

POLSKIE BADANIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH I ICH WDROŻENIE. CZĘŚĆ III A PROBLEMY TECHNICZNE I ORGANIZACYJNE WDROŻENIA NURKOWAŃ SATUROWANYCH W POLSCE OD LAT 90-TYCH UBIEGŁEGO WIEKU. CZĘŚĆ 1

Stanisław Skrzyński

Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni

STRESZCZENIE

Artykuł jest kolejnym z cyklu artykułów dotyczących badań i wdrażania technologii nurkowań saturoowanych w naszym kraju. W poniższym artykule przedstawiono polską specyfikę wdrażania na tle uwarunkowań gospodarczych i historycznych. W naszym kraju problematyką nurkowań saturoowanych dla potrzeb rodzącego się na morzu przemysłu wydobywczego od kilkunastu lat zajmuje się ZSniTPP. Równolegle przygotowywane są technologie nurkowań głębokich, w pierwszym etapie, jako podstawowa technologia nurkowania, a od roku 1994, jako uzupełnienie pełnego zabezpieczenia nurkowań saturoowanych. Od 1995 roku nurkowania saturoowane stały się codziennością w polskiej strefie ekonomicznej morza bałtyckiego. Artykuł ten pokazuje trudną drogę, jaką przebyło wdrażanie nurkowań saturoowanych w okresie niestabilności gospodarczej, oraz małej skali zaplecza krajowego morskiego przemysłu wydobywczego w porównaniu z przedsiębiorstwami światowymi. Przypomniano wybranych animatorów i uczestników wdrożenia które podzielić należy na okresy współpracy z włoskim przedsiębiorstwem usług podwodnych RANA oraz realizacji podwodnych prac długotrwałych w oparciu o potencjał krajowy. W artykule uwzględnia się również uwarunkowania techniczne i organizacyjne realizacji nurkowań saturoowanych dla polskiego przemysłu wydobywczego. W 1990 r. Przedsiębiorstwo Poszukiwań i Eksploatacji Złóż Ropy i Gazu Petrobaltic (aktualnie LOTOS) odegrało jedną z głównych ról we wdrażaniu nurkowań saturoowanych w naszym kraju. Polskie wdrożenie nurkowań saturoowanych powiązane jest z jedynym operacyjnym systemem nurkowym produkcji włoskiej Af-2, który pozwolił na badania naukowe związane z zastosowaniem nowych rozwiązań technicznych oraz badania w warunkach eksploatacyjnych, a także na rozwój kadr naukowych i inżynierskich oraz medycznych dla potrzeb polskiego przemysłu offshore. Przedsiębiorstwo to odegrało jedną z głównych ról wdrożenia nurkowań saturoowanych w naszym kraju Rok 1995 stał się rokiem przełomowym w historii nurkowań saturoowanych w Polsce, jak i na Morzu Bałtyckim. Dzięki tej technologii rozpoczęto proces instalacji dwóch pierwszych podwodnych głowic eksploatacyjnych na otworach produkcyjnych B3-7 oraz B3-10. Nurkowania saturoowane były możliwe dzięki leasingu przez Petrobaltic systemu nurkowego Af-2, a następnie zakupieniu go w 1998 przez Akademię Marynarki Wojennej. System ten po modernizacjach służy do dnia dzisiejszego.

Słowa kluczowe: technologia nurkowań saturoowanych, tabele dekompresyjne, nurków parametry nurkowania saturoowanego, długotrwałe prace podwodne, system nurkowy, stany awaryjne, zabezpieczenie techniczno-organizacyjne nurkowania, medyczne problemy operacyjnych nurkowań saturoowanych, mobilny system nurkowy, baza nurkowań saturoowanych, mieszaniny oddechowe.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2023 Vol. 83 Issue 2 pp. 7 – 22

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2023-0008

Strony: 16, rysunki: 1, tabele: 1

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

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: przeglądowy

Termin nadestania: 17.03.2023 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 14.04.2023 r.



GENEZA PODJĘCIA TEMATU

Przemysł usług i prac podwodnych jest strategiczną gałęzią każdego kraju morskiego. Gospodarka naszego kraju w przeszłości i tym bardziej przyszłości będzie potrzebowała silnej, niezależnej bazy usług podwodnych. W klasycznej definicji prac podwodnych z udziałem nurków nurkowania satutowane są technologią świadcząca o sile państwa morskiego, tak gospodarczej jak i obronnej. Nurkowanie w czystej postaci korzysta z trzech dziedzin naukowych: medycyny, techniki i organizacji. Natomiast nurkowanie komercyjne rozszerza tę interdyscyplinarność i korzysta praktycznie ze wszystkich nauk związanych z działalnością człowieka. Spektrum nauk wykorzystywanych w nurkowaniu, a szczególnie nurkowaniu satutowanym uzupełniają; ekonomia, psychologia, ergonomia, termodynamika, statystyka, metrologia, mereologia, nawigacja, informatyka, higiena pracy, nauki o obronności itd. Poniższy artykuł ukazuje z jaką gamą problemów spotykała i spotyka się grupa naukowców, menadżerów produkcji, górnictwa morskiego, pracowników administracji morskiej, inżynierii podwodnej, specjalistów nurkowych i prac podwodnych w polskim przemyśle offshore. Przyszłość w której nasz kraj ma wyjść z energetyką na morze z niespotykanym dotychczas rozmachem, wymagać będzie w planowaniu i realizacji znajomości problemów naszego kraju. Te działania wymagają także wyobraźni twórczej, odwagi inwestycyjnej i przygotowania zaplecza. Całym tym procesem powinna zajmować się jedna wiodąca instytucja, która „czuje” i zna polskie realia. Artykuł pokazuje problemy z jakimi spotykali się realizatorzy nurkowań satutowanych w naszym kraju. Przyszłe problemy prac podwodnych będą takie same, ale zostaną umieszczone w innym środowisku technicznym, ekonomicznym i politycznym. Tę pracę autorzy dedykują przyszłym realizatorom prac podwodnych, a szczególnie ludziom nauki.

