

Zbigniew Talaśka

dr inż. Zbigniew Talaśka
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
81-103 Gdynia 3 ul. Śmidowicza 69
Zakład Technologii Prac Podwodnych
tel. + 58 626 27 46, fax. +58 625 38 82
e-mail : zbigniew_talaska@wp.pl

**DOBÓR ZAWORU BEZPIECZEŃSTWA DLA ZBIORNIKA CIŚNIENIOWEGO
NOWEJ GENERACJI HIPERBARYCZNEGO SYMULATORA**

W artykule opisano dobór zaworu bezpieczeństwa dla komory hiperbarycznej nowej generacji symulatora oddechowego w aspekcie możliwości wystąpienia sytuacji awaryjnych przy ciśnieniu nominalnym, wytworzonym w poduszce pneumatycznej wewnątrz zbiornika.

Słowa kluczowe: komora hiperbaryczna, nurkowanie.

**SAFETY VALVE SELECTION FOR THE PRESSURE TANK OF A NEW GENERATION
HYPERBARIC BREATHING SIMULATOR**

The article presents the process of selecting a safety valve for a new generation hyperbaric chamber breathing simulator, in the context of a possibility of an emergency situation at a nominal pressure, produced in a pneumatic cushion inside the tank.

Key words: hyperbaric chamber, diving.

WSTĘP

Na przestrzeni lat 2008 – 2010, w Zakładzie Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, realizowano pracę naukowo-badawczą p.t. „Nawa generacja hiperbarycznego symulatora oddechowego”. Podstawowym jej celem było zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska badawczego oraz przeprowadzenie cyklu testów nurkowych aparatów oddechowych w pełnej zgodności z normą PN-EN 250 – „Sprzęt do oddychania. – Aparaty powietrzne butlowe do nurkowania ze sprężonym powietrzem, z obiegiem otwartym. – Wymagania, badania, znakowanie” [3]. Spełnienie wymagań normy i badania stanowiskowe nurkowego sprzętu oddechowego mają zapewnić minimalny poziom bezpiecznego działania aparatów z obiegiem otwartym do maksymalnej głębokości 50 m.

Określone zapisy w przedmiotowej normie wskazują, że podstawowym jej założeniem jest przeprowadzanie badań stanowiskowych i eksploatacyjnych kompletnego aparatu nurkowego. Dopuszcza ona również oddzielne badanie części składowych aparatu, jednak w takich sytuacjach laboratorium badawcze powinno dołożyć starań, aby uzupełnić ich brak innymi częściami, spełniającymi jej wymagania.

Stan techniczno-użytkowy aparatu oddechowego dla nurka, odpowiadający punktowi 3.1 normy, określany jest jako SCUBA. Oznacza to zmontowany, kompletny aparat, umożliwiający użytkownikowi wdychanie powietrza zgodnie z zapotrzebowaniem z butli o wysokim ciśnieniu (jednej lub więcej) przez regulator zapotrzebowania, podłączony do części twarzowej. Wydychane powietrze przechodzi, bez recyrkulacji, z regulatora zapotrzebowania przez zawór wydechowy do otaczającej wody [3].

Do wykonania badań określonych w rozdziale 6 normy, niezbędnym jest użycie specjalizowanego stanowiska badawczego, wyposażonego w odpowiednią aparaturę pomiarową. Musi ono umożliwiać wykonywanie symulacji, odwzorowujących zmienne warunki środowiska wodnego do głębokości względnej 0,5 MPa (50 mH₂O). Takie stanowisko badawcze powstało w ZTPP AMW w Gdyni.

Na etapie projektowania symulatora oddechowego występowało szereg problemów natury rozwiązań techniczno-konstrukcyjnych. Jednym z nich był dobór zaworu bezpieczeństwa dla komory hiperbarycznej, który umieszczono na górnej, ruchomej pokrywie zbiornika. W normalnych, typowych zastosowaniach zbiorników, przeznaczonych do magazynowania gazów lub płynów, dobór zaworu bezpieczeństwa dokonuje się w sposób zgodny z tokiem obliczeń, określonym w przepisach Dozoru Technicznego. Jednakże w przypadku przedmiotowego stanowiska badawczego (symulatora) oprócz wykonania typowego doboru zaworu, należało przeprowadzić dodatkową analizę zabezpieczenia zbiornika, wynikającą z jego charakteru i przeznaczenia. Należy zauważyć, że warunki jego pracy odbiegają od typowych zastosowań zbiorników ciśnieniowych. Wynika to z faktu, że w symulatorze, o określonej wytrzymałości na nadciśnienie, umieszcza się zbiorniki ciśnieniowe, stanowiące butle nurkowe ze sprężonym gazem, o ciśnieniach znacznie przekraczających ciśnienie nominalne (robocze) komory hiperbarycznej. W nietypowych sytuacjach, jakim są m.in. nieprzewidziane awarie lub nie przestrzeganie procedur badawczych, może dojść do gwałtownego rozszczelnienia lub incydentalnego rozerwania butli.

INTRODUCTION

Scientific research under the name of "The new generation of hyperbaric breathing simulator" was carried out over the years 2008 - 2010 in the Department of Underwater Work Technology at the Naval Academy in Gdynia. Its basic objective was to design and build a test stand and to perform a series of tests of diving apparatuses in full compliance with PN-EN 250 - "Respiratory equipment – Open-circuit self-contained compressed air diving apparatus – Requirements, testing, marking" [3]. Meeting the requirements of the above standard and bench testing of respiratory equipment have to ensure a minimum level of safety of open-circuit apparatuses to a maximum depth of 50 m.

Certain entries in this standard indicate that its primary objective is to conduct tests of a complete diving apparatus. Examining some parts of the apparatus separately is also allowed, but in such situations the testing laboratory should make an effort to supplement the lack of such parts with those meeting the same requirements.

The technical condition of a breathing apparatus for divers, corresponding to point 3.1 of the standard, is referred to as SCUBA. It is an assembled, complete apparatus, which allows the user to adjust the amount of air inhaled from a high-pressure cylinder(s) through a demand regulator, connected to the face-piece. Exhaled air passes, without recirculation, from the demand regulator through the exhaust valve to water [3].

In order to perform the tests referred to in section 6 of the standard, it is necessary to use a specialized test stand equipped with suitable measuring equipment. It must enable the simulation exercise, imitating the varying conditions of the aquatic environment to the relative depth of 0.5 MPa (50 mH₂O). Such a test stand was created in the Department of Underwater Work Technology at the Naval Academy in Gdynia.

At the design stage of a breathing simulator, some technical and design problems occurred. One of them was the selection of a safety valve for the hyperbaric chamber, which was placed on top, moving lid of the tank. In normal, typical applications of tanks intended for storage of gases or liquids, the safety valve is chosen in a way consistent with the course of the calculations specified in the provisions of Technical Inspection. However, in the case of the test stand (simulator), in addition to choosing a typical selection of the valve, it was necessary to carry out additional analysis of the tank safety due to its nature and purpose. It should be noted that the conditions of its work differ from the typical applications of pressure vessels. This follows from the fact that pressure vessels, which are cylinders of compressed gas, with pressures far exceeding the nominal (working) pressure of a hyperbaric chamber, are placed in the simulator, which has certain resistance to hypertension. In unusual situations, which include unforeseen breakdowns or failure to follow test procedures, sudden leaks or incidental rupture of the cylinder may take place.

1. HIPERBARYCZNY SYMULATOR ODDECHOWY – BUDOWA

W swojej istocie hiperbaryczny symulator oddechowy stanowi sztuczne płuca, które w sposób mechaniczny, możliwie najbardziej zbliżony do rzeczywistości, odwzorowuje proces oddechowy bez udziału człowieka.

