POLISH HYPERBARIC RESEARCH 1(66)2019
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Polish Naval Academy

PROJEKTOWANIE TECHNOLOGII NURKOWANIA - PODEJŚCIE PROCESOWE

Ryszard Kłos

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

Opisano skrótowo nową metodykę[1] podejścia przy pracach nad technologią wykorzystania aparatu nurkowego typu Nx – SCR CRABE SCUBA[2] różną od opisanej wcześniej [1,2]. Nowa metodyka opiera się na krajowej teorii[3] zawierającej przede wszystkim deterministyczne metody[4] modelowania półzamkniętych systemów oddechowych SCR. Dalsze badania[5] mogą być odtąd prowadzone w sposób bardziej wiarogodny, z niedostępną dotąd efektywnością.
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. 66 Issue 1 pp. 7 - 24
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.2478/phr-2019-0001
Strony: 18, rysunki: 4, tabele: 0
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 07.11.2018 r.
Termin zatwierdzenia do druku: 12.12.2018 r.

POZYSKIWANIE WIEDZY

Opisanie świata jest coraz dokładniejsze a przez to coraz bardziej skomplikowane. Zjawiska będące wynikiem zachodzących procesów, najczęściej opisywane są za pomocą modeli[6], opisanych językiem matematyki, w postaci związków deterministycznych[7], które odzwierciedlają z akceptowaną wiarogodnością zachodzące procesy w badanym systemie.

Matematyczne sposoby opisania procesów bazują na różnych podstawach. Gdy nie można zbudować dostatecznie wiarogodnego związku deterministycznego, opis procesu opiera się o interpretacje stochastyczne[8] lub tworzy się opis empiryczny[9]. Opis stochastyczny może być w naturalny sposób zastosowany do procesów o mechanizmie probabilistycznym[10]. Gdy nie jest znany mechanizm[11] deterministyczny do opisania zachodzących procesów, zadaniem metod statystycznych[12] jest nadawanie większego sensu danym[13] [4].

Różne rodzaje wiedzy[14] nabywa się na różne sposoby, lecz najlepszym wydaje się sposób naukowego pozyskiwania.

Nauka jest jednym z rodzajów wiedzy ludzkiej wyróżniający się stosowanymi metodami oraz wykorzystywanym językiem opisu składającymi się na metanaukę. W wymiarze praktycznym, zadaniem nauki jest poznanie prawdy w celu późniejszej predykcji, czyli przewidywania przyszłych realizacji procesów zachodzących w zdefiniowanych systemach.

Nauka[15] składa się z teorii. Dobrze określona teoria posiada sprecyzowany: miejsce w systemie wiedzy, ustalony przedmiot poznania, jego otoczenie[16], swoiste metody i język[17]. Nauka o metodach i języku danej nauki stanowi metanaukę[18] zwaną metodologią[19]. Doskonałą definicję teorii, uwzględniającą postrzeganie modelowe i konieczność walidacji[20], podał Papież Franciszek[21] – „Teoria jest konstrukcją metanaukową odrębną od rezultatów obserwacji, ale zgodną z nimi. Dzięki teorii, można połączyć w całość pewien zbiór niezależnych od siebie danych i faktów i wyjaśnić je w ramach jednolitej interpretacji. Teoria okazuje się słuszna w takiej mierze, w jakiej pozwala się zweryfikować; jest nieustannie oceniana w świetle faktów; kiedy przestaje uwzględniać fakty, ujawnia swoje ograniczenia i nieprzydatność. Wymaga wówczas ponownego przemyślenia" [6].

Choć eksperymentowanie jest: trudne, kosztowne, czasochłonne, często kontrowersyjne[22], niejednoznaczne lub wręcz w danych warunkach niemożliwe czy nieopłacalne, to w odróżnieniu od nauk teoretycznych, prowadzenie badań jest jedyną drogą naukowego poznania w naukach eksperymentalnych.

PODEJŚCIE HOLISTYCZNE

Tradycyjnie, przy opracowywaniu systemów nurkowych stosowano w Polsce metodykę postępowania opartą o ocenę zagrożenia chorobą dekompresyjną DCS metodami wnioskowania statystycznego. Klasyczne podejście bazuje na wnioskowaniu statystycznym na podstawie przeprowadzonych eksperymentów w oparciu o rozkład binominalny[23].

Na podstawie dostępnej wiedzy układa się plan eksperymentu walidacyjnego badanego systemu, który w tym przypadku stanowi ergonomiczny układ maszyna-człowiek[24]. Następnie multiplikuje się z wymaganą odtwarzalnością i powtarzalnością[25] tę samą doświadczalną ekspozycję hiperbaryczną zbierając odpowiedzi systemu w postaci dychotomicznej[26].

Zebrane wyniki służą do określenia zagrożenie DCS, wyrażonego prawdopodobieństwem wystąpienia objawów DCS w przyszłości, w oparciu o rozkład binominalny. Wnioskowanie takie wymaga znacznych nakładów na przeprowadzenie nurkowań eksperymentalnych[27]. Aby potwierdzić, że zagrożenie DCS jest mniejsze niż 1% należy wykonać minimum 299 nurkowań eksperymentalnych bez wystąpienia przypadku DCS. Jeśli podczas cyklu wystąpi jeden przypadek DCS należy kontynuować badanie do skompletowania 555 nurkowań eksperymentalnych bez wystąpienia już jakiegokolwiek przypadku DCS, aby potwierdzić zagrożenie chorobą ciśnieniową na tym samym poziomie [7].

W warunkach krajowych stosowanie metody wnioskowania w oparciu o rozkład binominalny nie jest możliwe do wykorzystania. Dlatego dotąd prowadzono badania przesiewowe, wykorzystując analizę sekwencyjną [8]. Podobne podejście zaproponowane zostało przez Naval Medical Research Institute US Navy [9]. Procedura zapewnia odrzucenie rozkładu dekompresji, który generuje zagrożenie możliwością wystąpienia objawów DCS na poziomie większym niż 10% po maksymalnie 40 nurkowaniach eksperymentalnych[28] z prawdopodobieństwem ok. 90%.

W kraju, takie podejście stosowane było dla całego modelu dekompresji/wentylacji, gdyż wykorzystanie tej procedury do zatwierdzania każdego rozkładu dekompresji przewidzianego w technologii nurkowania jest w warunkach krajowych także nierealne[29].