INFORMACJE WSTĘPNE

Na początku 1992 r. wydawało się, że wyniki badań nurkowań satutowanych wykonywanych przez nasz kraj zostały bezpowrotnie utracone. Zadłużenie Stoczni Szczecińskiej, do którego doszło przy realizacji budowy systemów nurkowych dla Związku Radzieckiego w Akademii Marynarki Wojennej, wg danych kwestora wynosiło ponad 1,5 budżetu rocznego tej uczelni. Kierownictwo Uczelni sceptycznie, ale ze zrozumieniem podchodziło do spraw związanych z badaniami problematyki pracy człowieka w warunkach hipierbarii po klęsce programów państwowych związanych z tą tematyką. Rozpoczął się długotrwały proces odzyskiwania długów w ramach procedur oddłużania stoczni. Od 1991 roku rozpoczęły się w Zakładzie Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych (ZSNI TPP) zwolnienia grupowe, które spowodowały, że skład osobowy został zredukowany niemal do połowy. Równocześnie administrację Zakładu przejęła administracja Akademii. Mimo tak negatywnych zjawisk doświadczenie oraz wiedza nie zostały stracone. Dzięki ludziom nauki i personelowi inżynieryjno-technicznemu oraz nurkowemu, ludziom, którzy pozostali w składzie zespołu, rozpoczęły się działania mające na celu dalsze wdrażanie uzyskanej wiedzy w gospodarce narodowej i dla celów obronności. Nie bez znaczenia jest także fakt, że doświadczenie było i wciąż jest przekazywane następnym pokoleniom ludzi nauki i technikom zajmującym się nurkowaniem dla celów militarnych i pracami podwodnymi. Spektakularnym pozytywnym zjawiskiem tej drogi transferu doświadczeń badań z lat 1981-1991-tych jest chociażby fakt, że od 1993 roku otworzyły się możliwości wykorzystania zdobytego doświadczenia dla polskiego przemysłu offshore.

Po przemianach politycznych w 1989 roku wyodrębniło się tym razem już polskie przedsiębiorstwo poszukiwania i wydobycia ropy i gazu pod tą samą nazwą, jaką miało trójstronne przedsiębiorstwo (Polska, NRD, ZSSR) poszukiwania i wydobycia ropy naftowej Petrobaltic. Nie było to wydobycie na dużą skalę, ale posiadane platformy były i są przodującymi w kraju „kopalniami” tych ważnych dla gospodarki surowców. W Polsce przemysł ten nie był siłą napędową do rozwoju sprzętu i techniki nurkowej oraz technologii nurkowania i technologii prac podwodnych, tak jak to było na świecie, lecz położył silne podwaliny pod uruchomienie krajowego potencjału nurkowania i prac podwodnych.

Petrobaltic miał swoje pilne potrzeby w rozpoczęciu opłacalnego ekonomicznie wydobycia ropy i gazu z koncesjonowanych pól naftowych na głębokościach 70-85m. Kraj nasz nie był przygotowany na zabezpieczenie prac dla potrzeb polskiego przemysłu naftowego na Bałtyku, mimo że w latach 80-tych Polska wydała duże nakłady na rozwój techniki nurkowej przewidzianej na eksport do byłego ZSSR. Od 1982 roku do 1991 roku, z przerwami MW RP wykonywała usługi dla firmy Petrobaltic bez udziału AMW. Natomiast w latach 1992-1994 wykonywano prace z udziałem i na technologiach nurkowania opracowanych w Zakładzie Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych (ZSNI TPP). Wiodącym wykonawcą była MW RP, a Zakład przy tej okazji wdrażał opracowane technologie. Środki uzyskane z tych prac pozwoliły w 80% zabezpieczyć działanie Zakładu, gdyż od czasu prac na rzecz Stoczni Szczecińskiej utrzymywał się on na zasadzie samofinansowania.

Gdy po reformie gospodarczej w roku 1995 pojawiła się pilna potrzeba nurkowań satutowanych nie było potencjału polskiego dla wykonawstwa robót. Marynarka Wojenna posiadała jeden okręt ratowniczy z dzwonem nurkowym przystosowanym do nurkowań głębokich z użyciem mieszanin helowo-tlenowych z zastosowaniem aparatów o obiegu półzamkniętym FGG-III produkcji niemieckiej firmy Dräger. Aparaty te zakupione zostały przez PETROBALTIC. Nurkowania te wykorzystywały tabele nurkowań głębokich US -Navy, niestety nie uwzględniające specyfiki aparatów o obiegu półzamkniętym, dlatego nurkowania te były nurkowaniami wysokiego ryzyka. W początku roku 1992 dla potrzeb morskiego przemysłu wydobywczego przygotowywano w Zakładzie technicznie i realizacyjnie technologie nurkowania głębokiego z użyciem trimiksu, modernizując aparat FGG III i dzwon nurkowy oraz przystosowując komorę do dekompresji tlenowej. Byliśmy jedynym na świecie krajem, który do nurkowań komercyjnych stosował ten typ aparatów nurkowych. Aparat ten jak każdy aparat o obiegu półzamkniętym posiadał ograniczenia. Najistotniejszym z nich był niestabilny skład mieszaniny oddechowej przy dużym zapotrzebowaniu, czyli ciężkiej pracy nurka. Opracowane tabele dekompresyjne dla technologii nurkowań głębokich wykorzystywano do nurkowania z okrętów ratowniczych. Marynarki Wojennej dla potrzeb Petrobaltic do 1997r.

UWARUNKOWANIA REALIZACJI PRAC PODWODNYCH W PETROBALTIC

Polskie eksploatowane złoża znajdują się w odległości od 70 do 90 mil od bazy lądowej i na strefie głębokości 70 - 90m. Odległość od brzegu i głębokość wydobycia są głównymi czynnikami, które stymulują rozwiązania techniczne związane z wydobyciem i transportem surowców, oraz organizację zabezpieczenie prac. Zasadnicze problemy techniczne prac podwodnych, które są rozwiązywane przy eksploatacji morskich platform wydobywczych, dotyczą systemów transportu, montażu głowic do kontrolowanego wydobycia ropy i gazu, oraz rurociągów transportujących do odbiorcy lub na tankowce. Ponadto w działalności codziennej wymagany jest tzw. serwis podwodny, konieczny do procesu eksploatacji po zainstalowaniu głowic i rurociągów. Obejmuje on generalnie konserwację, naprawy, inspekcje i nadzory towarzystw klasyfikacyjnych i administracji morskiej.

STAN ZABEZPIECZENIA PRAC PODWODNYCH NA POLSKIM SZELFIE W LATACH 1992-1995

Do roku 1995 stosowano głębokie nurkowania krótkotrwałe do podwodnych prac inspekcyjnych, prac montażowych o bardzo małym zakresie i do prac doraźnych nurka o czasie trwania pobytu na głębokości pracy 30 do 45min. Technologia nurkowań głębokich nie pozwalała na prowadzenie prac instalacyjnych struktur podwodnych, najwyżej mogła być wykorzystana jako zabezpieczenie w przypadku działań awaryjnych oraz dopełnienie prac z wykorzystaniem nurkowań saturowanych.