Podstawowym elementem symulatora jest komora hiperbaryczna. Umożliwia ona zasymulowanie zmiennych i zróżnicowanych warunków środowiska wodnego, panujących na określonej głębokości. Scala w jedną całość wszystkie części składowe, które współpracują z komorą, tworząc specjalizowane stanowisko badawcze i umożliwiając tym samym wykonywanie pomiarów istotnych parametrów techniczno-użytkowych oddechowego sprzętu nurkowego. Parametry geometryczne zbiornika – komory hiperbarycznej umożliwiają badania nurkowych, powietrznych, butlowych aparatów oddechowych (SCUBA) ze stosunkowo szeroką gamą wielkości butli zasilających, ustawianych zarówno w pozycji pionowej jak i poziomej, z co najmniej 20 cm warstwą wody ponad badanym zestawem, zgodnie z normą PN-EN 250. Ponadto komora hiperbaryczna zapewnia:

- możliwość zmian ciśnienia w zbiorniku, odpowiadająca zmianom głębokości w zakresie do 200 mH₂O,
- możliwość symulowania zmian temperatury wody, stanowiącej otoczenie badanego sprzętu oddechowego, w zakresie +4°C (±2 °C) do +20 °C, poprzez zastosowanie odpowiedniego, automatycznego układu chłodniczo-grzewczego i regulacji temperatury w zbiorniku,
- szybkie jej zamykanie i otwieranie poprzez odpowiednią konstrukcję górnej pokrywy oraz dogodny dostęp do przestrzeni badawczej, w której umieszczone są testowane aparaty nurkowe lub inne urządzenia techniki nurkowej,
- możliwość doprowadzania wszystkich niezbędnych układów zasilających, połączonych z istniejącym stanowiskiem manewrowo-kontrolnym oraz podłączanie układów pomiarowo-kontrolnych, z których w sposób niezakłócony wyprowadzane są sygnały pomiarowe,
- rozwiązania konstrukcyjne współpracujących z komorą urządzeń i układów gwarantujących bezpieczną eksploatację oraz wygodną obsługę komory.

W skład symulatora wchodzi m.in. następujące grupy urządzeń:

- agregat chłodniczy schładzający wodę w komorze hiperbarycznej wraz z wymiennikami ciepła i pompą przetłaczającą,
- układ dozujący, symulujący proces nawilżania wydychanego czynnika oddechowego,
- pulpit kontrolno-manewrowy.

Drugim istotnym elementem symulatora jest dwumodułowa pompa oddechowa. Pierwszy moduł stanowi cylinder wraz z tłoczyskiem montowany wewnątrz komory hiperbarycznej. Istotą tego rozwiązania jest osiągnięcie możliwie jak najkrótszego połączenia pomiędzy badanym elementem, a wylotem z pompy.

Drugi moduł, montowany na pokrywie zbiornika, jest napędem tłoka w cylindrze poprzez tłoczysko wychodzące przez centralny otwór w pokrywie. Napęd przekształca, za pomocą motoreduktora servo, ruch obrotowy w posuwisto-zwrotny.

Zmontowany zestaw posiada regulacje mechaniczne i elektroniczne. Zmiany położenia łożyska przeniesienia napędu na kole oddechowym umożliwiają zmianę skoku tłoczyska, odpowiadającą zmianie objętości wdech-wydech w zakresie 0,5 do 4,0 litrów z przeskokami co 0,5 litra. Z kolei elektroniczna regulacja pracy motoreduktora servo, zapewnia zmiany częstotliwości ruchu posuwisto-zwrotnego w zakresie od 0 do 40 obrotów na min.

1. HYPERBARIC BREATHING SIMULATOR - CONSTRUCTION

A hyperbaric breathing simulator is actually an artificial lung, which in a mechanical way, as close as possible to reality, copies the process of breathing without human intervention.

The basic element of the simulator is a hyperbaric chamber. It allows you to simulate variable and diverse aquatic conditions prevailing at a certain depth. It merges into one whole all the components that work with the chamber, creating a specialized test stand and thereby allowing measurements of relevant technical and operational parameters of breathing diving equipment. Geometrical parameters of the tank (hyperbaric chamber) allow you to test self-contained breathing apparatuses (SCUBA) with a relatively wide range of sizes of cylinder power, adjustable both vertically and horizontally, with at least 20 cm layer of water over the test set, according to PN-EN 250. In addition, the hyperbaric chamber provides:

- the possibility to change pressure in the tank, corresponding to the changes in the depth range of 200 mH₂O,
- the possibility to simulate changes in water temperature surrounding the tested respiratory equipment, in the range from +4°C (±2 °C) to +20 °C, through the use of an appropriate automatic cooling and heating system and temperature regulation in the tank,
- rapid opening and closing the chamber through a well-designed top cover and easy access to the research area in which the tested apparatuses or some other diving equipment are placed,
- the possibility of supplying all necessary power systems, combined with the existing test stand and connecting measuring and control systems, which emit signals in an undisturbing way,
- design solutions of devices and systems cooperating with the chamber to ensure safe operation and easy handling of the chamber.

The simulator includes, among others, the following groups of devices:

- water chiller with heat exchangers and pump,
- injection system that simulates the process of moisturizing breathing mixture,
- control desktop.

Another important element of the simulator is doublemodular respiratory pump. The first module is a cylinder with a piston rod mounted inside the hyperbaric chamber. What is important in such a solution is to achieve the shortest possible connection between the tested element and the outlet of the pump.

The second module, mounted on the lid of the tank, is the drive of the piston in the cylinder through a piston rod coming through the central hole in the lid. The drive converts the rotary motion into reciprocating motion by means of.

An assembled set has mechanical and electronic adjustments. Changes in the position of the transmission bearing on the wheel can change the respiratory piston stroke, corresponding to a change in inhale-exhale volume in the range of 0.5 to 4.0 litres with sudden changes every 0.5 litres. The electronic control of the servo geared motor provides frequency changes of the reciprocating motion in the range from 0 to 40 revolutions per minute.

Hiperbaryczny symulator oddechowy wyposażony jest w elektroniczny system zbierania i przetwarzania danych, w skład którego wchodzi komputer nadrzędny, połączony z czujnikami i przetwornikami analogowo-cyfrowymi. Pomiary dokonywane za pomocą stanowiska badawczego podzielone są na : kontrolne oraz badawcze.

W pierwszej grupie wykonywane są wszystkie pomiary niezbędne do utrzymania ruchu i pracy komory hiperbarycznej oraz uzyskiwania warunków badawczych jak np. ciśnienie komorowe, temperatura wody w zbiorniku itp.

W drugiej grupie dokonuje się pomiary badawcze aparaturą pomiarową umieszczoną bezpośrednio w wybranych i istotnych dla badania punktach.

Najważniejszym efektem pomiarów, dla oddechowych aparatów nurkowych, jest otrzymanie tzw. pętli oddechowej, określającej ilościowo pracę potrzebną do pokonania oporów oddechowych w danym sprężeniu. Otrzymuje się ją jako pośrednie złożenie, w układzie p-V, dwóch najważniejszych parametrów mierzonych bezpośrednio:

- zmiany objętości geometrycznej mierzonej za pomocą liniowego przetwornika położenia oraz
- zmiany wartości ciśnienia w ustniku automatu oddechowego, mierzonego przez czujnik różnicy ciśnień.

Wyniki badań, w zależności od potrzeb, w każdej chwili można wyprowadzić w postaci zestawień tabelarycznych.

Na rys. 1 przedstawiono podstawowy schemat ideowy hiperbarycznego symulatora oddechowego do badania nurkowych aparatów oddechowych oraz elementów techniki nurkowej.

2. DOBÓR ZAWORU BEZPIECZEŃSTWA – TYPOWA PRACA SYMULATORA

Typowa praca symulatora, zgodna z normą PN-EN 250, obejmuje wykonywanie badań nurkowego sprzętu oddechowego wraz z butlami zasilającymi (nbz), w stanie wystabilizowanym i przyjętych na jej podstawie parametrach wyjściowych, zestawionych w Tabeli 1.

Z tabeli 1 wynika, że badania wykonywane są przy ciśnieniu względnym 0,5 MPa, co odpowiada głębokości 50 mH₂O. Jest to znacznie poniżej wartości ciśnienia nominalnego komory hiperbarycznej, które wynosi 2 MPa (200 mH₂O). Dlatego też przyjęto założenie, że zawór bezpieczeństwa zostanie dobrany dla nominalnych warunków pracy komory hiperbarycznej z wypełnioną przestrzenią wodną i bez umieszczonych w niej nurkowych butli zasilających. Dla takiego stanu dobór zaworu bezpieczeństwa można dokonać na podstawie ustalonej, w przepisach Wojskowego Dozoru Technicznego, procedurze.

Tabela 1.

Zestawienie podstawowych parametrów wyjściowych dla hiperbarycznego symulatora oddechowego w typowej pracy podczas badań nurkowego sprzętu oddechowego zgodnie z normą PN-EN-250.

