

HELIOX SATURATION DIVING IN POLAND. PART II

NURKOWANIA SATUROWANE Z WYKORZYSTANIEM HELIOKSU. CZĘŚĆ II

Ryszard Kłos¹⁾

¹⁾Polish Naval Academy, Department of Underwater Work Technology, Gdynia

¹⁾Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

ARTICLE INFO

Journal: PolHypRes 2013 Vol. 43 Issue 2 pp. 39 – 68

ISSN: 1734-7009

eISSN: 2084-0535

DOI: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.43.3](http://dx.doi.org/10.13006/PHR.43.3)

Pages: 29, figures: 0, tables: 8

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

Keywords/Słowa kluczowe:

(in English): decompression, saturation diving

(in Polish): dekompresja, nurkowanie saturowane

Polish-English bilingual publication

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

ABSTRACT

(in English)

The described saturation diving technology was launched as training for Polish Navy specialists. It is an effect of the R&D project No. R00 O0014/3 entitled: "Saturation Diving Technology" financed by the Polish Ministry of Science and Higher Education, which have been implemented earlier by Academy in LOTOS Petrobaltic SA.

(in Polish)

Opisana technologia nurkowania realizowana była, jako szkolenia dla specjalistów Marynarki Wojennej RP stanowiąc wdrożenie efektów projektu badawczo-rozwojowego nr R00-O0014/3 pt.: „Metodyka nurkowań saturowanych” finansowanego ze środków na naukę, które wcześniej wdrożono w LOTOS Petrobaltic SA.

The summary in Russian on end of the publication

WSTĘP

W grudniu 2006 roku, podczas ćwiczeń ratowniczych uległ awarii zdalnie sterowany pojazd do ratowania załóg okrętów podwodnych **REMORA**. Pojazd uwięził na 12 godz. dwójkę marynarzy na głębokości 140 m. Ludzie zostali uratowani, lecz pojazd podniesiono dopiero w 2007 r. Po naprawie nie uzyskał on jednak świadectwa klasyfikacyjnego i został wycofany ze służby. Między innymi z tego powodu obserwuje się obecnie tendencję powrotu do technologii nurkowań saturowanych, której wycofanie z wojska i próba zastąpienia jej skafandrami pancernymi i telesterowanymi pojazdami bezzałogowymi było przedwczesne w obecnym stadium rozwoju technologii bezzałogowych, zwłaszcza przy zapewnieniu bezpieczeństwa okrętom podwodnym.

Technologie saturowane wracają w postaci tradycyjnych technologii nurkowych w **US Navy** (Thomas S.W., 2010). Norwesko-Brytyjsko-Francuskie konsorcjum uruchomiło prace dedykowane poznaniu możliwości przetrwania załogi okrętu podwodnego, na którym doszło do podniesienia ciśnienia i saturacji nitroksowej, stanowiąc dodatkowe prace naukowe związane z opracowaniem systemu ratowniczego dla Sojuszu – **NSRS**¹. **NSRS** ma zastąpić dotychczasowe wsparcie dla krajów **NATO** realizowane przez **US Navy** w postaci wycofanych ze służby pojazdów ratowniczych **DRSV Mystic** i **DSRV Avalon**².

Zaletą nurkowań saturowanych jest fakt, że dla każdej wybranej głębokości plateau saturacji czas dekompresji jest wartością stałą i nie zależy od czasu przebywania na niej nurków³. Zatem technologia nurkowań saturowanych jest najefektywniejszym sposobem prowadzenia prac podwodnych z punktu widzenia dekompresji. Dla opisanej w artykule technologii nurkowania maksymalny czas saturacji wynosi 4 tygodnie⁴. Podczas wykonywania prac bezpośrednio w środowisku wodnym nurek może zmieniać głębokość w pewnym zakresie w stosunku do plateau saturacji. Zakres zmian głębokości podany jest w opisie procedury nurkowań z plateau saturacji⁵. Procedura ta zakłada wykonywanie nurkowań bez konieczności dodatkowej dekompresji – nurkowania z dekompresją zerową⁶.

Przeprowadzenie nurkowania saturowanego wymaga, przede wszystkim, zastosowania: specjalnych procedur postępowania, kompleksu nurkowego, systemów zachowania życia, dokładnego systemu pomiarowego ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów głębokości, ciśnienia⁷ cząstkowego tlenu, ditlenku węgla, pomiarów temperatury i wilgotności. Odchylenia od zalecanych zakresów wartości utrzymywanych parametrów mogą być groźne dla nurków. Utrzymywanie ich na wymaganym poziomie jest szczególnie istotne z punktu widzenia prowadzonej później dekompresji, gdyż jest ona policzona z uwzględnieniem faktu, że parametry te podczas całego pobytu nurków pod ciśnieniem nie zostały przekroczone.

W Polsce nurkowania saturowane realizowane były początkowo przez entuzjastów tych technologii w zastosowaniach geologicznych. Wspomnieć tu należy śp. Antoniego Dębskiego, który swymi wyczynami zadziwił świat. W latach 70. ubiegłego wieku **Geonur** z jego nurkowaniami do 50 m był czwartą, co do głębokości, saturacją na świecie (Miller J. W., Koblick I.G., 1984). W Marynarce Wojennej RP realizowano programy naukowe mające na celu wdrożenie własnej technologii saturowanych nurkowań trimiksowych. Realizowane były one przez Akademię Marynarki Wojennej, lecz kierownikiem wdrożenia był śp. kmdr prof. dr hab. Tadeusz Doboszyński z Wojskowej Akademii Medycznej.

¹NATO Submarine Rescue System,

² Deep Submargence Rescue Vechicle,

³pozwała to na pozostawanie na głębokości plateau saturacji przez długi czas bez wpływu na czas zastosowanej potem dekompresji,

⁴bez uwzględnienia czasu dekompresji,

⁵wycieczek,

⁶ograniczeniu podlega jedynie szybkość powrotu na plateau saturacji,

⁷zawartości,

INTRODUCTION

In December 2006, in the course of rescue trainings a remotely operated vehicle for rescuing submarine crews, *REMORA*, broke down. The vehicle trapped two seamen at the depth of 140 m for 12 hours. The people were rescued; however, the vehicle was recovered only as late as in 2007. Though extensive repairs were carried out, the vehicle was qualified as inoperative and withdrawn from service. For this and other reasons we can observe a growing tendency to return to saturation diving, whose withdrawal and attempted replacement with armoured diving suits and teleoperated unmanned vehicles proved to be premature in the light of present advancement of unmanned technologies, particularly with regard to ensuring safety to submarines.

Saturation technologies have made their return in the form of traditional diving technologies in the US Navy (Thomas S.W., 2010). Whilst a Norwegian-British-French consortium commenced works dedicated to the recognition of survival possibilities of a submarine crew in a situation of an increased pressure and nitrox saturation, which constitutes an additional scientific project connected with the preparation of a rescue system for the Alliance's *NSRS*¹. The *NSRS* is to replace the former support for *NATO* states realized by the *US Navy* in the form of withdrawn rescue vehicles *DRSV Mystic* and *DSRV Avalon*².

An advantage of saturation diving lies in the fact that for each selected saturation plateau depth the decompression time constitutes a fixed value, independent of divers' stay time at such a depth³. Thus, saturation diving technology is the most effective way of conducting underwater works from the point of view of decompression. With regard to the diving technology described herein the maximum saturation time was 4 weeks⁴. While carrying out works directly in the aquatic environment a diver may change depths within a certain scope in relation to the saturation plateau. The range of depth changes is provided in the description of the diving procedure with a saturation plateau⁵. This procedure assumes conducting dives without the need of additional decompression – diving with a zero decompression⁶.

