

ANALIZA KONTEKSTU PRZY PROJEKTOWANIU TECHNOLOGII NURKOWANIA

Ryszard Kłós

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

W poprzednim artykule opisano nową metodykę¹ podejścia przy pracach nad technologią wykorzystania aparatu nurkowego typu SCR CRABE SCUBA². Jednak po jego publikacji nadeszły liczne pytania dotyczącymi genezy podjętych badań, także od partnerów zagranicznych wykorzystujących ten sam aparat nurkowy. Podjęcie prac nad zmianą technologii wykorzystania poprzedzono analizami, które były dostępne jedynie osobom zaangażowanym w proces decyzyjny. Pokazywanie wszystkich szczegółów procesu decyzyjnego może być nużące, lecz ich nie pokazanie w ogóle może budzić uzasadnione wątpliwości dotyczące celowości co do prowadzenia długotrwałego cyklu badań.

W artykule pokazano jedynie wstępne analizy. Konieczność ich przeprowadzenia wynikała ze szczególnych wymagań dla technologii³ wojskowych, które powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. Podejście oparte na wiedzy ze swej natury umożliwia ciągle poprawianie adekwatności dokonywanych predykcji, szacowanie poziomu zagrożenia przy zdiagnozowaniu odchyłań od powtarzalności czy precyzji modelu oraz możliwość dostosowywania technologii do zmieniających się wymagań użytkownika wynikających z uwarunkowań taktycznego jej wykorzystania.

Słowa kluczowe: aparat nurkowy o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego/Semi-Closed Circuit Rebreather, modelowanie procesu dekompresji/modelling process of decompression.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2019 Vol. 67 Issue 2 pp. 7 - 58

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

DOI: 10.2478/phr-2019-0005

Strony: 52, rysunki: 1, tabele: 5

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 13.02.2019 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 20.04.2019 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Sposoby pozyskiwania wiedzy, różnice w podejściu analitycznym i holistycznym do rozwiązywania sytuacji problemowych oraz podejście procesowe przy opracowywaniu technologii przedstawiono w zarysie we wcześniejszym artykule [1]. Zagadnienia te nie będą tutaj powtórnie przytaczane czy rozwijane⁴.

CEL PROCESU NURKOWANIA

W każdym projekcie powinny być zdefiniowane założenia dotyczące jego celu, propozycji procesu służącego do jego osiągnięcia⁵, określenia⁶ minimalnej i optymalnej struktury dla proponowanego systemu mogącego zapewnić jednoznaczną, stabilną i efektywną realizację proponowanego procesu z uwzględnieniem wpływu na środowisko i wpływu środowiska na system oraz przebiegający w nim proces.

Początkowo za nurkowania uważano jedynie procesy, w których organizm nurka był wystawiany na ciśnienie, zaś nurkowania przy wykorzystaniu skafandrów jedno-atmosferycznych uważano za wykorzystanie pojazdu podwodnego. Obecnie, ze względu na wymagane wyszkolenie i konieczność realizacji zadań w osamotnieniu, mianem nurka określa się także akwanautę wykorzystującego skafander jedno-atmosferyczny.

Dla procesu nurkowania można ustanowić różne cele ich prowadzenia. Zależnie od oczekiwanego celu stanowiącego efekt końcowy procesu nurkowania należy ustanowić odpowiedni system, który będzie w stanie zapewnić trwałe podtrzymanie gotowości do realizacji celów nurkowania. Ze względu na cel procesu nurkowania można zastosować różne podziały, przykładowo można je podzielić na nurkowania:

- ekstremalne,
- sportowe,
- rekreacyjne,
- techniczne,
- zawodowe,
- ratownicze,
- wojskowe,
- itp.

Minimalny system zdolny do trwałego podtrzymania procesu nurkowania prowadzonego w wybranym celu stanowi jedynie konstrukcję teoretyczną. Minimalizowanie systemu najczęściej występuje przy realizacji nurkowań ekstremalnych, które są prowadzone w celu ustanowienia jakiegoś rekordu. W tych warunkach najczęściej zakłada się jedynie nieznaczne wzbogacenie systemu w minimalne środki bezpieczeństwa lub redundancję⁷ niektórych elementów tego systemu⁸. Przyjęte elementy wychodzące poza minimalną strukturę systemu pozwalającego na realizację celu procesu nurkowania wynikają z analizy ryzyka i studium wykonalności.

Obrazowo można dobór minimalnej struktury systemu nurkowego prześledzić na opisywanym w historycznych książkach podręczniczych przykładzie nurkowań realizowanych przez poławiaczy gąbek.

Minimalny system potrzebny do realizacji procesu nurkowania składa się jedynie z przeszkolonego nurka. Element systemu szkolenia nurka można podzielić na dwa podsystemy: nauki pływania i nauki nurkowania z zatrzymanym oddechem. Ze studium wykonalności wynika jednak, że wyszkolony nurek będzie pracował efektywniej jeśli będzie wyposażony w nóż do odcinania gąbek, który zgodnie z analizą ryzyka może także posłużyć do wparcia ochrony nurka. Jeśli nurek jest dobrze wyszkolony i potrafi z zamkniętym oddechem wytrzymać dłuższą chwilę to z analizy efektywności dla procesu nurkowania w celu poławiania gąbek wynika, że należy dodatkowo wyposażać go w przytracaną siatkę do zbierania gąbek.

Ze studium wykonalności wynika, że gąbki raczej nie rosną blisko brzegu a efektywność pływania daleko od brzegu wpływ jest raczej nie do zaakceptowania, należy zatem wyposażać nurka w możliwość przemieszczania się łodzią. Skupiając się jedynie na systemie nurkowym należy łódź uznać za element otoczenia systemowego czyli kontekstu, który otacza rozpatrywany system nurkowy. Należy tutaj zauważyć, że w kontekście istnieją także inne elementy, które nie pozostają bez wpływu na rozpatrywany system nurkowań w celu poławiania gąbek, które powinny być brane pod uwagę przy studium wykonalności, jak: zapotrzebowanie rynkowe czy zagrożenie atakiem rekinów.

Późniejsze różnorodne analizy ryzyka, technicznej wykonalności czy ekonomicznej opłacalności, mogą dotyczyć zastosowania pompy lub kompresora powietrza, systemu podawania powietrza z systemem filtracji bądź bez niej, zastosowania reduktora zapotrzebowania lub nie, użycia maski, płetw aż do systemu ochrony zdrowia, ubezpieczenia społecznego czy emerytalnego. W taki sposób zdefiniowanie realizowanego celu przez ustanowiony proces może posłużyć do zdefiniowania struktury podtrzymującego go systemu z uwzględnieniem wpływu otoczenia na system i wpływu systemu na otoczenie.

Dla zaproponowanego tutaj podziału, rozgraniczenie pomiędzy wymienionymi rodzajami nurkowań polega właśnie na określeniu różnych celów ich prowadzenia. Nurkowania ekstremalne prowadzone są najczęściej w celu bicia rekordów, lecz mogą wystąpić jako element akcji ratowniczej, czy naprędcie zmienionego scenariusza taktycznego dla sytuacji bojowej. Typowe nurkowania ekstremalne mogą polegać na zaliczeniu na bezdechu maksymalnej głębokości przy wciąganiu nurka przez ciężar lub osiągnięcia głębokości własnymi siłami przy użyciu płetw po wstępnym wepchnięciu na pewną głębokość przez drugiego nurka, bądź osiągnięciu jej samodzielnie. Nurkowania sportowe prowadzone są w celu rywalizacji. Przykładowo, mistrzostwa w łowiectwie podwodnym wcześniej polegały na łowieniu ryb w określonym czasie a obecnie stanowią najczęściej zawody fotograficzne. Nurkowania rekreacyjne prowadzone są dla przyjemności. Nurkowania techniczne zrodziły się z chęci wykorzystania specjalnego, skomplikowanego wyposażenia do prowadzenia nurkowań. Często są one realizowane, podobnie jak nurkowania ekstremalne do bicia rekordów głębokości, czasu pobytu pod wodą, czy prowadzenia eksploracji niektórych zakątków, jak wraki czy jaskinie. Nurkowania zawodowe polegają na wykorzystaniu różnego uzbrojenia technicznego do

prowadzenia komercyjnych prac podwodnych. Specyficznym rodzajem nurkowania zawodowego jest nurkowanie prowadzone w celu ratowania życia. Ratowanie mienia mieści się w typowym komercyjnym nurkowaniu zawodowym. Nurkowania w celu ratowania życia charakteryzują się inną dynamiką i determinacją niż inne typy nurkowania. Używane są też inne procedury i dodatkowe wyposażenie dla poszkodowanych. Nurkowania techniczne wyłoniły się z nurkowań wojskowych, lecz ich cel jest niemilitarny. Cele prowadzenia nurkowań wojskowych mogą być różnorakie, przykładowo w nurkowaniach bojowych cele są zazwyczaj inne niż przy nurkowaniach przeciwiwminowych MCM⁹.

Zgodnie z celem procesu nurkowania stosuje się różne podejścia do budowy systemu zapewniającego niezakłócony, efektywny i bezpieczny przebieg tego procesu. Podczas prowadzenia prac podwodnych zarówno nurkowie, jak i kierownicy nurkowań wolą przeprowadzać dekompresję według reżimów o niskim poziomie ryzyka¹⁰, dlatego do programów dekompresyjnych wprowadzono funkcję konserwatywności wykorzystującą, np. metodę prowadzenia obliczeń dla zawyżonych w stosunku do rzeczywistych zawartości gazów obojętnych, zawyżonej głębokości w stosunku do rzeczywistej, przyjmując dłuższy od rzeczywistego czas pobytu na głębokości czy stosując asymetryczny model dla nasycania/odsycania tkanek teoretycznych¹¹.

Niektóre programy wykorzystują więcej niż jeden z wymienionych sposobów lub ich kombinację celem zwiększenia bezpieczeństwa dekompresji. Takie sposoby postępowania nazywane są metodami konserwatywnymi lub po prostu konserwatywnością¹². Wielkość konserwatywności jest często określana poprzez podanie o ile dłuższy i głębszy ma być przyjęty profil dekompresji w stosunku do rzeczywistego. Czasami można spotkać określenie konserwatywności wyrażone liczbowo, np.: w procentach odnoszonych do gradientu przesyceń¹³. Technologie nurkowe mogą być dzielone ze względu na konserwatywność.

Przy nurkowaniach ekstremalnych technologię nurkowania dobiera się indywidualnie do nurka. Najczęściej pojęcie konserwatywności dla tego typu nurkowań nie występuje, gdyż typowym postępowaniem jest przekraczanie typowych granic bezpieczeństwa, do których odnosi się konserwatywność. Zaistnienie wypadku nurkowego jest wkalkulowane w cel nurkowań ekstremalnych a zabezpieczenie związane jest z rozwinięciem systemów leczenia możliwie blisko miejsca organizacji nurkowań ekstremalnych.

W nurkowaniach technicznych często technologia jest dedykowana do zadania i do aktualnego stanu wytrenowania nurka. Często technologia, a zwłaszcza rozkłady dekompresji, są dobierane do aktualnego przebiegu nurkowania przez komputerowe systemy wspomagające proces nurkowania, przy uwzględnieniu zmian nie tylko głębokości i czasu pobytu, lecz także zmian temperatury, zużycia gazu czy zmiany nastaw poziomu konserwatywności. Nurkowania techniczne nie przekraczają granicy zerowego konserwatywności, jak to ma miejsce w nurkowaniach ekstremalnych. Odłamię nurkowania technicznego może być nurkowanie naukowe prowadzone w celu poznania środowiska wodnego, zarówno ożywionego jak i nieożywionego. Ze względu na fakt nurkowania naukowców, także zaawansowanych wiekiem, konserwatywność jest dla nich dobierana indywidualnie na zawyżonym poziomie.

Przy nurkowaniach sportowych poziom konserwatywności przewyższa typowy poziom 30% konserwatywności stanowiący granicę dla nurkowań z bezpieczną, lecz forsowną dekompresją. Jest on świadomie uzgadniany i identyczny dla wszystkich uczestników nurkowania. Różnice tkwią w sposobie przygotowania do procesu nurkowania sportowego, który stanowi skrywany handicap poszczególnych zawodników.

Dla nurkowań rekreacyjnych poziom konserwatywności jest dobierany w taki sposób, aby zagrożenie chorobami nurkowymi DCI¹⁴ było niższe niż 1% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla całej populacji dopuszczonych do nurkowania poprzez sprawdzenie wypełnienia standardów medycznych [2]. Odłamię nurkowania rekreacyjnego jest nurkowanie rehabilitacyjne, rzadziej uprawiane w formie rehabilitacji medycznej¹⁵, częściej w formie rehabilitacji społecznej¹⁶.

W nurkowaniach zawodowych standardy medyczne są zazwyczaj bardziej rozwinięte i rygorystyczne niż w nurkowaniach rekreacyjnych. Konserwatywność często ustalany jest na tym samym poziomie jak dla nurkowań rekreacyjnych, lecz nie dotyczy on już całej populacji mogącej nurkować, lecz wybranej, spełniającej wyższe wymagania niż przeciętny obywatel populacji nurków zawodowych. Jeśli przy nurkowaniach zawodowych zagrożenie chorobami nurkowymi DCI jest wyższe niż 1% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych, to podobnie jak przy normalnych procedurach ochrony pracy nurkowie muszą wyrazić na odstępstwa świadomą zgodę a ponoszone ryzyko powinno być skompensowane zarówno w sposobie ochrony zdrowia jak i gratyfikacji finansowej.

Nurkowania ratownicze charakteryzują się nie tyle zwiększeniem zagrożenia wystąpieniem objawów chorób nurkowych DCI co zagrożenia wypadkiem technicznym na skutek awarii wykorzystywanego sprzętu¹⁷. Zwiększenie zagrożenia DCI jest dozwolone jedynie przy bezpośrednim ratowaniu życia ludzkiego¹⁸. Stąd najczęściej w akcji ratowniczej konserwatywność utrzymywany jest na poziomie typowym dla nurkowań zawodowych. Dotyczy to oczywiście grupy ściśle dobranych i trenowanych nurków zabezpieczanych przez specjalistów różnych dziedzin, potrzebnych w akcji ratowniczej.

Nurkowania wojskowe charakteryzują się różnym poziomem zagrożenia możliwością wystąpienia chorób nurkowych DCI. Dla nurkowań EOD¹⁹ stosuje się najczęściej takie same zasady jak dla nurkowań ratowniczych. Przy nurkowaniach MCM, zależnie od wagi misji, możliwe jest zaaprobowanie zagrożenia możliwością wystąpienia objawów chorób nurkowych DCI od poziomu nurkowań EOD do misji bojowych SRT²⁰ dla których typowe zagrożenie DCI jest określane na poziomie²¹ 5% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych²².

Widać stąd, że wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. Inne technologie można kupić. Nawet przy nurkowaniach technicznych szersza, lecz dostępna wiedza jest wystarczająca do spracowania decyzji o podejmowanym ryzyku, na które pozwala zastosowany algorytm zaszyty w pamięci komputerów do wspomaganie podejmowania decyzji o zastosowanym procesie dekompresji.

Realizowany projekt dotyczy technologii nurkowań MCM z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA, realizowanych w szerokim zakresie głębokości, jako elementu systemu wojny minowej. Nurkowania powinny być prowadzone od powierzchni do ok. 80 mH₂O a do pokrycia różnych zakresów głębokości wykorzystywany będzie tlen do dekompresji oraz różne mieszaniny azotowo-tlenowe, do



głębokości²³ 50 mH₂O, zaś głębiej mieszaniny na bazie helu²⁴. Szczególnie istotnym wydaje się kontekst wykorzystania technologii nurkowych jako elementów systemu wojny minowej. Należy dążyć do tego aby konserwatyzm technologii był możliwie efektywny i stwarzał zagrożenie w granicach²⁵ (1;3)% w rozumieniu szacowania go, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych.

KONTEKST FIZJOLOGICZNY

Podstawowe wymagania dotyczące prowadzenia operacji nurkowych wykonywanych w niezależnych aparatach nurkowych wynikają z zagrożenia chorobą dekompresyjną DCS²⁶ oraz toksycznością tlenową²⁷ CNSyn.

Wśród podstawowych parametrów dekompresyjnych można wyróżnić następujące założenia do ekspozycji:

- maksymalna, planowana głębokość ekspozycji hiperbarycznej,
- czas ekspozycji na maksymalnej głębokości,
- użyty czynnik oddechowy,
- predyspozycja nurka do przechodzenia ekspozycji hiperbarycznej,

Nie zawsze nurkowanie planowane jest z pobytem na jednej głębokości ekspozycji hiperbarycznej H . Najczęściej głębokość H stanowi skomplikowaną zależność funkcyjną od czasu ekspozycji t : $H = f(t)$. Jednak często, bez szkody dla efektywnego planowania dekompresji, zależność $H = f(t)$ daje się przybliżyć parą parametrów: maksymalną głębokością ekspozycji H_{\max} i czasem pobytu na maksymalnej głębokości $t(H_{\max})$. Niezwykle ważnym parametrem do planowania skutecznej, bezpiecznej ekspozycji i efektywnej dekompresji jest ciśnienie cząstkowe tlenu p_i , które najczęściej jest funkcją czasu ekspozycji i dekompresji: $p_i = f(t)$. W czasie zanurzenia i pobytu na dnie, najczęściej wykorzystywana jest jedna mieszanina operacyjna zasilająca aparat nurkowy, lecz zależnie od jego konstrukcji może on utrzymywać ciśnienie cząstkowe tlenu p_i w węższych lub nawet bardzo szerokich granicach.

Planowanie wykonywania długotrwałej pracy ciężkiej w operacjach nurkowych poza strefą saturacji jest kłopotliwe, ze względu na brak możliwości zaprojektowania adekwatnej dekompresji [3]. Ciężka praca uruchamia konieczność adekwatnej odpowiedzi organizmu nurka. Najczęściej odpowiedzią jest włączenie przemian anaerobowych powodujących powstawanie kwasu mlekowego w mięśniach, który zakwaszając krew powoduje spadek efektywności transportu tlenu przez hemoglobinę [4].

Efekty te różnią się osobniczo θ a dla tego samego osobnika silnie zależą od aktualnego wytrenowania $\theta_i = f(t)$, przygotowania²⁸ czy nawet nastawienia do nurkowania. Trudno niektóre parametry osobnicze uwzględnić przy planowaniu adekwatnej dekompresji w odniesieniu do populacji. Przy nurkowaniach saturowanych przeznacza się czas na stabilizację przed procesem dekompresji. Czas ten zależy od typu wykonanych wcześniej prac i może wynieść nawet 2 dni.

Jak wspomniano, przy uproszczonym podejściu do procesu planowania dekompresji wykorzystuje się dwa parametry: osiągniętą głębokość maksymalną ekspozycji H_{\max} i czas ekspozycji na maksymalnej głębokości $t(H_{\max})$, liczony od momentu rozpoczęcia zanurzenia do rozpoczęcia procesu dekompresji. Maksymalna głębokość ekspozycji H_{\max} może być osiągnięta choćby przez chwilę²⁹ a rozpoczęcie procesu dekompresji liczone jest od chwili, gdy ciśnienie już tylko może się zmniejszać z wyjątkiem wymaganych postojów na stacjach dekompresyjnych. Jeśli postoje na stacjach dekompresyjnych ulegną wydłużeniu może ulec zmianie także plan dalszej dekompresji. Ten sposób planowania procesu dekompresji opiera się na procedurze doboru metodą najgorszych okoliczności. Takie postępowanie zwiększa konserwatyzm przyjętego postępowania dekompresyjnego w sposób zmienny, zależnie od warunków nurkowania i sposobu podejścia kierownika nurkowania do planowania dekompresji. Należy zwrócić uwagę, że nieuzasadnione nadmierne zwiększanie konserwatyizmu może spowodować nieefektywność procesu nurkowania ze względu na znacznie przewymiarowany czas procesu dekompresji. Zgodnie z tradycją Marynarki Wojennej RP projekt opierał się o dobór procesu dekompresji metodą najgorszych okoliczności.