KOMORA HIPERBARYCZNA	
• zbiornik napełniony wodą o temperaturze (część mokra)	$T_W = + 4 \text{ }^\circ\text{C}$ lub $T_W = + 10 \text{ }^\circ\text{C}$
• ciśnienie absolutne poduszki pneumatycznej nad lustrem wody	$p_{KP} = 0,6 \text{ MPa}$
• temperatura powietrza w poduszce pneumatycznej	$T_{KP} = 8 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$
• geometryczna objętość poduszki pneumatycznej	$V_{KP} = 0,415 \text{ m}^3$

Hyperbaric breathing simulator is equipped with an electronic system for collecting and processing data, comprising a host computer, connected to sensors and analog-digital converters. Measurements made using the test bench are divided into control and research ones.

In the first group, all measurements necessary for the maintenance and operation of hyperbaric chambers and obtaining research conditions such as chamber pressure, water temperature in the tank, etc. are performed.

In the second group, test measurements are performed using measuring apparatus in selected places relevant to the study.

The most important result of the measurements, for breathing apparatuses for divers, is to get the so-called breathing loop, determining quantitatively the work needed to overcome the resistance of breathing in a given apparatus. It is obtained as an indirect combination, in the p-V system, the two most important parameters measured directly:

- geometric volume changes measured by linear encoder and
- changes in pressure in the regulator mouthpiece, measured by a differential pressure sensor.

The results, depending on the needs, can at any time be derived in the form of summary tables.

Figure 1 shows a basic schematic diagram of hyperbaric breathing simulator for testing diving breathing apparatus and other diving elements.

2. SAFETY VALVE SELECTION - TYPICAL WORK OF A SIMULATOR

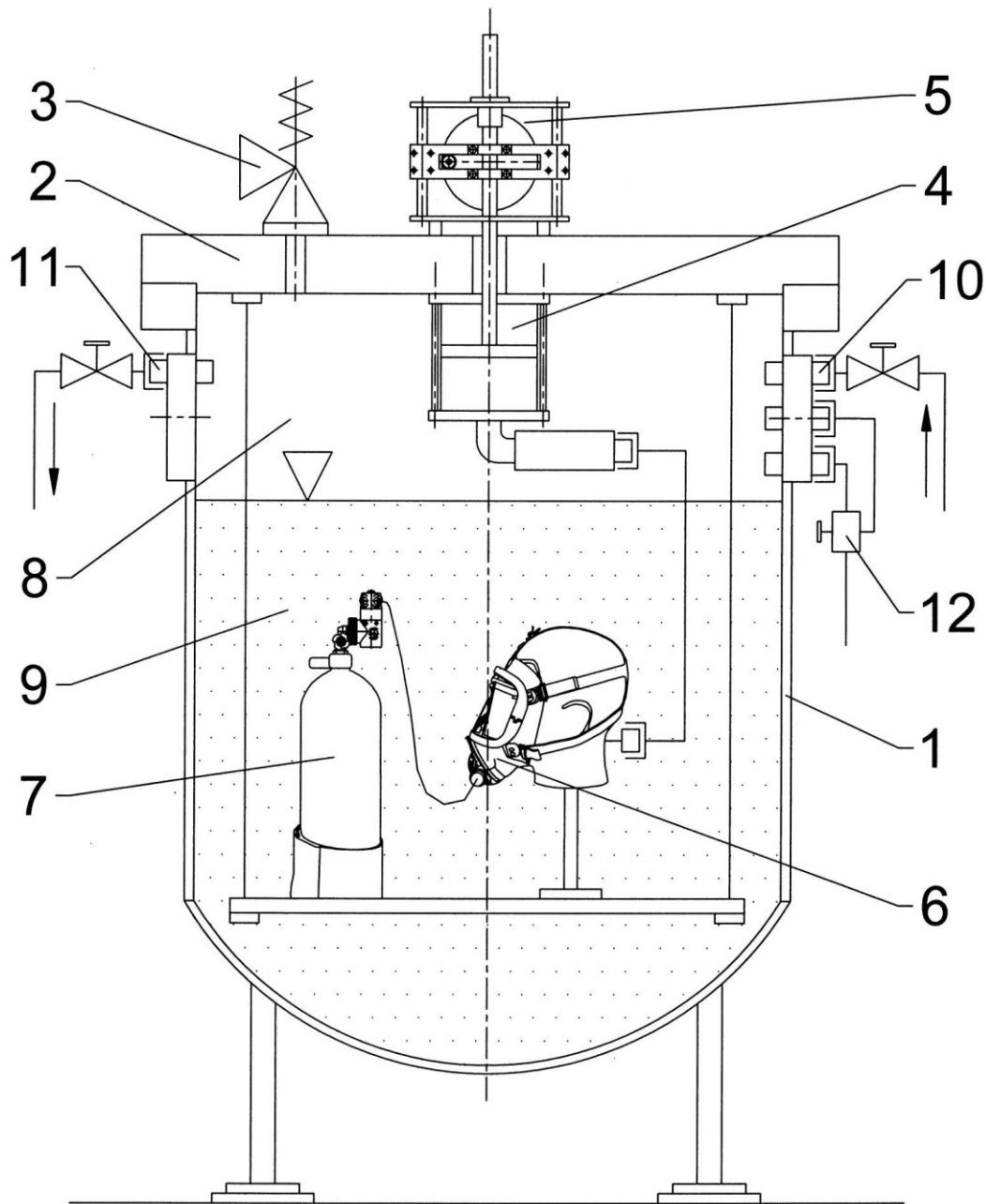
Typical work of a simulator, according to PN-EN 250, includes testing the diving equipment and its power supply cylinders in a stabilized state and adopting output parameters on the basis of its work, summarized in Table 1.

Table 1 shows that the tests are made at a relative pressure of 0.5 MPa, which corresponds to a depth of 50 mH₂O. This is well below the nominal pressure of the hyperbaric chamber, which is 2 MPa (200 mH₂O). Therefore, it is assumed that the safety valve will be selected for the nominal operating conditions of hyperbaric chamber filled with water and without power cylinders. For such a state, safety valve selection can be made on the basis of a fixed procedure, included in the provisions of the Military Technical Supervision.

Table 1.

Summary of basic output parameters for hyperbaric breathing simulator in typical work during respiratory equipment test in accordance with PN-EN-250.

HYPERBARIC CHAMBER	
• cylinder filled with water at the temperature (wet part)	T _W = + 4 °C or T _W = + 10 °C
• absolute pressure of the pneumatic cushion above water	p _{KP} = 0.6 MPa
• air temperature in the pneumatic cushion	T _{KP} = 8 – 10 °C
• geometric volume of the pneumatic cushion	V _{KP} = 0.415 m ³



Rys. 1 Schemat ideowy hiperbarycznego symulatora oddechowego.

1 – komora hiperbaryczna (zbiornik); 2 – zdejmowana pokrywa górna; 3 – zawór bezpieczeństwa; 4 – pompa oddechowa; 5 – napęd pompy oddechowej; 6 – badany regulator zapotrzebowania; 7 – nurkowa butla zasilająca (nbz); 8 – poduszka powietrzna – część sucha; 9 – woda – część mokra; 10 – dolot powietrza z instalacji zasilającej; 11 – odlot powietrza z komory hiperbarycznej; 12 – układ stabilizacji ciśnienia poduszki powietrznej w komorze hiperbarycznej.

