

Krzysztof Iwankiewicz¹

SPOSOBY ZAPOBIEGANIA ZAMARZANIU AUTOMATÓW ODDECHOWYCH – PRZEGLĄD PROBLEMÓW

Streszczenie: W artykule opisano zjawisko zamarzania automatów oddechowych, jego skutki, jak i sposoby zapobiegania zamarzaniu automatów oraz podjęto próbę usystematyzowania sposobów zapobiegania temu zjawisku. Opisano także awaryjne systemy użyteczne w sytuacji, gdy automat oddechowy ulegnie oblodzeniu.

Słowa kluczowe: nurkowanie, zamarzanie automatów, systemy pasywne, systemy aktywne.

WSTĘP

Automat oddechowy jest urządzeniem umożliwiającym (wraz z zestawem butlowym tworzącym tzw. aqualung) swobodne oddychanie człowieka pod powierzchnią wody. Zasada działania automatu oddechowego polega na redukcji ciśnienia z butli do ciśnienia otoczenia. Współczesne automaty osiągają to poprzez dwa stopnie redukcji połączone węzłem. Pierwszy stopień redukuje ciśnienie czynnika oddechowego do tzw. średniego nadciśnienia względem otoczenia (8-12 bar), następnie drugi stopień obniża ciśnienie do poziomu ciśnienia otoczenia oraz dostarcza czynnik oddechowy tylko podczas wdechu.

Szybki przepływ gazów podczas wdechu znacznie obniża temperaturę gazu oddechowego. Badania Dive Lab wykazały, że temperatura przed pierwszym stopniem i za nim może wynosić od -27,8 do -55,6°C lub nawet więcej zależnie od ciśnienia w butli [18].

Spadek temperatury jest liniowo zależny od ciśnienia w butli. Im wyższe ciśnienie w butli tym większy spadek temperatury. Wpływ na temperaturę gazu ma także temperatura otoczenia, gdy nurek zanurza się w stosunkowo cieplej wodzie 23,9° C i oddycha z butli o ciśnieniu 206,8 bar, czynnik oddechowy ma w takim przypadku temperaturę za pierwszym stopniem -3,9° C, czyli poniżej zera. Większość nurków nie odczuwa tej temperatury jako dyskomfortu.

Gdy temperatura wody wynosi 4,5°C, to temperatura gazu (przy ciśnieniu początkowym w butli 206,8 bar) za pierwszym stopniem redukcji wynosi -23,3° C,

¹ Katedra Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie ,e-mail: obi@onet.pl

a przy temperaturze wody 0°C odpowiednio -28°C. Może to doprowadzić do tzw. zamarzania automatu oddechowego zarówno na pierwszym, jak i drugim stopniu. W rzeczywistych warunkach następuje wymiana ciepła z otaczającą wodą, co niweluje w pewnym stopniu niekorzystny efekt spadku temperatury [6].

Zamarzanie automatu jest zjawiskiem, w wyniku którego nurek może zostać pozbawiony dopływu czynnika oddechowego lub, co zdarza się częściej, przepływ czynnika będzie niekontrolowany i, w konsekwencji, doprowadzi do szybkiej utraty powietrza w butli. Temperatura powietrza przepływającego przez automat obniża się w wyniku efektu Joule'a-Thomsona. Przepływające przez automaty powietrze podczas rozprężania ochładza się poniżej temperatury zamarzania wody i nawet jeśli I stopień będzie odseparowany od wody a użyte powietrze odpowiednio suche, to w II stopniu zawsze będzie obecna woda (choćby para z wydechu). Lód osadzający się w gnieździe i na grzybku zaworu uniemożliwi w konsekwencji szczelne zamknięcie, co spowoduje niekontrolowany wypływ powietrza z butli lub też całkowicie uniemożliwi przepływ czynnika oddechowego [6].

Bezpośrednią przyczyną większości zgonów podczas nurkowania jest utonięcie (blisko 70%) a jedną z pośrednich przyczyn jest zamarzanie automatu oddechowego.