Wielu światowych specjalistów w tym okresie uważało, że przyszłość prac podwodnych na offshore będzie opierała się o systemy i technologie oparte o zdalnie sterowane roboty podwodne i specjalizowane pojazdy załogowe wyposażone w manipulatory. Systemy infrastruktury podwodnej obsługiwane są zdalnie przez operatora z powierzchni lub bezpośrednio przez załogę pojazdu podwodnego. Są to technologie bez udziału nurków lub z udziałem operatorów, których organizm nie podlega oddziaływaniu ciśnienia. Na tym etapie rozwoju Petrobaltic te technologie nie mogły być nawet brane pod uwagę ze względów ekonomicznych i posiadanej ówczesnie techniki wydobywczej. Technologie podwodne, które zakładają „nieobecność nurków” były i są aktualnie bardzo kosztowne, a stosuje się je głównie do prac, w których praca nurka jest niemożliwa ze względów fizjologicznych. Jak pokazuje praktyka w/w technologie mimo, że nie przewidują pracy nurków, muszą korzystać z ich usług w ograniczonym zakresie i to nie tylko w przypadkach awaryjnych.

Podczas pierwszych podwodnych prac montażowo – instalacyjnych w Petrobaltic również stosowano proste technologie, które nie wymagały bezpośredniego udziału nurka. Były to montaż stalowych elastycznych rurociągów, które nie wymagają spawania podczas ich układania. Przy ich montażu wykorzystywano kamerę podwodną umieszczoną na rurach (tzw. „syfonówkach”) sterowaną w ograniczonym zakresie odciągami dla obserwacji operacji na otworach wierceń. Na początku tych prac stosowano najprostsze pojazdy ROV, typu „eyeball” z kamerą TV, później doposażone w manipulator o małej sile. Stosowano je jako samodzielne podwodne urządzenia inspekcyjne i/lub jako urządzenie wspomagające nurkowanie. Pojazdy te były sterowane i zasilane z powierzchni za pośrednictwem kabla (ang. umbilical – pepowina - wyraz stosowany w slangu wiertników morskich). Niestety, jeśli pojazd podwodny typu ROV zaplątywał się w struktury podwodne, zawsze musiał interweniować nurek. W okresie początków eksploatacji złoża zaplątanie kabla ROV było relatywnie częste, aż do chwili pełnego wyszkolenia operatorów tych pojazdów.

Porównując skuteczność w/w nurkowania w krajowej praktyce przy platformie Petrobaltic, jeden nurek w nurkowaniu saturowanym przepracował w 1995r. 48 godzin pod wodą na głębokości 80m, przebywając pod ciśnieniem ponad 30 dób, w tym 3 doby trwała dekompresja. Stan nauki w nurkowaniu nie zmienił się do chwili obecnej i określa zalecany czas pracy nurka dla nurkowań pojedynczych (czas pobytu włącznie z zanurzeniem) na 1,5 godz. do maksymalnie 2 godzin z uwzględnieniem zapasu czasu na nieplanowane przedłużenie pobytu na dnie. Oznacza to, że przy przekroczeniu czasu pobytu nurka na głębokości określonej w tabelach dla nurkowań krótkotrwałych, powinniśmy zastosować nurkowanie saturowane. [1]. Tzw. „nurkowania subsaturowane” są praktycznie i teoretycznie nie opracowane i nie mogły być stosowane na głębokościach wydobycia ropy przez Petrobaltic. Natomiast w całym roku 1994 zespół 12 nurków stosując nurkowanie standardowe w ciągu roku przepracował około 51 godzin w trakcie 58 nurkowań, co wymagało ponad 312 godzin osobodekompresji. W nurkowaniach standardowych czas pobytu nurka na danej głębokości jest bardzo ściśle limitowany, a jego przekroczenie powoduje wydłużenie się dekompresji nawet o kilkanaście godzin. Stosunek czasu pracy nurka na głębokości do całkowitego czasu nurkowania jest jednym ze wskaźników efektywności nurkowania.

Dodać należy, że w naszym kraju brak jest przepisów dotyczących nurkowań saturowanych. Wszystkie nurkowania, które odbyły się w Polsce, prowadzone były na zasadzie doświadczalnych nurkowań wdrożeniowych.[2]. Tę możliwość zapewniała i do dzisiaj zapewnia Akademia Marynarki Wojennej. Do chwili obecnej w naszym kraju brakuje podstawowych dokumentów formalnych dotyczących nurkowań saturowanych, np. tabel dekompresyjnych.

Dla rozwoju związanego z budową podwodnej struktury wydobywczej Petrobaltic konieczne były podwodne prace długotrwałe, a nie krótkie interwencyjne prace nurkowe w strefie głębokości 50-85m. Nurkowania saturowane były jedyną, podstawową technologią dla potrzeb rodzącego się polskiego przemysłu offshore. Nurkowania saturowane były niezbędne dla podwodnych prac montażowych, naprawczych i serwisowych, co zapewniło Petrobaltic rozwój i efektywność ekonomiczną. Zastosowanie nurkowania saturowanego wpłynęło na projektowanie zmian i modernizacji podwodnych instalacji. Projekty uwzględniały specyfikę tych nurkowań. W szczególności możliwość praktycznie nieograniczonej ilości godzin przepracowanych przez nurka na głębokości, przy jego wysokiej dyspozycyjności oraz niezależność czasu dekompresji od ilości tych godzin. Nurkowie przebywający pod ciśnieniem od kilku do kilkunastu dni pracują codziennie pod wodą średnio od 3 do 6 godzin bez prowadzenia dekompresji. W nurkowaniach krótkotrwałych na tych samych głębokościach jest to niemożliwe z punktu widzenia fizjologii i nieoptymalne ekonomicznie.