Carrying out saturation diving requires, most of all, the use of: special procedures, a diving complex, life support systems, an accurate measuring system with a particular consideration of the measurements of depth, oxygen partial pressure⁷, carbon dioxide, temperature and humidity. Any deviations from the recommended scopes of the above parameters may be dangerous for divers. Their maintenance at the required level is particularly important from the point of view of decompression carried out afterwards, as it is calculated based on the assumption that during the diver's entire stay time under pressure the parameter values have not been exceeded.

In Poland saturation diving was initially realized by enthusiasts of such technologies in geological applications. At this point we should mention the late Antoni Dębski whose achievements astounded the world. In the 1970s, Geonur and his dives to the depth of 50 m were ranked the fourth deepest in saturation dives in the world (Miller J. W., Koblick I.G., 1984). The Polish Navy initiated its own research programmes aimed at the implementation of own technologies of trimix saturation dives. They were conducted by the Naval Academy; however, the person responsible for their implementation was the late Cmdr. Prof. Tadeusz Doboszyński, Ph.D., from the Medical Military Academy.

¹ NATO Submarine Rescue System,

² Deep Submergence Rescue Vehicle,

³ this allows to stay at the saturation plateau depth for a long time with no impact on the decompression time,

⁴ without the decompression time,

⁵ excursions,

⁶ the only limitation concerns the time of return to saturation plateau,

⁷ content,

Niezmiennie pod kierownictwem kmdr. dr.inż. Stanisława Skrzyńskiego Akademia Marynarki Wojennej uczestniczy od lat 90. ubiegłego wieku w zabezpieczeniu serwisu nurkowego, w tym nurkowań saturowanych dla LOTOS Petrobaltic SA. Obecnie Marynarka Wojenna RP widzi konieczność wdrożenia technologii nurkowań saturowanych na planowany do zakupu nowy okręt ratowniczy.

Artykuł stanowi kontynuację opisu technologii nurkowań saturowanych (R., Kłos, 2007). W poprzednim artykule opisano technologię, której stosowanie obecnie zaniechano.

METODA

Opisana technologia saturowanych nurkowań HeO_2 charakteryzuje się kilkoma ogólnymi zaleceniami:

- Czas pracy nurka pod wodą przy nurkowaniach saturowanych może być o wiele dłuższy niż podczas nurkowań poza strefą saturacji dzięki temu nurek nie musi wykonywać zadań podwodnych pośpiesznie.
- Czas przebywania nurków pod ciśnieniem nie ma wpływu na czas dekompresji i jest zawsze ten sam. Dopuszczalny czas przebywania pod ciśnieniem wynosi ok. 4 tyg. Dalsze przedłużenie czasu pobytu wymaga za każdym razem rozpatrzenia takiej możliwości przez Kierownika Nurkowania i Lekarza Zabezpieczającego.
- Zakres głębokości wycieczek uzależniony jest od głębokości plateau saturacji.
- Wydawana długość wiązki nurka nie powinna przekraczać krótszej odległości z dozwolonych dla niego wycieczek w górę lub dół.
- Przebywanie nurków pod ciśnieniem na plateau saturacji wymaga stałego utrzymywania parametrów atmosfery kompleksu nurkowego na odpowiednim poziomie z wymaganą dokładnością. Parametry te nie mogą być przekroczone podczas całego czasu przebywania nurków pod ciśnieniem. Jeżeli nastąpiłoby jakiegokolwiek odstępstwo należy powiadomić o tym Kierownika Nurkowania i Lekarza Zabezpieczającego oraz umieścić wyczerpujący opis sytuacji w Dzienniku Zdarzeń.
- Opisane procedury oraz zasady przekazane podczas szkolenia powinny być przez obsługę i nurków bezwzględnie przestrzegane. Przed podjęciem jakiegokolwiek czynności należy zastanowić się, jaki będzie jej skutek. Żadna z czynności na obiekcie hiperbarycznym nie może być podjęta bez zgody i wiedzy Kierownika Zmiany.
- Do najważniejszych czynności obsługi należy dbałość o stan szczelności obiektu. Służą temu, między innymi, następujące zasady:

a) śluz powinny być utrzymywane w pozycji zamkniętej,

b) uszczelki śluz, dzwonu i włączów powinny być sprawdzane i utrzymywane w dobrym stanie a włącz utrzymywane w gotowości do zamknięcia lub otwarcia,

c) należy kontrolować pozycje zaworów ich zamknięcie lub otwarcie powinno być sprawdzane,

d) czas przechodzenia nurków do dzwonu, innej komory kompleksu lub komory transportowej i z powrotem do kompleksu powinien być jak najkrótszy, gdyż śluzowanie ludzi jest najniebezpieczniejszym etapem podczas prowadzenia nurkowań.

- Przed każdym opuszczeniem dzwonu czy śluzowaniem ludzi należy dokładnie sprawdzić czy nurkowie zabrali wymagane podstawowe i dodatkowe wyposażenie.
- Nurek powinien przed wyjściem do pracy sprawdzić swój sprzęt, a w szczególności systemy oddechowe zasadnicze i awaryjne oraz mocowanie sprzętu⁸.
- Przed podłączeniem czynnika oddechowego do systemu należy bezwzględnie upewnić się, z jakim jego rodzajem mamy do czynienia. Należy w tym celu wykonać pomiar zawartości tlenu oraz sprawdzić wynik z opisem na butlach oraz atestem. Jeżeli wartości te będą niezgodne nie należy podłączać takiej mieszaniny a o zaistniałym fakcie powiadomić Kierownika Zmiany oraz Kierownika Nurkowania.

⁸aby jego zgubienie nie spowodowało wyrzucenia nurka,

Invariably since the 1990s the Naval Academy under the direction of Cmdr. Eng. Stanisław Skrzyński, Ph.D., has been a participant in providing the diving services, including saturation dives for LOTOS Petrobaltic SA. Currently, the Polish Navy sees the necessity of implementing saturation diving technology connected with the planned purchase of a new rescue ship.

This article is a continuation of an earlier article on the description of saturation diving technology (R., Kłos, 2007). The technology described in the previous article has however since been abandoned.

METHOD

The described HeO_2 saturation diving technology is characterised by several general guidelines:

- In saturation diving the time of a diver's work under water may be significantly longer as compared with diving outside the saturation zone, which results in the fact that the diver does not need to hurry while carrying out the assigned underwater tasks.
- The divers' stay time under pressure does not influence the decompression time and is always the same. The allowable stay time under pressure reaches ca. 4 weeks. Any further prolongation of the stay time requires careful examination of such a possibility by the Diving Director and the Securing Physician.
- The range of excursion depths depends on the saturation plateau depth.
- The diver's umbilical's length should not exceed the shorter distance of allowable excursions up or down.
- Divers' staying under pressure at the saturation plateau requires constant maintenance of the parameters of the diving habitat's in which they are living at a proper level and with required accuracy. The specified parameters must not be exceeded during the entire stay time under pressure. In the case of any deviations it is required to notify the Diving Director and the Securing Physician as well as provide an exhaustive situation description in the Incident Log.
- The described procedures and rules presented in the course of training must be unconditionally observed by service staff and the divers. Before undertaking any action, its consequences must be considered. It is prohibited to undertake any actions in a hyperbaric vessel without the consultation with the Shift Director.
- The most important service activities consist in ensuring the facility is tightly sealed shut.