Skala występowania zjawiska zamarzania automatów, jak i jego wpływ na wypadki nurkowe, nie jest dostatecznie poznana. Brak jest także spójnych całościowych raportów z federacji nurkowych. Z przeprowadzonych przez autora badań literaturowych można jednak stwierdzić, iż liczba wszystkich zgonów z powodu zamarznięcia automatu oddechowego mieści się w granicach 3-17 % wszystkich zgonów wśród nurków.

Poniżej przedstawiono sposoby przeciwdziałania w/w sytuacji. Wśród sposobów zapobiegania zamarzaniu automatów oddechowych możemy wyróżnić systemy pasywne oraz aktywne. Pasywne systemy to takie, które nie posiadają własnego zewnętrznego źródła generującego ciepło jak np. wymienniki ciepła. Systemy aktywne to takie, w których zewnętrzne źródło generuje ciepło, które z kolei jest bezpośrednio lub pośrednio wykorzystane do ogrzewania gazu oddechowego.

SYSTEMY PASYWNE

Systemy działające na zasadzie wymiany ciepła z otoczeniem

Podstawowym zadaniem rozwiązań konstrukcyjnych zmniejszających ryzyko zamarzania wewnętrznego działających na zasadzie wymiany ciepła jest pobieranie ciepła z wody i ogrzewanie czynnika oddechowego oraz elementów układu redukcyjnego. Stosowane są w tym celu materiały o dobrym przewodnictwie cieplnym oraz geometrii elementów tak dobranych, by zapewnić jak największą powierzchnię wymiany ciepła.

Wśród tych konstrukcji są między innymi drugie stopnie automatów wykonane w całości z metalu, włókna węglowego (zdolności przewodzenia ciepła o ok. 10 % wyższe od metalowych drugich stopni) lub technopolimerów przewodzących ciepło [2]. Dzięki wysokiej zdolności przewodzenia ciepła ograniczającej efekt zamarzania, drugie stopnie wykazują lepsze parametry i bezpieczeństwo w zimnych wodach od drugich stopni wykonanych z tradycyjnych tworzyw sztucznych [1].

Innym rozwiązaniem tego typu są radiatory, które mogą być częścią automatu oddechowego pierwszego stopnia, jak w przypadku urządzenia Michalaka czy ożebrowania np. firmy scubapro [3]. Rozwiązanie Michalaka może mieć różne warianty wykonania np. wymiennik ciepła znajduje się pomiędzy pierwszym a drugim stopniem redukcji. W drugim wariantcie wymiennik ciepła może być zamocowany na reduktorze pierwszego stopnia lub też oba urządzenia mogą być użyte jednocześnie. Jak podaje autor konstrukcja automatu oddechowego według wynalazku, polegająca na zastosowaniu wymiennika ciepła związanego z pierwszym stopniem redukcji, zapobiega oblodzeniu zaworu redukcyjnego drugiego stopnia w warunkach nurkowania w wodach zimnych o temperaturze poniżej 10°C. Powietrze ochłodzone po pierwszym stopniu redukcji nawet o 30°C przechodząc przez wymiennik ciepła według wynalazku ulega ociepleniu do temperatury otaczającej wody i nie powoduje wzbudzenia automatu oddechowego, polegającego na niekontrolowanym wypływie powietrza z butli. Stosowanie automatu oddechowego według wynalazku zwiększa bezpieczeństwo nurkowania w wodach zimnych

Inną konstrukcją tego autora jest także wymiennik ciepła do automatu oddechowego zwany potocznie grzałką Michalaka. Urządzenie to również działa na zasadzie wymiany ciepła z otoczeniem, przy czym wymiennik znajduje się między pierwszym a drugim stopniem redukcji.

