkowy, adaptacyjny i psychologiczny, oraz zabiegi pielęgnacyjne i higieniczne.

Kondycyjny trening adaptacyjny polega na kontrolowanym zadawaniu wysiłku pływackiego wespół z kontrolą oddechu. Tworzy on predyspozycje do pływania podwodnego. Trening taki może składać się z pływania podwodnego z zatrzymanym oddechem, także przy dodatkowej wyporności⁶⁰, forsownego pływania dystansowego w aparacie itp. Komplementarnym treningiem adaptacyjnym są ekspozycje ciśnieniowe prowadzone w komorze hiperbarycznej, pozwalające na adaptację oddechową do środowiska hiperbarycznego oraz do przechodzenia dekompresji. Treningi takie powinny być prowadzone ustawnie a poziom wytrenowania stanowi parametr do oceny stopnia adaptacji do pracy w środowisku hiperbarycznym. Ocena aktualnego stopnia adaptacji do pracy w środowisku hiperbarycznym może być prowadzona właściwie jedynie według skali porządkowej⁶¹. Do oceny stanu wytrenowania zespołu nurkowego nie wystarczy wyciąg z aktualnie przebytych treningów, lecz prowadzący prace podwodne powinien trening ten planować i osobiście nadzorować.

Powyższe formy treningu powinny być uzupełnione o adaptację do ekspozycji na zimno i szok termiczny. Trening ten tworzy warunki do bezpiecznego przechodzenia dekompresji poprzez wpływ na zmniejszenie zaburzeń homeostazy w skutek wychodzenia. Trening można organizować na basenie z nieogrzaną wodą a później w wodach otwartych. Jako zasadę przyjmuje się niekorzystanie z ciepłej wody przed wejściem do basenu i po zakończeniu treningu. W późniejszej fazie do basenu można wchodzić skokiem⁶². Stopniowo można dodawać trening nurkowy stosując różne

warianty pływania z zatrzymanym oddechem. Można także dołączyć pływania z wykorzystaniem sprzętu podstawowego⁶³ i nurkowego. Należy kontrolować poziom obciążenia treningiem odpowiednio go stopniując, początkowo nie stosując zbyt drastycznych elementów, przykładowo zezwalając na używanie ocieplaczy głowy czy wybranych części ciała.

Treningi w komorze dekompresyjnej powinny być uzupełniane elementami treningu psychologicznej odporności na klaustrofobię. Oczywiście trening psychologiczny może być prowadzony dodatkowo w sposób wyizolowany, przykładowo w formie medytacji czy treningu antystresowego. Nie łączy się jednak oddzielić elementów treningu psychologicznego od treningu ogólnorozwojowego czy specjalistycznego treningu nurkowego. Trening psychologiczno-nurkowy powinien także zawierać elementy doprowadzające do fizjologicznego: przyśnięcia hipoksyicznego, black-out'u tlenowego, zachłyśnięcia, głębokiego przejścia na przemianę beztlenową, obciążenia oddechowego itp. Trening taki można organizować na basenach pływackich lub nurkowych, także przy okazji normalnych treningów pływackich czy ogólnorozwojowych.

Treningi orientacji przestrzennej uodpornienia na klaustrofobię mogą być prowadzone na specjalistycznych torach przeszkód. W naszych warunkach hydrologicznych trudno jest zorganizować trening adaptacyjny do agorafobii. Może on być prowadzony jedynie na wodach o dużej przezroczystości i występujących uskokach na duże głębokości, jako element nurkowania lub pływania w batyskafie. Jeśli nie jest to możliwe, to można go organizować w pobliżu infrastruktury technicznej, jak platforma wiertnicza, z wykorzystaniem wielopunktowego oświetlenia podwodnego ustawionego tak, aby powstała odpowiednia ekspozycja przestrzenna. Niebezpiecznym, choć możliwym do wykorzystania rejonem są zalane kamieniołomy.