Procesy dekompresji i kompresji mogą przebiegać też w warunkach stałego ciśnienia przy zmianie składu czynnika oddechowego [3]. Izobaryczne procesy dekompresji towarzyszą dekompresji tlenowej. Zastąpienie mieszaniny gazowej czystym tlenem powoduje wymywanie gazów inertnych przez tlen z tkanek. Tlen jest usuwany z organizmu, przede wszystkim na drodze metabolicznej konsumpcji. Zjawisko izobarycznej dekompresji zachodzi na tlenowych stacjach dekompresyjnych. Ze względu na swą toksyczność tlen może być zastosowany jedynie na stosunkowo płytkich stacjach dekompresyjnych. Na świecie uważa się, że dekompresję tlenową można rozpocząć od głębokości 12 mH₂O.

W Marynarce Wojennej RP istnieją długie tradycje zastosowania dekompresji tlenowej już od 15 mH₂O, jednak ze względu na zachowanie interoperacyjności w nurkowaniach przy wykorzystaniu SCR CRABE SCUBA dekompresja tlenowa została zaplanowana od 12 mH₂O, lecz przepłukanie przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem będzie następowało już od głębokości 15 mH₂O. Dekompresję można akcelerować także przez wykorzystanie mieszanin gazowych wzbogaconych w tlen. Mechanizm jest podobny a wykorzystanie takich mieszanin może rozpocząć się przed przejściem na dekompresję tlenową. Jednak możliwe jest zastosowanie innej mieszaniny niż jedynie wzbogaconej w tlen. Przykładowo zastąpienie Trymiks przez Nitroks³⁰. W takim przypadku nawet przy stałym ciśnieniu zewnętrznym Nitroks będzie wymywał hel z tkanek zastępując go azotem, czyli zamiana czynnika oddechowego będzie powodowała zjawiska dekompresji izobarycznej. Należy jednak zwrócić uwagę, że azot jest znacznie lepiej rozpuszczalny w tkankach zawierających tłuszcz niż hel, dlatego zaplanowanie długiego okresu dekompresji izobarycznej w przypadku zamiany czynnika oddechowego z Trymiks na Nitroks może doprowadzić do wydłużenia procesu dekompresji zamiast akceleracji. Jeśli fakt ten nie zostanie uwzględniony to może dojść do objawów choroby dekompresyjnej DCS. Taki mechanizm choroby dekompresyjnej znany jest jako DCS indukowany procesem kontrdyfuzji [5-7].

Predyspozycja nurka do ekspozycji hiperbarycznej stanowi cały kompleks zagadnień do których można zaliczyć:

- budowę fizyczną,
- stan psychofizyczny przed nurkowaniem,
- budowę mentalną,
- aktualny stan wytrenowania,

- zakres stosowanych zasad higieny itd.

Dawniej budowa fizyczna nurka była podstawowym parametrem dopuszczającym go do służby wojskowej w charakterze nurka lub do pracy w charakterze nurka zawodowego. Wiązało się to z rodzajami skafandrów nurkowych. Za wysoki nurek nie mieścił się w skafandrze, zaś dla niskiego wzrostem nurka zrefowany skafander stwarzał zagrożenie. Przykładowo, pęknięcie pasa kroczonego w skafandrze klasycznym powodowało ucieczkę hełmu i brak możliwości upuszczania powietrza ze skafandra doprowadzając do wyrzucenia nurka na powierzchnię lub zawiśnięcia w toni na zakleszczonym o przeszkody podwodne wężu nurkowym. Obecnie istnieje możliwość wyprodukowania skafandra dopasowanego do nurka. Dawniej wymagana była silna budowa ciała dla nurka klasycznego, gdyż zakładany na powierzchni sprzęt ważył niewiele poniżej 100 kg i wymagana była wystarczająca siła fizyczna do jego nałożenia i wejścia do wody. Obecnie sprzęt i wyposażenie nurka zawodowego jest znacznie lżejsze, choć nadal wymaga niemałej siły fizycznej do jego założenia i poruszania się w nim poza środowiskiem wodnym³¹. Także wykonywanie prac podwodnych, choć realizowane przy wykorzystaniu narzędzi i wsparcia różnego rodzaju sprzętem, wymaga niejednokrotnie angażowania znacznego wysiłku fizycznego tak, że niektóre prace muszą być wykonywane tylko w warunkach saturacji.

Wykorzystanie aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego wymaga pewnych predyspozycji. Wpływające na poziom bezpieczeństwa nurkowania parametry fizjologiczne HF³² oznaczane są tutaj symbolem θ . Dla aparatu nurkowego SCR CRABE SCUBA jest to przede wszystkim moduł oddechowy³³.

Nie zawsze znane są przyczyny występowania niektórych fenomenów³⁴, które powinny stanowić punkt wyjścia do dalszych badań naukowych. Powszechnie uważa się, że nurkowie starsi wymagają bardziej konserwatywnych procedur dekompresyjnych, lecz u całkiem sporego odsetka nurków w wieku powyżej 45 roku życia obserwuje się znaczny wzrost odporności osobniczej na warunki forsownej dekompresji. Zjawisko to zaobserwowano przy monitorowaniu powstawania wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych podczas nurkowań eksperymentalnych, choć już wcześniej obserwowano przypadki odporności osobniczej na trudy dekompresji³⁵. Zjawisko to nie występuje jedynie jako właściwość osobnicza θ , lecz potrafi zmieniać się wraz z aktualnym stanem psychofizycznym³⁶ nurka.

Wpływ nastawienia czy determinacji nie jest obserwowany jedynie przy nurkowaniu. Istnieje wiele wiarygodnych zdarzeń związanych z nastawieniem, jak występowanie u ludzi i zwierząt zjawiska ciąży urojonej. Istnieje pogląd, że nurka buduje w 80% jego budowa mentalna, szczególnie umiejętność efektywnego działania w stresie oraz odporność na wpadanie w stan paniki³⁷. Istnieje także przekonanie o korelacji nastawienia z odpornością na ośrodkową formę toksycznego oddziaływania tlenu CNSyn. Próbowano także forsować pogląd, że głęboka świadomość pochodząca z wiedzy stanowi przyczynek do łatwiejszego wpadania w stany lękowe rozwijające się aż do wybuchu paniki w sytuacji stresowej. Rzeczywiście obserwuje się, że gorzej wykształceni nurkowie wykazują większą odporność lecz, gdy dojdzie do przełamania bariery strachu, to rozwój sytuacji stresowej do wybuchu paniki ma u nich przebieg niezwykle gwałtowny.

Doświadczeni kierownicy nurkowania starają się zdobyć zaufanie nurków, aby stać się ich powiernikami, co ułatwia im ocenę aktualnego stanu psychofizycznego nurka. Przy ocenie tego stanu nie należy lekceważyć żadnych, nawet minimalnych symptomów. Dobrą praktyką jest uzyskanie przez kierownika kontaktu wzrokowego z nurkiem³⁸ podczas przygotowania do nurkowania, przy jednoczesnym badaniu stanu napięcia mięśni, drżenia ciała³⁹ czy oceny akcji serca⁴⁰ itp. Ważne jest sprawdzenie koordynacji ruchowej po nałożeniu sprzętu⁴¹.

Ważne jest wychwycenie symptomów przemęczenia, wczesnych objawów chorobowych, stresogennych itp., gdyż one rzutują w sposób bezpośredni na bezpieczeństwo dekompresji.

Przy powtarzaniu nurkowania ważne jest pozostałe po wcześniejszej dekompresji przesylenie gazami inertnymi⁴² tkanek. Obniżanie wartości ciśnienia, jak podczas lotów samolotami rejsowymi czy śmigłowcami transportowymi, może powodować na tyle poważne zaburzenia równowagi w prężności gazu w tkankach, że może dojść do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS. W projekcie nie zakładano badań nad możliwościami podejmowania nurkowań powtarzalnych⁴³, powtórzeniowych⁴⁴ oraz osiągnięcia stanu równowagi gazowej pomiędzy tkankami i atmosferą oddechową⁴⁵ na powierzchni⁴⁶, lecz podczas postępów prac takie badania mogą zostać przeprowadzone.

Oprócz treningu siłowego, zapewniającego dobrą tężyznę fizyczną, treningu gibkości, zapewniającego dobre rozciągnięcie mięśni⁴⁷, ważny jest trening adaptacyjny. Trening adaptacyjny jest ukierunkowany na przygotowanie nurka do przebywania w warunkach hiperbarycznych i przechodzenia dekompresji. Przyzwyczajanie organizmu poprzez udrożnienie toru wymiany gazowej pomiędzy tkankami i atmosferą oddechową przyczynia się do bezpieczeństwa nurkowania. W projekcie istotne będzie określenie zakresu takiego treningu oraz wytycznych do treningu siłowego czy gibkości.

Higiena życia i pracy nurka jest pojęciem szerokim, jak wspomniane już komplikacje wynikłe na skutek podejmowania forsownego wysiłku przed nurkowaniem. Ważnym elementem jest przechodzenie planowych treningów siłowych, wytrzymałościowych, rozciągających czy adaptacyjnych. Ważnym jest wspomniana już dbałość o odpowiedni wypoczynek oraz trening antystresowy. Przy trenowaniu istotna jest odpowiednio zbilansowana dieta ograniczająca możliwość odkładania się tkanki tłuszczowej, lecz zapewniająca odpowiedni ładunek energetyczny. Ważne jest dostarczanie odpowiednich mikroelementów oraz witamin w formie raczej naturalnej niż w postaci suplementów diety. Suplementy diety czy leki mogą powodować wtrącenia jąder kondensacji do krwi i przez to zwiększyć podatność na łatwiejsze tworzenie się wolnej fazy gazowej podczas dekompresji. Rozwiązania dotyczące tej problematyki nie będą jednak stanowiły celów cząstkowych projektu i muszą być rozwiązane w ramach innych działań.

Do podstawowych wariantów założeń dekompresyjnych można zaliczyć:

- wysiłek,
- komfort cieplny.

Zawsze należy liczyć się z możliwością wydatkowania dodatkowej, nieprzewidzianej pracy, przykładowo związanej ze zmianą sytuacji hydrologicznej wymuszającej pracę przeciwko prądowi wody. Dodatkowo wydatkowany wysiłek może doprowadzić do zachwiania komfortu cieplnego. Przykładowo, jeśli nurkowie przygotowali się do wydatkowania wysiłku lekkiego w zimnej wodzie ubierając odpowiednio dobrane ocieplacze, to w warunkach wydatkowania wysiłku mogą ulec przegrzaniu. Komfort cieplny można także utracić przekraczając granicę termokliny⁴⁸ czy w skutek wydłużenia pobytu pod wodą. Wcześniej wykonywany wysiłek, brak snu, lekkie infekcje, wcześniejsze przemarznięcie, przegrzanie czy przewianie są



niejednokrotnie przyczyną szybszego wychłodzenia nurka. Do przegrzania najczęściej dochodzi przed nurkowaniem⁴⁹, co później skutkuje szybszym wyziębianiem pod wodą. Dotyczyć to może przygotowanego do zanurzenia nurka zabezpieczającego oczekującego na stanowisku wyczekiwania, dlatego należy zwrócić uwagę na jego ochronę przed przegrzaniem, gdyż podczas akcji ratunkowej może okazać się na tyle wyczerpany, że będzie jedynie pogłębiał zagrożenie.

Mechanizm wpływu nadmiernego, długiego wysiłku podczas nurkowania czy przed nurkowaniem na dekompresję został zasygnalizowany już wcześniej. Komfort cieplny ma także niebagatelny wpływ na bezpieczeństwo dekompresji. Podczas dekompresji utrzymywany jest stan przesylenia gazami w metastabilnej równowadze. Każda zmiana temperatury powoduje zaburzenia tej równowagi. Zarówno, marznięcie podczas nurkowania a przechodzenie dekompresji powierzchniowej w ciepłej komorze dekompresyjnej, jak i przegrzanie podczas nurkowania a przechodzenie dekompresji w warunkach wychładzania powoduje zaburzenia tej równowagi, które mogą prowadzić do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS.

Do podstawowych wariantów prowadzenia dekompresji można zaliczyć:

- reakcję na zanieczyszczenia czynnika oddechowego,
- reakcja na odchylenia od składu czynnika oddechowego,
- akcelerację procesu dekompresji,
- przerwanie procesu dekompresji,
- realizacja dekompresji powierzchniowej i kompensacyjnej,
- kumulowanie czasu dekompresji na stacjach głębszych,
- przedłużenie procesu dekompresji.

Zanieczyszczenie czynnika oddechowego jest zawsze niepożądane. Problemy związane z zanieczyszczeniem czynnika oddechowego zostały opisane wcześniej i nie będą tutaj analizowane [8]. W aparatach regeneracyjnych częstym zagrożeniem jest retencja ditlenku węgla CO₂ oraz pył emitowany przez wypełnienie pochłaniacza. Wydychany ditlenku węgla CO₂ może ulegać kumulacji w przestrzeni oddechowej na skutek złej pracy pochłaniacza spowodowanej jego złą jakością, wyczerpaniem, zjawiskiem kanalikowania nieoczyszczonego czynnika oddechowego przez złożo itp. Należy dążyć do współpracy z dostawcą gwarantującym utrzymanie wymaganej jakości sorbenta.

Oprócz tego, powinna być sprawowana odpowiednia kontrola laboratoryjna nad przechowywanym sorbentem. Zagadnienia te nie będą stanowiły zadań cząstkowych projektu, lecz ustanowione procedury SOP⁵⁰ wynikające z poprzednio prowadzonych prac będą zachowywane i w miarę konieczności rewidowane [9]. Pylenie wapna sodowanego związane jest z jego postacią. Niekiedy jest ono tabletkowane i wyjątkowo odporne na ścieranie i łamanie, innym razem jest luźno formowane w różnego kształtu wytloczki [10].

Wprowadzono także niepyłącą formę gdzie sorbent stabilizowany jest w podłożu z tworzywa sztucznego. Jednak najpopularniejszą formą występującą w sprzedaży jest wapno kruszone i segregowane na sitach. Taka forma jest podatna na pylenie cząstek odłamanych na skutek uderów mechanicznych, przykładowo w transporcie czy w czasie upakowywania pochłaniaczy. Dlatego sorbent powinien być wstępnie odpylany na sitach przed pakowaniem do pochłaniaczy a później pochłaniacz powinien być przedmuchiwać. Podczas transportu przygotowanych aparatów wapno w pochłaniaczu może podlegać wytrząsaniu i w ten sposób kruszeniu. Zjawisku temu towarzyszy nie tylko pylenie, lecz także tworzenie się kanałów umożliwiających przejście regenerowanego czynnika oddechowego przez pochłaniacz bez dostatecznego oczyszczenia. Należy zatem ostrożnie transportować aparaty. Zabezpieczeniem przed pyłem może być moczenie wewnętrznej warstwy węży oddechowych i w ten sposób tworzenie filmu wodnego na powierzchni wewnętrznej węża, do którego przyklejać się mogą pyły emitowane z pochłaniacza. Sorbenty CO₂ są najczęściej mieszaniną silnie żrących wodorotlenków i pyłac mogą powodować mikro poparzenia dróg oddechowych.

Ze względu na możliwość zbrylania, sorbent przechowywany jest w formie przesuszonej, która wykazuje mniejszą wydajność chemisorpcyjną ditlenku węgla CO₂. Dlatego przed użyciem należy go nawilżyć przez wykonanie kilku wydechów do pochłaniacza. Moczenie węży tworzy także środowisko do aktywowania wypełnienia pochłaniacza. Częściowe wyczerpanie sorbentu może nastąpić w skutek przechowywania go w częściowo nieuszczelnionych pojemnikach lub pochłaniaczu. Oprócz tego niedostateczna szczelność aparatu może podczas nurkowania spowodować powstanie silnie żrącego roztworu wodorotlenków, który może spowodować silne poparzenia dróg oddechowych.

Kumulujący się ditlenek węgla CO₂ w cyrkulującym czynnikiem oddechowym powoduje szereg efektów, jak: działanie toksyczne, zwiększenie akcji oddechowej, obkurczenie naczyń krwionośnych⁵¹ na obwodzie ciała, rozkurczenie naczyń krwionośnych w mózgu powodujące zwiększenie mózgowego przepływu krwi przez co wzmacnia wrażliwość na ośrodkową formę toksyczności tlenowej CNSyn [4].

Wpływ generalnej zmiany składu czynnika oddechowego na dekompresję omówiono przy okazji omawiania dekompresji izobarycznej oraz zjawisk kontrdyfuzji. Przy projektowaniu ekspozycji hiperbarycznych, a szczególnie rozkładów dekompresji, niezwykle istotnym jest uwzględnienie istniejących fluktuacji składu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego. Jest to szczególnie istotne dla aparatów o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, gdzie występuje dynamiczne mieszanie się świeżego premiksu ze zregenerowanym czynnikiem oddechowym.

Nawet przy dekompresji tlenowej, nigdy nie zakłada się, że nurek będzie oddychał czystym tlenem. Obecnie można zastosować tlen o wysokiej czystości⁵², gdyż jest on osiągalny za rozsądną cenę, lecz taki gaz daje możliwość realizacji dekompresji w aparatach o otwartym obiegu czynnika oddechowego⁵³. W aparatach nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego występują problemy z efektywną wentylacją przestrzeni oddechowej tlenem oraz płukaniem z organizmu gazów inertnych kumulujących się w obiegu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego. Stąd zagadnienia wentylacji muszą uwzględniać te zjawiska a założenia związane z efektywnością procesu wentylacji muszą być walidowane podczas nurkowań eksperymentalnych. Zagadnienia wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA zarówno premiksem jak i tlenem są problemami kluczowymi dla projektu, dlatego stanowią główną kanwę prowadzonych badań. W projekcie należało wziąć pod rozwagę:

- czas oddychania z aparatu na powierzchni przed rozpoczęciem procesu nurkowania,
- skuteczności płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem podczas procesu zanurzenia,
- wpływ płukania organizmu z gazów obojętnych⁵⁴ na skład czynnika oddechowego wdychanego przez nurka,

- skuteczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem podczas pobytu na dnie⁵⁵,
- skuteczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem przed podjęciem procesu wynurzenia,
- konieczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem na stacjach dekompresyjnych,
- skuteczność procesu wymiany czynnika oddechowego na tlen przed podjęciem dekompresji tlenowej,
- konieczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym tlenem na stacjach dekompresji tlenowej.

Model wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA stanowi główną podstawę planowania bezpiecznych ekspozycji hiperbarycznych i późniejszej dekompresji. Ocena skuteczności procesu wentylacji powinna być kontynuowana podczas treningów na symulatorze hiperbarycznym, gdzie można zebrać wiarogodne dane z procesu nurkowania. Baza danych z takich nurkowań stanowi podstawę do budowania postępu przez wiedzę oraz ważny element monitoringu bezpieczeństwa nurkowania, na którym powinna opierać się okresowa analiza bezpieczeństwa prowadzenia operacji nurkowych. Skuteczność płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego stanowi ważny element oceny wyszkolenia nurków. Umiejętność stosowania procedur płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego powinna być periodycznie sprawdzana podczas obowiązkowych treningów na symulatorze hiperbarycznym.

Najczęściej wykorzystywaną procedurą akceleracji procesu dekompresji jest dekompresja tlenowa. Powszechnie uważa się, że akceleracja taka stanowi 2,5-krotne skrócenie czasu dekompresji przy zastosowaniu mieszaniny operacyjnej [11-12]. Ze względów bezpieczeństwa parametr ten powinien być uściślony dla konkretnego przypadku jego wykorzystania lub zaokrąglony celem uproszczenia systemu⁵⁶. Jednak zaokrąglanie prowadzi do mniej efektywnych⁵⁷ rozkładów dekompresji, stąd może istnieć potrzeba generacji dwóch, bądź większej liczby tabel, przykładowo: szkolnych, treningowych, bojowych wykorzystywanych na ćwiczeniach, bojowych wykorzystywanych w czasie działań wojennych, ekstremalnych wykorzystywanych w operacjach antyterrorystycznych itd., różniących się zagrożeniem wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS czy ośrodkowej formy zatrucia tlenowego CNSyn.