Mimo, że Marynarka Wojenna związana była umową o zabezpieczeniu prac podwodnych z Petrobaltic, nie posiadała sprzętu i techniki, która mogłaby zabezpieczyć zadania podwodne związane z rozwojem tego przedsiębiorstwa. Wykonywała podstawowy element tych zobowiązań poprzez przygotowanie kadry, zabezpieczenia technicznego i brzegowego nurkowań oraz wsparcie typowych, przewidywanych sytuacji awaryjnych w morzu. Szkoląc nurków głębokowodnych Marynarki

Wojennej, kadre nurkową z okrętów ratowniczych i Ośrodka Szkolenia Nurków i Płetwonurków Marynarki Wojennej w ZSNI TPP, równolegle przygotowywano ekipę nurków do nurkowań saturowanych. Wykonano trzy badawcze ekspozycje saturowane powiązane ze szkoleniem tej ekipy w DGKN 120 na głębokościach niskiego plateau saturacji 30m. Przygotowanie do nurkowań saturowanych również wymagało przygotowania i rozszerzenia składu ekipy nurkowej. Wiązało się to z rozszerzeniem organizacyjnych przedsięwzięć wdrożenia nurkowania głębokiego, wymagającego szkolenia nurków, personelu technicznego i kierowników nurkowania, równolegle przygotowując ich do nurkowań saturowanych. Była to niespotykana sytuacja w Polsce i nowych warunkach ekonomicznych połączenia instytucji przemysłu i obronności dla dobra naszego Kraju z korzyściami dla obu stron. Ta współpraca była bardzo pomocna w uruchomieniu pierwszych prac podwodnych z wykorzystaniem operacyjnych nurkowań saturowanych w polskiej strefie ekonomicznej na Bałtyku w 1995r na rzecz przemysłu wydobywczego ropy naftowej.

W 1994 roku, gdy pojawiły się realne potrzeby nurkowań dla Petrobaltic związanych z montażem nasz kraj znalazł się w paradoksalnej sytuacji. Posiadaliśmy ekipę do nurkowań saturowanych, a nie mieliśmy techniki i możliwości do ich operacyjnych realizacji w warunkach rzeczywistych.

Gdy w roku 1995 potencjał krajowy nie był w stanie zaproponować polskiego wykonawstwa prac podwodnych, dyrekcja Petrobaltic, a szczególnie dyr. ds. eksploatacji J. Bokiniac na którym „ciążyła odpowiedzialność za wydobywanie ropy” i który był siłą napędową wdrożenia komercyjnych nurkowań głębokich w Polsce, podjęła decyzję by szukać systemu nurkowego do nurkowań saturowanych za granicą. W tym czasie nasz kraj był „mocarstwem” badawczym, posiadającym dwa brzegowe systemy badawcze i to w mieście Gdynia. Była to baza realizacji badań i treningów zabezpieczających nurkowania saturowane, nie posiadająca jednak realnych możliwości operacyjnych realizacji tych nurkowań. Jeden ośrodek z długą tradycją i kuźnią kadr badawczych i medycznych znajdował się w Akademii Marynarki Wojennej. Drugi nowy, wyposażony w zespół wyprodukowanych przez Stocznię Szczecińską komór LSH -200 znajdował się w ówczesnym Instytucie Medycyny Morskiej i Tropikalnej (IMMiT). Ośrodek ten był dopiero na początku okresu rozwoju, praktycznie bez własnej ekipy medycznej, technicznej i nurkowej. Jak by tego było mało, to w Stoczni Szczecińskiej pozostały elementy systemów nurkowych GWK-200, których część zakupiono do IMMiT. Jeszcze do 2020 roku widziano tam elementy w stanie surowym systemu GWK-200, takie jak, komory, dzwon nurkowy, układ podnoszenia dzwonu i wiele innych. Te podstawowe elementy w stanie surowym „straszyły” przed budynkiem, w którym zainstalowany był LSH-200 (obecnie placówka Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego, Wydział Nauk o Zdrowiu z Instytutem Medycyny Morskiej i Tropikalnej). Również ZSN i TPP otrzymał w ramach redukcji długów elementy systemów GWK-200, którym były instalacje układu nurkowego o obiegu zamkniętym produkcji niemieckiej Dräger GAK-450, elementy instalacji gazowych i pomiarowych. Większość tych urządzeń i elementów wykorzystano wtórnie do budowy lub modernizacji instalacji nurkowych. Planowano i projektowano budowę operacyjnego systemu nurkowego do nurkowań głębokich i saturowanych na wybranych jednostkach pływających, których było relatywnie dużo, gdyż w tym okresie likwidowano przedsiębiorstwa rybackie. Ta sytuacja wskazała paradoks w naszym kraju, że potencjał intelektualny i badawczy, który powinien być wykorzystany dla dobra Kraju w chwili, gdy zaistniała taka potrzeba, był pozbawiony możliwości wdrożenia głównych wyników badań.

POLSKIE TABELY DEKOMPRESJI DO OPERACYJNYCH NURKOWAŃ SATUROWANYCH Z UŻYCIEM MIESZANIN TRIMIKSOWYCH

Przygotowując się w ZSNI TPP do operacyjnych nurkowań saturowanych na podstawie wyników własnych doświadczeń, oraz danych pochodzących z dostępnej literatury oceniono, że tabele opracowane w ramach programu CPBR 9 cel 5 powinny być dostosowane do warunków wymaganych w pracach podwodnych ze względu na:

- zmienne prędkości obniżania ciśnienia w krótkich przedziałach głębokości, co wymaga szczególnego podejścia do realizacji dekompresji,
- konieczność zmiany dozowania tlenu dla utrzymania ciśnienia parcjalego wymaganego dla dekompresji przy zmiennych prędkościach,
- wysoką precyzję pomiarów przewyższającą precyzję w systemach operacyjnych i systemach nurkowych,
- czasy trwania dekompresji dłuższe niż w dostępnych tabelach zagranicznych,
- normatywy określające ciśnienie parcjale tlenu w mieszaninie oddechowej nurka pracującego w toni zbliżone do ciśnienia plateau saturacji, co nie odpowiadało wymaganiom nurkowań operacyjnych, w których nurkowie pracują w strefie głębokości zmieniającej się w przedziałach $\pm 15m$. w stosunku do głębokości plateau saturacji. Tabele nie były testowane na dopuszczalne zmiany głębokości pracy nurka tzw. „wycieczki” (ang .excursion) w stosunku do, jak nazywano w literaturze plateau saturacji „horyzontu dekompresji”,
- opracowane „trimiksowe nurkowania saturowane” dla zaznaczenia, że podczas sprężania mieszaninę helioksovą wprowadzano do komory zawierającej powietrze. Wszystkie tabele helioksove pomijają ciśnienie parcjale azotu do 1,2 ata .(odpowiadające około 5,5m głębokości ze stosowaniem powietrza). Natomiast opracowane w 1989 roku polskie tabele dopuszczały tylko ciśnienie parcjale azotu odpowiadające jego ciśnieniu parcjalnemu w powietrzu atmosferycznym. $pN_2 = 0,78$ ata. [3].