Nurkowania w zmienionym środowisku powinna poprzedzać adaptacja. Nie chodzi tu tylko o adaptację przy zmianie wyniesienia, jak przed nurkowaniem w wysokogórskich rejonach. Konieczność adaptacji istnieje także przy zmianach w zakresie adaptacji meteorologicznych⁶⁴ czy hydrologicznych⁶⁵.

DIETA

Nurków obejmują ogólne zalecenia kaloryczne i suplementacje dotyczące ludzi wykonujących pracę ciężką. Jednak dieta powinna uwzględniać także specyficzne wymagania.

Ośrodkami zarodkowania narostu wolnej fazy gazowej mogą być wtrącenia pochodzące od suplementów diety, elementów diety czy zażywanych leków. Dlatego informacje na ten temat nie mogą być pomijane czy bagatelizowane. Przykładowo, istnieje przekonanie, że soki owocowe są źródłem cennych witamin i powinny być wskazane dla nurków. W ogólności takie przekonanie jest słuszne, także z punktu widzenia pożądanej hydratacji organizmu. Jednak soki zawierają znaczna ilość kwasów, które szybko docierają do krwi obniżając potencjalnie *pH* krwi. Organizm broni się stosując efekty buforowania, które są potencjalnie niekorzystne z punktu widzenia dekompresji. Mechanizm zabezpieczający w postaci buforowania *pH* krwi oparty jest o procesy emisji ditlenku węgla CO_2 , powodując szybszą zadyszkę czy objawy sapania. Podobnie dieta składająca się z kwaśnych potraw, może powodować podobne efekty.

Dieta bogata w tłuszcze powoduje, że występują one w surowicy krwi sprzyja odkładaniu się go w ścianach naczyń krwionośnych, co zwiększa ryzyko miażdżycy tętnic.

Lipidy w osoczu krwi są nieodzowne dla ułatwienia absorpcji witamin rozpuszczalnych w tłuszczach pełniąc rolę czynnika przenoszącego te witaminy. W stosunku do gazów obojętnych lepiej rozpuszczalnych w tłuszczach, lipidy zawarte we krwi mogą pełnić rolę ich przynosiacza lub/i magazynu. Funkcja magazynowania gazów powinna spowodować zmianę charakteru tkanki z szybkiej na wolniejszą.

CZYNNIKI OSOBNICZE

Osobnicza odporność bądź wrażliwość na skutki dekompresji może wynikać z naturalnej obecności wolnej fazy gazowej w krwi stanowiącej formę zarodków do jej narostu w czasie dekompresji. Wolna faza gazowa we krwi powstaje głównie poprzez zjawisko kawitacji towarzyszące akcji serca⁶⁶. Emisja kawitacyjnej wolnej fazy gazowej w sercu w dużej mierze zależy od indywidualnej budowy serca a szczególnie pracy zastawek. Doświadczenie w ultrasonografii i możliwości permanentnego wykonania takich badań daje jedynie możliwość subiektywnej oceny wpływu tego czynnika na bezpieczeństwo dekompresji i stąd nie może być jak dotąd generalizowana czy normalizowana.

Osobnicza odporność na forsowną dekompresję może być powodowana zwiększoną perfuzją tkanki tłuszczowej przez krew⁶⁷. W tym zakresie obserwuje się różnice w zależności od płci i wieku.

Hormony stresu oddziałują głównie na układ krążenia, przez co poprawiają krążenie krwi. Powodują także zwiększenie wydzielania glukozy do krwi. Hormony stresu powodują całą reakcję wydzielania także różnych innych substancji do krwi. Wtrącenia te stanowią potencjalne załączki narostu wolnej fazy gazowej. Choć nadpobudliwość powodująca szybkie podwyższenie percepcji jest w wielu przypadkach pozytywnym zachowaniem, to przy nurkowaniach może prowadzić do zwiększenia ryzyka.

