

Ryszard Kłos

kmdr rez. dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw. AMW
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3, ul. Śmidowicza 69
tel.: +58 626 27 46, fax.: +58 626 27 61

KRAJOWY SYSTEM DEKOMPRESJI DLA APARATU NURKOWEGO TYPU CRABE

W artykule opisano polski system dekompresji dla francuskiego aparatu nurkowego typu CRABE o wybieranym zamkniętym lub półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego.

Słowa kluczowe: dekompresja, aparat nurkowy typu CRABE.

POLISH DECOMPRESSION SYSTEM FOR CRABE DIVING APPARATUS

In the article has been described Polish decompression system for alternatively closed or semiclosed circuit France made diving apparatus CRABE.

Key words: decompression, diving apparatus CRABE.

WSTĘP

Potrzeba rozpoczęcia eksploatacji aparatu CRABE wymusiła konieczność przeprowadzenia odpowiednich szkoleń dla nurków. Początkowo zakładano, że zostanie w tym celu wykorzystany system dekompresji używany w Marynarce Francuskiej. Jednak dostarczone przez Producenta wyniki pomiarów z 300 osobo–nurkowań zaczęły budzić uzasadnione wątpliwości:

1. analiza tabel francuskich wykazała, że wymagają one usankcjonowania niedopuszczalnych przez krajowe przepisy ciśnień cząstkowych tlenu (Kłos R., 2007),
2. analiza wyników monitoringu tlenu podczas wdrażania aparatu we Francji pokazała, że założenia projektowe nie były spełnione i możliwe są spadki ciśnień cząstkowych tlenu poniżej dopuszczalnej w założeniach teoretycznych granicy, co jest niebezpieczne z punktu widzenia dekompresji,
3. analiza gradientów przesyceń dla proponowanej dekompresji jest niezgodna z dotychczasową krajową praktyką, stosowaną podczas wdrożeń innych aparatów nurkowych (Kłos R., 2007).

Z powyższych powodów zdecydowano się na zaostrzenie rygorów bezpieczeństwa, przenosząc nurkowania do ośrodka hiperbarycznego Akademii Marynarki Wojennej. Badania prowadzone było w ramach posiadanego zezwolenia Komisji Bioetycznej Wojskowego Instytutu Medycznego nr 8/WIM/2009 z dnia 18.03.2009 (Declaration of Helsinki, 2008).

METODA

APARAT NURKOWY

Aparat nurkowy CRABE jest konstrukcją o półzamkniętym obiegu nitroksu¹, jako czynnika oddechowego i workach umieszczonych jeden w drugim (Kłos R., 2000). Zasilany jest on premiksem² lub czystym tlenem³.

Prawidłowy obieg czynnika oddechowego utrzymywany jest przez zawory kierunkowe **1** – **rys.1**. Podczas fazy wydechu zawór wydechowy urządzenia ustnikowego, otwiera się – **rys.2A**. Wydechany czynnik gazowy, poprzez ustnik **12**, wąż wydechowy i zawór wydechowy, przechodzi przez pochłaniacz ditlenku węgla **11** do worka dużego **2**, a z niego poprzez zawór zwrotny do worka małego **3**.

¹lub tlenu podczas dekompresji tlenowej

²nitroksiem o wstępnie ustalonym, niezmiennym podczas procesu nurkowania składzie ilościowym

³podczas stosowania dekompresji tlenowej

INTRODUCTION

Launching the diving apparatus CRABE for routine operation has needed divers training. At first, the French Navy decompression system has been proposed for this task, but provided by the manufacturer the results of 300 man-dives flashed some problems:

1. French decompression tables analyses revealed that accepted oxygen partial pressure values are not allow for Polish regulations (Kłos R., 2007),
2. results of oxygen monitoring were taken during implementation process of the apparatus in France showed that the design assumptions were not valid and that some oxygen partial pressure decreases below assumed theoretical limit, which is harmful for decompression,
3. analysis of the supersaturation gradients for proposed decompression are incompatible with existing the Polish practice used for other diving apparatuses implementation (Kłos R., 2007).

For these reasons, has been taken decision to tighten security requirements by moving the training process to hyperbaric facilities at the Naval Academy and treat them as experimental dives. The study was approved by the Military Medical Institute Bioethics Committee – permission No: 8/WIM/2009 of 18/03/2009 (Declaration of Helsinki, 2008).

METHOD

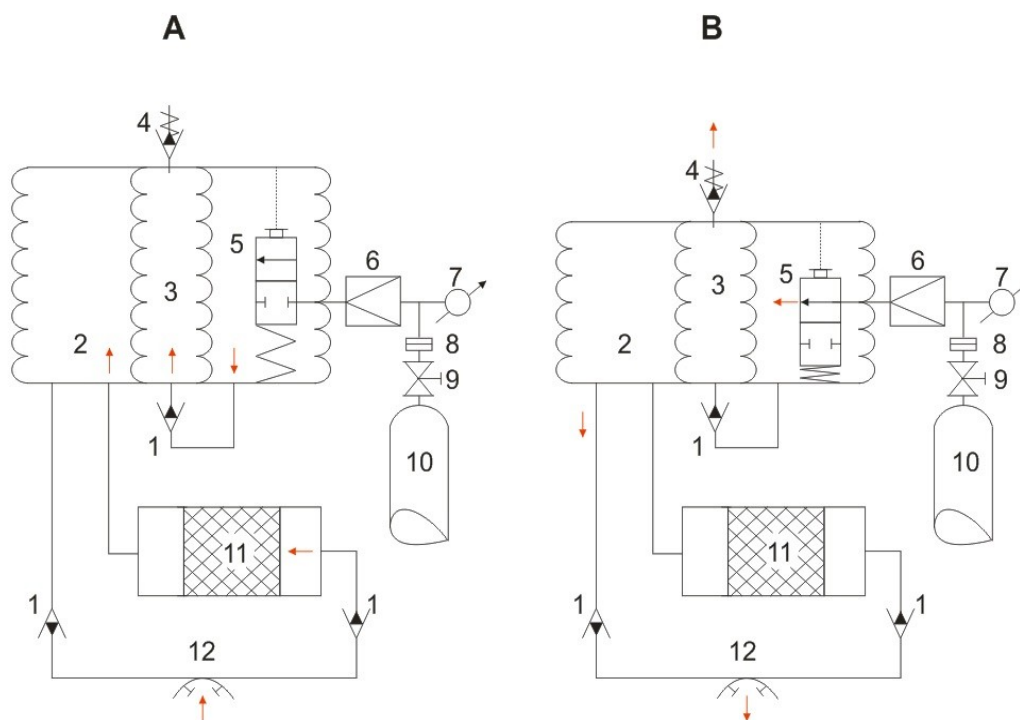
DIVING APPARATUS

The CRABE is a semi-closed circuit nitrox¹ rebreather with two breathing bags placed one inside the other. It is powered by premix² or pure oxygen³ (Kłos R., 2000). The proper circulation of the breathing mixture is maintained by the directional valves **1** – **Fig.1**. During the expiration phase, the exhaust valve of the mouthpiece opens – **Fig.2A**. The breathing mixture exhaled through the mouthpiece **12**, the exhalation hose, and the exhaust valve, passes through a carbon dioxide scrubber **11** into to the large breathing bag **2**, and from there through the non-return valve into the small breathing bag **3**.

¹ or oxygen, during oxygen decompression

² nitrox of a predetermined quantitative composition, constant during the process of diving

³ during oxygen decompression



Rys.1. Zasada działania aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego i workach umieszczonych jeden w drugim.

A. faza wydechu

B. faza wdechu

1. zawór zwrotny

2. worek duży (zewnątrzny)

3. worek mały (wewnętrzny)

4. zawór nadmiarowy

5. zawór dozujący

6. reduktor

7. manometr

8. złączka

9. zawór

10. butla z czynnikiem oddechowym

11. pochłaniacz dwutlenku węgla

12. ustnik

Podczas wdechu, zawór wydechowy jest zamknięty – **rys.1B**. Natomiast otwiera się zawór wdechowy. Czynniki oddechowy z worka dużego **2** przechodzi do płuc poprzez zawór wdechowy, wąż wdechowy i urządzenie ustnikowe **12**. Powoduje to opadanie⁴ worka dużego **2**, a wraz z nim opadanie także worka małego **3**, z którego gaz ulatuje poprzez zawór nadmiarowy **4** do przestrzeni wodnej. Jednocześnie, duży worek **2** opadając uruchamia zawór dawkujący **5** poprzez naciśnięcie jego dźwigni. Otwarcie zaworu **5** powoduje dopływ świeżego czynnika oddechowego z butli **10** poprzez zawór odcinający **9**, złącze **8**, reduktor **6** i zawór dawkujący **5** do worka dużego **2**, gdzie miesza się on ze zregenerowanym czynnikiem oddechowym. Stąd czynniki oddechowy wdychany jest przez nurka poprzez zawór zwrotny, wąż wdechowy i urządzenie ustnikowe **12**. Zapotrzebowanie na czynniki oddechowe regulowane jest poprzez akcję oddechową oraz stosunek objętości worka dużego i małego.

⁴zmniejszenie się objętości

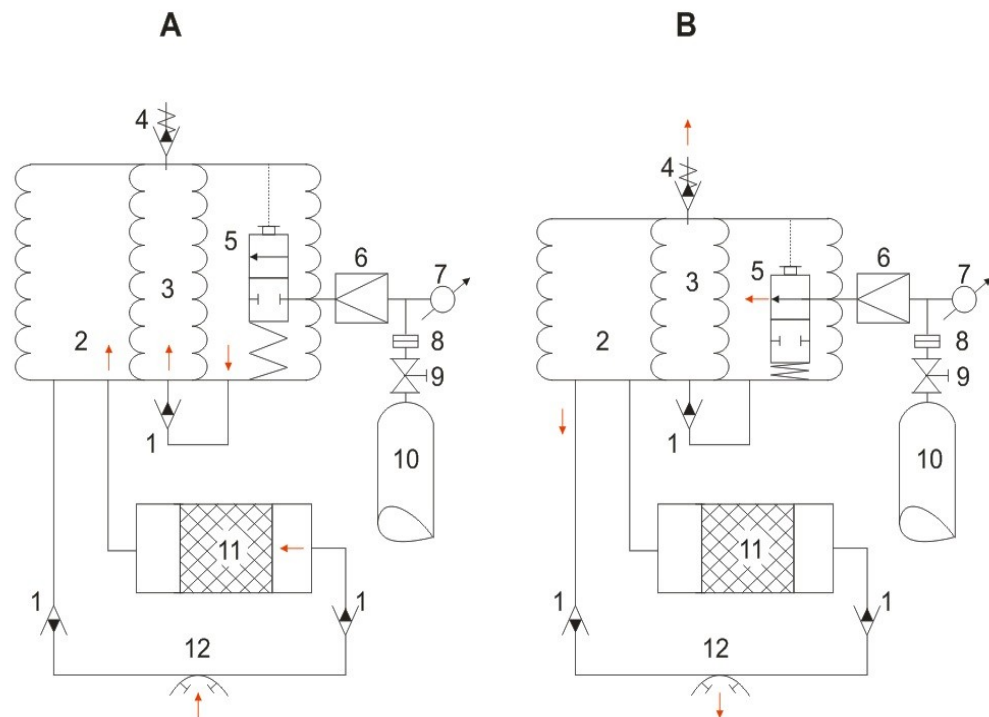


Fig.1. Principle of operation of a semi-closed circuit rebreather with breathing bags placed one inside the other.

A. expiration phase

B. inspiration phase

1. non-return valve

2. large bag (external)

3. small bag (inner)

4. relief valve

5. dosing valve

6. regulator valve

7. manometer

8. coupling

9. valve

10. cylinder with breathing mixture

11. carbon dioxide scrubber

12. mouthpiece

When the diver inhales, the exhaust valve closes – **Fig.1B**, and the inlet valve opens. The breathing mixture is inhaled into the lungs from the large bag **2**, through the inlet valve, inhalation hose and mouthpiece **12**. This causes the large bag **2** to shrink, along with the small bag **3**, from which the gas escapes through a relief valve **4** to ambient water. As the large bag **2** is shrinking, it triggers the dosing valve **5** by pressing its lever. Opening the valve **5** causes fresh breathing mixture to be inhaled from cylinder **10** through the valve **9**, coupler **8**, regulator valve **6**, and dosing valve **5** to the large bag **2**, where it is mixed with regenerated breathing mixture. From here, the breathing mixture is inhaled by the diver through the non-return valve, inhalation hose and mouthpiece **12**. The demand for breathing mixture is regulated by breathing and the ratio of the volume of the large bag to the small one. During the dives with the CRABE apparatus at the maximum depth in the range of $20 - 45 \text{ mH}_2\text{O}$ with the composition of fresh breathing mixture provided for such circumstances $x_{\text{O}_2} = 0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ and $x_{\text{CO}_2} = 0,325 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, it turns out that this system does not provide the diver with sufficient level of oxygen in the breathing mixture which remains in the loop during decompression at small depths.

Podczas nurkowań z aparatem CRABE na maksymalne głębokości leżące w zakresie 20 – 45 mH₂O z użyciem przewidzianego w tych okolicznościach składu świeżego czynnika oddechowego $x_{O_2} = 0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i $x_{O_2} = 0,325 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, system ten nie zapewnia dostatecznego stężenia tlenu we wdychanym przez nurka czynnika oddechowym pozostającym w obiegu podczas dekompresji na małych głębokościach. Stąd, przy takich nurkowaniach system ten wspomagany jest na małych głębokościach dyszowym układem stałego dozowania, w celu zwiększenia bezpieczeństwa dekompresji.

WENTYLACJA

W aparatach o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego występuje względny spadek zawartości tlenu w przestrzeni oddechowej w stosunku do premiksu, spowodowanym mieszaniem się czynnika zregenerowanego ze świeżym. Proces ten w swej naturze może być modelowany podobnie jak inne procesy wentylacyjne (Kłós R., 2007).

Jako podstawę do opracowania modelu matematycznego można przyjąć bilans masy czynnika oddechowego w przestrzeni oddechowej – **rys.2** (Williams S., 1975). Podczas wydechu uwalniana jest część mieszaniny oddechowej, która powiązana jest z wentylacją oddechową \dot{V}_{od} oraz stosunkiem r objętości wentylowanej worków małego u i dużego U : $r = \frac{u}{U-u}$. Zgodnie z równaniem *Clapeyrona*: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ można zapisać, że ulatująca przez zawór nadmiarowy worka małego liczba moli czynnika oddechowego n_1 będzie wynosić: $n_1 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r$. Wraz z wdychanym czynnikiem oddechowym do płuc przechodzi tlen, którego liczba moli $n_2 = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0$ jest konsumowana i konwertowana na wodę i ditlenek węgla⁵. Aby zbilansować objętość w worku dużym system automatycznego uzupełniania dodaje taką liczbę moli n_3 , jaka ubyła z obiegu $n_3 = n_1 + n_2 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0)$. Wraz z dodaną liczbą moli n_3 premiksu dodawane jest n_4 moli tlenu: $n_4 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_{1W}$. Wraz z ulatniającym się czynnikiem oddechowym n_1 uwalniana jest także liczba n_5 moli tlenu: $n_5 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_{1W} - \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0$.

Stabilną zawartość tlenu w cyrkulującym czynnikiem oddechowym x_s można wyrazić poprzez liczbę moli n_4 dozowanego tlenu minus liczbę moli n_2 konsumowanego tlenu podzieloną przez liczbę moli n_3 dozowanego premiksu pomniejszoną o liczbę moli n_2 konsumowanego tlenu $x_s = \frac{n_4 - n_2}{n_3 - n_2}$ (Williams S., 1975):

$$x_s = \frac{(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_{1W} - \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0}$$
. Skracając i mnożąc licznik i mianownik przez ciśnienie p można otrzymać formułę na obliczanie stabilnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynnikiem oddechowym:
$$x_s = \frac{(\dot{V}_{od} \cdot r \cdot p + p_0 \cdot \dot{v}_0) \cdot x_{1W} - p_0 \cdot \dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r \cdot p}$$
.

⁵który jest następnie chemisorbowany całkowicie w pochłaniaczu

Hence, in such dives at small depths, this system is supported by a nozzle permanent supply system in order to increase the safety of decompression.

VENTILATION

In semi-closed circuit apparatuses, there is a relative decline of oxygen content in the breathing space in relation to premix; it is due to mixing of regenerated and fresh breathing mixture. This process in its nature can be modelled just like other ventilation processes (Kłos R., 2007).

We can take the mass balance of the breathing mixture in the breathing space – **Fig.2** – as a basis for developing a mathematical model (Williams S., 1975). When the diver exhales, some breathing mixture is released, which is related to lung ventilation \dot{V}_{od} and ratio r of the ventilated volume of the small bag u to the volume of the large one U : $r = \frac{u}{U-u}$. According to the *Clapeyron* equation $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$, we can write that the number of breathing mixture moles being released through the relief valve of the small bag n_1 will be $n_1 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r$. Oxygen is inhaled into the lungs along with the breathing gas mixture; its number of moles $n_2 = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0$ is consumed and converted to water and carbon dioxide⁴. To balance the volume of the large bag, the auto-completion system adds the same number of moles n_3 that has left the loop $n_3 = n_1 + n_2 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0)$.

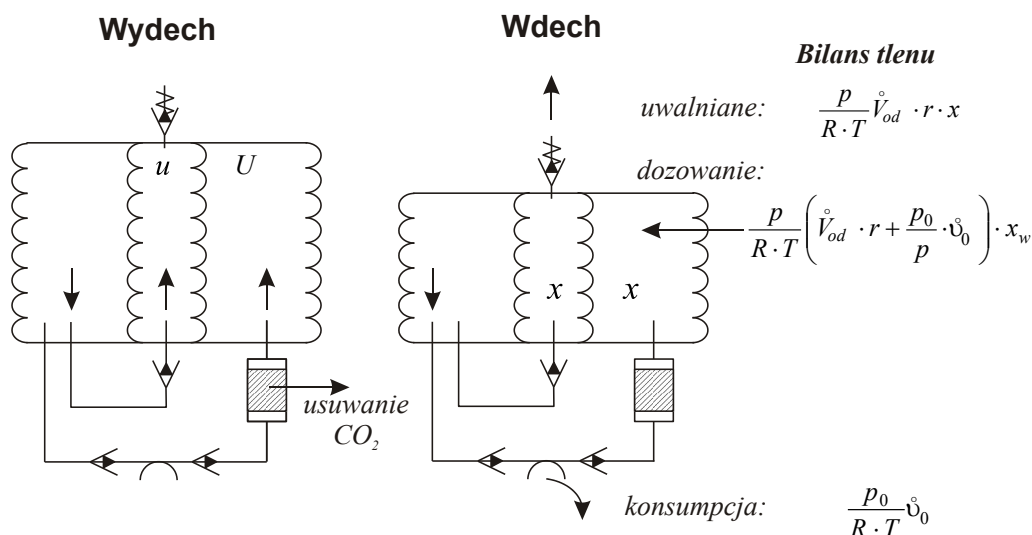
Along with the number of moles of premix n_3 , a number of moles of oxygen is added $n_4 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_w$. Along with breathing mixture n_1 released, a certain number of moles of oxygen n_5 is released too: $n_5 = \frac{p}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0$.

Stable oxygen content in the circulating breathing mixture x_s can be expressed as a number of moles n_4 of oxygen inhaled minus the number of moles n_2 of oxygen consumed divided by the number of moles n_3 of premix inhaled minus the number of moles n_2 of oxygen consumed $x_s = \frac{n_4 - n_2}{n_3 - n_2}$ (Williams S., 1975):

$$x_s = \frac{(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0}$$

by pressure p , we can obtain a formula to calculate stable oxygen content in the breathing mixture inhaled by the diver: $x_s = \frac{(\dot{V}_{od} \cdot r \cdot p + p_0 \cdot \dot{v}_0) \cdot x_w - p_0 \cdot \dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r \cdot p}$.

⁴ which is then completely chemisorbed in the scrubber



Rys.2. Bilans molowy tlenu w worku dużym aparatu nurkowego.

gdzie: \dot{V}_{od} – wentylacja płuc [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{v}_0 – strumień zużywanego tlenu [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_w – ułamek molowy tlenu w świeżym czynniku oddechowym [$mol \cdot mol^{-1}$], x – ułamek molowy tlenu we wdychanym czynniku oddechowym [$mol \cdot mol^{-1}$], x_0 – ułamek molowy tlenu w przestrzeni oddechowej przed uruchomieniem aparatu nurkowego [$mol \cdot mol^{-1}$], p – ciśnienie na głębokości nurkowania [Pa], p_0 – ciśnienie normalne [Pa], R – uniwersalna stała gazowa [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$], T – temperatura bezwzględna [K], U – objętość worka dużego [m^3], u – objętość worka małego [m^3], r – stosunek objętości wentylowanych dla małego i dużego worka $r = \frac{u}{U-u}$ [$m^3 \cdot m^{-3}$].

SZYBKOŚĆ STABILIZACJI

Ważnym czynnikiem jest szybkość reakcji systemu na wymuszoną skokowo zmianę zawartości tlenu w cyrkulującym czynniku oddechowym⁶. Do wyprowadzenia modelu matematycznego zmian zawartości tlenu x we wdychanym czynniku oddechowym w funkcji czasu τ można powtórnie wykorzystać bilans masy⁷ – **rys.2**.

Podczas wydechu uwalniana jest część objętości mieszaniny oddechowej, która powiązana jest z akcją oddechową \dot{V}_{od} oraz stosunkiem objętości wentylowanej worków $r = \frac{u}{U-u}$. Zgodnie z równaniem *Clapeyrona*: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ można zapisać, że ulatująca przez zawór nadmiarowy worka małego liczba moli tlenu n_{O_2} będzie wynosić: $n_{O_2}(1) = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r \cdot x$. Wraz z wdychanym czynnikiem oddechowym do płuc przechodzi pewna część tlenu, gdzie jego liczba moli $n_{O_2}(2) = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0$ jest konsumowana i konwertowana na wodę i ditlenek węgla, który jest następnie chemisorbowany całkowicie w pochłaniaczu. Aby wyrównać bilans masy w worku dużym, system automatycznego uzupełniania dodaje wraz ze świeżym czynnikiem oddechowym pewną liczbę moli tlenu $n_{O_2}(3) = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r \cdot x + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right)$. Bilans tlenu w postaci różniczkowej można zapisać, jako $\frac{p \cdot U}{R \cdot T} \frac{\partial x}{\partial \tau} = n_{O_2}(3) - n_{O_2}(2) - n_{O_2}(1)$.

⁶czas stabilizacji

⁷moli

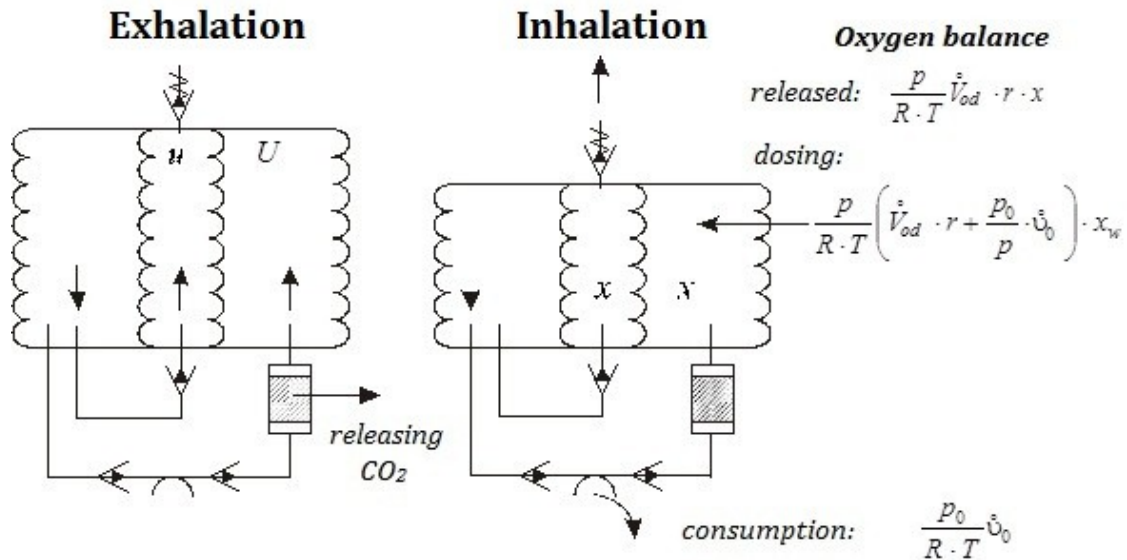


Fig.2. The molar balance of oxygen in the large bag of the rebreather.

where: \dot{V}_{od} – lung ventilation [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{v}_0 – stream of oxygen consumed [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_w – mole fraction of oxygen in fresh breathing mixture [$mol \cdot mol^{-1}$], x – mole fraction of oxygen in inhaled breathing mixture [$mol \cdot mol^{-1}$], x_0 – mole fraction of oxygen in the breathing space before starting the diving apparatus [$mol \cdot mol^{-1}$], p – pressure at the depth of the dive [Pa], p_0 – normal pressure [Pa], R – universal gas constant [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$], T – absolute temperature [K], U – large bag volume [m^3], u – small bag volume [m^3], r – ratio of ventilated volume of the small bag to the volume of the large bag $r = \frac{u}{U-u}$ [$m^3 \cdot m^{-3}$].

STABILIZATION RATE

An important factor is the speed of the system response to oxygen content changes in the circulating breathing mixture⁵, forced at an irregular rate. To derive a mathematical model of changes in oxygen content x in the inhaled breathing mixture in a function of time τ , we can re-use the mass balance⁶ - **Fig.2**.

When the diver exhales, some part of tidal volume, which is connected with respiratory action \dot{V}_{od} and the ratio of ventilated volume of the bags $r = \frac{u}{U-u}$ is released.

According to the *Clapeyron* equation $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$, we can write that the number of moles of oxygen n_{O_2} escaping through the relief valve of the small bag will be $n_{O_2}(1) = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r \cdot x$. Some part of oxygen is inhaled along with the breathing gas mixture into the lungs, where its number of moles $n_{O_2}(2) = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0$ is consumed and converted to water and carbon dioxide, which is then chemisorbed completely in the scrubber. To balance the weight in the large bag, the autocompletion system adds a number of moles of oxygen $n_{O_2}(3) = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r \cdot x + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right)$ together with fresh breathing mixture.

⁵ stabilization time

⁶ of moles

W **tab.1** przedstawiono wyprowadzenie modelu wentylacyjnego dla tego typu aparatu w oparciu o bilans molowy, z której wynika końcowa zależność:

$$x(t) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} + \left[x_0 - \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \cdot \tau\right) \quad (1)$$

gdzie: \dot{V}_{od} – wentylacja płuc [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{v}_0 – strumień zużywanego tlenu [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_w – ułamek molowy tlenu w świeżym czynniku oddechowym [$mol \cdot mol^{-1}$], x – ułamek molowy tlenu we wdychanym czynniku oddechowym [$mol \cdot mol^{-1}$], x_0 – ułamek molowy tlenu w przestrzeni oddechowej przed uruchomieniem aparatu nurkowego [$mol \cdot mol^{-1}$], p – ciśnienie na głębokości nurkowania [Pa], p_0 – ciśnienie normalne [Pa], R – uniwersalna stała gazowa [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$], T – temperatura bezwzględna [K], U – objętość worka dużego [m^3], u – objętość worka małego [m^3], r – stosunek objętości wentylowanych dla małego i dużego worka $r = \frac{u}{U-u}$ [$m^3 \cdot m^{-3}$], τ – czas [min].

Wartość stabilną zawartości tlenu x_s dla aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, posiadającym system worków umieszczonych jeden w drugim, można obliczyć znajdując granicę modelu matematycznego procesu wentylacji (1), dla czasu dążącego do nieskończoności $\tau \rightarrow \infty$:

$$x_s = \lim_{\tau \rightarrow \infty} x(\tau) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \quad (2)$$

gdzie: x_s – stabilna zawartość tlenu we wdychanym czynniku oddechowym [$m^3 \cdot m^{-3}$]

Wstawiając do równania (1) wartości stosunku strumienia konsumowanego tlenu do strumienia akcji oddechowej C_0 oraz stosunek objętości wentylowanych worka dużego do małego k zdefiniowane jako $C_0 = \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od}} \wedge k = \frac{u}{r} = \frac{U-u}{u}$, można zapisać:

$$x_s = \frac{x_w \cdot (p + k \cdot C_0 \cdot p_0) - k \cdot C_0 \cdot p_0}{p} \quad \left| \quad C_0 = \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od}} \wedge k = \frac{u}{r} = \frac{U-u}{u} \right. \quad (3)$$

Stąd ciśnienie cząstkowe tlenu p_{O_2} we wdychanym czynniku oddechowym wyniesie:

$$p_{O_2} = p \cdot x_s = x_w \cdot p - k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \quad (4)$$

Tabela 1.

Wyprowadzenie modelu wentylacji ze względu na zawartość na tlenu x w funkcji czasu $x = f(t)$ dla aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego z systemem worków umieszczonych jeden w drugi.

Oxygen balance in differential form can be written as $\frac{p \cdot U}{R \cdot T} \frac{\partial x}{\partial t} = n_{O_2}(3) - n_{O_2}(2) - n_{O_2}(1)$.

Table 1 presents the derivation of ventilation model for this type of apparatus based on the molar balance, which shows the final relation:

$$x(t) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} + \left[x_0 - \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{od} \cdot r \cdot \tau}{U}\right) \quad (1)$$

where: \dot{V}_{od} – lung ventilation [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{v}_0 – stream of oxygen consumed [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_w – fraction mole of oxygen in fresh breathing mixture [$mol \cdot mol^{-1}$], x – mole fraction of oxygen in inhaled breathing mixture [$mol \cdot mol^{-1}$], x_0 – mole fraction of oxygen in the breathing space before starting the diving apparatus [$mol \cdot mol^{-1}$], p – pressure at the depth of the dive [Pa], p_0 – normal pressure [Pa], R – universal gas constant [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$], T – absolute temperature [K], U – large bag volume [m^3], u – small bag volume [m^3], r – ratio of ventilated volume of small to large bag $r = \frac{u}{U-u}$ [$m^3 \cdot m^{-3}$], τ – time [min].

The stable oxygen value x_s for a semi-closed circuit rebreather with a system of bags placed one inside the other can be calculated by finding the limit of the mathematical model of ventilation process (1), for time tending to infinity $\tau \rightarrow \infty$:

$$x_s = \lim_{\tau \rightarrow \infty} x(\tau) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \quad (2)$$

where: x_s – stable oxygen content in the inhaled breathing mixture [$m^3 \cdot m^{-3}$]

If we substitute some parts of equation (1) with the ratio of the oxygen consumed to the respiratory action C_0 and the ratio of the ventilated volume of the large big to the small one k defined as $C_0 = \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od}} \wedge k = \frac{1}{r} = \frac{U-u}{u}$, we can write:

$$x_s = \frac{x_w \cdot (p + k \cdot C_0 \cdot p_0) - k \cdot C_0 \cdot p_0}{p} \quad \left| \quad C_0 = \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od}} \wedge k = \frac{1}{r} = \frac{U-u}{u} \quad (3)\right.$$

Thus, the oxygen partial pressure p_{O_2} in the inhaled breathing mixture will be:

$$p_{O_2} = p \cdot x_s = x_w \cdot p - k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \quad (4)$$

Z:	$\dot{v}_0 \neq f(H)$		
T:	$x_{O_2} \equiv x = f(t)$		
D:	1°	$\frac{p}{R \cdot T} \cdot U \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0 - \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r \cdot x$	z bilansu molowego tlenu
	2°	$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{U} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{U} - \frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \cdot x$	równanie różniczkowe zwyczajne pierwszego rzędu ⁸
	3°	$\forall_{b = \frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \wedge a = \frac{1}{U} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{U}} dx = (a - b \cdot x) \cdot dt$	z 2°
	4°	$\frac{dx}{b \cdot x - a} + dt = 0$	z 3° po podzieleniu stronami przez $(bx - a)$
	5°	$\int \frac{dx}{b \cdot x - a} + \int dt = const = c$	z 4° i definicji całki
	6°	$\frac{1}{b} \cdot \ln b \cdot x - a + t = c$ $\ln b \cdot x - a \equiv b \cdot (c - t) = c' - b \cdot t$	z 5°; c'-nowa stała całkowania
	7°	$e^{(c' - b \cdot t)} = c'' \cdot e^{-b \cdot t} \equiv b \cdot x - a$	z 6° oraz def. logarytmu naturalnego; c''-nowa stała całkowania
	8°	$\forall_{t \rightarrow 0} x \rightarrow x_0 \Rightarrow c'' = b \cdot x_0 - a \Rightarrow (b \cdot x_0 - a) \cdot e^{-b \cdot t} = b \cdot x - a$ $x(t) = \left(x_0 - \frac{a}{b} \right) \cdot e^{-b \cdot t} + \frac{a}{b}$	z 7° i jeśli $\forall_{t \rightarrow 0} x \rightarrow x_0$
	9°	$\frac{a}{b} = \left(1 + \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r} \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r} = \frac{x_w \cdot p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + x_w \cdot p_0 \cdot \dot{v}_0 - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r}$	z 3°
	10°	$x(t) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} + \left[x_0 - \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \cdot t\right)$	z 2° i 8° cnd.
gdzie: Z-założenie; T-teza; D-dowód; oznaczenia, jak dla rys.2.1			

⁸W równaniach różniczkowych niewiadomą jest funkcja występująca pod znakiem pochodnej. Jeśli niewiadoma jest funkcją jednej zmiennej, to równanie nazywa się zwyczajnym. Rząd najwyższej pochodnej występującej w równaniu jest rzędem równania.

Table 1.

Derivation of a ventilation model of oxygen content x in a function of time $x = f(t)$ for a semi-closed circuit diving apparatus with a system of bags placed one inside the other.