This is regulated by the following principles:

- a) locks should be maintained in the locked position,
- b) lock, bell and manhole seals should be checked and maintained in a proper condition, whereas manholes should be prepared for opening or closing,
- c) valve positions should be controlled and their closing or opening should be checked,
- d) the time taken for divers to transition between the bell or another complex chamber or transport chamber and back to the complex should be as short as possible since locking of people is the most dangerous phase in the course of the diving activity.
 - Prior to each departure from the bell or locking of people it is necessary to carefully check if the divers took with them the required primary and additional equipment.
 - Before leaving to work the diver should check his equipment, and in particular the basic and emergency respiratory systems, both to ensure its functions and that the equipment is firmly secured to his person⁸.
 - Before connecting the breathing mix to the system it is necessary to ascertain what type of the breathing mix is being used.

⁸ so that its loss does not effect the divers' bouancy, and potentially, result in an uncontrolled ascent,

- Po osiągnięciu głębokości plateau należy odłączyć zasilanie kompleksu powietrzem, jako czynnikiem oddechowym⁹, a zasilanie tlenem powinno być realizowane poprzez reduktor na którego wyjściu ciśnienie nie powinno być większe niż **4,0 MPa**.

1. GŁĘBOKOŚĆ PLATEAU SATURACJI

Przy planowaniu prac nurkowych należy dobrać najdogodniejszą głębokość plateau saturacji. Analizy takiej dokonuje się w oparciu o przewidywane zakresy głębokości, na których będą wykonywane prace nurkowe i dystanse, na które nurkowie będą odchodzili od dzwonu.

1.1. KOMPRESJA

Zadaniem kompresji jest bezpieczne osiągnięcie głębokości plateau oraz stabilizacja parametrów atmosfery oddechowej tak, aby była ona bezpieczna dla nurków. Podstawowe zagrożenia podczas procesu kompresji to indukowanie się bólów w tkance łącznej oraz **HPNS**¹⁰ objawiający się porażeniem centralnego układu nerwowego **CNS**¹¹. Oba efekty powstają wskutek oddziaływania wysokiego ciśnienia przy szybkim sprężaniu, dlatego szybkość dochodzenia do plateau saturacji jest ograniczona – tab. 1.

Tabela 1.

Maksymalne dozwolone szybkości sprężania do głębokości plateau w funkcji głębokości.

Zakres głębokości		Zakres dozwolonych szybkości sprężania	
[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O · min ⁻¹]	[fsw · min ⁻¹]
0–18,2	0–60	0,15–9,0	0,5–30
18,2–75,8	60–250	0,15–3,0	0,5–10
75,8–227,3	250–750	0,15–0,9	0,5–3
227,3–303,0	750–1000	0,15–0,6	0,5–2

Tabela 2.

Dozwolone wartości podstawowych wielkości mierzonych podczas saturacji w kompleksie hiperbarycznym i dzwonie nurkowym.

Wielkość mierzona	Zakres dozwolonych wartości wielkości mierzonych
Ciśnienie cząstkowe O₂	w granicach (44–48)kPa
Ciśnienie cząstkowe CO₂	poniżej 0,5 kPa ≅ 0,5%_{SEV} ≅ 3,8 mmHg
Zawartość N₂ He	pozostałość
Temperatura	ok. (27–28)°C zależnie od odczuć własnych nurków
Zawartość wilgoci	wilgotność względna w zakresie (50–80)%_R zależnie od odczuć nurków

Zamiast pomiarów ciśnienia cząstkowego można wykonywać pomiary zawartości pod warunkiem, że przeliczenie zawartości na ciśnienie cząstkowe będzie możliwe do wykonania z wymaganą dokładnością.

⁹podłączenie powietrza serwisowego pozostaje nadal podłączone,

¹⁰**HPNS** – High-Pressure Nervous Syndrome,

¹¹**CNS** – Central Nervous System,

For this purpose it is necessary to carry out oxygen content measurement and compare the result with the description provided on the container and the certificate. In the case when the values do not comply with the provided parameters such a mix must not be connected and the Shift of Diving Director must be notified.

- After reaching the plateau depth the feeding system with the air as the breathing mix must be disconnected⁹, and the oxygen feed should be realized through the reducer with the input pressure not exceeding 4.0 MPa.

1. SATURATION PLATEAU DEPTH

When planning diving works it is required to select the most adequate saturation plateau depth. Such an analysis is carried out on the basis of anticipated depth scopes at which the works will take place and the divers' distances from the bell.

1.1. COMPRESSION

The compression objective is to ensure a safe achievement of the plateau depth and stabilization of the breathing atmosphere parameters in such a way as to guarantee divers' safety. The primary hazards connected to the compression process include induction of pain in the connective tissue and the **HPNS**¹⁰ manifested by **CNS**¹¹ paralysis. Both these effects are a consequence of a high pressure accompanying quick compression, thus the speed of reaching the saturation plateau is limited – tab. 1.

Table 1.

Maximum allowable compression speeds to plateau depth in the function of depth.

Depth range		The scope of allowable compression speeds	
[mH_2O]	[fsw]	[$mH_2O \cdot min^{-1}$]	[$fsw \cdot min^{-1}$]
0–18.2	0–60	0.15–9.0	0.5–30
18.2–75.8	60–250	0.15–3.0	0.5–10
75.8–227.3	250–750	0.15–0.9	0.5–3
227.3–303.0	750–1000	0.15–0.6	0.5–2

Table 2.

Allowable values of basic quantities measured during saturation in the hyperbaric complex and the diving bell.

Measured quantity	Scope of allowable values of measured quantities
O_2 partial pressure	within (44–48) kPa
CO_2 partial pressure	below 0,5 $kPa \cong 0,5\%_{SEV} \cong 3,8 mmHg$
$N_2 He$ content	residue
Temperature	ca. (27 – 28)°C depending on divers' impressions
Humidity	relative humidity within (50 – 80)% _R depending on divers' impressions

It is possible to conduct the measurements of content instead of partial pressure; however, on condition that the conversion to partial pressure with the required accuracy is achievable.

⁹ the service air connection stays connected,

¹⁰ **HPNS** High-Pressure Nervous Syndrome

¹¹ **CNS** Central Nervous System,

Powolna kompresja ma dodatkowo tę zaletę, że jeżeli po jej zakończeniu nurkowie czują się dobrze, to mogą przystąpić natychmiast do pracy. Jednak zalecana jest ich **12–24 godz** aklimatyzacja na głębokości plateau saturacji. Decyzję o szybszym przystąpieniu do pracy może podjąć jedynie Lekarz Zabezpieczający na wniosek Kierownika Nurkowania.

Podczas kompresji należy dążyć także do precyzyjnego otrzymania i utrzymania parametrów plateau saturacji¹² – tab. 2. Z tego względu może być ona prowadzona dwufazowo przy pomocy powietrza i helu, przy pomocy mieszaniny helowo-tlenowej i czystego helu, bądź przy pomocy specjalnej mieszaniny helowej¹³.