Istnieje silny pogląd, że odporność osobnicza na skutki dekompresji maleje z wiekiem. Jednak długie badania występowania wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych pokazują, że sytuacja może być bardziej skomplikowana. U pewnego odsetka nurków zaawansowanych wiekiem, lecz pozostających nadal w dobrej ogólnej kondycji fizycznej i poddawanych systematycznym treningom hiperbarycznym, nie obserwuje się objawów choroby dekompresyjnej *DCS* pomimo występowania znacznej ilości wolnej fazy gazowej we krwi⁶⁸. Choć ten fenomen jest obserwowany, to trudno go wytłumaczyć na podstawie obecnej wiedzy fizjologicznej. Występowanie tych zjawisk nie wpływa na ogólną tendencję, związaną z nabywanymi z wiekiem obciążeniami, które powodują konieczność łagodzenia reżimów dekompresyjnych dla starszych nurków.

PŁEĆ

Dyskusję na temat wpływu płci na bezpieczeństwo szacowanej dekompresji wywołały publikacje dotyczące zagrożenia chorobą dekompresyjną *DCS* w awiacji. Po głębszej analizie piśmiennictwa wydaje się autorowi, że zauważalne różnice istnieją w hipobarii, natomiast w hiperbarii ich nie obserwowano, choć badania były prowadzone na znacznej liczbie osobników [9,21,31].

Jednak istnieje szereg obciążeń związanych z różnicami międzypłciowymi, które mają istotny wpływ na bezpieczeństwo dekompresji.

Do tej pory wykonano niewiele badań naukowych dotyczących wpływu płci na zagrożenie chorobą dekompresyjną *DCS*. Stało się tak dlatego, że prawie wszystkie badania naukowe wykonuje się w kierunku zastosowań militarnych i komercyjnych. Na tych polach działa dotąd niewiele kobiet. Obecnie Marynarka Wojenna RP zaczęła rekrutować kobiety do służby nurkowej.

Jeżeli kobieta może znosić energiczne ćwiczenia podczas menstruacji powinna być również w stanie nurkować bez większych problemów. Jeżeli kobieta łagodzi objawy menstruacji poprzez zastosowanie środków przeciwbólowych to powinna powstrzymać się od nurkowania. Stres przedmiesiączkowy⁶⁹ *PMS* może powodować u części kobiet skłonności do zmniejszenia tolerancji środowiska czy załamań psychicznych. Generalnie, to czy kobieta może w tym czasie nurkować zależy od tego jak się czuje.

Wiele kobiet nurkuje w pierwszych tygodniach ciąży, kiedy nie są jeszcze świadome poczęcia. W tym czasie płód jest szczególnie narażony na wpływy czynników teratogennych⁷⁰. Płód powinien posiadać odpowiedni poziom dotlenienia, jednocześnie nie za duży i nie za mały. Istnieją spekulacje, że wolna faza gazowa która nie powoduje problemów u matki⁷¹, może „atakować” płód lub łożysko ograniczając przepływ krwi, a co za tym idzie zmniejszając dotlenienie płodu. Część procedur leczenia choroby dekompresyjnej *DCS* polega na rekompresji i podaniu do oddychania tlenu. Niektórzy uważają, że wysokie ciśnienie cząstkowe tlenu może być kancerogenne dla płodu⁷².

PODSUMOWANIE

W zaprezentowanym materiale nie można było przedstawić głębokiej analizy piśmiennictwa naukowego. Choć piśmiennictwo dotyczące bezpieczeństwa dekompresji jest obszerne, to doniesienia skupiają się raczej na opisie pojedynczych przypadków nie niosąc jak na razie bezspornych zaleceń. Jedynie nieliczni pokusili się o przedstawienie w udostępnianym szeroko piśmiennictwie analizy czynników zakłócających proces dekompresji [2].