PODEJŚCIE PROCESOWE

Wyróżniony[30] system stanowi racjonalnie minimalny[31] zbiór elementów wraz z synergicznymi[32] powiązaniami między nimi, gwarantujący możliwość przebiegu zdefiniowanych w nim procesów. Proces to przebiegający w czasie szereg działań nastawionych na osiągnięcie konkretnego celu. Warunki oddziałujące na proces stanowią kontekst wewnętrzny i zewnętrzny[33].

Układ to szereg elementów systemu uporządkowanych według ściśle określonych zasad. Relacja to wszelki związek, zależność, stosunek między dwoma lub większą liczbą elementów systemu. Układ i relacje składają się na strukturę systemu. Wyróżniony w systemie układ działań uporządkowany przyczynowo, przebiegający w określonym czasie, stanowiący studium rozwoju czegoś, stanowi proces.

Pojęcia systemu i procesu są podstawowymi w inżynierii systemów zajmującej się poszukiwaniem synergicznie optymalnych rozwiązań dla systemów technicznych i ekonomicznych[34], zdolnego do niezakłóconego podtrzymania realizacji ustalonych procesów podczas cyklu życia systemu.

Inżynieria systemów wydaje się obecnie najlepszym podejściem do rozwiązywania naukowych sytuacji problemowych, zarówno technicznych jak i organizacyjnych[35]. Jest to metoda analityczna, zatem opiera się na rozłożeniu

sytuacji problemowej na problemy składowe. Jako punkt wyjścia należy przyjąć podstawowe procesy, jakie musi podtrzymać tworzony system. W przypadku technologii nurkowania będą to scenariusze operacji nurkowych. Analizy ryzyka takich operacji będą stanowić podstawę do opracowania bazy scenariuszy awaryjnych. Na podstawie analizy procesów zasadniczych i awaryjnych przyjętej technologii prowadzenia operacji nurkowych można utworzyć optymalny system techniczno-organizacyjny, w otoczeniu którego będzie można bezpiecznie realizować wymagane procesy.

Od samego początku prowadzenia prac nad systemami dekompresji dla aparatów nurkowych w Polsce[36] uznano, że postęp krajowy możliwy jest jedynie poprzez poszukiwanie modeli deterministycznych[37]. Konsekwentnie trzymanie się tego założenia przez trzy pokolenia badaczy doprowadziło do opracowania efektywnych metodyk postępowania niewymagających finansowania tak rozległych i długotrwałych badań, jak opartych na modelowaniu statystycznym.

W stosowanym podejściu badawczym rozbija się sposób przewidywania zachowania ergonomicznego systemu człowiek-aparat nurkowy na szereg powiązanych modeli − rys. 1. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań wydaje się, że takie rozbicie na modele cząstkowe nie powoduje generowania istotnych błędów przy ich syntezie w model całościowy.

Sposoby modelowania wentylacji za pomocą równań różniczkowych są znane od wieków. Są to stosunkowo proste równania, które mogą być rozwiązane metodami analizy matematycznej. Jednak ich przydatność do niedawna była kwestionowana ze względu na brak możliwości wystarczająco dokładnego ustalenia niektórych parametrów tych modeli[38].

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 zostały przełamane ok. 20 lat temu po ok. 20 latach prac. Umożliwiło to także opanowanie modelowania deterministycznego wentylacji okrętu podwodnego, komory hiperbarycznej czy wyrobiska górniczego. Wykorzystanie tych osiągnięć w inżynierii przemysłowej i sanitarnej mogłaby doprowadzić do zmiany podejścia do problemów wentylacji [10].

Wcześniejsze badania nad wentylacją aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego skończyły się sukcesem ok. 20 lat temu [11]. Jednak aparaty tego typu zostały wycofane z użytku krajowego.

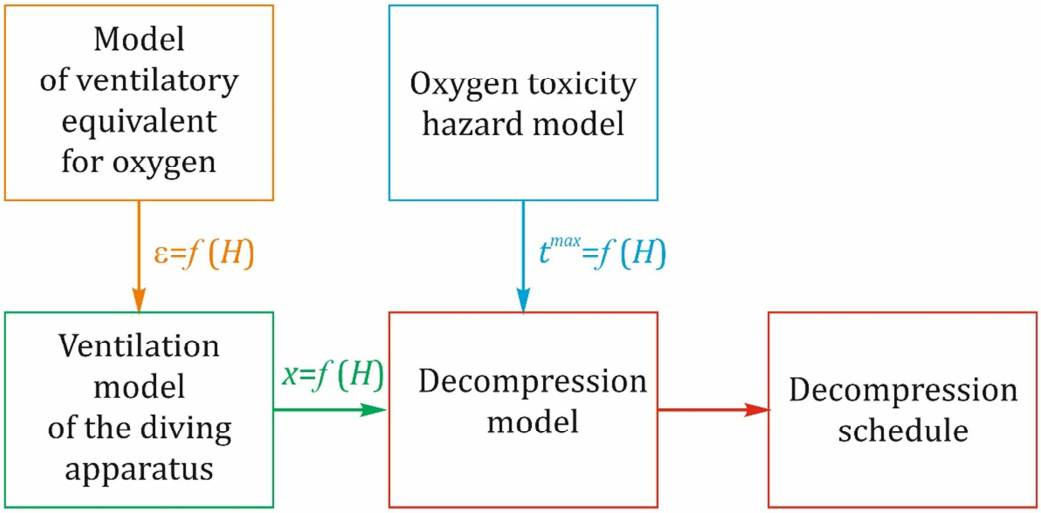
W podejściu do modelowania systemu nurkowania z wykorzystaniem aparatu Nx − SCR CRABE SCUBA zmieniono podejście ze statystycznego na statystyczno-deterministyczne. Podstawy opracowywania rozkładów dekompresji zostały oparte na kilku modelach pokazanych na rys.1:

- zmian modułu oddechowego ε w funkcji głębokości H: $\varepsilon = f(H)$, dla określonych parametrów nurkowania,
- zmian w składzie czynnika oddechowego wdychanego przez nurka w zależności od parametrów: głębokości H, modułu oddechowego ε, parametrów konstrukcyjnych dla półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego, składu premiksu x i temperatury,
- zmian w zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową w zależności od ciśnienia cząstkowego tlenu p_i i czasu ekspozycji t,
- projektowania dekompresji[39] oraz obliczanego według wybranego modelu profilu dekompresji, jako funkcji czasu ekspozycji hiperbarycznej t oraz ciśnienia H przy uwzględnieniu wpływu czynników zakłócających, jak: temperatury, wpływ poprzednich ekspozycji na dekompresję, wzrostu zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową, obciążenia dodatkową pracą, sekwencją zanurzenia i wynurzenia, przebytym transportem do miejsca zanurzenia, obciążeniem wysiłkiem przed i po nurkowaniu itp.