Z:	$\dot{v}_0 \neq f(H)$		
T:	$x_{O_2} \equiv x = f(t)$		
D:	1°	$\frac{p}{R \cdot T} \cdot U \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot \dot{v}_0 - \frac{p}{R \cdot T} \cdot \dot{V}_{od} \cdot r \cdot x$	from molar balance of oxygen
	2°	$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{U} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{U} - \frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \cdot x$	first-order ordinary differential equation ⁸
	3°	$\forall_{b = \frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \wedge a = \frac{1}{U} \cdot \left(\dot{V}_{od} \cdot r + \frac{p_0}{p} \cdot \dot{v}_0 \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{U}} \quad dx = (a - b \cdot x) \cdot dt$	from 2°
	4°	$\frac{dx}{b \cdot x - a} + dt = 0$	from 3° after dividing both sides by $(bx - a)$
	5°	$\int \frac{dx}{b \cdot x - a} + \int dt = const = c$	from 4° and definition of the integral
	6°	$\frac{1}{b} \cdot \ln b \cdot x - a + t = c$ $\ln b \cdot x - a \equiv b \cdot (c - t) = c' - b \cdot t$	from 5°; c'-new constant of integration
	7°	$e^{(c' - b \cdot t)} = c'' \cdot e^{-b \cdot t} \equiv b \cdot x - a$	from 6° and definition of natural logarithm; c''-new constant of integration
	8°	$\forall_{t \rightarrow 0} x \rightarrow x_0 \Rightarrow c'' = b \cdot x_0 - a \Rightarrow (b \cdot x_0 - a) \cdot e^{-b \cdot t} = b \cdot x - a$ $x(t) = \left(x_0 - \frac{a}{b} \right) \cdot e^{-b \cdot t} + \frac{a}{b}$	from 7° and if $\forall_{t \rightarrow 0} x \rightarrow x_0$
	9°	$\frac{a}{b} = \left(1 + \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r} \right) \cdot x_w - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_{od} \cdot r} = \frac{x_w \cdot p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + x_w \cdot p_0 \cdot \dot{v}_0 - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r}$	from 3°
	10°	$x(t) = \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} + \left[x_0 - \frac{x_w \cdot (p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r + p_0 \cdot \dot{v}_0) - p_0 \cdot \dot{v}_0}{p \cdot \dot{V}_{od} \cdot r} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{od}}{U} \cdot r \cdot t\right)$	from 2° and 8° Q.E.D.
where: Z-hypothesis; T-proposition; D-proof; symbols as explained in Fig.2.			

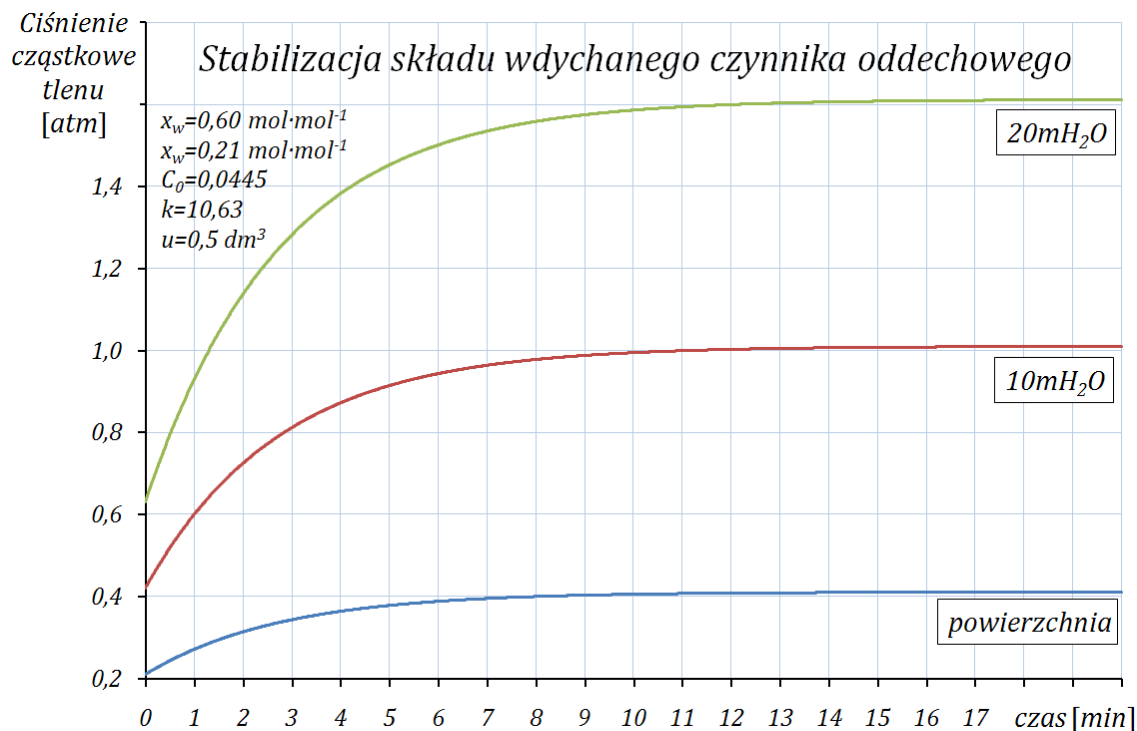
⁸ in differential equations, the derivative is an unknown function. If the unknown function is a function of one variable, such an equation is called ordinary. The order of the highest derivative appearing in the equation is the order of the equation.

Do obliczeń można równanie (4) zapisać w uproszczonej formie: $p_{O_2} = p - (p + k \cdot C_0 \cdot p_0) \cdot x$, gdzie: x – ułamek molowy inertu⁹ [$mol \cdot mol^{-1}$].

Model zależny od czasu (1) można przekształcić do funkcji ciśnienia cząstkowego tlenu p_{O_2} zależnej od czasu $p_{O_2} = f(t)$. Korzystając z zależności (4) oraz tego, że $r = \frac{u}{\bar{v}-u} \Rightarrow U = u \cdot (1 + \frac{z}{r}) = u \cdot (1 + k) \wedge \dot{V}_{od} = \frac{\dot{v}_0}{C_0} \Rightarrow C_0 = \frac{\dot{v}_0}{od} \wedge k = \frac{z}{r}$ można zapisać, że:

$$p_{O_2} = x_w \cdot p - k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) + [x_0 \cdot p - x_w \cdot p + k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w)] \cdot \exp\left[-\frac{\dot{v}_0}{u \cdot C_0} \frac{z}{k \cdot (z+r)} t\right] \quad (5)$$

Do obliczeń można przekształcić podobnie jak poprzednio wprowadzając ułamek molowy inertu x : $p_{O_2} = p - (k \cdot C_0 \cdot p_0 + p) \cdot x + [k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot x - (x_w - x_0) \cdot p] \cdot \exp\left[-\frac{\dot{v}_0}{u \cdot C_0} \frac{z}{k \cdot (z+r)} t\right]$. Korzystając z tej formuły można obliczyć czasy stabilizacji czynnika oddechowego dla aparatu nurkowego tego typu, które są zbliżone do czasów stabilizacji dla półzamkniętego obiegu czynnika oddechowego z dyszowym układem stało dozującym – **rys.3** (Kłos R., 2000).



Rys.3. Przykładowe czasy stabilizacji składu czynnika oddechowego w worku dużym.

⁹dla tej sytuacji problemowej możliwe jest zastąpienie ułamka molowego przez ułamek objętościowy [$x_v] = m^3 \cdot m^{-3}$

Equation (4) can be written in a simplified form to facilitate calculations: $p_{O_2} = p - (p + k \cdot C_0 \cdot p_0) \cdot x$, where: x – inert mole fraction⁸ [$mol \cdot mol^{-1}$].

Time-dependent model (1) can be converted to a function of partial pressure of oxygen p_{O_2} dependent on time $p_{O_2} = f(t)$. Using the formula (4) and the fact that $r = \frac{u}{U-u} \Rightarrow U = u \cdot (1 + \frac{1}{r}) = u \cdot (1 + k) \wedge \dot{V}_{od} = \frac{\dot{v}_0}{C_0} \Rightarrow C_0 = \frac{\dot{v}_0}{od} \wedge k = \frac{1}{r}$, we can write that

$$p_{O_2} = x_w \cdot p - k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) + [x_0 \cdot p - x_w \cdot p + k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot (1 - x_w)] \cdot \exp\left[-\frac{\dot{v}_0}{u \cdot C_0} \cdot \frac{1}{k(1+k)} \cdot t\right] \quad (5)$$

The inert mole fraction x can be introduced here as well to facilitate calculations:

$$p_{O_2} = p - (k \cdot C_0 \cdot p_0 + p) \cdot x + [k \cdot C_0 \cdot p_0 \cdot x - (x_w - x_0) \cdot p] \cdot \exp\left[-\frac{\dot{v}_0}{u \cdot C_0} \cdot \frac{1}{k(1+k)} \cdot t\right].$$

Using this formula allows us to calculate the times of breathing mixture stabilization for such type of a diving apparatus; they are close to the times of stabilization for semi-closed circuit apparatuses with nozzle dispensing systems - **Fig.3.** (Kłos R., 2000).

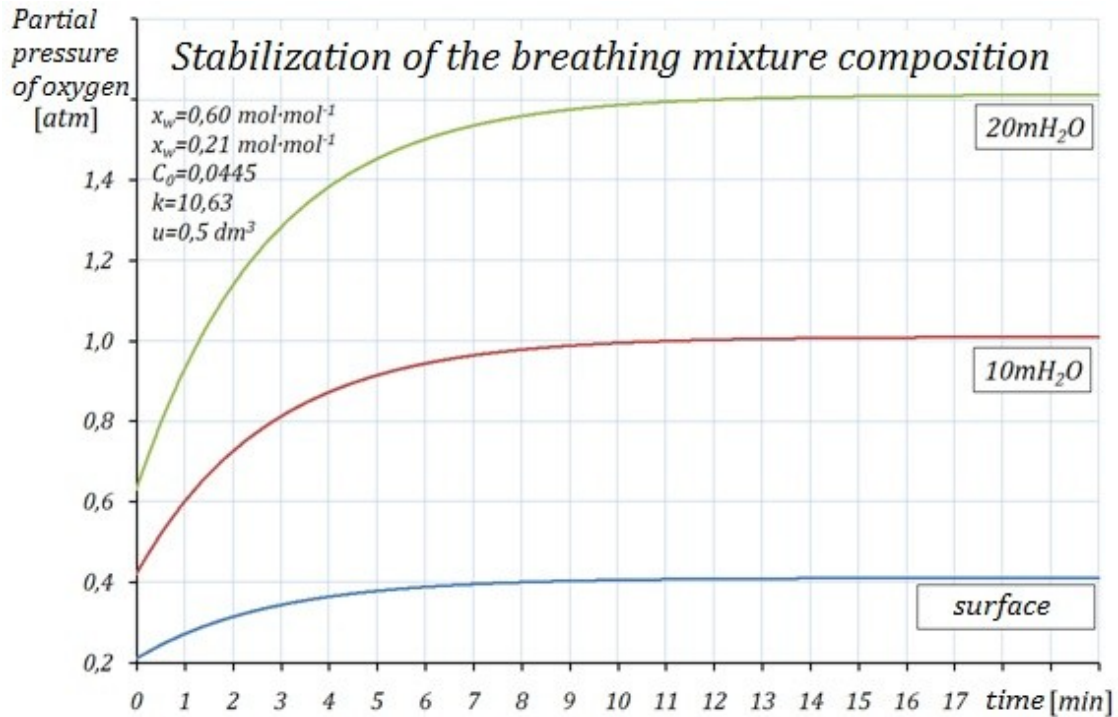


Fig.3. Sample stabilization times of the breathing mixture composition in the large bag.

⁸ in this problem situation, it is possible to replace the mole fraction by a volume fraction $[x_v] = m^3 \cdot m^{-3}$

Tabela 2.

Strumienie zużywanego tlenu i wentylacja płuc w zależności od wysiłku fizycznego (Przylipiak M., Torbus J., 1981).

Wysiłek fizyczny		Strumień zużywanego tlenu	Ilość oddechów na minutę	Wentylacja płuc	Graniczny strumień zużywanego tlenu
Intensywność	Przykład	$[dm^3 \cdot min^{-1}]$	$[min^{-1}]$	$[dm^3 \cdot min^{-1}]$	$[dm^3 \cdot min^{-1}]$
bardzo lekki	leżenie w łóżku	0,25	do 20	8–10	do 0,5
	spokojne siedzenie	0,30			
	stanie bez ruchu	0,40			
lekki	spacer $3,5 km \cdot h^{-1}$	0,7	20–25	10–20	0,5–1,0
umiarkowany	marsz $6,5 km \cdot h^{-1}$	1,2	25–30	20–30	1,0–1,5
ciężki	pływanie z prędkością $3,0 km \cdot h^{-1}$	1,8	30–35	30–50	1,5–2,0
bardzo ciężki	bieg z prędkością $13 km \cdot h^{-1}$	2,0	35–40	50–65	2,0–2,5
krańcowo ciężki	bieg pod górę	4,0	>40	>65	>2,5

PREMIKS

Analizując bilans (4) można stwierdzić, że dla aparatu nurkowego CRABE zasilanego premiksem, minimalne ciśnienie cząstkowe tlenu $p_{O_2}^{min}$ w czynniku oddechowym wdychanym przez nurka wystąpi dla przypadku minimalnej głębokości nurkowania p^{min} i maksymalnego zużycia tlenu, co pociągnie za sobą maksymalizację współczynnika oddechowego C_0^{max} – **tab.2**. Z drugiej strony, maksymalne ciśnienie cząstkowe tlenu $p_{O_2}^{max}$ w czynniku oddechowym wystąpi dla maksymalnej głębokości nurkowania p^{max} i minimalnego zużycia tlenu C_0^{min} . Wartości współczynnika oddechowego wytwórcy przyjmuje w granicach $C_0 \in [0,035; 0,055]$, co stanowi w przybliżeniu wentylację płuc na poziomie $\dot{V}_{O_2} \in [12,5; 60,5]$ przy stosowanym przez producenta odwołaniu do zużycia tlenu na poziomie $\dot{v}_O \in [0,44; 3,33]$ opisanym w normie europejskiej (PN-EN-14143, 2004).

Z powyższej analizy i równania bilansu (4) wynika, że można zapisać układ równań: $p_{O_2}^{max} = x_w \cdot p^{max} - k \cdot C_0^{min} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \wedge p_{O_2}^{min} = x_w \cdot p^{min} - k \cdot C_0^{max} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w)$, który dla $p^{min} = p^{max} = p$, który po uporządkowaniu, przybierze formę:

Table 2.

Oxygen consumption and lung ventilation depending on physical activity (Przylipiak M., Torbus J., 1981).

Physical activity		Oxygen consumed	Number of breaths per minute	Lung ventilation	Border limits of oxygen consumed
Intensity	Example	[dm ³ · min ⁻¹]	[min ⁻¹]	[dm ³ · min ⁻¹]	[dm ³ · min ⁻¹]
very light	lying in bed	0.25	up to 20	8–10	up to 0.5
	sitting still	0.30			
	standing still	0.40			
light	walking at the speed of 3.5 km · h ⁻¹	0.7	20–25	10–20	0.5–1.0
moderate	marching at the speed of 6.5 km · h ⁻¹	1.2	25–30	20–30	1.0–1.5
hard	swimming at the speed of 3.0 km · h ⁻¹	1.8	30–35	30–50	1.5–2.0
very hard	running at the speed of 13 km · h ⁻¹	2.0	35–40	50–65	2.0–2.5
maximal exertion	running uphill	4.0	>40	>65	>2.5

PREMIX

Having analysed equation (4), we can state that for the CRABE rebreather using premix, the minimum partial pressure of oxygen $p_{O_2}^{min}$ in the breathing mixture inhaled by the diver will take place at the minimum diving depth p^{min} and with maximum oxygen consumption, which would entail respiratory rate maximization C_0^{max} – **Table 2**. On the other hand, the maximum oxygen partial pressure $p_{O_2}^{max}$ in the breathing mixture will take place at the maximum diving depth p^{max} and with minimum oxygen consumption C_0^{min} . The respiratory quotient values are assumed by the manufacturer to fall between $C_0 \in [0.035; 0.055]$, which roughly corresponds to the level of lung ventilation $\dot{V}_{O_2} \in [12.5; 60.5]$ with the level of oxygen consumption used by the manufacturer $\dot{v}_O \in [0.44; 3.33]$ and described by a European Standard (PN-EN-14143, 2004).

The above analysis and equation (4) show that the following system of equations can be written:

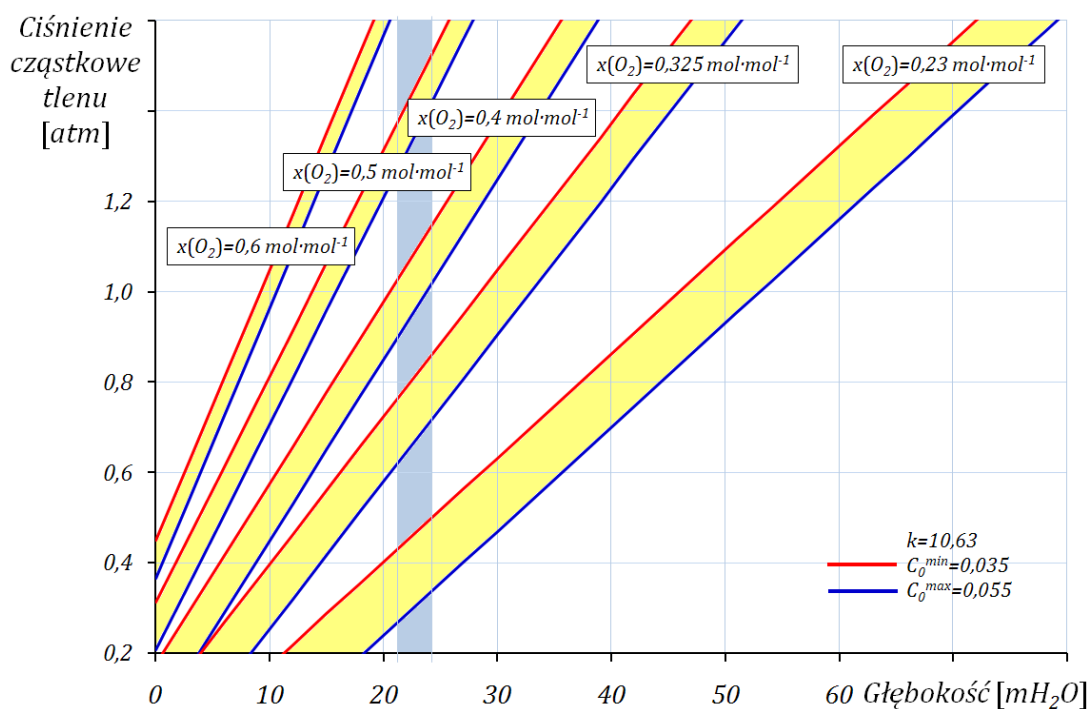
$$p_{O_2}^{max} = x_w \cdot p^{max} - k \cdot C_0^{min} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \wedge p_{O_2}^{min} = x_w \cdot p^{min} - k \cdot C_0^{max} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w)$$

, which with $p^{min} = p^{max} = p$, and then rearranged, will take the following form:

$$\begin{cases} p_{O_2}^{max} = x_w \cdot p - k \cdot C_0^{min} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \\ p_{O_2}^{min} = x_w \cdot p - k \cdot C_0^{max} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \end{cases} \quad (6)$$

Zgodnie z zaleceniami producenta (AQUA-LUNG, 2004) mieszana 40%_v O₂/N₂ może być użyta w zakresie maksymalnych głębokości nurkowania $H^{max} \in [25; 45] mH_2O$. Teoretycznie maksymalne ciśnienia cząstkowe w tym zakresie głębokości mogą wynieść $p_{O_2}^{max} \in [130; 210] kPa$.

Jak wynika z **rys.4** system worka w worku nie zabezpiecza nurka przed hipoksją na głębokościach poniżej 19 mH₂O dla mieszanin o zawartościach tlenu¹⁰ $x(O_2) \in \{0,4; 0,325; 0,23\} mol \cdot mol^{-1}$. Dlatego przy wykorzystaniu tych premiksów podczas procesu dekompresji, od głębokości leżących w zakresie $H \in \{21; 24\} mH_2O$ musi być użyte eżektorowe wspomaganie dozowania świeżego czynnika oddechowego.



Rys.4. Przykładowe zakresy ciśnień cząstkowych tlenu we wdychanym czynniku oddechowym.

¹⁰premixs o zawartości tlenu $x(O_2) = 0,23 mol \cdot mol^{-1}$ jest trimiksem zaś pozostałe nitroksami

$$\begin{cases} p_{O_2}^{max} = x_w \cdot p - k \cdot C_0^{min} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \\ p_{O_2}^{min} = x_w \cdot p - k \cdot C_0^{max} \cdot p_0 \cdot (1 - x_w) \end{cases} \quad (6)$$

According to the manufacturer's instructions (AQUA-LUNG, 2004), a mixture of 40%_v O₂/N₂ can be used in the following range of diving depths $H^{max} \in [25; 45] \text{ mH}_2\text{O}$. Theoretically, the maximum partial pressure in this area can reach $p_{O_2}^{max} \in [130; 210] \text{ kPa}$.

As shown in **Figure 4**, the system of two bags placed one inside the other does not protect the diver from hypoxia at depths below $19 \text{ mH}_2\text{O}$ for mixtures with oxygen content⁹ $x(O_2) \in \{0.4; 0.325; 0.23\} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. Therefore, while using these premixes during the process of decompression, an ejector dosing fresh mixture to support breathing must also be used from the depth $H \in \{21; 24\} \text{ mH}_2\text{O}$ on.

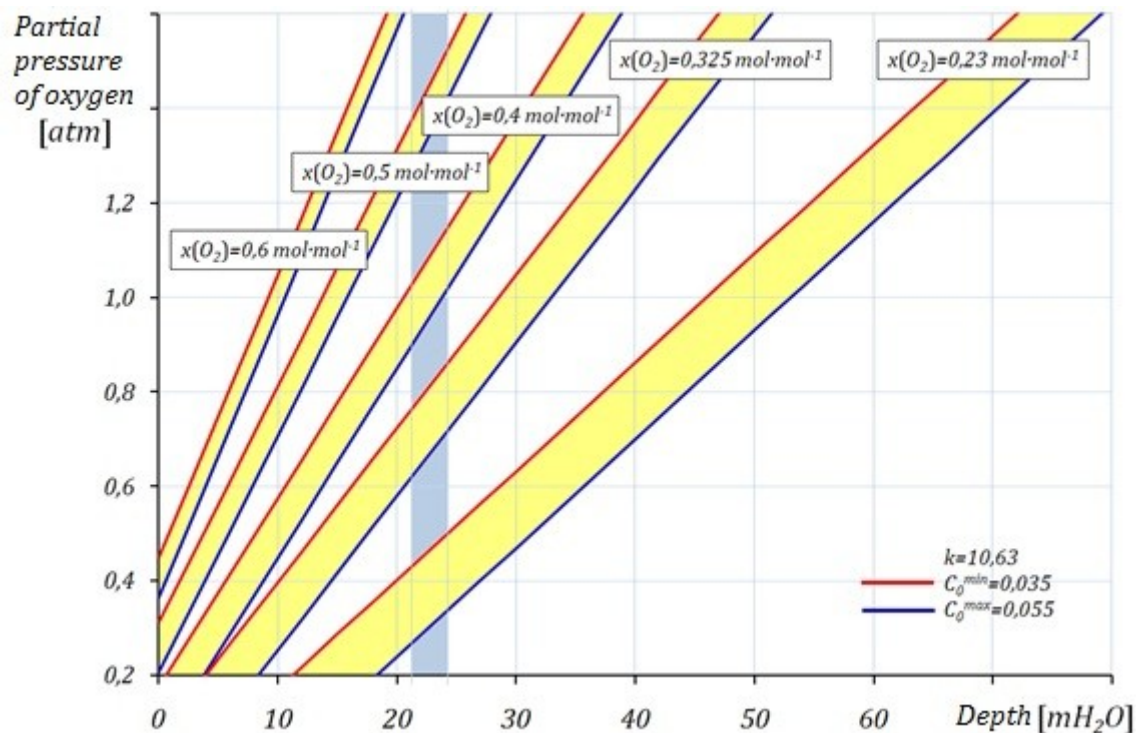


Fig.4. Sample ranges of partial pressure of oxygen in the inhaled breathing mixture.

⁹ premix with oxygen content $x(O_2) = 0.23 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ is called trimix, the rest is called nitrox

MODEL DEKOMPRESJI

Do analizy możliwości dekompresji w aparacie CRABE wykorzystano podejście *Bühlmanna* z zestawem *ZH-L₁₂* i *ZH-L 16B* wartości *M* (Bühlmann A.A., 1984; Bühlmann A.A., 1995). Pominięto wpływ zawartości wilgoci we wdychanym i wydychanym czynniku oddechowym. Zastosowano metodykę obliczania przy różnych wartościach maksymalnego gradientu przesylenia na różnych poziomach, lecz jako bezpieczny przyjęto zrównoważony gradient przesyceń na poziomie $\delta = 75\%$. Opisane dalej szczegółowo sposoby obliczeń opartych na tej zasadzie, nazwano podejściem *AMW*.

Do analizy porównawczej zastosowano podejście *Bühlmanna* z wykorzystaniem programu Deco Planner 3.1.4¹¹. Gradienty przesyceń δ ¹² według *AMW* przeważnie są bardziej konserwatywne¹³ dla długich czasów pobytu niż by to wynikało z programu Deco Planner 3.1.4.

Wstępnie, jako granicę bezpieczeństwa przyjęto rozkłady dekompresji generowane przez Deco Planner 3.1.4, dla dopuszczalnego gradientu początkowego i końcowego na poziomie 100%. Jako granicę rozwiązań wstępnie uznanych za bezpieczne¹⁴ przyjęto rozkłady dekompresji generowane przez Deco Planner 3.1.4, dla dopuszczalnego gradientu początkowego i końcowego na poziomie $\delta = 75\%$. Stąd zrównoważony algorytm *AMW* i rozkład dekompresji obliczony według głębokości równoważnej dla *tabeli powietrznej 3 MW* powinny dla czasów krótkich być poprawione według rozkładu dekompresji generowanego przez Deco Planner 3.1.4, dla dopuszczalnego gradientu początkowego i końcowego na poziomie $\delta = 75\%$ o jednogodzinowy pobyt na *6 mH₂O*¹⁵.

Jako wstępne założenia do zaproponowania tabel dekompresyjnych przyjęto następujące wytyczne:

1. występują jedynie stacje dekompresyjne na głębokościach *6 mH₂O* i *3 mH₂O*.
2. możliwe jest odbycie całej wymaganej dekompresji na stacji *6 mH₂O*.
3. maksymalny gradient według *ZHL₁₂* będzie kształtowany w zależności od wyników eksperymentów nurkowych z obciążeniem nurka wysiłkiem polegającym na symulacji pływania w płetwach.
4. zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{O_2} \geq 30\%_{obj}$.

¹¹zastosowano własną metodykę obliczania tabel ze względu na to, że Deco Planner 3.1.4 nie zezwala na analizę profili uważanych przez niego za stwarzające zagrożenie *DCS*, a takimi były zaproponowane przez Marynarkę Francuską rozkłady dekompresji

¹²przyjęto tutaj, że gradient stanowiący 75% wartości maksymalnej oznacza 0% konserwatywności, zaś na poziomie 30% wartości maksymalnej, jako 100% konserwatywności; gradienty większe od $\delta = 75\%$ wartości maksymalnej będą tutaj uważane wstępnie za potencjalnie niebezpieczne z punktu widzenia zagrożenia *DCS* chyba, że przeprowadzone badania będą sugerowały inaczej

¹³nie zastosowano sugerowanej przez Deco Planner 3.1.4. metodologii *VPM* do generacji tabel, gdyż jest ona jeszcze bardziej konserwatywna

¹⁴z małym zagrożeniem *DCS*

¹⁵ze względu na to, że czas dojścia dla *tabeli 3 MW* jest liczony zgodnie z inną metodyką, to zastosowanie tej dodatkowej stacji jest zgodne z tzw. wprowadzaniem „deep stops”

DECOMPRESSION MODEL

To analyze the possibility of decompression in the CRABE apparatus, the *Bühlmann* approach was used, with the *ZH-L₁₂* and *ZH-L 16B* sets of *M*-value (Bühlmann A.A., 1984; Bühlmann A.A., 1995). The influence of the moisture content in the inhaled and exhaled breathing mixture was omitted. The methodology of making calculations with different values of the maximum supersaturation gradient at different levels was used, but the balanced supersaturation gradient at $\delta = 75\%$ was assumed to be safe. The calculations based on this principle, described in detail below, were called the *AMW* approach (*AMW* stands for Akademia Marynarki Wojennej – Polish Naval Academy in Gdynia).

In a comparative analysis, the *Bühlmann* approach along with the Deco Planner 3.1.4 programme¹⁰ were used. According to *AMW*, supersaturation gradients δ ¹¹ are usually more conservative¹² for longer periods of time than it would be apparent from Deco Planner 3.1.4.

Initially, the decompression tables generated by Deco Planner 3.1.4 (with the permissible initial and final gradient set at 100%) determined the safety limit. The decompression tables generated by Deco Planner 3.1.4, with the permissible initial and final gradient at the level of $\delta = 75\%$, were adopted as the boundary of solutions initially considered as safe¹³. Thus, the *AMW* balanced algorithm and decompression distribution calculated according to the depth equivalent to the *air table 3 MW* should, when it comes to short times, be corrected according to the decompression table generated by Deco Planner 3.1.4, for the permissible initial and final gradient at the level of $\delta = 75\%$, by a one-minute stay at *6 mH₂O*¹⁴.

The following guidelines have been proposed as initial principles of creating decompression tables:

1. there are only two decompression stations, at the depths *6 mH₂O* and *3 mH₂O*.
2. it is possible to undergo the whole required decompression process at the station *6 mH₂O*.
3. maximum gradient according to *ZHL₁₂* will be shaped depending on the results of the experiments where the diver will be given more exercise (simulated swimming with fins).
4. oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_v$.

¹⁰ another methodology for calculating tables was used due to the fact that Deco Planner 3.1.4 does not allow the analysis of the profiles considered by it as posing a *DCS* risk, and such were the ones proposed by the French Navy decompression tables

¹¹ it was assumed here that the gradient which is at 75% of the maximum value is not conservative (0%) , while at 30% of the maximum value, it is conservative (100%); gradients greater than $\delta = 75\%$ of maximum value will be initially considered as posing potential *DCS* risk, unless the studies will suggest otherwise

¹² *VPM* methodology suggested by Deco Planner 3.1.4. was not used to generate tables, since it is even more conservative

¹³ with small *DCS* risk

¹⁴ due to the fact that the time of reaching *table 3 MW* is calculated according to a different methodology, using this additional station is consistent with the introduction of "deep stops"

BEZPIECZEŃSTWO DEKOMPRESJI

Całą dekompresję należy przeprowadzić w wodzie. Po zakończonej dekompresji nurek powinien być monitorowany co *0,5 godz*, przez okres *3 godz*¹⁶ przy pomocy urządzenia do detekcji śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej (Kłós R., 2010). Monitorować należy prawą i lewą żyłę podobojczykową oraz prawy przedsionek serca. Przekroczenie wartości grad *II +* dla regionu przedsińkowego lub grad *II* dla żył podobojczykowych powinno być przesłanką do rozpoczęcia przeprowadzenia procedury leczniczej, np. według tabeli *TT 5 USN*. Z kolei wystąpienie objawów skórnych *DCS* powinno być przesłanką do natychmiastowego przeprowadzenia procedury leczniczej według tabeli *TT 6 USN* z ewentualnym jej przedłużeniem lub przejściem do procedury według tabeli *TT 6A USN* (US Navy diving manual, 2008). Wszelkie objawy bólowe lub kliniczne typowe dla cięższych postaci *DCS*¹⁷ powinny być przesłanką do natychmiastowego rozpoczęcia leczenia według tabeli *TT 6A USN*. Wszelkie decyzje w zakresie podjęcia leczenia przy wystąpieniu objawów chorobowych powinny być podejmowane przez lekarza służby nurkowej *DMO*¹⁸, który powinien przejąć kierowanie leczeniem.

Dopuszcza się prowokowanie skórnych objawów choroby dekompresyjnej, poprzez *5 min* gorący prysznic zaraz po zakończeniu dekompresji. Nurek może wziąć prysznic jedynie przy asyście i za wiedzą *DMO*.

Minimalny czas odpoczynku po zakończonej dekompresji wynosi *24 godz*. Nurkowania powtarzalne w tym cyklu są zakazane. Nurkowie eksperymentalni nie powinni być ekspozycyjni hiperbarycznie częściej niż 3 razy podczas sześciodniowego tygodnia pracy¹⁹. Dotyczy to nie tylko uczestniczenia w badaniach, lecz także w treningach.

OGÓLNE WYTYCZNE DO EKSPERYMENTÓW

Kontrola zgodności założeń dekompresyjnych z aktualnie prowadzoną dekompresją opiera się na kontrolowaniu składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka. Podczas całego nurkowania należy starać się utrzymać zawartość tlenu we wdychanym przez nurka nitroksie C_{O_2} na poziomie $C_{O_2} \geq 30\%_{v} O_2/N_2$. Jeśli warunki te nie zostaną zachowane podczas pobytu na głębokości $H = 30 \text{ mH}_2\text{O}$ należy zaprzestać wysiłku. Jeśli nie nastąpi w ciągu $\tau = 60 \text{ s}$ wzrost zawartości tlenu powyżej $C_{O_2} \geq 30\%_{v} O_2/N_2$ należy zaprzestać oddychania z aparatu nurkowego i przeprowadzić awaryjną dekompresję zgodnie z *Tabelą 3 MW*²⁰ (Praca zbiorowa, 1982).

¹⁶chyba, że nadzorujący lekarz uzna inaczej, lecz minimalny czas obserwacji nie może być krótszy niż *1,5 h*

¹⁷szczególnie neurologiczne

¹⁸diving medical officer

¹⁹ze względu na możliwość zafałszowywania wyników poprzez nadmierne ich obciążenie lub nadmierne przystosowanie się do warunków prowadzenia nurkowań eksperymentalnych

²⁰należy wybrać profil dla głębokości *30 mH₂O* i stosownego czasu pobytu tak, jakby całe nurkowanie odbywało się przy wykorzystaniu powietrza, jako czynnika oddechowego

DECOMPRESSION SAFETY

The whole decompression process should be performed in water. After decompression, the diver should be monitored every **30 min** for a period of **3 hours**¹⁵, using a device for detecting intravascular bubble formation (Kłos R., 2010). The right and left subclavian vein and right atrium of the heart should be monitored. Exceeding the values of grad **II +** for the vestibular region or grad **II** for the subclavian vein should constitute a reason to begin carrying out medical procedures, for example, according to the **TT 5 USN** table. The symptoms of skin **DCS** should be a reason for an immediate conduct of therapeutic procedures according to the **TT 6 USN** table with its possible extension or moving to the procedure described in the **TT 6A USN** table (US Navy diving manual, 2008). Any pain or clinical symptoms typical of more severe forms of¹⁶ should be a reason for an immediate treatment according to the **TT 6A USN** table. Any decisions concerning medical treatment in case of any symptoms of disease should be undertaken by a **DMO**¹⁷, who should take control over the treatment.