Większość przedstawionych problemów pochodzi jedynie z tzw. dobrej praktyki nurkowej, która była gromadzona przez specjalistów Marynarki Wojennej RP. Praktyki te przekazywane były na kursach specjalistycznych, lecz prawdopodobnie z powodu braku ich opracowania w postaci zwartej stopniowo zaniknęły. Zostały one tutaj pokrótce spisane i powinny być brane pod uwagę przy obowiązkowej analizie inherentnego ryzyka dekompresji, choć ich interpretacja nie została w bezsporny sposób potwierdzona w metodycznie poprawnym i kompletnym, naukowym procesiepoznawczym⁷³.

Proces nurkowania stanowi jedynie element scenariusza operacji bojowej, stąd bezpieczeństwo nurkowania przekłada się w sposób pośredni na efektywność tego scenariusza. Opracowanie i sprawdzenie niektórych przewidywanych scenariuszy operacji nurkowych ma głęboki sens przy poszukiwaniu optymalnego sposobu planowania bojowego.

ODNIESIENIE

Artykuł jest wynikiem prac realizowanych na podstawie umowy nr DOB-BI08/09/01/2016 podpisanej na podstawie decyzji Dyrektora Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr DOB-BIOS/09/01/2016 na realizację projektu pt. *Projektowanie dekompresji dla nurkowania MCM/EOD II*, złożonego w ramach konkursu nr 8/2016 na wykonanie i finansowanie projektów w zakresie badań naukowych lub prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.

LITERATURA

1. Bühlmann A.A. Decompression-Decompression sickness. Berlin : Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9;
2. Lippmann J. Deeper into diving. Carnegie, Australia: J.L. Publications, 1990. ISBN 0-9590306-3-8;
3. Lippmann J., Mitchell S. Deeper into diving. Aschburton: J.L. Publications, 2009. ISBN 0-9752290-1-X;
4. Lewbel G.S. The decompression workbook. New York: Pisces Book Co., 1984. ISBN: 0-86636-023-9;
5. Betts E.A. Introduction to enriched air diving. Freeport: American Nitrox Divers Inc., 1994;
6. Comex Marseille. Medical Book. Marseille: Comex, 1986;
7. Imbert J-P, Bontoux M. Proposition d'un manuel de procedures de decompression a l'air. Marseille: Comex Services, 1987. Final report to Centre d'Etudes Petroleres et Marines. Fiche no 4723;
8. Tabele dekompresji i rekompresji nurków. Praca zbiorowa. Gdynia: Dowództwo Marynarki Wojennej, 1982. Sygn.Mar.Woj. 860/81;
9. Brubakk A.O., Neuman T.S. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. brak miejsca : Saunders, 2003. ISBN 0-7020-2571-2;
10. Kenyon D.J. Butler G. Crude neon with nitrogen and oxygenasa hyperbaric intervention breathing mixture. Pub. No.: US 2014/0290651 A1 USA, 2 11 2014. 128/203.12: 96/134;
11. US Navy diving manual. Praca zbiorowa (revision 7). The Direction of Commander: Naval Sea Systems Command, 2016. SS521-AG-PRO-010 0910-LP-115-1921;
12. Kłos R. Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego. Poznań: COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2;
13. —. Ultrasonic detection of the intravascular free gas phase in research on diving. Polish Maritime Research. 106, 2020, Tom 27, 2, strony 176-186;
14. —. Możliwości doboru ekspozycji tlenowo-nitroksowych dla aparatu nurkowego typu AMPHORA - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2012. ISBN 978-83-924989-8-8;
15. Castagna O, de Maistre S, Schmid B, Caudal D, Regnard J. Immersion pulmonary oedema in a healthy diver not exposed to cold or strenuous exercise. Diving and Hyperbaric Medicine. March 2018, Tom 48, strony 40-44;