Funkcja $\varepsilon = f(H)$ zmian modułu oddechowego[40] ε w zależności od głębokości H nie jest kluczową z punktu widzenia wiarogodności[41] ustalenia wartości stabilnych zawartości tlenu x_s z modelu wentylacji. Stała się istotną, gdyż pozostałe modele wyznaczane są z znacznie większą wiarogodnością. Przy poszukiwaniu rozwiązań dla modelu różniczkowego wentylacji aparatu nurkowego zawierającego system worków umieszczonych jeden w drugim, parametr ten zaczął pełnić rolę kluczową[42].

Badania modułu oddechowego ε są dobrze opisane w dostępnym piśmiennictwie dla ciśnienia atmosferycznego, gdyż stanowią one ważny wskaźnik wytrenowania sportowców stanowiąc podstawę wielu badań dotyczących medycyny wysiłku i normowania pracy. Dotychczasowe przenoszenie tych wartości na badania hiperbaryczne generowało barierę w opracowywaniu systemów nurkowych. Wyniki badań modułu oddechowego ε dla określonych sytuacji hiperbarycznych można poszukiwać w rzadkich wydawnictwach specjalistycznych [12,13]. 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 reprezentatywnej grupie nurków eksperymentalnych[43].

Model wentylacji pozwala ustalić stabilną zawartości tlenu w funkcji głębokości: $x_s = f(H)$, parametrów środowiskowych i wysiłku. Po uwzględnieniu spotykanych fluktuacji stabilnej zawartości tlenu x_s, dla poszczególnych głębokości H, model ten stanowi wkład do modelowania dekompresji – rys. 1.



Rys.1 Następstwo modeli.

W aparatach o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego *SCR* występuje względny spadek zawartości tlenu[44] w przestrzeni oddechowej do wartości stabilnej[45] x_s. Zjawisko to spowodowane jest mieszaniem się czynnika zregenerowanego ze świeżym. Dynamikę tego *procesu* można modelować podobnie jak inne *procesy* wentylacyjne. 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 wiarogodne podejście do tej problematyki, stąd modelowanie oparto o w pełni deterministyczny, algebraiczny model analityczny.

Badania nad procesem wentylacji aparatu nurkowego bez udziału ludzi prowadzone były na stanowisku skumulowanych symulatorów: metabolicznej konsumpcji tlenu v̇, akcji oddechowej $\dot{V}_E$ i głębokości H. Symulator ten jest pod wieloma względami oryginalnym w skali światowej rozwiązaniem powstałym w ramach wieloletnich badań własnych – rys. 2. Charakteryzuje się tym, że do symulowania konsumpcji tlenu v̇ stosowane jest medium płynne, nie zaś gazowe jak w innych, podobnych rozwiązaniach technicznych na świecie [14]. Dzięki temu, w pomijalnym stopniu zaburza on objętość 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, przyczyniając się do dokładniejszego odwzorowania realnej pracy płuc.

Rys. 2 Stanowisko połączonych symulatorów: oddechowego, metabolicznego i hiperbarycznego.

Równolegle prowadzone były badania w symulowanych warunkach hiperbarycznych, z udziałem nurków eksperymentalnych. Z porównania wyników tych badań określono wiarogodność zastosowanego modelowania procesu wentylacji i wymiany gazowej w systemie ergonomicznym człowiek-aparat nurkowy. Badania bez udziału nurków eksperymentalnych dały odpowiedź na temat wiarogodności zastosowanego modelu matematycznego w stosunku do obiektu rzeczywistego, jakim jest aparat nurkowy.

Badania z udziałem nurków eksperymentalnych pozwoliły ustalić, jakie występuje zmniejszenie wiarogodności modelu matematycznego przebiegu procesu wentylacji aparatu nurkowego, gdy dołożone zostanie zaburzenie związane ze zróżnicowaniem biometrycznym nurków.

Pomimo tego, że tlen jest człowiekowi potrzebny do utrzymania hemostazy, to jest on także czynnikiem kancerogennym. Istnieją teorie postulujące, że jest on główną przyczyną starzenia się organizmów aerobowych[46]. W warunkach hiperbarycznych jest on bardziej niebezpieczny ujawniając niektóre formy toksyczności niespotykane w życiu codziennym. W warunkach hiperbarycznych tlen wykazuje toksyczność płucną[47], ośrodkową[48] oraz inną toksyczność somatyczną[49]. Przy krótkotrwałych nurkowaniach wojskowych najgroźniejszą formą toksyczności tlenowej jest toksyczność ośrodkowa.

Podczas eksperymentów z ośrodkowym zatruciem tlenowym CNSyn, obserwowano często mniej specyficzne symptomy, takie jak: niepokój, bladość 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.

Wynurzanie nurka bez przywrócenia akcji oddechowej może spowodować uraz ciśnieniowy płuc, gdyż najczęściej zatruciu tlenowemu i ustaniu akcji oddechowej towarzyszy zaciśnięcie krtani. Ciężkie postacie ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn prowadzą do śmierci. Na świecie istnieje wiele modeli empirycznych do przewidywania zagrożenia ośrodkową formą toksyczności tlenowej CNSyn [15].

W projekcie wykorzystano najszersze opublikowane systematyczne prowadzone badania nad modelowaniem zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową *CNSyn* opierające się na matematycznej *analizie przetrwania*[50]*.* Podstawę do adiustacji modelu stanowiły wyniki badań przeprowadzonych w czasie II Wojny Światowej przez Brytyjczyków [16,17] oraz ich kontynuację przez Amerykanów do późnych lat 70. ubiegłego wieku [18]. Badania własne nad adekwatnością takiego podejścia do modelowania ośrodkowej toksyczności tlenowej CNSyn zakończyły się walidacją ustanowionego modelu przez US Navy [19].

Do szacowania stopnia relaksacji[51] po ekspozycjach tlenowych stosowany był model empiryczny[52] zaproponowany przez National Oceanic and Atmospheric Administration [20].