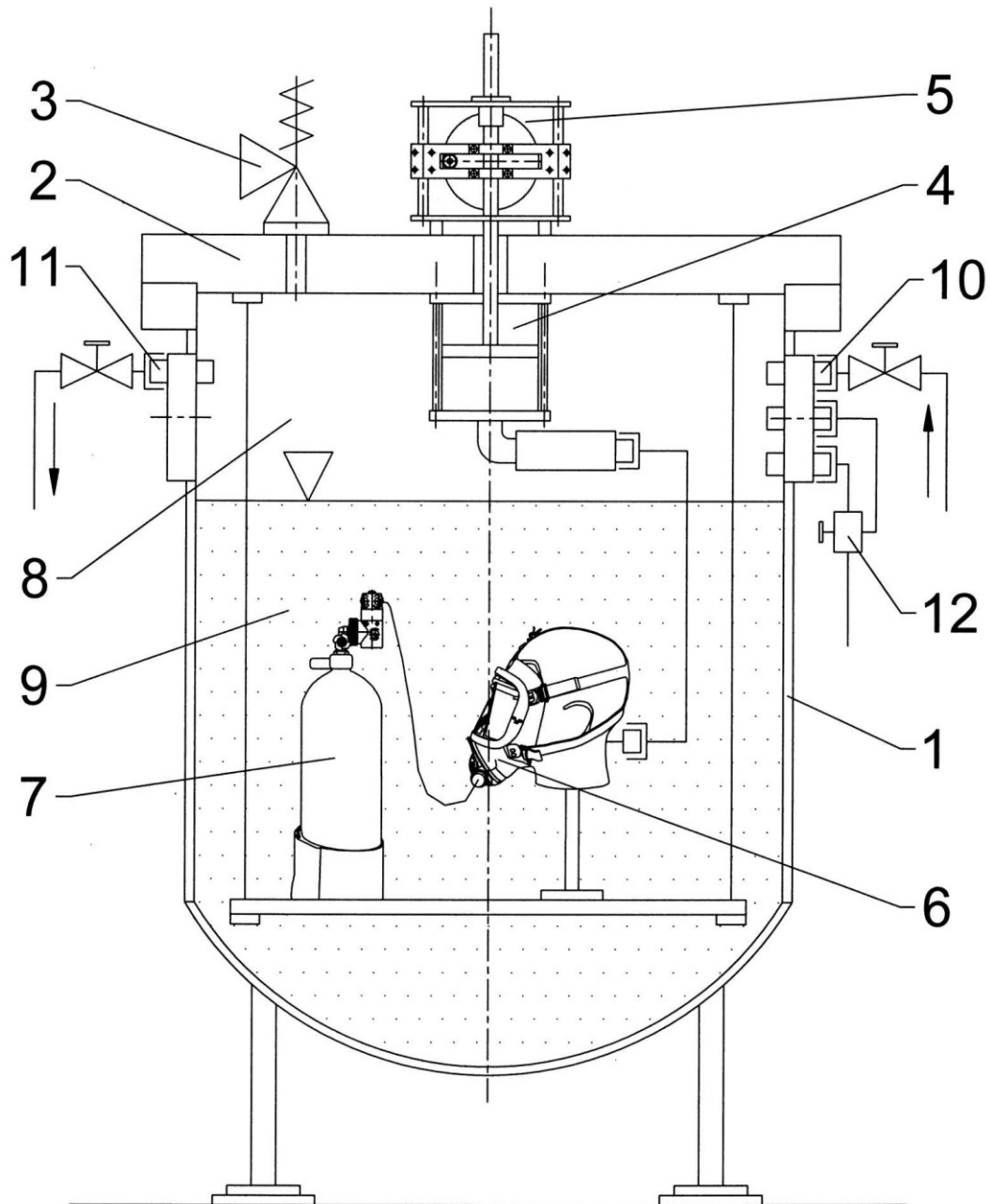


Figure 1. Diagram of hyperbaric breathing simulator.

1 - hyperbaric chamber (tank); 2 - removable top cover; 3 - safety valve; 4 - respiratory pump; 5 - respiratory pump drive; 6 - tested demand regulator; 7 - diving supply cylinder 8 - airbag – dry part; 9 - water – wet part; 10 - air inlet from supply system; 11 - air outlet from hyperbaric chamber; 12 – system stabilizing air bag pressure in hyperbaric chamber.

W obliczeniach przyjmuje się, że przepływ gazu przez zawór bezpieczeństwa, kanałem o kształcie zbliżonym do dyszy Bandemana jest przepływem adiabatycznym i izentropowym. Oznacza to, że podczas ekspansji powietrza nie jest doprowadzane, ani odprowadzane z niego ciepło (tzn. tak jakby przemiana zachodziła w doskonale zaizolowanym zbiorniku i rurociągach przesyłowych). Podczas adiabatycznego rozprężania czynnik gazowy wykonuje pracę jedynie kosztem swojej energii wewnętrznej. Natomiast podczas izentropowej przemiany rozprężania entropia czynnika nie ulegnie zmianie. Należy zauważyć, iż przepływ czynnika zachodzi tak szybko, że nawet w nieizolowanej dyszy czynnik traci nieznaczne ilości ciepła.

Zgodnie z przepisami WUDT-UC-WO-A/01:10.2003 sumaryczna przepustowość zaworu bezpieczeństwa powinna być tak dobrana, aby w zbiorniku nie mogło wytworzyć się ciśnienie przekraczające ciśnienie dopuszczalne (nominalne) więcej, niż o 10 %. Punkt 9.1 określa, że przepustowość zaworu bezpieczeństwa dla gazów i par, opisana jest wzorem:

$$\dot{m}_\tau = 10 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \alpha \cdot F \cdot (p_1 + 0,1) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z}} \quad (1)$$

Gdzie:

- \dot{m}_τ – przepustowość zaworu bezpieczeństwa w [kg/h],
- K_1 – współczynnik poprawkowy uwzględniający właściwości czynnika roboczego (gazu) i jego parametry przed zaworem bezpieczeństwa (odczyt z wykresu lub obliczenie),
- K_2 – współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ stosunku ciśnień przed i za zaworem bezpieczeństwa (odczyt z wykresu na podstawie obliczonych współczynników),
- α – współczynnik wypływu zaworu bezpieczeństwa dla gazów i par,
- F – obliczeniowa powierzchnia przekroju kanału dopływowego zaworu bezpieczeństwa w [mm²],
- p_1 – ciśnienie zrzutowe (ciśnienie początku otwarcia zaworu bezpieczeństwa) w [MPa],
- Z – współczynnik ściśliwości, którego wielkość wyznacza się na podstawie obliczonej zredukowanej temperatury T_r i zredukowanego ciśnienia p_r .

Wykonane obliczenia dla przyjętych parametrów termodynamicznych i geometrycznych komory oraz przy wyznaczeniu strumienia masy powietrza dopływającego do poduszki powietrznej, określono średnicę kanału dopływowego do zaworu bezpieczeństwa na $\phi \approx 14,0$ mm. Na tej podstawie dobrano zawór: Si 6302.01 PN 40 wykonanie PM produkcji Śląskich Zakładów Armatury Przemysłowej „ARMAK”. Sposób zainstalowania zaworu na pokrywie komory hiperbarycznej pokazano na fot. 1.

3. ZDARZENIA AWARYJNE W PRACY HIPERBARYCZNEGO SYMULATORA ODCHOWEGO

Zgodnie m.in. z punktem 6.5.1 i 6.5.2 normy PN-EN 250, do wnętrza komory należy włożyć kompletny aparat nurkowy, składający się z regulatora zapotrzebowania i nurkowej (-ych) butli zasilającej (-ych). Przedmiotowa butla zasilająca (nbz), stanowi podstawowy element zagrożenia. Wynika to z faktu, że wypełniona jest powietrzem (lub mieszaniną oddechową) sprężonym do ciśnienia nominalnego w zakresie 15 – 30 MPa.

In the calculations, it is assumed that the flow of gas through the safety valve, which is a channel whose shape is similar to the Bandeman's nozzle, is an adiabatic and isentropic flow. This means that during the expansion of air, the heat is neither supplied nor discharged (i.e. as if the change occurred in the well-insulated tank and transmission pipelines). During the adiabatic expansion, gas performs work only at the expense of its internal energy. However, during isentropic expansion, entropy of the gas will not change. It should be noted that the flow of the gas occurs so quickly that even in a non-isolated nozzle, the gas loses only slight amounts of heat.

In accordance with the regulations of WUDT-UC-WO-A/01:10.2003, the total capacity of the safety valve should be such that the tank cannot produce pressure exceeding permitted (nominal) pressure by more than 10%. Point 9.1 states that the capacity of safety valve for gases and vapours is described by the following formula:

$$\dot{m}_\tau = 10 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \alpha \cdot F \cdot (p_1 + 0,1) \cdot \frac{1}{\sqrt{Z}} \quad (1)$$

Where:

- \dot{m}_τ – safety valve capacity in [kg/h],
- K_1 – correction coefficient taking into account the properties of the gas and its parameters before the safety valve (read from chart or calculated),
- K_2 – correction coefficient taking into account the influence of pressure ratio before and after the safety valve (read from chart on the basis of calculated coefficients),
- α – safety valve discharge coefficient for gases and vapours,
- F – computational cross-sectional area of the safety valve inlet channel in [mm²],
- p_1 – discharge pressure (safety valve opening initial pressure) in [MPa],
- Z – compressibility factor, determined on the basis of the calculated reduced temperature T_r and reduced pressure p_r .