Jak podaje w swoim rozwiązaniu William B. Morgan z roku 2002 temperatura przy ciśnieniu w butli 2000 psi (ok. 138 bar) za pierwszym stopniem wyniosła ok. - 4°C przy temperaturze wody ok. 5°C. Jego rozwiązanie polegało na zastosowaniu odpowiednio długiego wymiennika, w tym przypadku metalowego wyprofilowanego przewodu zamontowanego na butli nurkowej. W tabeli 1 przedstawiono wyniki

Tabela 1. Wyniki pomiarów temperatury przy zastosowaniu przenośnego wymiennika ciepła wg patentu W. Morgana

Długość wymiennika [cm]	Ciśnienie [bar]	Temperatura wody [° C]	Temperatura za 1 stopniem [° C]	Temperatura za 2 stopniem [° C]
bez wymiennika	138	4,89	-3,89	-8,61
60,96	138	4,50	0,50	-0,11
121,92	138	4,22	1,61	2,11
182,88	138	4,00	1,11	3,11
243,84	138	3,78	1,61	3,67

pomiarów. Wraz ze wzrostem długości przewodu wzrastała temperatura powietrza na wylocie z drugiego stopnia. Bez zastosowania wymiennika temperatura wynosiła $-8,61^{\circ}\text{C}$ natomiast przy zastosowaniu najdłuższego wymiennika przyrost temperatury wyniósł ponad 12°C .

Wymienniki ciepła mogą występować pomiędzy stopniami redukcji jak w przypadku grzałki Michalaka [17], na puszcze drugiego stopnia [17] lub być też kombinacją wszystkich wymienionych rozwiązań [20].

Wbudowany w drugi stopień radiator (bimetal) to kolejny pomysł zapobiegający zamarzaniu. Jak podaje producent płytki (radiatory) są automatycznie ogrzewane wydychanym powietrzem a następnie ciepło przekazywane do zaworów i elementów szczególnie narażonych na zamarzanie [8].

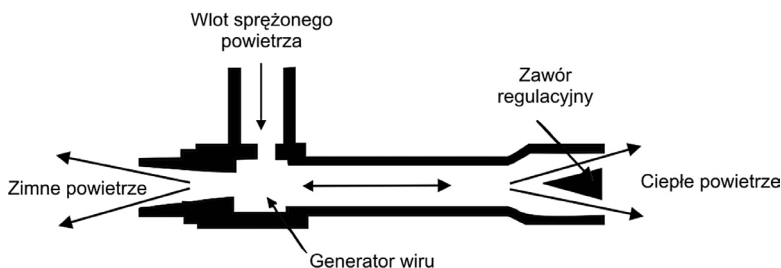
Na zasadzie wymiany ciepła działa także NCC - naturalny kanał konwekcyjny, który umożliwia przepływ wody przez pierwszy stopień. Przepływem kieruje zmiana w gęstości wody w miarę zmian temperatury. Jak podaje producent kanał o idealnym kształcie i rozmiarze, zapewnia maksymalną wymianę ciepła i optymalne parametry [1].

Firma Mares oferuje opatentowany system VAD (Vortex Assisted Design). Jest to system stosowany przy drugich stopniach redukcji. Zasada działania polega na tym, że powietrze z węża przechodzi przez drugi stopień i rurką by-pass kierowane jest bezpośrednio do ustnika. W ustniku powietrze wykonuje ruch wirowy a wir powietrzny wytwarza w swym centrum strefę niskiego ciśnienia. Podczas wdechu, niskie ciśnienie pomaga utrzymać membranę drugiego stopnia na dole jednocześnie zwiększając czułość automatu. W ten sposób zmniejsza się także opory oddechowe. Główną przyczyną formowania się lodu w automatach oddechowych jest powietrze rozprężające się w puszcze drugiego stopnia, które powoduje nagły spadek temperatury. Dzięki systemowi VAD, powietrze rozpręża się wewnątrz rurki by-pass i ustnika, redukując prawdopodobieństwo zamarzania [1].

Zastosowanie rury wirowej Ranque'a-Hilscha

Douglas Larry Marcus w 1975 opatentował urządzenie działające na zasadzie rury wirowej czyli efektu Ranque'a-Hilscha [14]. Rurki wirowe (Vortex Tubes) pozwalają na rozdzielenie strumienia sprężonego powietrza na strumień powietrza gorącego i strumień powietrza zimnego bez konieczności stosowania ruchomych elementów. Urządzenie Marcusa było skierowane do nurków rekreacyjnych i cały system montowany był na butli nurka.