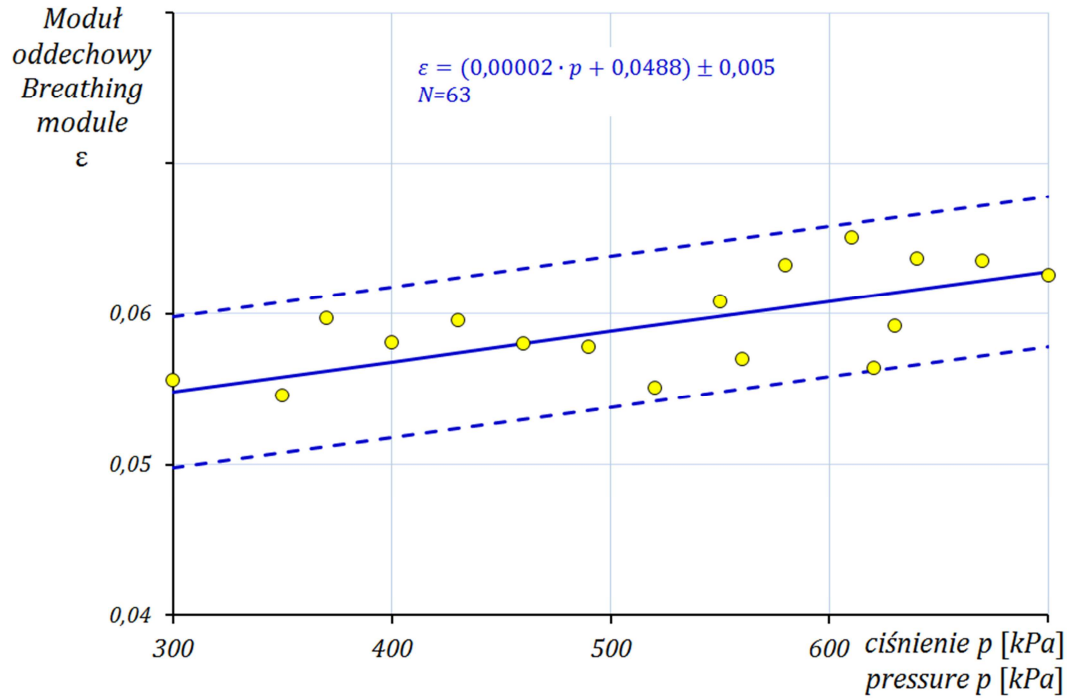
Szacowanie rozkładów bezpiecznej dekompresji oparto w projekcie na zaniechanym[53] modelu $ZH - L_{12}$ opracowanym przez Bühlmanna dla armii szwajcarskiej [21]. Model ten uwzględnia uwarunkowania wojskowe jak: specjalny dobór grupy nurków, utrzymywanie nurków w kondycji do przechodzenia forsownych dekompresji, podwyższony poziom aprobowanego zagrożenia itp. Model ten można przyjąć jako granicznie bezpieczny. Został on walidowany podczas wcześniej prowadzonych badań [1,2].

Jak wspomniano, projektowanie dekompresji musi uwzględniać przewidywane scenariusze spodziewanych operacji nurkowych, zastosowane środki bezpieczeństwa[54], warunki odpoczynku przed i po nurkowaniu itp. Ocena tych parametrów była prowadzona na drodze nurkowań eksperymentalnych w warunkach symulacji, co pozwoliło na dokładne ustalenie dozwolonych zakresów wybranych parametrów ekspozycji.

Walidacja podejścia odbyła się, podobnie jak w poprzednich etapach badań, na drodze statystycznej przy wykorzystaniu analizy sekwencyjnej [7].

Jak wspomniano, przedstawione na rys.1 modele deterministyczne wentylacji półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego $Nx - SCR$ 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 modelu o największym wpływie na bezpieczeństwo prowadzenia ekspozycji hiperbarycznej $-$ rys. 3. 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 zmiany[55] modułu oddechowego ε wraz z głębokością H oraz test tolerancji tlenowej TTT [23].

Negatywny wynik testu tolerancji tlenowej TTT stanowi przesłankę dla nurka do planowania operacji nurkowych, jedynie o zwiększonym zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn oraz zachowania ostrożności przy planowaniu procesu leczenia przy wykorzystaniu procedur tlenowych $oxy - TT$. Zaś odchylenia od ustalonej funkcji $\varepsilon = f(H)_\theta$, powodują, że ze względów bezpieczeństwa, nurek powinien mieć inaczej zaprojektowaną dekompresję. Jednak dla nurkowań wojskowych wykonywanych w parach, negatywne wyniki tych testów raczej dyskwalifikują nurka ze szkolenia nurkowego z wykorzystaniem aparatu $Nx - SCR$ CRABE SCUBA, ze względów formalnych.



Rys. 3. Praktyczna zależność funkcyjna $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmian modułu oddechowego ε wraz z głębokością H dla wybranej populacji nurków eksperymentalnych θ.

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 wiarogodnych[56] 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 odchyleń 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 selekcjonowania nurków, dla których procedura dekompresyjna może być potencjalnie niebezpieczna.

Badania nurków na symulatorze nurkowania czy badania aparatu nurkowego na symulatorze metabolicznym, mogą służyć do wyeliminowania zagrożenia DCS. Jeśli wyniki badań nie wykazują odchyleń od modelu $\varepsilon = f(H)_\theta$ a obserwuje się zwiększone zagrożeniem DCS, to należy poszukiwać innych przyczyn, przykładowo odstępstw od technologii[57] wykonywania prac podwodnych czy poszukiwać przyczyn kazuistycznych[58]. Monitorowanie odstępstw od modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H daje potencjalne narzędzie pracy powołanemu oficerowi bezpieczeństwa w Marynarce Wojennej RP.

PRZYKŁAD PODEJŚCIA PROCESOWEGO

Przy realizacji niezależnych nurkowań w morzu, dla klasycznej dekompresji zaprojektowanej ze stacjami dekompresyjnymi co 3 mH_2O, technologia nurkowania powinna zapewniać proces dekompresji awaryjnej z możliwością odbycia ostatniej stacji dekompresyjnej na głębokości 6 mH_2O. Postępowanie takie może być potrzebne przy zmianie wysokość fal w rejonie nurkowania lub podczas planowania nurkowania przy podwyższonym zafalowaniu rejonu. W takiej sytuacji, możliwość utrzymania się nurka na głębokości stacji 3 mH_2O 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 mH_2O powinien stanowić sumę czasu pobytu na stacji 3 mH_2O i 6 mH_2O.