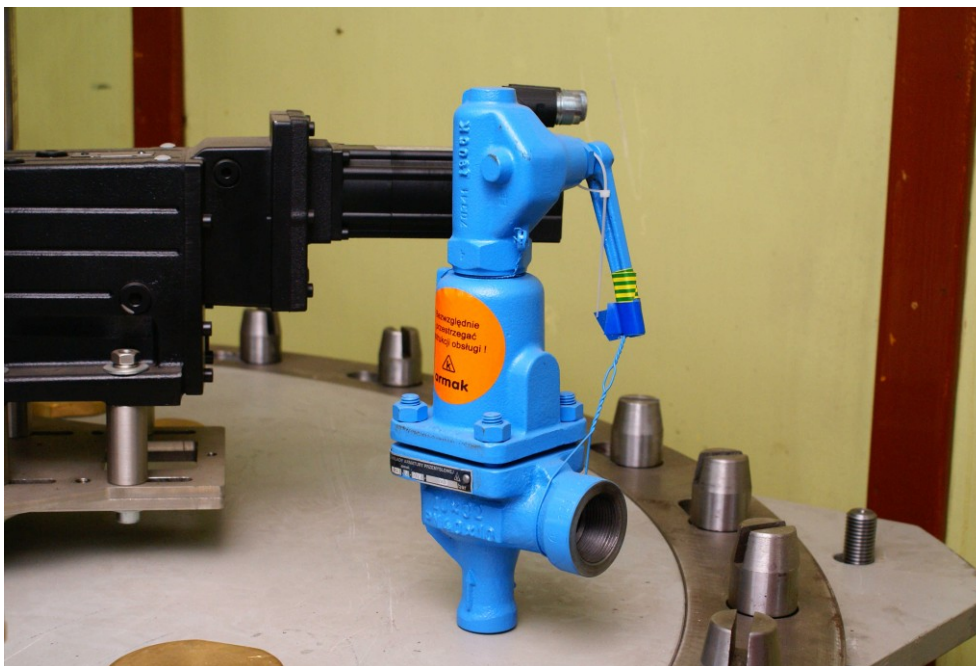
Using the calculations for the adopted thermodynamic and geometric parameters of the chamber and determining the mass flow air entering the air bag, the diameter of the safety valve inlet channel was calculated at $\phi \approx 14.0$ mm. On the basis of that, the following valve was chosen: Si 6302.01 PN 40 made by Śląskie Zakłady Armatury Przemysłowej „ARMAK”.

Figure 2 shows how to install the valve on the lid of a hyperbaric chamber.

3. EMERGENCIES IN THE WORK OF A BREATHING SIMULATOR

According to point 6.5.1 and 6.5.2 of PN-EN 250 standard, a complete diving apparatus, consisting of demand regulator(s) of cylinder(s), should be placed into a chamber.

The supply cylinder poses the greatest threat here, which follows from the fact that it is filled with air (or mixture of gases), compressed to a nominal pressure of 15 - 30 MPa.



Fot. 1 Zawór bezpieczeństwa zainstalowany na pokrywie komory hiperbarycznej.

Do niedawna typowa butla powietrzna napełniana była do wartości 20 MPa. Obecnie podstawowym standardem są butle ładowane do 30 MPa. Uznano, że w doborze zaworu bezpieczeństwa, dla komory hiperbarycznej pracującej przy ciśnieniu nominalnym 2 MPa, niezbędnym jest uwzględnienie sytuacji, w której:

- a) wystąpiło niekontrolowane i gwałtowne rozszczelnienie nbz, w typowych warunkach prowadzenia badań, zgodnie z normą PN-EN 250 tzn. 0,5 MPa (50 mH₂O) oraz
- b) hipotetycznie możliwe, niekontrolowane i gwałtowne rozszczelnienie nbz przy nominalnych wartościach pracy komory, tzn. 2,0 MPa (200 mH₂O).

W obu przypadkach dodatkowym źródłem „zasilania”, poza napełnieniem przestrzeni gazowej z instalacji zewnętrznej, jest butla (lub zespół butli), która uległa awarii i spowodowała niezamierzony, gwałtowny dopływ czynnika oddechowego do objętości poduszki pneumatycznej wewnątrz komory hiperbarycznej.

Przyjęto hipotetyczne założenie, że przyczyną powstania sytuacji awaryjnej może być m.in.:

- a) zerwanie gwintu w szyjce butli,
- b) pęknięcie i/lub urwanie części poszycia butli.

W pierwszym przypadku doszłoby do niezamierzonego wyrwania z szyjki butli zaworu odcinającego o typowym złączu M25x2 i wplynięciu jej zawartości do poduszki pełnym przekrojem o średnicy ϕ 25 mm.

W drugim przypadku, w wyniku awarii, mogłoby nastąpić np. wyrwanie denka butli. Wówczas atmosfera oddechowa (np. powietrze) wplynęłaby do poduszki, będącej pod ciśnieniem nominalnym, pełnym przekrojem o przyjętej średnicy wewnętrznej ϕ 170 mm.

Należy zaznaczyć, że norma PN-EN 250 [3] nie przewiduje badań pod ciśnieniem większym, niż 0,5 MPa (50 mH₂O). Nie oznacza to jednak, że taka sytuacja nie może wystąpić.

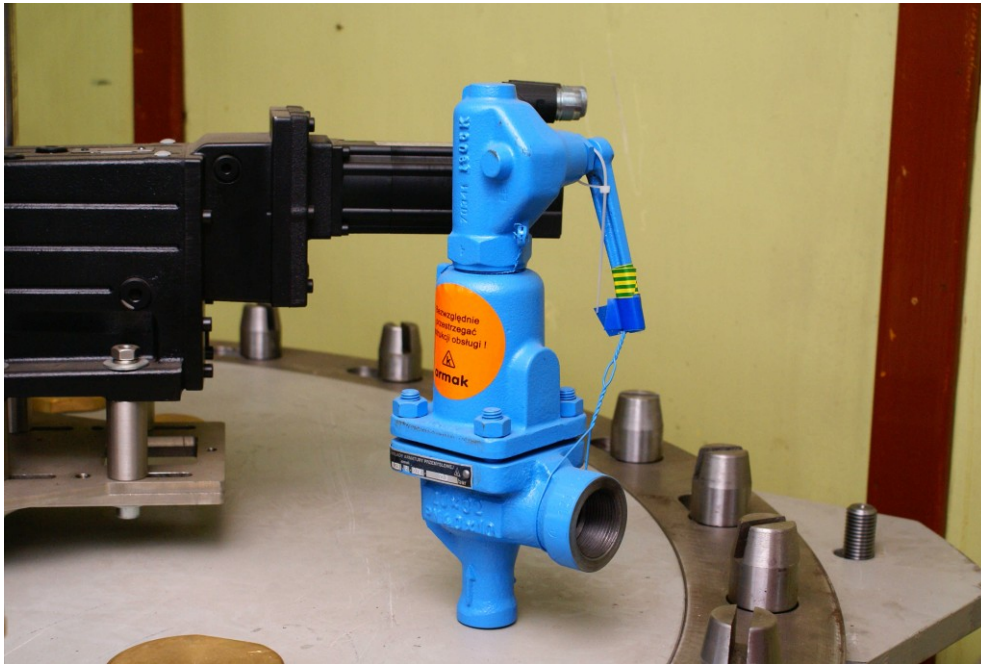


Figure 2. Safety valve installed on the lid of a hyperbaric chamber.

Until recently, the typical air cylinder was filled up to the value of 20 MPa. Currently, cylinders loaded up to 30 MPa are a standard. It was considered that in the selection of a safety valve for a hyperbaric chamber working at the pressure of 2 MPa, it is necessary to take into account situations in which:

- a) there was an uncontrolled and violent unsealing, in typical test conditions, in accordance with PN-EN 250, i.e. 0.5 MPa (50 mH₂O) and
- b) hypothetically possible, uncontrolled and violent unsealing at nominal values of the chamber, i.e., 2.0 MPa (200 mH₂O).

In both cases, a cylinder (or a group of cylinders) is an additional source of "power", apart from filling the space from an outdoor installation; the cylinder(s) crashed and caused unintended, sudden flow of gas to pneumatic cushion inside the hyperbaric chamber.

A hypothetical assumption was made that the causes of the emergency situation may be such as:

- a) broken threads on the neck of the cylinder,
- b) rupture and / or tearing off some part of the cylinder plating.