Po zamknięciu włączów i podniesieniu ciśnienia przy pomocy powietrza lub helioksu do uzyskania szczelności¹⁴ należy sprawdzić szczelność i działanie wszystkich systemów wchodzących w skład kompleksu nurkowego. Następnie można przystąpić do fazy sprężania wstępnego do otrzymania wymaganego ciśnienia cząstkowego tlenu przy pomocy powietrza lub helioksu. Po ustaleniu ciśnienia cząstkowego tlenu na wymaganym poziomie należy sprawdzić powtórnie systemy i można kontynuować sprężanie przy wykorzystaniu czystego helu do wybranej głębokości plateau saturacji.

Tabela 3.

Bilans molowy przy sprężaniu kompleksu powietrzem i helem.

Liczba moli	Faza		
	①	②	③
całkowita n	$p_0 \cdot V_k$	$p_k \cdot V_k$	$p \cdot V_k$
tlenu n_{O_2}	$p_0 \cdot V_k \cdot x_0$	$p_k \cdot V_k \cdot x_0$	$p_{O_2} \cdot V_k$

$V, R, T = idem$

gdzie: p_0 –ciśnienie normalne, p_k –ciśnienie w fazie ② sprężania kompleksu powietrzem, V_k –objętość kompleksu x_0 –zawartość tlenu w powietrzu, p_{O_2} –ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji.

Przykładowo, można korzystając z równania Clapeyrona można zapisać bilans całkowitej liczby moli i liczby moli tlenu – tab. 3. Na jego podstawie można obliczyć, do jakiego ciśnienia p_k należy napełnić kompleks nurkowy powietrzem tak, aby podnosząc je dalej do wartości plateau saturacji przy wykorzystaniu helu, ciśnienie cząstkowe tlenu p_{O_2} na plateau saturacji wynosiło $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$.

¹²należy uważać aby nie powstała atmosfera hipoksyczna $p_{O_2} < 21 \text{ kPa}$ podczas całego procesu kompresji,

¹³ta metoda nie jest zalecana przy nurkowaniach według system *US Navy*, lecz zgodnie z zaleceniami IMCA nie powinno się używać do prac na kompleksie gazów czystych, gdyż może to prowadzić do szybszych zaburzeń w składowaniu atmosfery oddechowej,

¹⁴np. $(1 - 2)\text{mH}_2\text{O}$,

Slow compression has an additional advantage that immediately after its completion the divers feel well and are able to commence work. Nonetheless, an acclimation period of 12 – 24 hours at the saturation plateau depth is recommended. The decision on starting work sooner may be made only by the Securing Physician at the request of the Diving Director.

Moreover, during the compression it is required to aim at obtaining and keeping the saturation plateau parameters¹² – tab. 2. For this reason the compression may be carried out in two phases with the use of air and helium, with the use of a helium-oxygen mix and pure helium, or with a special helium mix¹³.

After closing the manholes and increasing the pressure with the use of air or heliox until tightness is reached¹⁴ it is required to double check the integrity and operation of all the systems of the diving complex. Next, it is possible to engage in the initial compression phase until achieving the required oxygen partial pressure value with the use of air or heliox. On determining the value of oxygen partial pressure it is required to double check the systems, after which the compression may be continued with the use of pure helium, until reaching the intended saturation plateau depth.

Table 3.

Molar balance at a complex compression with air and helium

Number of moles	Phase		
	①	②	③
total n	$p_0 \cdot V_k$	$p_k \cdot V_k$	$p \cdot V_k$
oxygen n_{O_2}	$p_0 \cdot V_k \cdot x_0$	$p_k \cdot V_k \cdot x_0$	$p_{O_2} \cdot V_k$

where: p_0 –regular pressure, p_k –pressure in phase ② of complex compression with air, V_k –complex volume x_0 –oxygen content in the air, p_{O_2} –oxygen partial pressure at the saturation plateau.

For example, using Clapeyron’s equation it is possible to write down the balance between the total number of moles and the number of oxygen moles – tab. 3. On its basis it is possible to calculate to what pressure p_k the diving complex needs to be filled with air so that by increasing it further to the saturation plateau with the use of helium the oxygen partial pressure p_{O_2} on the saturation plateau would reach $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$. The number of oxygen moles in phase ② will be equal to the number of oxygen moles in phase ③, since the compression from phase ② to phase ③ with helium does not cause an increase in the number of its moles, hence: $p_{O_2} \cdot V_k = p_k \cdot V_k \cdot x_0 \rightarrow p_k = \frac{p_{O_2}}{x_0}$. By inserting task data we will obtain the following result: $p = \frac{p_{O_2}}{x_0} \cong 219 \text{ kPa} \cong 11,9 \text{ mH}_2\text{O}$.

¹² it is necessary to be careful not to induce hypoxic atmosphere $p_{O_2} < 21 \text{ kPa}$ in the entire compression process

¹³ This method is not recommended for diving according to the *US Navy* system; however, following IMCA guidelines works in the complex should not be carried out with pure gases as it may lead to a more rapid imbalance in the composition of the breathing atmosphere

¹⁴ eg. $(1 - 2)\text{mH}_2\text{O}$

Liczba moli tlenu w fazie ② będzie równa liczbie moli tlenu w fazie ③, gdyż sprężanie od fazy ② do fazy ③ heliem nie powoduje wzrostu jego liczby moli, stąd: $p_{O_2} \cdot V_k = p_k \cdot V_k \cdot x_0 \rightarrow p_k = \frac{p_{O_2}}{x_0}$. Wstawiając dane zadania, można obliczyć: $p = \frac{p_{O_2}}{x_0} \cong 219 \text{ kPa} \cong 11,9 \text{ mH}_2\text{O}$.

Podobnie można przeprowadzić obliczenia dla procedury sprężania dowolnym helioksem¹⁵. Przykładowo, ciśnienie p_k do jakiego należy napełnić kompleks nurkowy powietrzem tak, aby podnosząc je dalej do wartości plateau saturacji $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ przy wykorzystaniu helioksu $Hx 0,02$, ciśnienie cząstkowe tlenu p_{O_2} na plateau saturacji wynosiło $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$.

Liczba moli tlenu w fazie ③ będzie równa sumie liczby moli tlenu w fazie ② i doprowadzonej liczby moli podczas sprężania od ciśnienia p_k do ciśnienia plateau p helioksem $Hx 0,02$ o zawartości tlenu $x_M = 0,02 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ w fazie ③, stąd ciśnienie cząstkowe tlenu p_{O_2} na plateau saturacji w fazie ③, wyniesie: $p_k \cdot x_0 + (p - p_k) \cdot x_M = p_{O_2} \rightarrow p_k = \frac{p_{O_2} - p \cdot x_M}{x_0 - x_M}$. Wstawiając dane, można obliczyć: $p_k = \frac{p_{O_2} - p \cdot x_M}{x_0 - x_M} \cong 168 \text{ kPa} \cong 6,8 \text{ mH}_2\text{O}$

Wygodnie jest także sprężać kompleks specjalnie skomponowanym helioksem. Przykładowo, można obliczyć jaka powinna być zawartość tlenu x_M w Hx , którym napełniany będzie kompleks saturacyjny do ciśnienia $p = 700 \text{ kPa}$, aby ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji Hx wyniosło $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$. Korzystając z równania Clapeyrona można zapisać bilans całkowitej liczby moli i liczby moli tlenu, dla stałej temperatury – tab. 4.