Triggering skin symptoms of **DCS** by a **5 min** hot shower immediately after decompression is allowed. The diver can take a shower only with the assistance and knowledge of a **DMO**.

Minimum rest time after decompression is **24 hours**. Repetitive dives in this cycle are prohibited. Experimental divers should not be exposed to hyperbaric conditions more than 3 times during a six-day work week¹⁸. This applies not only to participating in the research, but also in trainings.

GENERAL GUIDELINES FOR EXPERIMENTS

Verification of the compliance between the decompression assumptions and the decompression being carried out is based on controlling the composition of the breathing mixture inhaled by the diver. During the dive, it is advisable to try to keep oxygen content in nitrox inhaled by the diver C_{O_2} at the level $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$. If these conditions are not maintained during a dive at the depth $H = 30 \text{ mH}_2\text{O}$, the dive should be stopped. If there is no increase in oxygen content above $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$ in time $\tau = 60 \text{ s}$, the diver should stop using the breathing apparatus and emergency decompression should be performed according to **Table 3 MW**¹⁹ (Praca zbiorowa, 1982). A similar procedure should be applied if oxygen content falls below $C_{O_2} > 30\%_v O_2/N_2$ during decompression (and such decompression should be considered as already carried out).

¹⁵ unless the supervising doctor says otherwise, but the minimum observation time should be not less than 1.5 h

¹⁶ particularly the neurological ones

¹⁷ diving medical officer

¹⁸ due to the possibility of result distortion as a consequence of excessive workload or adaptation to the conditions of experimental dives

¹⁹ the profile at the depth of **30 mH₂O** and the appropriate time of stay should be selected as if air was used as breathing mixture during the whole dive

Podobnie należy postąpić, jeśli zawartość tlenu spadnie poniżej $C_{O_2} > 30\%_{v} O_2/N_2$ podczas dekompresji, przy czym należy zaliczyć odbytą już dekompresję.

Jeśli podczas dekompresji²¹, po przejściu na pierwszą stację dekompresyjną, nastąpi spadek zawartości tlenu poniżej wartości $C_{O_2} \geq 30\%_{v} O_2/N_2$, to w ciągu $\tau = 30 s$ należy przejść awaryjnie na oddychanie powietrzem i przeprowadzić dekompresję zgodnie z *Tabelą 3 MW*²² dla głębokości $30 mH_2O$, wybierając profil tak, jakby całe nurkowanie odbywało się przy wykorzystaniu, jako czynnika oddechowego powietrza (Praca zbiorowa, 1982). Jeśli odbyto wymaganą dekompresję nitroksową na stacji $6 mH_2O$ zalicza się ją w całości. Jeśli czas pobytu na dowolnej stacji nie został całkowicie odczekany, to musi być on dokończony w takiej wartości, ile wynosi różnica pomiędzy postojem na stacji przy dekompresji powietrznej i nitroksowej.

Założenie 0% konserwatyzmu podczas dekompresji według *AMW* powinno służyć ustaleniu bezpiecznego maksymalnego, dozwolonego obciążenia pracą podczas pobytu na głębokości $H = 30 mH_2O$. Jednak nie należy przekraczać poziomu obciążenia W liczonego na masę ciała powyżej wartości $W \leq 1 W \cdot kg^{-1}$. Podczas dojścia do pierwszej stacji dekompresyjnej i pobytu na stacjach dekompresyjnych obciążenie powinno być minimalne. Dekompresja powinna być prowadzona w wodzie.

PRZYKŁADOWA BUDOWA TABEL

Tab.3 przedstawia wygenerowaną przykładową tabelę dekompresji, jaka podlegała testom. Jest ona podzielona na tabelę podstawową i procedury awaryjne²³. W **tab.4** pokazano porównawcze wyliczenia przy wykorzystaniu programu Deco Planner 3.1.4.

²¹przy oddychaniu z aparatu nurkowego

²²preferowane jest zastosowanie dekompresji tlenowej

²³jeżeli procedury awaryjne były możliwe do wygenerowania w trakcie teoretycznych obliczeń dla poszczególnych bloków reprezentujących różne założenia dekompresyjne

If during the decompression process²⁰, after reaching the first decompression station, there is a decrease in oxygen content below the value of $C_{O_2} \geq 30\%_{v} O_2/N_2$, the following operations should be performed within $\tau = 30 s$: the diver should start breathing air, decompression should be carried out in accordance with *Table 3 MW* for the depth of $30 mH_2O$, and the profile should be selected as if air was used as the breathing mixture during the whole dive (Praca zbiorowa, 1982). If a required nitrox decompression at the station at $6 mH_2O$ was conducted, it is recognised completely. If waiting time at any station was not full, it must be complemented with the difference between waiting time at the station with air and nitrox decompression.

Assuming 0% of conservatism during decompression by *AMW* should serve safely to determine the maximum allowable workload while staying at the depth of $H = 30 mH_2O$. However, the load W calculated on the basis of body weight should not be exceeded above $W \leq 1 W \cdot kg^{-1}$. During the time spent on reaching the first decompression station and the stay on both stations, the workload should be minimal. Decompression should be conducted in water.

SAMPLE TABLE CONSTRUCTION

Table 3 shows a sample generated decompression table, which was subject to tests. It is divided into a basic table and emergency procedures²¹.

Table 4 shows comparative calculations generated using Deco Planner 3.1.

²⁰ while using the breathing apparatus

²¹ if it was possible to generate any emergency procedures in the course of theoretical calculations for individual blocks representing different decompression assumptions

Tabela 3.

Poprawiona tabela dekompresji zrównoważonej AMW dla $\delta \approx 75\%$.

Głębokość	Czas na dnie	Szybkość wynurzenia do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [mH ₂ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]		
			6	3	6	3	0
[mH ₂ O]	[min]	[min]	Czas na stacji [min]		[%]		
Tabela podstawowa							
30	5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	1	–	21	25	38
	10		1	–	36	36	50
	15		1	–	40	45	67
	20		1	2	42	56	72
	25		1	4	49	66	73
	30		1	8	55	75	71
	35		2	15	61	75	69
	40		3	21	66	75	67
	45		5	28	69	74	66
<i>Procedury awaryjnego przedłużenia pobytu na głębokości 30 mH₂O</i>							
30	50	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	7	36	72	74	63
	55		10	40	74	75	62
	60		13	43	76	75	62
<i>Procedury awaryjnej dekompresji na stacji 6 mH₂O</i>							
30	5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	1	–	21	25	38
	10		1	–	36	36	50
	15		1	–	40	45	67
	20		3	–	42	48	74
	25		5	–	49	50	76
	30		9	–	55	45	75
	35		17	–	61	36	76
	40		24	–	66	34	76
	45		33	–	69	31	76
	50		43	–	72	26	76
	55		50	–	74	26	76
60	56	–	76	26	76		
Przejście pomiędzy stacją 6 i 3 mH ₂ O oraz 3 mH ₂ O i powierzchnią wynosi 30 s							

Table 3.

Improved AMW balanced decompression table for $\delta \geq 75\%$.

Depth	Time spent at the bottom	Speed of ascending to the first station	Decompression stations [mH ₂ O]		Gradient according to AMW at stations [mH ₂ O]		
			6	3	6	3	0
[mH ₂ O]	[min]	[min]	Time spent at the station [min]		[%]		
Basic table							
30	5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	1	–	21	25	38
	10		1	–	36	36	50
	15		1	–	40	45	67
	20		1	2	42	56	72
	25		1	4	49	66	73
	30		1	8	55	75	71
	35		2	15	61	75	69
	40		3	21	66	75	67
	45		5	28	69	74	66
<i>Emergency procedures for prolonging the stay at the depth of 30 mH₂O</i>							
30	50	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	7	36	72	74	63
	55		10	40	74	75	62
	60		13	43	76	75	62
<i>Emergency decompression procedures at the station at the depth of 6 mH₂O</i>							
30	5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	1	–	21	25	38
	10		1	–	36	36	50
	15		1	–	40	45	67
	20		3	–	42	48	74
	25		5	–	49	50	76
	30		9	–	55	45	75
	35		17	–	61	36	76
	40		24	–	66	34	76
	45		33	–	69	31	76
	50		43	–	72	26	76
	55		50	–	74	26	76
60	56	–	76	26	76		
Transfer time between stations 6 and 3 mH ₂ O and station 3 mH ₂ O and the surface is 30 s							

Tabela 4.

Tabela dekompresji według Deco Planner 3.1.4. dla wartości GF Lo%=75 i GF Hi%=75 oraz wymuszeniem zakończenia dekompresji na stacji 6 mH₂O.

Mission: 1 Dive: 1 File: E:\\$\$ Prace\AKTUALNE\TULIPAN-Nautiner_OTM-5_09\8_Oprac...

Depth Plan (Meters)						Deco			Gas Plan							
Depth	Time	O ₂	He	PP0 ₂	Ceil	Depth	O ₂	He	Size	Fill	O ₂	He	MOD	Res	Litres	BAR
30	90	30	0	1,20	9				24,0	232	30	0	36,67	0	0226	426

Bühlmann VPM

Dive Plan: ZHL16B Safety: OFF Descent: Normal

Depth	Time	O ₂	He	Start	End	PP0 ₂	SCR	Gas Reqd	GF%	MVal%	CNS%	OTU
30	90	30	0	1	90	1,20	20,00	7312	0	17	42	116,32
9	6	30	0	91	97	0,57	20,00	220	75	84	43	118,44
6	84	30	0	97	181	0,48	20,00	2694	75	91	43	118,45
0					182				75	91	43	118,45

Dive Time: 182 mins Deco Time: 91 Max Stop Depth: 15 GF Lo%: 75 GF Hi%: 75

Plan Dive No Deco Gas Range Plan Graphs Analyse Next Dive

Range Deco Plan - Mission: 1 Dive: 1 File: E:\\$\$ Prace\AKTUALNE\TULI...

Time	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	Total	CNS	OTU'
5													2	6,48
10													5	13,00
15													7	19,53
20										2,4		2,4	9	26,05
25										5,4		5,4	12	32,58
30										9,4		9,4	14	39,11
35										13,4		13,4	16	45,63
40										19,4		19,4	19	52,16
45										26,4		26,4	21	58,68
50										31,4		31,4	23	65,21
55										39,4		39,4	26	71,73
60										46,4		46,4	28	78,26
65								1,6	51			52	31	85,08
70								1,6	58			59	33	91,61
75								2,6	66			68	36	98,32
80								3,6	72			75	38	105,03
85								4,6	78			82	40	111,74
90								5,6	84			89	43	118,45

Print Close

Table 4.

Decompression table by Deco Planner 3.1.4. for GF Lo% = 75 and GF Hi% = 75 and forcing the end of decompression at the station at the depth of 6 mH₂O.

Mission: 1 Dive: 1 File: E:\\$\\$ Prace\AKTUALNE\TULIPAN-Nautiner_OTM-5_09\8_Oprac...

Depth Plan (Meters)						Deco			Gas Plan							
Depth	Time	O2	He	PP02	Ceill	Depth	O2	He	Size	Fill	O2	He	MOD	Res	Litres	BAR
30	90	30	0	1.20	9				24.0	232	30	0	36.67	0	0226	426

Bühlmann VPM

Dive Plan: ZHL16B Safety: OFF Descent: Normal

Depth	Time	O2	He	Start	End	PP02	SCR	Gas Reqd	GF%	MVal%	CNS%	OTU
30	90	30	0	1	90	1.20	20.00	7312	0	17	42	116.32
9	6	30	0	91	97	0.57	20.00	220	75	84	43	118.44
6	84	30	0	97	181	0.48	20.00	2694	75	91	43	118.45
0					182				75	91	43	118.45

Dive Time: 182 mins Deco Time: 91 Max Stop Depth: 15 GF Lo%: 75 GF Hi%: 75

Plan Dive No Deco Gas Range Plan Graphs Analyse Next Dive

Range Deco Plan - Mission: 1 Dive: 1 File: E:\\$\\$ Prace\AKTUALNE\TULI...

Time	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	Total	CNS	OTU'
5													2	6.48
10													5	13.00
15													7	19.53
20										2.4		2.4	9	26.05
25										5.4		5.4	12	32.58
30										9.4		9.4	14	39.11
35										13.4		13.4	16	45.63
40										19.4		19.4	19	52.16
45										26.4		26.4	21	58.68
50										31.4		31.4	23	65.21
55										39.4		39.4	26	71.73
60										46.4		46.4	28	78.26
65									1.6	51		52	31	85.08
70									1.6	58		59	33	91.61
75									2.6	66		68	36	98.32
80									3.6	72		75	38	105.03
85									4.6	78		82	40	111.74
90									5.6	84		89	43	118.45

Print Close

BLOKI AMWA-D

Wygenerowanie bloków *AMWa-d* dało możliwość przechodzenia od profili dekompresji o minimalnym zagrożeniu *DCS* w kierunku zwiększającego się zagrożenia.

Po badaniach wstępnych systemu oddechowego aparatu nurkowego CRABE zaplanowano podjęcie dalszych eksperymentów celem jakościowej oceny zagrożenia *DC* powiązanego z nim systemu dekompresji zaproponowanego przez producenta.

BLOK AMWA

Jako wstępne założenia dekompresyjne przyjęto następujące wytyczne:

- występują jedynie stacje dekompresyjne na głębokościach $6\text{ mH}_2\text{O}$ i $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- możliwe jest odbycie całej wymaganej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- maksymalny gradient według ZHL_{12} nie będzie większy niż ok. $\delta = 75\%$,
- zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i na stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{\text{O}_2} \geq 30\%_{\text{obj.}}$.

Ze względu na spodziewane małe zagrożenie *DCS*, w tej fazie badań nurek zabezpieczający przez cały czas ekspozycji oddychał z półmasksi nitroksen o zawartości tlenu x_{O_2} nie mniejszej niż $x_{\text{O}_2} \geq 30\%_{\text{obj.}}$. W ten sposób testowana była ta sama procedura dekompresyjna z tą różnicą, że poddawani jej nurkowie mieli różne obciążenie pracą²⁴. Należało jednak w tym przypadku zwrócić uwagę na większe zagrożenie ośrodkową toksycznością tlenową dla nurka zabezpieczającego niż roboczego.

Zbiorną tabelę profili przewidzianych w tym bloku, zgodnym z wymienionymi wyżej wytycznymi dla procedury awaryjnej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$ podano w **tab.4.11**.

W **tab.4.12** zebrano wszystkie profile wchodzące w skład bloku dekompresji o kryptonimie *AMWa*. Wygenerowane wszystkie profile wchodzące w skład bloku dekompresji o kryptonimie *AMWa* dla procedury podstawowej i awaryjnej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$ podano w **tab.5**.

²⁴teoretycznie nurek roboczy był eksponowany na większe zagrożenie *DCS*

AMWA-D PROGRAMS

Generating *AMWa-d* units created an opportunity to go from decompression profiles with minimal *DCS* risk towards the ones with increasing risk.

After preliminary studies of the breathing system of the CRABE diving apparatus, we planned to conduct further experiments to estimate *DCS* risk and make a qualitative assessment of the decompression system proposed by the manufacturer.

AMWA UNIT

The following guidelines have been adopted as preliminary decompression assumptions:

- there are only two decompression stations, at the depths of $6\text{ mH}_2\text{O}$ and $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- it is possible to undergo the whole required decompression process at the station $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- maximum gradient according to *ZHL₁₂* will not be greater than about $\delta = 75\%$,
- oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{\text{O}_2} \geq 30\%_{\text{vol}}$.

Due to the expected low risk of *DCS*, in this phase of research, the safety diver was breathing nitrox with oxygen content x_{O_2} not less than $x_{\text{O}_2} \geq 30\%_{\text{vol}}$ from a half mask during the time of exposure. In this way, the same decompression procedure was tested, the only difference being that the divers were subjected to different workload²³. However, in this case it was necessary to draw attention to the risk of central oxygen toxicity that could affect the safety diver more than the working one.

Table 4.11 shows a summary of profiles in this program, consistent with the above guidelines for emergency decompression procedures at the station at the depth of $6\text{ mH}_2\text{O}$. **Table 4.12** presents all the profiles included in the program code-named *AMWa*.

Table 5 shows all the profiles included in the decompression program code-named *AMWa*, for primary and emergency decompression procedures at the station at the depth of $6\text{ mH}_2\text{O}$.

²³ theoretically, the regular diver was exposed to a greater risk of *DCS*

Tabela 5.

Tabela dekompresji eksperymentalnej dla bloku AMW_a i nitroksu 40%_v O₂/N₂.

Głębokość [mH ₂ O]		30					33					36					
Czas na dnie	Szybkość wynurzenia do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [mH ₂ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]			Stacje dekompresyjne [mH ₂ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]			Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]			
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	
[min]	[min]	Czas na stacji [min]		[%]			Czas na stacji [min]		[%]			Czas na stacji [min]		[%]			
Tabela podstawowa																	
5	15 – 17m · min ⁻¹	1	–	21	25	28	1	–	27	29	42	1	–	32	33	46	
10		1	–	36	36	50	1	–	43	42	55	1	–	50	47	62	
15		1	–	40	45	67	1	1	47	53	71	1	2	55	60	74	
20		1	2	42	56	72	1	4	51	65	72	1	6	60	75	69	
25		1	4	49	66	73	2	8	59	72	67	4	8	69	71	70	
30		1	8	55	75	71	4	12	67	71	70	–	–	–	–	–	
<i>Procedury awaryjnego przedłużenia pobytu na głębokości</i>																	
35		2	15	61	75	69	5	20	74	73	67	–	–	–	–	–	
40		3	21	66	75	67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
45		5	28	69	75	66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
<i>Procedury awaryjnej dekompresji na stacji 6 mH₂O</i>																	
5	1	–	21	25	38	1	–	27	29	42	1	–	32	33	46		
10	1	–	36	36	50	1	–	43	42	55	1	–	50	47	62		
15	1	–	40	45	67	2	–	47	48	71	3	–	55	50	76		
20	3	–	42	48	74	5	–	51	48	75	7	–	60	49	75		
25	5	–	49	50	76	10	–	59	42	72	12	–	69	45	76		

Table 5.

Experimental decompression table for unit AMW_{α} and nitrox 40% v_{O_2}/N_2 .

Depth [mH ₂ O]		30					33					36				
Time at the bottom	Speed of ascending to the first station	Decompression stations [mH ₂ O]		Gradient according to AMW at stations [mH ₂ O]			Decompression stations [mH ₂ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH ₂ O]			Decompression stations [mH ₂ O]		Gradient according to AMW at stations [mH ₂ O]		
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	6	3	6	3	0
		Time spent at the station		[%]			Time spent at the station		[%]			Time spent at the station		[%]		
[min]	[min]	[min]					[min]					[min]				
Basic table																
5	15 – 17m · min ⁻¹	1	–	21	25	28	1	–	27	29	42	1	–	32	33	46
10		1	–	36	36	50	1	–	43	42	55	1	–	50	47	62
15		1	–	40	45	67	1	1	47	53	71	1	2	55	60	74
20		1	2	42	56	72	1	4	51	65	72	1	6	60	75	69
25		1	4	49	66	73	2	8	59	72	67	4	8	69	71	70
30		1	8	55	75	71	4	12	67	71	70	–	–	–	–	–
<i>Emergency procedures for prolonging the stay under water</i>																
35		2	15	61	75	69	5	20	74	73	67	–	–	–	–	–
40		3	21	66	75	67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
45		5	28	69	75	66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Emergency decompression procedures at the 6 mH₂O station</i>																
5	1	–	21	25	38	1	–	27	29	42	1	–	32	33	46	
10	1	–	36	36	50	1	–	43	42	55	1	–	50	47	62	
15	1	–	40	45	67	2	–	47	48	71	3	–	55	50	76	
20	3	–	42	48	74	5	–	51	48	75	7	–	60	49	75	
25	5	–	49	50	76	10	–	59	42	72	12	–	69	45	76	
30	9	–	55	45	75	16	–	67	38	76	–	–	–	–	–	

Tabela 5 cd.

30		9	–	55	45	75	16	–	67	38	76	–	–	–	–	–
35		17	–	61	36	76	25	–	74	34	76	–	–	–	–	–
40		24	–	66	34	76	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
45		33	–	69	31	76	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Tabela 5 cd.

Tabela dekompresji eksperymentalnej dla bloku AMW α i nitroksu 40% $_v$ O $_2$ /N $_2$.

Głębokość [mH $_2$ O]		39					42					45				
Czas na dnie	Szybkość wynurzania do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [mH $_2$ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH $_2$ O]			Stacje dekompresyjne [mH $_2$ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH $_2$ O]			Gradient wg AMW na stacjach [mH $_2$ O]		Gradient wg AMW na stacjach [mH $_2$ O]		
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	6	3	6	3	0
[min]	[min]	Czas na stacji [min]		[%]			Czas na stacji [min]		[%]			Czas na stacji [min]		[%]		
		Tabela podstawowa														
5	15 – 17m · min $^{-1}$	1	–	37	37	51	1	–	43	41	55	1	–	48	45	59
10		1	–	56	52	68	1	1	63	58	68	1	2	70	63	70
15		1	4	62	68	72	2	5	69	69	70	3	6	76	72	68
20		3	7	69	74	70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		<i>Procedury awaryjnego przedłużenia pobytu na głębokości</i>														
25		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
30		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		<i>Procedury awaryjnej dekompresji na stacji 6 mH$_2$O</i>														

Table 5cont

35		17	–	61	36	76	25	–	74	34	76	–	–	–	–	–
40		24	–	66	34	76	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
45		33	–	69	31	76	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Transfer time between stations 6 and 3 mH_2O and station 3 mH_2O and the surface is 30 s																
<ul style="list-style-type: none"> – maximum gradient according to ZHL_{12} will not be greater than about $\delta = 75\%$ – oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_{vol}$ 																

Experimental decompression table for unit AMW_a and nitrox $40\%_v O_2/N_2$.

Table 5cont

Depth [mH_2O]		39					42					45					
Time at the bottom	Speed of ascending to the first station	Decompression stations [mH_2O]		Gradient according to AMW at stations [mH_2O]			Decompression stations [mH_2O]		Gradient according to AMW at stations [mH_2O]			Decompression stations [mH_2O]		Gradient according to AMW at stations [mH_2O]			
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	6	3	6	3	0	
[min]	[min]	Time spent at the station		[%]			Time spent at the station		[%]			Time spent at the station		[%]			
[min]	[min]	[min]		[min]			[min]		[min]			[min]		[min]			
Basic table																	
5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	1	–	37	37	51	1	–	43	41	55	1	–	48	45	59	
10		1	–	56	52	68	1	1	63	58	68	1	2	70	63	70	
15		1	4	62	68	72	2	5	69	69	70	3	6	76	72	68	
20		3	7	69	74	70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Emergency procedures for prolonging the stay under water</i>																	
25		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
30		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
<i>Emergency decompression procedures at the 6 mH_2O station</i>																	

Tabela 5 cd.

5		1	–				1	–	43	41	55	1	–	48	45	59
10		1	–				2	–	63	49	69	3	–	70	49	71
15		5	–				7	–	69	49	74	9	–	76	47	73
20		10	–				–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Przejście pomiędzy stacją 6 i 3 mH_2O oraz 3 mH_2O i powierzchnią wynosi 30 s																
– maksymalny gradient według ZHL_{12} nie będzie większy niż ok.75%																
– zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i na stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{O_2} \geq 30\%_{obj}$.																

Table 5cont.

5		1	–				1	–	43	41	55	1	–	48	45	59
10		1	–				2	–	63	49	69	3	–	70	49	71
15		5	–				7	–	69	49	74	9	–	76	47	73
20		10	–				–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Transfer time between stations 6 and 3 mH_2O and station 3 mH_2O and the surface is 30 s																
<ul style="list-style-type: none"> – maximum gradient according to ZHL_{12} will not be greater than about $\delta = 75\%$ – oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_{vol}$ 																

BLOK AMWB

Jako wstępne założenia dekompresyjne przyjęto następujące wytyczne:

- występują jedynie stacje dekompresyjne na głębokościach $6\text{ mH}_2\text{O}$ i $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- możliwe jest odbycie całej wymaganej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- Maksymalny gradient według ZHL_{12} dla tkanki 1 nie będzie większy niż ok. $\delta = 100\%$, dla tkanek 2–3 na stacji dekompresyjnej $6\text{ mH}_2\text{O}$ nie będzie większy niż ok. $\delta = 90\%$, na powierzchni dla tkanek 12–16 nie będzie większy niż ok. $\delta = 90\%$, dla pozostałych sytuacji nie będzie większy niż ok. $\delta = 80\%$,
- zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i na stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{O_2} \geq 30\%_{obj.}$.

Wygenerowane wszystkie profile wchodzące w skład bloku dekompresji o kryptonimie $AMWb$ dla procedury podstawowej i awaryjnej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$ jak i dla innych bloków nie będą tutaj przytaczane, gdyż zostały opublikowane wcześniej (Kłós R., 2011).

BLOK AMWc

Jako wstępne założenia dekompresyjne przyjęto następujące wytyczne:

- występują jedynie stacje dekompresyjne na głębokościach $6\text{ mH}_2\text{O}$ i $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- możliwe jest odbycie całej wymaganej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- Maksymalny gradient według ZHL_{16B} dla tkanki 1 nie będzie większy niż ok. $\delta = 100\%$, dla wszystkich tkanek na stacjach dekompresyjnych 3 i $6\text{ mH}_2\text{O}$ nie będzie większy niż ok. 75% , na powierzchni dla tkanek 12–16 nie będzie większy niż ok. $\delta = 100\%$, dla pozostałych sytuacji będzie poniżej wartości $\delta = 90\%$,
- Zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i na stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{O_2} \geq 30\%_{obj.}$.

BLOK AMWd

Jako wstępne założenia dekompresyjne przyjęto następujące wytyczne:

- występują jedynie stacje dekompresyjne na głębokościach $6\text{ mH}_2\text{O}$ i $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- możliwe jest odbycie całej wymaganej dekompresji na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- Maksymalny gradient według ZHL_{16B} dla tkanki 1 nie będzie większy niż ok. $\delta = 100\%$, na stacjach dekompresyjnych 3 i $6\text{ mH}_2\text{O}$ nie będzie większy niż ok. $\delta = 80\%$, na powierzchni dla tkanek 12–16 nie będzie większy niż ok. $\delta = 100\%$, dla pozostałych sytuacji będzie poniżej wartości $\delta = 90\%$,
- Zawartość tlenu x_{O_2} na głębokości pracy i na stacjach dekompresyjnych nie może być mniejsza niż $x_{O_2} \geq 30\%_{obj.}$.

AMWB PROGRAM

The following guidelines have been adopted as preliminary decompression assumptions:

- there are only two decompression stations, at the depths of $6\text{ mH}_2\text{O}$ and $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- it is possible to undergo the whole required decompression process at the station at the depth of $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- maximum gradient according to ZHL_{12} for tissue 1 will not be greater than about $\delta = 100\%$, for tissues 2 and 3 at the $6\text{ mH}_2\text{O}$ decompression station not greater than about $\delta = 90\%$, on the surface for tissues 12-16 it will not be greater than about $\delta = 90\%$, and in all the other cases it will not be greater than about $\delta = 80\%$
- oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_{vol}$.

All the profiles included in the decompression program code-named *AMWb*, for primary and emergency decompression procedures at the $6\text{ mH}_2\text{O}$ station, as well as for all the other units, will not be quoted here, as they have been already published (Kłos R., 2011).

AMWC PROGRAM

The following guidelines have been adopted as preliminary decompression assumptions:

- there are only two decompression stations, at the depths of $6\text{ mH}_2\text{O}$ and $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- it is possible to undergo the whole required decompression process at the station $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- maximum gradient according to $ZHL\ 16B$ for tissue 1 will not be greater than about $\delta = 100\%$, for all the tissues at 3 and $6\text{ mH}_2\text{O}$ decompression stations it will not be greater than about 75% , on the surface for tissues 12-16 it will not be greater than $\delta = 100\%$, and in all the other cases it will be less than $\delta = 90\%$,
- oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_{vol}$.

AMWD PROGRAM

The following guidelines have been adopted as preliminary decompression assumptions:

- there are only two decompression stations, at the depths of $6\text{ mH}_2\text{O}$ and $3\text{ mH}_2\text{O}$,
- it is possible to undergo the whole required decompression process at the station at the depth of $6\text{ mH}_2\text{O}$,
- maximum gradient according to $ZHL\ 16B$ for tissue 1 will not be greater than about $\delta = 100\%$, at 3 and $6\text{ mH}_2\text{O}$ decompression stations it will not be greater than about $\delta = 80\%$, on the surface for tissues 12-16 it will not be greater than $\delta = 100\%$, and in all the other cases it will be less than $\delta = 90\%$,
- oxygen content x_{O_2} at the depth of work and decompression stations may not be less than $x_{O_2} \geq 30\%_{vol}$

Tabela 6.

Analiza podejścia do tabel dekompresji przez *French Navy*.

Głębokość [mH_2O]		40							40								
Czas na dnie	Szybkość wynurzenia do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [mH_2O]		Gradient i nr wiodącej tkanki teoretycznej wg AMW na stacjach [mH_2O]					Stacje dekompresyjne [mH_2O]		Gradient i nr wiodącej tkanki teoretycznej wg AMW na stacjach [mH_2O]						
		6	3	6	3	0			6	3	6	3	0				
[min]	[min]	Czas na stacji [min]		[%]					Czas na stacji [min]		[%]						
Tabela podstawowa																	
5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	-	-	15	1	28	1	41	1	-	-	14	1	27	1	44	1
10		-	-	35	1	48	1	62	1	-	-	32	1	48	1a	69	1a
15		-	-	44	1	58	2	78	2	-	-	42	1a	61	2	87	2
20		-	-	51	2	69	2	95	3	-	-	51	2	73	2	100	2
25		-	1	58	2	81	3	101	3	-	1	58	2	81	2	106	3
30		-	4	65	3	90	3	96	4	-	4	63	3	90	3	102	4
<i>Procedury awaryjnego przedłużenia pobytu na głębokości</i>																	
35		-	8	72	3	98	3	90	6	-	8	69	3	97	3	95	4
40		-	13	77	4	103	3	90	6	-	13	74	3	104	4	93	6
45		-	17	81	3	107	4	91	6	-	17	79	4	111	4	95	6
Przejście pomiędzy stacją 6 i 3 mH_2O oraz 3 mH_2O i powierzchnią wynosi 30 s																	
System o otwartym obiegu czynnika oddechowego $x_{O_2} = 40\%_{obj}$ Nie można odstąpić czasów ze stacji 3 mH_2O na stacji 6 mH_2O		Zestaw tkanek według <i>ZHL₁₂</i>							Zestaw tkanek według <i>ZHL 16B</i>								

Table 6.

Analysis of the *French Navy's* approach to decompression tables.

Depth [mH_2O]		40							40								
Time at the bottom	Speed of ascending to the first station	Decompression stations [mH_2O]		Gradient and number of the leading theoretical tissue according to AMW at stations [mH_2O]					Decompression stations [mH_2O]		Gradient and number of the leading theoretical tissue according to AMW at stations [mH_2O]						
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	0						
[min]	[min]	Time spent at the station		[%]					Time spent at the station		[%]						
[min]	[min]	[min]						[min]									
Basic table																	
5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	-	-	15	1	28	1	41	1	-	-	14	1	27	1	44	1
10		-	-	35	1	48	1	62	1	-	-	32	1	48	1a	69	1a
15		-	-	44	1	58	2	78	2	-	-	42	1a	61	2	87	2
20		-	-	51	2	69	2	95	3	-	-	51	2	73	2	100	2
25		-	1	58	2	81	3	101	3	-	1	58	2	81	2	106	3
30		-	4	65	3	90	3	96	4	-	4	63	3	90	3	102	4
<i>Emergency procedures for prolonging the stay under water</i>																	
35		-	8	72	3	98	3	90	6	-	8	69	3	97	3	95	4
40		-	13	77	4	103	3	90	6	-	13	74	3	104	4	93	6
45		-	17	81	3	107	4	91	6	-	17	79	4	111	4	95	6
Transfer time between stations 6 and 3 mH_2O and station 3 mH_2O and the surface is 30 s																	
Open-circuit system $x_{O_2} = 40\%_{obj}$. Times from 3 mH_2O station cannot be made up for at 6 mH_2O st.		Set of tissues according to <i>ZHL₁₂</i>							Set of tissues according to <i>ZHL 16B</i>								

Tabela 6cd.

Analiza podejścia do tabel dekompresji przez *French Navy*.

ZH - L₁₂																		
Tkanka teoretyczna			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
czas połowicznego odsycania	t (N ₂)	min	4	8	12, 5	18, 5	27	38, 3	54, 3	77	109	146	187	239	305	390	498	635
wartość a dla tkanki	a		2,2 00	1,5 00	1,0 80	0,9 00	0,7 50	0,5 80	0,4 70	0,4 55	0,4 55	0,4 55	0,4 55	0,3 80	0,2 55	0,2 55	0,2 55	0,2 55
wartość b dla tkanki	b		0,8 20	0,8 20	0,8 25	0,8 35	0,8 45	0,8 60	0,8 70	0,8 90	0,8 90	0,9 34	0,9 34	0,9 44	0,9 62	0,9 62	0,9 62	0,9 62
czas trwania ekspozycji	t	min	30															
początkowe ciśnienie zewnętrzne	p _o	ata	1,00															
końcowe ciśnienie zewnętrzne	p _c	ata	5,00															
ciśnienie cząstkowe nasyconej H ₂ O	p _{H₂O}	ata	0,063															
zawartość azotu	x	m ³ m ⁻³	0,6															
początkowe ciśnienie zewnętrzne azotu	p _o (N ₂)	ata	0,79															
końcowe ciśnienie zewnętrzne azotu	p _i (N ₂)	ata	2,96															
prężność azotu w tkance	p(N ₂ , t)	ata	2,9 5	2,8 0	2,5 5	2,2 6	1,9 6	1,7 0	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6
maksymalne przesylenie	p(max)	ata	0,6 15	1,0 67	1,2 13	1,1 33	1,0 2	0,9 63	0,8 8	0,7 56	0,6 34	0,5 82	0,5 26	0,5 58	0,6 52	0,6 23	0,6	0,5 82
głębokość I stacji	H	mH ₂ O	-	1	2	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 6cont.

Analysis of the *French Navy's* approach to decompression tables.