W związku z tym, że w tym czasie Marynarka Wojenna do nurkowań głębokich używała tabel dekompresji z użyciem trimiksu, które przygotował zespół Katedry Medycyny Morskiej Wojskowej Akademii Medycznej, zwrócono się do prof. Doboszyńskiego o modyfikacje opracowanych tabel dekompresji nurkowań saturowanych i ich adaptację do wymagań nurkowań operacyjnych. Uzgodniono z prof. Doboszyńskim, że w modyfikacji uwzględniono system nurkowań głębokich z użyciem trimiksu stosowanych w Marynarce Wojennej. Spod jego ręki wyszło opracowanie „System Nurkowań Saturowanych z użyciem Trimiksu w Strefie Głębokości 80 metrów dla Platformy Wiertniczej *Petrobaltic*” DSK – 95. Współautorami dopisanymi, co dla nas było ogromnym zaskoczeniem, byli Z. Sicko i J. Kot, zabrakło natomiast lekarzy z Katedry Medycyny Wojskowej Akademii Medycznej, którzy przez wiele lat czynnie, z dużym poświęceniem opracowywali i weryfikowali tabele dekompresji nurkowań saturowanych, oraz brali udział we wdrożeniu trimiksowych tabel dekompresji do nurkowań głębokich z użyciem systemu nurkowego okrętu ORP Lech, czyli faktycznych współautorów.

W części wprowadzającej dokument analizował dostępne tabele dekompresji nurkowań saturowanych, w tym w przypadku tabel rosyjskich i firmy RANA oficjalnie będące własnością ZSN i TPP Akademii Marynarki Wojennej. Przeanalizowano pięć, aktualnych w tym czasie tabel dekompresji operacyjnych systemów nurkowań saturowanych, umożliwiających kilkugodzinną pracę w każdej dobie na głębokości 70 - 80 metrów w których stosuje się wyłącznie mieszaniny helioksove. Przyjęto kryterium oceny medycznej przydatności poszczególnych systemów na podstawie stopnia występujących przesyceń tj potencjalnego powstania przesłanek choroby dekompresyjnej w stosowanym modelu polskich tabel, uznając, że w poprawnym systemie dekompresja ze stanu pełnej saturacji nie powinna wywoływać przesyceń krytycznych. Dopuszczono jedynie niewielkie, przejściowe zmiany czynnościowe dla modelu sprawdzonego polskich tabel [4].

Sposób weryfikowania opracowanych polskich tabel został oparty o założenia dozowania obciążeń dekompresyjnych, polegające na przechodzeniu w kolejnych ekspozycjach od dopuszczalnych przesyceń tkanek mniejszych do większych. Ten sposób pozwalał na utrzymanie marginesu bezpieczeństwa z uwzględnieniem możliwych błędów w ocenie pO_2 błędów analizy, niejednorodności mieszaniny oddechowej, niedokładności pracy operatorów oraz uwzględniał inne zakłócenia podczas operacyjnych nurkowań saturowanych. Założono, że jeżeli potrafimy uwzględnić wpływ azotu na szybkość dekompresji, jego obecność lub nieobecność nie powinna mieć wpływu na jej bezpieczeństwo [4].

PARAMETRY NURKOWANIA SATUROWANEGO TABEL DSK-95 Z UŻYCIEM TRIMIKSU DLA PLATERU SATURACJI 70 I 80 METRÓW [4].

W DSK - 95 poruszono wybrane aspekty techniczne dotyczące realizacji nurkowań.

Do prac nurkowych z platformy na głębokości ≈ 80 metrów przy zastosowaniu techniki saturowanej wg metody DDC-PTC (wprowadzono pojęcie DDC z nomenklatury US Navy deck decompression chamber - komora hiperbaryczna na bazie i SDC dzwon nurkowy submassible decompression chamber) niezbędne są następujące mieszaniny oddechowe:

1. habitatowa trimiksowa,
2. dzwonowa trimiksowa (do zasilania aparatów nurkowych)
3. do indywidualnych układów oddychania dzwonowa z 25% O_2 , dzwonowa, tlen

Przygotowanie mieszaniny habitatowej trimiksowej startowej opiera się na zmieszaniu: powietrza 1 cz.obj. + azot

1.1 cz.obj. + 3.3 cz.obj. helu. Procent objętościowy tak otrzymanej mieszaniny habitatowej: $O_2 - 3,70 \%$, $N_2 - 35,18 \%$, $He - 61,12 \%$.

Ciśnienia cząstkowe składników mieszaniny habitatowej oraz ich procent objętościowy łącznie z ciśnieniami cząstkowymi składników powietrza habitatu na plateau saturacji (bezpośrednio) po sprężeniu.

	pO_2	$\%O_2$	pN_2	$\%N_2$	pHe	$\%He$
70 m (8 ata)	0.46	5.75	3.26	40.75	4.27	53.40
80 m (9 ata)	0.5	5.55	3.61	40.11	4.88	54.22

1. Po obniżeniu pO_2 d w komorze o 0,4 ata

70 m (8 ata)	0.4	5.0	3.29	41.1	4.3	53.8
80 m (9 ata)	0.4	4.5	3.65	40.5	4.94	54.9

2. Przygotowanie mieszaniny dzwonowej trimiksowej: powietrze 1 cz.obj. + hel 1 cz.obj. Składniki mieszaniny dzwonowej oraz ich procent objętościowy:

	pO_2	$\%O_2$	pN_2	$\%N_2$	pHe	$\%He$
70 m (8 ata)	0.8	10.0	3.2	40.0	4.0	50.0
80 m (9 ata)	0.9	10.0	3.2	40.0	4.5	50.0

3. Mieszanina lecznicza. Przygotowanie mieszaniny dzwonowej trimiksowej z 25% O_2 : mieszanina dzwonowa trimiksowa 1 cz.obj. + tlen 0.2 cz.obj. Procent objętościowy składu mieszaniny dzwonowej z 25% O_2 . Skład mieszaniny $O_2 - 25.0 \%$, $N_2 - 33.3 \%$, $He - 41.6 \%$

Ciśnienie cząstkowe składników mieszaniny dzwonowej z 25% O_2 oraz ich procent objętościowy:

	pO_2	$\%O_2$	pN_2	$\%N_2$	pHe	$\%He$
70 m (8 ata)	2.0	25%	2.66	33.3	3.32	41.6
80 m (9 ata)	2.25	25%	2.99	33.3	3.74	41.6

- Zalecano, by bezpośrednio przed rozpoczęciem sprężania mieszaniną habitatową (mieszaniną na plateau saturacji):
- przy włączonym systemie regeneracji w habitacie zawierającym powietrze, nurkowie 4-ro osobowego zespołu podłączają się do "indywidualnych układów oddechowych". Z układów tych oddychają mieszaniną dzwonową o zwiększonej zawartości tlenu.
 - Ciśnienie w habitacie podnosi się z szybkością od 2 do 4m/min. Po osiągnięciu ciśnienia odpowiadającego głębokości 30 metrów przerywa się sprężanie. Po potwierdzeniu, że procentowa zawartość tlenu w atmosferze komory jest nie większa aniżeli 7 %, nurkowie na polecenie kierownika nurkowania przechodzą indywidualnie na oddychanie atmosferą komory.

