

ANALIZA WYPADKÓW NURKOWYCH ZWIĄZANYCH Z ZAMARZANIEM AUTOMATÓW ODDECHOWYCH

AN ANALYSIS OF DIVING ACCIDENTS RELATED TO THE FREEZING OF DIVING REGULATORS

Krzysztof Iwankiewicz, Remigiusz Iwańkiewicz

W artykule opisano zjawisko zamarzania automatów oddechowych, przedstawiono statystykę wypadków nurkowych oraz ich związek z zamarzaniem automatów. Przedstawiono także wyniki badań awaryjności automatów oddechowych związanych z zamarzaniem zarówno w laboratorium, jak i w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: nurkowanie, zamarzanie automatów, wypadki nurkowe.

The article describes the phenomenon of freezing of diving regulators and presents the statistics of diving accidents and their relation to regulator freeze-ups. The article also presents the results of failure frequency tests on diving regulators conducted in the laboratory as well as in real conditions.

Keywords: diving, free-flow regulators, diving accidents.

АНАЛИЗ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НЫРЯНИЯ, СВЯЗАННЫЙ С ЗАМЕРЗАНИЕМ АППАРАТА ДЫХАНИЯ

Эта статья описывает явление замерзания аппарата дыхания и представляет статистику несчастных случаев ныряния и их связь с замерзанием аппаратов. В статье представлены результаты исследования отказа аппаратов дыхания, связанные с замораживанием как в лабораторных условиях так и в реальном мире.

Ключевые слова: Ныряние, замерзание аппаратов, несчастные случаи ныряния.

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 różnica temperatur przed pierwszym stopniem i za nim może wynosić $-27,8$ - $-55,6^{\circ}\text{C}$ lub nawet więcej przy ciśnieniu w butli rzędu 413,7 bar [14].

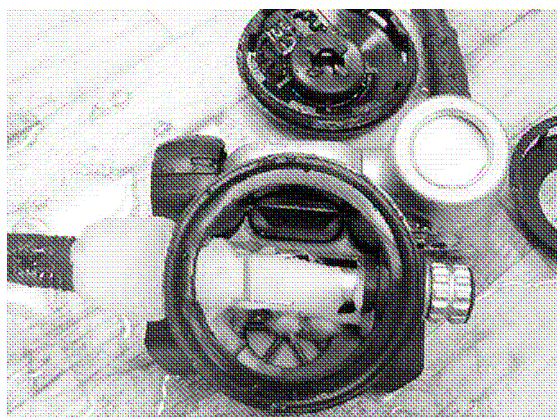
Spadek temperatury jest liniowo zależny od ciśnienia w butli. Im wyższe ciśnienie w butli tym większy spadek temperatury.

Wpływ na temperaturę gazu ma temperatura otoczenia, gdy nurk zanurza się w stosunkowo ciepłej wodzie $23,9^{\circ}\text{C}$ i oddycha z butli o ciśnieniu 206,8 bar, czynnik oddechowy ma w takim przypadku temperaturę za pierwszym stopniem $-3,9^{\circ}\text{C}$, czyli poniżej zera. Większość nurków nie odczuwa tej temperatury jako dyskomfortu.

Jednak nawet w przypadku takiej temperatury wody organizm musi niwelować straty ciepła. Im niższa temperatura gazu tym większe wychłodzenie nurka i dyskomfort nurkowania a oprócz strat ciepła, zimne i suche powietrze powoduje zwiększone odwodnienie nurka.

Gdy temperatura wody wynosi $4,5^{\circ}\text{C}$ to temperatura gazu (przy ciśnieniu początkowym w butli 206,8 bar) za pierwszym stopniem redukcji wynosi $-23,3^{\circ}\text{C}$, a przy temperaturze wody 0°C odpowiednio -28°C . Może to doprowadzić do tzw. zamarzania automatu oddechowego zarówno na pierwszym, jak i drugim stopniu.

Jak wykazały testy przeprowadzone w Dive Lab na Florydzie w skrajnych przypadkach przyrost lodu na automacie wyniósł aż pół cala powłoki lodu wewnątrz i na zewnątrz drugiego stopnia, także pierwszy stopień był zalodzony - bryła lodu pokryła niemal cały automat [14].



Rys. 1. Oblodzony 2 stopień automatu.



Rys. 2. Oblodzony 1 stopień automatu.

W rzeczywistych warunkach następuje wymiana ciepła z otaczającą wodą, co niweluje w pewnym stopniu niekorzystny efekt spadku temperatury [5].

INTRODUCTION

A breathing apparatus (together with a cylinder set creating the so-called aqua-lung) is a device allowing people to breathe freely under water. Its function is centred around the reduction of cylinder pressure to ambient pressure. Modern regulators achieve this goal with two reduction stages connected with a hose. The first stage reduces the pressure of a breathing mix to the so-called average overpressure in relation to ambience (8-12 bars), whereas the second stage decreases the pressure to the level of ambient pressure and supplies the breathing mix only during inhalation. A fast flow of gases during inhalation significantly lowers the temperature of the breathing gas. Dive Lab studies showed that temperature differences before the first stage and after it may reach from -27.8 to -55.6°C or even more with cylinder pressure of 413.7 bars [14].

Temperature decrease is linearly dependent on the pressure in the cylinder. The higher the cylinder pressure the greater the temperature decrease.

Ambient temperature has an impact on gas temperature. When a diver is submerged in relatively warm water of say 23.9°C and breathes from a cylinder with the pressure of 206.8 bars, the temperature of the breathing mix after the first stage is equal to -3.9°C, i.e. has a value below zero. Most divers do not experience this temperature as uncomfortable.

However, even with such water temperatures, the human body will experience heat loss. The lower the gas temperature the greater the diver's cooling and discomfort during the dive, and, in addition to heat losses, cold, dry air will lead to increased dehydration of the diver.

When the water temperature is 4.5°C the gas temperature (with initial cylinder pressure of 206.8 bars) after the first reduction stage is equal to -23.3°C, whereas with water temperature of 0°C it reaches -28°C. This may lead to regulator freeze-up both at the first and the second stage.

As the tests carried out at Dive Lab in Florida indicated, in extreme cases the thickness of icing of a regulator reached as much as half an inch inside and outside the second stage, with the first stage being covered with ice as well – a cake of ice covered nearly the entire apparatus [14].



Fig. 3. Icing of the 2nd stage of a regulator.



Fig. 4. Icing of the 1st stage of a regulator.

In real conditions heat exchange with ambient water takes place, which to a certain extent diminishes the unfavourable effect of temperature decrease [5].

1. ZAMARZANIE AUTOMATU

Zamarzanie automatu jest sytuacją, w wyniku której 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 granicach $-27,8$ do $-55,6^{\circ}\text{C}$ (w zależności od początkowego ciśnienia w zestawie butlowym i temperatury otoczenia) w wyniku efektu Joule'a-Thomsona. Skutki tego efektu można zniwelować polepszając wymianę ciepła (jak np. w przypadku grzałki Michalaka lub ożebrowania gniazda II stopnia) lub zmniejszając wydatek automatu. Sposoby te tylko opóźniają zamarznięcie automatu, zwłaszcza, jeżeli nurkowanie jest prowadzone w zimnych wodach ($0-4^{\circ}\text{C}$). Przepływające przez automaty powietrze podczas rozprężania ochładza się poniżej temperatury zamarzania wody i jeśli I stopień odseparuje się od wody i użyje odpowiednio suchego powietrza, 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 czynnik [5].

ZAMARZANIE ZEWNĘTRZNE - występuje w komorze wodnej pierwszego stopnia redukcji, uwidacznia się powstawaniem bryły lodu na korpusie automatu I stopnia. Lód w komorze wodnej blokuje prace znajdujące się tam sprężyny uniemożliwiając szczelne zamknięcie grzybka. Zamarzanie wywołane jest spadkiem temperatury przepływającego przez automat gazu na skutek jego rozprężania. Spadek temperatury występuje zawsze ale zamarznięcie występuje tylko przy zbyt dużym obciążeniu automatu i niskich temperaturach zewnętrznych.

ZAMARZANIE WEWNĘTRZNE - występuje wewnątrz komór powietrznych automatu, dotyczy obu stopni. Wywołane jest spadkiem temperatury czynnika oddechowego poniżej zera po przejściu przez pierwszy i drugi stopień automatu. Spadek ten powoduje wykraplanie pary wodnej z czynnika oddechowego i przywieranie kawałków lodu do elementów automatu [21].