ZH - L₁₂																		
Theoretical tissue			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
time of half offgasing	t (N ₂)	min	4	8	12, 5	18, 5	27	38, 3	54, 3	77	109	146	187	239	305	390	498	635
value a for the tissue	a		2,2 00	1,5 00	1,0 80	0,9 00	0,7 50	0,5 80	0,4 70	0,4 55	0,4 55	0,4 55	0,4 55	0,3 80	0,2 55	0,2 55	0,2 55	0,2 55
value b for the tissue	b		0,8 20	0,8 20	0,8 25	0,8 35	0,8 45	0,8 60	0,8 70	0,8 90	0,8 90	0,9 34	0,9 34	0,9 44	0,9 62	0,9 62	0,9 62	0,9 62
exposure time	t	min	30															
initial external pressure	p _o	ata	1,00															
final external pressure	p _c	ata	5,00															
partial pressure of saturated H ₂ O	p _{H₂O}	ata	0,063															
nitrogen content	x	m ³ m ⁻³	0,6															
initial external pressure of nitrogen	p _o (N ₂)	ata	0,79															
final external pressure of nitrogen	p _i (N ₂)	ata	2,96															
partial pressure of nitrogen in the tissue	p(N ₂ , t)	ata	2,9 5	2,8 0	2,5 5	2,2 6	1,9 6	1,7 0	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6
maximum supersaturation	p(max)	ata	0,6 15	1,0 67	1,2 13	1,1 33	1,0 2	0,9 63	0,8 8	0,7 56	0,6 34	0,5 82	0,5 26	0,5 58	0,6 52	0,6 23	0,6 23	0,5 82
depth of station I	H	mH ₂ O	-	1	2	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 6cd.

zaokrąglona głębokość I stacji	H ^I	mH ₂ O	6																
szybkość przejści na I stację	t _i	m/min	17																
prężność azotu po dojściu do I stacji	p(t _i)	ata	2,8 6	2,7 6	2,5 3	2,2 4	1,9 5	1,6 9	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
gradient wartości M	M _%	%	49	63	65	53	33	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
czas postoju na I stacji	t ^I	min	0																
prężność azotu po I stacji	p(I)	ata	2,8 6	2,7 6	2,5 3	2,2 4	1,9 5	1,6 9	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
gradient wartości M	M _%	%	63	82	90	81	66	50	27	0	-	-	-	-	-	-	-	-	
głębokość II stacji	H ^{II}	mH ₂ O	3																
czas postoju na II stacji	t ^{II}	min	4																
prężność azotu po II stacji	p(II)	ata	1,8 7	2,2 1	2,2 0	2,0 5	1,8 4	1,6 4	1,4 5	1,2 9	1,1 6	1,0 7	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
gradient wartości M	M _%	%	36	70	93	96	90	86	72	50	27	14	3	-	-	-	-	-	
czas odpoczynku po nurkowaniu	t _s	min	1440																
prężność azotu po odpoczynku	p(s)	ata	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,8 0	0,8 0	0,8 0	0,8 0

Table 6cont.

depth of station I (rounded)	H ^I	mH ₂ O	6																
speed of transition to station I	t _t	m/min	17																
partial pressure of nitrogen after reaching station I	p(t _t)	ata	2,8 6	2,7 6	2,5 3	2,2 4	1,9 5	1,6 9	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
M value gradient	M _%	%	49	63	65	53	33	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
waiting time at station I	t ^I	min	0																
partial pressure of nitrogen after station I	p(I)	ata	2,8 6	2,7 6	2,5 3	2,2 4	1,9 5	1,6 9	1,4 8	1,3 0	1,1 7	1,0 8	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
M value gradient	M _%	%	63	82	90	81	66	50	27	0	-	-	-	-	-	-	-	-	
depth of station II	H ^{II}	mH ₂ O	3																
waiting time at station II	t ^{II}	min	4																
partial pressure of nitrogen after station II	p(II)	ata	1,8 7	2,2 1	2,2 0	2,0 5	1,8 4	1,6 4	1,4 5	1,2 9	1,1 6	1,0 7	1,0 2	0,9 7	0,9 3	0,9 0	0,8 8	0,8 6	
M value gradient	M _%	%	36	70	93	96	90	86	72	50	27	14	3	-	-	-	-	-	
length of rest after diving	t _s	min	1440																
partial pressure of nitrogen after rest	p(s)	ata	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,7 9	0,8 0	0,8 0	0,8 0	0,8 0

Analiza podejścia do tabel dekompresji przez *French Navy*.

ZH - L 16B															
Tkanka teoretyczna			1	1a	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
czas połowicznego odsycania	t (N ₂)	min	4	5	8	12,5	18,5	27	38,3	54,3	77	109	146	187	239
wartość a dla tkanki	a		1,2599	1,1696	1,0000	0,8618	0,7562	0,6667	0,5600	0,4947	0,4500	0,4187	0,3798	0,3497	0,3223
wartość b dla tkanki	b		0,5050	0,5578	0,6514	0,7222	0,7825	0,8126	0,8434	0,8693	0,8910	0,9092	0,9222	0,9319	0,9403
czas trwania ekspozycji	t	min	30												
początkowe ciśnienie zewnętrzne	p _o	ata	1,00												
końcowe ciśnienie zewnętrzne	p _c	ata	5,00												
ciśnienie cząstkowe nasyconej H ₂ O	p _{H₂O}	ata	0,063												
zawartość azotu	x	m ³ m ⁻³	0,6												
początkowe ciśnienie zewnętrzne azotu	p _o (N ₂)	ata	0,79												
końcowe ciśnienie zewnętrzne azotu	p _i (N ₂)	ata	2,96												
prężność azotu w tkance	p(N ₂ ,t)	ata	2,95	2,93	2,80	2,55	2,26	1,96	1,70	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
maksymalne przesylenie	p(max)	ata	0,854	0,981	1,173	1,22	1,174	1,048	0,962	0,857	0,761	0,681	0,644	0,623	0,61
głębokość I stacji	H	mH ₂ O	-	-	2	2	2	0	-	-	-	-	-	-	-
zaokrąglona głębokość I stacji	H ^I	mH ₂ O	6												
szybkość przejści na I stację	t _t	m/min	17												
prężność azotu po dojeździe do I stacji	p(t _t)	ata	2,86	2,86	2,76	2,53	2,24	1,95	1,69	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
gradient wartości M	M _%	%	45	52	62	63	53	34	11	-	-	-	-	-	-
czas postoju na I stacji	t ^I	min	0												
prężność azotu po I stacji	p(I)	ata	2,86	2,86	2,76	2,53	2,24	1,95	1,69	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
gradient wartości M	M _%	%	62	71	86	90	84	67	49	26	0	-	-	-	-
głębokość II stacji	H ^{II}	mH ₂ O	3												
czas postoju na II stacji	t ^{II}	min	4												
prężność azotu po II stacji	p(II)	ata	1,87	2,02	2,21	2,20	2,05	1,84	1,64	1,45	1,29	1,16	1,07	1,02	0,97
gradient wartości M	M _%		39	52	79	96	102	94	86	70	50	31	16	4	-
czas odpoczynku po nurkowaniu	t _s	min	1440												
prężność azotu po odpoczynku	p(s)	ata	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

Analysis of the *French Navy's* approach to decompression tables.

Table 6cont.

ZH - L 16B															
Theoretical tissue			1	1a	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
time of half offgasing	t (N ₂)	min	4	5	8	12,5	18,5	27	38,3	54,3	77	109	146	187	239
value a for the tissue	a		1,2599	1,1696	1,0000	0,8618	0,7562	0,6667	0,5600	0,4947	0,4500	0,4187	0,3798	0,3497	0,322
value b for the tissue	b		0,5050	0,5578	0,6514	0,7222	0,7825	0,8126	0,8434	0,8693	0,8910	0,9092	0,9222	0,9319	0,940
exposure time	t	min	30												
initial external pressure	p _o	ata	1,00												
final external pressure	p _c	ata	5,00												
partial pressure of saturated H ₂ O	p _{H₂O}	ata	0,063												
nitrogen content	x	m ³ m ⁻³	0,6												
initial external pressure of nitrogen	p _o (N ₂)	ata	0,79												
final external pressure of nitrogen	p _i (N ₂)	ata	2,96												
partial pressure of nitrogen in the tissue	p(N ₂ ,t)	ata	2,95	2,93	2,80	2,55	2,26	1,96	1,70	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
maximum supersaturation	p(max)	ata	0,854	0,981	1,173	1,22	1,174	1,048	0,962	0,857	0,761	0,681	0,644	0,623	0,61
depth of station I	H	mH ₂ O	-	-	2	2	2	0	-	-	-	-	-	-	-
depth of station I (rounded)	H ^I	mH ₂ O	6												
speed of transition to station I	t _t	m/min	17												
partial pressure of nitrogen after reaching station I	p(t _t)	ata	2,86	2,86	2,76	2,53	2,24	1,95	1,69	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
M value gradient	M _%	%	45	52	62	63	53	34	11	-	-	-	-	-	-
waiting time at station I	t ^I	min	0												
partial pressure of nitrogen after station I	p(I)	ata	2,86	2,86	2,76	2,53	2,24	1,95	1,69	1,48	1,30	1,17	1,08	1,02	0,97
M value gradient	M _%	%	62	71	86	90	84	67	49	26	0	-	-	-	-
depth of station II	H ^{II}	mH ₂ O	3												
waiting time at station II	t ^{II}	min	4												
partial pressure of nitrogen after station II	p(II)	ata	1,87	2,02	2,21	2,20	2,05	1,84	1,64	1,45	1,29	1,16	1,07	1,02	0,97
M value gradient	M _%		39	52	79	96	102	94	86	70	50	31	16	4	-
length of rest after diving	t _s	min	1440												
partial pressure of nitrogen after rest	p(s)	ata	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

Tabela 7.

Tabela dekompresji eksperymentalnej dla bloku $AMW_{e_1 - e_2}$.

Głębokość [mH_2O]		40							40								
Czas na dnie	Szybkość wynurzenia do pierwszej stacji	Stacje dekompresyjne [mH_2O]		Gradient i nr wiodącej tkanki teoretycznej wg AMW na stacjach [mH_2O]					Stacje dekompresyjne [mH_2O]		Gradient i nr wiodącej tkanki teoretycznej wg AMW na stacjach [mH_2O]						
		6	3	6	3	0	6	3	0	6	3	6	3	0			
[min]	[min]	Czas na stacji [min]		[%]					Czas na stacji [min]		[%]						
Tabela podstawowa																	
5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	-	-	21	1	36	1	54	1	-	-	24	1	36	1	50	1
10		-	-	43	1a	61	1a	84	1a	-	-	47	1	61	1	75	1
15		-	1	56	1a	77	2	96	2	-	-	57	1	74	2	94	3
20		1	2	68	2	83	2	100	3	-	1	68	2	87	3	108	3
25		2	5	76	2	90	3	98	4	-	3	77	3	102	3	109	3
30		4	6	84	3	90	4	99	4	2	4	87	3	100	3	109	4
<i>Procedury awaryjnego przedłużenia pobytu na głębokości</i>																	
35		6	9	92	3	92	4	100	6	4	6	96	3	98	4	110	6
40		7	14	98	3	96	4	99	6	5	11	102	3	102	4	109	6
Przejście pomiędzy stacją 6 i 3 mH_2O oraz 3 mH_2O i powierzchnią wynosi 30 s																	
System CRABE $x_{O_2} = 32\%_{obj.}$ Nie można odstać czasów ze stacji 3 mH_2O na stacji 6 mH_2O		Zestaw tkanek według ZHL 16B Jeśli gradient Δ w chwili rozpoczęcia dekompresji jest większy niż od $\Delta > 90\%$, to przy opuszczeniu stacji 6 mH_2O musi mieć wartość, co najwyżej równą tej wartości Na powierzchni gradient nie może być większy od ok.100%							Zestaw tkanek według ZHL ₁₂ Gradient Δ podczas dekompresji nie większy niż 100% Na powierzchni gradient nie może być większy od ok.110%								

Table 7.

Experimental decompression table for $AMW_{e_1 - e_2}$ programs.

Depth [mH_2O]		40							40								
Time at the bottom	Speed of ascending to the first station	Decompression stations [mH_2O]		Gradient and number of the leading theoretical tissue according to AMW at stations [mH_2O]					Decompression stations [mH_2O]		Gradient and number of the leading theoretical tissue according to AMW at stations [mH_2O]						
		6	3	6	3	0	6	3	6	3	6	3	0				
[min]	[min]	Time spent at the station		[%]					Time spent at the station		[%]						
[min]	[min]	[min]															
Basic table																	
5	$15 - 17m \cdot min^{-1}$	-	-	21	1	36	1	54	1	-	-	24	1	36	1	50	1
10		-	-	43	1a	61	1a	84	1a	-	-	47	1	61	1	75	1
15		-	1	56	1a	77	2	96	2	-	-	57	1	74	2	94	3
20		1	2	68	2	83	2	100	3	-	1	68	2	87	3	108	3
25		2	5	76	2	90	3	98	4	-	3	77	3	102	3	109	3
30		4	6	84	3	90	4	99	4	2	4	87	3	100	3	109	4
		<i>Emergency procedures for prolonging the stay under water</i>															
35	6	9	92	3	92	4	100	6	4	6	96	3	98	4	110	6	
40	7	14	98	3	96	4	99	6	5	11	102	3	102	4	109	6	
Transfer time between stations 6 and 3 mH_2O and station 3 mH_2O and the surface is 30 s																	
The CRABE system $x_{O_2} = 32\%_{obj}$ Times from 3 mH_2O station cannot be made up for at 6 mH_2O station		Set of tissues according to ZHL 16B If gradient Δ at the start of decompression is greater than $\Delta > 90\%$, then at leaving the 6 mH_2O station it must have a value at most equal to this value On the surface, gradient cannot be greater than about 100%							Set of tissues according to ZHL₁₂ Gradient Δ during decompression not greater than 100% On the surface, gradient cannot be greater than about 110%								

BLOK AMWE I SYSTEM FN

Analizując system nitroksowy o otwartym obiegu czynnika oddechowego o zawartości tlenu $x_{O_2} = 40\%_{obj.}$ bez możliwości przechodzenia dekompresji przewidzianej dla stacji $3 mH_2O$ i odbyciu jej na stacji $6 mH_2O$ można zauważyć, że podejście bülmannowskie²⁵ jest spójne z systemem dekompresji *French Navy* dla aparatu CRABE pod warunkiem dopuszczenia do przesyceń rzędu 110% na głębokości $3 mH_2O$ – **tab.6-7**.

W celu bezpiecznego, stopniowego zbliżenia się do dekompresji *French Navy* przyjęto dwa profile o zwiększającym się zagrożeniu *DCS* – $AMWe_1$ i $AMWe_2$. Dla systemu $AMWe_1$ przyjęto, że najniższe stężenie tlenu w obiegu aparatu CRABE będzie wynosić $x_{O_2} = 32\%_v$ bez możliwości przeniesienia czasów ze stacji $3 mH_2O$ na stację $6 mH_2O$. Dla zestawu tkanek według *ZHL 16B*, jeśli gradient δ w chwili rozpoczęcia dekompresji jest większy niż od $\delta > 90\%$, to przy opuszczeniu stacji $6 mH_2O$ musi mieć wartość, co najwyżej równą tej wartości. Zaś na powierzchni gradient nie może być większy od ok. $\delta = 100\%$ – **tab.7**.

Dla systemu $AMWe_2$ przyjęto, że najniższe stężenie tlenu w obiegu aparatu CRABE będzie wynosić $x_{O_2} = 32\%_v$ bez możliwości przeniesienia czasów ze stacji $3 mH_2O$ na stację $6 mH_2O$. Dla zestawu tkanek według *ZHL₁₂* gradient δ podczas dekompresji nie był większy niż $\delta = 100\%$. Na powierzchni gradient nie był większy od ok. $\delta = 110\%$ – **tab.7**.

WYNIKI

ORGANIZACJA EKSPERYMENTÓW

Nurek roboczy wykonując wysiłek w basenie kompleksu nurkowego DGKN-120 ubezpieczony jest przez nurka zabezpieczającego – **rys.5a**. W ciągu całego eksperymentu nurek przebywa w wodzie oddychając z aparatu nurkowego CRABE – **rys.5d**. Nurek na stanowisku wysiłkowym posiada komputer, na którego ekranie możliwe jest wyświetlanie poleceń oraz parametrów nacisku oraz zawartości tlenu w czynniku oddechowym²⁶ – **rys.5c**. Na pulpicie komputera nurek ma do dyspozycji trzy przyciski do szybkiej komunikacji. Do komunikacji z nurkiem można wykorzystać system łączności przewodowej lub głośnik znajdujący się w wodzie do bezpośredniego wydawania nurkowi komend poprzez środowisko wodne. W skrzynce komputera znajduje się kamera do obserwacji twarzy nurka, oprócz tego zamontowane są kamery pokazujące prawidłowość ułożenia sylwetki nurka pod wodą oraz ogólny widok w komorze pokazujący nurka roboczego i nurka zabezpieczającego – **rys.5f**.

²⁵zarówno dla zestawu tkanek według *ZHL₁₂* i *ZHL 16B*

²⁶funkcje te można pojedynczo wyłączać

AMWE UNIT AND FN SYSTEM

Having analyzed the open-circuit nitrox system with oxygen content $x_{O_2} = 40\%_{vol}$ without the possibility of shifting the decompression provided for the station at the depth of $3\text{ mH}_2\text{O}$ to the station $6\text{ mH}_2\text{O}$, we can state that the Bülmann approach²⁴ is consistent with the *French Navy's* decompression system for the CRABE apparatus, on the condition that 110% supersaturations at the depth of $3\text{ mH}_2\text{O}$ are allowed – **Table s 6-7**.

In order to approach the *French Navy's* decompression safely and gradually, two profiles with an increased risk of DCS – $AMWe_1$ and $AMWe_2$ – were adopted. It was assumed that in the $AMWe_1$ system, the lowest concentration of oxygen in the loop will be $x_{O_2} = 32\%_v$, without the possibility of transferring times from station $3\text{ mH}_2\text{O}$ to station $6\text{ mH}_2\text{O}$. For a set of tissues according to *ZHL 16B*, if the gradient δ at the start of decompression is greater than $\delta > 90\%$, then at leaving the $6\text{ mH}_2\text{O}$ station it must have a value at most equal to this value. On the surface, the gradient cannot be greater than about $\delta = 100\%$ - **Table 7**.

It was assumed that in the $AMWe_2$ system, the lowest concentration of oxygen in the loop will be $x_{O_2} = 32\%_v$, without the possibility of transferring times from station $3\text{ mH}_2\text{O}$ to station $6\text{ mH}_2\text{O}$. For a set of tissues according to *ZHL₁₂*, the gradient δ during decompression was not greater than $\delta > 100\%$. On the surface, the gradient was not greater than about $\delta = 110\%$ - **Table 7**.

RESULTS

ORGANIZATION OF EXPERIMENTS

A diver engaged in physical activity in the swimming pool of the DGKN-120 complex, is secured by a safety diver – **Fig.5**. Throughout the experiment, the diver uses the CRABE rebreather while under water – **Fig.5d**. On the workstation, there is a computer on whose screen it is possible to display the commands and parameters of oxygen pressure and content in the breathing mixture²⁵ – **Fig.5c**. On the computer desktop, there are three buttons for quick communication. To communicate with the diver, we can use a wired communication system or a loudspeaker located in water, to issue commands directly to the diver in the aquatic environment. In the computer box, there is a camera for observing the diver's face; there are also cameras showing the correct arrangement of the diver under water and a general view showing both divers in the chamber – **Fig.5f**.

²⁴ both for the sets of tissues according to *ZHL₁₂* and *ZHL 16B*

²⁵ these functions can be turned off individually

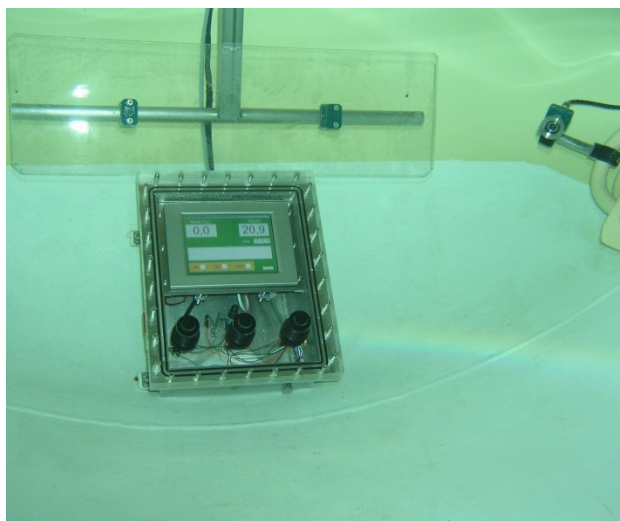
a)



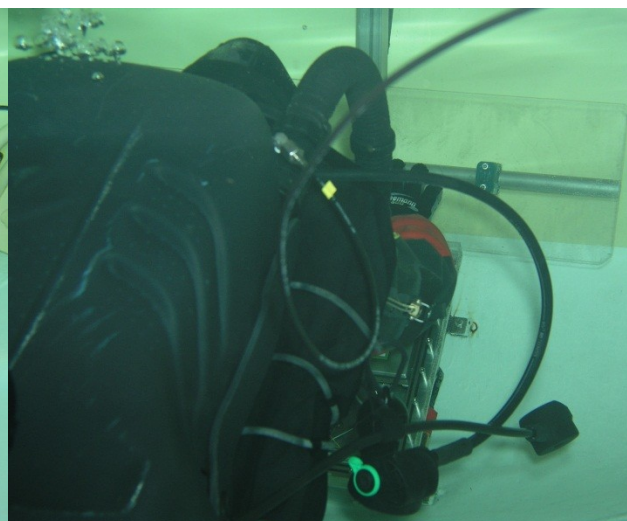
b)



c)



d)



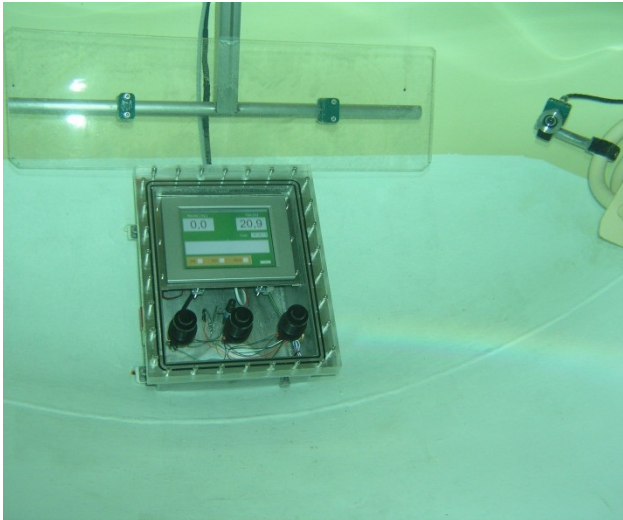
a)



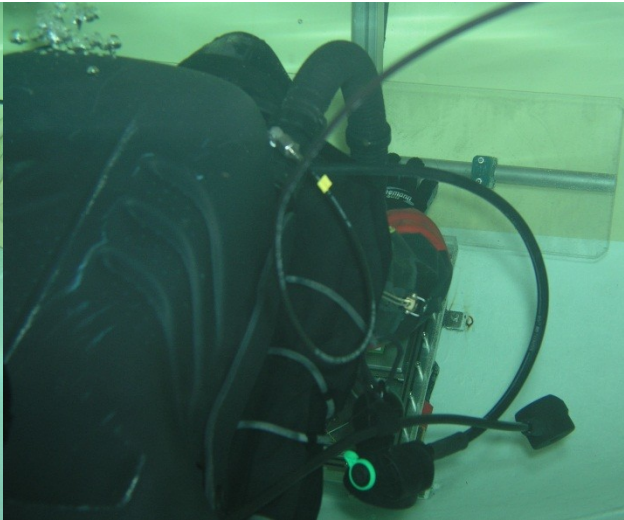
b)



c)

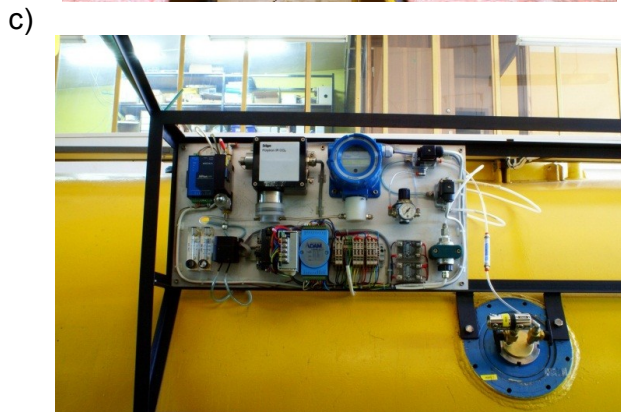
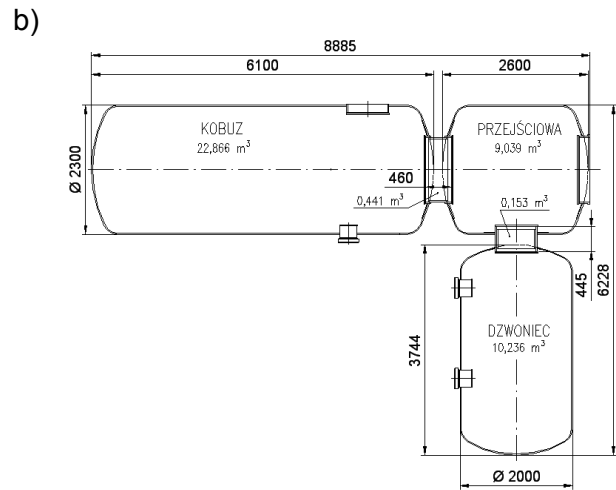
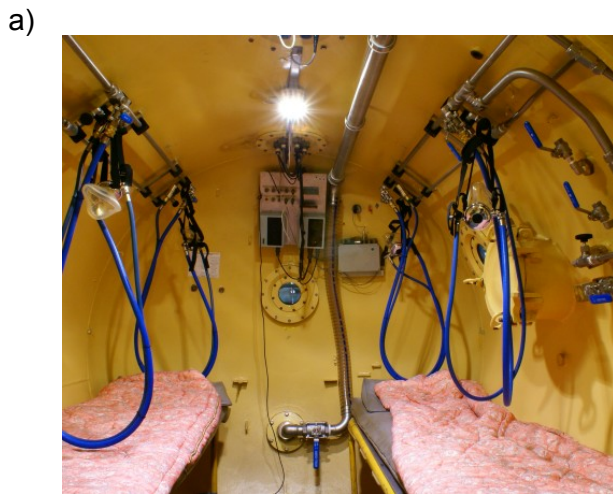


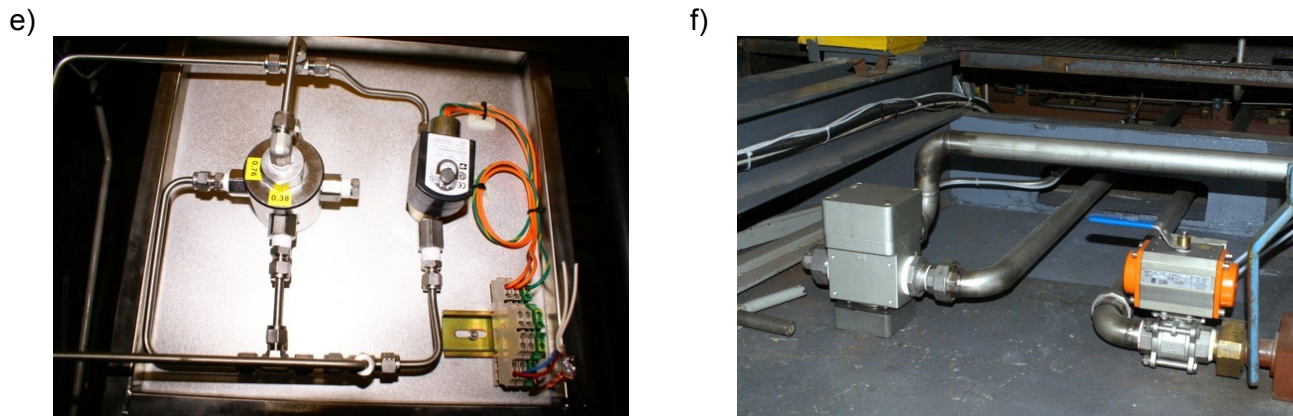
d)





Rys.5. Doświadczalny Głębokowodny Kompleks Nurkowy DGKN-120 a) nurkowie w komorze wodnej kompleksu przygotowujący się do nurkowania b) nurek gotowy do nurkowania c) komputer ze wskazaniami dla nurka d) nurek na stanowisku ergonometru e) kompleks DGKN-120 widok z góry f) system obserwacji i nadzoru eksperymentu.





Rys.6. Doświadczalny Głębokowodny Kompleks Nurkowy DGKN-120 a) widok komory mieszkalnej od strony komory przejściowej b) schemat zespołu komór wchodzących w skład kompleksu c) Automatyczny system pomiarowy czynnika oddechowego nurka roboczego d) automatyczny system pomiaru składu atmosfery komory DZWONIEC i PRZEJŚCIOWA e) dyskowy system do systemu automatycznego dozowania tlenu do atmosfery komory DZWONIEC f) element wykonawczy do systemu automatycznego utrzymywania ciśnienia i realizacji procesu dekompresji (po lewej).

Przed zanurzeniem nurek ubezpieczający podłącza szybkozłączem przetokę zamontowaną na wężu wdechowym aparatu nurkowego²⁷. W ten sposób czynnik oddechowy wdychany przez nurka jest odprowadzany do analizy. Maksymalny strumień pobieranego czynnika oddechowego wynosi $\dot{V} < 1 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ i kierowany jest na sondę cyrkonową typu SERVOMEX Zr743 Industrial Oxygen Sensor²⁸ lub paramagnetyczny analizator tlenu typu SERVOMEX Pm1111E701 Oxygen Transducer²⁹. Analizatory wchodzące w skład automatycznego systemu pomiarowego składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka roboczego pokazano na **rys.6c**. Podobne systemy pomiarowe posiada każda komora kompleksu DGKN-120 – **rys.6d**. System posiada także automatyczne urządzenia do utrzymywania stałego ciśnienia i realizacji zadanej dekompresji oraz utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu w atmosferze komory hiperbarycznej – **rys.6 e-f**. Wyniki pomiarów realizowane przez stanowiska pomiaru składu czynnika oddechowego, tensometru, utrzymywania ciśnienia, realizacji dekompresji i utrzymywania ciśnienia cząstkowego tlenu są nadzorowane, zobrazowywane a dane archiwizowane przez dowolnie wybrany komputer będący na wyposażeniu sieci pomiarowej kompleksu DGKN-120. Wszystkie systemy nadzorowane są przez zintegrowane oprogramowanie mogące działać na dowolnie wybranym komputerze Ethernetowej sieci pomiarowej.

Podczas pobytu na głębokości nurek roboczy wykonuje wysiłek polegający na symulacji pływania w płetwach jednocześnie napierając na pionową płytę połączoną z tensometrem typu NK-SS 300N Keli Electric Manufacturing (Ning 80) Co.,Ltd. Nurek zabezpieczający asekuruje jedynie nurka roboczego bez wykonywania jakiegokolwiek innej pracy – **rys.5c-d**.

e)

f)

²⁷ przed zaworem zwrotnym urządzenia ustnikowego

²⁸ zrezygnowano z wykorzystania sondy cyrkonowej ze względu na znaczny wpływ zanieczyszczeń na dokładność wskazań zawartości tlenu

²⁹ dodatkowo monitorowana jest zawartość ditlenku węgla oraz detekcji związków utleniających przy pomocy eksplozometru

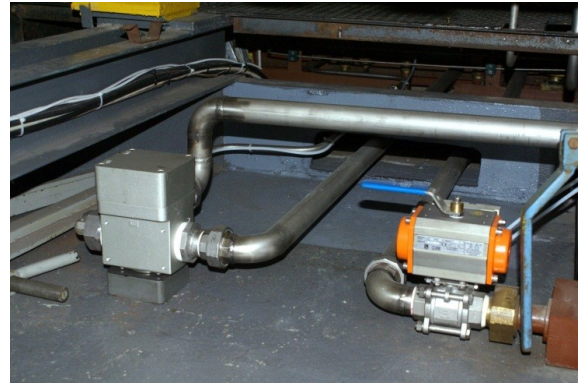
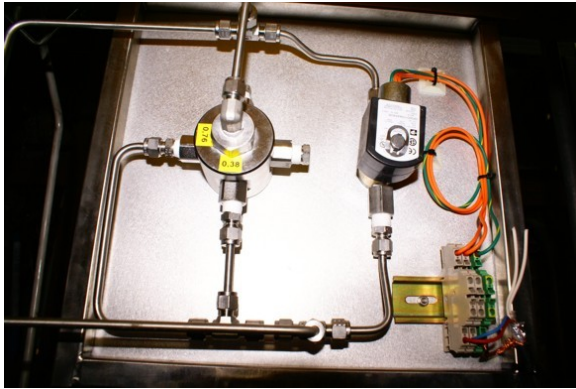


Fig.6. Experimental Deepwater Diving Complex DGKN-120 a) a view of the living chamber from the transition chamber b) an outline of the chambers in the complex c) an automatic system for measuring the breathing mixture of the diver d) an automatic system for measuring the composition of the atmosphere of the DZWONIEC and PRZEJŚCIOWA chambers e) nozzle system for automatic oxygen dispensing into the DZWONIEC chamber's air f) an actuator of the automatic pressure maintenance system and the process of decompression (left).

Before immersion, the safety diver connects the one part of the inhalation hose with a quick coupler²⁶. In this way, the breathing mixture inhaled by the diver is taken for analysis. The maximum intake of the breathing mixture is $\dot{V} < 1 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ and is directed to a zirconium probe, SERVOMEX Zr743 Industrial Oxygen Sensor²⁷, or a paramagnetic oxygen analyser, SERVOMEX Pm1111E701 Oxygen Transducer²⁸. The analyzers which are part of an automatic measuring system of the breathing mixture inhaled by the diver are shown in **Fig.6c**. Similar measuring systems can be found in every chamber if the DGKN-120 complex – **Fig.6d**. The system is also equipped with an automatic device for maintaining constant pressure, conducting decompression, and maintaining permanent partial pressure of oxygen in the atmosphere of the hyperbaric chamber - **Fig.6e-f**. The results of measurements carried out at workstations measuring the composition of the breathing mixture, strain gauge, pressure maintenance, conducting decompression, and maintenance partial pressure of oxygen are monitored, and the data is archived on any computer available in the measurement network of the DGKN-120 complex. All the systems are supervised by integrated software that can run on any of the Ethernet measurement network computer.

While staying underwater, the working diver performs a simulation of swimming with flippers on while pushing a vertical plate connected to a strain gauge NK-SS 300N Keli Electric Manufacturing (Ning 80) Co.,Ltd. The safety diver only protects the working diver, without performing any other tasks – **Fig.5c-d**.