Akceleracja dekompresji może dotyczyć sytuacji awaryjnych, jak konieczność pominięcia niektórych stacji dekompresyjnych w przypadku wystąpienia urazów czy utracie czynnika oddechowego. Takie postępowanie musi być połączone z przygotowanym wcześniej odpowiednim działaniem kompensacyjnym.

Dekompresja kompensacyjna może polegać na ekspozycji tlenowej w warunkach normobarycznych lub hiperbarycznych, jak podczas stosowania procedury dekompresji powierzchniowej⁵⁸. Dalsze rozwinięcie tej problematyki oraz kumulowanie czasu dekompresji na stacjach głębszych będzie omówione jako kontekst realizacji procesu dekompresji.

Ze względu na podniesienie bezpieczeństwa, tradycyjnie w Marynarce Wojennej RP przyjmuje się kilka scenariuszy, dla których przedłuża się proces dekompresji⁵⁹ w przypadku:

- wykonywania przez nurka ciężkiej pracy pod wodą,
- zmarznięcia nurka podczas nurkowania i dekompresji,
- gdy nurkowanie jest jednym w serii nurkowań,
- gdy nurek jest niewytrenowany lub posiada osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową DCS,
- otyłości lub gdy masa nurka przekracza 80 kg.,
- gdy nurek jest w wieku powyżej 40 lat.

Jeżeli zostanie zdiagnozowane jedno z powyższych utrudnień podnosi się konserwatywność podejścia do procesu dekompresji poprzez zastosowanie dekompresji wydłużonej. Dekompresja wydłużona polega na przyjęciu następnego, dłuższego czasu nurkowania z tabeli dla tej samej głębokości⁶⁰. Jeżeli zajdą dwie z wymienionych okoliczności zwiększa się czas nurkowania poprzez przejście o dwie linijki niżej. Przy zaistnieniu większej liczby przypadków utrudniających nie uwzględnia się ich i postępuje tak, jakby zaistniały tylko dwa utrudnienia. Zatem dwie ostatnie linijki dozwolonych czasów pobytu na dnie, dla każdej głębokości występującej w tabeli dekompresyjnej, pełnią rolę czasów awaryjnych stosowanych wyłącznie w procedurze dekompresji wydłużonej. Zwraca się uwagę także na inne czynniki wpływające na zwiększenie zagrożenia możliwością wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej DCS – tab. 1.

Zadaniem projektu było opracowanie technologii nurkowań punktowych. Takie podejście wymaga zarówno opracowania technologii nurkowań z planowanym wysiłkiem⁶¹, stwarzającym potencjalne zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS, oraz technologii uwzględniającej brak wykonywania dodatkowej pracy przez nurka, gdzie głównym problemem jest zagrożenie możliwością wystąpienia objawów ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn.

Tab. 1

Ważniejsze czynniki mogące powodować wypadki dekompresyjne.

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 czynniku 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.



Ważniejsze czynniki mogące powodować wypadki dekompresyjne.

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.

- 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, witaminizowaną 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 witamin, 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 i 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.

KONTEKST ORGANIZACYJNY

W Marynarce Wojennej RP, przy realizacji niezależnych nurkowań w środowisku morskim, dla klasycznej dekompresji zaprojektowanej ze stacjami dekompresyjnymi co 3 mH₂O, technologia nurkowania powinna zapewniać proces dekompresji awaryjnej z możliwością odbycia ostatniej stacji dekompresyjnej na głębokości 6 mH₂O. Postępowanie takie może być przydatne przy zmianie wysokości fal w rejonie nurkowania lub podczas planowania nurkowania przy podwyższonym zafalowaniu rejonu. W takiej sytuacji możliwość utrzymania się nurka na głębokości stacji 3 mH₂O jest problematyczna. Ze względów organizacyjnych najlepiej przyjąć, że czas realizacji takiego procesu dekompresji awaryjnej powinien być taki sam jak dla dekompresji zasadniczej a pobyt na stacji 6 mH₂O powinien stanowić sumę czasu pobytu na stacji 3 mH₂O i 6 mH₂O.

W Marynarce Wojennej RP tradycyjnie wymaga się aby system dekompresji pozwalał na realizację procesu kompensacji utrudnionych warunków przechodzenia dekompresji, umożliwiał zastosowania dekompresji powierzchniowej, przewidywał zastosowanie dekompresji kompensacyjnej itp. System taki powinien składać się z procedur hiperbarycznych, w tym procedur leczniczych, oraz zawierać wymagane uzbrojenie techniczne i medyczne do ich przeprowadzenia. System ten powinien być uzupełniony o podsystem ewakuacji poszkodowanego nurka do specjalistycznego ośrodka hiperbarycznego czy szpitala. Układ elementów systemu zabezpieczenia realizacji procesów leczniczych może być zapożyczony, lub opracowany na nowo i dedykowany specjalnie systemowi prowadzenia prac nurkowych. Ze względu na wykorzystywanie sprzętu niezależnego SCUBA, system tabel rekompresji leczniczej TT⁶² powinien przewidywać procedury lecznicze na wypadek „wyrzucenia” nurka ze znacznych głębokości z pominięciem stacji dekompresyjnych a w skutek tego eksplozywnej dekompresji.

Wykorzystanie aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR i mieszanin o podwyższonej zawartości tlenu wymaga opracowania procesu rekrutacji nurków i utrzymania ich w kondycji. System musi uwzględniać parametry zdrowotne nurków. Tutaj przyjęto, że będą one zgodne z wymaganiami dla nurków wojskowych. Do procesu kwalifikacji można dodać także dodatkowe kryteria⁶³. Przyjęty standard parametrów fizjologicznych nurka stanowi wskazówkę przy opracowaniu procedury realizacji efektywnego procesu dekompresji.

Zagrozenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS przyjęto na wyższym poziomie niż dla nurków rekreacyjnych⁶⁴. System może także zawierać procedury realizacji procesu dekompresji jak dla nurków rekreacyjnych, który będzie wykorzystywany podczas szkolenia i treningów.

Ze względu na fakt opracowania technologii dla procesu nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR powinna ona zawierać opracowane i walidowane skuteczne procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu. Technologia powinna zakładać, że nie będzie potrzeby realizacji procesu przepłukania przestrzeni oddechowej aparatu podczas pobytu na dnie. Zawsze będzie można jednak zastosować skuteczną procedurę płukania przy podejrzeniu utraty kontroli nad składem czynnika oddechowego, którym oddycha nurek. Procedury te podwyższają zawartość tlenu w obiegu stąd powinien być sprawdzony ich wpływ na możliwość wystąpienia ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn.

Ważnym parametrem operacji nurkowej jest możliwość obciążania nurka pracą. Wartość obciążenia pracą jest powiązana z procesem wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu, a także z procesem dekompresji i narastania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn. Przyjęto tutaj obciążenie pracą średnio-ciężką⁶⁵ oraz spoczynek⁶⁶. Nie można także pominąć wpływu ochrony cieplnej nurka na proces dekompresji.

Z analizy ryzyka wynika konieczność stosowania podsystemów awaryjnego oddychania. Systemy awaryjnego oddychania mogą opierać się o możliwość przejścia na oddychanie z integralnego zestawu butlowego z wykorzystaniem redundantnego⁶⁷ systemu oddechowego. Taki proces zabezpiecza przed utratą kontroli nad zasadniczym systemem oddechowym, nie zaś przed utratą zapasu czynnika oddechowego. Z punktu widzenia planowania procesu realizacji ekspozycji i późniejszej dekompresji, zastosowanie awaryjnego systemu oddechowego o innej zasadzie działania niż system zasadniczy powinno uwzględniać zmiany w zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn. Jeśli założy się konieczność opracowania procedur użycia systemów oddechowych niezależnych od używanego aparatu nurkowego⁶⁸ należy także uwzględnić fazę nurkowania, dla której możliwe będzie przejście na dekompresję awaryjną.

Dla zabezpieczenia opisanych procesów zasadniczych i awaryjnych będzie potrzebny minimum⁶⁹ system składający się z:

- procedur kwalifikacji do nurkowania z wykorzystaniem przewidzianego aparatu nurkowego oraz mieszanin oddechowych,
- specjalnie zaprojektowanej i walidowanej procedury dekompresji podstawowej wraz z zasadami obciążania nurka pracą,
- specjalnie zaprojektowanych i walidowanych procedur dekompresji awaryjnej,
- procedury płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego z uwzględnieniem wzrostu zagrożenia możliwością wystąpienia objawów ośrodkowej toksyczności tlenowej CNSyn,
- zapożyczonych lub nowo opracowanych procedur leczniczych na wypadek wystąpienia chorób nurkowych DCI,
- wyposażenia hiperbarycznego i medycznego do zabezpieczenia procesu leczenia chorób nurkowych DCI i innych możliwych przypadków chorobowych,
- podsystemem transportu do ośrodka hiperbarycznego,
- procedury szacowania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn,
- integralnego podsystemu awaryjnego oddychania z aparatu nurkowego,
- awaryjnych aparatów nurkowych,
- podsystemu ochrony cieplnej nurka.

Jeśli zostanie wprowadzone wymaganie akceleracji⁷⁰ podstawowego procesu dekompresji poprzez wykorzystanie tlenu na ostatnich stacjach dekompresyjnych, to system musi zostać dalej rozbudowany nie tylko o walidowaną procedurę dla procesu dekompresji tlenowej, lecz także o elementy wynikające z analizy ryzyka przeprowadzonej dla tego procesu.

Procedura prowadzenia procesu dekompresji będzie wymagała określenia na jakim etapie można przejść bezpiecznie na dekompresję tlenową ze względu na odbytą już ekspozycję i podwyższone ciśnienie cząstkowe tlenu przy uwzględnieniu wynikającego stąd wzrostu zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn.

Niezależnie od momentu czasu i głębokości przejścia na dekompresję tlenową należy poszukiwać efektywnej procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem. Bezpośrednio od jej skuteczności zależeć będzie algorytm akceleracji dekompresji. Oczywiście należy rozpatrzyć sposób powtórnego przejścia w dowolnym momencie z dekompresji tlenowej na dekompresję z wykorzystaniem mieszaniny gazowej⁷¹.

Najlepiej, jeśli przeliczenie czasu dekompresji pomiędzy procesem dekompresji z wykorzystaniem mieszaniny oddechowej oraz tlenu będzie odbywało się według prostej reguły. W takim przypadku wystarczy podać czasy pobytu na stacjach dla zasadniczego rozkładu dekompresji z zastosowaniem dekompresji tlenowej. Awaryjna dekompresja z wykorzystaniem mieszaniny oddechowej będzie stanowić przeliczenie czasów pobytu na stacjach przy oddychaniu tlenem. Zmiana czynnika oddechowego podczas dekompresji będzie wymagała opracowania zasad płukania przestrzeni oddechowej aparatu. Na wypadek awarii zasilania tlenem z aparatu nurkowego można także rozpatrzyć rozbudowanie systemu o zewnętrzne systemy oddychania tlenem⁷².

Wykorzystanie systemu dekompresji tlenowej i awaryjnej dekompresji realizowanej przy oddychaniu cyrkulującą mieszaniną oddechową może się skomplikować, jeżeli nadal będzie utrzymane wymaganie, jak dla systemów morskich, z ostatnią stacją dekompresyjną na 6 mH₂O. Postawienie takiego wymagania dla wszystkich rozkładów dekompresji może spowodować, że proces dekompresji zasadniczej będzie zbyt konserwatywny i z tego powodu nieefektywny z punktu widzenia prowadzenia militarnych operacji nurkowych. W takim przypadku można zrezygnować ze stawiania takiego wymagania procesowi dekompresji awaryjnej i opracować dwa systemy dekompresji, wykorzystywane zależnie od tego czy nurkowanie będzie zabezpieczone w inne źródła zasilania tlenem na wypadek awarii zasilania z integralnego zestawu butlowego aparatu nurkowego czy też nie.

Dla systemów morskich atrakcyjny do wykorzystania wydaje się proces dekompresji powierzchniowej. Realizacja procesu dekompresji powierzchniowej umożliwia dla niektórych stacji dekompresyjnych przerwanie procesu dekompresji

w wodzie, szybkie wynurzenie i dotarcie do komory dekompresyjnej. Następnie sprężenie i odbycie reszty dekompresji już na powierzchni w komorze dekompresyjnej. Taki proces zmniejsza zagrożenie nurka związane z przebywaniem pod wodą, lecz naraża na stres związany z przerwaniem procesu dekompresji. Istnieją dowody na to, że przerwanie dekompresji może trwać do 7 min⁷³. Jest to czas stosunkowo krótki na wynurzenie, dotarcie do komory dekompresyjnej, częściowe rozebranie nurka i powtórne sprężenie. Systemy dekompresji powierzchniowej, jako zasadnicze procedury realizacji procesu dekompresji, stosowane są przy nurkowaniach przewodowych, realizowanych z platformy nawodnej wyposażonej w komorę dekompresyjną⁷⁴. Dla nurków niezależnych takie procedury pełnią jedynie funkcje awaryjne.

System prowadzenia prac podwodnych może nie przewidywać możliwości prowadzenia nurkowań powtarzalnych, powinien jednak normować czas odpoczynku jaki powinien upłynąć do powtórnego nurkowania.

KONTEKST SPRZĘTOWY

Do zasilania aparatów nurkowych o otwartym obiegu czynnika oddechowego najczęściej wykorzystywany jest premix, którym napełnione są butle zasilające regulator zapotrzebowania, choć możliwe są konstrukcje wytwarzające czynnik oddechowy podczas procesu nurkowania z komponentów gazowych⁷⁵. Do pomyslenia jest konstrukcja aparatu o otwartym obiegu czynnika oddechowego zasilanego powietrzem i tlenem dopasowująca zawartość tlenu x_i w komponowanej dynamicznie mieszance powietrzno-tlenowej zależnie od głębokości nurkowania H , podobnie jak dla aparatów o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, przykładowo w polskim SCR KSZYK SCUBA [13]. W takim przypadku należałoby znać funkcję realizującą algorytm mieszania gazów z komponentów $x_i = f(H)$ i na podstawie zawartości tlenu x_i ocenić jego ciśnienie cząstkowe p_i oraz ciśnienia cząstkowe innych gazów ($p_1..p_n$). Ciśnienie cząstkowe tlenu p_i i innych gazów ($p_1..p_n$) stanowi podstawę do szacowania dekompresji, ekspozycji na różne formy zatrucia tlenowego oraz toksycznego oddziaływania gazów⁷⁶.

Sytuacja ulegnie komplikacji, jeśli w procesie nurkowania będą zmieniane rodzaje czynników oddechowych⁷⁷. Wtedy należy uwzględnić możliwość wystąpienia zjawiska kontrdyfuzji, także izobarycznej. Zarówno skład czynnika oddechowego ($x_1..x_n, x_i$), jak i ciśnienia cząstkowe⁷⁸ komponentów czynnika oddechowego ($p_1..p_n, p_i$), dla różnych typów aparatów nurkowych mogą być skomplikowanymi funkcjami głębokości H : ($x_1..x_n, x_i$) = $f(H)$, ($p_1..p_n, p_i$) = $f(H)$.

Aparaty o otwartym obiegu czynnika oddechowego dostosowują się do akcji oddechowej nurka, stąd ograniczenia związane z obciążeniem pracą W są związane z wytrenowaniem nurka i oporami stawianymi przez system oddechowy aparatu. Nie należy jednak planować wykonywania w nich wysiłku ciężkiego⁷⁹ podczas nurkowań niezależnych i przewodowych poza strefą saturacji z powodów podanych powyżej.

W aparatach o zamkniętym obiegu czynnika oddechowego, poza utrzymaniem składu czynnika oddechowego ($x_1..x_n, x_i$) = $f(H, t)$ w funkcji głębokości H i czasu t , ważnym jest wiarygodność algorytmu utrzymania ciśnień cząstkowych gazów komponentów czynnika oddechowego ($p_1..p_n, p_i$) \cong idem w reakcji na wymuszenia. Przykładowo, na zmiany konsumpcji tlenu na skutek zmiany obciążenia pracą W wymuszające najczęściej⁸⁰ zmiany strumienia tlenu \dot{V}_i dozowanego do obiegu oddechowego: $\dot{V}_i = f(\dot{v})$.

Aparaty tego typu projektowane są tak, aby oszczędnie gospodarować zasobami czynnika oddechowego, stąd muszą w umiarkowany sposób realizować reakcję na wymuszenia. W przeciwnym razie, drobne wahania w zakresie utrzymania się na określonej głębokości $\uparrow H \downarrow$ mogłyby spowodować nieuzasadnioną utratę czynnika oddechowego. Stąd odstępstwa od stanu stabilnego zawartości tlenu $x_i \neq$ idem, przykładowo przy szybkich zmianach obciążenia pracą⁸¹ W , mogą powodować rozchwianie algorytmu utrzymywania składu wdychanego czynnika oddechowego $\uparrow (x_1..x_n, x_i) \downarrow$ tak, że będzie on stwarzał dodatkowe zagrożenie. Algorytm realizowany w aparatach o zamkniętym obiegu czynnika oddechowego doskonale sprawdza się przy wydatkowanym stałym wysiłku lekkim. Stąd nawet przy wykorzystaniu bojowych aparatów tlenowych zakłada raczej planowanie niewielkiej szybkości przemieszczania się podczas misji bojowej. Planowany wysiłek powinien być względnie stały, zarówno oparty o czysto mechaniczne czy sterowane elektronicznie mechatroniczne aktulatory⁸², aby system uzupełniania ubytków tlenu $x_i = f(\dot{v}, H)$ czy czynnika oddechowego ($x_1..x_n$) = $f(H)$, był w stanie prawidłowo odczytać sytuację i odpowiedzieć adekwatnym działaniem.

W półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego świeży czynnik oddechowy miesza się dynamicznie ze zregenerowanym. Ustalenie funkcji ($x_1..x_n, x_i$) = $f(\dot{v}, H, t)$ składu ($x_1..x_n, x_i$) czynnika oddechowego wdychanego przez nurka w zależności od konsumpcji tlenu \dot{v} , głębokości H i czasu ekspozycji t stanowi podstawowy problem przy planowaniu bezpiecznej ekspozycji hiperbarycznej oraz późniejszej dekompresji. Najczęściej aparaty takie realizują predefiniowaną funkcję uzyskiwania składu czynnika oddechowego ($x_1..x_n, x_i$) = $f(\dot{v}, H)$ na drodze mechanicznej⁸³.

Predefiniowanie algorytmu utrzymania stałego, założonego składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka ($x_1..x_n, x_i$) = $f(\dot{v}, H) = \text{const}$ wymaga poczynienia założeń dotyczących parametrów osobniczych nurka θ oraz dozwolonych zakresów tolerancji dla odchylenia od tych wartości $\Delta\theta$. Późniejszy dobór nurków wymaga sprawdzenia wypełnienia poczynionych założeń leżących podstaw projektowania algorytmu utrzymania założonego składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka ($x_1..x_n, x_i$) = $f(\dot{v}, H)$. Założone parametry osobnicze θ nie zawsze muszą być spełnione przez nurka, zwłaszcza gdy zachodzą takie fenomeny jak: sportowa wagotonia⁸⁴, bradykardia⁸⁵, znaczna rozbudowa tkanki mięśniowej, nadwaga, niedowaga itp. Stąd nurkowie powinni być wstępnie klasyfikowani do nurkowań przy wykorzystaniu aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego ze względu na spełnienie założonych parametrów osobniczych θ przy konstruowaniu aparatu oraz technologii nurkowania.

Parametry osobnicze nurka θ ulegają zmianie wraz z wiekiem nurka i stopniem jego przygotowania/wytrenowania. Coroczne przesiewowe badania lekarskie nie skupiają się na tych zmianach. Ich zadaniem jest sprawdzenie ogólnego stanu zdrowia nie zaś poziomu wytrenowania czy spełnienia parametrów osobniczych θ leżących u podstaw bezpiecznego wykorzystania aparatów nurkowych. Stąd jednorazowe dopuszczenie do nurkowania przy wykorzystaniu specjalnych aparatów nurkowych może stracić sens wraz ze starzeniem się nurka lub aktualnym stanem jego wytrenowania⁸⁶. Wydaje się dobrą praktyką sprawdzanie kluczowych dla bezpieczeństwa parametrów osobniczych nurka θ podczas każdego szkolenia na

wyższe uprawnienia nurkowe.