Czynniki wpływające na zamarzanie automatów oddechowych:

- zbyt duży wydatek automatu,
- sposób oddychania i używanie jednocześnie inflatora lub skafandra suchego,
- zbyt duże ciśnienie w zestawie butlowym (np. 300 bar i więcej),
- temperatura otoczenia,
- głębokość nurkowania,
- wilgotności czynnika oddechowego,
- skład czynnika oddechowego,
- budowa automatu (materiał, wielkość obudowy, możliwość pobierania ciepła).

2. STATYSTYKI WYPADKÓW NURKOWYCH

Szacunkowo na świecie jest ok. 15 milionów nurków rekreacyjnych, którzy wykonują ponad 250 milionów nurkowań. Magazyn „Diver Skin” na podstawie własnych badań szacuje, że każdy nurek przeprowadza średnio 12 nurkowań rocznie [17].

Zależnie od badającego przyjmuje się różne ryzyka wystąpienia wypadku śmiertelnego. I tak dr Taylor na podstawie własnych badań określił ryzyko wypadku ze skutkiem śmiertelnym na poziomie 1 na 200.000 nurkowań, natomiast doktor Elliot i doktor Bennet na 2 do 4 przypadków na 100.000 nurkowań – obie wartości dla Stanów Zjednoczonych.

1. REGULATOR FREEZE-UP

Regulator freeze-up can result in a diver being deprived of a breathing mix or, what is more common, its flow becoming uncontrolled and, consequently, leading to its quick loss from the cylinder. The temperature of the air flowing through the apparatus is decreased within the range of -27.8 and -55.6°C (depending on initial cylinder pressure and ambient temperature) as a result of the Joule Thomson effect. The results of this effect may be diminished by an improvement of heat exchange (as e.g. in the case of Michalak's heater or by ribbing of the 2nd stage socket) or by decreasing the regulator's output. These methods however only delay the icing, especially if diving is carried out in cold waters (0-4°C). The temperature drop comes when compressed gas which is stored in a cylinder is stepped down in pressure via a regulator to its working pressure, the reduction cooling the gas to below the freezing point of water – water is always present within the 2nd stage of the apparatus (even if just the resulting vapour from exhalation), even if the 1st stage is separated from the water, and the correct volume of dry air is used. In consequence, the ice settling in the socket and on the valve head will impair the regulator's tightness and lead to an uncontrolled outflow of air from the cylinder or completely empty it [5].

- EXTERNAL FREEZE-UP – results in an ice cake forming on the body of the 1st stage. The ice blocks the work of an externally located spring that is a key component to the setting of the regulator's inter-stage pressure, preventing the tight closing of the valve head within the 1st stage. The icing is caused by the decrease of temperature of the gas flowing through the apparatus as a result of its reduction in pressure in the first stage. Temperature loss is a common phenomenon, whereas icing occurs only when the load on the regulator is too high and external temperatures are too low.

- INTERNAL FREEZE-UP – occurring inside the regulator, concerns both stages of the equipment. It is invoked by a temperature decrease of the breathing mix below zero after passing through the first and the second stage. The said decrease causes condensation of water vapour from the breathing mix and the adherence of ice to the regulator's components [21].

Factors having an influence on regulator icing are:

- too large an output of the regulator,
- breathing manner combined with the use of a buoyancy compensator's inflator or a dry suit inflate
- too high a pressure in the cylinder set (e.g. 300 bars or more),
- ambient temperature,
- diving depth,
- breathing mix humidity,
- breathing mix composition,
- apparatus construction (material, body size, heat reception capacity).

2. DIVING ACCIDENTS STATISTICS

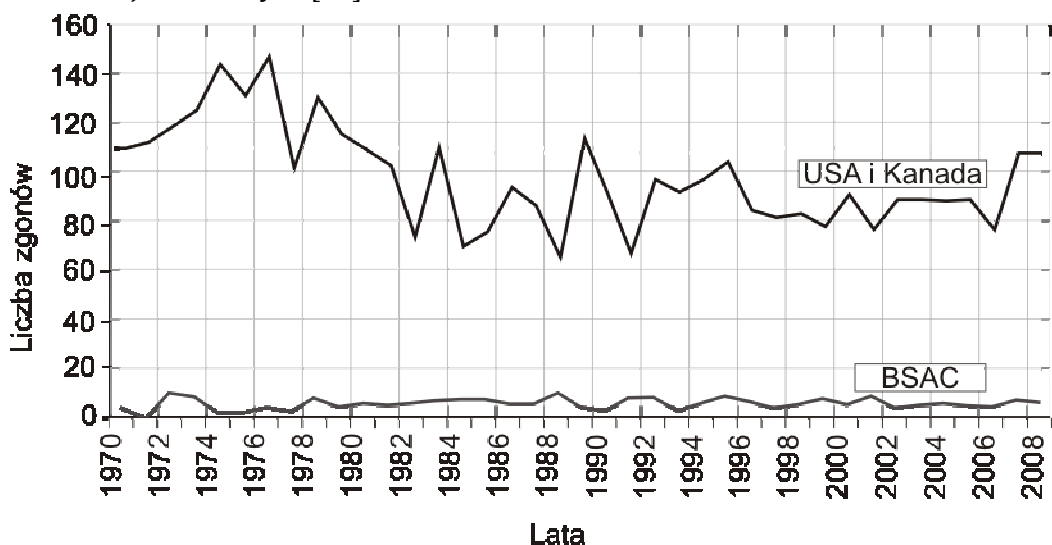
The estimated number of recreational divers in the world reaches approximately 15 million, with 250 million dives performed by them. Based on its own research, "Diver Skin" magazine assessed that each diver carried out on average 12 dives a year [17].

Various sources adopt different risk ratios regarding fatal accidents. And so, according to Taylor, Ph.D., the risk of a diving accident resulting in the diver's death reaches 1 per 200,000 dives, whereas according to Elliot, Ph.D., and Bennet, Ph.D., there are 2 to 4 such cases per 100,000 dives – both values determined for the USA.

Inne wartości podaje z kolei Santoro, gdzie dla Stanów Zjednoczonych przyjmuje ryzyko na poziomie 1 na 100.000 nurkowań, natomiast dla Australii 1 na 120.000 a dla Japonii aż 6,5 na 100.000 nurkowań [17].

Jak podaje Poleszak, statystyka wypadków nurkowych w Polsce w badanym okresie (1999-2007) wyniosła 1 na 667.000 nurkowań, jednak autor artykułu zastrzega, że tak optymistyczne wartości mogą być spowodowane błędnym oszacowaniem ilości nurkowań (4 mln w badanym okresie), bądź nierzetelnymi informacjami na temat wypadków nurkowych (60 zgonów) [17].

Każdego roku około 125 nurków ginie w trakcie nurkowania (dane z Ameryki Północnej, Europy i Azji). Z tej liczby 50-60 płetwonurków umiera w samych tylko Stanach Zjednoczonych [12].



Rys. 3. Liczba zgonów nurków w latach 1970-2008.

Poniżej przedstawiono statystyki wypadków nurkowych opierając się na raportach największych światowych organizacji PADI, DAN, BSAC podając przyczyny śmierci.

Raport Padi (Professional Association of Diving Instructor) przedstawia statystyki wypadków nurkowych biorąc pod uwagę dwa okresy - lata 1989-1998 oraz 1999-2008 [18]. Każdy z nich podzielono na 3 grupy:

- śmiertelne wypadki w trakcie kursów PADI,
- śmiertelne wypadki certyfikowanych nurków PADI poza kursem,
- oraz zgony profesjonalnych instruktorów, asystentów i divemasterów PADI podczas pracy.

Z danych PADI wynika, że przez 20 lat przeprowadzono 63,041,231 nurkowań szkoleniowych i wydano 17,224,125 certyfikatów a liczba zgonów podczas szkoleń wyniosła 304. Śmiertelne wypadki certyfikowanych nurków PADI poza kursem wyniosły 808 a zgony wśród instruktorów, asystentów i divemasterów wyniosły 22 przypadki w okresie 1989-2008 roku. Od momentu powstania PADI w 1967 stowarzyszenie wydało 20 milionów certyfikatów (2011 underwater journal PADI), co stanowi 60-70 % wszystkich wydawanych na świecie certyfikatów. Liczba instruktorów i divemasterów wyniosła w 2008 - 134,959.

Other results, on the other hand, determined by Santoro, state that the risk of a fatal diving accident is equal to 1 case per 100,000 dives for the USA, whereas for Australia 1 per 120 000, and for Japan as many as 6.5 cases per 100,000 dives [17].

According to Poleszak the statistics of diving accidents in Poland in the period in question (1999-2007) indicated 1 fatal accident per 667,000 dives; however, the author stipulated that such optimistic values may result from an erroneous estimation of the number of dives (4 million in the indicated period) or unreliable information concerned with diving accidents (60 deaths) [17].