Ten sam efekt wykorzystał także A. Baz i D. Uhler w urządzeniu do podgrzewania czynnika oddechowego dla nurków komercyjnych wykorzystujących zasilanie w gaz z tzw. pępowiny. Powietrze tłoczone z powierzchni trafiało do rury wirowej gdzie było rozdzielane na dwa strumienie – zimny i ciepły. Strumień zimny wędrował do wymiennika ciepła, gdzie ogrzewał się od temperatury wody a następnie



Rys. 1. Zasada działania rury wirowej

trafiał do komory mieszania, do której wpadał również strumień gorącego powietrza. W efekcie końcowym nurek biorąc wdech pobierał ciepłe powietrze z komory mieszania [4].

Profesor Baz jest również współtwórcą innego rozwiązania działającego również na zasadzie rury wirowej usytuowanej natomiast na pierwszym stopniu automatu oddechowego [5].

Isolowanie komory wodnej

Rozwiązania tego typu stosowane są wyłącznie w pierwszym stopniu redukcji. Zabezpieczenia w tym względzie są różne.

Rozwiązanie najprostsze to takie, w którym na górną część automatu nakłada się gumowy kapturek a komorę wodną wypełnia niezamarzającą cieczą spirytusem lub silikonem. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie suchej komory. Zmiany ciśnienia zewnętrznego przekazywane są na membranę przy pomocy tłoczka a nie bezpośrednio cieczy. Takie rozwiązanie zmniejsza także opory związane z ruchem membrany [13].

Jeszcze inny sposób zabezpieczenia automatu zaproponowała firma Sherwood. W produkowanym przez firmę automacie blizzard zastosowano system stałego upuszczania gazu w suchej komorze wodnej, gdzie czynnik oddechowy przez zaworek w tłoku dostaje się do komory wodnej. Nadmiar czynnika oddechowego opuszcza komorę przez zaworek nadmiarowy w korpusie automatu. Straty powietrza to ok. 15-20 l na całe nurkowanie [8].

Pozostałe metody zmniejszające ryzyko wystąpienia zjawiska zamarzania automatów nurkowych

Mesh-Grid to z kolei puszką opracowaną według patentu firmy Mares, która redukuje ciśnienie wody przepływającej przez membranę, minimalizując prawdopodobieństwo wystąpienia zamarzania w drugim stopniu, nawet w wypadku nurkowania w obecności silnych prądów.

SYSTEMY AKTYWNE

Podgrzewanie czynnika

Podgrzewacze czynnika oddechowego to przeważnie urządzenia stosowane w nurkowaniach komercyjnych, gdzie oprócz podgrzewania skafandra nurka poprzez wodę płynącą w wiązce pępowiny podgrzewany jest także przewód z czynnikiem oddechowym[12]. Urządzenia tego typu mogą być zasilane elektrycznie lub spalinowo, posiadają dużą moc (np. 160 kW) oraz masę (650 kg). Ten sposób ma za zadanie głównie poprawić komfort cieplny aniżeli przeciwdziałać zamarzaniu.

Urządzeniem, którego zadaniem jest przeciwdziałanie zamarzaniu, a w którym jako medium wykorzystuje też wodę, jest wynalazek Douglasa Larrego Marcus'a z 1977 roku. Wynalazek wykorzystywany jest do nurkowań rekreacyjnych. Podgrzewanie czynnika oddechowego odbywa się poprzez gorącą wodę znajdującą się w cylindrze zamontowanym na butli. Przez cylinder przechodzą przewody czynnika oddechowego, które ogrzewają się oraz czynnik oddechowy przez wymianę ciepła z gorącą wodą [15]. Cylinder jest dobrze izolowany aby jak najdłużej utrzymać temperaturę wody we wnętrzu oraz odizolować gorącą wodę od otaczającej wody, której temperatura może wynosić nawet -2°C .