Z analizy ryzyka przeprowadzonej na tym etapie wynika, że system dekompresji powinien być zabezpieczony systemem umożliwiającym realizację procesu rekompresji leczniczej czy innej interwencji medycznej. System taki powinien składać się z procedury 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, dedykowany specjalnie systemowi prowadzenia prac nurkowych. Ze względu na wykorzystywanie sprzętu niezależnego SCUBA, system tabel rekompresji leczniczej TT 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 dekompresji musi uwzględniać parametry zdrowotne nurków. Tutaj przyjęto, że będą one zgodne z wymaganiami dla nurków wojskowych. Do procesu kwalifikacji można dodać także dodatkowe kryteria[59]. Przyjęty standard parametrów fizjologicznych nurka stanowi wskazówkę przy opracowaniu procedury realizacji efektywnego procesu dekompresji.

Zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS przyjęto na wyższym poziomie niż dla nurków rekreacyjnych[60]. 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 ściśle powiązana z procesem wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu, a także z procesem dekompresji i narastania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn. Przyjęto tutaj obciążenie pracą średnio-ciężką[61] oraz spoczynek[62]. Nie można także pominąć wpływu ochrony cieplnej nurka na proces dekompresji i możliwość zwiększenia zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn.

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 redundantnego[63] systemu oddechowego. Taki proces zabezpiecza przed utratą kontroli nad zasadniczym systemem oddechowym, nie zaś przed utratą zapasu czynnika oddechowego. Z punktu widzenia planowanego procesu realizacji ekspozycji i późniejszej dekompresji, zastosowanie awaryjnego systemu oddechowego o otwartym obiegu czynnika oddechowego musi uwzględniać wzrost zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn. Jeśli założy się konieczność opracowania procedur użycia systemów oddechowych, niezależnych od używanego aparatu nurkowego[64,] należy także uwzględnić fazę nurkowania, dla której możliwe będzie przejście na dekompresję awaryjną.

Dla zabezpieczenia opisanych procesów zasadniczych i awaryjnych będzie potrzebny minimum[65] 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 CNSyn,
- zapożyczonych lub nowo opracowanych procedur leczniczych na wypadek wystąpienia chorób nurkowych,
- wyposażenia hiperbarycznego i medycznego do zabezpieczenia procesu leczenia,
- podsystememu transportu do ośrodka hiperbarycznego,
- procedury szacowania zagrożenia CNSyn,
- integralnego podsystemu awaryjnego oddychania z aparatu nurkowego,
- awaryjnych aparatów nurkowych,
- podsystemu ochrony cieplnej nurka.

Jeśli dodatkowo zostanie wprowadzone wymaganie akceleracji[66] 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 gazowej[67].

Najlepiej, jeśli przeliczenie czasu dekompresji pomiędzy procesem dekompresji z wykorzystaniem mieszaniny oddechowej oraz tlenu będzie odbywało się według prostej reguły. Najczęściej stosuje się przelicznik dwukrotnie dłuższego czasu pobytu na przystankach dekompresyjnych przy oddychaniu mieszaniną niż przy oddychaniu tlenem. 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 podwojenie czasów pobytu na stacjach przy oddychaniu tlenem. Zmiana czynnika oddechowego podczas dekompresji będzie wymagała opracowania zasad płukania przestrzenni oddechowej aparatu. Na wypadek awarii zasilania tlenem, z aparatu nurkowego można także rozpatrzyć wzbogacenie systemu zabezpieczenia operacji nurkowych o zewnętrzne systemy oddychania tlenem[68].

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 mH_2O. 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 integralnego 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, 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.

Przerwanie dekompresji może trwać do 7 min[69]. 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 dekompresyjną[70]. Dla nurkowań 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.

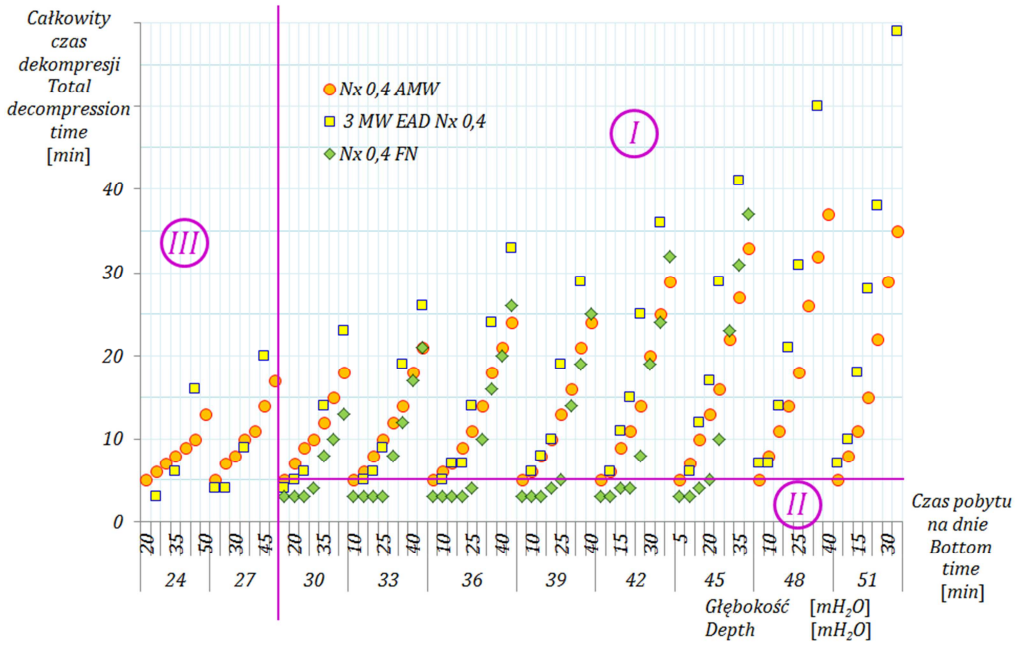
PODSUMOWANIE

Naukowe podejście polega na tyle dokładnym poznaniu zachodzących procesów w badanym systemie, aby możliwe było prognozowanie jego zachowania w przyszłości[71] z zadawalającą wiarogodnością[72].

Ustanowiony w projekcie wiarogodny[73] model deterministyczny dla ergonomicznego systemu człowiek-maszyna daje możliwość predykcji[74] z wystarczającą wiarogodnością. Opisany proces modelowania deterministycznego ze swej natury umożliwia ciągłe poprawianie precyzji predykcji oraz szacowanie poziomu zagrożenia, przy zdiagnozowaniu odchyleń od powtarzalności czy precyzji modelu. Dalsze ulepszenia technologii nurkowania mogą być prowadzone z efektywnością dotąd niedostępną.