Each year approximately 125 divers die while performing dives (data from North America, Europe and Asia). From this number, 50-60 divers die in the United States [12].

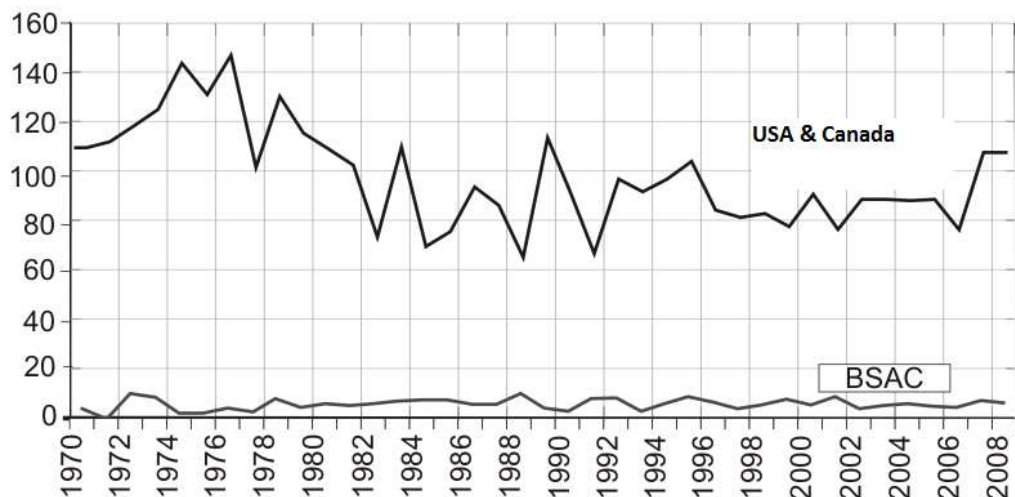


Fig. 3. Number of divers' deaths in the years 1970-2008.

The table below presents diving accidents statistics based on the reports prepared by the largest world organisations PADI, DAN, BSAC with the specification of the causes of deaths.

The PADI report (Professional Association of Diving Instructors) presents the statistics concerning two periods – the years 1989-1998 and 1999-2008 [18]. Both periods were divided into 3 groups:

- fatal accidents during PADI courses,
- fatal accidents of certified PADI divers outside the course,
- deaths of professional PADI instructors, assistants and dive-masters at work.

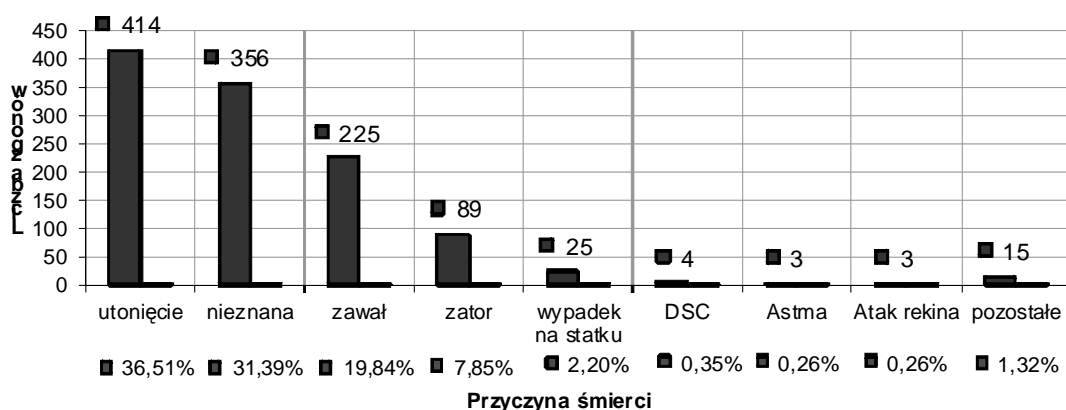
According to PADI data, 63,041,231 training dives were carried out and 17,224,125 certificates were issued in the specified period of 20 years, and the number of deaths during training courses reached 304. Fatalities among certified PADI divers outside the course amounted to 808, whereas deadly incidents among instructors, assistants and dive-masters reached 22 in the period 1989-2008. Since PADI's establishment in 1967, the association has issued 20 million certificates (2011 underwater journal PADI), i.e. 60-70% of all such certificates issued worldwide. The number of instructors and dive-masters in 2008 was equal to 134,959.

Tabela 1.

Zestawienie zgonów z raportu PADI w latach 1989-2008.

Przyczyna śmierci	Wypadki po za kursem		Wypadki podczas kursu		Wypadki Instruktorów		SUMA	
	Liczba	Procent	Liczba	Procent	Liczba	Procent	Liczba	Procent
Utonięcie	329	40,72%	80	26,32%	5	22,73%	414	36,51%
Nieznana	263	32,55%	85	27,96%	8	36,36%	356	31,39%
Zawał	125	15,47%	96	31,58%	4	18,18%	225	19,84%
Zator	61	7,55%	27	8,88%	1	4,55%	89	7,85%
Wypadek na statku	14	1,73%	7	2,30%	4	18,18%	25	2,20%
DSC	3	0,37%	1	0,33%			4	0,35%
Astma	2	0,25%	1	0,33%			3	0,26%
Atak rekina	2	0,25%	1	0,33%			3	0,26%
Pozostałe	9	1,11%	6	1,97%			15	1,32%
							SUMA	100,00%
Mężczyźni	636	78,71%	218	71,71%	19	86,36%	873	0,7698413
Kobiety	166	20,54%	86	28,29%	3	13,64%	255	0,2248677
Niezidentyfikowani	6	0,74%	0	0	0	0,00%	6	0,005291
Wszyscy	808	100%	304	100%	22	100,00%	1134	100,00%

W raporcie DAN przeanalizowano grupę 814 ofiar wypadków z lat 1992-2003 [12]. Raport ten nie uwzględnia nieznaną przyczyn zgonów jak w przypadku raportu PADI, natomiast liczba utonięć pozwala sądzić, że raport DAN łączy obie grupy, ponieważ suma zgonów w z raportu PADI (utonięcia i nieznane) 67,9 % jest bardzo zbliżona do danych o utonięciach z raportu DAN – 70 %.



Rys. 4. Przyczyny śmiertelnych wypadków nurkowych z lat 1992-2003 (raport PADI).

Table 1.

Fatalities according to PADI report for the years 1989-2008.

Cause of death	Accidents outside the course		Accidents during the course		Instructor accidents		TOTAL	
	Number	Per cent	Number	Per cent	Number	Per cent	Number	Per cent
Drowning	329	40.72%	80	26.32%	5	22.73%	414	36.51%
Unknown	263	32.55%	85	27.96%	8	36.36%	356	31.39%
Heart attack	125	15.47%	96	31.58%	4	18.18%	225	19.84%
Embolus	61	7.55%	27	8.88%	1	4.55%	89	7.85%
Accident on board a ship	14	1.73%	7	2.30%	4	18.18%	25	2.20%
DSC	3	0.37%	1	0.33%			4	0.35%
Asthma	2	0.25%	1	0.33%			3	0.26%
Shark attack	2	0.25%	1	0.33%			3	0.26%
Other	9	1.11%	6	1.97%			15	1.32%
							TOTAL	100.00%
Men	636	78.71%	218	71.71%	19	86.36%	873	0.7698413
Women	166	20.54%	86	28.29%	3	13.64%	255	0.2248677
Unidentified people	6	0.74%	0	0	0	0.00%	6	0.005291
Total	808	100%	304	100%	22	100.00%	1134	100.00%

The DAN report provided an analysis of a group of 814 fatalities from the years 1992-2003 [12]. The report did not take into consideration the unknown causes of deaths as was the case with the PADI report; however, the number of cases of drowning allows one to conclude that the DAN report combines both these categories (drowning and unknown) as the total number of such deaths from PADI report – 67.9 % - comes very close to the drowning data from the DAN report – 70 %.