Innym rozwiązaniem z tej grupy jest podgrzewacz i nawilżacz powietrza do aparatów oddechowych. Urządzenie może być stosowane zarówno na powierzchni jak i pod wodą. Jak podaje wynalazca w opisie patentowym zastosowania urządzenia obejmują wszelkie warunki, w których powietrze lub gaz oddechowy muszą być użytkowane nawet przy ekstremalnie niskich temperaturach i wilgotności. Autor wynalazku sugeruje, że urządzenie może być wykorzystywane zarówno w nurkowaniu jak i wspinaczce, lotnictwie jak w misjach kosmicznych. Urządzenie wykorzystuje źródło wodoru w postaci gazowej, którego ilość jest bardzo mała i odpowiednio dozowana w stosunku do gazu oddechowego. W zbiorniku pomiędzy pierwszym a drugim stopniem redukcji lub już w komorze maski oddechowej następuje katalityczne spalanie wodoru co doprowadza do zwiększenia temperatury gazu oddechowego. Ponieważ procentowa zawartość wodoru w mieszanke jest stosunkowo niewielka nie grozi ona wybuchem ani zatruciem – autor przedstawia dane, z których wynika, że przy stężeniu wodoru w granicach 1% temperatura gazu powinna wynieść aż 80°C [9].

Zastosowanie innego czynnika oddechowego

Zastosowanie helu. Z przeprowadzonych przez dr Wiktora Bolka i Zakład Automatyki i Procesów Energetycznych Politechniki Wrocławskiej w 2000 roku rozważań teoretycznych i eksperymentalnych wynikało, że gwałtowny spadek temperatury w wyniku efektu Joule'a-Thomsona można trwale i całkowicie wyeliminować.

W mieszaninie o zawartości helu co najmniej 40 % nie następuje spadek temperatury gazu podczas przepływu ze względu na termodynamiczne własności helu. W związku z tym dodanie do mieszaniny oddechowej helu zmniejszy lub całkowicie wyeliminuje ryzyko zamarznięcia automatu niezależnie od temperatury otaczającej wody [6]. Niemniej jednak w nurkowaniach płytkich do 50 metrów zastosowanie helu jest nieopłacalne, ponieważ koszt napełnienia 12 litrowej butli trimiksem* to 140-280 pln, gdzie koszt powietrza to 12-18 pln.

Zastosowanie cieczy. Choć brzmi to abstrakcyjnie, badania nad oddychaniem cieczą były prowadzone już niemal 50 lat temu – w 1963 r. dr J. Kylstra, fizjolog z holenderskiego uniwersytetu w Lejdzie przeprowadził eksperyment, w którym w wodzie o odpowiednim zasoleniu i obficie przesyconej tlenem umieścił 17 myszek. Eksperyment powiódł się częściowo, ponieważ myszki były zbyt małe i nie można było w porę wysuszyć ich płuc w konsekwencji wszystkie zdechły [10]. Dlatego też w kolejnym etapie Kylstra użył psów, którym dużo łatwiej było osuszyć płuca i zwierzęta żyły wiele miesięcy po eksperymencie. Był on w stanie utrzymać zwierzęta przy życiu do 18 godzin. Oprócz osuszania płuc pojawił się drugi problem – dwutlenek węgla nie był wydalany z organizmu wystarczająco szybko i jego ilość dochodziła szybko do granicy toksyczności; problem ten był poważnym utrudnieniem.

Podobny eksperyment w roku 1966 przeprowadził dr Leland Clark. Dr Clark stworzył technikę, dzięki której mysz wytrzymała ponad 20 godzin, oddychając cieczą o temperaturze 18 stopni. Niestety pojawiały się problemy z płucami zwierząt związane z toksycznymi nieczystościami płynu, którym oddychały czyli fluorocarbonu czy perfluorokarbonu w skrócie PFC [7].