W procesie analizy bezpieczeństwa nurkowania w Marynarce Wojennej RP kluczowe jest odpowiednie przygotowanie kondycyjne, wydolnościowe i dekompresyjne nurka, gdyż parametry osobnicze nurka θ ulegają czasami znacznym fluktuacjom w skutek treningu adaptacyjnego lub jego zaniechania. Kontrola parametrów osobniczych nurka θ możliwa jest podczas obowiązkowych treningów, gdy odbywają się one przy wykorzystaniu wysiłkowych symulatorów hiperbarycznych, najlepiej hiperbarycznych symulatorów pływania⁸⁷, stanowiąc element zapobiegania sytuacjom potencjalnie niebezpiecznym.

Poziom bezpieczeństwa nurkowania ściśle zależy od zagrożenia stwarzanego przez wykorzystywany sprzęt, wyposażenie i technologie⁸⁸.

Przytoczony projekt skupia się na elemencie wyposażenia nurka jaki stanowi aparat nurkowy typu SCR CRABE SCUBA i wynikającym stąd zagrożeniem chorobą ciśnieniową DCS oraz ośrodkową formą toksyczności tlenowej CNSyn, w kontekście taktycznym wojny minowej MCM. Ważnymi elementami systemu jest wyposażenie nurkowe, jak dodatkowe systemy awaryjne XBS⁸⁹, skafandry nurkowe⁹⁰, analizatory gazowe⁹¹, dekompresjometri itp.

KONTEKST TAKTYCZNY

W nurkowaniach wojskowych dominującą rolę odgrywa wykorzystanie sprzętu i wyposażenia nurkowego jako elementów strukturalnych systemu zapewniającego realizację procesów wynikających z przyjęcia określonej taktyki⁹². W rozumieniu zadań opisywanego projektu, nurkowania stanowią element systemu służący procesom zapewnienia ochrony sił własnych oraz bezpieczeństwa publicznego, które można podzielić na trzy podsystemy: MCM⁹³, EOD⁹⁴ oraz IED⁹⁵.

Działania MCM są procesami realizowanymi w systemie wojny minowej. Elementami systemu wojny minowej są specjalizowane jednostki pływające, dzielone tradycyjnie na: mine sweepers i mine hunters, lecz obecnie ten podział uległ zatarciu i można przyjąć, że w nowoczesnych marynarkach wojennych istnieje jedna klasa okrętu wojny minowej MCMV⁹⁶. Do pierwszych zalicza się tradycyjne trałowce, które przechodząc nad polem minowym ciągną za sobą trały symulujące pola fizyczne okrętów wymuszając eksplozje miny lub podcięcie miny kotwicznej i rozstrzelanie jej na powierzchni. Drugi typ jednostek pływających rozwinął się do MCMV i stanowi wszechstronnie wyposażony okręt do realizacji procesów poszukiwania i neutralizacji min, zwłaszcza inteligentnych.

Zazwyczaj MCMV wyposażone są w autonomiczne pojazdy podwodne AUV⁹⁷/UUV⁹⁸ do wykonania zwiadu w celu skolekcjonowania na mapie cyfrowej potencjalnych celów, które mogą być neutralizowane przez inne autonomiczne AUV lub kablowo sterowane pojazdy podwodne ROUV⁹⁹. Pojazdy te mogą przenosić specjalne ładunki do neutralizacji podejrzanych obiektów, prowadzić ich „bombardowanie” specjalnymi ładunkami detonowanymi później zdalnie po odejściu pojazdu w rejon bezpieczny czy mogą stanowić sobą samobieżny ładunek wybuchowy. Najczęściej okręt wyposażony jest także w ROUV wyposażony w różnego rodzaju sensory do skanowania akwenu przed okrętem¹⁰⁰ oraz system holowany wyposażony w podobne sensory do skanowania dna. Na wyposażeniu takiej jednostki może być system inteligentnego trału symulujący pola fizyczne różnych klas okrętów. Jest on najczęściej holowany przez bazujący na MCMV nawodny pojazd bezzałogowy ASV¹⁰¹. Okręt stanowi element sieciocentrycznego¹⁰² systemu większych sił przeciwminowych¹⁰³. Jednostki takie posiadają zazwyczaj nurków przygotowanych do prowadzenia operacji ratowniczych¹⁰⁴ oraz jako jeden z elementów przeciwdziałania zagrożeniu ze strony min morskich.

Możliwe jest działanie nurków MCM z małych jednostek pływających operujących z brzegu lub przewożonych przez okręty¹⁰⁵. Do ich zadań można zaliczyć rozpoznanie zwiadowcze, rzadziej prace likwidacyjne lub rozgrodzeniowe infrastruktury obrony obiektów hydrotechnicznych lub umocnienia brzegu¹⁰⁶.

Przedstawiany projekt w części dotyczącej działań MCM skupiając się nad działaniami ratowniczymi wyposażenia MCM, neutralizacji min inteligentnych oraz oślepienia elektronicznej infrastruktury obronnej obiektów morskich.

Działania EOD skoncentrowane są na usuwaniu niebezpiecznych ładunków wybuchowych, zarówno w postaci niezdetonowanych wojskowych ładunków wybuchowych UXO¹⁰⁷ jako pozostałości: wojennych, po bazach, ćwiczeniach wojskowych itp. Ze względu na zagrożenie działania te traktowane są jako działania bojowe realizowane także w warunkach pokoju¹⁰⁸. Ważną odmianą tych działań są operacje IED skupiające się na przeciwdziałaniu UXO nierozpoznanego jako typowe wyposażenie wojskowe. Przynajmniej teoretycznie, działania EOD stwarzają mniejsze zagrożenie, gdyż sposób postępowania wynika ze skatalogowanych algorytmów postępowania z UOX pochodzenia wojskowego, które zazwyczaj posiadają możliwość dezaktywacji przy ustawieniu na nieusuwalność, czy systemu obrony obiektu inteligentnego. Niestety nawet stosunkowo prymitywne urządzenia IED mogą być nieusuwalne inaczej, jak przez ich kontrolowane zdetonowanie a jedynym przeciwdziałaniem zmniejszającym rażenie jest raptowne skierowanie fali uderzeniowej w inną stronę¹⁰⁹ lub zastosowanie osłon¹¹⁰.

W niektórych przypadkach można próbować zastosować przeciw wykorzystanej elektronice jamming¹¹¹. Często są to jednak stosunkowo prymitywne urządzenia elektryczne, które można próbować dezaktywować jedynie mechanicznie, przykładowo poprzez ich przestrzelenie różnymi pociskami¹¹² z armatki czy ładunkiem kumulacyjnym EFP¹¹³, przepalenie ładunkiem termitowym, wytopienie materiału wybuchowego itp. Projekt ze swej natury związany jest z działaniami MCM oraz EOD pomijając działania IED, gdyż problematyka IED jest ściśle powiązana z parametrami pól fizycznych generowanych przez sprzęt nurkowy nie jest zaś ściśle z technologią nurkowania, choć procesy płukania przestrzeni oddechowej aparatu są niezwykle istotne z punktu widzenia emitowania szumu do akwenu.

Z punktu widzenia taktycznego analiza ryzyka ukierunkowana jest na akceptowanie innych poziomów zagrożenia niż akceptowany poziom zagrożenia wynikający z analizy ryzyka bezpieczeństwa operacji nurkowych. Jest to oczywiste gdyż oba podejścia odnoszą się do różnych celów. Jednak, przy taktycznym planowaniu operacji nurkowych należy uwzględnić uwarunkowania także dotyczące technologii nurkowania. Przykładowo, dla hipotetycznego scenariusza operacji desantowania, analiza ryzyka operacji skrytego rozpoznania i ewentualnego przygotowania rozgrodzenia podwodnych zapór

minowych przez nurków, z taktycznego punktu widzenia nakierowana jest na określenie prawdopodobieństwa skutecznego wykonania zadania na założonym poziomie ufności¹¹⁴.

Ochrona szlaków żeglownych powinna być realizowana pewnie i szybko. Nie zawsze rozpoznanie min dryfujących przez jednostki nie posiadające wyposażenia do ich likwidacji może być skompensowane szybkim dojściem jednostki MCMV w rejon. W takim przypadku do likwidacji typowych min dryfujących można użyć nurków/pływaków VSW¹¹⁵, którzy operując ze śmigłowców mogą być zrzućni do wody i umieścić zdalnie odpalany ładunek w jej pobliżu¹¹⁶ lub na korpusie. Przeciwdziałanie minom inteligentnym na szlaku żeglownym nie zawsze może być realizowane przez pojazdy podwodne czy ładunki samobieżne ze względu na rejon czy przewidywany sposób działania miny¹¹⁷. Ponieważ pojazdy są łatwiej i z większym prawdopodobieństwem detektowane przez sensory takich min pozostaje użycie nurków, którzy posiadają dużą możliwość maskowania się na tle normalnych pól fizycznych występujących w akwenie. Nurek może precyzyjnie ustawić mały ładunek kumulacyjny odpalany nieelektrycznie, sieciować minę do czasu jej detonacji przez ładunek samobieżny lub przygotować do odholowania.

Podwodne działania IED właściwie zawsze realizowane są jedynie przez pływaków VSW czy nurków. Przeciwdziałanie atakom terrorystycznym czy działaniom w konflikcie asymetrycznym z użyciem nurków samobójców opiera się o użycie sprzętu bezzałogowego, załogowego, działania nurków SRT itp. Znajomość możliwości nurków w takich przypadkach jest niezwykle istotna, nie tylko ze względu na szacowanie ryzyka dla sił własnych, lecz także na szacowanie potencjału nurków terrorystów/samobójców.

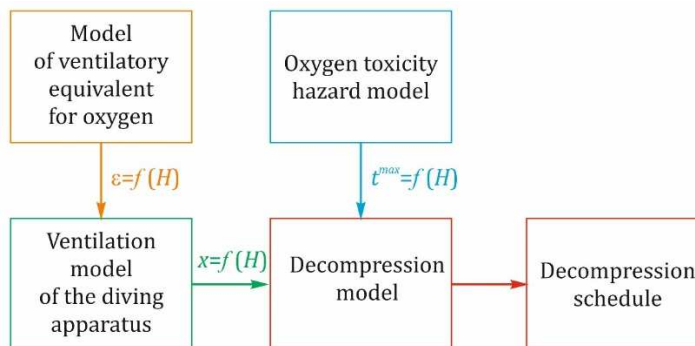
Podczas realizacji projektu należy niejako przy okazji zbierać dane do analizy ryzyka sytuacji taktycznej dla typowych scenariuszy operacji podwodnych w powiązaniu z zagrożeniem chorobą dekompresyjną DCS czy ośrodkowym zatruciem tlenowym CNSyn.

KONTEKST BADAWCZY

Od samego początku prowadzenia prac nad systemami dekompresji dla aparatów nurkowych w Polsce¹¹⁸ zauważono, że postęp krajowy jest możliwy jedynie poprzez poszukiwanie modeli deterministycznych¹¹⁹. Konsekwentnie trzymanie się tego założenia przez trzy pokolenia badaczy doprowadziło do opracowania wiarogodnych i efektywnych, choć żmudnych metodyk postępowania¹²⁰.

W stosowanym podejściu badawczym sposób przewidywania zachowania ergonomicznego systemu nurek–aparat nurkowy został rozbity na szereg powiązanych ze sobą modeli¹²¹ – rys. 1. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań walidacyjnych wydaje się, że analityczne rozbicie na modele cząstkowe nie powoduje generowania istotnych błędów przy ich syntezie w model całościowy i wykorzystania według podejścia holistycznego.

Sposoby modelowania wentylacji za pomocą równań różniczkowych są znane od wieków. Są to stosunkowo proste równania, które mogą być rozwiązywane metodami analizy matematycznej.



Rys. 1 Nastęstwo modeli.

Jednak ich przydatność do niedawna była kwestionowana ze względu na brak możliwości wystarczająco dokładnego ustalenia niektórych parametrów tych modeli¹²². Dlatego inżynieria wentylacji opiera się na modelach półempirycznych wywodzących się z przybliżonego rozwiązywania równania różniczkowego metodami analizy wymiarowej.

Pierwszy raz bariery związane z zastosowaniem podejścia deterministycznego do procesu wentylacji zostały przełamane ok. 15 lat temu. Umożliwiło to opanowanie modelowania deterministycznego wentylacji okrętu podwodnego, komory hiperbarycznej czy wyrobiska górniczego [14]. Wykorzystanie tych osiągnięć w inżynierii przemysłowej i sanitarnej mogłoby doprowadzić do zmiany podejścia do problemów wentylacji.

Wcześniejsze badania nad wentylacją aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego skończyły się sukcesem ok. 20 lat temu [13]. Jednak aparaty tego typu zostały wycofane z użytku krajowego.

W obecnym podejściu do modelowania systemu nurkowania z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA zmieniono stosowane początkowo podejście holistyczne na analityczne. Podstawy opracowywania rozkładów dekompresji zostały oparte na kilku modelach pokazanych na rys. 1:

- zmian modułu oddechowego¹²³ ε w funkcji głębokości H : $\varepsilon = f(H)$,
- zmian w składzie czynnika oddechowego wdychanego przez nurka $(x_1 \dots x_j, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ w zależności od: głębokości H , modułu oddechowego ε , parametrów konstrukcyjnych dla półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego ε_k , składu premiks x_w oraz czasu t ,

- zmian w zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn w zależności od ciśnienia cząstkowego tlenu p_i i czasu ekspozycji t ,
- projektowania dekompresji¹²⁴ jako funkcji czasu ekspozycji hiperbarycznej t oraz ciśnienia H przy uwzględnieniu wpływu czynników zakłócających, jak: temperatury T , wpływu poprzednich ekspozycji na dekompresję, wzrostu zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn, obciążenia dodatkową pracą W , sekwencją zanurzenia i wynurzenia, przebytem transportem do miejsca zanurzenia, obciążeniem wysiłkiem przed i po nurkowaniu itp.

Funkcja $\varepsilon = f(H)$ zmian modułu oddechowego¹²⁵ ε w zależności od głębokości H nie jest kluczową z punktu widzenia wiarygodności¹²⁶ ustalenia wartości stabilnych zawartości tlenu x_s z modelu wentylacji. Stała się ona istotną, gdyż niespodziewanie pozostałe modele pokazane na rys.1 wyznaczane są ze znacznie większą wiarygodnością. Przy poszukiwaniu rozwiązań dla modelu różniczkowego wentylacji aparatu nurkowego zawierającego system worków umieszczonych jeden w drugim $\frac{\partial}{\partial t}(x_1 \dots x_i, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ moduł oddechowy ε zaczął pełnić rolę kluczową¹²⁷. Spowodowało to konieczność przeprowadzenia badań naukowych nad wiarygodnym ustaleniem zależności modułu oddechowego $\varepsilon = f(H)$ od głębokości H .

Badania modułu oddechowego ε są opisane w dostępnym piśmiennictwie dla ciśnienia atmosferycznego, gdyż stanowią ważny wskaźnik wytrenowania sportowców stanowiąc podstawę wielu badań dotyczących medycyny wysiłku czy normowania pracy [15]. Dotychczasowe, bezkrytyczne przenoszenie wartości dla warunków normobarycznych do badań hiperbarycznych stanowiło barierę w adekwatnym opracowywaniu systemów nurkowych. Wyniki badań modułu oddechowego ε dla określonych sytuacji hiperbarycznych można poszukiwać w rzadkich wydawnictwach specjalistycznych [5-6]. Jednak przeniesienie tych wartości wiąże się nadal z obniżeniem wymaganej dokładności i precyzji modelowania wentylacji. Ustalenie zależności $\varepsilon = f(H)$ zmian modułu oddechowego ε w funkcji głębokości H dla predefiniowanych warunków, zrealizowano poprzez prowadzenie ekspozycji eksperymentalnych w warunkach symulowanych na możliwie reprezentatywnej grupie nurków eksperymentalnych¹²⁸.

Model wentylacji pozwala ustalić stabilną zawartości tlenu w funkcji głębokości: $x_s = f(H)|x_s(H, W) \equiv x_i = \text{idem}$, parametrów środowisko-wych i wysiłku. Po uwzględnieniu spotykanych fluktuacji Δx_s stabilnej zawartości tlenu x_s , dla ustalonych głębokości H i obciążenia pracą W , model ten stanowi wkład do modelowania dekompresji – rys. 1.

W aparatach o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR zasilanego premiksem występuje względny spadek zawartości tlenu¹²⁹ od stężenia występującego w premiksie x_w do wartości stabilnej¹³⁰ x_s . Zjawisko to spowodowane jest uzyskaniem warunku równowagi przy mieszaniu się czynnika zregenerowanego ze świeżym. Dynamikę tego procesu można modelować podobnie jak inne procesy wentylacyjne [14].

Na podstawie wcześniejszych, wieloletnich badań można dojść do wniosku, że proces wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA można wystarczająco dokładnie opisać w oparciu o równanie stanu gazu doskonałego. Równanie różniczkowe zbudowane na podstawie bilansu molowego można rozwiązać dokładnie. Podejście takie nie jest powszechnie stosowane ze względu na trudności spotykane z ustaleniem niektórych parametrów dla tego równania. Poprzez wieloletnie badania nad procesem wentylacji okrętu podwodnego, komór hiperbarycznych, wyrobisk górniczych itp., udało się zaproponować wiarygodne podejście do tej problematyki, stąd modelowanie oparto o w pełni deterministyczny, algebraiczny model analityczny.

Do badań nad procesem wentylacji aparatu nurkowego bez udziału ludzi wykorzystuje się stanowisko skumulowanych symulatorów: metabolicznej konsumpcji tlenu \dot{v} , akcji oddechowej \dot{V}_E i głębokości H . Symulator jest pod wieloma względami oryginalnym w skali światowej rozwiązaniem powstałym w ramach wieloletnich badań własnych. Charakteryzuje się tym, że do symulowania konsumpcji tlenu \dot{v} stosowane jest medium płynne, nie zaś gazowe jak w innych, podobnych rozwiązaniach technicznych na świecie [16]. Dzięki temu dodawanie go w pomijalnym stopniu zaburza objętość gazów w przestrzeni wentylowanej. Zestaw symulatorów posiada ekstremalnie krótką drogę pomiędzy pompą symulującą wentylację płuc \dot{V}_E a badanym systemem oddechowym, co nie powoduje sprężania i rozprężania czynnika oddechowego w linii wymuszającej akcję oddechową.

Równolegle prowadzone są badania w symulowanych warunkach hiperbarycznych z udziałem nurków eksperymentalnych. Na podstawie wyników tych badań określa się wiarygodność zastosowanego modelowania procesu wentylacji i wymiany gazowej w systemie ergonomicznym nurek–aparat nurkowy. Badania bez udziału nurków eksperymentalnych dają odpowiedź na temat wiarygodności zastosowanego modelu matematycznego w stosunku do procesów zachodzących w obiekcie rzeczywistym, jakim jest aparat nurkowy. Badania z udziałem nurków eksperymentalnych pozwalają ustalić, jakie występuje zmniejszenie wiarygodności modelu matematycznego przebiegu procesu wentylacji aparatu nurkowego, gdy dołożone zostanie zaburzenie związane ze zróżnicowaniem biometrycznym¹³¹ nurków HF¹³², oznaczane tutaj przez θ .

Pomimo tego, że tlen jest człowiekowi potrzebny do utrzymania hemostazy, to jest on także czynnikiem kancerogennym. Istnieją teorie postulujące, że jego oddziaływanie jest główną przyczyną starzenia się organizmów aerobowych¹³³. W warunkach hiperbarycznych jest on bardziej niebezpieczny ujawniając niektóre formy toksyczności niespotykane w życiu codziennym. W warunkach hiperbarycznych tlen wykazuje toksyczność płucną¹³⁴, ośrodkową¹³⁵ oraz toksyczność somatyczną¹³⁶ [17-20]. Przy krótkotrwałych nurkowaniach wojskowych najgroźniejszą formą toksyczności tlenowej jest toksyczność ośrodkowa CNSyn.