16. Alonso J.V., Chowdhury M., Borakati R., Gankande U. Swimming-induced pulmonary oedema an uncommon condition diagnosed with POCUS ultrasound. *American Journal of Emergency Medicine*. 2017, Tom 35, strony 1986.e3–1986.e4;
17. Boussuges A., Ayme K., Chaumet G., Albier E., Borgnetta M., Gavarry O. Observational study of potential risk factors of immersion pulmonary edema in healthy divers: exercise intensity is the main contributor. *Sports Medicine - Open*. 2017, Tom 35, 3;
18. Klos R. Context analysis in the development of diving technologies (bilingual: Analiza kontekstu przy projektowaniu technologii). *Polish Hyperbaric Research*. 2019, Tom 62, 2, strony 7-58;
19. Schipke J. D., Tetzlaff K. Why predominantly neurological decompression sickness in breath-hold divers? *J Appl Physiol*. 2016, Tom 120, strony 1474–1477;
20. Klos R., Konarski M., Olszański R. The implementation of factor analysis for the evaluation of selected blood parameter changes induced by hyperbaric exposure. *International Maritime Health*. 2004, Tom 55, strony 87-101;
21. Cole B. Decompression and computer assisted diving. brak miejsca : Dive Information Company, 1993. ISBN 0-9520934-0-5;
22. Lepawsky M., Wong R. (ed.). *Empirical diving techniques of commercial sea harvesters*. Richmond: Undersea and Hyperbaric Medical Society Inc., 2001. Fiftieth Workshop of the Undersea and Hyperbaric Medical Society. ISBN 0-93406-21-4;
23. Wienke B.R. *Diving above sea level*. Flagstaff : Best Publishing Co., 1993. ISBN 0-941332-30-6;
24. Natural Environment Research Council. *Code of practice for scientific diving 1974* London. London: Natural Environment Research Council, 1974;
25. The effect of exercise during decompression. Vann R.D. Norfolk: Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc., 1982. Abstract of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc. Annual Scientific Meeting held June 1-5, 1982 in Norfolk, Virginia. <http://archive.rubicon-foundation.org/7279>;
26. Potential fifty percent reduction in saturation diving decompression time using a combination of intermittent recompression and exercise. Gernhardt M.L., Abercromby A.F., Conkin J. Kapalua Maui, Hawaii: Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc., June 14-16, 2007. Abstract of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc. Annual Scientific Meeting held. Ritz-Carlton. <http://archive.rubicon-foundation.org/5140>;
27. Gerth W.A., Ruterbusch V.L., Long E.T. The influence of thermal exposure on diver susceptibility to decompression sickness. Panama City : Navy Experimental Diving Unit, 2007. NEDU TR 06-07;
28. DCIEM. *Diving Manual*. North York: Defence and Civil Institute of Environmental Medicine, 1995. DCIEM No. 86-R-35A;
29. NOAA. *Vertical excursions breathing air from nitrogen-oxygen or air saturation exposures*. Rockville: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976. U.S. Government Printing Office 1976-210-801/366;
30. Klos R. *Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt*. Gdynia: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26;
31. Edmonds C., Lowry C., Pennefather J. *Diving and subaquatic medicine*. Oxford: Butterworth Heinemann Ltd, 1992;
32. Bartosz G. *Druga twarz tlenu - wolne rodniki w przyrodzie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008. ISBN 978-83-01-13847-9;
33. Langelüddecke J. Trimix for the BASF fire brigade. *Dräger Review*. 1996, Tom 76, January, strony 17-19;

dr hab. inż. Ryszard Klos prof. AMW

Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
e-mail: r.klos@amw.dynia.pl

ORCID identifier No: 0000-0002-4050-3978

¹ nierozłącznie przynależnych,

² resztkowego ryzyka, którego nie można już w danych warunkach zminimalizować,

³ ocenie stanu przedstawionej na podstawie badań i analiz,

⁴ czynności mające na celu zbadanie odpowiedniości na założonym poziomie dokładności i precyzji,

⁵ najczęściej zbierane są one w formie opisu przypadku, zaś wnioski wynikające z analizy przypadku są wprowadzane jako pilotażowe zalecenia do stosowania lub możliwych do wykorzystania patentów składających się na *dobrą praktykę nurkową*,