In the first case, the stop valve with a typical connector M25x2 would be torn out the neck of the cylinder and its full contents would all go into the pillow with a diameter of ϕ 25 mm.

In the second case, the cylinder crown could be torn off. Then the breathing atmosphere (e.g. air) would go into the pillow, which is at the nominal pressure, with an inner diameter of ϕ 170 mm.

It should be noted that the PN-EN 250 standard [3] does not envisage tests at a pressure greater than 0.5 MPa (50 mH₂O). This does not mean that this situation cannot occur. In both cases, the "recoil" effect of the cylinder that could take place after such damage is not included. The diving apparatus was stably placed in the hyperbaric chamber. Such behaviour of diving cylinders, under normobaric conditions, confirms the diving accidents that have taken place.

W obu przypadkach nie uwzględniono efektu "odrzutu" butli, który nastąpiłby po takim uszkodzeniu. Założono odpowiednio stabilne mocowanie badanego, nurkowego zestawu oddechowego w komorze hiperbarycznej. Takie zachowanie butli nurkowych, w warunkach normobarycznych, potwierdzają zaistniałe wypadki nurkowe.

2.1 DOBÓR ZAWORU BEZPIECZEŃSTWA DLA SYTUACJI AWARYJNEJ PRZY NOMINALNYCH PARAMETRACH PRACY KOMORY HIPERBARYCZNEJ

W rozpatrywanych przypadkach zajęć awaryjnych w komorze dekompresyjnej, należy spodziewać się wystąpienia praktycznie w jednym czasie dwóch przepływów gazu:

- a) wypływu nadkrytycznego z butli zasilającej do objętości poduszki pneumatycznej,
- b) wypływu z poduszki pneumatycznej do atmosfery normobarycznej (tzn. na zewnątrz komory dekompresyjnej).

2.1.1 OKREŚLENIE MAS POWIETRZA W ZBIORNIKACH W CHWILI RÓWNOWAGI

W chwili równowagi układu butla zasilająca-komora dekompresyjna w zbiornikach zgromadzona jest masa powietrza, którą określono z wzorów:

$$m_{KP} = \frac{p_{KP} \times V_{KP}}{R \times T_{KP}} \quad (2)$$

$$m_{BN} = \frac{p_{BN} \times V_{BN}}{R \times T_{BN}} \quad (3)$$

Gdzie:

- m_{KP} – masa powietrza poduszki pneumatycznej w komorze hiperbarycznej [kg],
- m_{BN} – masa powietrza w zasilającej butli nurkowej [kg],
- p_{KP} – ciśnienie nominalne powietrza w poduszce pneumatycznej w komorze hiperbarycznej [MPa],
- p_{BN} – ciśnienie nominalne powietrza w nurkowej butli zasilającej [MPa],
- V_{KP} – geometryczna objętość poduszki pneumatycznej w komorze hiperbarycznej [m³],
- V_{BN} – geometryczna objętość wnętrza nurkowej butli zasilającej [m³],
- R – indywidualna stała gazowa dla powietrza [J/kg K].

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymano odpowiednio : $m_{KP} = 10,20$ kg i $m_{BN} = 5,66$ kg.

2.1.2. OKREŚLENIE PARAMETRÓW POWIETRZA W PODUSZCE PNEUMATYCZNEJ W CHWILI AWARII

W chwili wystąpienia rozważanych awarii w komorze hiperbarycznej, w poduszce pneumatycznej panuje nominalne ciśnienie pracy równe $p_{KP} = 2$ MPa. Każdy wzrost ciśnienia ponad tą wartość, bez odpowiedniego zabezpieczenia, może spowodować trudne do określenia uszkodzenia lub zniszczenia zbiornika.

2.1 SELECTION OF A SAFETY VALVE FOR AN EMERGENCY AT NOMINAL PARAMETERS OF A HYPERBARIC CHAMBER

In the examined emergency cases in a recompression chamber, two gas flows should be expected to occur almost at the same time

- a) supercritical discharge from the cylinder to the pneumatic cushion,
- b) discharge from the pneumatic cushion to normobaric air (i.e. outside the recompression chamber).

2.1.1 DETERMINING AIR MASSES IN THE CYLINDERS AT THE TIME OF EQUILIBRIUM

At the time of equilibrium between the cylinder and decompression chamber, air mass, determined from the formulas below, is accumulated in the tanks:

$$m_{KP} = \frac{p_{KP} \times V_{KP}}{R \times T_{KP}} \quad (2)$$

$$m_{BN} = \frac{p_{BN} \times V_{BN}}{R \times T_{BN}} \quad (3)$$

Where:

- m_{KP} – air mass of pneumatic cushion in a hyperbaric chamber [kg],
- m_{BN} – mass of air in the cylinder [kg],
- p_{KP} – nominal pressure in pneumatic cushion in a hyperbaric chamber [MPa],
- p_{BN} – nominal pressure in the cylinder [MPa],
- V_{KP} – geometric volume of pneumatic cushion in a hyperbaric chamber [m³],
- V_{BN} – geometric volume of the inside of the cylinder [m³],
- R – individual gas constant for air [J/kg K].

After replacing the symbols with numerical values, we got the following result: $m_{KP} = 10.20$ kg and $m_{BN} = 5.66$ kg.

2.1.2. DETERMINING PARAMETERS OF A PNEUMATIC CUSHION AT THE TIME OF EMERGENCY

At the time of emergency in a hyperbaric chamber, in the pneumatic cushion the nominal working pressure equals to $p_{KP} = 2$ MPa. Any increase in pressure above this value, without proper protection, can cause damage difficult to determine or destruction of the tank.

In emergency situations considered here, it was assumed those processes occurring rapidly and almost simultaneously do not cause significant changes in the temperature and heat exchange with the environment. Thus, air flowing from the pneumatic cushion to normobaric atmosphere maintain its temperature at approximately $T_{KP} \cong 283,15$ K.

W rozważanych sytuacjach awaryjnych przyjęto założenie, że zachodzące szybko i praktycznie równoległe procesy, nie spowodują istotnej zmiany temperatury układu i wymiany ciepła z otoczeniem. Stąd też powietrze wypływające z poduszki pneumatycznej do atmosfery normobarycznej w przybliżeniu utrzyma swoją wartość temperatury na poziomie $T_{KP} \cong 283,15$ K.

Wartość ciśnienia w poduszce po wpłynięciu zawartości nurkowej butli zasilającej określono ze wzoru:

$$p_{KP}' = \frac{(m_{KP} + m_{BN}) \cdot R \cdot T_{KP}}{V_{KP}} \quad (4)$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymano: $p_{KP}' = 3,1$ MPa.

Oznacza to, że chwilowa wartość ciśnienia w poduszce pneumatycznej wzrosłaby o $\Delta p = 1,1$ MPa ponad nominalne ciśnienie pracy komory hiperbarycznej. Próba hydrauliczna, przeprowadzona w ramach odbioru zbiornika ciśnieniowego, wynosiła 2,9 MPa. Była to maksymalna, obliczeniowa granica wytrzymałości, jaką komora hiperbaryczna mogłaby być chwilowo przeciążona.

2.1.3. OKREŚLENIE MASOWEGO NATĘŻENIA PRZEPIYWU POWIETRZA W UKŁADZIE

W celu określenia masowego natężenia przepływu, w przedmiotowych sytuacjach awaryjnych przyjęto, że masa powietrza zawarta w butli stanowi nadmiar gazu, który należy usunąć. Ponieważ ciśnienie w zbiorniku jest nominalne, to odprowadzanie masy wpływającej z nurkowej butli zasilającej do poduszki powietrznej, a z niej do otoczenia komory dekompresyjnej, powinno odbywać się równoległe i w tym samym czasie. Dlatego też do obliczeń przyjęto, że masa powietrza do odprowadzenia z butli równa będzie wartościowo $m_{BN} = 5,66$ kg. Aby przekształcić ją w strumień masy, niezbędnym jest określenie czasu wypływu dla obu rozważanych awarii. W tym celu wykorzystano bilans masy powietrza zawartego w butli dla dowolnego momentu czasu wypływu, który zapisano [2]:

$$V_{BN} \cdot d\rho_{BN} = w_{KR} \cdot F_{BN} \cdot d\tau_{BN} \quad (5)$$

Gdzie:

- V_{BN} – objętość geometryczna nurkowej butli zasilającej [m³],
- $d\rho_{BN}$ – zmiana gęstości powietrza pomiędzy początkiem a końcem wypływu [kg/m³],
- w_{KR} – prędkość krytyczna wypływu powietrza z butli [m/s],
- F_{BN} – pole powierzchni przekroju, przez który wypływa powietrze [m²],
- $d\tau_{BN}$ – przyrost czasu podczas wypływu powietrza z butli [s].