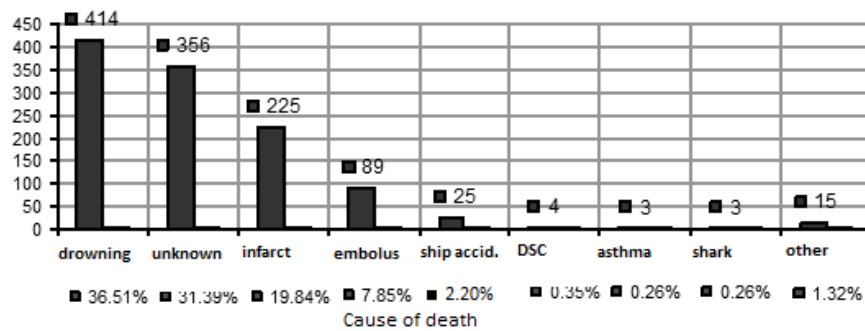
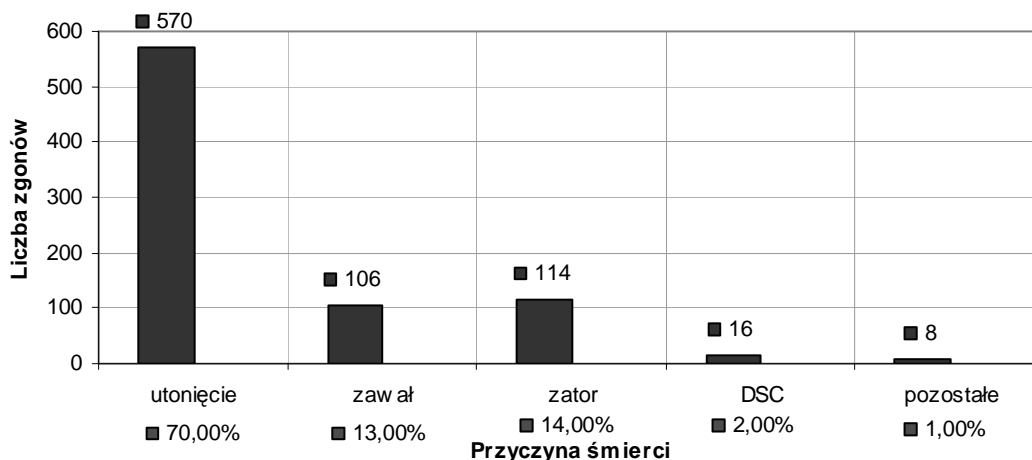


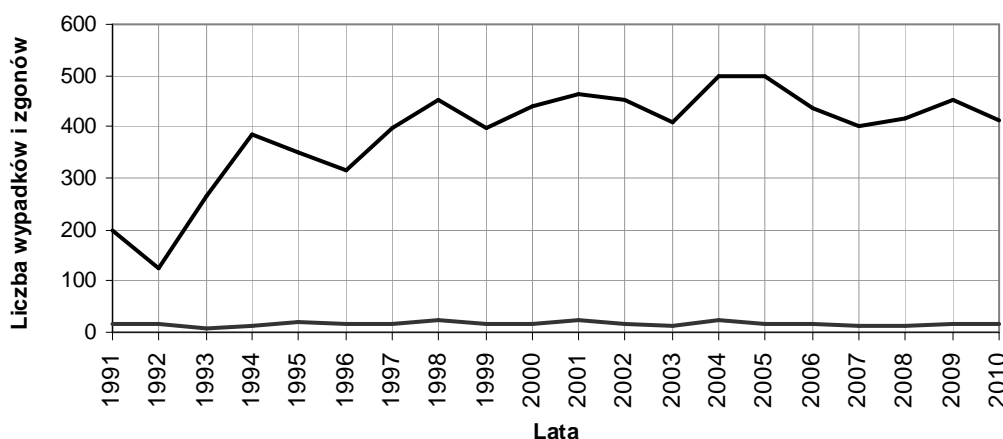
Fig. 4. The causes of fatal diving accidents in the years 1992-2003 (PADI report).



Rys. 5. Przyczyny wypadków nurkowych (raport DAN).

Należy wspomnieć, że przedstawiono tu tylko wypadki ze skutkiem śmiertelnym, nie wspominając nic o wypadkach, które nie zakończyły się tragicznie. Ich liczba jest wielokrotnie większa.

W raportach BSAC (British Sub-Aqua Club) z lat 1991-2010 przeanalizowano 7764 wypadki, średnia roczna wyniosła zatem 388,2 wypadków a średnia zgonów odpowiednio 15,8 [10,11]. Na podstawie tych danych można wnioskować, że na 24,5 wypadków przypada 1 zgon a biorąc pod uwagę średnią liczbę zgonów jaką podaje Denoble i Vann (2009) w latach 1970-2008, która wyniosła 125 zgonów można wnioskować, że statystycznie w roku (opierając się na w/w danych) liczba zgłoszonych wypadków może wynosić ok. 3062 [12]. Powstaje pytanie ile przypadków wypadków nurkowych nie jest zgłaszanych.



Rys. 6. Liczba wypadków i zgonów nurków (raport BSAC 1991-2010).

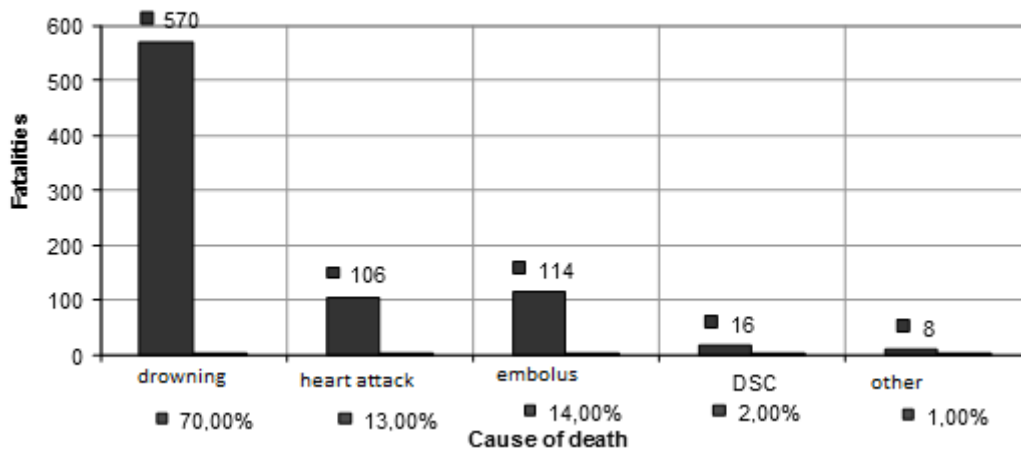


Fig. 5. The causes of diving accidents (DAN report).

It needs to be mentioned that the above tables only present fatal accidents and not the incidents with a less tragic ending. Their number is much higher.

BSAC reports (British Sub-Aqua Club) from the years 1991-2010 provided an analysis of 7,764 diving accidents, which gives the yearly average of 388.2 with the average number of deaths of 15.8 [10, 11]. Based on these data we may assume that there is 1 fatality per 24.5 accidents, and considering the average number of fatalities reported by Denoble and Vann (2009) in the years 1970-2008 that reached 125 deaths, we may conclude that the statistical number of reported accidents with regard to the above data may amount to approximately 3,062 [12]. It remains unknown how many diving accidents are never reported.

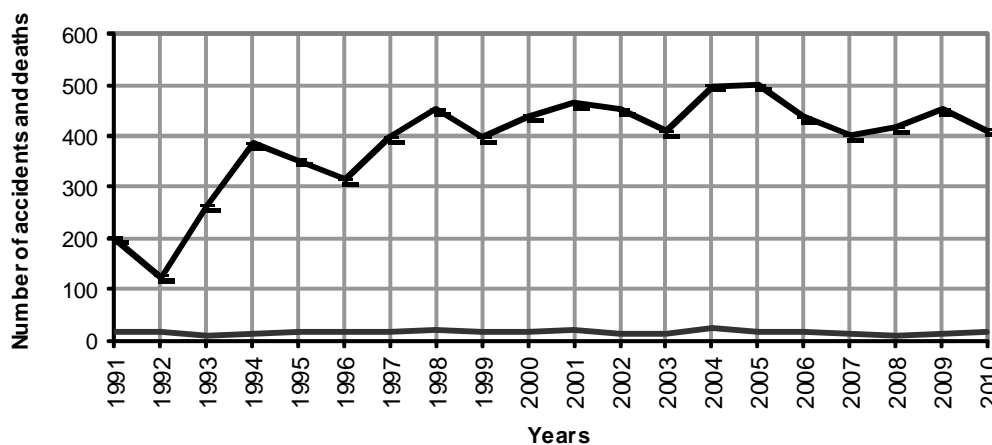


Fig. 6. Number of diving accidents and fatalities among divers (BSAC report 1991-2010).

Bezpośrednią przyczyną większości zgonów jest utonięcie (blisko 70%), natomiast należy odpowiedzieć na pytanie, jaka jest pośrednia przyczyna.

Informacje na temat pośredniej przyczyny śmierci, jaką może być zamarznięty automat, są stosunkowo nieliczne. W większości przedstawianych raportów opierano się głównie na bezpośredniej przyczynie śmierci nie wnikając, co mogło być jej pośrednią przyczyną i w konsekwencji doprowadzić do tragicznego zdarzenia. W nielicznych publikacjach można jednak odnaleźć informację na temat zamarzania automatu jako pośredniej przyczynie zgonu.