⁶ wiedza jeszcze niewalidowana metodami i metodami uznany za naukowe,

⁷ lub wojskowym samolocie transportowym,

⁸ w odciepu przez wodę korytarzu może panować ciśnienie znacznie wyższe niż wynikałoby to jedynie z jego poziomu poniżej powierzchni morza,

⁹ dekompresjometr zazwyczaj nie może uwzględnić rezydualnego ryzyka,

¹⁰ najczęściej występuje uwaga o korzystaniu z systemu dekompresji na własną odpowiedzialność,

¹¹ aby stwierdzenie to nie miało znaczenia pejoratywnego, można umiejętności te porównać z umiejętnościami szlifierzy diamentów, mistrzów kuchni itp.,

¹² mowa tu o zawodowych kosmonautach a nie ludziach będących jedynie turystami w przestrzeni kosmicznej,

¹³ obecnie coraz częściej posiadanie instrukcji serwisowania wymaga zawiązania umowy franczyzy z producentem,

¹⁴ sprzeczności,

¹⁵ są tacy, którzy uważają, że *Jaroslav Hašek* osiągnął taki cel opisując wszystkie możliwe sytuacje mogące zdarzyć się w wojsku w stosunkowo mało obszernym dziele pt. „Przygody dobrego wojaka Szwajka podczas wojny światowej”,

¹⁶ stanowią one wyniki badań przeprowadzonych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych,

¹⁷ maksymalnej wartości dopuszczalnych gradientu ciśnień,

¹⁸ materializacja ryzyka rezydualnego,

¹⁹ bez zmian ciśnienia całkowitego nurek nie mógłby opuścić środowiska hiperbarycznego,

²⁰ większość, nawet najprostszych nurkowań prowadzonych w warunkach rzeczywistych posiada bardziej złożony kształt dla profilu dekompresji,

²¹ przykładowo: akcelerowanie dekompresji, terapia tlenowa, leczenie choroby dekompresyjnej itp.,

²² umożliwiają to ominięcie stosunkowo uciążliwej procedury produkcji prawidłowo skomponowanego *Helioksu Hx*, dopuszczając stosunkowo szeroki zakres jego składu,

²³ podobne zaburzenia występują u pływaków dystansowych i związane są z głębokimi, szybkimi wdechami powodującymi zapadanie się oskrzelików,

²⁴ zatrzymanie w organizmie ditlenku węgla CO_2 ,

²⁵ aparat o obiegu oscylacyjnym,

²⁶ ze względu na indukowanie się skórnych objawów choroby dekompresyjnej, może być także bezpośrednia wymiana gazowa pomiędzy atmosferą a tkankami poprzez skórę,

²⁷ przykładowo przez hemoglobinę lub lipidy krwi,

²⁸ fizycznie rozpuszczony gaz w osoczu krwi,

²⁹ Intrapulmonary Arteriovenous Anastomoses,

³⁰ głębokość jest jednostką miary długości, choć w tym przypadku jest specyficzną jednostką ciśnienia,

³¹ odniesienie do wody słodkiej jest jednoznaczne, odniesienie do głębokości wyrażonej w jednostkach głębokości wody morskiej jest niejednoznaczne, gdyż zależy od zasolenia akwenu. Dawniej, podawano na manometrze wartość odniesienia do gęstości wody, obecnie dla ujednoczenia jednostek miar przyjęto, że $10 \text{ mH}_2\text{O s.w.} \approx 100 \text{ kPa}$,

³² zawieszanie w wodzie niektórych minerałów, jak *baryt* znane jest jako proces tworzenia tzw. „wody ciężkiej”. Przykładowo, zawiesiny takie są wykorzystywane np. w przemyśle wiertniczym do wywierania przeciwcisnienia na ściany otworu wiertniczego. Nazwa ta może być myląca gdyż także wodą ciężką nazywa się wodę deuterowaną. Tutaj chodzi o tworzenie trwałych zawiesin zwiększających gęstość wody. Nurkowanie na tej samej głębokości wyrażonej metrycznie w wodzie z zawiesinami jest ekspozycją na wyższe ciśnienie niż w czystej wodzie słodkiej,