Po osiągnięciu zamierzonego plateau saturacji procentowa zawartość tlenu w mieszaninie oddechowej habitatu powinna wynosić przy p 8 ata \approx 5.75 %, przy p 9 ata \approx 5.55 %, co odpowiada ciśnieniu cząstkowym tlenu odpowiednio 0.46 i 0.5, a więc wyższym od zalecanego. Z tego względu zużywany przez nurków tlen uzupełnia się wówczas, gdy pO₂ osiągnie wielkość 0.4 ata. Ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji należy utrzymywać z dokładnością \pm 5% (0.38 – 0.42 ata).

Ciśnienie cząstkowe składników mieszaniny oddechowej habitatu na plateau saturacji 70 m (8 ata) powinno wynosić:

$$pO_2 - 0.4 \quad (5.0\%), \quad pN_2 - 3.29 \quad (41.1\%), \quad pHe - 4.3 \quad (53.8\%)$$

Gęstość mieszaniny odpowiada gęstości powietrza na głębokości 32.2 metra, działanie narkotyczne odpowiada powietrzu na głębokości 31.1 metra. Przewodnictwo cieplne mieszaniny jest ponad dwukrotnie mniejsze od przewodnictwa mieszaniny helioksovej na 70 metrach.

Ciśnienie cząstkowe składników mieszaniny oddechowej habitatu na plateau saturacji 80 m (9 ata) powinno wynosić: pO₂ - 0.4 (4.5%), pN₂ - 3.65 (40.6%), pHe - 4.94 (54.9%).

Gęstość mieszaniny odpowiada gęstości powietrza na głębokości 36.6 metra, działanie narkotyczne odpowiada powietrzu na głębokości 35.6 metra. Przewodnictwo cieplne mieszaniny jest ponad dwukrotnie mniejsze od przewodnictwa mieszaniny helioksovej na 80 metrach.

Podczas pracy 2-osobowej ekipy poza habitatem, dzwon oraz aparaty nurkowe są zasilane mieszaniną dzwonową. Wskazane jest, aby ciśnienie podczas pracy nurka w toni było zbliżone do ciśnienia w habitacie \pm 6 metrów, a czas pobytu na plateau był ograniczony do 10 dni. Po tym okresie z codzienną 4-o godzinową pracą każdego z nurków następuje dekompresja. Trzy godziny przed jej rozpoczęciem podnosi się ciśnienie cząstkowe tlenu w habitacie do wielkości 0.5 ata. Dekompresję przeprowadza się zgodnie z załączoną tabelą (zał. 1 i 2), utrzymując niezmiennie pO₂ na poziomie 0.5 ata. (odchylenie "in minus" nie powinno przekraczać 1%).

Od głębokości 10.5 metra procentowa zawartość tlenu w mieszaninie oddechowej habitatu powinna wynosić 24 %. Czas trwania dekompresji dla plateau saturacji 70.

Tabela nr 1 Przykład początkowej i końcowej fazy dekmpresji. System trimiksowej dekompresji saturowanej do systemu zabezpieczenia medycznego nurkowania z platformy wiertniczej Petrobaltic.

Wymagany procentowy skład mieszaniny oddechowej na plateau saturacji pO₂ 4.4% - pN₂ 40.6% - pHe 55.0%. 3 godziny przed rozpoczęciem dekompresji. Tabela nie przewidywała przerw dekompresji podczas snu nurków.

Tab.1

Przykład początkowej i końcowej fazy dekmpresji.

DEPTH [m]	TIME pressure reduction [min]	TOTAL TIME {min}=[hour : min]			
			=		
80		0 min	=	0 h	0 min
79.5	2	2 min	=	0 h	2 min
79	3	5 min	=	0 h	5 min
78.5	3	8 min	=	0 h	8 min
78	4	12 min	=	0 h	12 min
77.5	4	16 min	=	0 h	16 min
77	4	20 min	=	0 h	20 min
76.5	10	30 min	=	0 h	30 min
76	15	45 min	=	0 h	45 min
75.5	25	70 min	=	1 h	10 min
75	42	112 min	=	1 h	52 min
74.5	42	154 min	=	2 h	34 min
74	42	196 min	=	3 h	16 min
73.5	42	238 min	=	3 h	58 min
73	42	280 min	=	4 h	40 min
72.5	42	322 min	=	5 h	22 min
72	42	364 min	=	6 h	4 min
71.5	42	406 min	=	6 h	46 min
71	42	448 min	=	7 h	28 min
70.5	42	490 min	=	8 h	10 min
70	42	532 min	=	8 h	52 min
9.5	42	5614 min	=	93 h	34 min
9	42	5656 min	=	94 h	16 min
8.5	43	5699 min	=	94 h	59 min
8	44	5743 min	=	95 h	43 min

7.5	45	5788 min	=	96 h	28 min
7	47	5835 min	=	97 h	15 min
6.5	48	5883 min	=	98 h	3 min
6	50	5933 min	=	98 h	53 min
5.5	51	5984 min	=	99 h	44 min
5	53	6037 min	=	100 h	37 min
4.5	54	6091 min	=	101 h	31 min
4	56	6147 min	=	102 h	27 min
3.5	58	6205 min	=	103 h	25 min
3	60	6265 min	=	104 h	25 min
2.5	63	6328 min	=	105 h	28 min
2	65	6393 min	=	106 h	33 min
1.5	68	6461 min	=	107 h	41 min
1	71	6532 min	=	108 h	52 min
0.5	20	6552 min	=	109 h	12 min
0		6552 min	=	109 h	12 min

Czas dekompresji dla plateau saturacji 70m 95godz 44min a dla 80m 109godz 12min.