W roku 2006 w raporcie the Health and Safety Laboratory można odnaleźć informację o pośrednich przyczynach zgonów, gdzie ujmuję się jako jedną z nich zamarzanie automatu oddechowego. W raporcie przeanalizowano 54 wypadki gdzie 46 zakończyło się zgonem. W 4 przypadkach przyczyną problemów był zamarznięty automat oddechowy, co stanowiło 7 % przeanalizowanej grupy [2].

Dr C.J. Acott przeanalizował 457 wypadków, gdzie wśród nich 136 zakończyło się śmiercią nurka spowodowanych problemem ze sprzętem [1]. Na drugim miejscu znalazły się problemy z automatem oddechowym - 18 zgonów, co stanowi ponad 13 % wszystkich zgonów.

Dopiero od 2008 roku BSAC (British Sub Aqua Club) w swoich raportach wprowadził jako pośrednią przyczynę śmierci zamarzanie automatów. W poszczególnych latach wyniosła ona odpowiednio:

- 2008 - 17 % wszystkich zgonów,
- 2009 - 3% wszystkich zgonów,
- 2010 - 9 % wszystkich zgonów.

Przedstawione powyżej dane są stosunkowo skromne, pozwalają jednak stwierdzić, że problem zamarzania automatów oddechowych jest nadal nierozwiązany, co potwierdzają zgony nurków, a także badania z Dive Lab Kirby Morgan na Florydzie oraz R. Stinton w publikacji z roku 2007 gdzie czytamy: „Brak jest aktywnych systemów ogrzewania gazów oddechowych dostępny dla nurkowań swobodnych” [19].

Oprócz braku rozwiązania tego problemu w badaniach Dive Lab znajduje się informacją dotyczącą temperatury czynnika oddechowego, która oprócz znaczącego wpływu na zamarzanie wody w automacie oddechowym może mieć też wpływ na liczbę zgonów przypisanych utonięciom [14]. Czytamy w nim, że: „...zimne powietrze oddziałując na drogi oddechowe stanowi poważne niebezpieczeństwo powodujące zaburzenia oddechu (szok oddechowy - respiratory shock), w wyniku którego nurek nie jest w stanie oddychać” a także: „fizyczny mechanizm szoku oddechowego nie jest w pełni zrozumiały (dla autorów). Prawdopodobnie spowodowany jest kurczem krtani. Drogi oddechowe zostają całkowicie zablokowane przez nagłośnię uszczelniającą tchawicę. Szok może wystąpić nawet w stosunkowo płytkiej wodzie, niezależnie od dokładnego mechanizmu fizycznego skutki mogą być katastrofalne.” Zjawisko to może być przyczyną wielu niewyjaśnionych zgonów wśród nurków, gdzie nie ustalono, bądź trudno było ustalić pośrednią przyczynę śmierci.

Temperatura gazu oddechowego może mieć wpływ nie tylko na sam automat oddechowy, ale także bezpośrednio oddziałuje na nurka. Powstaje więc pytanie jaka powinna to być temperatura.

3. GRANICE KOMFORTU CIEPLNEGO I TEMPERATUR GAZÓW ODDECHOWYCH

Zapewnienie komfortu cieplnego pod wodą wymaga określenia granic w obrębie, których nurek powinien być w stanie bezpiecznie wykonywać swoje zadanie. Granicę tę wyznaczano eksperymentalnie przyjmując średnią wagę nurka na poziomie 81 kg [3].

The direct cause of most deaths is drowning (nearly 70%), yet the real question is what constitutes the indirect cause.

Information on fatalities, in which the indirect cause of death was a frozen regulator, is relatively scarce. The majority of the presented reports were based mainly on direct causes of deaths omitting indirect causes that led to the tragic incident. Yet, in some publications it is possible to find information pointing to regulator freeze-up as one of the indirect causes of death.

In 2006, the Health and Safety Laboratory report published information on indirect causes of deaths among which one could find free-flowing regulators. The report analysed 54 cases, 46 of which ended in divers' deaths. In 4 cases the root cause of the problem was a frozen regulator, which constituted 7% of the analysed group [2].

C.J. Acott, Ph.D., conducted an analysis of 457 accidents, 136 of which ended in divers' deaths due to equipment failure [1]. The second highest cause involved regulator problems – 18 deaths, i.e. 13% of all fatal incidents.

It was as late as 2008 that the BSAC (British Sub Aqua Club) introduced regulator freeze-up as an indirect cause of death to its reports. The number of such accidents for particular years was as follows:

- 2008 – 17% of all deaths,
- 2009 – 3% of all deaths,
- 2010 – 9% of all deaths.

The above numbers are relatively low, yet they allow one to conclude that the problem of free-flowing regulators remains unsolved, a fact that is confirmed by numerous divers' deaths as well as studies conducted by Dive Lab Kirby Morgan in Florida and R. Stinton^[S1] published in 2007 where we read: "There is a lack of active heating systems for breathing gases in freediving" [19].

Besides the lack of a valid solution for this problem, Dive Lab research provided information concerning breathing mix temperature, which, besides having a significant impact on the freezing of water in a regulator may also have an impact on the number of deaths attributed to drowning [14]. We read that "... a serious threat is the effect of cold air on the respiratory tract which leads to a respiratory disorder (respiratory shock) as a result of which a diver will not be able to breathe", and also: "the physical mechanism of a respiratory shock is not fully understood (for the authors). It is probably caused by a laryngeal spasm. The respiratory tract becomes completely blocked by the epiglottis sealing the trachea. The shock may occur even in relatively shallow water, and irrespective of the physical mechanism its results may be catastrophic." This phenomenon may be the reason of numerous unexplained deaths among divers.

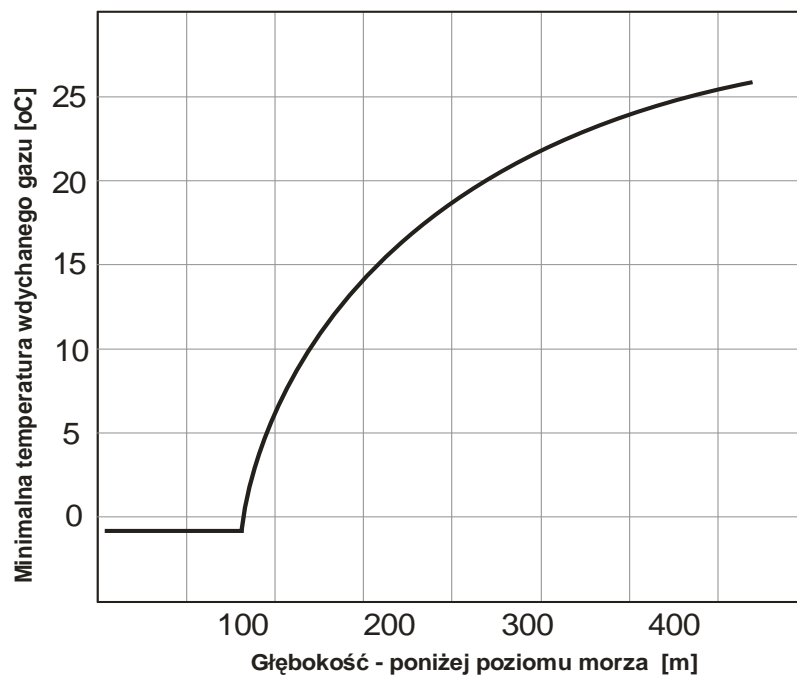
The temperature of the breathing gas may have an influence not only on the regulator itself but it may also have a direct impact on a diver. Thus, we should ask questions as to what the breathing mix's proper temperature should be.

3. THERMAL COMFORT AND BREATHING GAS TEMPERATURES LIMITS

Ensuring thermal comfort under water requires providing the specification of limits within which a diver should be able to safely perform his tasks. The said limits were defined by means of experiments with the adopted average diver weight of 81 kg [3].

Wyznaczono następujące wartości:

- maksymalna utrata ciepła 200 kcal (3 kcal/kg) przy założeniu normalnej początkowej temperatury ciała 36.6° C,
- temperatura ciała powinna utrzymywać się na poziomie 36° C a minimalnie 35° C,
- średnia temperatura skóry powinna być nie niższa niż 25° C, natomiast minimalna temperatura nie powinna być niższa niż 20° C, z wyjątkiem dłoni, których temperatura nie powinna być niższa niż 15° C. Niższe wartości temperatur mogą prowadzić do wychłodzenia organizmu.
- minimalną temperaturę gazu oddechowego w zależności od głębokości, przedstawiono na rysunku 1 [20]. Dla głębokości do 100 m powinna ona wynosić nie mniej niż -1° C [4].