²⁶ before the non-return valve of the mouthpiece

²⁷ a zirconia probe was not used due to a significant influence of impurities on the accuracy of the oxygen content index

²⁸ additionally, carbon dioxide content and the presence of oxidizable compounds (detected with an explosimeter) are monitored

Nurek zabezpieczający podczas przebywania na dnie, może oddychać z atmosfery komory zawartym w niej powietrzem lub nitroksen/tlenem poprzez system *BIBS*³⁰ wyposażony w półmaskę z wydechem kierowanym przez system utrzymywania odpowiedniej różnicy ciśnień na zewnątrz komory. Długość węży pozwala nurkowi na poruszanie się w obrębie całej komory.

Jeżeli nurek zabezpieczający oddychał powietrzem z komory, musi on być wymieniony przed rozpoczęciem dekompresji na innego nurka zabezpieczającego, gdyż rozkład jego dekompresji będzie się różnił od dekompresji nurka roboczego ze względu na różne zawartości tlenu we wdychanym czynniku oddechowym³¹. Po wymianie nurków, pierwszy nurek zabezpieczający przechodzi dekompresję w komorze mieszkalnej kompleksu DGKN-120 według *tabeli 3 MW* z możliwością zastosowania dekompresji tlenowej – **rys.6a**. Drugi nurek zabezpieczający przechodzi dekompresją wraz z nurkiem roboczym. Moment wymiany musi być dokładnie przemyślane przez kierownika nurkowania tak, aby procedura ta była bezpieczna i wygodna z punktu widzenia eksperymentu.

Wymiana nurków pod ciśnieniem możliwa jest, gdyż wszystkie komory kompleksu DGKN-120 mogą pracować niezależnie i mogą być w nich utrzymywane różne ciśnienia³² – **rys.6b**. Jeśli nurek zabezpieczający oddycha poprzez system *BIBS* nitroksen o zawartości $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$, to nie musi być on wymieniany na czas dekompresji, gdyż założenia dekompresyjne dla niego są podobne jak dla nurka roboczego z tą różnicą, że nie jest on podczas ekspozycji obciążany pracą.

Podczas dekompresji nurek roboczy nie wykonuje żadnej pracy. Po zakończeniu dekompresji przechodzi on szybko do komory mieszkalnej³³, gdzie przechodzi badanie na obecność śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej. Czas przerwy pomiędzy zakończeniem nurkowania a rozpoczęciem badania powinien być nie dłuższy niż *7 min*³⁴. Jeśli lekarz udzieli zezwolenia, to po badaniu nurek bierze *5 min* ciepły prysznic celem sprowokowania skórnych objawów *DCS*. Po prysznicu nurek wraca do komory mieszkalnej, gdzie powtórnie przechodzi badania na obecność śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej.

Po zakończeniu badań nurek jest obserwowany minimum *2-3 godz* od czasu zakończenia dekompresji pod warunkiem, że nie wystąpi sygnał od wolnej fazy gazowej. Jeśli taki sygnał zostanie odnotowany, to obserwacja przedłużana jest do *2 godz* od zaniku sygnału pochodzącego od śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej.

³⁰built in breathing system

³¹nurek roboczy oddycha nitroksen o zawartości tlenu $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$, gdy nurek zabezpieczający powietrzem o zawartości tlenu $C_{O_2} \cong 21\%_v O_2/N_2$

³²każda komora kompleksu DGKN-120 posiada dwa włązy a przestrzeń pomiędzy nimi może być niezależnie ewakuowana do ciśnienia atmosferycznego lub połączona z komorą sąsiednią celem wyrównania z nią ciśnienia

³³przejście do komory mieszkalnej gwarantuje, że w chwili wykrycia nagromadzenia śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej można szybko podjąć rekompresję leczniczą

³⁴preferowany czas poniżej *5 min*

The safety diver, while underwater, can breathe air or nitrox/oxygen from the atmosphere of the chamber through the *BIBS*²⁹ system equipped with a half-mask with an exhaust-driven system maintaining proper pressure difference outside the chamber. The length of hose allows the diver to move across the chamber.

If the safety diver breathed air from the chamber, he or she must be replaced before the start of decompression by another safety diver, because his or her decompression distribution will differ from the working diver's decompression due to different oxygen content in the inhaled breathing mixture³⁰. After replacing the divers, the first safety diver undergoes decompression in a residential chamber of the DGKN-120 complex according to *Table 3 MW*, with the possibility of employing oxygen decompression – **Fig.6**. The second safety diver undergoes decompression along with the working diver. The moment of the exchange must be carefully thought out by the person in charge of the dive so that this procedure is safe and convenient for the experiment.

Replacing the divers under pressure is possible, since all the chambers in the DGKN-120 complex may operate independently and have different pressures inside them³¹ – **Fig.6b**.

If the safety diver breathes nitrox $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$ through the *BIBS* system, there is no need to replace him, as the decompression assumptions will be similar to the ones of the working diver, the difference being that the safety diver is not assigned any work at exposure time.

During decompression, the working diver does not perform any work. After decompression, he goes quickly to the living chamber³², where he is examined to check the presence of intravascular free gas phase. The time of the interval between the end of the dive and the start of the examination should be no longer than *7 min*³³. If the doctor agrees, the diver can take a 5-minute warm shower in order to trigger skin symptoms of *DCS*. After the shower, the diver returns to the living chamber, where he is examined again to check the presence of intravascular free gas phase. After the research is finished, the diver is kept under observation for at least *2–3 hours* since the end of decompression, provided that there is no free gas phase. If such a signal is recorded, the observation time is extended to *2 hours*, counting from the moment the signal from the intravascular free gas phase fades out.

²⁹ built in breathing system

³⁰ the working diver breathes nitrox with oxygen content $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$, while the safety diver breathes air with oxygen content $C_{O_2} \cong 21\%_v O_2/N_2$

³¹ each chamber of the DGKN-120 complex has two openings; the space between them can be independently evacuated to atmospheric pressure or connected with the adjacent chamber to offset the pressure

³² transition to the living chamber ensures that, at the time of detection of intravascular accumulation of free gas phase, a therapeutic recompression can be applied quickly

³³ preferred time – below *5 min*

BADANIA WSTĘPNE

Weryfikację poczynionych założeń wykonano wstępnie prowadząc nurkowania, gdzie aparat CRABE zasilany był premiksem $Nx 40\%O_2/N_2$ ³⁵ na głębokość $30 mH_2O$ z czasami pobytu $t \in \{15; 20; 30; 35\} min$ z obciążeniem dowolnie kształtowanym przez nurków. Średnie obciążenie dla tych nurkowań wyrażone w sile F nacisku wywieranej na poziomą płytę połączoną z tensometrem kształtowało się kolejno na poziomie $F \in \{1,75; 0,77; 2,89; 1,84\} kG$. Wysiłek ten rozłożony był w czasie $\tau \in \{9,5; 15; 26; 24,5\} min$, który w trzech pierwszych nurkowaniach był wydatkowany ciągle, zaś w czwartym z przerwami³⁶.

Oszacowanie pracy można w przybliżeniu przyjąć, że średnie obserwowane napory $F \in \{1,75; 0,77; 2,89; 1,84\} kG$ odpowiadają prędkościom średnim pokonywania dystansów wyrażoną w węzłach $v \in \{0,7; 0,5; 0,9; 0,8\} w$. Akcja serca nurka podczas trzeciej i czwartej ekspozycji dochodziła do $HR = 130 min^{-1}$ przy końcowych ekspozycjach wysiłkowych, co odpowiada konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_O = 2,65 dm^3 \cdot min^{-1}$ podczas pracy z obciążeniem ok. $W = 190 W$ dla wysiłku realizowanego na cykloergometrze przez nurka. Zgodnie z **tab.2** jest to wysiłek umiarkowany i średni (Przylipek M., Torbus J., 1981).

Z przeprowadzonych prób wstępnych wynikało, że podczas dekompresji zaraz po wykonaniu wysiłku problematyczne jest osiągnięcie i utrzymanie zawartości tlenu na założonym początkowo poziomie $C_{O_2} \geq 35\%_v O_2/N_2$. Dodatkowo można zauważyć, że nawet niewielki wysiłek podczas dekompresji powoduje szybkie zmiany zawartości tlenu. Badania wstępne wymusiły zmianę założeń dekompresyjnych zmieniając zakładany minimalny poziom stężenia tlenu na $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$.

ZGRYWANIE ZESPOŁU

Celem potwierdzenia poczynionych założeń dekompresyjnych oraz zgrywania zespołu nurków eksperymentalnych przeprowadzono cztery nurkowania wstępne z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%O_2/N_2$ ³⁷ na głębokość $30 mH_2O$ z maksymalnym, wymaganym czasem pobytu $\tau = 30 min$ z obciążeniem dowolnie kształtowanym przez nurków, oraz dla najbezpieczniejszego systemu dekompresji **AMWa**. Średnie obciążenie dla tych nurkowań wyrażone w sile F nacisku wywieranej na poziomą płytę połączoną z tensometrem kształtowało się kolejno na poziomie $F \in \{3,33; 1,84; 3,43; 1,70\} kG$. Wysiłek ten wydatkowany był w czasie $\tau = 30 min$, który w trzech nurkowaniach był wydatkowany ciągle, zaś w jednym został przerwany³⁸. Oszacowano odpowiadające naporom $F \in \{3,33; 1,84; 3,43; 1,70\} kG$ prędkości średnie pokonywania dystansów wyrażone w węzłach $v \in \{1,0; 0,8; 1,0; 0,7\} w$.

³⁵inżektor 0 – 45

³⁶wynikały one z przekroczenia założeń o minimalnej koncentracji tlenu, która zaczynała spadać poniżej wartości $30\%_v$

³⁷inżektor 0 – 45

³⁸ze względu na za niedostateczne wypełnienie skafandra suchego nastąpiło spływanie oddechu i zadyszka, dlatego nurek musiał przerwać pracę a podczas dekompresji, ze względu na złe samopoczucie nurka, kierownik nurkowania zarządził przerwanie oddychania z aparatu i wydłużenie dekompresji wraz z zastosowaniem dekompresji tlenowej

PRELIMINARY TESTS

The process of verifying the assumptions was initiated by dives at the depth of $30 \text{ mH}_2\text{O}$ that lasted $t \in \{15; 20; 30; 35\} \text{ min}$, with a load shaped by divers, who breathed premix $Nx 40\%O_2/N_2$ ³⁴ from the CRABE rebreather. The average load for these dives, expressed in the pressure force F exerted on the horizontal plate connected to a strain gauge, was at the level of $F \in \{1.75; 0.77; 2.89; 1.84\} \text{ kG}$. The physical effort was distributed in time $\tau \in \{9.5; 15; 26; 24.5\} \text{ min}$, with some intervals present only in the fourth dive³⁵. While estimating the work, it can be roughly assumed that the average force observed $F \in \{1.75; 0.77; 2.89; 1.84\} \text{ kG}$ corresponded to the average speeds of overcoming distances expressed in knots $v \in \{0.7; 0.5; 0.9; 0.8\} \text{ kn}$.

The diver's heart rate during the third and fourth exposure reached $HR = 130 \text{ min}^{-1}$ in final exercise exposures, which corresponds to the consumption of oxygen at the level of $\dot{v}_O = 2.65 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ while working with a load of about $W = 190 \text{ W}$ on a cycloergometer. According to **Table 2**, this is a moderate and average physical activity (Przylipek M., Torbus J., 1981).

The preliminary tests showed that during decompression, immediately after the exercise, it is problematic to achieve and maintain the oxygen content at the level originally assumed $C_{O_2} \geq 35\%_v O_2/N_2$. Additionally, one may notice that even a small effort during decompression causes rapid changes in oxygen content. Preliminary studies have forced a change of decompression assumptions by changing the assumed minimum level of oxygen concentration to $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2/N_2$.

TEAM BUILDING

In order to confirm the decompression assumptions made earlier and to build the team of experimental divers, four dives were conducted at the depth $30 \text{ mH}_2\text{O}$ in maximum required time $\tau = 30 \text{ min}$, with a load adjusted by divers breathing premix $Nx 40\%O_2/N_2$ ³⁶; the *AMWA* system was used to ensure the highest safety level of decompression. The average load for these dives, expressed in the pressure force F exerted on the horizontal plate connected to a strain gauge, was at the level of $F \in \{3.33; 1.84; 3.43; 1.70\} \text{ kG}$. The pressure force was applied continually throughout the period of $\tau = 30 \text{ min}$; there were no intervals in the dives, except for one³⁷. The average speeds of overcoming distances expressed in knots $v \in \{1.0; 0.8; 1.0; 0.7\} \text{ kn}$ corresponding to the force $F \in \{3.33; 1.84; 3.43; 1.70\} \text{ kG}$ have been estimated. The diver's heart rate during the first three exposures stayed at more or less the same level, at about $HR \cong 125 \text{ min}^{-1}$. During the fourth exposure, the rate fell from about $HR \cong 120 \text{ min}^{-1}$ to about $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$.

³⁴ injector 0 – 45

³⁵ they resulted from exceeding the guidelines of a minimum concentration of oxygen, which began to fall below $30\%_v$

³⁶ injector 0 – 45

³⁷ due to an inadequate dry suit filling, the diver's breath was shortened; that is why he had to stop working, and because he felt bad, the person in charge of the dives ordered him to stop breathing with the apparatus during decompression, extend decompression time, and use oxygen decompression

Akcja serca nurka podczas wysiłku w pierwszych trzech ekspozycjach utrzymywała się prawie na stałym poziomie ok. $HR \cong 125 \text{ min}^{-1}$. Podczas czwartej ekspozycji spadała od wartości ok. $HR \cong 120 \text{ min}^{-1}$ do wartości ok. $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$. Średnia wartość akcji serca ok. $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$ odpowiada obciążeniu pracą ok. $P = 160 \text{ W}$ i konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_O = 2,30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Zgodnie z **tab.2** odpowiada to obciążeniu ciężkiemu. Tak oszacowane obciążenie jest zgodne z odczuciami nurków.

Temperatura wody dla poszczególnych nurkowań wyniosła $t \in \{5; 8; 12; 14\}^\circ\text{C}$. Podobne obciążenie realizowane przez nurków powodowały podobne reakcje systemu oddechowego aparatu nurkowego. Wyniki nurkowań potwierdziły słuszność założenia o minimalnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynniku oddechowym kształtujące się na poziomie $C_{O_2} \geq 30\%_{obj.} O_2$ ³⁹.

BADANIA NA GŁĘBOKOŚCI 30 mH₂O

Celem wstępnej optymalizacji założeń dekompresyjnych przeprowadzono cztery nurkowania z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\% O_2 / N_2$ ⁴⁰ na głębokość 30 mH₂O z maksymalnym, wymaganym czasem pobytu $\tau = 30 \text{ min}$ i obciążeniem dowolnie kształtowanym przez nurków oraz systemami dekompresji AMWb – d. Po analizie wyników badań wstępnych zdecydowano się włączyć dwa z nich do puli nurkowań eksperymentalnych odbytych na głębokości 30 mH₂O jako serię AMWa.

Średnie obciążenie dla nurkowań wyrażone w sile F nacisku wywieranej na poziomą płytę połączoną z tensometrem kształtowało się kolejno na poziomie $F \in \{3,43; 1,70; 2,50; 1,83; 2,28; 1,69\} \text{ kG}$. Wysiłek ten wydatkowany był w czasie $\tau = 30 \text{ min}$, który w pięciu nurkowaniach był wydatkowany ciągle, zaś w nurkowaniu z dn.2010.02.23 został dwukrotnie przerwany⁴¹. Stosując oszacowanie pracy można w pierwszym przybliżeniu przyjąć, że średnie obserwowane napory $F \in \{3,43; 1,70; 2,50; 1,83; 2,28; 1,69\} \text{ kG}$ odpowiadają prędkościom średnim pokonywania dystansów wyrażoną w węzłach $v \in \{1,0; 0,7; 0,9; 0,8; 0,8; 0,7\} \text{ w}$.

Akcja serca nurków podczas wysiłku w pierwszym nurkowaniu⁴² utrzymywała się prawie na stałym poziomie $HR \cong 125 \text{ min}^{-1}$. Podczas drugiej i trzeciej⁴³ ekspozycji spadała od wartości $HR \cong 120 \text{ min}^{-1}$ do wartości $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$. Podczas czwartej i szóstej⁴⁴ ekspozycji spadała od wartości $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$ do wartości $HR \cong 80 \text{ min}^{-1}$, a przy piątej⁴⁵ utrzymywała się prawie na stałym poziomie $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$.

³⁹ obserwuje się wzrost zawartości tlenu we wdychanym czynniku oddechowym podczas dekompresji, lecz ze względu na stosunkowo krótki jej czas w porównaniu z ekspozycją na maksymalnej głębokości, ze względów bezpieczeństwa przyjęto wstępnie założenie upraszczające dotyczące minimalnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynniku oddechowym na poziomie $C_{O_2} \geq 30\%_{obj.} O_2$

⁴⁰ inżynektor 0 – 45

⁴¹ ze względu na spadek zawartości tlenu poniżej $C_{O_2} < 30\%_{obj.} O_2$ co było niezgodne z przyjętymi założeniami dekompresyjnymi

⁴² 2010.02.10

⁴³ 2010.02.11 i 2010.02.23

⁴⁴ 2010.02.24 i 2010.02.26

⁴⁵ 2010.02.25

The average heart rate, about $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$, corresponds to a workload of about $P = 160 \text{ W}$ and oxygen consumption at $\dot{v}_0 = 2,30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. According **Table 2**, this corresponds to a severe load. Such estimation is consistent with the feelings of the divers. Water temperature for each dive was $t \in \{5; 8; 12; 14\}^\circ\text{C}$.

Similar load caused similar reactions of the respiratory system of the diving apparatus.

The results of the dives confirmed the validity of the assumptions about the minimum oxygen content in the breathing mixture inspired by the diver, $C_{O_2} \geq 30\%_{\text{obj}} O_2$ ³⁸.

STUDY AT THE DEPTH OF 30 MH₂O

In order to optimize the decompression assumptions, four dives were conducted at the depth of 30 mH₂O in maximum required time $\tau = 30 \text{ min}$, with a load adjusted by divers breathing premix $Nx 40\% O_2/N_2$ ³⁹; the *AMWb* decompression system was applied. After analyzing the results of preliminary tests, a decision was made to include two of them in the group of experimental dives at the depth of 30 mH₂O as an *AMWa* series.

The average load for these dives, expressed in the pressure force F exerted on the horizontal plate connected to a strain gauge, was at the level of $F \in \{3.43; 1.70; 2.50; 1.83; 2.28; 1.69\} \text{ kG}$. The physical effort was distributed in time $\tau = 30 \text{ min}$, with two intervals present only in the dive from Feb 23rd, 2010⁴⁰. While estimating the work, it can be roughly assumed that the average force observed $F \in \{3.43; 1.70; 2.50; 1.83; 2.28; 1.69\} \text{ kG}$ corresponded to the average speeds of overcoming distances expressed in knots $v \in \{1.0; 0.7; 0.9; 0.8; 0.8; 0.7\} \text{ kn}$.

The divers' heart rate during the first dive⁴¹ was at the level of $HR = 125 \text{ min}^{-1}$. During the second and third⁴² exposure, it fell from about $HR \cong 120 \text{ min}^{-1}$ to about $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$. During the fourth and sixth⁴³ exposure, it fell from about $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$ to about $HR \cong 80 \text{ min}^{-1}$, and during the fifth⁴⁴ exposure it remained almost all the time at $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$.

The average heart rate, at about $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$, corresponds to a workload of about $P = 150 \text{ W}$ and oxygen consumption at $\dot{v}_0 = 2.20 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, as related to exercising on a cycloergometer. According **Table 2**, this corresponds to a heavy load. Such estimation is consistent with the divers' feelings.

³⁸ there is an increase in the oxygen content in the inhaled breathing gas mixture during decompression, but because of its relatively short time, compared with exposure at the maximum depth, an initial simplifying assumption concerning the minimum content of oxygen in the breathing mixture inhaled by the diver (at the level of $C_{O_2} \geq 30\%_{\text{obj}} O_2$) was adopted for safety reasons

³⁹ injector 0 – 45

⁴⁰ due to a decrease in oxygen content below $C_{O_2} < 30\%_{\text{obj}} O_2$, which was incompatible with the decompression assumptions

⁴¹ 10.02.2010

⁴² 11.02.2010 and 23.02.2010

⁴³ 24.02.2010 and 26.02.2010

⁴⁴ 25.02.2010

Średnia wartość akcji serca ok. $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$ odpowiada obciążeniu pracą ok. $P = 150 \text{ W}$ i konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_0 = 2,20 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ w odniesieniu do wysiłku realizowanego na cykloergometrze. Zgodnie z **tab.2** odpowiada to obciążeniu ciężkiemu. Tak oszacowane obciążenie jest zgodne z odczuciami nurków. Temperatura wody dla poszczególnych nurkowań wyniosła $t \in \{12; 14; 6; 12; 14; 16\}^\circ\text{C}$.

Podobne obciążenia realizowane przez nurków powodowały podobne reakcje systemu oddechowego aparatu nurkowego. Wyniki nurkowań potwierdziły słuszność założenia o minimalnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynniku oddechowym na poziomie $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2 e$.

Podczas tego cyklu nurkowań zanotowano dwie sytuacje pojawienia się śródnaczyniowej cichej fazy gazowej u tego samego nurka. W jednym z nich⁴⁶ niewymagane było podejmowanie żadnych działań poza obserwacją.

W drugim⁴⁷ zastosowano dekompresję leczniczą według procedury **TT USN 5** zaraz po zakończeniu nurkowania nurek miał objawy w rejonie prawej i lewej żyły podobojczykowej na poziomie $g = II +$, który po kompresji i standardowym odbyciu dwóch 20 min cykli oddychania na głębokości $18 \text{ mH}_2\text{O}$ został całkowicie zniwelowany. Po odbyciu standardowej dekompresji tlenowej nie zaobserwowano nawrotu. Po wywiadzie z nurkiem okazało się, że ze względu na złe wyważenie się zużył on zapas czynnika do napełniania skafandra i był on podczas nurkowania za mocno obciążony. Spowodowało to spływanie oddechu, co można zaobserwować poprzez związany z tym efektem wzrost częstotliwości oddechu (Birch K., MacLaren D., George K., 2009).

BADANIA NA GŁĘBOKOŚCI 42-45 mH_2O

Celem wstępnej optymalizacji założeń dekompresyjnych na głębokościach w zakresie $39 - 45 \text{ mH}_2\text{O}$ przeprowadzono pięć nurkowań z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\% O_2 / N_2$ ⁴⁸, z czasem pobytu $\tau = 30 \text{ min}$ dla głębokości $39 \text{ mH}_2\text{O}$, z czasem pobytu $\tau = 20 \text{ min}$ dla głębokości $42 \text{ mH}_2\text{O}$ oraz z czasem pobytu $\tau = 15 \text{ min}$ dla głębokości $45 \text{ mH}_2\text{O}$. Obciążenie było dowolnie kształtowane przez nurków. Testowano systemy dekompresji **AMWc - d** dla głębokości $39 \text{ mH}_2\text{O}$ oraz **AMWd** dla głębokości $42 - 45 \text{ mH}_2\text{O}$.

Średnie obciążenie dla nurkowań wyrażone w sile F nacisku wywieranej na poziomą płytę połączoną z tensometrem kształtowało się kolejno na poziomie $F \in \{1,80; 1,93; 1,74; 1,63; 2,60\} \text{ kG}$. Wysiłek ten wydatkowany był ciągle w czasie $\tau \in \{30; 30; 30; 20; 15\} \text{ min}$. Można przyjąć, że średnie obserwowane napory $F \in \{1,80; 1,93; 1,74; 1,63; 2,60\} \text{ kG}$ odpowiadają prędkościom średnim pokonywania dystansów wyrażoną w węzłach $v \in \{0,7; 0,8; 0,7; 0,7; 0,9\} \text{ w}$. Akcja serca nurków podczas wysiłku we wszystkich nurkowaniach utrzymywała się prawie na stałym poziomie ok. $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$.

⁴⁶2010.02.25.; u nurka po odbyciu dekompresji nie zaobserwowano śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej, lecz po prowokacji skórnych objawów **DCS** po 5 min ciepłym prysznicu pojawiła się wolna faza gazowa w rejonie prawej żyły podobojczykowej

⁴⁷2010.02.23.

⁴⁸inżektor 0 - 45

Water temperature for each dive was $t \in \{12; 14; 6; 12; 14; 16\}^{\circ}\text{C}$. Similar load caused similar reactions of the respiratory system of the diving apparatus.

The results of the dives confirmed the validity of the assumptions about the minimum oxygen content in the breathing gas mixture inhaled by the diver, at the level of $C_{O_2} \geq 30\%_{v}O_2$ ⁴⁵.

During this series of dives, two cases of silent intravascular bubbles presence were recorded in one diver. In one of them⁴⁶, no action apart from observation had to be taken; in the second case⁴⁷, therapeutic decompression was employed, following the *TT USN 5* procedure.

Immediately after the dive, the diver had symptoms in the region of the right and left subclavian vein at the level of $g = II +$, which after compression and going through two standard breathing cycles lasting *20 min* at the depth of *18 mH₂O* was levelled completely. There was no recurrence after completing standard oxygen decompression. After an interview with the diver, it turned out that, due to bad balance, he used the whole supply of the agent filling the suit and then the suit was too tight. This resulted in shortening the breath, consequence of which can be seen in the increase in breathing frequency (Birch K., MacLaren D., George K., 2009).

STUDY AT THE DEPTH OF 42-45 MH₂O

In order to optimize the decompression assumptions, five dives were conducted at the depth ranging from *39* to *45 mH₂O*; in time $\tau = 30 \text{ min}$ at the depth of *39 mH₂O*, in time $\tau = 20 \text{ min}$ at the depth of *42 mH₂O*, and in time $\tau = 15 \text{ min}$ at the depth of *45 mH₂O*. The load was adjusted by divers breathing premix *Nx 40%O₂/N₂*⁴⁸. The following decompression systems were applied: the *AMWc - d* system at the depth of *39 mH₂O* and the *AMWd* system at the depths of *42 - 45 mH₂O*.

The average load for these dives, expressed in the pressure force F exerted on the horizontal plate connected to a strain gauge, was at the level of $F \in \{1.80; 1.93; 1.74; 1.63; 2.60\} \text{ kG}$. The physical effort was distributed in time $\tau \in \{30; 30; 30; 20; 15\} \text{ min}$, with no intervals. It can be roughly assumed that the average force observed $F \in \{1.80; 1.93; 1.74; 1.63; 2.60\} \text{ kG}$ corresponded to the average speeds of overcoming distances expressed in knots $v \in \{0.7; 0.8; 0.7; 0.7; 0.9\} \text{ kn}$.

The divers' heart rate during all the dives remained at almost the same level of $HR = 100 \text{ min}^{-1}$.

⁴⁵ there is an increase in the oxygen content in the inhaled breathing gas mixture during decompression, but because of its relatively short time, compared with exposure at the maximum depth, an initial simplifying assumption concerning the minimum content of oxygen in the breathing mixture inhaled by the diver (at the level of $C_{O_2} \geq 30\%_{v}O_2$) was adopted for safety reasons

⁴⁶ 25.02.2010; no presence of intravascular bubbles was detected after decompression, but after triggering cutaneous symptoms of *DCS* after a 5-minute warm shower, intravascular bubbles appeared in the region of the right subclavian vein

⁴⁷ 23.02.2010

⁴⁸ injector 0 - 45

Średnia wartość akcji serca ok. $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$ odpowiada obciążeniu pracą ok. $P = 150 \text{ W}$ i konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_O = 2,20 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Zgodnie z **tab.2** odpowiada to obciążeniu ciężkiemu. Tak oszacowane obciążenie jest zgodne z odczuciami nurków. Temperatura wody dla poszczególnych nurkowań wyniosła $t \in \{9; 13; 15; 16; 16\}^\circ\text{C}$.

Podobne obciążenia realizowane przez nurków powodowały podobne reakcje systemu oddechowego aparatu nurkowego. Podobnie jak poprzednio wyniki nurkowań na głębokość $39 \text{ mH}_2\text{O}$ potwierdziły słuszność założenia o minimalnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynniku oddechowym na poziomie $C_{O_2} \cong 30\%_{\text{obj.}} O_2$. Podczas nurkowań w zakresie głębokości $42 - 45 \text{ mH}_2\text{O}$ zawartość tlenu utrzymywała się na wyższym poziomie $C_{O_2} \cong 32\%_{\text{obj.}} O_2$ powodując znaczny wzrost zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową. Przy nurkowaniu na głębokość $45 \text{ mH}_2\text{O}$ ciśnienie cząstkowe na początku nurkowania doszło do wartości $p_{O_2} = 198 \text{ kPa}$, aby później spaść do wartości $p_{O_2} = 175 \text{ kPa}$. Tak wysokie ciśnienia cząstkowe utrzymywały się pomimo tego, że nurek utrzymywał nacisk na tensometrze ok. $F = 2,6 \text{ kG}$, co odpowiadałoby płynięciu z prędkością $v \cong 0,9 \text{ w}$. W czasie wysiłku akcja serca nurka utrzymywała się na poziomie ok. $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$ co odpowiada obciążeniu pracą ok. $P = 160 \text{ W}$ i konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_O = 2,30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Zgodnie z **tab.2** odpowiada to obciążeniu ciężkiemu. Pomimo ekstremalnej ekspozycji tlenowej u nurka zaobserwowano wolną fazę gazową w prawej żyły podobojczykowej o stopniu gradacji $g = I$ – zaraz po ekspozycji i $g = I$ po prowokowaniu skórnych objawów *DCS* poprzez 5 min ciepły prysznic. Stopień gradacji $g = I$ utrzymywał się ponad 1 godz ustępując dopiero po ponad 2 godz od zakończenia dekompresji⁴⁹.

Drugi przypadek wystąpienia wolnej fazy gazowej odnotowano podczas nurkowania na głębokość $39 \text{ mH}_2\text{O}$. Podczas nurkowania wystąpiło chwilowe przekroczenie dopuszczalnej wartości ciśnienia cząstkowego tlenu powyżej $p_{O_2} > 160 \text{ kPa}$, później utrzymywało się ono na stałym poziomie ok. $p_{O_2} \cong 160 \text{ kPa}$. Nurek wydatkował pracę poniżej wartości dotąd przez niego preferowanych. Nacisk wyniósł średnio $F = 1,8 \text{ kG}$, co odpowiadałoby płynięciu z prędkością $v \cong 0,7 \text{ w}$. W czasie wysiłku akcja serca nurka utrzymywała się na poziomie ok. $HR \cong 80 - 90 \text{ min}^{-1}$, co odpowiada obciążeniu pracą ok. $P = 116 \text{ W}$ i konsumpcji tlenu na poziomie $\dot{v}_O = 1,92 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Zgodnie z **tab.2** odpowiada to obciążeniu ciężkiemu.

⁴⁹nie zastosowano rekompresji tlenowej jedynie obserwowano przez cały czas nurka – nie wystąpiły żadne objawy *DCS*

The average heart rate, at about $HR \cong 100 \text{ min}^{-1}$, corresponds to a workload of about $P = 150 \text{ W}$ and oxygen consumption at $\dot{v}_{O_2} = 2.20 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. According **Table 2**, this corresponds to a heavy load. Such estimation is consistent with the divers' feelings.

Water temperature for each dive was $t \in \{9; 13; 15; 16; 16\}^\circ\text{C}$. Similar load caused similar reactions of the respiratory system of the diving apparatus. As before, the results of the dives at the depth of $39 \text{ mH}_2\text{O}$ confirmed the validity of the assumptions about the minimum oxygen content in the breathing gas mixture inhaled by the diver, at the level of $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2$. During the dives at the depths of $42 - 45 \text{ mH}_2\text{O}$, oxygen content remained at a higher level of $C_{O_2} \geq 32\%_v O_2$, causing a significant increase in the risk of central oxygen toxicity. When diving at the depth of $45 \text{ mH}_2\text{O}$, the partial pressure at the beginning of the dive reached $p_{O_2} = 198 \text{ kPa}$ and then fell to $p_{O_2} = 175 \text{ kPa}$. Such high partial pressures persisted despite the diver's continued pressure on the cycloergometer at about $F = 2.6 \text{ kG}$, which corresponds to swimming at the speed of $v \cong 0.9 \text{ kn}$.

The average heart rate during the exercise was at about $HR \cong 110 \text{ min}^{-1}$, which corresponds to a workload of about $P = 160 \text{ W}$ and oxygen consumption at $\dot{v}_{O_2} = 2.30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. According **Table 2**, this corresponds to a heavy load.

Despite extreme oxygen exposure, the presence of intravascular bubbles presence was recorded in the right subclavian vein with a degree of gradation $g = I -$ just after exposure and $g = I$ after provoking cutaneous *DCS* symptoms by taking a 5-minute warm shower. The degree of gradation $g = I$ remained for more than **1 hour**, to finally subside after more than 2 hours after the end of decompression⁴⁹.

The second case of during a dive at the depth of $39 \text{ mH}_2\text{O}$. During the dive, the partial pressure temporarily exceeded the allowable value above $p_{O_2} > 160 \text{ kPa}$, then remained constant at around $p_{O_2} \cong 160 \text{ kPa}$. The diver's force was smaller than the one preferred so far. The pressure force was about $F = 1.8 \text{ kG}$, which corresponds to swimming at the speed of $v \cong 0.7 \text{ kn}$.

The heart rate during the exercise was at about $HR \cong 80 - 90 \text{ min}^{-1}$, which corresponds to a workload of about $P = 116 \text{ W}$ and oxygen consumption at $\dot{v}_{O_2} = 1.92 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. According **Table 2**, this corresponds to a heavy load.

Immediately after the dive, no intravascular bubbles presence was observed in either the subclavian veins or the cardiac area. After provoking cutaneous *DCS* symptoms by a 5-minute warm shower, the degree of gradation reached $g = I$ on the right subclavian vein, which was reduced to $g = I -$ after 50 min after the end of decompression and stayed for nearly two hours after the end of decompression⁵⁰.

⁴⁹ no oxygen recompression was applied; the diver was under observation all the time; there were no signs of *DCS*

⁵⁰ no oxygen recompression was applied; the diver was under observation all the time; there were no signs of *DCS*

Zaraz po nurkowaniu nie wystąpiła u nurka wolna faza gazowa ani w żyłach podobojczykowych ani w obszarze przedsercowym. Po prowokowaniu skórnych objawów *DCS* poprzez 5 min ciepły prysznic wystąpił stopień gradacji $g = I$ na prawej żyłce podobojczykowej, który zmalał do $g = I$ – po 50 min od zakończenia dekompresji i utrzymywał się prawie 2 godz od zakończenia dekompresji⁵¹.