Dotychczas wykorzystywane rozkłady dekompresji Nx odnoszone były do tabeli dekompresji powietrznej oparte były o tabelę powietrzną – Tabela 3 MW [24]. Przeliczeń dokonywano zgodnie z zasadą ekwiwalentnej głębokości równoważnej EAD[75] [1]. Bez ustalenia wiarogodnego modelu wentylacji półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego Nx – SCR CRABE SCUBA nie można było oszacować dokładnego rozkładu bezpiecznej dekompresji. Obecnie wprowadzone tabele dekompresji uwzględniają oparto o wiarogodny model wentylacji, choć dla krótkich czasów pobytu jest on marginalizowany[76]. Rys. 4. pokazuje porównanie profili stosowanych przez French Navy FN, tabel polskich opartych na EAD oraz nowoopracowanych tabel dekompresji AMW dla 40% mieszaniny tlenowo-azotowej Nx 0,4. W polu I widać, że profile FN i pochodne Tabeli 3 MW tworzone są według innej filozofii niż tabele AMW.

Profile FN i pochodne Tabeli 3 MW zostały opracowane według tradycyjnego podejścia opartego o wytworzenia maksymalnego bezpiecznego przesycenia dla tkanki wiodącej w początkowej fazie dekompresji i późniejsze przeciwdziałanie możliwości wytrącenia wolnej fazy gazowej. Profile AMW zostały wygenerowane w oparciu o filozofię deep stops. Charakteryzują się one efektywniejszą[77] dekompresją dla dłuższych czasów pobytu – rys. 4 obszar *I*.



Rys. 4 Porównanie sumarycznych czasów dekompresji dla aparatu nurkowego Nx – SCR CRABE SCUBA zasilającego premiksem Nx 0,4 dla wybranych rozkładów dekompresji według French Navy FN, procedury opartej na przeliczaniu na EAD rozkładów dekompresji z Tabeli 3 MW oraz według nowo opracowanej procedury Nx 0,4 AMW[78].

Takie podejście jest mniej efektywne dla krótkich czasów pobytu[79] – rys.4 obszar II. W podejściu AMW można założyć dla obszaru II inne podejście[80], umożliwiające skrócenie czasu dekompresji dla profili z krótkimi czasami pobytu. Nie uczyniono tego zwiększając bezpieczeństwo prowadzenia dekompresji[81]. Krótkie czasy pobytu są wykorzystywane w sytuacjach awaryjnych, zazwyczaj podczas zanurzania[82]. Pominięcie stacji dekompresyjnych zalecanych w oparciu o filozofię deep stops nie stwarza nadmiernego wzrostu zagrożenia DCS, czyniąc ich pominięcie w sytuacji awaryjnej względnie bezpiecznym.

Rozkłady dekompresji dla zaznaczonego na rys. 4 obszaru III powinny być jednoznacznie określone, gdyż w tym zakresie nie można z całą pewnością przewidzieć czy eżektor wspomagający wentylację przestrzeni oddechowej podczas dekompresji będzie włączony czy wyłączony. Prawdopodobnie dlatego FN nie opublikowała danych w tym zakresie głębokości.

Dla profili o maksymalnej głębokości nurkowania powyżej 45 mH_2O, tabele według FN nie zostały wygenerowane, prawdopodobnie ze względu na obawę wystąpienia objawów CNSyn. Badania własne nie potwierdzają istotnego wzrostu zagrożenie CNSyn dla tego obszaru, stąd dopuszczono te rozkłady dekompresji do wykorzystania przez MW RP.

WNIOSKI

W artykule opisano przykład podejścia procesowego do opracowania teorii dającej możliwość planowania działań podwodnych dla aparatu nurkowego Nx – SCR AMPHORA SCUBA. Jako podstawę procesu planowania przyjęto zasadniczy scenariusz operacji nurkowej. Na podstawie analizy ryzyka takiej operacji wygenerowano scenariusze awaryjne. Na podstawie scenariusza zasadniczego i scenariuszy awaryjnych obrany został minimalny system, który może zapewnić realizację tych scenariuszy na zakładanym poziomie odtwarzalności z założoną precyzją określoną na wymaganym lub wyższym poziomie ufności. Uwzględniono, że w niektórych scenariuszach system ma być bezpieczniejszy, stąd został on redundantnie rozbudowany.

Opisane podejście bazowało na stworzonej krajowej teorii badawczej dla półzamkniętych systemów oddechowych w interakcji z człowiekiem w warunkach hiperbarycznych opartą na kilku modelach. Metodyka projektowania operacji nurkowych bazuje na przyjętym poziomie ryzyka[83] uwzględniającym zagrożenie możliwością wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej DCS oraz ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn. Stąd dalsze badania[84] mogą być prowadzone w sposób bardziej celowy z efektywnością niedostępną dotąd w kraju.