Rys. 7. Wykres minimalnej temperatury gazu oddechowego w funkcji głębokości.

Określono także górne granice temperatur gdzie:

- temperatura ciała nie powinna być wyższa niż 38,5° C,
- średnia temperatury skóry nie powinna przekraczać 42° C,
- maksymalna temperatura gazu oddechowego dla ekspozycji nie dłuższej niż 1 godzina powinna wynosić nie więcej niż 45° C a dla dłuższych ekspozycji 40° C.

Podsumowując granice temperatur powinny zawierać się w przedziałach jak w tabeli 2.

Tabela 2.

Granice temperatur ciała, skóry oraz gazu oddechowego.

Granice temperatur	Minimalna	Maksymalna
Ciała	35° C	38,5° C
Skóry	20° C	42° C
Gazu oddechowego	-1 ° C	45 ° C

The following values were defined:

- maximum heat loss of 200 kcal (3 kcal/kg) with initial body temperature of 36.6°C,
- body temperature should be maintained at the level of 36°C or a minimum of 35°C,
- average skin temperature should not be lower than 25°C, whereas the minimum temperature should not be lower than 20°C, with the exception of hands, the temperature of which should not be below 15°C. Lower temperature values may lead to excessive cooling of the organism.
- minimum breathing gas temperature depending on the depth (presented in fig.1) [20]. Its value for the depth up to 100 m should not be lower than -1°C [4].

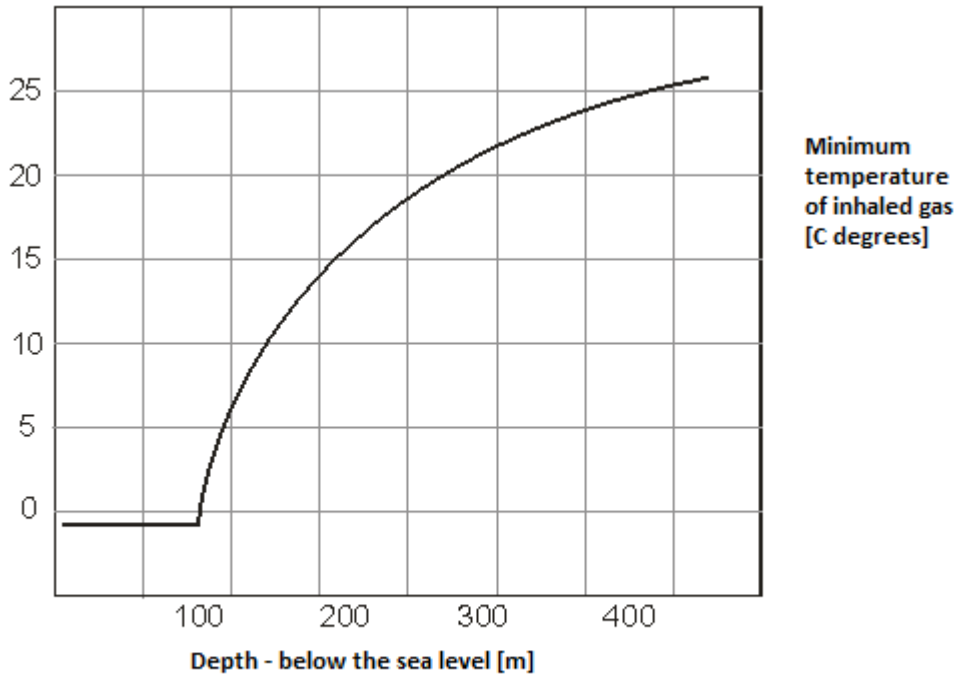


Fig. 7. Minimum breathing gas temperature in the function of depth.

Also upper temperature limits were defined, where:

- body temperature should not exceed 38.5°C,
- average skin temperature should not exceed 42°C,
- maximum breathing gas temperature for an exposition not exceeding 1 hour should not amount to more than 45°C and for longer expositions 40°C.

In conclusion, temperature limits should correspond to the ranges presented in table 2.

Table 2.

Limits for body, skin and breathing gas temperatures.

Temperature limits	Minimum	Maximum
Body	35°C	38.5°C
Skin	20°C	42°C
Breathing gas	-1°C	45°C

Piotrowski jako granice temperatur komfortu w skafandrze podaje wartości 18-24° C [16].

4. STATYSTYKA ZAMARZANIA AUTOMATÓW

4.1. BADANIA POLIGONOWE

Dane do badania poligonowych opracowane zostały przez J. Bozanic'a oraz J. Mastro Podczas badań w Australijskiej bazie na Antarktydzie (McMurdo) w latach 1989-1991 przeprowadzono łącznie 1191 nurkowań z użyciem 11 różnych automatów oddechowych, zarówno jedno jak i dwu węzowych. Konstrukcje jednowęzowe okazały się być bardziej niezawodne – tylko w przypadku 6,8 % automatów wystąpiło zjawisko zamarzania, natomiast zawodność konstrukcji dwuwęzowych wyniosła aż 17,4%. Temperatura wody w tym rejonie (McMurdo Station, Ross Island) wynosi -1,8° C.

Najbardziej niezawodny okazał się Posejdon Cyklon (4,0%) oraz Posejdon Odin (5,3%) [6].

Tabela 3

Liczba awarii automatów podczas badań.

	Liczba nurkowań	Awarie	Procent
Automaty			
Dwuwęzowe			
Ram	259	45	17,4
Jednowęzowe	932	57	6,1
Cyklon 300	427	17	4,0
Cyklon /Odin	87	1	1,1
Cyklon/AGA	3	0	0,0
Odin	263	14	5,3
Conshelf Supr	5	2	40,0
Pro Diver	3	2	66,7
Mk200/G200	8	8	100,0
Mk10/G200	121	13	10,7
Mk10/G250	1	1	100,0
Mk10/D350	14	2	14,3
Wszystkie	1191	102	8,6

4.2. BADANIA ANKIETOWE

Badania ankietowe opracowane zostały przez Ricka Layton'a i przeprowadzone na grupie 132 nurków zapytanych o najczęstsze problemy z automatem oddechowym. Wykazały one, że zamarzanie automatu oddechowego stanowi największy problem tego typu urządzeń aż 49 ankietowanych wskazało zamarzanie automatu, co stanowiło aż 37 % badanych. W tabeli poniżej przedstawiono pozostałe wyniki [13].

According to Piotrowski, thermal comfort limits in a diving suit range from 18 to 24°C [16].

4. REGULATOR FREEZING STATISTICS

4.1. MILITARY TRAINING GROUND TESTS

Data for military training ground tests were prepared by J. Bozanic and J. Mastro. The tests conducted in an Australian base in Antarctica (McMurdo) in the years 1989-1991 consisted in 1191 dives with the use of 11 different regulators, both one- and two-hose versions. One-hose constructions proved to be more reliable – freezing occurred only in 6.8% of regulators; whereas the reliability of two-hose constructions reached as much as 17.4%. Water temperature in this region (McMurdo Station, Ross Island) is -1.8° C.

The most reliable regulators were the Poseidon Cyklon (4.0%) and the Poseidon Odin (5.3%) [6].

Table 3.

Number of regulator failures during tests.

	Number of dives	Failures	Per cent
Regulators			
Two-hose			
Ram	259	45	17.4
One-hose	932	57	6.1
Cyklon 300	427	17	4.0
Cyklon /Odin	87	1	1.1
Cyklon/AGA	3	0	0.0
Odin	263	14	5.3
Conshelf Supr	5	2	40.0
Pro Diver	3	2	66.7
Mk200/G200	8	8	100.0
Mk10/G200	121	13	10.7
Mk10/G250	1	1	100.0
Mk10/D350	14	2	14.3
Total	1191	102	8.6

4.2. SURVEY

The survey was prepared by Rick Layton and carried out on a group of 132 divers interviewed with regard to their most common problems with a diving regulator. The results indicated that the freezing of a regulator constitutes the greatest problem for this type of devices since as many as 49 respondents pointed to this answer, i.e. 37% of those surveyed. The table below presents this as well as the remaining results [13].

Tabela 4.

Przyczyny problemów z automatem oddechowym.

Problemy z automatem oddechowym	Liczba przypadków
Zamarzanie automatu	49
Przedostawianie się wody do automatu	28
Awaria ustnika	21
Duże opory oddechowe/w spoczynku	14
Duże opory oddechowe/podczas płynięcia	13
Awaria dostarczania czynnika	3
Nieczystości w automacie	2
Inne	2

4.3. BADANIA W LABORATORIUM

Badania laboratoryjne NEDU (Navy Experimental Diving Unit) przeprowadzone zostały w solance o temperaturze $-2,2^{\circ}\text{C}$ do $-0,5^{\circ}\text{C}$ na stanowisku sztucznego płuca, gdzie ciśnienie zasilania automatów wynosiło 103,4 barów oraz 34,5 barów a głębokość testowa wahała się od 0 do 60 metrów. Powietrze „wydychane” ze sztucznego płuca było nawilżane i podgrzewane w granicach 10°C - 20°C . Istotność statystyczna testu wyniosła $P < 0,05$.