Podczas eksperymentów z ośrodkowym zatruciem tlenowym CNSyn obserwowano często mniej specyficzne symptomy, takie jak: niepokój, bledność twarzy, drżenie warg i powiek, mdłości, skurcze, oszołomienie, brak koordynacji, halucynacje wzrokowe i słuchowe, zawężenie pola widzenia czy zaburzenia mowy. Symptomy te rzadko poprzedzają postać drgawkową. Początek uogólnionych drgawek jest nagły. Atak zaczyna się od fazy tonicznej, trwającej zazwyczaj 30 s, podczas której nurek traci przytomność i ustaje czynność oddechowa. Następnie występuje faza kloniczna z nieskoordynowanymi ruchami całego ciała. Cały atak trwa najczęściej ok. 2 min.

Jeżeli zatrucie wystąpiło w wodzie nurek zabezpieczający powinien spróbować odczekać czas do powrotu przynajmniej części świadomości i oddechu, można dopuścić do okresu bezdechu trwającego do 3 min. Wynurzenie nurka bez przywrócenia akcji oddechowej może spowodować uraz ciśnieniowy płuc, gdyż najczęściej zatruciu tlenowemu i ustaniu akcji

oddechowej towarzyszy zaciśnięcie krtani. Ciężkie postaci ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn prowadzą do śmierci. Na świecie istnieje wiele modeli empirycznych do przewidywania zagrożenia ośrodkową formą toksyczności tlenowej CNSyn [21].

W projekcie, wykorzystano najszerze opublikowane systematyczne prowadzone badania nad modelowaniem zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn¹³⁷ opierające się na matematycznej analizie przetrwania¹³⁸ [22-23]. Podstawę do adiustacji modelu stanowiły wyniki badań przeprowadzonych w czasie II Wojny Światowej przez Brytyjczyków [24-25], oraz ich kontynuację przez Amerykanów do późnych lat 70. ubiegłego wieku [26]. Badania własne nad adekwatnością takiego podejścia do modelowania ośrodkowej toksyczności tlenowej CNSyn zakończyły się walidacją ustanowionego modelu przez US Navy [4].

Do szacowania stopnia relaksacji¹³⁹ po ekspozycjach tlenowych wykorzystuje się najczęściej model empiryczny¹⁴⁰ zaproponowany przez National Oceanic and Atmospheric Administration [27].

Szacowanie rozkładów bezpiecznej dekompresji oparto w projekcie na zaniechanym¹⁴¹ modelu ZH – L₁₂ opracowanym przez Bühlmanna dla armii szwajcarskiej [28]. Model ten uwzględnia uwarunkowania wojskowe, jak: specjalny dobór grupy nurków, utrzymywanie nurków w kondycji do przechodzenia forsownych dekompresji, podwyższony poziom aprobowanego zagrożenia itp. Model ten można przyjąć jako granicznie bezpieczny. Został on walidowany podczas wcześniej prowadzonych badań [29-30].

Projektowanie dekompresji musi opierać się o przewidywane scenariusze operacji nurkowych, zastosowane środki bezpieczeństwa¹⁴², warunki odpoczynku przed i po nurkowaniu, warunki transportu itp. Ocena tych parametrów może być prowadzona na drodze nurkowań eksperymentalnych w warunkach symulacji, co pozwala na ustalenie dozwolonych zakresów wybranych parametrów ekspozycji.

Walidacja podejścia, podobnie jak w poprzednich etapach badań, może być realizowana na drodze statystycznej przy wykorzystaniu analizy sekwencyjnej [31-32].

Przedstawione na rys.1 modele deterministyczne wentylacji półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego SCR CRABE SCUBA i dekompresji, oraz model statystyczny zagrożenia toksycznością tlenową CNSyn zostały ustalone z taką wiarogodnością, że model empiryczny $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H dla wybranej populacji nurków eksperymentalnych θ jako parametru, stał się elementem modelowania o największym wpływie na bezpieczeństwo prowadzenia ekspozycji hiperbarycznej.

Wybrana populacja nurków θ była standardową populacją dopuszczoną do nurkowań wojskowych w Marynarce Wojennej RP. Dodatkowo populacja θ powinna przejść test na odchylenia od funkcji $\varepsilon = f(H)_\theta$ opisującej zmiany¹⁴³ modułu oddechowego ε wraz z głębokością H oraz test tolerancji tlenowej TTT [32]. Negatywny wynik testu tolerancji tlenowej TTT stanowi przesłankę dla nurka do planowania operacji nurkowych jedynie o zmniejszonym zagrożeniu ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn oraz zachowania ostrożności przy planowaniu procesu leczenia przy wykorzystaniu procedur tlenowych oxy – TT¹⁴⁴ [32]. Zaś odchylenia od ustalonej funkcji $\varepsilon = f(H)_\theta$, powodują, że ze względów bezpieczeństwa, nurek powinien mieć inaczej zaprojektowaną dekompresję. Negatywne wyniki tych testów raczej dyskwalifikują nurka ze szkolenia nurkowego z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA, z formalnych względów organizacyjnych¹⁴⁵.

Możliwość ciągłego poprawiania precyzji projektowania dekompresji wiąże się z ciągłym doskonaleniem modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H. Każde nurkowanie dostarczające wiarogodnych¹⁴⁶ danych z jego przebiegu powiększa bazę danych do wnioskowania o precyzji ustalenia funkcji $\varepsilon = f(H)$ i może posłużyć jako wytyczna do zmiany rozkładu dekompresji. Nurkowania operacyjne nie mogą dostarczać wiarogodnych danych do takiego wnioskowania, lecz treningi i szkolenia prowadzone na symulatorze dają taką możliwość.

Wnioskowanie o zwiększeniu zagrożenia jest związane z diagnozowaniem odchyień od modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmian modułu oddechowego ε wraz z głębokością H. Dane zbierane podczas treningów i szkoleń na symulatorze nurkowania przyczyniają się do tyupowania nurków, dla których procedura dekompresyjna może być potencjalnie niebezpieczna. Badania nurków na symulatorze nurkowania mogą służyć do wyeliminowania zagrożenia DCS.

Jeśli wyniki badań nie wykazują odchyień od modelu $\varepsilon = f(H)_\theta$ a obserwuje się zwiększone zagrożenie objawami choroby dekompresyjnej DCS, to należy poszukiwać innych przyczyn, przykładowo odstępstw od technologii¹⁴⁷ prowadzenia prac podwodnych czy poszukiwać przyczyn kazuistycznych¹⁴⁸. Monitorowanie odstępstw od modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H daje potencjalnie narzędzie pracy oficerowi odpowiadającemu za bezpieczeństwo nurkowania w Marynarce Wojennej RP.

KONTEKST PROJEKTOWY

Projekt naukowy jest procesem przebiegającym w systemie zawierającym strukturę pozwalającą na jego realizację¹⁴⁹, dla którego należy prowadzić analizę kontekstu wewnętrznego i zewnętrznego.

Celem projektu była potrzeba operacyjna wdrożenia krajowej¹⁵⁰ technologii nurkowań przy wykorzystaniu niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA jako podprocesu operacji przeciwmionowych MCM. Analizę kontekstu projektu przeprowadzono metodą SWOT¹⁵¹. Osobnym problemem będzie analiza kontekstu wojny minowej dla nurków przy wykorzystaniu technologii nurkowania w aparacie SCR CRABE SCUBA.

Wyniki generacji spodziewanych mocnych i słabych stron oraz zagrożeń i szans zebrano w tab. 2. Mocne strony S, zawierają wszystko to, co stanowi atuty, przewagę czy zaletę analizowanego systemu, którym jest ustanowiony projekt badawczy. Słabe strony W zawierają wszystko to, co stanowi słabość, barierę czy wadę analizowanego systemu. Szanse O zawierają wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu szansę korzystnej zmiany. Jako zagrożenia T przedstawiono wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu niebezpieczeństwo zmiany niekorzystnej.

Mocną stroną wynikającą z kontekstu projektu stanowi posiadana baza naukowo-badawcza. Jej początki sięgają czasów Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej, która podjęła decyzję o specjalizowaniu się Polski w produkcji systemów hiperbarycznych zapewniających prowadzenia długotrwałych prac podwodnych do głębokości 200 mH₂O. Podstawowe obiekty ciśnieniowe miała produkować Stocznia Szczecińska. Koordynacja programu badawczego na potrzeby

Stocznia została powierzona Politechnice Gdańskiej. Akademia Marynarki Wojennej AMW miała zaś być dostawcą systemów zachowania życia. Dla zapewnienia finansowania tak rozległych prac ustanowiono Centralne Projekty Badawczo-Rozwojowe CPBR. Szybko zdano sobie sprawę, że ważnym elementem zapewniającym sukces przedsięwzięcia będą próby zdawczo-odbiorcze wiążące się z koniecznością przeprowadzeniem nurkowań saturowanych. W tamtych czasach technologie nurkowań saturowanych były zaliczane do zdolności strategicznych i nie były udostępniane. Postanowiono powierzyć zadanie opracowania takiej technologii Wojskowej Akademii Medycznej¹⁵² WAM, która nie dysponowała własnym zapleczem technicznym ale współpracowała z AMW.

Zdano sobie także sprawę, że możliwość wynajęcia profesjonalnego zespołu nurków spoza Polski związana jest z tak dużą barierą ekonomiczną, że zdecydowano się rozszerzyć działania o ustanowienie oddzielnego CPBR¹⁵³ w ramach którego należało wyszkolić takie ekipy. Zadanie to powierzono zespołowi WAM – AMW. Badania przeprowadzone w tamtym czasie i późniejsze wdrożenia technologii przyczyniły się do powstania bazy wiedzy do dalszych prac w zakresie szeroko rozumianych technologii nurkowych, które były kontynuowane także przy współpracy międzynarodowej.

Tab. 2

Najważniejsze mocne strony S, słabe strony W, szanse O oraz zagrożenia T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

S	1	posiadana baza naukowo-badawcza
	2	posiadany potencjał naukowo-badawczy
	3	zdobyte doświadczenia
W	1	niewystarczająca wojskowa baza obsługowa
	2	niewydolny system zaopatrzenia
	3	możliwości tabel dekompresyjnych i leczniczych
O	1	zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO
	2	opracowania systemowego podejścia do projektowania operacji nurkowych
	3	plan modernizacji Sił Zbrojnych
T	1	spodziewany długi okres realizacji
	2	potrzeba znacznych nakładów finansowych
	3	trudności w utrzymaniu trwałości efektów projektu
S (Strengths) – mocne strony: wszystko to, co stanowi atut, przewagę, zaletę analizowanego systemu		
W (Weaknesses) – słabe strony: wszystko to, co stanowi słabość, barierę, wadę analizowanego systemu		
O (Opportunities) – szanse: wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu szansę korzystnej zmiany		
T (Threats) – zagrożenia: wszystko to, co stwarza dla analizowanego obiektu niebezpieczeństwo zmiany niekorzystnej		

Zdobyta wiedza posłużyła do ciągłej obecności serwisu AMW świadczącego usługi prac podwodnych dla polskich platform wiertniczych oraz wdrożenia różnych technologii nurkowych. Powstała w tamtym czasie baza techniczna była wielokrotnie modernizowana i w obecnym czasie reprezentuje wysoki poziom światowy. Ponad trzydziestoletnie doświadczenie pozwala domniemywać, że projekt ma szanse na poszerzenie granic poznania w zakresie technologii hiperbarycznych.

Słabymi stronami projektu jest niewystarczająca baza remontowa dla pozyskanych z planu modernizacji Sił Zbrojnych aparatów nurkowych oraz niewydolny system zaopatrzenia w części zamienne.

Najważniejszą słabą stroną wynikającą z kontekstu zewnętrznego jest fakt dostarczenia przez dostawcę tabel dekompresyjnych, które nie pokrywają wszystkich wymagań. Przepisy i ugruntowana tradycja w Marynarce Wojennej RP wymusza na wykorzystywanej technologii nurkowania, między innymi:

- przy awarii zasilania tlenem możliwość dokończenia dekompresji przy wykorzystaniu mieszaniny używanej podczas pobytu na dnie,
- w przypadku zwiększenia zafalowania akwenu zakończenia dekompresji na przystanku 6 mH₂O.

Dostarczona technologia nurkowania nie posiadała także dodatkowych zaleceń co do leczenia ciężkich przypadków choroby dekompresyjnej powstałej w skutek wyrzucenia nurka czy ominięcia znacznej części przystanków dekompresyjnych¹⁵⁴.

Wdrożenie niezależnych nurkowań z wykorzystaniem SCR CRABE SCUBA daje szansę spełnienia przez Polskę wymagań NATO oraz zwiększa możliwości interoperacyjności Marynarki Wojennej RP.

Najważniejszą poznawczą szansą wynikającą z prowadzenia projektu jest możliwość wypełnienia luki w wiedzy umożliwiającej pokrycie wymagań taktycznych czy rozwoju technologii nurkowych. Pozyskana wiedza umożliwi efektywne działania w przyszłości, niestety należy liczyć się, że na etapie początkowym prac należy podjąć kosztowne i długotrwałe badania. Dużą szansą na pomyślne zakończenie projektu może stanowić wsparcie wynikające z planu modernizacji Sił Zbrojnych.



Głównym zagrożeniem jest czas oczekiwania na pierwsze rezultaty projektu, który decydującym zawsze wydaje się za długi a potrzebne na praktyce badań naukowych środki finansowe za wysokie. Jednak największym problemem jest długofalowe utrzymanie efektów projektu. Ten problem dotyczy nie tylko Polski, lecz prawie wszystkich partnerów Sojuszu, gdyż powstała luka pokoleniowa wśród specjalistów zajmujących się techniką hiperbaryczną. Obserwuje się wręcz pewnego rodzaju uwstecznienie, uwiadczniające się powtórnym rozwiązywaniem tych samych problemów, czasami z gorszymi rezultatami w porównaniu do pierwotnie otrzymanych efektów.

W fazie analizy mocy asocjacji, dla wygenerowanych mocnych S i słabych stron W, szans O, oraz zagrożeń T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących realizacji zakresu projektu, przeprowadzono analizę mocy powiązań w trzystopniowej skali:

- 0 brak powiązania,
- 1 słabe powiązania,
- 2 silne powiązania.

Wyniki analizy tych powiązań zawarto w tab. 3.

Tab. 3

Wyniki analizy siły powiązań pomiędzy mocnymi stronami S i słabymi stronami W a szansami O oraz zagrożeniami T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

		O. Szanse			T. Zagrożenia		
		1	2	3	1	2	3
S. Mocne strony	1			2	1	1	2
	2			2	2	2	2
	3	2		2	2	2	1
W. Słabe Strony	1	2		2	2	2	
	2	2	1		2	1	
	3	2	2	2	2	2	
0- brak oddziaływania							
1- słabe oddziaływania							
2- silne oddziaływania							

Tab. 4

Wyniki analizy implikacji dla silnych powiązań pomiędzy mocnymi stronami S i słabymi stronami W a szansami O oraz zagrożeniami T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

		O.Szanse			T.Zagrożenia			O.Szanse			T.Zagrożenia		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S.Mocne strony	1			T			T			T			T
	2			T	T	T				T		T	T
	3	T		T	T	T				T			
W.Słabe strony	1	T			T					T	T	T	
	2	T			T						T		
	3	T							T		T	T	
		Czy dana mocna strona pozwoli wykorzystać daną szansę?						Czy dana szansa wzmacnia daną silną stronę?					
		Czy dana mocna strona pozwoli zniwelować dane zagrożenie?						Czy dana szansa pozwala zniwelować daną słabość?					
		Czy dana słaba strona ogranicza możliwość wykorzystania danej szansy?						Czy dane zagrożenie niweluje daną silną stronę?					
		Czy dana słaba strona potęguje ryzyko związane z danym zagrożeniem?						Czy dane zagrożenie uwypukla daną słabość?					
		T–Tak											

Numeracja wygenerowanych mocnych stron S, słabych stron W, szans O oraz zagrożeń T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych, dotyczących realizacji projektu jest identyczna jak w tab. 2 i tab. 3.

Analizę implikacji wyłonionych silnych asocjacji dla lewej strony tab.4 przeprowadzono odpowiadając na pytania:

- Czy dana mocna strona pozwoli wykorzystać daną szansę?
- Czy dana mocna strona pozwoli zniwelować dane zagrożenie?
- Czy dana słaba strona ogranicza możliwość wykorzystania danej szansy?
- Czy dana słaba strona potęguje ryzyko związane z danym zagrożeniem?

a dla prawej strony tab. 4 przeprowadzono odpowiadając na pytania:

- Czy dana szansa wzmacnia daną silną stronę?
- Czy dana szansa pozwala zniwelować daną słabość?
- Czy dane zagrożenie niweluje daną silną stronę?
- Czy dane zagrożenie uwypukla daną słabość?

Zebrane w tab. 4 wyniki analizy implikacji dla silnych powiązań posiadają taką samą numerację mocnych stron S, słabych stron W, szans O oraz zagrożeń T, jak w tab. 2 i tab. 3.

Odpisano jedynie silne powiązania, dla których ujawniono związki deterministyczne¹⁵⁵ w postaci pozytywnej odpowiedzi na pytania uwidocznione w tab. 4.

Czy posiadana baza naukowo-badawcza pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Po modernizacji, posiadana baza naukowo-badawcza umożliwi wykonanie badań na stanowiskach pomiarowych z udziałem nurków eksperymentalnych w zakresie potrzebnych technologii pokrywających wymagane scenariusze operacyjne. Podstawowym zakresem modernizacji kompleksu hiperbarycznego będzie przywrócenie możliwości chłodzenia wody w basenie. Modernizacji wymaga też system monitoringu wizyjnego, parametrów nurkowania i zapisu prowadzonych rozmów. Stanowisko do badań aparatów nurkowych wymaga zbudowania od podstaw nowego symulatora metabolicznego i włączenie go do systemu symulatorów oddechowego i hiperbarycznego.

Posiadana baza hiperbaryczna spełnia też rolę trenażera dla nurków MCM oraz jest wykorzystywana podczas szkoleń nurków MCM na wyższe stopnie nurkowe.

Czy posiadany potencjał naukowo-badawczy pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Wydaje się, że Akademia Marynarki Wojennej nadal dysponuje wystarczającym potencjałem ludzkim do przeprowadzenia koniecznych badań. Jednak zabezpieczenie medyczne jest realizowane przez lekarza zatrudnionego na umowę cywilno–prawną. Także nurkowie eksperymentalni są kontraktowani na umowy cywilno–prawne z jednostek wojskowych. Stąd większość działań projektowych musi być realizowana poza godzinami służbowymi.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Obecnie wydaje się, że zdobyte doświadczenie w pracach nad nowymi technologiami nurkowymi pozwoli na zrealizowanie także obecnego projektu. Oczekiwane jest pozyskanie nowej wiedzy, która pozwoli dokonać znacznego wzrostu efektywności pracy. Taką nadzieję stwarzałoby opracowanie nowych modeli matematycznych podstawowych procesów dla ergonomicznego systemu nurek–aparat nurkowy. Zwłaszcza adekwatny model wentylacji przestrzeni oddechowej przyczyniłby się do znacznego postępu w projektowaniu technologii nurkowania oraz otoczenia systemowego.

Należy poszukiwać w miarę możliwości modeli deterministycznych a modele probabilistyczne powinny być wykorzystywane jedynie w procesie walidacji opracowanych technologii

Czy posiadana baza naukowo–badawcza pozwoli zniwelować zagrożenie związane z trudnościami w utrzymaniu trwałości efektów projektu?

Baza naukowo–badawcza jest doskonałym narzędziem do prowadzenia badań nad nowymi technologiami nurkowymi. Jednak przy braku specjalistów, którzy chcieliby samodzielnie podejmować badania w tym zakresie nie uda się utrzymać trwałości efektów projektu. Podobnie jak w innych ośrodkach światowych wraz z odejściem dotychczas pracujących tam naukowców posiadane kompetencje tych instytucji powoli zanikają.