Całkując obie strony równości (5) w przyjętych granicach:

$$V_{BN} \cdot \int_{\rho_{1BN}}^{\rho_{2BN}} d\rho_{BN} = w_{KR} \cdot F_{BN} \cdot \int_0^{\tau} d\tau_{BN} \quad (6)$$

The pressure in the cushion after the inflow of the contents of diving cylinders is defined by the formula:

$$p_{KP}' = \frac{(m_{KP} + m_{BN}) \cdot R \cdot T_{KP}}{V_{KP}} \quad (4)$$

After replacing the symbols with numerical values, we got the following result: $p_{KP}' = 3,1$ MPa. This means that the instantaneous pressure in the pneumatic cushion increased by $\Delta p = 1,1$ MPa above the nominal operating pressure of the hyperbaric chamber. The hydraulic test, showed pressure at 2.9 MPa. This was the maximum strength limit with which the hyperbaric chamber could be temporarily loaded.

2.1.3. DETERMINING THE MASS FLOW OF AIR IN THE SYSTEM

In order to determine the mass flow rate, in these emergency situations it is assumed that the mass of air contained in a cylinder is some excess of gas, which must be removed. As the cylinder pressure is nominal, discharging the mass flowing from the supply cylinder into the bag, and from there to the recompression chamber, should happen simultaneously. Therefore, the calculation assumes that the mass of air to be discharged from the cylinder will be equal in value to $m_{BN} = 5,66$ kg. To turn it into a mass flux, it is necessary to determine the flow time for the two emergencies discussed. In order to do so, the mass balance of air contained in the cylinder for any discharge point in time was used, which was written as [2]:

$$V_{BN} \cdot d\rho_{BN} = w_{KR} \cdot F_{BN} \cdot d\tau_{BN} \quad (5)$$

Where:

- V_{BN} – geometric volume of the supply cylinder [m³],
- $d\rho_{BN}$ – change in air density between the beginning and the end of the discharge [kg/m³],
- w_{KR} – critical velocity of air flow from the cylinder [m/s],
- F_{BN} – cross-sectional area through which air flows [m²],
- $d\tau_{BN}$ – increase in the time during the flow of air from the bottle [s].

Integrating both sides of the equation (5) within the adopted limits:

$$V_{BN} \cdot \int_{\rho_{1BN}}^{\rho_{2BN}} d\rho_{BN} = w_{KR} \cdot F_{BN} \cdot \int_0^{\tau} d\tau_{BN} \quad (6)$$

assuming that the discharge will be held at a critical speed:

$$w_{KR} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} \cdot p_{BN} \cdot v_{BN}} \quad (7)$$

where

- v_{BN} – volume of air in the cylinder under nominal pressure p_B ; it can be expressed as and substituting the mass balance in the equations and transformation, the formula for the duration of air discharge from the cylinder was calculated:

przyjmując, że prędkość wypływu odbywać się będzie z prędkością krytyczną:

$$w_{KR} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} \cdot p_{BN} \cdot v_{BN}} \quad (7)$$

Gdzie:

v_{BN} – objętość właściwa powietrza w butli pod ciśnieniem nominalnym p_B ; można ją wyrazić

$$v_{BN} = \frac{1}{\rho_{1BN}} \quad (8)$$

i podstawieniu do równania bilansu masy oraz przekształceniach, otrzymano wzór na czas wypływu powietrza z butli:

$$\tau_{BN} = \frac{V_{BN} \cdot (\rho_{1BN} - \rho_{2BN})}{F_{BN} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa + 1)} \cdot \frac{p_{BN}}{\rho_{1BN}}}} \quad (9)$$

Po wstawieniu danych liczbowych, otrzymanych po zastosowaniu poniższych wzorów [1]:

- ciśnienie wylotowe z butli (końcowe) [Pa] – przepływ nadkrytyczny:

$$p_{BKR} = \beta_{KR} \cdot p_{BN} \quad (10)$$

- temperatura krytyczna na wylocie z nbz [K] – przepływ nadkrytyczny:

$$T_{BKR} = T_{1BN} \cdot \left(\frac{p_{BKR}}{p_{1BN}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (11)$$

- gęstość powietrza w butli [kg/m^3] przy $p_{BN} = 30 \text{ MPa}$ i temperaturze $T_{1BN} = 277,15 \text{ K}$:

$$\rho_{1BN} = \frac{p_{BN}}{R \cdot T_{1BN}} \quad (12)$$

- gęstość powietrza na wylocie z butli [kg/m^3] przy ciśnieniu wylotowym i temperaturze krytycznej $T_{BKR} = 230,9 \text{ K}$:

$$\rho_{2BN} = \frac{p_{BKR}}{R \cdot T_{BKR}} \quad (13)$$

- pola przekrojów: dla szyjki butli o średnicy $\phi 25$ i pełnego przekroju butli o średnicy $\phi 170$ - [m^2]:

$$\tau_{BN} = \frac{V_{BN} \cdot (\rho_{1BN} - \rho_{2BN})}{F_{BN} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa + 1)} \cdot \frac{p_{BN}}{\rho_{1BN}}}} \quad (9)$$

After inserting the figures, obtained after applying the following formulas [1]:

- discharge (final) pressure from the cylinder [Pa] - supercritical flow:

$$p_{BKR} = \beta_{KR} \cdot p_{BN} \quad (10)$$

- critical temperature at the time of discharge [K] - supercritical flow:

$$T_{BKR} = T_{1BN} \cdot \left(\frac{p_{BKR}}{p_{1BN}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (11)$$

- air density in the cylinder [kg/m³] at $p_{BN} = 30$ MPa and temperature $T_{1BN} = 277,15$ K:

$$\rho_{1BN} = \frac{p_{BN}}{R \cdot T_{1BN}} \quad (12)$$

- air density at the outlet of the cylinder [kg/ m³] at the outlet pressure and critical temperature $T_{BKR} = 230,9$ K:

$$\rho_{2BN} = \frac{p_{BKR}}{R \cdot T_{BKR}} \quad (13)$$

- fields of cross-sections: for the neck of the cylinder with a diameter of $\phi 25$ and a full cylinder profile with a diameter of $\phi 170$ - [m²]:

$$F_{BN25(170)} = \frac{\Pi \cdot d_{25(170)}^2}{4} \quad (14)$$

flow times were obtained as follows:

- a) for the discharge through the neck of the cylinder:

$$\tau_{BN25} = 13,84 \text{ s}$$

- b) for the discharge from the whole cylinder profile:

$$\tau_{BN170} \cong 0,3 \text{ s}.$$

Referring the obtained time values to the air mass contained in the cylinder, which flows into the pneumatic cushion, and using the formula:

$$\dot{m}_{25(170)} = \frac{m_{BN}}{\tau_{BN25(170)}} \quad (15)$$

- a) for the discharge through the neck of the cylinder:

$$\dot{m}_{25} = 1\,476,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$F_{BN25(170)} = \frac{\Pi \cdot d_{25(170)}^2}{4} \quad (14)$$

otrzymano następujące czasy wypływu:

a) dla wypływu przez szyjkę nurkowej butli zasilającej:

$$\tau_{BN25} = 13,84 \text{ s}$$

b) dla wypływu pełnym przekrojem nurkowej butli zasilającej:

$$\tau_{BN170} \cong 0,3 \text{ s}$$

Odnosząc otrzymane wartości czasu do masy powietrza zawartej w butli, która wpływa do poduszki pneumatycznej komory i wykorzystując wzór:

$$\dot{m}_{25(170)} = \frac{m_{BN}}{\tau_{BN25(170)}} \quad (15)$$

otrzymano następujące jednostkowe natężenia przepływu:

a) dla wypływu przez szyjkę nurkowej butli zasilającej:

$$\dot{m}_{25} = 1\,476,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

b) dla wypływu pełnym przekrojem nurkowej butli zasilającej:

$$\dot{m}_{170} = 67\,932,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2.1.4. OBLICZENIE POWIERZCHNI PRZEKROJU ZAWORU BEZPIECZEŃSTWA