BIBLIOGRAFIA

1. Kłos R. 2011. *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;
2. Kłos R. 2016. *System trymiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE.* Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5;
3. Stewart I. 1996. *Czy Bóg gra w kości? – Nowa matematyka chaosu:.* Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 1996. ISBN 83-01-11371-5;
4. Birkes D., Dodge Y. 1993. *Alternative methods of regression.* brak miejsca : Jon Wiley & Sons, Inc., 1993;
5. Mańczak K. 1976. *Experiment planning technique.* Warsaw : Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1976. 519.2.001.5;
6. Sporniak A. 2018. Teoria Ewolucji Kościoła. *Tygodnik Powszechny.* 23 września 2018, 2018, Tom 3611, 39, strony 32-35;
7. Kłos R. 2007 a. *Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt.* Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26;
8. Wald A. 1947. *Sequential Analysis.* New York : Jon Willey & Sons, Inc., 1947;
9. Homer L.D. Weathersby P.K. 1985. Statistical aspects of the design and testing of decompression tables. *Undersea Biomedical Research.* 1985, Tom 12, 3, strony 239-249;
10. Kłos R. 2007. *Mathematical modelling of the normobaric and hyperbaric facilities ventilation.* Gdynia : Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-0-2;
11. Kłos R. 2000. *Dive equipment with regeneration of the respiratory mix.* Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2;
12. Predictive studies IV. 1978. *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;
13. *Report of proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea operational diving:.* Proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea. 4-5 Nov1976. Heathrow : Hotel London, 4-5 Nov1976;
14. Frånberg O. 2015. *Oxygen content in semi-closed rebreathing apparatuses for underwater use: Measurements and modeling.* Stockholm : School of Technology and Health, 2015. ISSN 1653-3836;
15. Shykoff B. 2007. *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;
16. Donald K.W. 1947. Oxygen poisoning in man part I. *British Medical Journal.* May 17, 1947, strony 667-672;
17. Donald K. 1992. *Oxygen and the diver.* Harley Swan : The SPA Ltd., 1992. ISBN 1-85421-176-5;
18. Harabin A.L. 1993. *Human central nervous system oxygen toxicity data from 1945 to 1986.* Bethesda : Naval Medical Research Institute, 1993. NMRI 93-03; AD-A268-225;
19. Kłos R. 2012. *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;
20. NOAA. 2017. *NOAA diving manual - diving for science and technology.* [red.] Administration National Oceanic and Atmospheric. VI. Flagstaff : Best Publishing Co., 2017. ISBN 9781930536883;
21. Bühlmann A.A. 1984. *Decompression-Decompression sickness.* Berlin : Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9;
22. Abysmal Diving Inc. 2001. *Advanced Dive Planning Software.* [CD] 6595 Odell Place, Suite G. Boulder Colorado, 80301 : Abysmal Diving Inc., 2001. ABYSS-2000 v.2.30.17;
23. Kłos R. 2013. Test tolerancji tlenowej. *Polish Hyperbaric Research.* 2013, Tom 45, 4, strony 69-78;
24. Tabele dekompresji i rekompresji nurków. 1982. *Praca zbiorowa.* Gdynia : Dowództwo Marynarki Wojennej, 1982. Sygn.Mar.Woj. 860/81.

dr hab. inż. Ryszard Kłos, 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

Numer identyfikacji ORCID: 0000-0002-4050-3978

[1] metodyka to zbiór zasad dotyczących sposobów prowadzenia wybranych procesów,
[2] Nitrox Semi-Closed Rebreather Self Contained Underwater Breathing Apparatus AMPHORA,
[3] teoria to ogólna koncepcja oparta na poznaniu i zrozumieniu istotnych czynników kształtujących pewien wycinek rzeczywistości,
[4] metoda jest efektywnym sposobem naukowego postępowania, prowadzącym do osiągnięcia zdefiniowanego celu; na wysokim szczeblu uszczegółowienia metoda staje się techniką naukowego postępowania,
[5] przykładowo nad: różnymi scenariuszami operacji nurkowych, obciążenia wysiłkiem podczas pobytu pod wodą, oceny eksploatowanej technologii itp.,
[6] model opisuje wyidealizowany system i przebiegający w nim wyidealizowany proces będący kopią lub wzorcem rzeczywistego systemu, w którym przebiegają rzeczywiste procesy,
[7] bazujące na przyczynowo–skutkowym wyniku każdorazowej realizacji eksperymentu, w odróżnieniu od zdarzenia losowego, które może zajść lub nie w określonym zbiorze warunków eksperymentu,
[8] słowo stochastyczny jest pochodzenia greckiego i znaczy tyle, co „zręczny w dążeniu do celu", wyrażając ideę użycia praw rządzących przypadkiem dla korzyści osobistych [3],
[9] nie odzwierciedla on pełnej dziedziny zmienności parametrów procesu i przez to może być traktowany jedynie, jako przybliżenie interpolacyjne, służące do przewidywania późniejszego stanu czy zachowania procesu,
[10] związany z pojęciem prawdopodobieństwa a w odróżnieniu od potocznie rozumianej losowości, do której nie zawsze da się zastosować reguły prawdopodobieństwa,
[11] statystyczny opis odpowiedzi na zastosowane wymuszenie jest coraz częstym sposobem szacowania zachowania skomplikowanych zjawisk,
[12] zjawiska losowe dzielą się na trzy typy: zdarzenia losowe, zmienne losowe i procesy stochastyczne. Rachunek prawdopodobieństwa zajmuje się badaniem prawidłowości wśród zdarzeń, zmiennych i procesów losowych. Statystyka matematyczna zajmuje się metodami wnioskowania o rozkładach wielkości losowych na podstawie obserwacji, stanowiąc tym osobną dyscyplinę matematyczną mającą własny przedmiot badań [5],
[13] statystyka opisowa, która służy do lepszego zobrazowania danych wydobywając z nich informacje dla lepszego zrozumienia znaczenia uzyskanych danych nie zaś do dociekania ich natury,
[14] wiedza potoczna, powszechna, zdroworozsądkowa, artystyczno-literacka, spekulatywna,
[15] wiedza o rzeczywistości poddana zgodnie z ustalonymi wymaganiami treściowymi i metodologicznymi,
[16] nad system,
[17] język należy traktować tutaj, jako zasób elementów i sposobów ich użycia służący do porozumiewania się,
[18] nauka o nauce, zajmująca się badaniem nauk z punktu widzenia ich struktury oraz występujących w nich sposobów uzasadniania,
[19] w aspekcie pragmatycznym jest to nauka o metodach działalności naukowej i stosowanych w nauce procedurach badawczych,
[20] walidacja to potwierdzenie odtwarzalności ocenianego procesu przebiegającego w zdefiniowanym systemie z wymaganą precyzją na założonym lub większym poziomie ufności,
[21] definicja z pewnością była konsultowana z Papieskiej Akademii Nauk, do którego to towarzystwa naukowego należą powoływani przez papieży wybitni przedstawiciele nauk matematycznych i przyrodniczych z różnych państw,
[22] z powszechną koniecznością stosowania modelowania stochastycznego wiąże się jednak często spotykana nadinterpretacja, prowadząca do za daleko idących uogólnień niemających oparcia w zastosowanych metodach,
[23] podobnie do testowania nowych leków lub procedur klinicznych,
[24] aparat nurkowy – nurek,
[25] najczęściej przyjmuje się jeden parametr zmienny przy tej multiplikacji, którym jest osoba nurka doświadczalnego rozciągając wnioskowanie na wybraną populację nurków,
[26] nie wystąpiły lub wystąpiły objawy DCS,
[27] co uzmysławia długi czas potwierdzania możliwości dopuszczenia leków do sprzedaży,
[28] minimalnie po 28 nurkowaniach eksperymentalnych,
[29] w warunkach krajowych teoretycznie możliwe jest przeprowadzenie max. 150 nurkowań eksperymentalnych w ciągu roku, lecz koszt takiego postępowania wynosi ok. 1 mln. zł netto,
[30] przykładowo, poprzez ustalenie granic,
[31] jeżeli ze względów sposobu budowania systemu istnieje konieczność zastosowanie elementów redundantnych, przykładowo ze względów bezpieczeństwa, to takie podejście mieści się także w zastosowanym tutaj określeniu „racjonalnie minimalny zbiór elementów",
[32] wspólne odziaływanie silniejsze niż suma oddzielnych działań,
[33] leżący poza systemem, lecz wywierający wpływ na przebiegające w nim procesy,
[34] uwzględniającej nie tylko opłacalność finansową, lecz także skutki społeczne,
[35] inżynieria systemów wykorzystywana jest w technice, te same podstawy przypisane są analizie systemowej wykorzystywanej w naukach o zarządzaniu,
[36] około 35 lat temu,
[37] a wykorzystanie modeli statystycznych zarezerwowano jedynie do procesu walidacji,
[38] najczęściej objętości przestrzeni wentylowanej,
[39] rekomendowanych może być co najmniej kilka: neo-haldanian, RGBM, VPM itp.,
[40] stosunek strumienia konsumowanego tlenu $\dot{v}$ do strumienia wentylacyjnego $\dot{V}_E$: $\varepsilon = \frac{\dot{v}}{\dot{V}_E}$,
[41] dokładności,
[42] przykładowo, podobną do roli objętości wentylowanej w modelu wentylacji okrętu podwodnego,
[43] reprezentatywność grupy jest ograniczona do nurków spełniających kryteria dla nurków wojskowych,
[44] w stosunku do zawartości tlenu w premiksie x_w zasilającym przestrzeń oddechową,
[45] dla ustabilizowanych wartości parametrów oddechowych nurka,
[46] dla anaerobowych jest czynnikiem śmiertelnie toksycznym,
[47] objawy podobne do poparzenia płuc chemikaliami,
[48] w stosunku do ośrodkowego układu nerwowego,
[49] zmniejszenie zawartości czerwonych krwinek, spadek życiowej pojemności płuc, oślepienie tlenowe itp.,
[50] teoria ta stanowi podstawę badań epidemiologicznych, badania na wymieralnością i bioróżnorodnością, niezawodności maszyn, analizy ryzyka itp.,
[51] 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,
[52] używany powszechnie w programach komputerowych do planowania cywilnych nurkowań technicznych [22],
[53] uważanym za niebezpieczny dla szerokiego grona nurków,
[54] możliwość przeprowadzenia dekompresji na ostatniej stacji na głębokości $6\ mH_2O$, możliwość zaniechania dekompresji tlenowej, możliwość obciążenia dodatkowym wysiłkiem, uwzględnienie poprzednich nurkowań, uwzględnienie typu transportu, uwzględnienie nurkowania w niskiej temperaturze itp.,
[55] odchylenia te występują gdy nurek posiada znacznie rozbudowaną tkankę mięśniową w stosunku do typowej, z tego powodu został odrzucony jeden nurek,
[56] odtwarzalności i powtarzalności,
[57] przykładowo, w przygotowaniu kondycyjnym nurka, zmniejszeniu skuteczności płukania przestrzeni oddechowej aparatu, złego konfekcjonowania czynników oddechowych lub obniżenia ich wymaganej jakości, złego upakowania pochłaniacza lub obniżenia jego parametrów jakościowych itp.,