Czy posiadany potencjał naukowo–badawczy pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Zniecierpliwienie zleceniodawców jest przyczyną niepowodzeń wielu projektów. Zwłaszcza wypadki śmiertelne zmniejszają cierpliwość okazywaną zespołom badawczym. Wydaje się, że Marynarka Wojenna RP zdoła zachować wystarczającą cierpliwość ze względu na niezadawalający postęp w badaniach nad technologiami nurkowania dla aparatów SCR CRABE SCUBA i SCR IS – Mix SCUBA.

Wydaje się obecnie, że zespół realizujący projekt posiada doświadczenie w zakresie opracowywania nowych technologii nurkowych. A używane procedury i wyposażenie są na dobrym poziomie światowym. Nie gwarantuje to zniwelowania zagrożenia związanego ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu, lecz daje nadzieję, że projekt skończy się sukcesem w zakładanej perspektywie czasowej.

Czy posiadany potencjał naukowo–badawczy pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanymi dużymi nakładami na realizację projektu?

Niezadawalający postęp w badaniach nad technologią dla aparatów SCR CRABE SCUBA i SCR IS – Mix SCUBA niewątpliwie wiąże się z niskimi nakładami finansowymi oraz zawężaniu perspektyw czasowych dla zespołów realizujących projekty.

Budżet projektu jest typowym dla projektów o średnim poziomie finansowania. Zawiera elementy modernizacji infrastruktury, która jest także wykorzystywana w szkoleniach i treningach. Stąd poziom finansowania nie budził zastrzeżeń. W warunkach stabilności ekonomicznej kraju budżetowanie projektu wydaje się zapewnione.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Zgromadzona baza wiedzy budzi duże nadzieje na przełamanie luki w wiedzy przy modelowaniu wentylacji aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR. Kluczowym w tym zakresie będzie powtórne zbudowanie symulatora metabolicznego na nowym stanowisku symulacyjnym składającym się z symulatora oddechowego i hiperbarycznego. Zdobyte doświadczenie z poprzednio wykorzystywanym symulatorem pozwala sądzić, że w ramach projektu spodziewany jest znaczny postęp w wiedzy w zakresie projektowania ergonomicznych systemów aparat nurkowy–nurek.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanymi dużymi nakładami na realizację projektu?

Można mieć uzasadnione nadzieje, że podczas realizacji projektu nastąpi przełom i zostanie wypełniona następną luką w wiedzy pozwalającą na efektywniejszą pracę nad nowymi technologiami nurkowymi. Jednak taki scenariusz najczęściej nie przyczynia się do obniżenia kosztów, lecz powoduje przewartościowanie celów w kierunku wyższego standardu jakościowego dla rozwiązania końcowego.

Jeśli osiągnięcia naukowe projektu będą znaczne, to należy raczej spodziewać się, że możliwy do osiągnięcia wyższy standard jakościowy będzie wymagał dodatkowego wsparcia finansowego oraz rozszerzenia czasu realizacji projektu.

Czy niewystarczająca wojskowa baza obsługowa ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Formalnie niewystarczająca baza obsługowa dla aparatów nurkowych SCR CRABE SCUBA nie ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO, lecz obniża gotowość bojową przez zbyt rozwlekłe procedury biurokratyczne, które przy dobrej woli można skrócić. Jednak obsługa sprzętu nurkowego opiera się w znacznej mierze o usługi zewnętrzne, które muszą być kontraktowane w ramach zamówień publicznych. W warunkach konieczności utrzymania stałej, podwyższonej gotowości bojowej¹⁵⁶ ten model nie jest dostatecznie wydolny.

Czy niewydolny system zaopatrzenia ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Według filozofii prowadzenia działań bojowych niewydolny system zaopatrzenia dla aparatów nurkowych SCR CRABE SCUBA eliminuje możliwości utrzymania zdolności operacyjnych do prowadzenia podwodnych działań bojowych, w tym w ramach NATO.

Jednostki wydzielające patrole minerskie powinny dysponować oddzielnym funduszem na utrzymanie stałej gotowości bojowej. Niezależnie od potrzeb, które będą planowane na podstawie zebranych doświadczeń i realizowane centralnie, jednostki te powinny posiadać do swej dyspozycji warsztaty naprawcze, systemy do otrzymywania i dopuszczenia do użytku czynników oddechowych, możliwość szybkiego zakupu gazów, części zamiennych itp.

Czy obecne możliwości tabel dekompresyjnych i leczniczych ograniczają możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Projekt koncentruje się na planowaniu dekompresji dostosowanej do scenariuszy operacyjnych realizowanych przez nurków MCM, dla których możliwości dotychczas wykorzystywanych tabel były w tym zakresie ograniczone.

Przy niezależnych nurkowaniach głębokowodnych należy liczyć się z przypadkiem wyrzucenia nurka. Doświadczenia innych krajów NATO pokazują, że standardowe procedury oparte o zestaw tabel proponowany przez US Navy może być niewystarczający. Zabezpieczenie takich nurkowań wymagać może stosowania tradycyjnego leczenia w warunkach saturacji. Wymaga to zmian w projektach nowych komór dekompresyjnych planowanych w projekcie KORMORAN II, modernizowanych obiektów hiperbarycznych na ORP PIAST i ORP LECH oraz zestawów SERCÓWKA.

Niestety inne kraje NATO nie są przygotowane do udzielenia nam wystarczającego wsparcia działań leczniczych, dlatego ta problematyka musi być rozwiązana siłami krajowymi.

Czy niewystarczająca wojskowa baza obsługowa potęguje ryzyko związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Niewystarczająca wojskowa baza obsługowa może spowodować brak sprawnych aparatów do badań a przez to wydłużyć czas realizacji projektu.

Czy niewydolny system zaopatrzenia potęguje ryzyko związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Niewydolny system zaopatrzenia powoduje, że może wystąpić brak części zamiennych do aparatów nurkowych i wpłynąć na brak sprawnych aparatów do badań a przez to wydłużyć czas realizacji projektu.

Analiza prawej strony tab. 4 jest komplementarna do przeprowadzonej powyżej i raczej nie ujawni dodatkowych uwarunkowań wynikających z kontekstu projektu, stąd nie będzie tutaj przedstawiona.

RYZYKO W PROJEKCIE

Wstępną analizę ryzyka realizacji projektu wykonano metodą Failure Mode and Effects Analysis FMEA [33]. Innego sposobu podejścia będzie wymagać analiza ryzyka taktycznego użycia technologii nurkowań MCM jako elementu systemu wojny minowej¹⁵⁷.

Analiza ryzyka prowadzona metodą FMEA nakierowana jest na zdolność do przewidywania wystąpienia niezgodności w systemie lub przebiegającym w nim procesie w oparciu o wiedzę ekspercką i zawczasu opracowanie sposobów reakcji na przewidywane formy materializacji ryzyka w postaci zagrożenia lub szansy, bez względu na skalę finansową efektu tej materializacji. Metodą FMEA można hierarchizować potencjalne ryzyko pod względem prawdopodobieństwa i skali technicznego oddziaływania w chwili jego materializacji. Skalę finansową¹⁵⁸ materializacji ryzyka należy oceniać równoległe do analizy technicznej, aby nie ukierunkowywać działania w celu zminimalizowania mało dotkliwych finansowo skutków materializacji ryzyka zaś bardziej dotkliwe pozostawiać jako rezydualne. Metoda ta została z powodzeniem zastosowana także podczas prowadzenia innych projektów [34-35].

Metodyka FMEA nie tylko przyczynia się do minimalizowania skutków materializacji ryzyka, ale ustala hierarchię rodzajów zdiagnozowanych, inherentnych jego rodzajów a przez to pozwala ustalić niezbędny poziom i kierunki prowadzonego monitoringu zagrożeń i szans.

W analizie używane są pojęcia ryzyka i zagrożenia. Całka funkcji ryzyka od momentu $t = 0$ do momentu czasu t określa tutaj zagrożenie lub szansę materializacji ryzyka.

W fazie początkowej zdiagnozowano osiem rezydualnych, możliwych zagrożeń istniejących w projekcie, związanych z sześcioma rodzajami ryzyka:

1. brakiem odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych,
2. brakiem kontroli nad higieną życia u nurków,
3. doborem nieadekwatnej populacji nurków,
4. wystąpieniem kazuistycznego¹⁵⁹ przypadku choroby ciśnieniowej DCS,
5. sprawdzaniem technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych,
6. nieadekwatnym działaniem aparatu nurkowego.

Zdiagnozowane podstawowe rodzaje ryzyka w projekcie.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt materializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodobieństwo zmaterializowania się ryzyka	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodobieństwo detekcji materializacji ryzyka	RPN $RPN=I \times P \times D$	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawione RPN			
		I		P		D			I	P	D	RPN
Brak odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych	Brak możliwości walidacji technologii	9	Problemy administracyjne	8	pełna detekcja	5	360	minimalizowanie	9	3	4	108
Brak kontroli nad higieną życia u nurków	Potencjalny wypadek	7	Chęć zatajenia	7	Możliwa średnia detekcja	8	392	unikanie, redukcja	7	4	4	112
Dobór nieadekwatnej populacji nurków	Nieadekwatna technologia	7	Brak screeningu	5	Możliwa średnia detekcja	6	210	minimalizowanie	7	3	2	42
Wystąpienie kazuistycznego przypadku choroby ciśnieniowej	Zatrzymanie badań	9	Możliwe zdarzenie losowe	4	Możliwa średnia detekcja	6	216	przeniesienie, współdzielenie	4	4	6	96
Sprawdzenie technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych	Nieadekwatna technologia	7	Ograniczona kontrola temperatury wody	8	idealna detekcja	1	56	zamiana	7	2	1	14
		7	Niedokładne analizy zewnętrzne	7	pełna detekcja	9	441	redukowanie	7	7	2	98
Nieadekwatne działanie aparatu nurkowego	Potencjalny wypadek	7	Brak sprawdzenia aparatu	4	pełna detekcja	6	168	omijanie	7	3	2	42
		7	Awaria	6	idealna detekcja	1	42	akceptowanie	7	6	1	42
		Intensywność stwarzanego zagrożenia I			Prawdopodobieństwo wystąpienia P		Prawdopodobieństwo detekcji D					
		1: Prawie nieodczuwalne			1: Nieprawdopodobne		1: idealna detekcja $D_{\%} @ 100\%$					
		2-3: Niewielkie obciążenie klienta			2-3: Bardzo mało prawdopodobne		2-5: pełna detekcja ($100\% > D_{\%}^{399,7\%}$)					
		4-6: Umiarkowane oddziaływanie			4-6: Małe prawdopodobieństwo		6-8: możliwa średnia detekcja ($99,7\% > D_{\%}^{398\%}$)					
		7-8: Duże oddziaływanie			7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo		9: niepełna detekcja ($98\% > D_{\%}^{390\%}$)					
		9-10: Bardzo duże oddziaływanie			9-10: Wysokie prawdopodobieństwo		10: brak detekcji $D_{\%} @ 0\%$					
RPN (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka $RPN > 100$												

Ad. 1 Intensywność stwarzanego zagrożenia przez brak odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych jest duża i została określona na względnym poziomie $I = 8$ w dziesięciostopniowej skali porządkowej, gdyż efektem materializacji tego zagrożenia będzie brak możliwości walidacji proponowanej technologii bądź walidacja obarczona błędem systematycznym. Spowodowane z reguły barierami administracyjnymi, prawdopodobieństwo powstania zagrożenia oszacowano na umiarkowanym poziomie i we względnej, dziesięciostopniowej skali porządkowej określono je na $P = 8$ przy możliwości pełnej detekcji. Stąd prawdopodobieństwo detekcji oszacowano na poziomie $100\% > D\% \geq 99,7\%$, co odpowiada wartości względnej $D = 5$ w dziesięciostopniowej skali porządkowej. Wartość względnej liczby ryzyka kształtuje się w tym przypadku na poziomie $RPN = 320$ przekraczając ponad 3-krotnie wartość krytyczną $RPN_{kr} = 100$ – tab. 5.

Jako sposób reakcji na występujące ryzyko braku odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych, stwarzające zagrożenie brakiem walidacji opracowywanej technologii lub walidacją obciążoną błędem systematycznym, obrano jego minimalizowanie poprzez stworzenie zachęt finansowych i decydując się dodatkowo na prowadzenie eksperymentów poza godzinami służbowymi nurków wojskowych¹⁶⁰.

Powoduje to obniżenie względnego prawdopodobieństwa materializacji ryzyka wystąpienia hamulców biurokratycznych, do poziomu bardzo mało prawdopodobnego, oszacowanego na względnym poziomie $P = 3$ oraz nieznaczne zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji, ze względu na spodziewaną współpracę z nurkami skutkującą odpowiednio wczesnym zawiadaniem o niemożliwości przystąpienia do badań w danym terminie: $D = 4$. Pozwala to na obniżenie wartości liczby ryzyka do poziomu $RPN = 108$, leżącego w pobliżu wartości krytycznej.

Dotąd nie zaobserwowano znacznych problemów z brakiem nurków eksperymentalnych, lecz zasoby czasu wolnego nurków wojskowych pozostają ograniczone, stąd zagrożenie nadal istnieje. Podjęto próby w ramach Komitetu Sterującego zachęcające Gestora do wystąpienia do dowódców jednostek z wnioskiem o wydzielenie nurków do prowadzenia projektu. Umożliwiłoby to zmniejszenie prawdopodobieństwa powstania zagrożenia do poziomu mało prawdopodobnego $P = 4$, a możliwość detekcji do poziomu pełnej $D = 3$. Obniżyłoby to wartość względnej liczby ryzyka do poziomu $RPN = 108$, nieznacznie przekraczającego wartość krytyczną $RPN_{kr} = 100$, co jest wynikiem identycznym z poprzednim, dlatego wariant ten traktowany jest jako awaryjny.

Ad. 2 Brak kontroli nad higieną życia nurków jest dużym ryzykiem dla projektu, ocenianym na poziomie $I = 7$, gdyż stwarza ono potencjalne zagrożenie wystąpieniem wypadku nurkowego przy materializacji tego ryzyka. Ryzyko to jest powiązane z Ad.1, gdyż chęć dodatkowego zarobkowania połączona z niechęcią do zmiany zachowań w kierunku zwiększenia higieny życia potęguje to ryzyko. Stąd prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oceniono jako umiarkowane, na poziomie $P = 7$, przy możliwym średnim prawdopodobieństwie detekcji na poziomie $D = 8$. Brak kontroli nad higieną życia nurków powoduje znaczne zagrożenie dla projektu na poziomie względnej liczby ryzyka $RPN = 392$. Reakcją na ryzyko będzie jego unikanie połączone z redukowaniem poprzez stosowanie sprzętu diagnostycznego: alkomat i zestaw do oznaczania zawartości kwasu mlekowego we krwi. Spowoduje to zredukowanie szacowanego prawdopodobieństwa materializacji ryzyka do poziomu małego $P = 4$ oraz zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji do pełnego: $D = 4$. Wpłynie to na zmniejszenie szacowanej liczby ryzyka do poziomu $RPN = 112$, nieznacznie przewyższającego wartość krytyczną.

Ad. 3 Dobór nieadekwatnej populacji nurków może być spowodowany brakiem adekwatnych badań przesiewowych, lecz najczęściej wynika z potrzeby prowadzenia projektu przy ograniczonej liczbie nurków eksperymentalnych pozostających w dyspozycji. Stąd ryzyko to jest dość ściśle połączone z Ad.1. Intensywność stwarzanego zagrożenia oszacowano na poziomie dużego oddziaływania $I = 7$. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oceniono na małe, na poziomie $P = 5$, przy średnim poziomie prawdopodobieństwa detekcji $D = 6$. Razem generuje to względną liczbę ryzyka na poziomie $RPN = 210$, ponad dwukrotnie przewyższającą wartość krytyczną. Reakcją na ryzyko będzie jego minimalizowanie poprzez przeprowadzenie dokładnych badań nurków podczas eksperymentów. Pozwoli to zminimalizować prawdopodobieństwo materializacji ryzyka do bardzo małego $P = 3$ i zwiększyć prawdopodobieństwo detekcji do poziomu pełnego $D = 2$. Obniża to względną liczbę ryzyka do pomijalnie małej $RPN = 42$. Podczas poprzednich projektów zdiagnozowano jednego nurka, który nie odpowiadał założeniom modelu działania aparatu. Wydaje się, że w przyszłości należy stosować badania przesiewowe nurków zaliczanych do tych, którzy będą mogli być szkoleni i nurkować z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA.

Możliwa do wykorzystania populacja wojskowych nurków eksperymentalnych jest nie do końca adekwatna, gdyż zgodnie z obowiązującym prawem dopuszcza się jako nurków eksperymentalnych żołnierzy posiadających uprawnienia starszego nurka. Droga do uzyskania takich uprawnień jest długa, stąd są to osobnicy starsi w populacji nurków, którzy będą użytkować opracowaną technologię. Jednym ze sposobów utrzymania adekwatności stosowanego podejścia jest ustanowienie małego realnego wymagania wykorzystania technologii jedynie przez żołnierzy z uprawnieniami na poziomie starszych nurków minerów.

Ad. 4 Kazuistyczny przypadek choroby ciśnieniowej DCS, czyli DCS o rzadkim przebiegu czy rzadko występujący, może zawsze zaburzyć przebieg procesu walidacji. Niektóre warunki sprzyjające wystąpieniu kazuistycznego przypadku DCS zostały wymienione przy omawianiu kontekstu fizjologicznego¹⁶¹. Częściowe przeciwdziałanie polega na badaniach zakwaszenia krwi czy obecności alkoholu w wydychanym powietrzu, kontrola higieny życia nurków, wytrenowania itp. Jednak złe nastawienie psychiczne, zażywanie suplementów diety, zaburzenia snu itp., mogą być przez nurka dysymulowane, zatajane czy bagatelizowane i nie zostać zdiagnozowane podczas wywiadu lekarskiego. Materializacja takiego ryzyka jest szczególnie dotkliwa, gdyż może prowadzić do zatrzymania badań na czas dochodzenia powypadkowego. Intensywność stwarzanego zagrożenia oszacowano na duże $I = 7$. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka jest mało prawdopodobne $P = 4$. Prawdopodobieństwo detekcji przed nurkowaniem można oszacować na poziomie średnim: $D = 6$. Strategią reakcji na ryzyko jest uświadamianie nurkom zagrożenia oraz jego przeniesienie i współdzielenie z ubezpieczycielem, stąd przewidziano znaczne środki na ubezpieczenie nurków eksperymentalnych w ramach odpowiedzialności cywilnej OC. Pozwoli to na zmniejszenie intensywności oddziaływania ryzyka do poziomu $I = 4$. Co zmniejszy względną liczbę ryzyka RPN z wartości $RPN = 216$ do poziomu $RPN = 96$, leżącego lekko poniżej wartości krytycznej.

Ponieważ wystąpienie kazuistycznego przypadku choroby ciśnieniowej DCS jest zawsze możliwe, zabezpieczenie przed wystąpieniem objawów DCS u nurków polega na monitoringu wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych. Metoda od lat wykorzystywana w Akademii, wydaje się jak dotąd bardzo użyteczna.



Ad. 5 Sprawdzenie technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych stwarza dużą intensywność materializacji ryzyka, ocenioną na $I = 7$. Prawdopodobne są dwa przypadki materializacji tego ryzyka.

Przy ograniczonej możliwości modyfikowania temperatury wody prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oceniono na umiarkowane $P = 8$, przy idealnej detekcji $I = 1$. Względna liczba ryzyka dla tego przypadku leży poniżej wartości krytycznej $RPN = 56$. Reakcją na to ryzyko jest jego zamiana na szansę poprzez zbudowanie systemu oziębiania wody w basenie kompleksu hiperbarycznego. W tym przypadku szacowane prawdopodobieństwo materializacji ryzyka przy późniejszym wykorzystaniu technologii spada do wartości względnej $P = 2$ odpowiadającego zdarzeniu bardzo mało prawdopodobnemu. Tym samym względna liczba ryzyka spada do wartości pomijalnie małej $RPN = 14$.