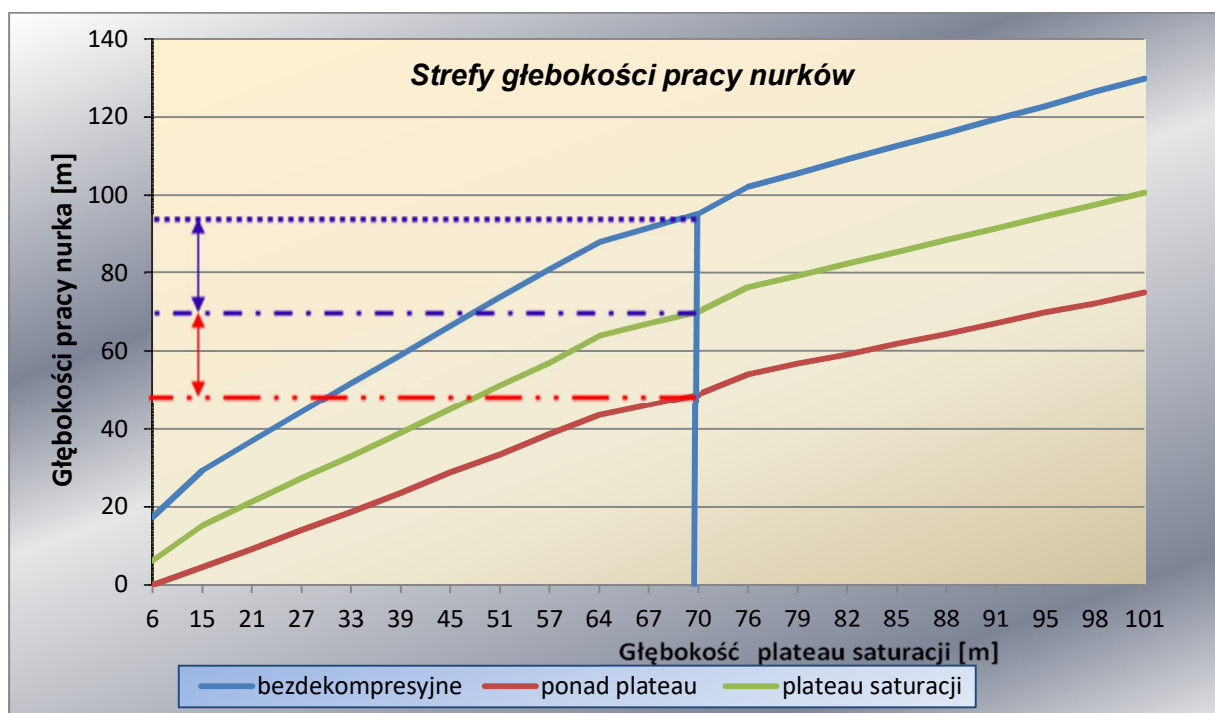
W/w tabele są oryginalne ze względu na unikalność w literaturze światowej tabel saturowanych z użyciem trimiksu w tym przedziale głębokości. Nie były one możliwe do praktycznego zastosowania w nurkowaniach operacyjnych w polskich warunkach z poniższych względów, pomijając fakt, że tabele te nie były praktycznie walidowane a weryfikowano je jedynie na sprawdzonym modelu dekompresji:

- tabele przewidziane są dla 10-dniowego pobytu na plateau, gdy stosowane na świecie tabele przewidywały 28 dobowy pobyt wraz z dekompresją,
- wykonywanie mieszanin trimiksowych w warunkach operacyjnych przedsiębiorstwa i ośrodków hiperbarycznych wymagają wielostopniowego mieszania, na czym cierpi dokładność i czas ich otrzymywania. Do otrzymania tych mieszanin można podejść, jak do mieszania dwóch czystych gazów tj. użyć powietrza lub nitroksu o złożonej zawartości tlenu mieszając go z czystym helem,
- dodatkowa konieczność monitorowania zawartości jednego z gazów obojętnych helu lub azotu,
- nie uwzględniały dostępnej techniki nurkowej, tj. dużej ilości zbiorników ciśnieniowych i możliwości ich przetłaczania,
- długości dekompresji trwającej ponad 4,5 doby, gdy z użyciem helioksu dekompresja, w zależności od tabel może być nawet o 2 doby krótsza w interesującej Petrobaltic strefie głębokości 70-75m.

KRÓTKA ANALIZA REALIZACJI ÓWCZESNYCH OPERACYJNYCH MODERNIZOWANYCH TABEL DEKOMPRESYJNYCH DLA NURKOWAŃ SATUROWANYCH

Zdaniem autorów i nie tylko, każdy system tabel dekompresyjnych powinien składać się z zestawu tabel zapewniających i określających zabezpieczenie techniczne oraz medyczne realizacji nurkowań. W nurkowaniach saturowanych zestaw tabel powinien być rozszerzony ze względu na określenie poniższych danych:

- strefy głębokości nurkowań w stosunku do plateau saturacji, (maksymalna i minimalna głębokość pracy nurków oraz ich maksymalny czas pobytu),
- czasów rozpoczęcia nurkowania po kompresji na głębokość plateau,
- czas startu do pracy nurków po osiągnięciu plateau saturacji, (zanurzenie dzwonu - pracy nurka w toni wodnej),
- czas rozpoczęcia dekompresji po powrocie nurków z ostatniego nurkowania; ostatniego w danym nurkowaniu zanurzenia dzwonu.



Rys 1. Strefy głębokości bezdekompresyjnych w stosunku do głębokości plateau pracy nurka w toni wodnej dla nurków saturowanych w/g[5].

Pełny system tabel dekompresyjnych dla nurków saturowanych powinien zawierać poniższe tabele

- robocze tabele z warunkami ich realizacji,
- tabele akceleracji dekompresji dla stanów awaryjnych, w tym procedury ewakuacji pod ciśnieniem,
- tabele dekompresji z plateau saturacji dla czasów przekroczenia głębokości bezdekompresyjnych,
- wskazania do pracy nurka na głębokościach mniejszych od plateau saturacji,
- tabele przerywania kompresji (ang „abort table”); z reguły są to tabele nurków głębokich lub przy długim czasie kompresji specjalnie wyliczane,
- tabele rekompresji leczniczej,

W/w wykaz tabel pokazuje, jak ważne jest dostosowanie wdrażanych tabel nurków saturowanych uwzględniając zespół medyczny i techniki zabezpieczające dla których tabele mają być wdrożone. W badaniach walidacyjnych tabel do nurków saturowanych sprawdza się tabele robocze i określa się wymagania zabezpieczenia technicznego i medycznego. Inne tabele dobiera się lub oblicza według założonego modelu. Np. tabele akceleracji dekompresji a tabele przerywania kompresji w zakresie poza tabelami nurków głębokich można określić przez stosowne obliczenia głębokości równoważnej lub przyjęcie dobranej metody rekompresji leczniczej. Nurkowanie saturowane stosowane na polskim szelfie jest na granicy umownej nurkowania płytkiego saturowanego w umownej granicy głębokości w zależności od kraju 50- 80m. W przypadku sytuacji przerywania kompresji z plateau saturacji 100 - 200m i głębiej nie ma takich szeroki możliwości i w stanach awaryjnych „trzymaj się” procedur związanych z dekompresją nurków saturowanych.