Liczba moli tlenu w fazie ③ będzie równa sumie liczby moli tlenu w fazie ① i doprowadzonej liczby moli podczas sprężania od ciśnienia p_0 do ciśnienia plateau p helioksem Hx o zawartości tlenu x_M w fazie ②, stąd ciśnienie cząstkowe tlenu p_{O_2} na plateau saturacji w fazie ③, wyniesie: $p_0 \cdot x_0 + (p - p_0) \cdot x_M = p_{O_2} \rightarrow x_M = \frac{p_{O_2} - p_0 \cdot x_0}{p - p_0}$. Zawartość tlenu w Hx , którym można napełniać kompleks od ciśnienia normalnego $p_0 = 100 \text{ kPa}$ do ciśnienia plateau $p = 700 \text{ kPa}$ tak, aby ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji wyniosło $p_{O_2} = 40 \text{ kPa}$, powinna wynieść: $x_M = \frac{p_{O_2} - p_0 \cdot x_0}{p - p_0} \cong 0,0416 \cong 4,16\%_n$.

Tabela 4.

Bilans molowy przy sprężaniu kompleksu helioksem.

	Faza	
Liczba moli	①	②-③
całkowita n	p_0	p
tlenu n_{O_2}	$p_0 \cdot x_0$	$p_0 \cdot x_0 + (p - p_0) \cdot x_M = p_{O_2}$

$V, R, T = idem$

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow n \cong p \quad | \quad R, T, V = idem$

gdzie: p_0 – ciśnienie normalne, p_k – ciśnienie w fazie ② sprężania kompleksu powietrzem, p – ciśnienie plateau, x_0 – zawartość tlenu w powietrzu, p_{O_2} – ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji

¹⁵ helioksem o dowolnym składzie – zaleca się stosowanie helioksu o zawartości tlenu poniżej $0,21 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,

It is possible to carry out similar calculations for compression procedure with any heliox type¹⁵. By way of example, the pressure p_k to which the diving complex needs to be filled with air so that by its further increase to the saturation plateau value $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ with the use of heliox $Hx 0,02$ the oxygen partial pressure p_{O_2} at the saturation plateau was equal to $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$.

The number of oxygen moles in phase ③ will be equal to the sum of oxygen moles in phase ② and the obtained number of moles during the compression from the pressure p_k to plateau pressure p with heliox $Hx 0,02$ with oxygen content $x_M = 0,02 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ in phase ③, hence oxygen partial pressure p_{O_2} at the saturation plateau in phase ③ will amount to: $p_k \cdot x_0 + (p - p_k) \cdot x_M = p_{O_2} \rightarrow p_k = \frac{p_{O_2} - p \cdot x_M}{x_0 - x_M}$. By inserting data it is possible to calculate the following: $p_k = \frac{p_{O_2} - p \cdot x_M}{x_0 - x_M} \cong 168 \text{ kPa} \cong 6,8 \text{ mH}_2\text{O}$.

It is also convenient to carry out complex compression with a special heliox composition. For instance, we may calculate proper oxygen content x_M in Hx that will be used for filling the saturation complex to the pressure $p = 700 \text{ kPa}$ so that the oxygen partial pressure at the saturation plateau Hx would reach $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$. Using Clapeyron's equation it is possible to write down the balance between the total number of moles and the number of oxygen moles for the same temperature – tab. 4.

The number of oxygen moles in phase ③ will be equal to the sum of oxygen moles in phase ① and the obtained number of moles during the compression from the pressure p_0 to plateau pressure p with heliox Hx of oxygen content x_M in phase ②, hence the oxygen partial pressure p_{O_2} at the saturation plateau in phase ③ will reach: $p_0 \cdot x_0 + (p - p_0) \cdot x_M = p_{O_2} \rightarrow x_M = \frac{p_{O_2} - p_0 \cdot x_0}{p - p_0}$. The oxygen content in Hx with which it is possible to fill the complex from regular pressure $p_0 = 100 \text{ kPa}$ to plateau pressure $p = 700 \text{ kPa}$, so that the oxygen partial pressure at the saturation plateau would reach $p_{O_2} = 40 \text{ kPa}$, should be as follows: $x_M = \frac{p_{O_2} - p_0 \cdot x_0}{p - p_0} \cong 0,0416 \cong 4,16\%_n$.

Table 4.

Molar balance at a complex compression with heliox.

Number of moles	Phase	
	①	②-③
total n	p_0	p
oxygen n_{O_2}	$p_0 \cdot x_0$	$p_0 \cdot x_0 + (p - p_0) \cdot x_M = p_{O_2}$

①

②

③

$V, R, T = idem$

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow n \propto p \quad | \quad R, T, V = idem$

where: p_0 – regular pressure, p_k – pressure in phase ② of complex compression with air, p – plateau pressure, x_0 – oxygen content in the air, p_{O_2} – oxygen partial pressure at the saturation plateau

¹⁵ heliox of any composition – it is recommended to use heliox with oxygen content below $0.21 \text{ mole} \cdot \text{mole}^{-1}$,



W trakcie jednego nurkowania saturowanego można zmieniać, w zależności od potrzeb, głębokość plateau saturacji. Należy jednak pamiętać, że zwiększania głębokości plateau saturacji można dokonać zawsze przy zachowaniu dozwolonej szybkości kompresji – tab.1. Natomiast zmniejszenie głębokości plateau saturacji można wykonać jedynie stosując standardową procedurę dekompresyjną¹⁶. W sytuacjach awaryjnych możliwa jest również dekompresja przyspieszona.

1.2. SKŁAD ATMOSFERY ODDECHOWEJ

Podczas nurkowania saturowanego należy w sposób ciągły kontrolować: ciśnienie całkowite¹⁷, ciśnienie cząstkowe tlenu¹⁸, temperaturę oraz wilgotność, ciśnienie cząstkowe ditlenku węgla¹⁸. Dopuszczalne wartości wymienionych wielkości dla kompleksu i dla dzwonu zebrano w tab. 2. Można kontrolować także zawartość helu oraz azotu co 12 godz. przez pierwsze 5 dni, następnie pomiary te można wykonywać co 24 godz. Dozwolone zakresy ciśnień cząstkowych tlenu podczas różnych faz nurkowania saturowanego podano w tab. 5.

Zabezpieczenie atmosfery kompleksu przed zanieczyszczeniami gazowymi i toksycznymi parami jest bardzo ważne dla zdrowia nurków. Zanieczyszczenia te mogą pochodzić z następujących źródeł:

- zanieczyszczenia pochodzące z gazów stosowanych do sporządzania czynnika oddechowego,

Tabela 5.

Dozwolone zakresy ciśnień cząstkowych tlenu podczas różnych faz nurkowania saturowanego.

Faza nurkowania	Dozwolone ekspozycje	
	Ciśnienie cząstkowe	Czas ekspozycji
pobyt na plateau saturacji	w granicach (44–48)kPa	4 tyg
wycieczka z plateau saturacji	w granicach (40–60)kPa	4 godz
procedury awaryjne	60 kPa [†]	24 godz

[†]jeśli ciśnienie cząstkowe tlenu przekroczy wartość > 60 kPa należy przełączyć się na mieszaninę awaryjną podawaną z układów BIBS; ciśnienie cząstkowe tlenu o wartości 60 kPa jest wykorzystywane podczas jednego ze sposobów zainicjowania dekompresji.

- zanieczyszczenia pochodzące ze środków technicznych stykających się z czynnikiem oddechowym np. lotne składniki farb używanych do malowania habitatów, lotne składniki środków do konserwacji, smarów, klei itp.,
- zanieczyszczenia, których źródłem jest sam organizm ludzki.