Przez wiele lat trwały badania i obecnie proces dopuszczania PFC do użytku terapeutycznego został już w niektórych przypadkach zakończony lub jest w końcowej fazie badań klinicznych. Dotyczy to na przykład stosowania związków perfluorowanych jako cieczy umożliwiających czasowe wspomaganie procesu oddychania podczas sztucznej wentylacji płuc, w tym także noworodków (III faza badań klinicznych w Europie i USA), stosowania PFC w postaci emulsji jako zamiennika krwi w tkankach zagrożonych niedotlenieniem (III faza badań klinicznych w Europie i USA), czy użycia ich jako medium służącego do przechowywania organów przeznaczonych do transplantacji (dopuszczone do użytku w Europie i USA) [19].

Zastosowanie w/w cieczy do nurkowania wyeliminowałoby całkowicie możliwość zamarzania automatu oddechowego, ze względu na brak takowego. Takie rozwiązanie niesie też wiele innych korzyści, jak choćby wyeliminowanie długotrwałej dekompresji czy możliwość nurkowania na niemal nieograniczone głębokości.

* Trimix - mieszanina tlenu helu i azotu w odpowiednich proporcjach odpowiednio dobranych od głębokości nurkowania.

Awaryjne systemy w przypadku wystąpienia zjawiska zamarzania

W przypadku kiedy automat zamarznie, istnieją sprzętowe zabezpieczenia takie jak butla ucieczkowa czy dysza FCD, niemniej jednak najlepszym zabezpieczeniem powinien być pewny i dobrze wyszkolony parter nurkowy.

Spare air czy H2Odyyssey Extra Air Source to tzw. butle ucieczkowe o pojemnościach od 0,28 l do prawie 1 l z ciśnieniem roboczym 200 bar. Posiadają zintegrowany automat pierwszego i drugiego stopnia z zaworem montowanym bezpośrednio do butli. Butle tego typu umożliwiają bezpieczne wyjście na powierzchnię w przypadku awarii podstawowego zestawu lub braku czynnika oddechowego.

Dysza FCD (Free Flow Control Device) to urządzenie stanowiące element łączący wąż średniociśnieniowy z reduktorem drugiego stopnia wykonane w postaci tulejki zaopatrzonej w dwa zestawy otworów o różnych średnicach, oddzielonych wewnętrzną przegrodą. Na tulejce jest osadzony przesuwne kołnierz sterujący dopływem powietrza do drugiego stopnia redukcji. W przypadku zamarznięcia automatu urządzenie umożliwia nurkowi całkowite odcięcie dopływu powietrza poprzez ręczne przesunięcie kołnierza, co uniemożliwia gwałtowną utratę powietrza z butli. Urządzenie to nie chroni przed samym zamarzaniem a jedynie eliminuje tragiczne skutki tego zjawiska [16].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stosowanie wyżej wymienionych wynalazków w automatach oddechowych może wpłynąć na zwiększenie komfortu i bezpieczeństwa nurkowania nie tylko w wodach zimnych.

Pomimo tak wielu rozwiązań zjawisko zamarzania automatów nadal występuje i przyczynia się do urazów oraz zgonów wśród nurków.

W publikacji z roku 2007 R. Stinton podaje, iż brak jest aktywnych systemów ogrzewania gazów oddechowych dostępny dla nurkowań swobodnych. Stwierdzenie to nie jest prawdą, jak widać na przykładzie rozwiązania Douglasa Larrego Marcus'a z 1977 roku czy Davida Castel'a i Stephena E. Suess'a z tego samego roku [21]. Natomiast prawdą jest, że żadne z tych rozwiązań nie jest obecnie stosowane. Pozwala to sądzić, że urządzenia te nie były w stanie w pełni zabezpieczyć nurka, bądź ich zastosowanie na szeroką skalę było niemożliwe, bądź za drogie.

Pożądanym rozwiązaniem wydaje się być połączenie systemu pasywnego z aktywnym i stworzenie takiego systemu, który mógłby wykorzystywać np. wymiennik ciepła czy rurę wirową z cylindrem z gorącą wodą lub elektrycznym elementem oporowym podgrzewającym przepływający czynnik.