- ³³ pneumatometr stosowany jest do pomiarów ciśnienia na głębokości (różni się on budową od urządzenia o tej samej nazwie używanego w medycynie do pomiarów podciśnienia wdechu i nadciśnienia wydechu) - jest to przewód którym podaje się gaz tak aby powoli, swobodnie wypływał na jego końcu do wody, jednocześnie mierząc ciśnienie panujące w przewodzie,
- ³⁴ np. w zależności od pozycji nurka w toni wodnej, z punktu widzenia dekompresji w pozycji pionowej nurka, istnieje istotna różnica głębokości pomiędzy stopami a głową; najczęściej przyjmuje się miejsce pomiaru głębokości w okolicy centroidy płucnej nurka,
- ³⁵ dokładność metody oraz miejsce pomiaru może spowodować, że błąd dla zmierzonego ciśnienia może być porównywalny z rozstępem pomiędzy stacjami dekompresyjnymi,
- ³⁶ w samolotach rejsowych dopuszcza się do zmniejszenia ciśnienia w kabinie ze względów wytrzymałościowych - samoloty w ten sposób mogą być konstruowane na mniejsze zmiany ciśnienia, stąd ich konstrukcja może być lżejsza,
- ³⁷ zgodnie z powszechnie akceptowanymi wytycznymi, wewnątrz kabin samolotów pasażerskich ciśnienie musi być utrzymywane na poziomie nie niższym niż odpowiadające przebywaniu na wysokości 2438 m n. p. m. (0,75 atm),
- ³⁸ podobnie jak w sporcie, gdzie liczą się nie tylko indywidualne predyspozycje, ale taki sam wpływ ma trafienie z formą na zawody. Lecz spełnienie tych warunków nie gwarantuje sukcesu, gdyż brak odporności psychicznej podczas samych zawodów może zniwelować wpływ predyspozycji i wytrenowania,
- ³⁹ kwas mlekowy obecny w mięśniach może prowokować efekty bólowe,
- ⁴⁰ wiąże się to ze skokową zmianą temperatury, szczególnie gdy podczas transportu na powierzchnię dodatkowo zachodzi proces obniżania ciśnienia w dzwonie,
- ⁴¹ w tym przypadku lekkie objawy skórne potęgowane są przez zjawiska kontrdyfuzji [18],
- ⁴² podczas nurkowania saturowanego dzwon z reguły nie spełnia roli cieplnego habitatu, stąd nawet podczas przebywania w dzwonie nurkowie korzystają z aktywnych środków ochrony cieplnej,
- ⁴³ przykładowo, przy rąbaniu drewna na opał na mrozie,
- ⁴⁴ w niektórych regionach nurkowie działają specjalnych nadal preferują skafandry typu mokrego, które są wyposażone w systemy Velcro umożliwiające mocowanie płatów rozpiętego skafandra; umożliwia to częściowe rozpięcie pianki pod wodą i takie jej klarowanie, aby nie zwiększała oporów pływania,
- ⁴⁵ powszechnie uważa się, że po 12 *godz* efekt przesylenia jest niezauważalny nawet po nurkowaniach głębokowodnych,
- ⁴⁶ obecnie takie pomiary najczęściej nie przedstawiają większych trudności,
- ⁴⁷ nie da się precyzyjnie zdefiniować znaczenia przesłanki związanej ze zwiększeniem zagrożenia chorobą dekompresyjną *DCS* przy nurkowaniach seryjnych, gdyż czasami bezpieczny odstęp pomiędzy nurkowaniem będzie wynosił 12 h a w innym przypadku 2 *dni*, raz będzie dotyczył drugiego nurkowania a w innym przypadku późniejszych,
- ⁴⁸ maksymalna ilość tlenu, jaką jest w stanie pobrać organizm podczas intensywnego wysiłku,