Emisja zanieczyszczeń wchodzących w skład grupy pierwszej i drugiej musi być minimalizowana. Minimalizowanie zawartości zanieczyszczeń pochodzących z gazów stosowanych do sporządzania czynnika oddechowego dokonuje się przez użytkowanie gazów tylko od certyfikowanych dostawców, którzy dostarczają je wraz ze stosownym świadectwem. Wszelkie materiały używane do napraw i wyposażenia kompleksu nurkowego oraz gazowe komponenty czynnika oddechowego powinny posiadać atesty. Przed ich zastosowaniem należy dokładnie sprawdzić czy odpowiadają one normom toksykologicznym.

¹⁶do głębokości dozwolonej wycieczki plateau można zmienić dowolnie, lecz wykonanie wycieczki z nowego plateau saturacji wymaga czasu na stabilizację będzie o tym mowa przy omawianiu wycieczek z plateau saturacji,

¹⁷głębokość nurkowania,

¹⁸bądź zamiast pomiarów ciśnienia cząstkowego można wykonywać pomiary zawartości pod warunkiem, że przeliczenie zawartości na ciśnienie cząstkowe będzie możliwe do wykonania z wymaganą dokładnością,

1.2. BREATHING ATMOSPHERE COMPOSITION

The parameters that need to be continuously controlled during saturation diving include: total pressure¹⁷, oxygen partial pressure¹⁸, temperature and humidity, and carbon dioxide partial pressure. Allowable values of the specified parameters for the diving complex and the bell are presented in tab. 2. It is also advisable to monitor helium and nitrogen content every 12 hours over the first 5 days, and after this period every 24 hours. Allowable scopes of oxygen partial pressure values in various phases of saturation diving are specified in tab. 5.

From the point of view of divers' health it is extremely important to secure the complex's atmosphere from gas contamination or toxic vapours. Such hazards may have the following sources:

- contamination originating from gases used in the preparation of the breathing mix

Table 5.

Allowable scopes of oxygen partial pressure values in various phases of saturation diving.

Diving phase	Allowable exposures	
	Partial pressure	Exposure time
stay at saturation plateau	within (44- 48)kPa	4 weeks
excursion from saturation plateau	within (40- 60)kPa	4 hours
emergency procedures	60 kPa [†]	24 hours

[†]should the oxygen partial pressure value exceed > 60 kPa it is required to switch to emergency mix fed from *BIBS* systems; oxygen partial pressure of the value of 60 kPa is used in one of the ways of decompression initiation.

The emission of contamination from the first and the second group must be minimized. The minimization of the contamination content originating from gases used in the preparation of the breathing mix is achieved by using only gases from certified suppliers, marked with a proper label. Any materials used in the repairs and furnishing of the diving complex as well as the gaseous components of the breathing mix should be accompanied with the correct certification. Before their use it is required to check that they do not violate any toxicological standards.

It is advisable to check the supplied breathing atmospheres as well as the complex condition. For this purpose it is possible to carry out toxicology tests. Also, during saturation this method may be used for taking periodic measurements of pollution emission levels.

Most contamination types originating from the human organism must be handled by specially designed habitat atmosphere regeneration systems.

Toxicology norms - Toxicology tests are conducted when the possibility of habitat atmosphere contamination cannot be ruled out beyond all doubt¹⁹. Such tests have been described in the first part of this article.

¹⁷ diving depth,

¹⁸ it is possible to conduct the measurements of content instead of partial pressure; however, on condition that the conversion to partial pressure with required accuracy is achievable,

¹⁹ eg. after renovation works such as painting of the interior with a new kind of paint; when during the diving process certain contamination of the aquatic environment is brought into the bell; diver's suit contamination with grease, etc.,

Zarówno dostarczone czynniki oddechowe jak i stan kompleksu mogą być sprawdzane. W tym celu można wykonać test toksykologiczny. Podczas saturacji można także sprawdzać periodycznie poziom emisji zanieczyszczeń w ten właśnie sposób.

Z większością zanieczyszczeń, których źródłem jest sam organizm ludzki muszą sobie poradzić specjalnie projektowane układy regeneracji atmosfery habitatu.

Normy toksykologiczne - testy toksykologiczne wykonuje się, gdy nie może być wykluczona ponad wszelką wątpliwość możliwość skażenia atmosfery habitatu¹⁹. Zostały one opisane w pierwszej części artykułu.

1.3. MODYFIKACJA SKŁADU ATMOSFERY

Podczas otrzymywania i utrzymywania składu atmosfery na plateau saturacji może zaistnieć konieczność jej modyfikacji. Najczęściej potrzebna jest korekcja ciśnienia cząstkowego tlenu, gdy nie udało się otrzymać żądanej wartości podczas procesu sprężania. Często też modyfikowana jest zawartość tlenu przed procesem dekompresji²⁰. System hiperbaryczny reaguje z kilkuminutowym opóźnieniem na wykonywane korekty.

Ubytki tlenu związane z jego konsumpcją przez nurków realizowane mogą być przez systemy utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu, lub przez stałą drobną korektę składu atmosfery.

Podniesienie ciśnienia cząstkowego tlenu dogodnie jest wykonywać metodą ciśnieniową. Polega ona na chwilowym, szybkim obniżeniu o niewielką głębokość plateau saturacji i wyrównanie tej różnicy tlenem. Jeśli korekta jest znaczna można proces ten podzielić na części.

Przykładowo, można obliczyć o jaką wartość Δp należy opuścić ciśnienie z plateau saturacji $p = 700 \text{ kPa}$, aby przy powtórny, szybkim podniesieniu ciśnienia tlenem do wartości plateau saturacji podnieść jednocześnie ciśnienie cząstkowe tlenu z poziomu $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$ o wartość $\Delta p_{O_2} = 14 \text{ kPa}$.

Liczba moli tlenu n_3 dla plateau saturacji po wykonaniu korekcji ciśnienia cząstkowego tlenu ③ będzie sumą liczby moli tlenu po obniżeniu ciśnienia plateau saturacji ②: $\frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_2 \equiv \frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_1$ oraz liczby dodanych moli tlenu po powtórny sprężeniu do plateau saturacji ③: $\frac{\Delta p V}{RT} \cdot x = \frac{\Delta p V}{RT}$. Zatem sumę tę można zapisać, jako: $n_3 = \frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_1 + \frac{\Delta p V}{RT}$ - tab. 6. Zaś całkowita liczba moli dla plateau saturacji po korekcji ③ będąca równoważną i dla stanu ①, będzie wynosić: $n = \frac{pV}{RT}$. Stąd zawartość tlenu x_3 po wykonaniu korekty ③ zgodnie z definicją ułamka molowego $x_i = \frac{n_i}{n}$ wyniesie: $x_3 = \frac{n_3}{n} = \frac{p-\Delta p}{p} \cdot x_1 + \frac{\Delta p}{p} = x_1 - \frac{\Delta p}{p} \cdot x_1 + \frac{\Delta p}{p}$. Ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji po wykonaniu korekty ③ jest sumą ciśnienia początkowego tlenu p_{O_2} i różnicy, o którą należy podnieść ciśnienie cząstkowe tlenu na plateau saturacji Δp_{O_2} z jednej strony, oraz iloczynem ciśnienia plateau saturacji p i zawartości tlenu x_3 na plateau saturacji po wykonaniu korekty ③ z drugiej strony: $p_{O_2} + \Delta p_{O_2} = p \cdot x_3$.