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę systemów tabel, które były analizowane, tak od strony technicznej, jak i medycznej.

Tabele dekompresji CIRIA Wielka Brytania - (1978 Construction Industry Research and Information Association). W systemie tym podczas pobytu na plateau oraz podczas dekompresji stosuje się mieszaninę helioksovą o zawartości azotu na poziomie oznaczalności, co wymaga specjalnego oprzyrządowania technicznego systemu nurkowego. Uzyskanie tak wysokiego stopnia czystości mieszaniny oddechowej wymaga stosowania gazów niezawierających azotu (tlen powyżej 99,5 %) oraz jego wypłukania przed kompresją z habitatu, co jest bardzo niepraktyczne i czasochłonne. W tym czasie, a nawet aktualnie, było to nie do zrealizowania w warunkach krajowych.

Tabele stosowane we włoskiej firmie RANA i zastosowane na platformach Petrobaltic z punktu widzenia szybkości obniżania ciśnienia nie różnią się od systemu US Navy 1973. Natomiast różnią się niekorzystnie warunkami w jakich przebiega obniżanie ciśnienia dekompresowanych nurków niższym pO_2 (0,33 ata), wyższym pN_2 (1,32 ata) oraz wyeliminowaniem w każdej dobie dwugodzinnej przerwy. Te trzy odstępstwa znacznie zwiększają narażenie dekompresowanych w systemie "Rana" w porównaniu z systemem US Navy 1973 w którym procent przypadków choroby ciśnieniowej i tak wynosił 11%. Należy podkreślić, że tak wysoka inwazyjność dekompresji w systemie US Navy 1973 skłoniła NEDU (Navy Experimental Diving Unit) do dokonania zmian i przekształcenia go w system US Navy 1991. Rozpatrywane narażenie nurków na chorobę ciśnieniową w systemie "Rana" potwierdza wielkości przesyceń krytycznych, według polskich badań. Jednorazowe, jedno- i dwugodzinne przesyceń w końcowej fazie dekompresji o wartości 0,4 - 0,5 ata wywołuje objawy choroby ciśnieniowej pierwszego typu u kilku do kilkunastu procent nurków. Natomiast większe zagrożenia, których wykładnikiem jest wyższy procent przypadków choroby ciśnieniowej, wywołują podobne wielkości przesyceń, ale występujące wielokrotnie, lub we wcześniejszej fazie dekompresji. Równocześnie, nieprzerwane, wielogodzinne niskie przesyceń mimo, że nie wywołują jeszcze objawów bends, mogą narażać nurków na dysbaryczną martwicę kości [4].

Podczas operacyjnych nurkowań saturowanych w trakcie dekompresji w 1995 i 1997 roku stosowano od głębokości 6,5m wymianę atmosfery komory hiperbarycznej z helioksowej na powietrzną. Ta operacja nie była ujęta w oficjalnych dokumentach włoskiej firmy RANA [6]. Kierownik nurkowania włoskiej ekipy wyjaśnił, że ten zabieg jest fizjologicznym przystosowaniem płuc nurków do oddychania powietrzem atmosferycznym. Z rozmów ze specjalistami francuskimi w 1999 roku wynika, iż taka operacja pozwala na uniknięcie „efektu Chateau”; trudności w oddychaniu gazem o niskiej gęstości, które może wywołać zjawisko braku komfortu oddechowego u nurków [7].

System US Navy 1991. Brak jest danych statystycznych w literaturze o tym poprawionym, najnowszym saturowanym systemie US Navy. Według ówczesnej oceny prof. Doboszyńskiego ten sposób

System Marynarki Wojennej Rosji (Związku Sowieckiego). Nie opublikowano częstotliwości przypadków choroby ciśnieniowej w tym systemie i wypadkowość ta nie została przedstawiona w ogólnie dostępnych publikacjach. Z dokonanej oceny wynika, że również ten sposób przeprowadzania dekompresji jest bezpieczniejszy od systemu „Rana”, aczkolwiek duża początkowa szybkość dekompresji oraz stosowanie stopniowanego obniżania ciśnienia (stacje) budzą uzasadnione wątpliwości [4]. Z tego systemu tabel zrezygnował armator radziecki zamawiający systemy nurkowe GKW 200 w Stoczni Szczecińskiej na rzecz systemu polskich tabel dekompresji, które sprawdzono podczas prób zdawczych, niestety bez operacji dzwonowej związanej z pracą nurka na głębokości o czym pisano wcześniej.

LITERATURA

1. Skrzyński S., Pachut M., Olszański R.: „Helioksowe nurkowania saturowane w Morzu Bałtyckim”, V Konferencja Naukowo-szkoleniowa „Problemy medycyny oraz Nurkowanie – problemy techniczne” 1998.
2. Skrzyński S. „Wybrane problemy techniczno-organizacyjne wdrożenia nurkowań saturowanych”. Praca pk „SATURN” AMW 1998.
3. Doboszyński T., Łokuciejewski B: „Tabele dekompresyjne dla trimiksowych nurkowań saturowanych do 120 m. wraz z zasadami rekompresji leczniczej”, CPBR-9.5. „Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą”, Katedra Medycyny Morskiej WAM, Gdynia 1990.
4. Doboszyński T., J.Kot, Z Sicko „System Nurkowań Saturowanych z użyciem Trimiksu w Strefie Głębokości 80 metrów dla Platformy Wiertniczej Petrobaltic” DSK – 95 Akademia Marynarki Wojennej 1995.
5. Skrzyński S., J.Pawlak ,S Wiśniewski Technologia Nurkowania Saturowanego w Kompleksie Nurkowym Af-2 LOTOS Petrobaltic S.A. Gdańsk 2011.
6. Normative Operative Requisites di Sicurarzza RANA 1987. Rana” Working and Safety Regulation.
7. Skrzyński S., Dokumentacja pracy pk. NURSAT Nurkowania saturowane dla potrzeb Petrobaltic i LOTOS Petrobaltic z lat 1995-2000.

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