BADANIA NA GŁĘBOKOŚCI 40 mH₂O

Celem określenia wstępnego zagrożenia jakie niosą za sobą profile *FN* opracowano profile dekompresji dla głębokości 40 mH₂O w taki sposób, że profil *AMWe₂* ma podwojony czas dekompresji w stosunku do *FN*, a *AMWe₁* podwojony w stosunku do *AMWe₂*. Przeprowadzono pięć nurkowań z wykorzystaniem premiksu *Nx 40%O₂/N₂*⁵² z czasem pobytu $\tau = 30$ min. Obciążenie było dowolnie kształtowane przez nurków. Testowane zostały systemy dekompresji *AMWe₁ – e₂* oraz *FN* dla głębokości 40 mH₂O.

Średnie obciążenie dla nurkowań wyrażone w sile *F* nacisku wywieranej na poziomą płytę połączoną z tensometrem kształtowało się kolejno na poziomie $F \in \{1,74; 1,29; 1,73; 2,32; 2,60\}$ kG. Wysiłek ten wydatkowany był ciągle w czasie $\tau \in \{27; 26; 24; 25; 24\}$ min. Można przyjąć, że średnie obserwowane napory $F \in \{1,74; 1,29; 1,73; 2,32; 2,60\}$ kG odpowiadają prędkościom średnim pokonywania dystansów wyrażoną w węzłach $v \in \{0,7; 0,6; 0,7; 0,9; 0,9\}$ w. Akcja serca nurków podczas wysiłku we wszystkich nurkowaniach utrzymywała się prawie na stałym poziomie ok. $HR \cong 100$ min⁻¹.

Jeden z nurków poddany był ekspozycjom *AMWe₁ – AMWe₂* oraz *FN*. Dla ekspozycji *AMWe₁* nie wychwycono sygnału od śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej po dekompresji 4 min/6 mH₂O i 6 min/3 mH₂O. Po ekspozycji *AMWe₂* powtórnie nie wychwycono sygnału od śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej po dekompresji 2 min/6 mH₂O i 4 min/3 mH₂O. Po ekspozycji *FN* i dekompresji 4 min/3 mH₂O nie zaobserwowano sygnału od śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej po dekompresji i podczas badania po 20 min od zakończenia dekompresji. Po 80 min od zakończenia dekompresji zaobserwowano w żyłce podobojczykowej po lewej stronie sygnał {111,111,112}⁵³ a po 140 min w tym samym miejscu sygnał {111,000,000}⁵⁴, który po badaniu po upływie 215 min samoistnie zanikł.

Inny nurek poddano ekspozycji *AMWe₂* z taką samą dekompresją jak nurek poprzedni. Bezpośrednio po dekompresji zaobserwowano w lewej żyłce podobojczykowej sygnały od wolnej fazy gazowej {222,212,213}⁵⁵, podczas powtórnego badania po 35 min od ukończenia dekompresji zaobserwowano w lewej żyłce podobojczykowej sygnały {333,323,323}⁵⁶.

⁵¹nie zastosowano rekompresji tlenowej jedynie obserwowano przez cały czas nurka – nie wystąpiły żadne objawy *DCS*

⁵²inżektor 0 – 45

⁵³ $g = I$

⁵⁴ $g = I$

⁵⁵ $g = II$

⁵⁶ $g = III$

STUDY AT THE DEPTH OF 40 mH₂O

In order to determine the initial threat posed by *FN* profiles, the decompression profiles for the depth of 40 mH₂O were developed in such a way that the *AMWe₂* profile has double decompression time compared to *FN*, and the *AMWe₁* profile has double decompression time compared to the *AMWe₂* profile. Five dives were conducted in time $\tau = 30 \text{ min}$, with the use of premix *Nx 40%O₂/N₂*⁵¹ as breathing mixture. The load was adjusted by divers. The following decompression profiles were applied: *AMWe₁ – e₂* and *FN* for the depth of 40 mH₂O.

The average load for these dives, expressed in the pressure force *F* exerted on the horizontal plate connected to a strain gauge, was at the level of $F \in \{1.74; 1.29; 1.73; 2.32; 2.60\} \text{ kG}$. The physical effort was distributed in time $\tau \in \{27; 26; 24; 25; 24\} \text{ min}$, with no intervals. It can be roughly assumed that the average force observed $F \in \{1.74; 1.29; 1.73; 2.32; 2.60\} \text{ kG}$ corresponded to the average speeds of overcoming distances expressed in knots $v \in \{0.7; 0.6; 0.7; 0.9; 0.9\} \text{ kn}$.

The divers' heart rate during all the dives remained at almost the same level of $HR = 100 \text{ min}^{-1}$.

One of the divers was subjected to *AMWe₁ – AMWe₂* and *FN* exposures. In the *AMWe₁* exposure, no presence of intravascular bubbles was detected after 4 min/6 mH₂O and 6 min/3 mH₂O decompressions. The same happened after *AMWe₂* exposure and after 2 min/6 mH₂O and 4 min/3 mH₂O decompressions. After *FN* exposure and 4 min/3 mH₂O decompression, there was still no presence of intravascular bubbles both after decompression and during an examination carried out 20 min after the end of decompression. Eighty minutes after the end of decompression, a signal {111,111,112}⁵² was detected in the left subclavian vein; after 140 min, the signal in the same place was {111,000,000}⁵³; after 215 min, it disappeared completely.

Another diver was exposed to *AMWe₂* with the same decompression as the previous one. Immediately after decompression, a signal of intravascular bubbles presence {222,212,213}⁵⁴ was detected in the in the left subclavian vein; during the second examination, after 35 min after the end of decompression, the following signal was detected in the same vein: {333,323,323}⁵⁵. Recompression was applied according to *Table 5 USN*; after one oxygen breathing cycle⁵⁶, no presence of intravascular bubbles was recorded.

⁵¹ injector 0 – 45

⁵² *g = I*

⁵³ *g = I*

⁵⁴ *g = II*

⁵⁵ *g = III*

⁵⁶ 64 min after the end of decompression

Zastosowano rekompresję według *Tabeli 5 USN*, po 1 cyklu oddychania tlenem⁵⁷ nie obserwowano już obecności wolnej fazy gazowej.

Następny nurek poddany był ekspozycji $AMWe_1$ z taką samą dekompresją jak jak poprzedni. Bezpośrednio po dekompresji zaobserwowano w lewej żyłce podobojczykowej sygnały od wolnej fazy gazowej {112,112,121}⁵⁸, po przysznicy w 15 min od ukończenia nurkowania zaobserwowano w tym samym miejscu sygnał {212,113,312}⁵⁹, w 60 min {212,213,122}⁶⁰ i w 105 min zaobserwowano sygnał {112,212,112}⁶¹. Zdecydowano się na rekompresję według *Tabeli 5 USN*, po 1 cyklu oddychania tlenem⁶² nie obserwowano już obecności wolnej fazy gazowej.

WYNIKI NURKOWAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Przykładowe wyniki nurkowania eksperymentalnego pokazano na rys.7. Pełne wyniki badań można znaleźć w monografii (Kłós R., 2011).

NURKOWANIA STANDARDOWE

Organizacja nurkowań standardowych była taka sama jak nurkowań eksperymentalnych. Różnica polegała na planowaniu dekompresji w oparciu o tabele powietrzne i metodę obliczania azotowej głębokości równoważnej (Kłós R., 2011). Powietrzne tabele dekompresyjne są obliczane ze względu na odsycanie organizmu ludzkiego z azotu. Jeśli o oddychania w aparatach nurkowych stosuje się nitroks o zawartościach tlenu powyżej $Nx > 21\%, O_2/N_2$, to obniżenie ciśnienia cząstkowego azotu umożliwia skrócenie czasu dekompresji w stosunku do dekompresji powietrznej. Możliwe jest też zastosowanie dekompresji tlenowej w celu dalszego zmniejszenia czasu jej trwania. Wychodząc z założenia o identycznej reakcji organizmu bez względu na to, w jaki sposób powstało jego nasycenie azotem, można obliczyć tzw. azotową głębokość równoważną – *EAD*⁶³.

Azotowa głębokość równoważna *EAD* odpowiada ciśnieniu całkowitemu na głębokości nurkowania, przy którym ciśnienie cząstkowe azotu dla powietrza⁶⁴ będzie identyczne z ciśnieniem cząstkowym azotu we wdychanym przez nurka nitroksie.

Dla aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, wartość azotowej głębokości równoważnej musi być odniesiona do ciśnienia cząstkowego azotu w nitroksie wdychanym przez nurka. Wartość tę można oszacować jedynie z dobrze poznanego⁶⁵ modelu matematycznego opisującego wentylację przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego.

⁵⁷ 64 min od ukończenia dekompresji

⁵⁸ $g = I$

⁵⁹ $g = I +$

⁶⁰ $g = I +$

⁶¹ $g = I$

⁶² 145 min od ukończenia dekompresji

⁶³ Equivalent Air Depth

⁶⁴ można przyjąć, że stwierdzenie to jest równoważne realnej sytuacji oddychania powietrzem z aparatu nurkowego o otwartym obiegu czynnika oddechowego

⁶⁵ zwalidowanego

The next diver was subjected to exposure AMW_{e_1} , with the same decompression as the previous one. Immediately after decompression, a signal of intravascular bubbles presence $\{112,112,121\}$ ⁵⁷ was detected in the in the left subclavian vein; after a shower taken 15 min after the dive, the signal $\{212,113,312\}$ ⁵⁸ was detected in the same place; after 60 min it was $\{212,213,122\}$ ⁵⁹ and after 105 min it was $\{112,212,112\}$ ⁶⁰. Recompression was applied according to *Table 5 USN*; after one oxygen breathing cycle⁶⁰, no presence of intravascular bubbles was recorded.

RESULTS OF EXPERIMENTAL DIVES

Sample results of experimental diving are shown in **Figure 7**. Full results can be found in the monograph (Kłos R., 2011).

STANDARD DIVING

The organization of standard dives was the same as the one of experimental dives. The difference lay in planning decompression on the basis of air tables and in the method of calculating equivalent air depth (Kłos R., 2011). Air decompression tables are prepared on the basis of the level of nitrogen desaturation. If nitrox $Nx > 21\%, O_2/N_2$ is used in breathing apparatuses, reducing the partial pressure of nitrogen can reduce the decompression time, compared to air decompression. It is possible to use oxygen decompression in order to reduce its duration even further. If we assume that the body responses are the same, regardless of how it was saturation with nitrogen, we can calculate *EAD* - equivalent air depth.

The equivalent air depth (*EAD*) corresponds to the total pressure at the dive depth, at which the partial pressure of nitrogen in the air⁶¹ will be identical to the partial pressure of nitrogen in the nitrox inhaled by the diver. For a semi-closed circuit breathing apparatus, the value of equivalent air depth must be related to the partial pressure of nitrogen in the nitrox inhaled by the diver. This value can be estimated only from a validated mathematical model describing the ventilation of the breathing space in a diving apparatus.

AIM OF STUDY

The aim of standard dives carried out on the basis of the standard method for calculating the equivalent air depth and *Table 3 MW* was to:

- determine the maximum decrease in oxygen content in the semi-closed circuit breathing apparatus CRABE,
- determine the need and way to carry out the ventilation procedures in the breathing space of the CRABE,
- determine the effectiveness of conducting oxygen decompression.

⁵⁷ $g = l$

⁵⁸ $g = l +$

⁵⁹ $g = l +$

⁶⁰ $g = l$

⁶⁰ 145 min after the end of decompression

⁶¹ it can be assumed that this statement is equivalent to the real situation of breathing air with an open circuit breathing apparatus

CEL BADAŃ

Nurkowania standardowe w oparciu o metodę obliczania azotowej głębokości równoważnej oraz powietrzną *Tabelę 3 MW* prowadzono celem:

- określenia maksymalnego spadku zawartości tlenu w półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego aparatu CRABE,
- określenia konieczności i sposobu przeprowadzania procedur płukania przestrzeni oddechowej aparatu typu CRABE,
- określenia skuteczności prowadzenia dekompresji tlenowej.

Część nurkowań przeprowadzono bez stosowania przepłukiwania przestrzeni oddechowej oraz stosowania dekompresji tlenowej – **tab.8**. Widać z nich, że nurkowania na głębokości rzędu $50\text{ mH}_2\text{O}$ zaczynają stwarzać zwiększone zagrożenie *DCS*.

Gdy nie można przeprowadzić dekompresji tlenowej po nurkowaniach na głębokości powyżej $35\text{ mH}_2\text{O}$ zaleca się, już przy wysiłku średnim, stosowanie dekompresji wydłużonej.

Można także zauważyć, ujawnianie się skłonności osobniczych do zmniejszenia tolerancji na dekompresję, czy warunki nurkowania – nurek *LAMBDA*⁶⁶. Z tego powodu warto jest prowadzić badania przesiewowe nurków podczas ćwiczeń na symulatorze nurkowania zamontowanym w kompleksie DGKN-120.

BADANIA WENTYLACJI NA $15\text{ mH}_2\text{O}$

Badania wentylacji na głębokości $15\text{ mH}_2\text{O}$ przy wykorzystaniu nitroksu $\text{Nx } 60\%_{\text{v}}\text{O}_2/\text{N}_2$ do zasilania aparatu nurkowego CRABE przeprowadzono dla sprawdzenia czy możliwe jest zwiększenie koncentracji tlenu w czynniku oddechowym wdychanym przez nurka celem zminimalizowania czasu dekompresji. Zastosowano następującą procedurę:

⁶⁶musiało być podjęte leczenie po nurkowaniu na głębokość $39\text{ mH}_2\text{O}$; nurek LAMBDA miał wcześniej uraz lewego ramienia i po wyleczeniu zaobserwowano zwiększoną podatność na wyłapywanie śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej w żyłę podobojczykowej

Some dives were carried out without ventilating the breathing space and conducting oxygen decompression – **Table 8**. We can see that dives at a depth of $50\text{ mH}_2\text{O}$ start posing an increased risk of *DCS*.

When no oxygen decompression can be applied after dives to depths of more than $35\text{ mH}_2\text{O}$, it is recommended, even at medium effort, to carry out extended decompression.

You may also notice an individual tendency to reduce tolerance to decompression or diving conditions, as in the case of *LAMBDA* diver⁶³. For this reason, it is useful to conduct screening of divers during diving exercises on the simulator installed in the DGKN-120 complex.

STUDY OF VENTILATION AT THE DEPTH OF 15 MH₂O

The studies of ventilation at the depth of $15\text{ mH}_2\text{O}$, with the use of nitrox $\text{Nx } 60\%_{\text{v}}\text{O}_2/\text{N}_2$, were conducted to verify whether it was possible to increase the concentration of oxygen in the breathing gas mixture inhaled by the diver to minimize decompression time. The following procedures were employed:

⁶³ treatment had to be administered after the dive at the depth of $39\text{ mH}_2\text{O}$; diver *LAMBDA* had previously had a left shoulder injury and after recovering, an increased susceptibility to intravascular bubbles formation in the subclavian vein was observed

Tabela 8.

Rezultaty nurkowań standardowych przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE bez stosowania płukania przestrzeni oddechowej.

LP	Nurek	Data	Plan nurkowania			Uwagi
			Głębokość	Czas pobytu na maksymalnej głębokości	Czas nurkowania	
			[mH ₂ O]	[min]	[min]	
1	Jota	08.02.2010	30	40	54	
2		11.02.2010	30	30	48	
3		21.04.2010	39	30	66	
4		22.04.2010	49	20	66	OS=I-,LR=I- bez leczenia
5	Lambda	20.04.2010	39	30	66	OS=I, LR=III+ TT 5
6		22.04.2010	49	20	66	LR=II inhalacja O ₂ 6m/30min
7		27.04.2010	49	20	67	OS=I, LR=II inhalacja O ₂ 6m/30min
8		29.04.2010	49	20	65	OS=I, LR=II, PR=I- bez leczenia
9	Mi	08.03.2010	30	20	26	
10		20.04.2010	39	30	68	
11		28.04.2010	49	20	65	PR=I- bez leczenia
12		30.04.2010	49	20	65	
12	Kappa	05.03.2010	30	20	26	
14		09.03.2010	30	20	30	
15	Ni	04.03.2010	30	30	47	
16		10.03.2010	30	20	27	
17	Eta	25.02.2010	30	30	46	

Table 8.

The results of standard dives with the CRABE apparatus, without ventilating the breathing space.

No	Diver	Date	Diving plan			Comments
			Depth	Time at the max depth	Diving time	
			[mH ₂ O]	[min]	[min]	
1	Jota	08.02.2010	30	40	54	
2		11.02.2010	30	30	48	
3		21.04.2010	39	30	66	
4		22.04.2010	49	20	66	OS=I-, LR=I- no treatment
5	Lambda	20.04.2010	39	30	66	OS=I, LR=III+ TT 5
6		22.04.2010	49	20	66	LR=II O ₂ inhalation, 6m/30min
7		27.04.2010	49	20	67	OS=I, LR=II O ₂ inhalation, 6m/30min
8		29.04.2010	49	20	65	OS=I, LR=II, PR=I- no treatment
9	Mi	08.03.2010	30	20	26	
10		20.04.2010	39	30	68	
11		28.04.2010	49	20	65	PR=I- no treatment
12		30.04.2010	49	20	65	
12	Kappa	05.03.2010	30	20	26	
14		09.03.2010	30	20	30	
15	Ni	04.03.2010	30	30	47	
16		10.03.2010	30	20	27	
17	Eta	25.02.2010	30	30	46	

1. Tuż przed rozpoczęciem zanurzania nurek wykonywał trzykrotne płukanie przestrzeni oddechowej⁶⁷. Polegało ono na szybkim zamknięciu butli aparatu nurkowego, wysaniu przez ustnik czynnika oddechowego i wydmuchanie go nosem⁶⁸ poprzez maskę do środowiska wodnego. Następnie otwarciu butli i pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej premiksem⁶⁹. Czynności te powtarzano trzykrotnie.
2. Podczas pobytu na dnie nurek płukał co 30 min przestrzeń oddechową aparatu nurkowego. Polegało to na szybkim głębokim wdechu⁷⁰, wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym czynnikiem oddechowym⁷¹ i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu.
3. Wynurzenie poprzedzone było procedurą płukania przestrzeni oddechowej. Polegała ona na szybkim głębokim wdechu⁷², wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym czynnikiem oddechowym⁷³ i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu. Następnie spokojnym oddychaniem ok. 30 s i powtórnym przeprowadzeniu płukania. Procedura płukania powtarzana była trzykrotnie⁷⁴.

Wyniki badań wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego CRABE nitroksenem $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ na głębokości 15 mH₂O zebrano w **tab.9**. Widać stąd, że średni spadek zawartości tlenu wyniósł ok. 7,5%_vO₂ a maksymalny ponad 8%_vO₂⁷⁵.

Analizując wyniki przeprowadzonych czterech nurkowań można stwierdzić, że wykonanie wentylacji na głębokości 15 mH₂O powoduje wzrost zawartości tlenu utrzymujący się jedynie przez 10 min, co jest zgodne z obliczeniami teoretycznymi (5). Tak krótkotrwały efekt nie może być brany pod uwagę w celu ustanowienia bardziej optymalnego profilu dekompresji. Wykonanie wentylacji aparatu nurkowego przed dekompresją podwyższa do bezpiecznych wartości zawartość tlenu w cyrkulującym czynnikiem oddechowym przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa dekompresji, dlatego zaleca się jej obligatoryjne stosowanie.

⁶⁷czynności takie zaleca się wykonać także podczas przygotowania aparatu przed nurkowaniem i pozostawienia go uszczelnionego do chwili rozpoczęcia nurkowania, jednak nie zastępuje to obowiązkowego płukania przestrzeni oddechowej przed nurkowaniem, gdyż procedura ta dotyczy także płukania płuc nurka

⁶⁸lub ustami po uprzednim zamknięciu ustnika

⁶⁹w tym czasie nie należy oddychać z aparatu nurkowego

⁷⁰należy zwrócić baczność uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności i zapobieżeniu możliwości wyrzucenia przy tej czynności, dlatego objętość wdechu musi być dostosowana do aktualnego wyważenia – jeśli możliwe, to należy odpowiednio skorygować pływalność przez zmianę pływalności skafandra lub kompensatora pływalności

⁷¹zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

⁷²należy zwrócić baczność uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności i zapobieżeniu możliwości wyrzucenia przy tej czynności

⁷³zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

⁷⁴trzy razy po trzy wdechy i wydechy przedzielone 30 s oddychaniem z aparatu

⁷⁵lecz jest to wartość chwilowa

1. Just before submersion, the diver ventilated the breathing space three times⁶⁴. It consisted in closing the cylinder, sucking the breathing mixture through the mouthpiece, and blowing it out through the nose⁶⁵ and a mask into the aquatic environment. Then the cylinder was opened to let the breathing space fill with premix⁶⁶. These steps were repeated three times.
2. During his stay at the bottom, the diver ventilated the breathing space of his diving apparatus every 30 minutes. This meant⁶⁷ exhalation through the nose, letting the breathing space fill with fresh breathing gas mixture⁶⁸, and repeating the inhalation-exhalation step three times.
3. Ascending was preceded by ventilating the breathing space. It consisted in a quick deep inhalation⁶⁹, exhalation through the nose, letting the breathing space fill with fresh breathing gas mixture⁷⁰, and repeating the inhalation-exhalation step three-times, followed by 30 s of quiet breathing and ventilating the breathing space again. The whole ventilation process was repeated three times⁷¹.

The results of ventilating the breathing space of the CRABE apparatus with nitrox $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of 15 mH₂O are presented in **Table 9**. It can be seen that the average decrease in oxygen content was approximately 7.5%_vO₂, and the maximum was more than 8%_vO₂⁷².

Having analyzed the results of the four dives, we can conclude that conducting ventilation at the depth of 15 mH₂O increases oxygen content for only 10 min, which is consistent with the theoretical calculations (5). Such a short-term effect cannot be taken into account in order to establish a more optimal decompression profile. Conducting a ventilation of a diving apparatus before decompression causes a safe increase in oxygen content in the circulating breathing gas mixture, contributing to the safety of decompression, so its mandatory application is recommended.

⁶⁴ such a procedure is also recommended while preparing the apparatus before a dive; it should be left sealed until the start of the dive; however, it does not replace the mandatory ventilation of the breathing space before diving, because this procedure also applies to ventilating the diver's lungs

⁶⁵ or through the mouth, after closing the mouthpiece

⁶⁶ the diver should not breathe with the apparatus at that time

⁶⁷ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy and preventing the possibility of expulsion during this action, because the volume of inspiration must be adapted to the current balance - if possible, the buoyancy should be adjusted by changing the buoyancy of the suit or buoyancy compensator

⁶⁸ it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

⁶⁹ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy and preventing the possibility of expulsion during this action

⁷⁰ it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

⁷¹ three series of three inhalations and three exhalations, separated by 30 s of breathing with the apparatus

⁷² but it is an instantaneous value

Tabela 9.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego nitroksenem $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ na głębokości $15\ mH_2O$.

Nurek	data	Zawartości tlenu [$\%_v\ O_2$]			
		minimalna	średnia	w nitroksie	spadek
Epsilon	11.01.2011	51,0	54,07	60	5,93
Jota	12.01.2011	48,5	51,71	60	8,29
Kappa	12.01.2011	49,0	51,83	60	8,17
Eta	13.01.2011	49,0	51,73	60	8,27
Delta	13.01.2011	50,0	53,34	60	6,66
minimalna		48,5	51,71	maksymalna	8,29
średnia		49,5	52,54	średnia	7,46

Wyniki szacowania według formuły (3) wartości średniego strumienia zużywanego tlenu \dot{v}_O oraz wentylacji płuc \dot{V} dla uśrednionych wyników nurkowań przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE dla premiksu $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ na głębokości $15\ mH_2O$ podano w **tab.10**. Przy szacowaniu okazało się, że zaobserwowany średni wysiłek można sklasyfikować jako umiarkowany według **tab.2** oraz wartość średnią stosunku C_0 strumienia konsumowanego tlenu \dot{v}_O do strumienia akcji oddechowej \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). Dodatkowo szacowania te są spójne z wynikami otrzymanymi z innych nurkowań.

NURKOWANIA NA GŁĘBOKOŚCI $30\ mH_2O$

Nurkowania na głębokości $30\ mH_2O$ z czasem pobytu na dnie ok. $60\ min$ prowadzono przy wykorzystaniu nitroksu $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ do zasilania aparatu nurkowego CRABE. Podczas nurkowań sprawdzano, czy możliwe jest zwiększenie koncentracji tlenu w czynniku oddechowym wdychanym przez nurka celem zminimalizowania czasu dekompresji oraz sprawdzono skuteczność dekompresji tlenowej. Zastosowano następującą procedurę:

Table 9.

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 60\%_vO_2/N_2$ at the depth of $15\ mH_2O$.

Diver	Date	Oxygen content [$\%_vO_2$]			
		minimum	average	in nitrox	decrease
Epsilon	11.01.2011	51,0	54,07	60	5,93
Jota	12.01.2011	48,5	51,71	60	8,29
Kappa	12.01.2011	49,0	51,83	60	8,17
Eta	13.01.2011	49,0	51,73	60	8,27
Delta	13.01.2011	50,0	53,34	60	6,66
	minimum	48,5	51,71	maximum	8,29
	average	49,5	52,54	average	7,46

The results of estimating the average oxygen consumption \dot{v}_O and lung ventilation \dot{V} , according to formula (3), for average results of dives with the CRABE rebreather and premix $Nx\ 60\%_vO_2/N_2$ at the depth of $15\ mH_2O$ are presented in **Table 10**. While estimating, it turned out that the observed average physical activity can be classified as moderate according to **Table 2**, with the average value of the ratio C_O of oxygen consumed \dot{v}_O to lung ventilation \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). In addition, the estimations are consistent with the results obtained from other dives.

DIVES AT THE DEPTH OF $30\ mH_2O$

Diving at the depth of $30\ mH_2O$ in time around $60\ min$ was performed using nitrox $Nx\ 40\%_vO_2/N_2$ in the CRABE.

During the dives, it was tested whether it was possible to increase the concentration of oxygen in the breathing gas mixture inhaled by the diver in order to minimize decompression time; the effectiveness of oxygen decompression was also tested. The following procedure was applied:

Tabela 10

Wyniki szacowania według formuły (2.3) wartości średniego strumienia zużywanego tlenu oraz wentylacja płuc dla uśrednionych wyników nurkowań przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE dla zastosowanego premiksu $Nx 60\%_v O_2/N_2$ na głębokości 15 mH₂O.

$p =$	250			kPa
$k =$	10,63			$m^3 \cdot m^{-3}$
$C_0 =$	0,0352	0,0480	0,0552	$\frac{dm^3 \cdot min^{-1}}{dm^3 \cdot min^{-1}}$
$x_w =$	0,6			$m^3 \cdot m^{-3}$
$u =$	0,5			dm^3
$\dot{v} =$	0,88	1,2	1,38	$dm^3 \cdot min^{-1}$
$\dot{V} =$	25	25	25	$dm^3 \cdot min^{-1}$
$x_s =$	0,540	0,518	0,506	$m^3 \cdot m^{-3}$

gdzie: p – ciśnienie zewnętrzne [kPa], k – stosunek objętości wentylowanych dla małego i dużego worka [$m^3 \cdot m^{-3}$], C_0 – stosunek strumienia konsumowanego tlenu do strumienia akcji oddechowej [$\frac{dm^3 \cdot min^{-1}}{dm^3 \cdot min^{-1}}$], x_w – ułamek molowy tlenu w świeżym czynniku oddechowym [$m^3 \cdot m^{-3}$], u – objętość worka małego [dm^3], \dot{v} – strumień zużywanego tlenu [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{V} – wentylacja płuc [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_s – stabilna zawartość tlenu w czynniku wdychanym przez nurka [$m^3 \cdot m^{-3}$].

1. Tuż przed rozpoczęciem zanurzania nurek wykonywał trzykrotne płukanie przestrzeni oddechowej⁷⁶. Polegało ono na szybkim zamknięciu butli aparatu nurkowego, wysaniu przez ustnik czynnika oddechowego i wydmuchanie go nosem⁷⁷. Następnie otwarciu butli i pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym czynnikiem gazowym⁷⁸. Czynności te powtarzano trzykrotnie.
2. Podczas pobytu na dnie nurek płukał po 30 min przestrzeń oddechową aparatu nurkowego. Polegało to na szybkim głębokim wdechu⁷⁹, wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym czynnikiem oddechowym⁸⁰ i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu.
3. Wynurzenie poprzedzone było procedurą płukania przestrzeni oddechowej. Polegała ona na szybkim głębokim wdechu⁸¹, wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym czynnikiem oddechowym⁸² i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu.

⁷⁶czynności takie zaleca się wykonać także podczas przygotowania aparatu przed nurkowaniem i pozostawienia go uszczelnionego do chwili rozpoczęcia nurkowania, jednak nie zastępuje to obowiązkowego płukania przestrzeni oddechowej przed nurkowaniem, gdyż procedura ta dotyczy także płukania płuc nurka

⁷⁷lub ustami po uprzednim zamknięciu ustnika

⁷⁸w tym czasie nie należy oddychać z aparatu nurkowego

⁷⁹należy zwrócić baczną uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności

⁸⁰zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

⁸¹należy zwrócić baczną uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności

⁸²zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

Table 10.

The results of estimating the average oxygen consumption and lung ventilation, according to formula (2.3), for average results of dives with the CRABE rebreather and premix $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $15\ mH_2O$.

$p =$	250			kPa
$k =$	10,63			$m^3 \cdot m^{-3}$
$C_0 =$	0,0352	0,0480	0,0552	$\frac{dm^3 \cdot min^{-1}}{dm^3 \cdot min^{-1}}$
$x_w =$	0,6			$m^3 \cdot m^{-3}$
$u =$	0,5			dm^3
$\dot{v} =$	0,88	1,2	1,38	$dm^3 \cdot min^{-1}$
$\dot{V} =$	25	25	25	$dm^3 \cdot min^{-1}$
$x_s =$	0,540	0,518	0,506	$m^3 \cdot m^{-3}$

where: p – ambient pressure [kPa], k – ratio of ventilated volume of small bag to large bag [$m^3 \cdot m^{-3}$], C_0 – ratio of oxygen consumed to lung ventilation [$\frac{dm^3 \cdot min^{-1}}{dm^3 \cdot min^{-1}}$], x_w – mole fraction of oxygen in fresh breathing gas mixture [$m^3 \cdot m^{-3}$], u – small bag volume [dm^3], \dot{v} – oxygen consumption [$dm^3 \cdot min^{-1}$], \dot{V} – lung ventilation [$dm^3 \cdot min^{-1}$], x_s – stable oxygen content in the breathing gas mixture inhaled by the diver [$m^3 \cdot m^{-3}$].

1. Just before submersion, the diver ventilated the breathing space three times⁷³. It consisted in closing the cylinder, sucking the breathing mixture through the mouthpiece, and blowing it out through the nose⁷⁴. Then the cylinder was opened to let the breathing space fill with fresh breathing gas mixture⁷⁵. These steps were repeated three times.
2. During his stay at the bottom, the diver ventilated the breathing space of his diving apparatus every **30 minutes**. This meant exhalation⁷⁶ through the nose, letting the breathing space fill with fresh breathing gas mixture⁷⁷, and repeating the inhalation-exhalation step three times.
3. Ascending was preceded by ventilating the breathing space. It consisted in a quick deep inhalation⁷⁸, exhalation through the nose, letting the breathing space fill with fresh breathing gas mixture⁷⁹, and repeating the inhalation-exhalation step three-times, followed by **30 s** of quiet breathing and ventilating the breathing space again.

⁷³ such a procedure is also recommended while preparing the apparatus before a dive; it should be left sealed until the start of the dive; however, it does not replace the mandatory ventilation of the breathing space before diving, because this procedure also applies to ventilating the diver's lungs

⁷⁴ or through the mouth, after closing the mouthpiece

⁷⁵ the diver should not breathe with the apparatus at that time

⁷⁶ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy

⁷⁷ it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

⁷⁸ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy

⁷⁹ it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

Następnie spokojnym oddychaniu ok. 30 s i powtórny przeprowadzeniu płukania. Procedura płukania powtarzana była trzykrotnie⁸³.

4. Dekompresja tlenowa była poprzedzona płukaniem przestrzeni oddechowej aparatu tlenem. Zastosowano dwie procedury zależnie od umiejętności nurka. Pierwsza polegała ona na szybkim głębokim wdechu⁸⁴, wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym tlenem⁸⁵ i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu. Następnie spokojnym oddychaniu ok. 30 s i powtórny przeprowadzeniu płukania. Procedura płukania powtórzona musiała być czterokrotnie⁸⁶. Czas płukania nie jest wliczany do odbytej dekompresji tlenowej. Druga polegała na wysaniu całej zawartości przestrzeni oddechowej aparatu i wydychaniu jej do środowiska wodnego przy zamkniętym dopływie tlenu i nitroksu. Następnie otworzeniu butli z tlenem i pozwoleniu na wypełnienie się przestrzeni oddechowej czystym tlenem. W tym czasie nurek nie oddycha z aparatu. Następnie zamykano butlę z tlenem i powtórnie powtarzana była procedura płukania. Takie postępowanie powtarzane było trzykrotnie.

Tabela 11.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego nitroksenem $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ na głębokości 30 mH₂O.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% _v O ₂]			
		minimalna	średnia	w nitroksie	spadek
Ksi	19.01.2011	31,07	34,70	40	5,30
Jota	19.01.2011	29,04	32,75	40	7,25
Eta	20.01.2011	29,38	32,20	40	7,80
Lambda	21.01.2011	29,88	32,81	40	7,19
minimalna		29,04	32,20	maksymalna	7,80
średnia		29,84	33,12	średnia	6,89

Wyniki badań wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego CRABE nitroksenem $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ na głębokości 30 mH₂O zebrano w **tab.11**.

Z **tab.11** wynika, że średni spadek zawartości tlenu wyniósł ok. 7%_vO₂ a maksymalny 7,8%_vO₂⁸⁷.

Analizując wyniki przeprowadzonych czterech nurkowań można stwierdzić, jak przy nurkowaniach na głębokość 15 mH₂O, że wykonanie wentylacji na głębokości 30 mH₂O powoduje wzrost zawartości tlenu utrzymujący się jedynie przez 10 min, co jest zgodne z obliczeniami teoretycznymi (5).