¹⁹np. po wykonaniu remontu z wykonaniem malowania wnętrza nowym rodzajem farby, gdy podczas nurkowania zanieczyszczenia ze środowiska wodnego wtargnęły do dzwonu, zabrudzenia skafandra nurka smarami itp.,

²⁰w opisywanym systemie nurkowań helioksowych można podnieść ciśnienie cząstkowe tlenu przed dekompresją z wykonaniem wycieczki poniżej plateau saturacji,

1.3. ATMOSPHERE COMPOSITION MODIFICATION

When obtaining and preserving the atmosphere composition at the saturation plateau there might be a need for its modification. The most common adjustment is concerned with oxygen partial pressure correction if its desired value was not achieved in the compression process. Also, quite frequently oxygen content is modified before the decompression process²⁰. The hyperbaric system reacts with a delay of several minutes to the performed corrections. Losses of oxygen, resulting from its consumption during the diving process may be controlled by systems managing oxygen partial pressure or by a continuous minor adjustment of atmosphere's composition.

A convenient method for increasing oxygen partial pressure is the pressure method. It consists in a quick momentary descent by a small saturation plateau depth and levelling the difference with oxygen. If the correction is significant the process may be divided into several parts.

By way of example, it is possible to calculate what Δp value is necessary to reduce the pressure from the saturation plateau $p = 700 \text{ kPa}$, so that at the second rapid pressure increase with oxygen to the saturation plateau it will be also possible to increase the oxygen partial pressure from the level $p_{O_2} = 46 \text{ kPa}$ by the value $\Delta p_{O_2} = 14 \text{ kPa}$. The number of oxygen moles n_3 for the saturation plateau after a correction of oxygen partial pressure ③ will be a sum of the number oxygen moles after pressure reduction of the saturation plateau ②: $\frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_2 \equiv \frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_1$ and the number of the added oxygen moles after the second compression to the saturation plateau ③: $\frac{\Delta p V}{RT} \cdot x = \frac{\Delta p V}{RT}$. Thus, the sum may be expressed as: $n_3 = \frac{(p-\Delta p)V}{RT} \cdot x_1 + \frac{\Delta p V}{RT}$ - tab. 6. Whereas the total number of moles for the saturation plateau after the correction ③ equivalent to state ① will reach: $n = \frac{pV}{RT}$.

Table 6.

Molar balance in complex compression with air and helium.

Number of moles	Phase		
	①	②	③
total n	p	$(p - \Delta p)$	p
oxygen n_{O_2}	$p \cdot x_1$	$(p - \Delta p) \cdot x_1$	$(p - \Delta p) \cdot x_1 + \Delta p$

①

$p ; x_1 ; n$

②

$p \rightarrow p - \Delta p$
 $x_2 = x_1$

$V, R, T = idem$

③

$p - \Delta p \rightarrow p$
 x_3

$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow n \triangleq p \mid R, T, V = idem$

where: p_0 – regular pressure, p_k – pressure in phase ② of complex compression with air, V – complex volume x_0 – oxygen content in the air, p_{O_2} – oxygen partial pressure at the saturation plateau.

²⁰ in the described heliox diving system the oxygen partial pressure may be increased prior to decompression by performing an excursion below the saturation plateau,



Consequently, the oxygen content x_3 after the correction ③ according to mole fraction definition $x_i = \frac{n_i}{n}$ will be equal to: $x_3 = \frac{n_3}{n} = \frac{p-\Delta p}{p} \cdot x_1 + \frac{\Delta p}{p} = x_1 - \frac{\Delta p}{p} \cdot x_1 + \frac{\Delta p}{p}$. Oxygen partial pressure at the saturation plateau after the correction ③ is a sum of oxygen partial pressure p_{O_2} and the remainder by which the oxygen partial pressure, must be increased at the saturation plateau Δp_{O_2} on the one hand, and the product between the saturation plateau pressure p and oxygen content x_3 at the saturation plateau after the correction ③ on the other hand: $p_{O_2} + \Delta p_{O_2} = p \cdot x_3$. Thus, using the derived relationship $x_3 = x_1 + \frac{(1-x_1)\Delta p}{p}$ we may write what follows: $p_{O_2} + \Delta p_{O_2} = p \cdot x_1 + (1-x_1) \cdot \Delta p$. According to task definition and conditions, the initial oxygen partial pressure p_{O_2} for the saturation plateau before the correction ① may be expressed as: $p_{O_2} = p \cdot x_1$. Consequently, the equation $p_{O_2} + \Delta p_{O_2} = p \cdot x_1 + (1-x_1) \cdot \Delta p$ will take the following form: $p_{O_2} + \Delta p_{O_2} = p_{O_2} + (1-x_1) \cdot \Delta p$, and after the reduction: $\Delta p_{O_2} = p \cdot \Delta x = (1-x_1) \cdot \Delta p$. Further transformation will enable calculation of the pressure by which it is necessary to initially reduce the saturation plateau Δp , so that by increasing it to the original value with oxygen $x = 1$ it will result in oxygen partial pressure increase at the plateau $p = 700 \text{ kPa}$ by $\Delta p_{O_2} = 14 \text{ kPa}$: $\Delta p = \frac{\Delta p_{O_2}}{1-x_1}$. Using the partial pressure definition $x_1 = \frac{p_{O_2}}{p}$ it is possible to transform the latter relationship to the following form: $\Delta p = \frac{\Delta p_{O_2}}{1-\frac{p_{O_2}}{p}}$. Thus, the value by which the pressure Δp must be reduced from the saturation plateau $p = 700 \text{ kPa}$ from ② to ③ will reach: $\Delta p \cong 15,0 \text{ kPa} \cong 1,5 \text{ mH}_2\text{O}$.

1.4. STAY PLAN AT THE SATURATION PLATEAU

Helium and heliox demand

The starting point for planning the demand for gases needed during saturation rests in the determination of the saturation plateau depth.

Proper calculations may be performed by assuming temperature stability for a given hyperbaric complex volume with the use of Boyle-Mariotte's law. This will constitute an operational reserve.

It is good practice to have a large enough volume of gas to hand to allow the diving complex to be filled at least twice, therefore the obtained demand needs to be doubled. The reserve will constitute an unalterable emergency stock.

Consequently, in order to carry out a saturation dive it is necessary to accumulate triple quantity of the calculated reserve of gases. The unalterable reserve, if not lessened in the course of diving, may be treated as a security for consecutive saturation dives.

In planning saturation dives it is also required to consider a useful form of reserve storage. For example, it should be taken into account whether it is possible to feed a complex possessing a volume of $V = 43 \text{ m}^3$ with helium supplied only from transport cylinders with the geometric volume equal to $V_z = 50 \text{ dm}^3$ and the working pressure during the compression process to the saturation plateau of $p_z = 20 \text{ MPa}$. A practical question concerns the time τ of pressure decrease in transport cylinders during the compression, and the determination of whether the crew would manage to exchange them during the compression process.