Drugi rodzaj zagrożenia wiąże się z nadmiernym błędem oznaczenia zawartości tlenu i innych gazów w premiksie¹⁶². Wydawałoby się, że jest to zdarzenie bardzo mało prawdopodobne, ale zaobserwowano takie przypadki podczas poprzednich projektów, stąd oszacowano prawdopodobieństwo na poziomie umiarkowanym $P = 7$. Błędy tego typu powstają przy nawet małym odejściu od ustanowionych procedur SOP¹⁶³, dobrej praktyki nurkowej GLP¹⁶⁴ lub niedopasowania ergonomicznego: operator analityk–przyrząd pomiarowy. Często przy badaniach rutynowych takie ryzyko może się łatwo zmaterializować. Prawdopodobieństwo detekcji materializacji ryzyka jest niepełne $D = 9$. Powoduje to duże zagrożenie techniczne, gdyż względna liczba ryzyka jest równa ponad czterokrotności wartości krytycznej $RPN = 441$. Strategią reakcji na ryzyko jest jego redukcja poprzez: wydzielenie doświadczonego obserwatora, w obecności którego będą wykonywane analizy, zlecenie analiz dwóm laboratoriom lub sprawdzanie dodatkowo w laboratorium zewnętrznym. Pozwoli to na zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji do pełnego $D = 2$ i obniżenie względnej liczby ryzyka do wartości lekko poniżej wartości krytycznej $RPN = 98$.

Zdiagnozowano odchylenia od założeń do wcześniejszych technologii nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego Nx/Tx – SCR CRABE SCUBA polegających na stosowaniu większego niż zakładano wysiłku podczas fazy wchodzenia do wody i wychodzenia z wody. Nurkowie nurkują z burty okrętu na pontonie wykonując wysiłek ciężki podczas poruszania się po trapie. Jako środek zaradczy zaproponowano podniesienie poziomu gotowości technologii z poziomu VIII do IX przez zespół realizujący badania, podejmując kroki do uruchomienia kontynuacji projektu z uwzględnieniem tych uwarunkowań.

Materializacja takiego ryzyka jest krytyczna, gdyż powoduje zniweczenie znacznych zasobów finansowych i czasu, które zostały wydatkowane na przeprowadzenie projektu. Takie wypadki zdarzają się w praktyce, warto więc skorzystać z udostępnionego Lesson Learned przez marynarki wojenne NATO.

Dla niesprawdzonej do końca w działaniu konstrukcji aparatu SCR CRABE SCUBA, ryzyko nieadekwatnego działania może być spowodowane dwiema przyczynami: brakiem dokładnego sprawdzenia przed nurkowaniem lub awarią. W obu przypadkach materializacja ryzyka może prowadzić do wypadku nurkowego, stąd intensywność oddziaływania zagrożenia została oceniona na poziomie dużym $I = 7$. Prawdopodobieństwo nieprawidłowego sprawdzenia aparatu nurkowego przed nurkowaniem oszacowano na poziomie $P = 5$ a prawdopodobieństwo detekcji na poziomie $D = 7$ ze względu na zaistniały podczas badań przypadek złego przygotowania aparatu spowodowany odstępstwem od SOP. Parametry te generują wartość względnej liczby ryzyka na poziomie $RPN = 245$.

Strategią reakcji na ryzyko będzie jego minimalizowanie przez stałą, kwalifikowany nadzór. Stąd do prowadzenia eksperymentów będzie wykorzystywany rozszerzony zespół nadzoru przez kwalifikowanych i doświadczonych specjalistów z Akademii. Pozwoli to na zredukowanie poziomu prawdopodobieństwa materializacji ryzyka wystąpienia potencjalnego wypadku nurkowego do poziomu $P = 4$ i prawdopodobieństwa detekcji do $D = 3$. Reakcja na ryzyko spowodowała zmniejszenie względnej liczby ryzyka do akceptowanego poziomu $RPN = 84$.

Nieadekwatne działanie aparatu nurkowego jest zawsze prawdopodobne. Przeciwdziałanie temu zagrożeniu opiera się na współpracy z Producentem poprzez Partnera przemysłowego w zakresie zmian w konstrukcji aparatu zapobiegającym występowaniu spotkanych nieprawidłowości w działaniu oraz bilateralnej współpracy naukowej z CEPHISMER Tulon w zakresie monitoringu występujących problemów w Marynarce Francuskiej.

Na podstawie analizy dotychczasowych nurkowań eksperymentalnych prawdopodobieństwo awarii aparatu nurkowego oszacowano na poziomie małym: $P = 6$. A prawdopodobieństwo wykrycia awarii na poziomie detekcji idealnej $D = 7$. Stąd względna liczba ryzyka jest na poziomie małym $RPN = 42$. Reakcją na ryzyko jest jego akceptowanie.

Z przedstawionych analiz wynika, że po zastosowaniu reakcji na rozpatrywane rodzaje ryzyka spadła wartość względnej liczby ryzyka RPN . Nieznacznie została obniżona intensywność¹⁶⁵ dla niektórych rodzajów ryzyka w projekcie. Ryzyko rezydualne jest nadal wysokie, więc projekt należy sklasyfikować, jako generujący duże potencjalnie zagrożenie techniczno–medyczne.

PODSUMOWANIE

Ze względu na szczególne wymagania wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. W planowanym cyklu badań oparto się na krajowym podejściu faworyzującym deterministyczne metody modelowania półzamkniętych systemów oddechowych SCR stanowiącej element systemu nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego typu SCR CRABE SCUBA. Zagadnienia wentylacji przestżeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA zarówno premiksem jak i tlenem są problemami kluczowymi dla projektu, dlatego stanowią główną kanwę prowadzonych badań. Przy budowie tego systemu zastosowano podejście procesowe oraz metody inżynierii systemów. W warunkach krajowych walidacja przyjętych teorii metodami wnioskowania w oparciu o rozkład binominalny nie jest możliwa do przeprowadzenia, stąd wnioskowanie oparto o analizę sekwencyjną [23].

Realizowany projekt dotyczy technologii nurkowań MCM realizowanych w szerokim zakresie głębokości, jako elementu systemu wojny minowej. Nurkowania powinny być prowadzone od powierzchni do ok. 80 mH₂O a do pokrycia różnych zakresów głębokości wykorzystywany będzie tlen do dekompresji oraz różne mieszaniny Nitroksowe do głębokości 50 mH₂O, zaś głębiej mieszaniny na bazie helu¹⁶⁶. Dekompresja zasadniczo powinna być akcelerowana przez wykorzystanie tlenu. Szczególnie istotnym wydaje się kontekst wykorzystania technologii nurkowych jako elementów systemu wojny

minowej. Należy dążyć do tego aby konserwatyzm technologii stwarzał zagrożenie w granicach¹⁶⁷ (1;3)% zagrożeniu DCI przy szacowaniu go, jak dla zagrożenia epidemiologicznego. W projekcie nie zakładano badań nad możliwościami podejmowania nurkowań powtarzalnych czy powtórzeniowych.

Przy realizacji projektu zwracana będzie uwaga na wybrane problemy higieny życia i pracy nurka oraz treningów adaptacyjnych. Wypracowane procedury SOP wynikające z poprzednio prowadzonych prac oraz przepisów będą zachowywane i w miarę konieczności rewidowane.

Zadaniem projektu jest opracowanie technologii nurkowań punktowych. Takie podejście wymaga zarówno opracowania technologii nurkowań uwzględniającej brak wykonywania dodatkowej pracy przez nurka, gdzie głównym problemem jest zagrożenie możliwością wystąpienia objawów ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn, oraz nurkowań wysiłkowych wykonywanych w sytuacjach awaryjnych, stwarzającym potencjalne zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS.

Z tradycji kulturowanej w Marynarce Wojennej RP wynika, że system dekompresji powinien być zabezpieczony systemem umożliwiającym realizację procesu dekompensacji w warunkach utrudnionych. System taki powinien składać się z procedur hiperbarycznych, oraz zawierać wymagane uzbrojenie techniczne i medyczne do ich przeprowadzenia łącznie z procedurami ewakuacji nurka do specjalistycznego ośrodka hiperbarycznego czy szpitala. Układ elementów systemu zabezpieczenia realizacji procesów leczniczych może być zapożyczony, lub opracowany na nowo. System tabel rekompresji leczniczej powinien przewidywać procedury lecznicze na wypadek „wyrzucenia” nurka ze znacznych głębokości z pominięciem stacji dekompresyjnych.

Wykorzystanie aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego i mieszanin o podwyższonej zawartości tlenu wymaga opracowania procesu rekrutacji nurków i utrzymania ich w kondycji. Zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej oraz objawów ośrodkowej toksyczności tlenowej przyjęto na wyższym poziomie niż dla nurków rekreacyjnych.

Ważnym parametrem operacji nurkowej jest możliwość obciążania nurka pracą, która jest powiązana z procesem wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu, a także z procesem dekompresji i narastania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową.

Niezależnie od momentu czasu i głębokości przejścia na dekompresję tlenową należy poszukiwać efektywnej procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem. Bezpośrednio od jej skuteczności zależy będzie algorytm akceleracji dekompresji. Oczywiście należy rozpatrzyć sposób powtórnego przejścia w dowolnym momencie z dekompresji tlenowej na dekompresję z wykorzystaniem mieszaniny gazowej.

System prowadzenia prac podwodnych może nie przewidywać możliwości prowadzenia nurkowań powtarzalnych, powinien jednak normować czas odpoczynku jaki powinien upłynąć do powtórnego nurkowania.

Predefiniowanie algorytmu utrzymania stałego, założonego składu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego przez aparat nurkowy wymaga poczynienia założeń dotyczących parametrów osobniczych nurka, które nie zawsze muszą być spełnione, stąd nurkowie powinni być badani pod kątem ich spełnienia. Parametry osobnicze nurka ulegają zmianie wraz z wiekiem nurka i stopniem przygotowania/wytrenowania. Wydaje się dobrą praktyką sprawdzanie kluczowych dla bezpieczeństwa parametrów osobniczych nurka podczas każdego szkolenia na wyższe uprawnienia nurkowe.

W procesie analizy bezpieczeństwa nurkowania w Marynarce Wojennej RP kluczowe jest odpowiednie przygotowanie kondycyjne, wydolnościowe i dekompresyjne nurka, gdyż parametry osobnicze nurka ulegają czasami znacznym fluktuacjom w skutek treningu adaptacyjnego lub jego zaniechania. Kontrola parametrów osobniczych nurka możliwa jest podczas obowiązkowych treningów, gdy odbywają się one przy wykorzystaniu wysiłkowych symulatorów hiperbarycznych, najlepiej hiperbarycznych symulatorów pływania czy wykonywania prac podwodnych¹⁶⁸, stanowiąc element zapobiegania sytuacjom potencjalnie niebezpiecznym.

WNIOSKI

Naukowe podejście polega na tyle dokładnym poznaniu zachodzących procesów w badanym systemie, aby możliwe było prognozowanie jego zachowania w przyszłości¹⁶⁹ z zadawalającą wiarygodnością¹⁷⁰.

W projekcie zastosowano podejście procesowe do opracowania teorii dającej możliwość planowania działań podwodnych. Ustanowiony w projekcie wiarygodny¹⁷¹ model deterministyczny dla ergonomicznego systemu człowiek–maszyna daje możliwość predykcji¹⁷² z wystarczającą wiarygodnością. Opisany proces modelowania deterministycznego ze swej natury umożliwia ciągłe poprawianie precyzji predykcji oraz szacowanie poziomu zagrożenia, przy zdiagnozowaniu odchylenia od powtarzalności czy precyzji modelu. Jest to ważne, gdyż ze względu na szczególne wymagania, wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. o jej opublikowaniu wiązała się z odpowiedzią na pytania kwestionujące sens podejmowania projektu. Dokumenty projektu były wielopoziomowo oceniane przez różne instytucje także niezależnych ekspertów naukowych. Opinie podważające zasadność podjęcia decyzji o uruchomieniu projektu godzą w ich autorytet. Większość z decydentów jest mi nieznana, lecz ochrona wyników ich pracy jest moją powinnością z racji roli kierownika projektu. Mam nadzieję, że postawy negujące podjęte decyzje wynikały jedynie z nieświadomości jak głęboki i dokładny był proces myślowy leżący u podstaw podjętej decyzji.

Informacja o projekcie jest w swej naturze informacją publiczną i wszelkie instytucje oraz osoby posiadające wiedzę na ten temat są zobowiązane do odpowiedzi na zadawane pytania. Opracowany wniosek o podjęcie projektu stanowi w Polsce dobro prawnie chronione, stąd najlepszą drogą jego ujawnienia jest publikacja naukowa autora. Stąd jeśli nadal będzie zapotrzebowanie na dalsze wyjaśnienia, to na przeszkodzie dalszego ujawnienia założeń do projektu stoi jedynie aprobata czasopisma drukującego tak obszerny materiał.

LITERATURA

1. Kłos R. Designing of diving technologies – process approach. Polish Hyperbaric Research. 2019, Tom 66, 1, strony 7-24.
2. Huggins K.E. The dynamics of decompression workbook. Ann Arbor : The University of Michigan, 1992.
3. Kłos R. Securing the hyperbaric treatment of decompression sickness in the Polish Navy. Polish Hyperbaric Research ISSN 1734-7009; e-ISSN 2084-0535. 2018, Tom 65, 4, strony 7-23. Polish-English Bilingual Publication.
4. —. 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.
5. Predictive studies IV. Work capability and physiological effects in He-O₂ excursions to pressures of 400-800-1200-1600 fsw. Philadelphia : Institute for Environmental Medicine University of Pennsylvania, 1978. Report 78-1.
6. Report of proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea operational diving. Proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea. Heathrow : Hotel London, 4-5 Nov1976.
7. Lambertsen C.J. Studies in isobaric counterdiffusion . Filadelfia : Institute for Environmental Medicine , 1986.
8. Kłos R. Pollutions of the hyperbaric breathing atmosphere. Scientific Journal of Polish Naval Academy. 2017, Tom 208, DOI: 10.5604/0860889X.1237621, strony 31-44.
9. Kłos, R. Wapno sodowane w zastosowaniach wojskowych. Gdynia : brak nazwiska, 2009. ISBN 978-83-924989-5-7.
10. Kłos I. i Kłos R. Polish Soda Lime in military applications. Oświęcim : Chemical Company DWORY S.A., 2004. ISBN 83-920272-0-5.
11. Bennett P.B., Elliott D.H. The physiology and medicine of diving. London : W.B. Saunders Company Ltd., 1975. ISBN 0-7020-0538-X.
12. Brubakk A.O., Neuman T.S. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. brak miejsca : Saunders, 2003. ISBN 0-7020-2571-2.
13. Kłos R. Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
14. —. Modelowanie procesów wentylacji obiektów normo- i hiperbarycznych. Gdynia : Akademia Marynarki Wojennej, 2007. Rozprawa habilitacyjna. PL ISSN 0860-889X nr 160A.
15. PN-EN-14143. Sprzęt do nurkowania. Autonomiczne aparaty do nurkowania z obiegiem zamkniętym. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2005. ICS 13.340.30; 97.220.40.
16. Frånberg O. Oxygen content in semi-closed rebreathing apparatuses for underwater use: Measurements and modeling. Stockholm : School of Technology and Health, 2015. ISSN 1653-3836.
17. Kłos R. Inherent unsaturation. The risk of central nervous system oxygen toxicity part 1. Polish Hyperbaric Research. 1, 2014, Tom 46, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR, strony 37 – 64.
18. —. The he pathophysiology related to the toxic effect of oxygen. the hazard of central oxygen toxicity part 2. Polish Hyperbaric Research. 2014, Tom 47, HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.47.2, strony 15-34.
19. —. Survival analysis. The risk of central oxygen toxicity part 3. Polish Hyperbaric Research. 3, 2014, Tom 48, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.3, strony 33 – 48.
20. —. The hazard of central oxygen toxicity occurrence. The risk of central oxygen toxicity part 4. Polish Hyperbaric Research. 4, 2014, Tom 49, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.49.2, strony 19 – 31.
21. Shykoff B. Performance of various models in predicting vital capacity changes caused by breathing high oxygen partial pressures. Panama City : Navy Experimental Diving Unit, 2007. NEDU Report TR 07-13.
22. Gerth W.A. Overview of survival functions and methodology . [aut. książki] Weathersby P.K. Gerth W.A. Survival analysis and maximum likelihood techniques as applied to physiological modeling. Kesington : Undersea and Hyperbaric Medical Society Inc., 2002.
23. Kłos R. Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26.
24. Donald K.W. Oxygen poisoning in man part I. British Medical Journal. May 17, 1947, strony 667-672.
25. Donald K. Oxygen and the diver. Harley Swan : The SPA Ltd., 1992. ISBN 1-85421-176-5.
26. Harabin A.L. Human central nervous system oxygen toxicity data from 1945 to 1986. Bethesda: Naval Medical Research Institute, 1993. NMRI 93-03; AD-A268-225.
27. NOAA. NOAA diving manual - diving for science and technology. [red.] Administration National Oceanic and Atmospheric. VI. Flagstaff : Best Publishing Co., 2017. ISBN 9781930536883.
28. Bühlmann A.A. Decompression-Decompression sickness. Berlin : Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9.
29. Kłos R. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0.
30. —. System trymiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE. Gdynia: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5.
31. Wald A. Sequential Analysis. New York : Jon Willey & Sons, Inc., 1947.
32. Kłos R. Test tolerancji tlenowej. Polish Hyperbaric Research. 2013, Tom 45, 4, strony 69-78.
33. PN-EN 60812:2009. Techniki analizy nieuszkodzalności systemów Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA). Warszawa : Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. ICS 03.120.01; 03.120.30; 21.020.
34. Kłos R. Diagnozowanie ryzyka na przykładzie wyższej uczelni technicznej. Logistyka. listopad-grudzień, 2013, 6, strony CD1: 275-294.

35. —. Katalityczne utlenianie wodoru na okręcie podwodnym. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2015. ISBN 978-83-938-322-3-1.
36. Abysmal Diving Inc. Advanced Dive Planning Software. [CD] 6595 Odell Place, Suite G. Boulder Colorado, 80301: Abysmal Diving Inc., 2001. ABYSS-2000 v.2.30.17.
37. von Ahsen A. Cost-oriented failure mode and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management 25: 2008. 2008, Tom 25, DOI: 10.1108/02656710810873871, strony 466-476.

dr hab. inż. Ryszard Kloś, prof. nadzw.