⁸³ trzy razy po trzy wdechy i wydechy przedzielone 30 s oddychaniem z aparatu

⁸⁴ należy zwrócić baczną uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności

⁸⁵ zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

⁸⁶ cztery razy po trzy wdechy i wydechy przedzielone 30 s oddychaniem z aparatu

⁸⁷ lecz jest to wartość chwilowa

The whole ventilation process was repeated three times⁸⁰.

4. Oxygen decompression was preceded by ventilating the breathing space with oxygen. Two procedures were applied, depending on the diver's abilities. The first one consisted in a quick deep inhalation⁸¹, exhalation through the nose, letting the breathing space fill with fresh oxygen⁸², and repeating the inhalation-exhalation step three-times, followed by 30 s of quiet breathing and ventilating the breathing space again. The whole ventilation process was repeated four times⁸³. Ventilation time is not included in the oxygen decompression time. The second procedure consisted in sucking all the breathing mixture and blowing it out to the aquatic environment, with a closed flow of oxygen and nitrox, then opening then the cylinder to let the breathing space fill with fresh pure oxygen. During this time, the diver is not breathing from the apparatus. Then the closed bottle of oxygen and re-washing procedure was repeated. This procedure was repeated three times. Then the cylinder was closed and the whole ventilation procedure was repeated three times.

Table 11.

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $30\ mH_2O$.

Diver	Date	Oxygen content [$\%_v\ O_2$]			
		minimum	average	in nitrox	decrease
Ksi	19.01.2011	31,07	34,70	40	5,30
Jota	19.01.2011	29,04	32,75	40	7,25
Eta	20.01.2011	29,38	32,20	40	7,80
Lambda	21.01.2011	29,88	32,81	40	7,19
minimum		29,04	32,20	maximum	7,80
average		29,84	33,12	average	6,89

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $30\ mH_2O$ are presented in **Table 11**.

Table 11 shows that the average decline in oxygen content was approximately $7\%_v\ O_2$, and the maximum – $7.8\%_v\ O_2$ ⁸⁴.

Having analyzed the results of the four dives, we can conclude that, as it was in the case of dives at the depth of $15\ mH_2O$, conducting ventilation at the depth of $30\ mH_2O$ increases oxygen content for only 10 min, which is consistent with the theoretical calculations (5). Such a short-term effect cannot be taken into account in order to establish a more optimal decompression profile.

⁸⁰ three series of three inhalations and three exhalations, separated by 30 s of breathing with the apparatus

⁸¹ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy

⁸² it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

⁸³ four series of three inhalations and three exhalations, separated by 30 s of breathing with the apparatus

⁸⁴ but it is an instantaneous value

Tak krótkotrwały efekt nie może być brany pod uwagę w celu ustanowienia bardziej optymalnego profilu dekompresji. Wykonanie wentylacji aparatu nurkowego przed dekompresją podwyższa do wartości bezpiecznych zawartość tlenu w cyrkulującym czynniku oddechowym przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa dekompresji, dlatego zaleca się jej obligatoryjne stosowanie.

Należy zauważyć, że zbyt długi czas oddychania z aparatu nurkowego do rozpoczęcia nurkowania może spowodować zjawiska hipoksyczne⁸⁸, więc nurkowie powinni przełączać się jednocześnie na oddychanie z aparatu i jak najszybciej rozpocząć zanurzenie. Wykonano podobnie jak poprzednio szacowania według formuły (3) wartości średniego strumienia zużywanego tlenu oraz wentylacja płuc dla uśrednionych wyników nurkowań przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE dla premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $30 mH_2O$ dochodząc do wniosku, że zaobserwowany wysiłek średni można sklasyfikować, jako umiarkowany według **tab.2** oraz wartość średnią stosunku C_0 strumienia konsumowanego tlenu \dot{V}_0 do strumienia akcji oddechowej \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). Dodatkowo szacowania te są spójne z wynikami otrzymanymi dla nurkowań na innych głębokościach.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości $15 mH_2O$ po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $30 mH_2O$ zebrano w **tab.12**. Widać z nich, że preferowaną metodą jest sposób związany z zamykaniem butli tlenowej. Jednak, gdy nurek nie jest dostatecznie wyszkolony może mieć obawy ze stosowaniem tego wariantu płukania lub może mieć problemy z utrzymaniem pływalności i w ten sposób zmieni warunki programu dekompresji. W takim przypadku można stosować, opisaną wcześniej, równoważną procedurę płukania bez zamykania butli.

Podczas badań potwierdzono, ujawnione wcześniej skłonności osobnicze obniżonej tolerancji na dekompresję, czy warunki nurkowania u nurka **LAMBDA** – **tab.8**.

Granica głębokości nurkowania dla premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ powinna zostać określona na ok. $35 mH_2O$, gdyż dozwolone ekspozycje tlenowe nie powinny przekraczać granicy ciśnienia cząstkowego tlenu wynoszącej $160 kPa$.

Tabela 12.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości $15 mH_2O$ po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $30 mH_2O$.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% _v O ₂]			
		minimalna	średnia	tlen	spadek
Ksi	19.01.2011	94,20	97,63	100	2,37
Jota	19.01.2011	95,78	97,62	100	2,38
Eta	20.01.2011	94,09	96,93	100	3,07
Lambda	21.01.2011	91,22	97,15	100	2,85
minimalna		91,22	96,93	maksymalna	3,07
średnia		93,82	97,33	średnia	2,67
Nurek LAMBDA Doppler // bez leczenia Nurek: OK					
Nurek ETA płukanie bez zamykania butli tlenowej					

⁸⁸dla premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ nie jest wykorzystywany eżektor

Conducting a ventilation of a diving apparatus before decompression causes a safe increase in oxygen content in the circulating breathing gas mixture, contributing to the safety of decompression, so its mandatory application is recommended. It should be noted that if a diver breathes the mixture from a diving apparatus for too long before the start of his dive, he might be affected by hypoxia⁸⁵, so divers should start breathing from the apparatus at the time of submersion.

As before, estimation of the average oxygen consumption \dot{v}_O and lung ventilation \dot{V} , according to formula (3) was performed, for average results of dives with the CRABE rebreather and premix $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $30\ mH_2O$. The observed average physical activity can be classified as moderate according to **Table 2**, and the average value of the ratio C_0 of oxygen consumed \dot{v}_O to lung ventilation \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). Additionally, the estimations are consistent with the results obtained from dives at different depths.

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $15\ mH_2O$, after a dive at the depth of $30\ mH_2O$ are presented in **Table 12**. We can see the method where the cylinder is closed is the preferred one. However, when the diver is not adequately trained, he may have doubts regarding this option, or he may have problems with maintaining buoyancy and thus will change decompression conditions. In this case, the procedure without closing the cylinder described above can be applied.

The study confirmed the previously observed tendency to reduce tolerance to decompression or diving conditions in the case of **LAMBDA** diver – **Table 8**.

Dive depth limit for premix $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ should be determined at about $35\ mH_2O$, as the allowed oxygen exposures should not exceed the limit of oxygen partial pressure of $160\ kPa$.

Table 12.

The results of the breathing space ventilation with oxygen at the depth of $15\ mH_2O$, after a dive at the depth of $30\ mH_2O$ with premix $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$.

Diver	Date	Oxygen content [% _v O ₂]			
		minimum	average	oxygen	decrease
Ksi	19.01.2011	94,20	97,63	100	2,37
Jota	19.01.2011	95,78	97,62	100	2,38
Eta	20.01.2011	94,09	96,93	100	3,07
Lambda	21.01.2011	91,22	97,15	100	2,85
minimum		91,22	96,93	maximum	3,07
average		93,82	97,33	average	2,67
LAMBDA diver Doppler // without treatment: OK					
ETA diver – ventilation without closing the cylinder					

⁸⁵ for premix $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$, no injector is used

NURKOWANIA NA GŁĘBOKOŚCI 35 mH₂O

Nurkowania na głębokości 35 mH₂O z czasem pobytu na dnie ok. 30 min prowadzono przy wykorzystaniu premiksu Nx 40%_vO₂/N₂ do zasilania aparatu nurkowego CRABE. Podczas nurkowań stosowano tę samą procedurę, co dla głębokości 30 mH₂O z tą różnicą⁸⁹, że dekompresja była poprzedzona płukaniem przestrzeni oddechowej aparatu tlenem przy zastosowaniu procedury polegającej na wykonywaniu szybkiego i głębokiego wdechu⁹⁰, wydechu nosem, pozwoleniu na napełnienie się przestrzeni oddechowej świeżym tlenem⁹¹ i trzykrotnym powtórzeniem wdechu i wydechu. Następnie spokojnym oddychaniem ok. 30 s i powtórnym przeprowadzeniu płukania. Procedura płukania powtarzana była czterokrotnie⁹². Czas płukania nie jest wliczany do odbytej dekompresji tlenowej. Badania prowadzono celem ustalenia maksymalnego ciśnienia cząstkowego tlenu podczas pobytu na dnie.

Wyniki badań wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego CRABE nitroksem Nx 40%_vO₂/N₂ na głębokości 30 mH₂O zebrano w tab.13. Z tabeli wynika, że średni spadek zawartości tlenu wyniósł niecałe 7%_vO₂ a maksymalny 8,7%_vO₂⁹³.

Tabela 13.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego nitroksem Nx 40%_vO₂/N₂ na głębokości 30 mH₂O.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% _v O ₂]			
		minimalna	średnia	w nitroksie	spadek
Ypsilon	24.01.2011	27,43	34,70	40	5,30
Tau	25.01.2011	28,82	32,99	40	7,01
Fi	26.01.2011	26,08	32,94	40	7,06
Pi	27.01.2011	30,40	33,84	40	6,16
Omikron	28.01.2011	28,15	31,26	40	8,74
minimalna		26,08	31,26	maksymalna	8,74
średnia		28,18	33,15	średnia	6,85

Analizując wyniki przeprowadzonych czterech nurkowań pozwalają stwierdzić, że wykonanie wentylacji na głębokości 35 mH₂O powoduje wzrost zawartości tlenu utrzymujący się jedynie przez 10 min, co jest zgodne z obliczeniami teoretycznymi (5). Tak krótkotrwały efekt nie może być brany pod uwagę w celu ustanowienia bardziej optymalnego profilu dekompresji. Wykonanie wentylacji aparatu nurkowego przed dekompresją podwyższa do wartości bezpiecznych zawartość tlenu w cyrkulującym czynniku oddechowym przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa dekompresji, dlatego zaleca się jej obligatoryjne stosowanie.

⁸⁹ze względu na nurkowania wykonywane przez mało doświadczonych nurków

⁹⁰należy zwrócić baczną uwagę na utrzymaniu neutralnej pływalności

⁹¹zaleca się, aby w czasie napełniania przestrzeni oddechowej nurek wstrzymał oddech

⁹²cztery razy po trzy wdechy i wydechy przedzielone 30 s oddychaniem z aparatu

⁹³lecz jest to wartość chwilowa

DIVES AT THE DEPTH OF 35 MH₂O

Diving at the depth of 35 mH₂O in time around 30 min was performed using premix Nx 40%_vO₂/N₂ in the CRABE. During the dives, the same procedure as in the dives at the depth of 30 mH₂O was applied, the only difference⁸⁶ being that decompression was preceded by ventilating the breathing apparatus with oxygen, which consisted in a quick deep inhalation, exhalat⁸⁷ion through the nose, letting the breathing space fill with fresh oxygen⁸⁸, and repeating the inhalation-exhalation step three-times, followed by 30 s of quiet breathing and ventilating the breathing space again. The whole ventilation process was repeated four times⁸⁹. Ventilation time is not included in the oxygen decompression time.

The study was conducted to determine the maximum oxygen partial pressure during the dive. The results of the breathing space ventilation with nitrox Nx 40%_vO₂/N₂ at the depth of 30 mH₂O are presented in **Table 13**.

The table shows that the average decline in oxygen content was less than 7%_vO₂, and the maximum – 8.7%_vO₂⁹⁰.

Table 13.

The results of the CRABE breathing space ventilation with nitrox Nx 40%_vO₂/N₂ at the depth of 30 mH₂O .

Diver	Date	Oxygen content [% _v O ₂]			
		minimum	average	in nitrox	decrease
Ypsilon	24.01.2011	27,43	34,70	40	5,30
Tau	25.01.2011	28,82	32,99	40	7,01
Fi	26.01.2011	26,08	32,94	40	7,06
Pi	27.01.2011	30,40	33,84	40	6,16
Omikron	28.01.2011	28,15	31,26	40	8,74
minimum		26,08	31,26	maximum	8,74
average		28,18	33,15	average	6,85

Having analyzed the results of the four dives, we can conclude that conducting ventilation at the depth of 35 mH₂O increases oxygen content for only 10 min, which is consistent with the theoretical calculations (5). Such a short-term effect cannot be taken into account in order to establish a more optimal decompression profile. Conducting a ventilation of a diving apparatus before decompression causes a safe increase in oxygen content in the circulating breathing gas mixture, contributing to the safety of decompression, so its mandatory application is recommended.

⁸⁶ due to the fact that the dives were performed by inexperienced divers

⁸⁷ close attention should be paid to maintaining neutral buoyancy

⁸⁸ it is recommended that, at the time of filling the breathing space, the diver hold his breath

⁸⁹ four series of three inhalations and three exhalations, separated by 30 s of breathing with the apparatus

⁹⁰ but it is an instantaneous value

Przeprowadzone, jak poprzednio, szacowania wartości średniego strumienia zużywanego tlenu \dot{v}_O oraz wentylacji płuc \dot{V} według formuły (3) dla uśrednionych wyników nurkowań przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE dla premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $35 mH_2O$ pozwalają ustalić, że zaobserwowany średni wysiłek można sklasyfikować, jako umiarkowany według **tab.2** z wartością średnią stosunku C_0 strumienia konsumowanego tlenu \dot{v}_O do strumienia akcji oddechowej \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). Dodatkowo szacowania te są spójne z wynikami otrzymanymi dla innych nurków.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości $15 mH_2O$ po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $35 mH_2O$ zebrano w **tab.14**.

Podczas nurkowań z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ została przekroczona granica ciśnienia cząstkowego tlenu wynosząca $160 kPa$, którą ustalono za nieprzekraczalną.

Tabela 14.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości $15 mH_2O$ po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $30 mH_2O$.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% $_v O_2$]			
		minimalna	średnia	tlen	spadek
Ypsilon	24.01.2011	95,13	96,41	100	3,59
Tau	25.01.2011	93,84	94,75	100	5,25
Fi	26.01.2011	95,05	96,04	100	3,96
Pi	27.01.2011	97,07	97,73	100	2,27
Omikron	28.01.2011	96,77	97,76	100	2,24
minimalna		93,84	94,75	maksymalna	5,25
średnia		95,57	96,54	średnia	3,46
Nurek <i>YPSILON</i> i <i>SIGMA</i> Doppler poniżej // bez leczenia Nurek: OK Płukanie czterokrotne bez zamykania butli tlenowej					

NURKOWANIA NA GŁĘBOKOŚCI $45 mH_2O$

Nurkowania na głębokości $45 mH_2O$ z czasem pobytu na dnie ok. $30 min$ prowadzono przy wykorzystaniu premiksu $Nx 32,5\%_v O_2/N_2$ do zasilania aparatu nurkowego CRABE. Podczas nurkowań stosowano tę samą procedurę, co dla głębokości $35 mH_2O$. Badania prowadzono celem ustalenia bezpieczeństwa dekompresji.

Wyniki badań wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego CRABE nitroksenem $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokości $45 mH_2O$ zebrano w **tab.15**. Wynika z niej, że średni spadek zawartości tlenu wyniósł ok. $5,5\%_v O_2$ a maksymalny $7,44\%_v O_2$ ⁹⁴.

⁹⁴lecz jest to wartość chwilowa

As before, the results of estimating the average oxygen consumption \dot{v}_O and lung ventilation \dot{V} , according to formula (3), for average results of dives with the CRABE rebreather and premix $Nx\ 40\%_vO_2/N_2$ at the depth of $35\ mH_2O$ let us state that the observed average physical activity can be classified as moderate according to **Table 2**, with the average value of the ratio C_0 of oxygen consumed \dot{v}_O to lung ventilation \dot{V} (PN-EN-14143, 2004). In addition, the estimations are consistent with the results obtained from other dives.

The results of the breathing space ventilation with oxygen at the depth of $15\ mH_2O$, after a dive at the depth of $30\ mH_2O$ with premix $Nx\ 40\%_vO_2/N_2$, are presented in **Table 14**.

During dives with premix $Nx\ 40\%_vO_2/N_2$, the limit of oxygen partial pressure was exceeded above $160\ kPa$, the value which had been declared impassable.

Table 14.

The results of the breathing space ventilation with oxygen at the depth of $15\ mH_2O$, after a dive at the depth of $30\ mH_2O$ with premix $Nx\ 40\%_vO_2/N_2$.

Diver	Date	Oxygen content [% _v O ₂]			
		minimum	average	oxygen	decrease
Ypsilon	24.01.2011	95,13	96,41	100	3,59
Tau	25.01.2011	93,84	94,75	100	5,25
Fi	26.01.2011	95,05	96,04	100	3,96
Pi	27.01.2011	97,07	97,73	100	2,27
Omikron	28.01.2011	96,77	97,76	100	2,24
minimum		93,84	94,75	maximum	5,25
average		95,57	96,54	average	3,46
Divers <i>YPSILON</i> and <i>SIGMA</i> Doppler less than // no treatment, Diver: OK Four ventilations without closing the oxygen cylinder					

DIVES AT THE DEPTH OF $45\ mH_2O$

Diving at the depth of $45\ mH_2O$ in time around $30\ min$ was performed using premix $Nx\ 32.5\%_vO_2/N_2$ in the CRABE. During the dives, the same procedure as in the dives at the depth of $35\ mH_2O$ was applied. The study was conducted to determine decompression safety.

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 32.5\%_vO_2/N_2$ at the depth of $45\ mH_2O$ are presented in **Table 15**. It can be seen that the average decrease in oxygen content was approximately $5.5\%_vO_2$, and the maximum was $7.44O_2$ ⁹¹.

⁹¹ but it is an instantaneous value

Analizując wyniki przeprowadzonych czterech nurkowań można stwierdzić, tak jak poprzednio, że wykonanie wentylacji na głębokości $45\text{ mH}_2\text{O}$ powoduje wzrost zawartości tlenu utrzymujący się jedynie przez ok. 10 min , co jest zgodne z obliczeniami teoretycznymi (5). Tak krótkotrwały efekt nie może być brany pod uwagę w celu ustanowienia bardziej optymalnego profilu dekompresji. Wykonanie wentylacji aparatu nurkowego przed dekompresją podwyższa do wartości bezpiecznych zawartość tlenu w cyrkulującym czynniku oddechowym przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa dekompresji, dlatego zaleca się jej obligatoryjne stosowanie.

Tabela 15.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego nitroksenem $Nx\ 32,5\%_v\text{O}_2/N_2$ na głębokości $45\text{ mH}_2\text{O}$.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% _v O ₂]			
		minimalna	średnia	w nitroksie	spadek
Lambda	24.01.2011	24,84	26,73	32,5	5,77
Ypsilon	26.01.2011	24,67	27,19	32,5	5,31
Tau	27.01.2011	24,20	26,52	32,5	5,98
Fi	27.01.2011	24,63	27,09	33,5	6,41
Pi	28.01.2011	24,67	27,06	34,5	7,44
minimalna		24,20	26,52	Maksymalna	7,44
średnia		24,60	26,92	średnia	5,58

Należy zwrócić szczególną uwagę na pracę eżektora, gdyż w przeciwnym razie nurkowi na powierzchni grozi hipoksja. Przeprowadzone szacowania według formuły (3) wartości średniego strumienia zużywanego tlenu \dot{v}_O oraz wentylacji płuc \dot{V} dla uśrednionych wyników nurkowań przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE dla premiksu $Nx\ 32,5\%_v\text{O}_2/N_2$ na głębokości $45\text{ mH}_2\text{O}$ pozwoliły ustalić, że zaobserwowany wysiłek średni można sklasyfikować, tak jak poprzednio, jako umiarkowany.

Having analyzed the results of the four dives, we can conclude that conducting ventilation at the depth of $45\text{ mH}_2\text{O}$ increases oxygen content for only 10 min , which is consistent with the theoretical calculations (5). Such a short-term effect cannot be taken into account in order to establish a more optimal decompression profile. Conducting a ventilation of a diving apparatus before decompression causes a safe increase in oxygen content in the circulating breathing gas mixture, contributing to the safety of decompression, so its mandatory application is recommended.

Table 15.

The results of the breathing space ventilation with nitrox $Nx\ 32.5\%_v\text{O}_2/N_2$ at the depth of $45\text{ mH}_2\text{O}$.

Diver	Date	Oxygen content [% _v O ₂]			
		minimum	average	in nitrox	decrease
Lambda	24.01.2011	24,84	26,73	32,5	5,77
Ypsilon	26.01.2011	24,67	27,19	32,5	5,31
Tau	27.01.2011	24,20	26,52	32,5	5,98
Fi	27.01.2011	24,63	27,09	33,5	6,41
Pi	28.01.2011	24,67	27,06	34,5	7,44
minimum		24,20	26,52	maximum	7,44
average		24,60	26,92	average	5,58

Special attention must be paid to the work of the ejector, because otherwise the diver is in the danger of hypoxia after surfacing. The results of estimating the average oxygen consumption \dot{v}_O and lung ventilation \dot{V} , according to formula (3), for average results of dives with the CRABE rebreather and premix $Nx\ 32.5\%_v\text{O}_2/N_2$ at the depth of $45\text{ mH}_2\text{O}$ allowed to classify the observed average physical activity as moderate.

Tabela 16.

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości 15 mH₂O po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu Nx 32,5%_vO₂/N₂ na głębokości 45 mH₂O.

Nurek	data	Zawartości tlenu [% _v O ₂]			
		minimalna	średnia	tlen	spadek
Lambda	24.01.2011	96,38	97,18	100	2,82
Ypsilon	26.01.2011	96,06	96,80	100	3,20
Tau	27.01.2011	95,55	96,69	100	3,31
Fi	27.01.2011	95,09	97,39	100	2,61
Pi	28.01.2011	97,03	98,82	100	1,18
minimalna		95,09	96,69	maksymalna	3,31
średnia		96,02	97,38	średnia	2,62
Nurek <i>YPSILON</i> i <i>SIGMA</i> Doppler poniżej // bez leczenia Nurek: OK Płukanie czterokrotne bez zamykania butli tlenowej					

Tabela 17.

Rezultaty nurkowań standardowych przy wykorzystaniu aparatu nurkowego CRABE z wykorzystywaniem płukania przestrzeni oddechowej.

LP	Nurek	Data	Plan nurkowania			Uwagi
			Głębokość	Czas pobytu na maksymalnej głębokości	Czas nurkowania	
			[mH ₂ O]	[min]	[min]	
1	DELTA	18.01.2011	15	10	25	
2	EPSILON	17.01.2011	15	05	29	
3	KSI	19.01.2011	30	59	91	LR=III bez leczenia
4	JOTA	19.01.2011	30	59	91	
5	ETA	20.01.2011	30	59	92	
6	LAMBDA	21.01.2011	30	59	91	LR=II, PR=II bez leczenia
7		24.01.2011	45	31	91	LR=II, bez leczenia
8	YPSILON	24.01.2011	35	30	60	LR=I, PR=I+ bez leczenia
9		26.01.2011	45	29	78	LR=II+, PR=I- bez leczenia

Table 16.

The results of the breathing space ventilation with oxygen at the depth of $15 \text{ mH}_2\text{O}$, after a dive at the depth of $45 \text{ mH}_2\text{O}$ with premix $Nx 32.5\% \text{O}_2/\text{N}_2$.

Diver	Date	Oxygen content [% _v O ₂]			
		minimum	average	oxygen	decrease
Lambda	24.01.2011	96,38	97,18	100	2,82
Ypsilon	26.01.2011	96,06	96,80	100	3,20
Tau	27.01.2011	95,55	96,69	100	3,31
Fi	27.01.2011	95,09	97,39	100	2,61
Pi	28.01.2011	97,03	98,82	100	1,18
minimum		95,09	96,69	maximum	3,31
average		96,02	97,38	average	2,62
Divers <i>YPSILON</i> and <i>SIGMA</i> Doppler less than II no treatment, Diver: OK Four ventilations without closing the oxygen cylinder					

Table 17.

The results of standard dives with the CRABE apparatus, with ventilating the breathing space.

No	Diver	Date	Diving plan			Comments
			Depth	Time at the max depth	Diving time	
			[mH ₂ O]	[min]	[min]	
1	DELTA	18.01.2011	15	10	25	
2	EPSILON	17.01.2011	15	05	29	
3	KSI	19.01.2011	30	59	91	LR=III no treatment
4	JOTA	19.01.2011	30	59	91	
5	ETA	20.01.2011	30	59	92	
6	LAMBDA	21.01.2011	30	59	91	LR=II, PR=II no treatment
7		24.01.2011	45	31	91	LR=II, no treatment
8	YPSILON	24.01.2011	35	30	60	LR=I, PR=I+ no treatment
9		26.01.2011	45	29	78	LR=II+, PR=I- no treatment
10	TAU	25.01.2011	35	29	61	
11		27.01.2011	45	29	78	

Tabela 17 cd.

10	TAU	25.01.2011	35	29	61	
11		27.01.2011	45	29	78	
12	RO	25.01.2011	35	32	58	
13	FI	26.01.2011	35	30	61	
14		27.01.2011	45	29	77	
15	SIGMA	26.01.2011	35	29	60	PR=I bez leczenia
16	PI	27.01.2011	35	30	61	
17		28.01.2011	45	30	80	PR=II inhalacja O ₂ , 6m/30min
18	OMIKRON	28.01.2011	35	30	63	

Wyniki badań nad wentylacją przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem na głębokości 15 mH₂O po nurkowaniu z wykorzystaniem premiksu Nx 40%_vO₂/N₂ na głębokości 45 mH₂O zebrano w **tab.16** a wyniki wszystkich nurkowań eksperymentalnych nurkowań z wykorzystaniem przeliczenia dekompresji na obowiązujące w MW RP standardowe tabele powietrzne zebrano w **tab.17**.

Podczas nurkowań z wykorzystaniem premiksu Nx 32,5%_vO₂/N₂ granica ciśnienia cząstkowego tlenu wynoszącej 160 kPa nie została przekroczona.

PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W artykule zamieszczono tylko przykładowe wyniki różnych etapów badań oraz wyniki końcowe. Pełne wyniki zostały opisane wcześniej (Kłós R., 2011).

Table 17 cont.

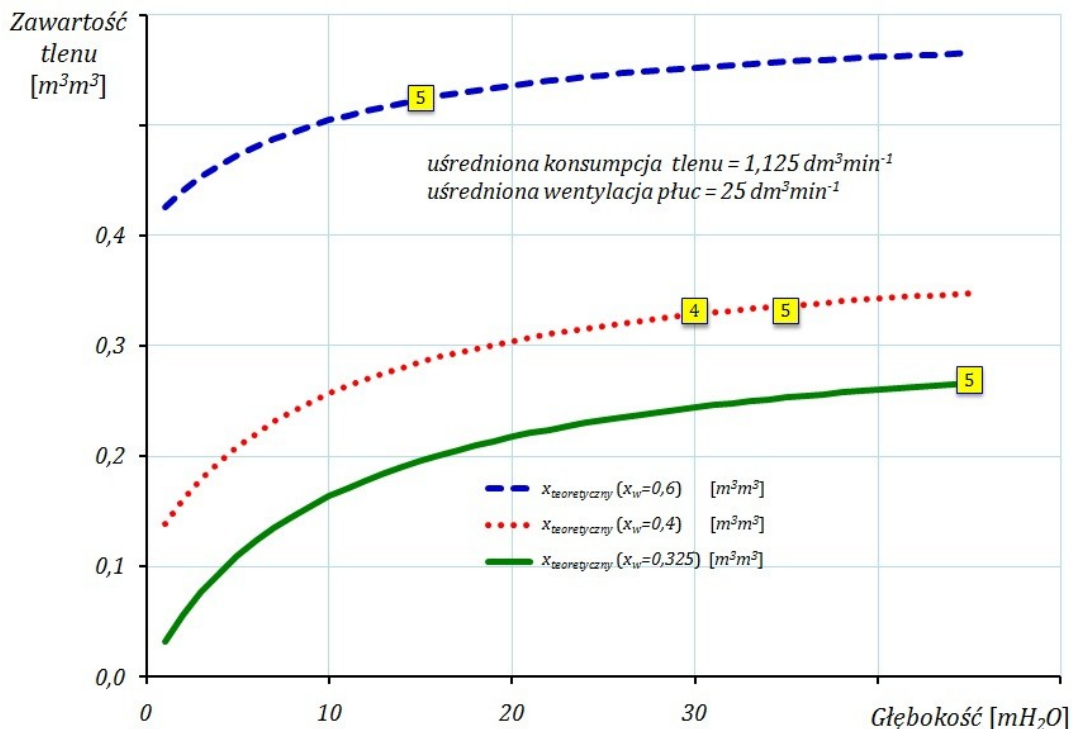
12	RO	25.01.2011	35	32	58	
13	FI	26.01.2011	35	30	61	
14		27.01.2011	45	29	77	
15	SIGMA	26.01.2011	35	29	60	PR=I no treatment
16	PI	27.01.2011	35	30	61	
17		28.01.2011	45	30	80	PR=II O ₂ inhalation, 6m/30min
18	OMIKRON	28.01.2011	35	30	63	

The results of the breathing space ventilation with oxygen at the depth of $15 \text{ mH}_2\text{O}$, after a dive at the depth of $45 \text{ mH}_2\text{O}$ with premix $\text{Nx } 32.5\% \text{ O}_2/\text{N}_2$ are presented in **Table 16**. All the results of all experimental dives are summarized in **Table 17** (decompression results were converted according to the standard air tables of the Polish Navy).

During the dives with premix $\text{Nx } 32.5\% \text{ O}_2/\text{N}_2$, the limit of oxygen partial pressure (160 kPa) was not exceeded.

SUMMARY OF STUDY RESULTS

The article contains only sample results of various stages of research and the final results. Full results have been described previously. (Kłos R., 2011)



Rys.7. Porównanie danych teoretycznych przy założeniu wysiłku średniego⁹⁵ z wynikami przeprowadzonych nurkowań standardowych przy wykorzystaniu premiksów $Nx 60\%_v O_2/N_2$ na głębokości 15 mH_2O , $Nx 40\%_v O_2/N_2$ na głębokościach 30 mH_2O i 35 mH_2O oraz $Nx 32,5\%_v O_2/N_2$ na głębokości 45 mH_2O – liczbę nurkowań składających się na wartość średnią zaznaczoną jako pozycja kwadratu podano w jego wnętrzu.

DEKOMPRESJE EKSPERYMENTALNE

Przeprowadzone nurkowania pokazały, że już dekompresje $AMWe_1 - AMWe_2$ są dość niebezpieczne a dekompresja FN jest nie do przyjęcia. Możliwe jest jednak trenowanie nurków do przechodzenia bardziej forsownych programów dekompresyjnych – obserwowane objawy o stosunkowo małej intensywności w stosunku do wcześniej obserwowanych u tych samych nurków dowodzą ich rosnącej odporności na forsowne procedury dekompresyjne.

DEKOMPRESJE EKWIWALENTNE NURKOWANIOM POWIETRZNYM

Porównanie danych teoretycznych z wynikami przeprowadzonych nurkowań przedstawiono na **rys.7**. Krzywe zawartości tlenu dla poszczególnych premiksów w funkcji głębokości wykreślono zakładając algebraiczny model matematyczny (1) oraz wysiłek średni. Zgodnie z **tab.2** przyjęto konsumpcję tlenu \dot{v}_0 na poziomie $\dot{v}_0 = 1,125 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a wentylację płuc \dot{V} na poziomie $\dot{V} = 25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

⁹⁵**tab.2.2** – konsumpcja tlenu $\dot{v} = 1,125 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ i wentylacja płuc $\dot{V} = 25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

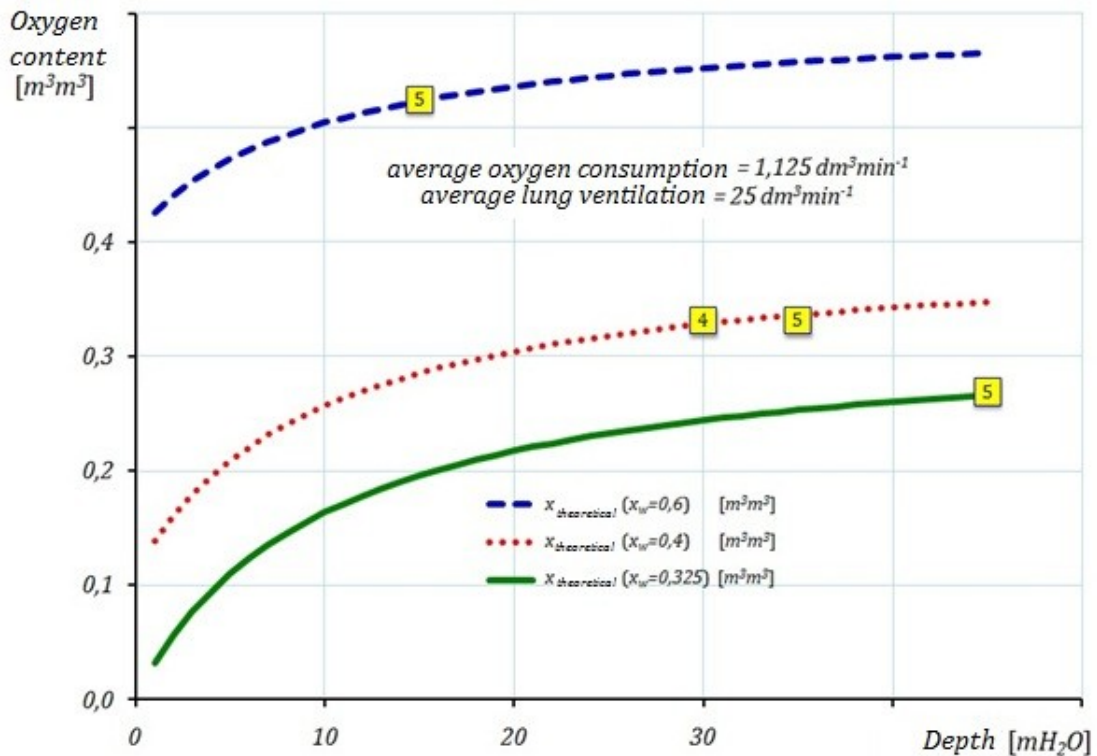


Fig.7. Comparison of theoretical data, assuming the average load⁹², with the results of standard dives carried out using premix $Nx\ 60\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $15\ mH_2O$, $Nx\ 40\%_v\ O_2/N_2$ at the depths of $30\ mH_2O$ and $35\ mH_2O$, and $Nx\ 32.5\%_v\ O_2/N_2$ at the depth of $45\ mH_2O$; numbers of dives that make up the averages is given in squares.