Zastosowanie gazu, w którym byłoby więcej niż 40 % helu jak proponuje dr Wiktor Bolek, eliminuje zjawisko zamarzania, jednak koszt każdego nurkowania wzrasta znacznie ponad dziesięciokrotnie w przypadku nurkowań rekreacyjnych.

Poza tym stosując mieszankę trimiksovą należy mieć na uwadze, że im więcej będzie zawierała ona helu a mniej tlenu tym dłuższa będzie dekompresja [11].

Oczywistym wydaje się, że zastosowanie suchego powietrza, czyli dobrej sprężarki i filtrów, powinno wyeliminować ryzyko zamarzania. Suche powietrze eliminuje możliwość wystąpienia zamarzania na pierwszym stopniu, jednak w przypadku drugiego stopnia redukcji wpływ na zjawisko ma wilgotność wydychanego powietrza, którego wyeliminować się nie da.

Nawet najlepszy system zapobiegający zamarzaniu nie jest w stanie zabezpieczyć nurkującego przed wypadkiem ani w pełni wyeliminować zjawiska, dlatego najważniejsze jest umiejętne posługiwanie się sprzętem oraz szkolenia nurków na wysokim poziomie, a zwłaszcza nabycie przez nich umiejętności radzenia sobie w awaryjnych sytuacjach.

LITERATURA

1. http://www.mares.com/common/_/5501.5bacbdef.dl.
2. <http://www.oceania.pl/index2.php?action=labs&id=3>.
3. <http://scubapro.com.pl/produkt/MK25-id11.html>.
4. Baz A, Uhler D.: A Compresses gas-powered heating system for underwater divers. *Ocean Engineering*, 1986: 273–90.
5. Baz A. Readey, T., Uhler, D.: A self-heated first stage breathing regulator for underwater divers. *Ocean Engineering*, 1986: 373–86.
6. Bolek W.: Jak wyeliminować zamarzanie automatów? *Biuletyn Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej*, 2000: 3.
7. Clark L, Gollan R.: Survival of mammals breathing organic liquids equivalent with oxygen at atmospheric pressure. *Science*, 1966: 1755–56.
8. Clarke J, Rainone M.: Evaluation of sherwood scuba regulators for use in cold water.
9. David Castel SES.: Heater and humidifier for breathing apparatus. 1977.
10. Górski J.: *Podbój głębin oceanów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1964.
11. Krzyżak J.: *Medycyna dla nurków w pigułce*. Wydawnictwo “KOOPgraf”, Poznań 2008.
12. Long R.: W.: Diver’s gas heater. 1977.
13. Macke J., Kuszewski K., Zieleniec G.: *Nurkowanie (2 wyd.)*. “Alma-Press”, Warszawa 2001.
14. Marcus D.: Breathing gas heater. 1975.
15. Marcus D.: Breathing gas heater for use by a diver comprising double walled cylinder and inner container filled with hot liquid prior to use. 1977.
16. Michalak M.: *Automat oddechowy*. 1994.
17. Michalak M.: *Wymiennik ciepła do automatu oddechowego*. 2006.
18. Morgan B., Ryan P., Schultz T.: Solving cold water breathing problems underwater. *Underwater Magazine*, 2001: 15–18.
19. Pilarek M, Szewczyk K.: Zastosowania perfluorozwiązków jako ciekłych nośników gazów oddechowych w medycynie biotechnologii. *Biotechnologia*, 2005: 125–50.
20. Semeia R.: *Regulator for underwater breathing apparatus comprising*, 2004.

21. Stinton R.: A review of diver passive thermal protection strategies for polar diving: present and future. [In:] Sayer M.A. and Lang M.D.J. (eds.) Proceedings of the International Polar Diving Workshop. Svalbard, March 15-21, Washington 2007: 30.

PREVENTION METHODS AGAINST FREEZING BREATHING REGULATORS – – PROBLEMS REVIEW

Abstract

The article describes the phenomenon of freezing breathing regulators, its effects and methods of prevention. Attempt of systematizing prevention methods of the phenomenon is presented as well. The emergency systems are also described useful in case of regulators freezing.

Keywords: diving, free flow regulators, passive systems, active systems.