AMW Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
Tel: +58 626 27 46

ORCID identifier No: 0000-0002-4050-3978

¹ metodyka to zbiór zasad dotyczących sposobów prowadzenia wybranych procesów,

² Semi-Closed Rebreather Self-Contained Underwater Breathing Apparatus,

³ technologia rozumiana jest tutaj jako optymalizacja systemu dla danego procesu,

⁴ chyba, że zostaną skierowane wnioski o ich dokładniejszą interpretację,

⁵ wynikającej z taktyki,

⁶ na drodze różnych analiz, jak studium wykonalności, konkurencyjności czy analizy ryzyka,

⁷ system, w którym zastosowano więcej elementów, niż to jest konieczne ze względów funkcjonalnych, w celu zwiększenia jego niezawodności,

⁸ choć wcale tak być nie musi,

⁹ Mine Counter Measure,

¹⁰ czyli małym prawdopodobieństwem wystąpienia nawet ograniczonych symptomów DCS (DeCompression Sickness),

¹¹ wolniejszy dla procesu dekompresji,

¹² w piśmiennictwie polskim ten sposób postępowania nazywany jest dekompresją wydłużoną,

¹³ konserwatywizm będzie wynosił 100% dla gradientu wynoszącego 30% wartości maksymalnego przesylenia a 0% dla 70% wartości tego gradientu,

¹⁴ Decompression illness, jako pojęcie szersze od DCS, przykładowo uwzględniające ośrodkowe zatrucie tlenowe CNSyn (Central Nervous Syndrome),

¹⁵ usprawnienia osób niepełnosprawnych,

¹⁶ umożliwienie osobie z niepełnosprawnością uczestniczenie w życiu, społecznym i sportowym, na poziomie zbliżonym do innych osób z podobną niepełnosprawnością; przykładowo, nurkowania osób bez niektórych kończyn czy kluby nurkowe diabetyków,

¹⁷ przykładowo awarii dźwigu, wyciągarki, pojazdu podwodnego, wystąpienia wybuchu, przesunięcia wraku czy jego elementu itp.,

¹⁸ taka sytuacja występuje przy ratowaniu nurka przez jego nurka zabezpieczającego podczas każdego typu nurkowania,

¹⁹ Explosive Ordnance Disposal,

²⁰ Special Response Team,

²¹ dotyczy to działań w warunkach pokoju przy zwalczaniu terroryzmu, lecz przy podejmowaniu działań asymetrycznych przeciwnika aprobowany apetyt na ryzyko może osiągać znacznie wyższe wartości,

²² niektóre kraje stosują procedury szacowania zagrożenia i doborzenia go według oceny sytuacji taktycznej,

²³ awaryjnie do głębokości 60 mH₂O,

²⁴ możliwe wydaje się także wykorzystanie neonu,

²⁵ powyżej 1% lecz nie więcej niż 3%,

²⁶ Decompression Sickness,

²⁷ gdyż najczęściej w celu intensyfikowania dekompresji używane są możliwe wysokie ciśnienia cząstkowe tlenu,

²⁸ przykładowo, czasu odpoczynku przed nurkowaniem czy niezakłóconego snu w nocy poprzedzającej nurkowanie,

²⁹ bez względu na czas pobytu na niej,

³⁰ ciekawym rozwiązaniem może być zastosowanie Neoksu,

³¹ przykładowo, przy wchodzeniu do dzwonu nurkowego,

³² Human Factors,

³³ Ventilatory Equivalent for Oxygen,

³⁴ w znaczeniu zjawisk fizycznych lub psychicznych będących przedmiotem poznania doświadczalnego,

³⁵ umownie klasyfikowano nurków na „delikatnych” i „odpornych” na warunki forsownej dekompresji,

³⁶ aktualnym nastawieniem do nurkowania,

³⁷ odporność na wpadanie w panikę, melancholię, przygnębienie czy rezygnację nie jest równoznaczna z umiejętnością trzeźwej oceny sytuacji, jasnego korzystania z zasobów wiedzy i podejmowanie efektywnych działań w warunkach stresu,

³⁸ oczy stanowią „zwierciadło duszy”,

³⁹ napięcie mięśni czy drżenie można sprawdzić przy sprawdzeniu oporządzenia mimochodem dotykając mięśni czy położeniu dłoni na ramieniu,

⁴⁰ nie tylko akcji serca ale i wypełnienia,

⁴² sprawdzenie czy nurek pamięta i ma łatwy dostęp do zaworów, przełączników, zegarka, panelu, noża itp.,

⁴³ dekompresja nie kończy się z chwilą osiągnięcia powierzchni, lecz stan równowagi z atmosferą oddechową osiągnąony jest na drodze powolnej dekompresji izobarycznej, po nurkowaniach saturovaniych proces ten jest najdłuższy,

⁴⁴ do jednej godziny po zakończeniu poprzedniej dekompresji,

⁴⁵ ponad jedną godzinę od zakończenia poprzedniej dekompresji,

⁴⁶ czas klirensu (od clearance),

⁴⁷ nie musi to być atmosfera powietrzna, gdyż nurek może oddychać na powierzchni, przykładowo z inhalatora tlenowego,

⁴⁸ zapewnia to, przykładowo sięgnięcie po wyrwany z ust ustnik, dostęp do zaworów, ewentualnie wałęsających się linek, roślinności, które mogą oplątać nurka itp.,

⁴⁹ w akwenach może dojść do stratyfikacji temperatury w warstwach wody, w termoklinie następuje szybka zmiana temperatury wraz ze zmianą głębokości,

⁵⁰ przykładowo, podczas wykonywania prac transportowych czy podczas wypoczynku polegającym na plażowaniu,

⁵¹ Standard Operating Procedures,

⁵² vasoconstriction,

⁵³ w obrocie znajduje się tlen 6.0N co oznacza 99,9999% tlenu w gazie,

⁵⁴ choć i w takim przypadku zawartość zanieczyszczeń rośnie wraz ze wzrostem „przestrzeni martwych”,

⁵⁵ washout period,

⁵⁶ płukanie przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego podczas pobytu na dnie jest niepożądane ze względu na bezpośrednią bliskość miny lub systemów detekcji i zwalczania nurków,

⁵⁷ przykładowo, nurkowi łatwiej jest podwoić przewidziany czas dekompresji tlenowej i przejścia jej przy wykorzystaniu mieszaniny operacyjnej przy awarii zasilania tlenem niż przeliczać ten czas według innej formuły,

⁵⁸ bardziej konserwatywnych,



- ⁵⁹ nurek pomija pewną część dekompresji by po wynurzeniu i ograniczonym czasowo przebywaniu na powierzchni, zostać powtórnie sprężonym i odbyć dalszą dekompresję w komorze dekompresyjnej,
- ⁶⁰ czyniąc go bardziej konserwatywnym,
- ⁶¹ sztuczne powiększenie czasu pobytu na dnie,
- ⁶² ten wariant technologii uwzględnia sytuację awaryjną, gdy nurek musi wykonywać pracę, np. przeciwstawienia się prądom morskim,
- ⁶³ Treatment Tables,
- ⁶⁴ jak przejście z wynikiem pozytywnym testu tolerancji tlenowej,
- ⁶⁵ zazwyczaj dla nurków rekreacyjnych zagrożenie podaje się na poziomie $p = 1\%$ a dla nurków bojowych $p \leq 5\%$ z istotnością $\alpha = 0,01$,
- ⁶⁶ poza strefą saturacji wydatkowanie większego wysiłku jest niebezpieczne,
- ⁶⁷ spoczynek będzie potrzebny przy wykonywaniu prac minerskich bądź wymuszony sytuacją taktyczną związaną z koniecznością ograniczenia emisji hałasu, lecz w takim przypadku należy rozpatrzyć problem wzrostu zagrożenia zatruciem tlenowym,
- ⁶⁸ przykładowo o otwartym obiegu czynnika oddechowego,
- ⁶⁹ przykładowo, w postaci dodatkowych aparatów zabieranych przez nurka czy podwieszanych w toni wodnej,
- ⁷⁰ można dodać wiele dodatkowych elementów systemu, jak podsystem komunikacji podnoszący komfort psychiczny, mający niebagatelny wpływając na procesy dekompresji,
- ⁷¹ przyspieszenia,
- ⁷² przykładowo, gdy nastąpi awaria zasilania tlenem,
- ⁷³ podwieszane w toni lub zabierane przez nurka dodatkowe aparaty oddechowe,
- ⁷⁴ według praktyki Kanadyjskiej, jednak w Polsce dopuszczano przerwę do 5 min.,
- ⁷⁵ w takim przypadku istnieje znacznie większa pewność, że nurek dotrze na czas do komory dekompresyjnej,
- ⁷⁶ takie konstrukcje spotykane są dla systemów oddechowych zasilanych przewodowo, przykładowo Polycom 101 produkcji Drägerwerk AG Lübeck,
- ⁷⁷ przykładowo, narażenia na narkozę azotową,
- ⁷⁸ przykładowo, przy zanurzeniu i pobytku na dnie użyty zostanie Trimix a w procesie dekompresji zastąpiony zostanie on Nitroksen a później tlenem,
- ⁷⁹ nie zawsze ciśnienia cząstkowe gazów komponentów czynnika oddechowego ($p_{1..p_j, p_i}$) muszą zmieniać się płynnie ze zmianą głębokości H, gdyż aparat nurkowy może realizować algorytm utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego danego gazu przez dostosowaną zmianę jego zawartości podczas zmiany ciśnienia, jak aparaty realizujące stałe ciśnienia cząstkowe tlenu p_i : Mk15/16,
- ⁸⁰ nie dotyczy to nurków z plateau saturacji,
- ⁸¹ dostarczanie tlenu może być także realizowane poprzez jego dostarczanie do obiegu wraz z innymi komponentami czynnika oddechowego,
- ⁸² przykładowo, szarpnięcia się podczas napadu paniki,
- ⁸³ element wykonawczy systemu automatyki, który realizuje predefiniowany proces reakcji na wymuszenie,
- ⁸⁴ często pod kontrolą elektroniczną,
- ⁸⁵ obniżenie akcji oddechowej u wytrenowanych sportowców w stosunku do średniej,
- ⁸⁶ obniżenie akcji serca u wytrenowanych sportowców w stosunku do średniej; efekt ten pogłębiany jest przy imersji wodnej (w odróżnieniu od imersji w środowisku wirtualnym, sztuce czy kulturze),
- ⁸⁷ nie chodzi tu o trening nurkowy, lecz trening adaptacyjny do uprawiania innych aktywności,
- ⁸⁸ w warunkach rzeczywistych takie sprawdzanie jest jak dotąd trudno realizowalne,
- ⁸⁹ technologia powinna posiadać zadeklarowany apetyt na ryzyko, który bezpośrednio wynika z kontekstu taktycznego,
- ⁹⁰ External/Auxiliary Breathing System, awaryjny system oddechowy "ponny" itp.,
- ⁹¹ ze względu na zabezpieczenie cieplne zapobiegające wyziębieniu i przegrzaniu a przez to mające wpływ na zagrożenie tlenową formą zatrucia tlenowego CNSyn,
- ⁹² opracowane zostały analizatory składu/ciśnienia cząstkowego tlenu oraz zawartości ditlenku węgla stanowiące opcjonalne wyposażenie dla aparatu SCR CRABE SCUBA,
- ⁹³ teoria i praktyka posługiwania się sprzętem i wyposażeniem dla osiągnięcia zamierzonego celu,
- ⁹⁴ Mine Countermeasures,
- ⁹⁵ Explosive Ordnance Disposal,
- ⁹⁶ Improvised Explosive Device Disposal,
- ⁹⁷ Mine Countermeasures Vessel,
- ⁹⁸ Autonomous Underwater Vehicle,
- ⁹⁹ Unmanned Undersea Vehicles,
- ¹⁰⁰ Remotely Operated Underwater Vehicle,
- ¹⁰¹ stanowiący pojazd zwiadowczy operujący z okrętu,
- ¹⁰² Autonomous Surface Vehicle,
- ¹⁰³ Network Centric Warfare,
- ¹⁰⁴ MCMV z reguły potrzebują osłony innej klasy okrętów i lotnictwa,
- ¹⁰⁵ nurkowie MCM mogą być przykładowo wykorzystywani do: uwalniania zaplątanych elementów wyposażenia MCMV, stropowania przy wylawianiu torped ćwiczebnych strzelanych przez okręty podwodne, wylawiania lub niszczenia niezdetonowanych samobieżnych lub zrzuconych ładunków wybuchowych itp.,
- ¹⁰⁶ także skrycie, przykładowo przez okręty podwodne,
- ¹⁰⁷ przykładowo, infrastruktury zabezpieczającej przed działaniami rozpoznawczymi lub desantowymi,
- ¹⁰⁸ Unexploded Ordnance,
- ¹⁰⁹ technologia nurkowania dotycząca takich działań powinna różnić się od typowo wojennej oraz ćwiczebnej,
- ¹¹⁰ przykładowo przez raptowne odciążenie przez szybką łódź, zdmuchnięcie podmuchem skierowanym ze specjalnej armatki itp.,
- ¹¹¹ przykładowo kurtyn powietrznych pod wodą czy rękawów wodnych, obkładania gumą, plastikiem tłumiącym falę uderzeniową, wykorzystywanych na lądzie,
- ¹¹² działania polegające na zniszczeniu elektroniki lub zagłuszeniu sygnałów wewnętrznych i zewnętrznych,
- ¹¹³ kółkiem drewnianym plastikowym, ołowiem, strumieniem wody itp.
- ¹¹⁴ Explosively Formed Penetrator,
- ¹¹⁵ Przyjmując, jako wariant alternatywny operacji uderzenie z wprowadzeniem w pierwszej linii jednostek mogących wystrzelić ładunki wydłużone i przepalici drogi dościa lub uderzenie przez uderzenie sił powietrznych lub raketowych w celu przepalenia przeprawy. Jednak uderzenie naraża operację na konieczność podjęcia boju, do którego przeciwnik może być przygotowany. Siły przeciwnika są w stanie wykryć i przeciwdziałać siłom szpicy uderzeniowej czy atakowi z powietrza. Oprócz tego zachowanie skrytości do chwili podjęcia desantowania nie może być spełnione. Dodatkowo, jeżeli poniesione zostaną znaczne straty własne, to pomimo pomyślnego przełamania zajęcia broniętego terenu lub prowadzenie pościgu może nie mieć szans powodzenia. Rozważenie użycia oddziałów SRT czy MCM do skrytego rozpoznania i zaminowania przeszkód, pomimo ok. 100% zagrożenia związanego z brakiem możliwości odzyskania pododdziału nurków, jeśli istnieje prawdopodobieństwo wykonania zadania z 70% pewnością przy 95% poziomie ufności wydaje się uzasadnione z punktu widzenia ekonomii prowadzenia działań bojowych pod warunkiem, że ewentualne wykrycie aktywności podwodnej może być natychmiast skompensowane wprowadzeniem realizacji wariantu przełamania,
- ¹¹⁷ przykładowo, postaci pływającego pierścienia,
- ¹¹⁸ przykładowo, posiadającej zdolność do przemieszczania się czy zagrzebywania,
- ¹¹⁹ około 35 lat temu,
- ¹²⁰ wykorzystanie modeli statystycznych zarezerwowano jedynie do procesu walidacji,
- ¹²¹ obranie takiej taktyki było trudne, gdyż w powszechnej opinii niemożliwym jest opracowanie wystarczająco dokładnych i wiarogodnych modeli deterministycznych dla tak skomplikowanego systemu interakcji człowiek–maszyna, jak w przypadku nurkowania,
- ¹²² zastosowano typowe podejście analityczne, które wymaga syntezy opracowanych modeli i walidacji przy wykorzystaniu modelu statystycznego,
- ¹²³ najczęściej objętości przestrzeni wentylowanej,
- ¹²⁴ ε – moduł oddechowy stanowi stosunek konsumpcji tlenu do wentylacji płuc $\varepsilon(H) = \dot{v}/\dot{V}_E$ odniesiony do głębokości nurkowania H,
- ¹²⁵ rekomendowanych może być co najmniej kilka: neo-haldanian, RGBM, VPM itp.,
- ¹²⁶ stosunek strumienia konsumowanego tlenu \dot{v} do strumienia wentylacyjnego \dot{V}_E : $\varepsilon = \frac{\dot{v}}{\dot{V}_E}$,
- ¹²⁷ powtarzalności i odtwarzalności z założoną dokładnością na przyjętym poziomie istotności,

- ¹²⁸ przykładowo, podobną do roli objętości wentylowanej w modelu wentylacji okrętu podwodnego [14],
¹²⁹ reprezentatywność grupy jest ograniczona do nurków spełniających kryteria dla nurków wojskowych oraz mogących występować w roli nurków eksperymentalnych,
¹³⁰ w stosunku do zawartości tlenu w premiksie x_w zasilającym przestrzeń oddechową,
¹³¹ dla ustabilizowanych wartości parametrów oddechowych nurka,
¹³² bioróżnorodnością,
¹³³ Human Factors,
¹³⁴ dla anaerobowych jest czynnikiem śmiertelnie toksycznym,
¹³⁵ objawy podobne do poparzenia płuc chemikaliami,
¹³⁶ w stosunku do ośrodkowego układu nerwowego,
¹³⁷ zmniejszenie zawartości czerwonych krwinek, spadek życiowej pojemności płuc, osłabienie tlenowe itp.,
¹³⁸ Central Nervous Syndrome,
¹³⁹ teoria ta stanowi podstawę badań epidemiologicznych, badania na wymieralnością i bioróżnorodnością, niezawodności maszyn, analizy ryzyka itp.,
¹⁴⁰ powrót do stanu przed ekspozycją tlenową, polegający na dezaktywacji przez mechanizmy biochemiczne potencjalnie niebezpiecznych reaktywnych związków tlenowych w wyniku ekspozycji na wysokie ciśnienia parcjalne tlenu,
¹⁴¹ używany powszechnie w programach komputerowych do planowania cywilnych nurkowań technicznych [36],
¹⁴² uważanym za niebezpieczny dla szerokiego grona nurków,
¹⁴³ możliwość przeprowadzenia dekompresji na ostatniej stacji na głębokości 6 mH₂O, możliwość zaniechania dekompresji tlenowej, możliwość obciążenia dodatkowym wysiłkiem, uwzględnienie poprzednich nurkowań, uwzględnienie typu transportu, uwzględnienie nurkowania w niskiej temperaturze itp.,
¹⁴⁴ odchylenia te występują gdy nurek posiada znacznie rozbudowaną tkankę mięśniową w stosunku do typowej, z tego powodu został odrzucony jeden nurek,
¹⁴⁵ Treatment Tables,
¹⁴⁶ gdyż nurkowania wojskowe wykonywane są w parach,
¹⁴⁷ odtwarzalności i powtarzalności,
¹⁴⁸ przykładowo, w przygotowaniu kondycyjnym nurka, zmniejszeniu skuteczności płukania przestrzeni oddechowej aparatu, złego konfekcjonowania czynników oddechowych lub obniżenia ich wymaganej jakości, złego opakowania pochłaniacza lub obniżenia jego parametrów jakościowych itp.,
¹⁴⁹ przypadków chorobowych o rzadkim przebiegu czy rzadko występujących,
¹⁵⁰ większość elementów systemu pozwalającego na realizację projektu stanowi opisana dalej baza laboratoryjna Akademii Marynarki Wojennej
¹⁵¹ wdrożenie krajowej technologii nurkowania wynikało z braku niektórych procedur wymaganych tradycją i prawem krajowym, których nie posiada dostarczona z aparatem technologia nurkowania o czym będzie mowa dalej,
¹⁵² Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats,
¹⁵³ CPBR 9.5 cel wdrożeniowy 31 Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą na głębokości 120 m.,
¹⁵⁴ CPBR 9.2 cel 17.07 Opracowanie systemu ekspozycji saturowanych w strefie do 100 m i zasad zabezpieczenia badawczo-medycznego nurków,
¹⁵⁵ przy niezależnych nurkowaniach głębokowodnych należy liczyć się z wyrzuceniem nurka ze znacznych głębokości,
¹⁵⁶ przyczynowo–skutkowe,
¹⁵⁷ nurkowie EOD nawet w warunkach pokoju muszą utrzymywać dyżury patroli minerskich,
¹⁵⁸ jak zaznaczono przy okazji opisywania kontekstu taktycznego,
¹⁵⁹ cost-oriented FMEA [37],
¹⁶⁰ tutaj należy rozumieć jako niejednoznaczne,
¹⁶¹ praca dodatkowa żołnierzy poza godzinami służbowymi jest dopuszczalna prawnie,
¹⁶² przykładowo: zakwaszenie organizmu spowodowane forsownym treningiem, obecność alkoholu w organizmie, niewyspanie itp.,
¹⁶³ mieszanina oddechowa zasilająca aparat nurkowy,
¹⁶⁴ Standard Operating Procedures,
¹⁶⁵ Good Laboratory Practice,
¹⁶⁶ wpływ,
¹⁶⁷ możliwe wydaje się także wykorzystanie neonu,
¹⁶⁸ powyżej 1% lecz nie więcej niż 3%,
¹⁶⁹ w warunkach rzeczywistych takie sprawdzanie jest jak dotąd trudno realizowalne,
¹⁷⁰ predykcji,
¹⁷¹ naturalnym przykładem może być takie poznanie procesów pogodowych zachodzących w systemie atmosfery, aby móc z dostateczną powtarzalnością przewidywać zjawiska pogodowe z zadawalającą precyzją,
¹⁷² dostatecznie precyzyjnego i powtarzalnego do przyjętych zastosowań,
¹⁷³ oparte na przesłankach naukowych przewidywania dróg przebiegu przyszłych procesów albo zmian cech systemu,
¹⁷⁴ Critical to Quality.