- ⁴⁹ łac. foramen ovale,
- ⁵⁰ aktualna sytuacja zdrowotna rodziny, kondycja finansowa, ostatnie niepowodzenia itp.,
- ⁵¹ zapadanie się ich klatki piersiowej wraz z głębokością nie powoduje uszkodzeń mechanicznych organizmu,
- ⁵² oczywiście stosuje się lekkie komponenty czynnika oddechowego, lecz z reguły do nurkowania na znaczne głębokości, więc i tak istnieje zwiększenie jego gęstości w stosunku do powietrza atmosferycznego; także w warunkach normobarycznych firma *Dräger* postulowała zastosowanie lekkich komponentów czynnika oddechowego do napełniania oddechowych aparatów pożarniczych [33],
- ⁵³ adopcja istniejącego systemu dekompresji jest możliwa, lecz powinno być walidowane,
- ⁵⁴ ok. 20 *kPa*,
- ⁵⁵ możliwe mogą być także poważniejsze objawy w postaci bólei stawów, zazwyczaj w dekompresji po saturacji na skutek złego ułożenia ciała podczas snu, dlatego nie zaleca się prowadzenia dekompresji w czasie pory nocnej zaś w dzień nie zezwala się nurkom na sen,
- ⁵⁶ podobne do efektów duszenia powodowanych przez niektóre węże duszące swe ofiary,
- ⁵⁷ dobrą praktyką jest odpytywanie nurka dające nie tylko kontrolę nad jego poczynaniami, lecz także dające mu czas na adiustowanie sprzętu i wyposażenia oraz przemyślenie aktualnej sytuacji,
- ⁵⁸ ułatwienie jednego *procesu* i jednoczesne utrudnienie drugiego
- ⁵⁹ rozumianej tutaj, jako aktualny stan fizjologiczny organizmu podlegający zmianom pod wpływem czynników środowiska zewnętrznego,
- ⁶⁰ np. wykonanie zanurzenia na kilka metrów z zatrzymanym oddechem z deską pływacką przy wspomaganiu płetwami lub bez, czy pływanie dystansowe na małej głębokości w płetwach, z zatrzymanym oddechem, i z deską pływacką,
- ⁶¹ skala pozwala ustalić kolejność, jednak nie da się w sensowny sposób określić różnicy między dwiema wartościami,
- ⁶² należy oczywiście stosować odpowiednie zabezpieczenie na wypadek ustania akcji serca,
- ⁶³ maska, płetwy, fajka nurkowa,
- ⁶⁴ nurkowania w innym klimacie lub warunkach meteorologicznych,
- ⁶⁵ różnice w występowaniu termokliny, występowaniu pływów czy nurkowania w nurcie płynącej wody,
- ⁶⁶ także pomiędzy mięśniami, ścięgnami, w pochewkach ścięgniastych czy okolicach okolostawowych,
- ⁶⁷ podobnie jak u ssaków morskich także u ludzi może występować tkanka tłuszczowa dobrze *perfundowana* przez krew,
- ⁶⁸ pomimo ekstremalnie dużego narostu wolnej fazy gazowej we krwi nie występują u nich objawy choroby dekompresyjnej *DCS*, które wystąpiłyby z dużym prawdopodobieństwem, gdy byli młodszy,
- ⁶⁹ Premenstrual Syndrome,
- ⁷⁰ czynniki pochodzące ze środowiska zewnętrznego, działające na organizm w okresie jego rozwoju wewnątrz łonowego,
- ⁷¹ główne naczynia krwionośne są większe u matki niż u zarodka,
- ⁷² szczególnie łatwo może zostać uszkodzony narząd wzroku co pokazują obserwacje prowadzone w inkubatorach dla niemowląt [32],
- ⁷³ interpretacja przytoczonych tutaj przykładów ma jednak oparcie w aktualnej wiedzy.