EXPERIMENTAL DECOMPRESSIONS

The dives showed that even $AMWe_1 - AMWe_2$ decompressions are quite dangerous, and the FN decompression is not acceptable. It is possible, however, to train divers to undergo more strenuous decompression programs; the relatively low intensity of symptoms, compared to the previously reported ones in the same group of divers, demonstrate their growing resistance to strenuous decompression procedures.

DECOMPRESSIONS EQUIVALENT TO AIR DIVES

The comparison of theoretical data with the results of the dives is shown in **Figure 7**. Curves of oxygen content for each premix as a function of depth was drawn according an algebraic model (1) and average physical activity. Oxygen consumption \dot{v}_O at the level of $\dot{v}_O = 1,125\ dm^3 \cdot min^{-1}$ and lung ventilation \dot{V} at the level of $\dot{V} = 25\ dm^3 \cdot min^{-1}$ were assumed according to **Table 2**.

⁹² **Table 2.2** – oxygen consumption $\dot{v} = 1,125\ dm^3 \cdot min^{-1}$ and lung ventilation $\dot{V} = 25\ dm^3 \cdot min^{-1}$

Dla głębokości $15 \text{ mH}_2\text{O}$ przyjęto wykorzystanie premiksu $Nx 60\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$, dla głębokości $30 \text{ mH}_2\text{O}$ i $35 \text{ mH}_2\text{O}$ premiks $Nx 40\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$ oraz dla głębokości $45 \text{ mH}_2\text{O}$ premiks $Nx 32,5\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$. Wewnątrz kwadratów oznaczających punkty eksperymentalne podano liczbę nurkowań składających się na wartości średnie. Zaobserwowano dużą zgodność wyników eksperymentów z wartościami teoretycznymi, gdzie odchylenie standardowe tak otrzymanych wartości od wartości teoretycznych wyniosło $s = 0,00155 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

DYSKUSJA I WNIOSKI

Podczas wzrostu obciążenia wykonywaną pracą występuje zwiększone zużycie tlenu O_2 i zwiększona produkcja ditlenku węgla CO_2 w komórkach mięśniowych, lecz prężność tych gazów we krwi tętnicznej ulega niewielkim zmianom, dzięki zwiększeniu objętości rzutowej serca i zwiększeniu przepływu krwi. W momencie rozpoczęcia wysiłku⁹⁶ dochodzi do szybkiego wzrostu wentylacji płuc \dot{V} , a później wzrost ten jest wolniejszy, zaś po $1-3 \text{ min}$ przy stałym obciążeniu następuje stabilizacja. Przy zaprzestaniu wysiłku mechanizm jest podobny, początkowo wentylacja \dot{V} spada gwałtownie, następnie wolniej aż do stabilizacji (Jegier A., Nazar K., Dziak A., 2005). Wraz z akcją oddechową \dot{V} rośnie konsumpcja tlenu \dot{v}_0 . Stały poziom koncentracji tlenu C_{O_2} dla małego i średniego obciążenia pracą⁹⁷ osiągany jest w ciągu $2-3 \text{ min}$. Jednak przy większych obciążeniach rośnie powoli poza tę granicę czasową (Wasserman K., 1982). Często przyjmuje się, że stan względnie stabilny osiągany jest w 7 min wysiłku (Åstrand P.-O. and Rodahl K., 1977). Konsumpcja tlenu \dot{v}_0 podczas wysiłku wydatkowanego na cykloergometrze jest w przybliżeniu stała dla całej populacji bez względu na wytrenowanie, wiek czy płeć, zależąc jedynie od masy ciała i obciążenia (Wasserman K., 1982):

$$\dot{v}_0 = a \cdot m + b \cdot P + c \quad (6)$$

gdzie: \dot{v}_0 – strumień zużywanego tlenu w warunkach standardowych w przeliczeniu na suchy gaz STPD ⁹⁸ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$], m – masa ciała [kg], P – obciążenie pracą [W], a – stała $a = 5,8 \cdot 10^{-3}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$], b – stała $b = 10,1 \cdot 10^{-3}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$], c – stała $c = 1,51 \cdot 10^{-1}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

Formuła (6) dotyczy wysiłku małego i średniego. Do obliczeń konsumpcji granicznej⁹⁹ stosuje się inną formułę (Birch K., MacLaren D., George K., 2009):

$$\dot{v}_{\text{O}_2}^{\text{max}} = \frac{10,8 \cdot P}{m} + 3,5 \quad (7)$$

gdzie: $\dot{v}_{\text{O}_2}^{\text{max}}$ – maksymalne zużycie tlenu STPD [$\text{cm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]

⁹⁶w ciągu $1-2 \text{ s}$

⁹⁷maksymalnie $100-125 \text{ W}$

⁹⁸standard temperature, pressure, dry

⁹⁹tzw. pułapu tlenowego

For the depth at $15 \text{ mH}_2\text{O}$, premix $Nx 60\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$ was used; for the depths of $30 \text{ mH}_2\text{O}$ and $35 \text{ mH}_2\text{O}$, premix $Nx 40\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$, and for the depth of $45 \text{ mH}_2\text{O}$, premix $Nx 32.5\%_{\text{v}}\text{O}_2/N_2$. Inside the squares denoting the experimental points, the number of dives that make up the averages are given. A high consistency of experiment results with the theoretical values was observed, with standard deviation of the values reaching $s = 0,00155 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

As the workload is increased, the oxygen O_2 consumption and carbon dioxide CO_2 production in muscle cells increase too; however, the compressibility of these gases in the arterial blood is slightly altered, thanks to increasing the volume of the heart and blood flow. At the beginning of exercise⁹³, there is a rapid increase in lung ventilation \dot{V} , then this increase is slower, and after $1-3 \text{ min}$, when the load is constant, ventilation is stabilized. After exercise, the mechanism is similar: ventilation \dot{V} initially decreases rapidly, then slower, up to stabilization (Jegier A., Nazar K., Dziak A., 2005).

Along with lung ventilation \dot{V} , oxygen consumption \dot{v}_0 increases. Constant level of oxygen concentration C_{O_2} for small and medium workload⁹⁴ is achieved within $2-3 \text{ min}$. However, with higher loads, it slowly grows beyond that limit of time (Wasserman K., 1982). It is often assumed that a relatively stable state is reached in 7 min of exercise (Åstrand P.-O. and Rodahl K., 1977). Oxygen consumption \dot{v}_0 during exercise on cycloergometer is approximately constant for the entire population, regardless of fitness, age or sex, depending only on the weight and load (Wasserman K., 1982):

$$\dot{v}_0 = a \cdot m + b \cdot P + c \quad (6)$$

where: \dot{v}_0 – oxygen consumption in standard conditions, converted into dry gas STPD ⁹⁵ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$], m – weight [kg], P – workload [W], a – constant $a = 5,8 \cdot 10^{-3}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$], b – constant $b = 10,1 \cdot 10^{-3}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$], c – constant $c = 1,51 \cdot 10^{-1}$ [$\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

Formula (6) applies to light and moderate intensity of physical activity. To calculate maximal oxygen consumption⁹⁶, another formula is used (Birch K., MacLaren D., George K., 2009):

$$\dot{v}_{\text{O}_2}^{\text{max}} = \frac{10,8 \cdot P}{m} + 3,5 \quad (7)$$

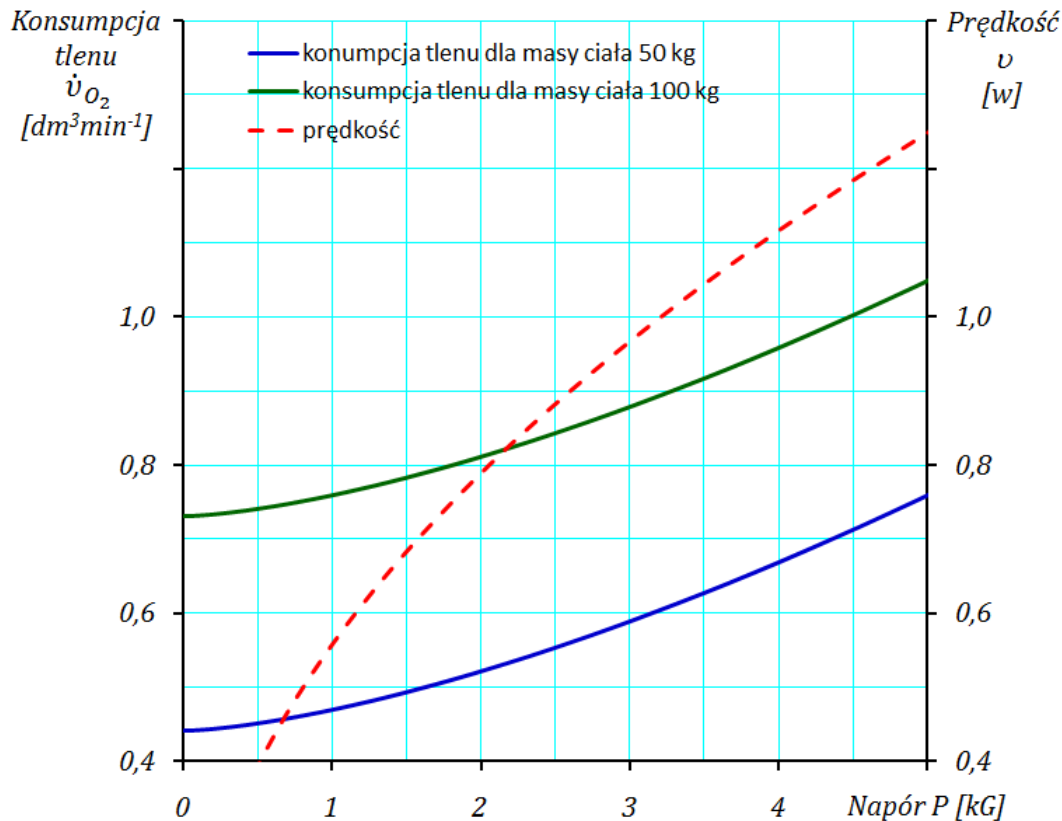
where: \dot{v}_0^{max} – maximal oxygen consumption STPD [$\text{cm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]

⁹³ in $1-2 \text{ s}$

⁹⁴ up to $100 - 125 \text{ W}$

⁹⁵ standard temperature, pressure, dry

⁹⁶ also called $\text{VO}_2 \text{ max}$ or aerobic capacity



Rys.8. Przykładowa zależność konsumpcji tlenu \dot{v}_O_2 w stosunku do wytwarzanego przez nurka nacisku P na stanowisku wysiłkowym.

Intensywność wentylacji płuc odniesionej do warunków standardowych \dot{V} w stosunku do strumienia konsumowanego tlenu \dot{v}_O_2 odniesiony do tych samych warunków przy umiarkowanym wysiłku¹⁰⁰ jest wartością stałą wynoszącą ok. $\frac{\dot{V}}{\dot{v}_O_2} = 25$ ¹⁰¹ (Jegier A., Nazar K., Dziak A., 2005).

Teoretycznie wykorzystując zależność konsumpcji tlenu \dot{v}_O_2 pracy na stanowisku wysiłkowym P oraz akcji serca HR dla wybranego nurka o kryptonimie GAMMA na podstawie przeprowadzonych trzech testów wysiłkowych PWC_{170} oraz równanie (6) można otrzymać zależność konsumpcji tlenu \dot{v}_O_2 w stosunku do wytwarzanego przez nurka nacisku P na stanowisku wysiłkowym – rys.8.

Istnieje dobrze sprecyzowana zależność pomiędzy obciążeniem W , akcją serca HR i konsumpcją tlenu \dot{v}_O_2 , którą można wyznaczyć dla poszczególnych nurków¹⁰² (Åstrand P.-O. and Rodahl K., 1977). Jednak na podstawie przedstawionych tutaj badań własnych stwierdzono, że powyższe wyniki nie są adekwatne dla przypadku obciążenia pracą w zanurzeniu ze względu na występujące zjawisko bradykardii¹⁰³.

¹⁰⁰ok. 50 – 60% pułapu tlenowego \dot{v}_O_2 dla ludzi niewytrenowanych i ok. 75 – 85% pułapu tlenowego \dot{v}_O_2 dla ludzi uprawiających czynnie sport

¹⁰¹stosunek ten jest wyższy przy angażowaniu małych partii mięśni niż dużych

¹⁰²np. podczas przeprowadzania standardowego testu PWC_{170}

¹⁰³obniżenie częstości akcji serca (Birch K., MacLaren D., George K., 2009)

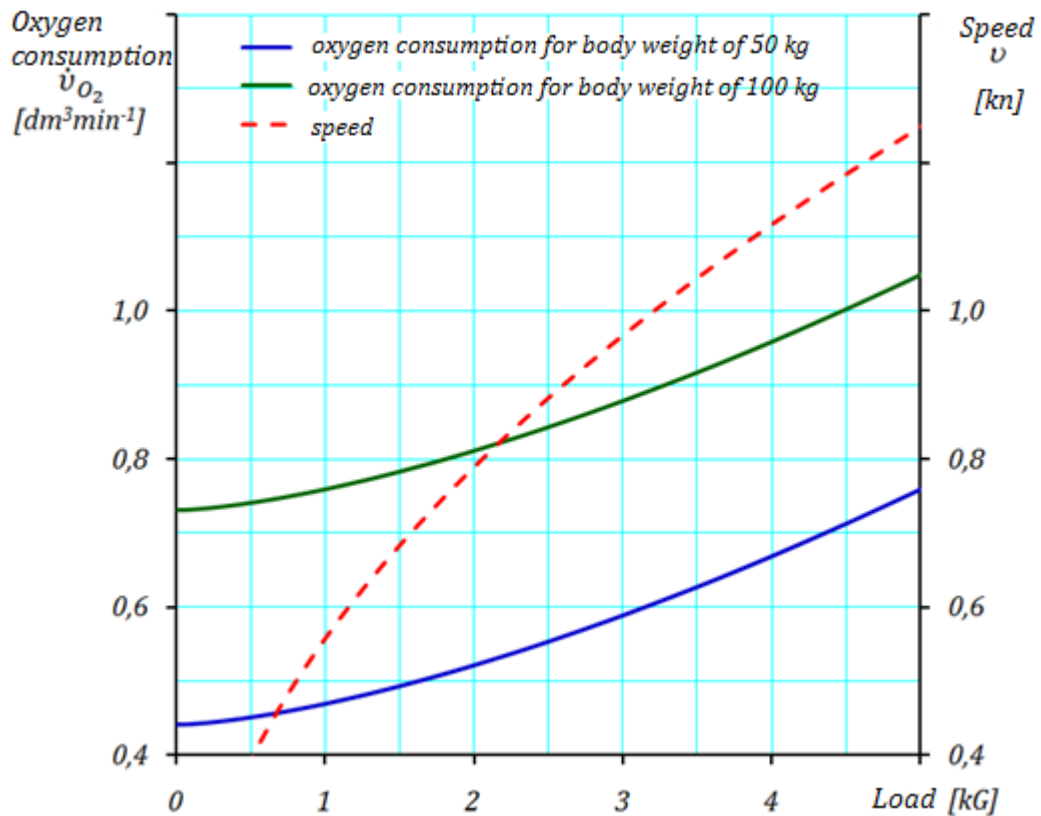


Fig.8. Sample relation between oxygen consumption \dot{v}_O and pressure P applied by the diver.

The intensity of lung ventilation referred to the standard conditions \dot{V} in relation to the oxygen consumed \dot{v}_O referred to the same conditions, with moderate exercise⁹⁷, is a constant value of approximately $\frac{\dot{V}}{\dot{v}_O} = 25$ ⁹⁸ (Jegier A., Nazar K., Dziak A., 2005). Theoretically, if we use the relation between oxygen consumption \dot{v}_O , exercise P , and heart rate HR for the selected diver code-named GAMMA, on the basis of it, three PWC_{170} tests, and equation (6), we can obtain a relation between oxygen consumption \dot{v}_O and pressure applied by the diver P – **Figure 8**.

There is a well-specified relation between the load W , heart rate HR and oxygen consumption \dot{v}_O , which can be calculated for individual divers⁹⁹ (Åstrand P.-O. and Rodahl K., 1977). However, on the basis of the research results presented here, it has been found that the above results are not adequate for the workload in submersion because of bradycardia¹⁰⁰.

⁹⁷ about 50 – 60% of VO_2 max for untrained people, and approximately 75 – 85% of VO_2 max for people doing sport

⁹⁸ this relation is higher is higher when more small than large muscles are involved

⁹⁹ e.g. during a standard PWC_{170} test

¹⁰⁰ heart rate reduction (Birch K., MacLaren D., George K., 2009)

Dowodów na to dostarczają także badania *NEDU*, gdzie dla prędkości $v = 0,7 w$, płynięcia nurka w skafandrze i płetwach¹⁰⁴, wyznaczono konsumpcję tlenu¹⁰⁵ na poziomie ok. $\dot{V}_{O_2}^{max} \cong 1,9 dm^3 \cdot min^{-1}$ a dla prędkości $v = 0,5 w$ wynosiła ona ok. $\dot{V}_{O_2}^{max} \cong 1,25 dm^3 \cdot min^{-1}$ (Sterba J.A., 1990). Zgodnie z **tab. 2** jest to wysiłek umiarkowany i średni (Przylipiak M., Torbus J., 1981). Wynika stąd, że dla warunków hiperbarycznych należy przeprowadzić takie badania celem znalezienia adekwatnych zależności. Przybliżona funkcja przedstawiona na **rys.4.2** powinna być także sprawdzona podczas osobnych badań.

WNIOSKI Z BADAŃ WSTĘPNYCH

Z faktu, że podczas dekompresji zaraz po wykonaniu wysiłku w aparacie CRABE nie jest możliwe osiągnięcie i utrzymanie zawartości tlenu C_{O_2} na wymaganym założeniach dekompresyjnymi poziomie $C_{O_2} \geq 35\%_v O_2/N_2$, wynika konieczność zmiany założeń dekompresyjnych i przyjęcie minimalnej zawartości tlenu we wdychanym przez nurka czynniku oddechowym, kształtujące się na poziomie $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2$.

WNIOSKI Z BADAŃ

1. Zaproponowany tutaj model wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego typu CRABE jest nieznacznie różny od tego, który posłużył konstruktorom do opracowania założeń dla tego systemu oddechowego (Aqua Lung, 2004). Jest on jednak zgodny z modelem opisanym w piśmiennictwie (Williams S., 1975).
2. Podczas przeprowadzonych badań potwierdziła się obserwowana od lat skuteczność dopplerowskiej detekcji śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej, jako metody diagnostycznej do wczesnego wykrywania możliwości wystąpienia *DCS*.
3. Analiza danych dopplerowskiej detekcji śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej pokazała, że wykorzystanie *tabeli 3 MW* (Praca zbiorowa, 1982) jest wystarczająco efektywnym sposobem prowadzenia procesu dekompresji dla aparatu nurkowego CRABE pod warunkiem stosowania dekompresji tlenowej. Gdy nie można przeprowadzić dekompresji tlenowej po nurkowaniach na głębokości powyżej $35 mH_2O$ zaleca się, już przy wysiłku średnim, stosowanie dekompresji wydłużonej.
4. Obecnie nie ma przesłanek do intensyfikacji prac nad specjalnym systemem dekompresji nitroksowej¹⁰⁶ dedykowanemu dla aparatu CRABE.

¹⁰⁴niezależnie od rodzaju płetw

¹⁰⁵były to wartości wyższe niż otrzymane wcześniej (Lamphier E. H., 1954)

¹⁰⁶dla nitroksowych systemów oddechowych wykorzystywanych w warunkach hiperbarycznych projektuje się specjalne systemy dekompresji a jedynie w początkowej fazie wdrożenia wykorzystuje się tabele oparte na tabelach powietrznych, wynika to z różnic powstających podczas ekspozycji na zwiększone ciśnienie cząstkowe tlenu wpływające nie tylko na zwiększone zagrożenie ośrodkową toksycznością tlenową *CNSym*, lecz także wpływem tych ekspozycji na kształt końcowych faz dekompresji

NEDU tests also prove it; there, for a diver in the suit and fins¹⁰¹, swimming at the speed of $v = 0.7 \text{ kn}$, oxygen consumption¹⁰² was determined at about $\dot{v}_{O_2}^{\text{max}} \cong 1.9 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, and at the speed of $v = 0.5 \text{ w}$, it was about $\dot{v}_{O_2}^{\text{max}} \cong 1.25 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (Sterba J.A., 1990). According to **Table 2**, it is moderate and average physical activity (Przylipek M., Torbus J., 1981). Thus, such research should be carried out for hyperbaric conditions in order to find adequate relations. Approximate function shown in **Fig.4.2** should also be checked during a separate study.

CONCLUSIONS FROM PRELIMINARY TESTS

As during decompression carried out immediately after exercise it was not possible to achieve and maintain oxygen content C_{O_2} in the CRABE at the required level of $C_{O_2} \geq 35\%_v O_2/N_2$, determined by decompression assumptions, a need has arisen to change decompression assumptions and adopt minimum content oxygen in the breathing gas mixture to the level of $C_{O_2} \geq 30\%_v O_2$.

CONCLUSIONS FROM THE STUDY

1. The model of ventilating the breathing space of the CRABE rebreather proposed here is slightly different from the one used by the designers to develop guidelines for the respiratory system (Aqua Lung, 2004). However, it is consistent with the model described in the literature (Williams S., 1975).
2. The study has confirmed the efficacy of Doppler ultrasonic detection of intravascular bubbles as a diagnostic tool for early detection of the possibility of *DCS*, observed for years.
3. Data analysis of Doppler intravascular bubbles detection has showed that using Table 3 of the Polish Navy (Praca zbiorowa, 1982) is a sufficiently effective way of conducting the process of decompression for the CRABE, provided that oxygen decompression is performed. If no oxygen decompression can be carried out after dives to depths of more than $35 \text{ mH}_2\text{O}$, it is recommended, even with medium physical activity, to apply extended decompression.
4. Currently, there are no reasons to intensify work on a special nitrox decompression system¹⁰³ for the CRABE rebreather. In the case of such construction of the respiratory system, premix cannot be proposed, though it would cover a wide range of operating depths¹⁰⁴,

¹⁰¹ regardless of the type of fins

¹⁰² the values were higher than those obtained previously (Lamphier E. H., 1954)

¹⁰³ there are special decompression systems designed for nitrox breathing systems used in hyperbaric conditions; only in the initial phase of implementation are tables based on air tables used, due to differences arising from the exposure to increased partial pressure of oxygen affecting not only the increased risk of central oxygen toxicity *CNSyn*, but also the influence of these exposures on the shape of the final stages of decompression

¹⁰⁴ the big advantage of the premix-supplied system with bags placed one into the other, connected with a relatively narrow range of variability in the composition of the breathing gas mixture inhaled by the diver, is also its biggest disadvantage - such a system should be powered by breathing mixture produced during the dive and modified according to the depth of the dive and the intensity of workload

Dla tej konstrukcji systemu oddechowego nie można zaproponować premiksu, który pokryłby szeroki zakres głębokości operacyjnych¹⁰⁷ jednocześnie znacznie skracając czas dekompresji w stosunku do dekompresji powietrznej¹⁰⁸.

5. Możliwe jest trenowanie nurków do przechodzenia bardziej forsownych programów dekompresyjnych¹⁰⁹. Efektywniejsze rozkłady dekompresji zwiększające możliwości bojowe mogą być opracowane jedynie dla specjalnie trenowanych i utrzymywanych w kondycji nurków.
6. Można zauważyć, ujawnianie się skłonności osobniczych do zmniejszenia tolerancji na dekompresję, czy warunki nurkowania (Kłos R., 2011). Z tego powodu warto jest prowadzić badania przesiewowe nurków podczas ćwiczeń na symulatorze nurkowania w kompleksie DGKN-120¹¹⁰.
7. Jak dotąd, nie udało się zastosować w *MWRP* żadnej statystycznej metody walidacji tabel dekompresyjnych¹¹¹ ze względu na koszty pozyskania danych.
8. Wykonanie wentylacji aparatu nurkowego przed dekompresją powoduje podwyższenie do wartości bezpiecznych zawartości tlenu w cyrkulującym czynnikiem oddechowym przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa dekompresji, dlatego zaleca się jej obligatoryjne stosowanie.

WNIOSKI KOŃCOWE

Dotychczas prowadzone badania w *AMW*, wraz z przeprowadzonymi obecnie, skłaniają do głębszych refleksji (Kłos R., 2000; Kłos R., 2007).

Można postulować z dużym prawdopodobieństwem istnienie możliwości opracowania na tyle dokładnych modeli matematycznych systemu oddechowego, że nie będą potrzebne jednoczesne badania walidacyjne systemu oddechowego i powiązanej z nim dekompresji¹¹².

¹⁰⁷duży atut konstrukcji zasilanego premiksem systemu dwuworkowego, dla worków umieszczonych jeden w drugim, związany ze stosunkowo wąskim zakresem zmienności składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka jest jednocześnie jego największą wadą – system taki powinien być zasilany wytwarzanym podczas procesu nurkowania czynnikiem o zmiennym składzie modyfikowanym wraz z głębokością nurkowania i intensywnością obciążenia nurka wykonywaną pracą

¹⁰⁸dla niewytrenowanych i średnio wytrenowanych nurków rozkłady dekompresji równoważnej dekompresji powietrznej według tabeli 3 *MW* leżą już na granicy bezpieczeństwa

¹⁰⁹specjalny trening daje przewagę nurków oddziałów specjalnych, którzy niejednokrotnie muszą działać przeciw zdeterminowanemu przeciwnikowi

¹¹⁰należy na drodze dalszych badań ustalić, jakie wartości antropometryczne eliminują nurków z zadań wykonywanych przy wykorzystaniu aparatu nurkowego typu CRABE

¹¹¹Dla *MWRP* nie jest możliwa do zaakceptowania procedura weryfikacji tabel dekompresyjnych dla $p \in (0,00; 1,00)$ z przedziałem ufności $\bar{P} = 0,95$, oparta o rozkład dwumianowy. Wynika to z ograniczeń czasowych i finansowych podczas prowadzenia nurkowań eksperymentalnych. Możliwa do zaakceptowania wydaje się natomiast procedura *NMRI*. Jednak, jak pokazały badania i ta metoda jest zbyt kosztowna.

¹¹²o ile znany jest model matematyczny proponowanej do zastosowania dekompresji

at the same time reducing the time for decompression compared to air decompression¹⁰⁵.

5. It is possible to train divers to undergo more strenuous decompression program¹⁰⁶s. Decompression schedules which increase divers' combat capabilities more efficiently can be developed only for specially trained and fit divers.

6. Individual tendencies to reduce tolerance to decompression or diving conditions can be noticed (Kłos R., 2011). For this reason, it is useful to conduct screening of divers during diving exercises on the simulator in the DGKN-120 complex¹⁰⁷.

7. So far, no statistical methods of validating decompression tables¹⁰⁸ have been applied in the Polish Navy because of the cost of obtaining such data.

8. Conducting a ventilation of a diving apparatus before decompression causes a safe increase in oxygen content in the circulating breathing gas mixture, contributing to the safety of decompression, so its mandatory application is recommended.

FINAL CONCLUSIONS

The studies conducted so far in the Naval Academy, along with the ones carried out recently, lead to deeper reflection (Kłos R., 2000; Kłos R., 2007). We can postulate the existence of a high probability of developing a sufficiently accurate mathematical models of the respiratory system that will not need simultaneous validation study of the respiratory system and the associated decompression¹⁰⁹.

We can also state that, with the knowledge of the mathematical model of respiratory system ventilation and its associated mathematical model of decompression, it is possible to establish a common model for such a system. The usefulness of the mathematical model is not difficult to show in the era of widespread use of electronic computer technology. The classic set of a test object and the mathematical model is accompanied by a computer to assist the processes of knowledge processing and making it possible to simulate the behaviour of the object of research. Hence designing new hyperbaric breathing systems along with decompression dedicated for them would be much faster and less expensive.

ACKNOWLEDGE

The research aimed at the diving apparatus CRABE are the result of scientific project financed by funds for research from the Polish Ministry of Sciences and Higher Education in 2009-2011.

¹⁰⁵ for untrained and semi-trained divers, equivalent decompression and air decompression systems according to *Table 3* of the Polish Navy are already on the border of safety

¹⁰⁶ special forces divers who have gone through special training have an advantage, as they often must work against a determined opponent

¹⁰⁷ further research should determine what anthropometric values prevent divers from performing tasks using the CRABE apparatus

¹⁰⁸ for the Polish Navy, the verification procedure for decompression tables for $p \in (0.00; 1.00)$ with confidence interval $\bar{P} = 0.95$, based on the binomial distribution, is not acceptable. This is due to time and financial constraints during the conduct of experimental dives. *NMRI* procedure seems acceptable, though. However, as it was demonstrated in the study, even this method is too expensive.

¹⁰⁹ if the mathematical model of the proposed decompression is known

Z dużym prawdopodobieństwem można postulować także, że przy znajomości modelu matematycznego wentylacji systemu oddechowego i powiązanego z nim modelu matematycznego dekompresji możliwe jest ustanowienie wspólnego modelu dla takiego systemu. Użyteczność takiego modelu matematycznego nie jest trudno wykazać w dobie powszechnego wykorzystania elektronicznej techniki obliczeniowej. Do klasycznego zestawu obiektu badań i modelu matematycznego, dołącza się komputer wspomagający procesy poznania dając możliwość symulacji zachowania obiektu badań. Stąd projektowanie nowych hiperbarycznych systemów oddechowych wraz z dedykowaną dla nich dekompresją stałoby się szybsze i znacznie mniej kosztowne.

WIADOMOŚCI UZUPEŁNIAJĄCE

Opisane badania aparatu nurkowego CRABE są efektem prowadzonej pracy rozwojowej realizowanej w Akademii Marynarki Wojennej a finansowanej przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2009–2011.

Nurkowanie jest działalnością zespołową, dla tego uzyskanie opisanych efektów nie byłoby możliwe bez pomocy moich przyjaciół z Zakładu Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej.

Wprowadzanie nowych aparatów nurkowych jest ściśle powiązane z eksperymentami na ludziach, dlatego chciałbym podziękować moim kolegom nurkom z Marynarki Wojennej RP za zaufanie i chęć podjęcia ryzyka. Ten typ eksperymentów może powodować incydenty nurkowe, dlatego dziękuje moim przyjaciołom lekarzom nurkowym za wsparcie.

Specjalne podziękowania kieruję do kmdr.rez. Huberta Dommartin z Aqua Lung France oraz kmdr. Oliviera Nastroga dowódcy CEPHISMER French Navy za pomoc.

As diving requires team work, therefore preparation of this report would not be possible without efficient assistance and help of my friends at the Department of Diving Gear and Underwater Work Technology, The Naval Academy of Gdynia. Introduction of the new diving apparatuses is strongly linked with manned experiments, therefore I would like to thank my colleagues – Polish Navy divers for their trust and their wish to undertake the risk. As this type of research is hazardous and diving accidents can occur, therefore my sincere thanks to my friend Diving Medical Officers for the medical care.

I wish to extend my gratitude to Capt Hubert Dommartin rtd from Aqua Lung France and Capt Olivier Nastorg from CEPHISMER French Navy for exhausting help.

LITERATURA/ BIBLIORAPHY

1. Aqua Lung. 2004. *User manual CRABE*. Nice : Aqua Lung France, 2004. provisional version 1.12. 2004.
2. AQUA-LUNG. 2004. *User manual CRABE provisional*. Nice: AQUA-LUNG, 2004. version 1.12.2004.
3. Åstrand P.-O. and Rodahl K. 1977. *Textbook of work physiology: Physiological bases of exercises*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1977. ISBN 0-07-002406-5.
4. Birch K., MacLaren D., George K. 2009. *Fizjologia sportu-krótkie wykłady*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009. ISBN 978-83-01-15460-8.
5. Bühlmann A.A. 1984. *Decompression-Decompression sickness*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9.
6. 1995. *Tauchmedizin*. Berlin : Springer-Verlag, 1995. ISBN 3-540-58970-8.
7. Declaration of Helsinki . 2008. *Ethical principles for medical research involving human subjects*. Seoul : World Medical Association, 2008. 59th WMA General Assembly.
8. Jegier A., Nazar K., Dziak A. 2005. *Medycyna sportowa*. Warszawa : Polskie Towarzystwo Medycyny Sportowej, 2005. ISBN 83-906715-9-X.
9. Kłós R. 2000. *Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego*. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
10. 2010. Detekcja śródnaczyniowej wolnej fazy gazowej. *Polish Hyperbaric Research*. 2010, Tom 32, strony 15-30.
11. 2007. *Mathematical modelling of the normobaric and hyperbaric facilities ventilation*. Gdynia : Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-0-2.
12. 2011. *Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych*. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0.
13. 2007. Niektóre problemy związane z wyborem sposobu dekompresji. *Polish Hyperbaric Research*. 2007, 18, str. 33.
14. 2007. Niektóre problemy związane z wyborem sposobu dekompresji. *Polish Hyperbaric Research*. 2007, Tom 18, strony 33-76.
15. Lamphier E. H. 1954. *Oxygen consumption in water swimming*. Panama City: Navy Experimental Diving Unit, 1954. NEDU Report 14-54.
16. PN-EN-14143. 2004. *Sprzęt do nurkowania. Autonomiczne aparaty do nurkowania z obiegiem zamkniętym*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2004. ICS 13.340.30.
17. Praca zbiorowa. 1982. *Tabele dekompresji i rekompresji nurków*. Gdynia : Dowództwo Marynarki Wojennej, 1982. Sygn.Mar.Woj. 860/81.
18. Przyłipiak M., Torbus J. 1981. *Sprzęt i prace nurkowe-poradnik*. Warszawa : Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1981. ISBN 83-11-06590-X.
19. Sterba J.A. 1990. *Oxygen consumption during underwater fin swimming wearing dry suit*. Panama City : Navy Experimental Diving Unit, 1990. NEDU Report 11-90.
20. US Navy diving manual. 2008. *Praca zbiorowa (revision 6)*. The Direction of Commander : Naval Sea Systems Command, 2008. 0910-LP-106-0957.
21. Wasserman K. 1982. Dyspnea on exertion. *J.Am.Med.Assoc*. 1982, Tom 248, strony 2039-2045.
22. Williams S. 1975. Engineering principles of underwater breathing apparatus. [aut. książki] Elliott D.H. Bennett P.B. *The physiology and Medicine of diving*. London: Bailliere Tidal, 1975, strony 34-46.