Badania NEDU (Navy Experimental Diving Unit) opierały się na dwóch profilach nurkowych, gdzie:

- w pierwszym przypadku (test 1) głębokość próby wynosiła 60,7 m przy wydatku automatu wynoszącym 62,5 l/min a czas próby wynosił 30 minut. Próbę powtarzano na głębokości 40 oraz 10 metrów,
- w drugim przypadku (test 2) nurkowanie symulowane było na głębokości 58,2 m z czasem 20 minut i przepływem 50 l/min a następnie przeprowadzono symulowaną dekompresję na głębokościach 12, 9, 6 oraz 3 metry.

Istotnym przy badaniu była zarówno liczba zamarzniętych automatów, jak i czas po jakim zjawisko wystąpiło [7,8,9].

Przebadano 5 typów automatów oddechowych, liczebność próby wyniosła 5 sztuk na jeden typ automatu.

Prawdopodobieństwo awarii automatu określono wzorem:

$$Pf = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n^{-1} \cdot E_i}{t_i^k} \right)$$

gdzie:

Pf – prawdopodobieństwo zamarznięcia automatu,

n – liczba automatów,

E_i – wystąpienie zjawiska – 0 nie zamarzł, 1- zamarzł,

t_i – czas do momentu wystąpienia awarii,

k – stała empiryczna równa 0,3.

Table 4.

Causes of diving regulator problems.

Problems with a diving regulator	Number of cases
Regulator freezing	49
Water leakage into the regulator	28
Mouthpiece failure	21
High breathing resistance at rest	14
High breathing resistance while swimming	13
Breathing mix supply failure	3
Impurities in the regulator	2
Other	2

4.3. LAB TESTS

NEDU (Navy Experimental Diving Unit) laboratory tests were conducted in salt water with the temperature from -2.2°C to -0.5°C at an artificial lung station, where supply pressure for regulators was equal to 103.4 bars and 34.5 bars, and the test depth ranged from 0 to 60 metres. The air “exhaled” from the artificial lung was humidified and heated to the temperatures between 10°C - 20°C. The statistical significance of the test was equal to $P < 0.05$.

NEDU (Navy Experimental Diving Unit) tests were based on two diving profiles, where:

- in the first case (test 1) the trial depth was 60.7 m with regulator output of 62.5 l/min and the trial time was set at 30 minutes. The test was repeated at the depths of 40 and 10 metres,
- in the second case (test 2) the simulated dive was performed at the depth of 58.2 m in 20 minutes and the output of 50 l/min, followed by simulated decompression at the depths of 12, 9, 6 and 3 metres.

What was considered significant in the test was both the number of frozen regulators as well as the time after which this phenomenon occurred [7, 8, 9].

The trial was carried out on 5 diving regulator types, 5 pcs of each type. Regulator failure rate was defined with the following formula:

$$Pf = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n^{-1} \cdot E_i}{t_i^k} \right)$$

where :

Pf – probability of regulator’s freeze-up,

n – number of regulators,

E_i – incidence – 0 no freeze-up, 1- freeze-up,

t_i – time until failure,

k – empirical constant equal to 0.3.

Przykładowo dla 5 automatów, gdzie wszystkie zamarzły po pierwszej minucie pracy, prawdopodobieństwo przedstawiało się następująco:

$$Pf = \left(\frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} \right) = 1$$

Jeżeli żaden z automatów nie ulegnie awarii podczas testu, prawdopodobieństwo zamarznięcia automatu $Pf = 0$. Natomiast jeżeli 2 automaty ulegną awarii w czasie np. 18 i 28 minut, prawdopodobieństwo wyniesie $Pf = 0,158$, ponieważ:

$$Pf = \left(0 + 0 + 0 + \frac{0,2 \cdot 1}{18^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{28^{0,3}} \right) = 0,158$$

Przebadano następujące automaty: Scubapro Mk10 i Mk20, Sherwood Blizzard oraz Maximus a także Posejdon Odin Jetstream.

Wszystkie automaty z grupy Mk10 zamarzły zarówno podczas testu 1, jak i 2. W pierwszym przypadku czas zamarznięcia automatu wynosił od 5 do 20 minut a średnia 13 minut. W przypadku drugiego testu czasy wyniosły odpowiednio od 5 do 34 ze średnią 19 minut. Lepsze wyniki zanotowano w przypadku Mk20 w czasie testu 1 zamarzły 3 automaty tego typu natomiast w przypadku testu 2 zamarznięciu uległy 2 automaty [7].

Automaty Sherwood Maximus w czasie pierwszego testu zamarzły w liczbie 5 na 5 badanych (z czasami 1, 5, 6, 11 i 16 minut), natomiast drugim teście zamarzły 3 automaty tego typu. Model Blizzard w czasie pierwszego testu zamarzł w liczbie 3 (dwa w czasie 7 minut, trzeci w czasie 14 minut) a w trakcie drugiego testu zamarzły 2 automaty (9 i 26 minut) [8].

W przypadku automatu Odin przeprowadzono tylko pierwszy test, gdzie zamarzł tylko 1 automat tego typu w 28 minucie testu [9].

Zestawienie prawdopodobieństwa wystąpienia zamarzania wśród badanych automatów przedstawia tabela poniżej.

Tabela 5.

Prawdopodobieństwo wystąpienia zamarzania w testowanych automatach.

Automat	Test 1	Test 2
Mk10	0,459	0,446
Mk20	0,149	0,274
Blizzard	0,314	0,179
Maximus	0,625	0,463
Odin	0,074	

Z 5 badanych typów automatów tylko 1 został rekomendowany przez NEDU do nurkowania w zimnych wodach. Należy jednak podkreślić, że testy NEDU są znacznie bardziej restrykcyjne niż obecnie stosowane testy automatów (do cywilnego zastosowania) a) zgodnie z normą EN 250, gdzie czas trwania testu wynosi raptem 5 minut przy temperaturze wody w granicach 2 - 4° C, głębokości 50 m oraz przepływie 62,5 l/min.

By way of example, failure probability for 5 regulators of which all froze after the first minute of work may be expressed as follows:

$$Pf = \left(\frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{1^{0,3}} \right) = 1$$

If none of the regulators failed during the test the probability of its freezing would be equal to $Pf = 0$. If, on the other hand, 2 regulators failed within e.g. 18 and 28 minutes, the probability would amount to $Pf = 0.158$ as:

$$Pf = (0 + 0 + 0 + \frac{0,2 \cdot 1}{18^{0,3}} + \frac{0,2 \cdot 1}{28^{0,3}}) = 0,158$$

The following diving regulators were tested: Scubapro Mk10 and Mk20, Sherwood Blizzard and Maximus, and the Poseidon Odin Jetstream.

All of the Mk10 regulators froze both during test 1 and test 2. In the first case the regulator freeze-up occurred between the 5th and the 20th minute of the test, which gives the average of 13 minutes. In the case of the second test the freezing occurred between the 5th and the 34th minute, which gave the average of 19 minutes. Better results were noted for Mk20 regulators. During the first test the freeze-up was observed in 3 regulators of this type, whereas in the second test the freeze-up concerned 2 regulators [7].

The first test on Sherwood Maximus regulators showed that all 5 regulators froze (with the times of 1, 5, 6, 11 and 16 minutes), whereas during the second test 3 such occurrences took place. As for the Blizzard model, 3 freeze-up incidents were noted during the first test (2 at the time of 7 minutes, the third one at the time of 14 minutes), whereas during the second test 2 regulators failed (9 and 26 minutes) [8].

In the case of the Odin regulators, only the first test was carried out as a result of which only 1 regulator froze at the 28th minute of the test [9].

Probability of freeze-up occurrence among the tested regulators is presented in the table below.

Table 5.

Probability of freeze-up in the tested regulators.

Regulator	Test 1	Test 2
Mk10	0.459	0.446
Mk20	0.149	0.274
Blizzard	0.314	0.179
Maximus	0.625	0.463
Odin	0.074	

Of the 5 tested regulator types only 1 was recommended by NEDU for diving in cold water. However, it should be emphasized that NEDU tests are much more restrictive than the presently applied regulator tests (for civil use) – in accordance with EN 250 standard where the test duration time is only 5 minutes with water temperature of 2 - 4° C, the depth of 50 m and the output of 62.5 l/min.