Obliczenie powierzchni przekroju kanału dopływowego zaworu bezpieczeństwa, dla rozpatrywanych sytuacji awaryjnych, przeprowadzono wykorzystując przekształcony wzór (1):

$$A_{ZB(25)(170)} = \frac{\dot{m}_{(25)(170)} \cdot \sqrt{Z}}{10 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \alpha \cdot (p_1 + 0,1)} \quad (16)$$

oraz wzór na średnicę przekroju kanału dopływowego:

$$d_{ZB(25)(170)} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{ZB(25)(170)}}{\Pi}} \quad (17)$$

b) for the discharge from the whole cylinder profile:

$$\dot{m}_{170} = 67\,932,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

2.1.4. CALCULATING THE CROSS-SECTIONAL AREA OF THE SAFETY VALVE

Calculating the cross-sectional area of the safety valve inlet channel, for the emergency situations discussed, was carried out after transforming formula (1):

$$A_{ZB(25)(170)} = \frac{\dot{m}_{(25)(170)} \cdot \sqrt{Z}}{10 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \alpha \cdot (p_1 + 0,1)} \quad (16)$$

and the formula for the diameter of the inlet channel:

$$d_{ZB(25)(170)} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{ZB(25)(170)}}{\Pi}} \quad (17)$$

After replacing the symbols with numerical values, we got the following diameter :

a) for the discharge through the neck of the cylinder:

$$d_{ZB25} \cong 9,0 \text{ mm}$$

b) for the discharge from the whole cylinder profile:

$$d_{ZB170} \cong 58,5 \text{ mm}$$

The calculated values indicate that:

- in the case of an uncontrolled flow of air from the cylinder through the neck with a diameter of ϕ 25 mm to the pneumatic cushion of the hyperbaric chamber, which is at the nominal pressure, the excess of gas may be discharged through a safety valve chosen on the same basis as for a typical, normal operation of the cylinder. The excess of breathing mixture accumulated for a moment in the pneumatic cushion should not cause significant damage to the test stand,
- in the case of a damaged cylinder in a hyperbaric chamber under nominal pressure, where air would be discharged from the whole cylinder profile, the safety valve inlet channel would have to be of diameter 3-fold greater than in the normal operation conditions of the chamber.
The above hypothetical emergency situation, could be secured by the valve SI 6302 PN 40, DIN 80x125, made by Śląskie Zakłady Armatury Przemysłowej "ARMAK".

Po podstawieniu wielkości liczbowych otrzymano następujące średnice:

a) dla wypływu przez szyjkę nurkowej butli zasilającej:

$$d_{ZB25} \cong 9,0 \text{ mm}$$

b) dla wypływu pełnym przekrojem nurkowej butli zasilającej:

$$d_{ZB170} \cong 58,5 \text{ mm}$$

Obliczone wartości wskazują, że:

- W przypadku niekontrolowanego wypływu powietrza z nurkowej butli zasilającej przez szyjkę o średnicy ϕ 25 mm do poduszki pneumatycznej komory hiperbarycznej, będącej pod ciśnieniem nominalnym, nadmiar czynnika może być odprowadzony zaworem bezpieczeństwa dobranym tak, jak dla typowej, normalnej pracy zbiornika. Nadmiar energii czynnika oddechowego, przez chwilę zgromadzony w poduszce pneumatycznej, nie powinien spowodować istotnych uszkodzeń stanowiska badawczego,
- W przypadku awarii butli nurkowej w komorze hiperbarycznej będącej pod ciśnieniem nominalnym, gdzie wypływ powietrza nastąpiłby pełnym przekrojem nurkowej butli zasilającej, zawór bezpieczeństwa musiałby być o średnicy kanału dolotowego 3-krotnie większym, niż w normalnych warunkach pracy komory. Powyższą, hipotetyczną sytuację awaryjną, zabezpieczyłby zawór: SI 6302 PN 40, DIN 80x125, produkcji Śląskich Zakładów Armatury Przemysłowej "AR-MAK".

3. WNIOSKI

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczonych parametrów pracy zaworu bezpieczeństwa dla analizowanych typowych i awaryjnych sytuacji.

Na podstawie zestawienia widać, że tylko w jednym przypadku może nastąpić znaczne przekroczenie parametrów pracy komory hiperbarycznej. Biorąc jednak pod uwagę, iż komora będzie wykorzystywana tylko do celów badawczych techniki nurkowej, prowadzonych zgodnie z normą PN-EN 250, nie przewiduje się sytuacji, w której butla nurkowa o ciśnieniu wewnętrznym 30 MPa, umieszczona w zbiorniku, będzie sprężona do ciśnienia nominalnego pracy komory.

Pozostałe, ewentualne przypadki niekontrolowanego wzrostu ciśnienia w komorze hiperbarycznej, z powodzeniem zabezpieczy zawór bezpieczeństwa dobrany do typowej pracy komory. Nie zmienia to faktu, że w instrukcji obsługi stanowiska badawczego, powinno być umieszczone ostrzeżenie o nieprzekraczaniu, wewnątrz komory hiperbarycznej, wartości ciśnienia 0,5 MPa w sytuacji umieszczenia w niej w pełni naładowanej, nurkowej butli zasilającej.

3. CONCLUSIONS

Table 3 summarizes the results of the calculated parameters of the safety valve for the normal and emergency situations discussed.

On the basis of the chart, it can be seen that only in one case there may be a significantly exceeded performance parameters of the hyperbaric chamber. However, given that the chamber will be used for diving research purposes only, carried out in accordance with PN-EN 250, no situations in which a diving cylinder under internal pressure of 30 MPa, placed in the tank will be compressed to a nominal pressure of the chamber are envisaged

Other cases of uncontrolled increase in pressure in a hyperbaric chamber will successfully be protected by the safety valve sized for typical chamber work. It does not change the fact that the test stand manual, there should be a warning not to exceed the pressure in the hyperbaric chamber over 0.5 MPa while placing there a fully charged supply cylinder.

Table 3.

Summary of calculated parameters of the safety valve, depending on the type of work of the hyperbaric chamber.

Type of work	Chamber pressure	Mass air flow	Computational area of the intake channel	Diameter of the inlet channel	Chosen type of safety valve
	[MPa]	[kg/h]	[mm ²]	[mm]	
Typical, without a cylinder inside	0.1 ÷ 2.0	3 790.8	150.0	14.0	Si 6303.01 PN 40 20 x 40
State of emergency (with a cylinder)					
a) in compliance with PN-EN 250	0.1 ÷ 0.5	not determined	not determined	not determined	
b) nominal pressure, discharge at ϕ 25	2.0	1 476.0	58.4	9.0	
c) nominal pressure, discharge at ϕ 170	2.0	67 932.0	2 685.0	58.5	Si 6302 PN 40 80 x 125

Tabela 3.

Zestawienie obliczonych parametrów pracy zaworu bezpieczeństwa w zależności od typu pracy komory hiperbarycznej.

Rodzaj pracy	Ciśnienie pracy komory	Strumień masy powietrza	Obliczeniowa pow. kanału dolotowego	Średnica kanału dolotowego	Typ dobrego zaworu bezpieczeństwa
	[MPa]	[kg/h]	[mm ²]	[mm]	
Typowa, bez butli wewnętrznej	0,1 ÷ 2,0	3 790,8	150,0	14,0	Si 6303.01 PN 40 20 x 40
Stan awaryjny (z butlą) :					
a) zgodna z PN-EN 250	0,1 ÷ 0,5	nie określano	nie określano	nie określano	
b) ciś. nomin., wypływ przy ϕ 25	2,0	1 476,0	58,4	9,0	
c) ciś. nomin., wypływ przy ϕ 170	2,0	67 932,0	2 685,0	58,5	Si 6302 PN 40 80 x 125

LITERATURA/BIBLIOGRAPHY

1. Bęczkowski W.: „Rurociągi energetyczne” cz. 1 Konstrukcja i obliczenie, Wyd. II WNT, Warszawa 1964,
2. Gąsiorowski J., Radwański E., Zagórski J., Zgorzelisk M.: „Zbiór zadań z teorii maszyn cieplnych” wyd. III WNT, Warszawa 1978
3. Polski Komitet Normalizacyjny : Polska Norma PN-EN 250 kwiecień 2003 Wprowadza EN 250:2000, IDT "Sprzęt do oddychania - Aparaty powietrzne butlowe do nurkowania ze sprężonym powietrzem, z obiegiem otwartym - Wymagania, badanie, znakowanie" Copyright by PKN, Warszawa 2003 nr ref. PN-EN 250:2003