[58] opisywanie przypadków chorobowych o rzadkim przebiegu czy rzadko występujących,
[59] jak przejście z wynikiem pozytywnym testu tolerancji tlenowej,
[60] zazwyczaj dla nurkowań rekreacyjnych zagrożenie podaje się na poziomie $p = 1\%$ a dla nurkowań bojowych $p \leq 5\%$ z istotnością $\alpha = 0{,}01$,
[61] poza strefą saturacji wydatkowanie większego wysiłku jest niebezpieczne,
[62] 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,
[63] przykładowo o otwartym obiegu czynnika oddechowego,
[64] przykładowo, w postaci dodatkowych aparatów zabieranych przez nurka czy podwieszanych w toni wodnej,
[65] można dodać wiele dodatkowych elementów systemu, jak podsystem komunikacji podnoszący komfort psychiczny, mający niebagatelny wpływając na procesy dekompresji
[66] przyspieszenia,
[67] przykładowo, gdy nastąpi awaria zasilania tlenem,
[68] podwieszane w toni lub zabierane przez nurka dodatkowe aparaty oddechowe,
[69] według praktyki Kanadyjskiej, w Polsce dopuszczano przerwę do $5\ \mathrm{min}$,
[70] w takim przypadku istnieje znacznie większa pewność, że nurek dotrze na czas do komory dekompresyjnej,
[71] predykcji,
[72] naturalnym przykładem może być takie poznanie procesów pogodowych zachodzących w systemie atmosfery, aby móc z dostateczną powtarzalnością przewidywać zjawiska pogodowe z zadawalającą precyzją,
[73] dostatecznie precyzyjnego i powtarzalnego do przyjętych zastosowań,
[74] oparte na przesłankach naukowych przewidywania dróg przebiegu przyszłych procesów albo zmian cech systemu,
[75] Equivalent Air Depth,
[76] marginalizowanie polega na nieuwzględnieniu początkowego wyższego stężenia tlenu w cyrkulującym czynniku oddechowym wdychanym przez nurka,
[77] krótszą,
[78] głębokość $24\ \mathrm{mH_2O}$ jest dodana jedynie jako orientacyjna wartość teoretyczna, gdyż w tym przypadku praca ežektora może nie być zapewniona,
[79] obserwowane na rys. 4 skrócenie czasów dekompresji w stosunku do poprzednio stosowanej technologii opartej o przeliczenia EAD nie powoduje istotnego wzrostu zagrożenia DCS, gdyż przyjęto podejście w oparciu o filozofię deep stops,
[80] projekt taki można oprzeć o obliczenia dla wyższych zawartości tlenu na początku nurkowania,
[81] przykładowo, przy nieefektywnie wykonanej procedurze płukania przestrzeni oddechowej aparatu premiksem,
[82] czasami do szybkich nurkowań interwencyjnych,
[83] akceptowany apetyt na ryzyko,
[84] przykładowo, nad różnymi scenariuszami operacji nurkowych, obciążenia wysiłkiem pod wodą, łączenia operacji nurkowych z obciążeniem wysiłkiem bojowym, transportem lotniczym, stosowania procedur nurkowań powtarzalnych czy powtórzeniowych itp.,