WNIOSKI

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 ze wszystkich federacji nurkowych, w których pod uwagę jako przyczynę pośrednią należy wziąć zamarzanie automatów – jak w przypadku federacji BSAC.

Poza tym należy przeciwdziałać samemu zjawisku zamarza automatu a także – a może i przede wszystkim - skupić się na rozwiązaniu problemu temperatury gazu oddechowego. Należy opracować system, który oprócz przeciwdziałania zamarzaniu automatu będzie utrzymywał minimalną temperaturę gazu oddechowego, jednak wyższą od tej, którą podaje Denoble, Marroni i Richardson jako temperaturę minimalną nie będącą dyskomfortową dla nurkującego. Temperatura ta musi być wyższa od 0° C, aby eliminować możliwość zalodzenia automatu oddechowego i w konsekwencji zmniejszyć liczbę zgonów spowodowanych opisywanym w artykule zjawiskiem.

Badania poligonowe wykazały, że automaty dwuwężowe są znacznie bardziej podatne na zamarzanie, zjawisko to wystąpiło w 17,4 % przypadków. Automaty jednowężowe zamarzły natomiast w 6,8 % przypadków.

Wyniki badań ankietowych wykazały, że największym problemem związanym z automatami oddechowymi jest zamarzanie – aż 37 % ankietowanych (1 pozycja w rankingu) wskazało to jako największą wadę automatów oddechowych.

Badania laboratoryjne zgodnie z normami NEDU wykazały, że większość automatów nie jest należycie zabezpieczona przed zamarzaniem.

Badania laboratoryjne potwierdziły także wyniki badań poligonowych – wyraźnie widać, że istnieje grupa automatów, których konstrukcja znacznie poprawia bezpieczeństwo nurkowania. Niestety istnieje też grupa automatów, które zarówno w badaniach poligonowych, jak i laboratoryjnych wykazały się dużą podatnością na zamarzanie. Tym bardziej dziwi fakt, że normy badań sprzętu cywilnego znacznie odbiegają od rygorystycznych testów przeprowadzanych przez wojsko i wszystkie przebadane automaty posiadają certyfikat zgodność z Normą EN 250, która mówi o użytkowaniu ich w tak zwanych zimnych wodach [15].

CONCLUSIONS

Drowning is the direct cause of most deaths when diving (nearly 70%) whereas one of the indirect causes is a diving regulator freeze-up.

The scale of regulator freeze-up incidents, as well as its influence on diving accidents has not been sufficiently explored. Moreover, there is a lack of comprehensive reports from all diving federations that would consider regulator freezing as an indirect cause of death – as it is the case with BSAC federation.

Besides that, proper means should be applied to prevent the occurrence of the phenomenon itself – or maybe the focus should rather be placed on solving the problem of the breathing mix temperature. It is necessary to prepare a system which, apart from preventing regulator freeze-up will maintain the temperature of the breathing gas at a level, greater than that specified by Denoble, Marroni and Richardson as the minimum temperature comfortable for a diver. The said temperature must be higher than 0°C in order to eliminate the possibility of regulator icing and, consequently, to reduce the number of deaths as a result of the phenomenon described in this article.

Military training ground tests indicated that two-hose regulators are much more susceptible to freezing, the phenomenon occurred in 17.4 % cases. The freeze-up in one-hose regulators, on the other hand, was observed in 6.8 % cases.

Survey results showed that regulator freezing is the greatest problem related to these devices – as many as 37% of the respondents (the 1st position in the ranking) pointed to this answer as the most serious flaw of diving regulators.

Lab tests conducted in accordance with NEDU standards showed that the majority of regulators are not properly protected from freezing.

The lab tests also confirmed the results of the military ground tests – it is clearly visible that there is a group of regulators whose construction significantly improves the safety of diving. Unfortunately there is also a group of regulators which, both in lab and military ground tests demonstrated high susceptibility to freezing. This makes it difficult to understand why the test norms for civil equipment are so different from the rigorous tests carried out by the army and all of the tested regulators receive compliance certificate with EN 250 standard allowing their use in the so-called cold waters [15].

LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

1. Acott C., „457 Equipment Incident Reports.” SPUMS J 31(4); 2001, str. 182-195,
2. Bailey N., Bolsover J., Parker C. „Performance of diving equipment”, Health and Safety Executive, Sheffield 2006, str. 5,
3. Beatty H., Berghage T.; „Diver Anthropometrics”. Washington: USN Experimental Diving Unit, Report No 10-72, 1972, DOI 10.1016/0003-6870(73)90181-6,
4. Beckman P., Sexton E., Vaughn P., Physiological Design Goals and Proposed Thermal Limits for U.S. Navy Thermal Garments: Proceedings of Two Conferences Sponsored by the Naval Medical Research and Development Command, WS 1991 str. A8,
5. Bolek W., „Jak wyeliminować zamrażanie automatów?”, Biuletyn Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, nr 2 Gdynia 2000, str.3,
6. Bozanic J, Mastro J., „Regulator Function in the Antarctic - McMurdo Dive cocker” - Lang and Stewart (Eds.): AAUS Polar Diving Workshop, Sun Diego, CA, May 1991, str.18,
7. Clarke J., Rainone M., Evaluation of the Scubapro MK10 and MK20 SCUBA Regulators for Use In Cold Water, Panama City: USN Experimental Diving Unit 1996 Report No 1-96 str.3-6,
8. Clarke J., Rainone M., Evaluation of Sherwood Scuba Regulators for Use In Cold Water, Panama City: USN Experimental Diving Unit 1995 Report No 9-95 str. 1-5,
9. Clarke J., Rainone M., Evaluation of Poseidon Odin Scuba Regulators for Use In Cold Water, Panama City: USN Experimental Diving Unit 1995 Report No 14-95 str.1-5,
10. Cumming B., „National Diving Committee Diving Incidents Report” 2009, str. 43-44,
11. Cumming B., „National Diving Committee Diving Incidents Report” 2009, str. 40-41,
12. Denoble P. Marroni A, Vann R. , „Annual fatality rates and associated risk factors for recreational scuba diving”. In: Vann R, Lang M, eds. Recreational Diving Fatalities. Proceedings of the Divers Alert Network 2010 April 8-10 Workshop. ISBN #978-0-615-54812-8. Durham, N.C.: Divers Alert Network, 2011, str. 73-86,
13. Layton R., “Catching Your Breath; „Alert Diver” Asia-Pacific Edition May- August 2009, str. 16-20,
14. Morgan B., Ryan P., Schultz T., “Solving Cold Water Breathing Problems”, Underwater Magazine, July 2001, str. 15-18,
15. Praca zbiorowa PN-EN 250:2003/A1:2006 „Sprzęt do oddychania - Aparaty powietrzne butlowe do nurkowania ze sprężonym powietrzem, z obiegiem otwartym - Wymagania, badanie, znakowanie”
16. Piotrowski K., „Zmechanizowane narzędzia ręczne do prac podwodnych – elementy metodyki badań”, Szczecin 1991, str. 47,
17. Poleszak S., „Wypadki nurkowe ze skutkiem śmiertelnym w Polsce”, „Polish Hyperbaric Research” Nr 4(25) 2008 str. 9-11,
18. Richardson D., „Training Scuba Divers: A Fatality and Risk Analysis”, In: Vann R, Lang M, eds. Recreational Diving Fatalities. Proceedings of the Divers Alert Network 2010 April 8-10 Workshop. ISBN #978-0-615-54812-8. Durham, N.C.: Divers Alert Network, 2011 str. 119-164,
19. Stinton R., „A Review Of Diver Passive Thermal Protection Strategies,
20. For Polar Diving: Present And Future”, In: Lang, M.A. And M.D.J. Sayer (Eds.) 2007. Proceedings Of The International Polar Diving Workshop. Svalbard, March 15-21, 2007. Smithsonian Institution, Washington, DC. 213 Pp. str.30,

21. Weinberg R.P., Ackerman N.J., Bradley N.E. Proposed thermal limits for divers
Naval Medical Research Institute, Bethesda, Maryland 1984,
22. Zieleniec G., „Poradnik instruktora płetwonurkowania KDP/CMAS”, Gdańsk 1997
str. 44-45.

mgr inż. Krzysztof Iwankiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
71-065 Szczecin Al. Piastów 41
Katedra Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów
Tel. (48 91) 449 46 96 fax.: (48 91) 449 47 48
e-mail: obi@onet.pl

dr inż. Remigiusz Iwańkiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
71-065 Szczecin Al. Piastów 41
Katedra Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów
Tel. (48 91) 449 41 80 fax.: (48 91) 449 47 48
e-mail: iwankow@zut.edu.pl