Assuming that all operations on gases in the compression process to the saturation plateau will be carried out in the same temperature $T = \text{idem}$, the equation concerned with the state of perfect gases will take the form of Boyle-Mariotte's equation: $p \cdot V = \text{idem}$. Thus the speed of pressure decrease in the transport cylinder \dot{p}_z will amount to: $\dot{p}_z = \frac{p \cdot V}{V_z}$, where: \dot{p}_z - pressure decrease speed in the transport cylinder, V_z - cylinder volume, V - complex volume, \dot{p} - pressure increase speed to the saturation plateau. The feed time τ from one cylinder may be expressed as follows: $\tau = \frac{p_z}{\dot{p}_z}$, where: p_z - pressure in cylinders. By combining the two equations we will obtain the following expression: $\tau = \frac{p_z \cdot V_z}{p \cdot V}$.

Stąd do przeprowadzenia nurkowania saturowanego należy zgromadzić potrojoną ilość obliczonego zapasu. Zapas nienaruszalny, jeśli nie będzie uszczuplony podczas nurkowania może stanowić zabezpieczenie dla dalszych nurkowań saturowanych.

Przy planowaniu nurkowań saturowanych należy także zastanowić się nad użyteczną formą ich przechowywania. Przykładowo należy zastanowić się czy możliwym jest zasilanie helem kompleksu o pojemności $V = 43 \text{ m}^3$ jedynie z butli transportowych o pojemności geometrycznej $V_z = 50 \text{ dm}^3$ i ciśnieniu roboczym $p_z = 20 \text{ MPa}$ podczas procesu sprężania do plateau saturacji. Praktycznie pytanie dotyczy czasu τ spadku ciśnienia w butlach transportowych podczas sprężania i stąd oszacowania czy obsługa nadażyłaby je zmieniać podczas procesu sprężania.

Przyjmując, że podczas wszelkich operacji z gazami przy kompresji do plateau saturacji temperatura będzie taka sama $T = \text{idem}$, to równanie stanu dla gazów doskonałych przybierze formę równania Boyle'a–Mariottea: $p \cdot V = \text{idem}$. Stąd szybkość spadku ciśnienia w butli transportowej \dot{p}_z wyniesie: $\dot{p}_z = \frac{p \cdot V}{V_z}$, gdzie: \dot{p}_z – szybkość spadku ciśnienia w butli transportowej, V_z – objętość butli, V – objętość kompleksu, \dot{p} – szybkość podnoszenia ciśnienia do plateau saturacji. Czas zasilania τ z jednej butli można zapisać jako: $\tau = \frac{p_z \cdot V_z}{\dot{p}_z}$, gdzie: p_z – ciśnienie w zbiornikach. Łącząc te równania, można zapisać: $\tau = \frac{p_z \cdot V_z}{\dot{p} \cdot V}$.

Najwolniejsza prędkość podnoszenia ciśnienia podczas kompresji do plateau saturacji wynosi $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1} \cong 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$, stąd czas zasilania τ przez jedną butlę o pojemności $V_z = 50 \text{ dm}^3 = 0,05 \text{ m}^3$ i ciśnieniu roboczym $p_z = 20 \text{ MPa}$, wyniesie: $\tau \cong 15,5 \text{ min} \cong 15 \text{ min } 30 \text{ s}$.

Możliwe jest zasilanie kompleksu DKN-120 z butli transportowych $V_z = 50 \text{ dm}^3$; $p_z = 20 \text{ MPa}$ podczas sprężania z minimalną szybkością $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$.

Zwiększenie prędkość podnoszenia ciśnienia podczas kompresji do plateau saturacji do $\dot{p} = 1 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1} \cong 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$ spowoduje, że czas zasilania τ przez jedną butlę o pojemności $V_z = 50 \text{ dm}^3 = 0,05 \text{ m}^3$ i ciśnieniu roboczym $p_z = 20 \text{ MPa}$, wyniesie: $\tau \cong 2,3 \text{ min} \cong 2 \text{ min } 18 \text{ s}$. Podczas sprężania z szybkością $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ do plateau saturacji nie jest możliwe zasilanie kompleksu z butli transportowych, gdyż obsługa nie nadaży wymieniać butli na rampie zasilającej.

Zapotrzebowanie na tlen

Podczas pobytu na plateau saturacji atmosfera podlega regeneracji polegającej na usuwaniu powstającego CO_2 pary wodnej i innych zanieczyszczeń, podgrzewaniu lub schładzaniu i uzupełnianiu tlenu. Należy zatem oszacować jaka ilość tlenu potrzebna jest do uzupełniania na plateau saturacji.

Przykładowo można policzyć, jakie jest zapotrzebowanie na tlen do uzupełniania składu atmosfery kompleksu nurkowego na jednego nurka podczas pobytu na plateau saturacji trwającego $\tau = 4 \text{ dni}$. Praktycznie pytanie to dotyczy objętości tlenu $V_{\text{O}_2}^0 \equiv V_{\text{O}_2}$ odniesionej do warunków normalnych. Zakładając, że konsumpcja tlenu \dot{v}_{O_2} nie zależy od głębokości można zapisać, że zapotrzebowanie na tlen V_{O_2} odniesione do warunków normalnych wyniesie: $V_{\text{O}_2} = \dot{v}_{\text{O}_2} \cdot \tau$, gdzie: \dot{v}_{O_2} – założona konsumpcja tlenu, τ – czas nurkowania, V_{O_2} – zapotrzebowanie na czynnik oddechowy odniesione do warunków normalnych. Przyjmując, że przy pobycie na plateau saturacji nurek będzie wykonywał wysiłek lekki można przyjąć, że maksymalna konsumpcja tlenu $\dot{v}_{\text{O}_2}^{\text{max}} \equiv \dot{v}_{\text{O}_2} = 0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Stąd zapotrzebowanie na tlen wyniesie: $V_{\text{O}_2} = 4032 \text{ dm}^3 \cong 4 \text{ Nm}^3$. Dobrą praktyką je to, że podczas planowania takiego jak tutaj nurkowania zabezpiecza się 100% nadmiaru tlenu. Stąd należy zabezpieczyć $V_{\text{O}_2} = 8 \text{ Nm}^3$ tlenu na jednego nurka.

The slowest speed of increase in the pressure during the compression to the saturation plateau reaches $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1} \cong 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$, hence the feed time τ from one cylinder with the volume of $V_z = 50 \text{ dm}^3 = 0,05 \text{ m}^3$ and the working pressure of $p_z = 20 \text{ MPa}$ will amount to: $\tau \cong 15,5 \text{ min} \cong 15 \text{ min } 30 \text{ s}$.

Thus we may conclude that it is possible to feed the complex DKN-120 from transport cylinders $V_z = 50 \text{ dm}^3$; $p_z = 20 \text{ MPa}$ during the compression with the minimum speed of $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$.

An acceleration of the pressure increase during the compression to the saturation plateau to $\dot{p} = 1 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1} \cong 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$ will cause the feed time τ from one cylinder with the volume of $V_z = 50 \text{ dm}^3 = 0,05 \text{ m}^3$ and the working pressure $p_z = 20 \text{ MPa}$ to reach: $\tau \cong 2,3 \text{ min} \cong 2 \text{ min } 18 \text{ s}$. Hence, during the compression with the speed of $\dot{p} = 0,15 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ to the saturation plateau it is not possible to feed the complex from transport cylinders, as the crew would not be able to exchange cylinders quickly enough on the feeding ramp.

Oxygen demand

During a stay at the saturation plateau the atmosphere undergoes a regeneration process consisting in the disposal of the produced CO_2 , water vapour and other kinds of pollution, heating or cooling and a supplementation of oxygen. For this reason it is necessary to evaluate what quantity of oxygen reserve is required at the saturation plateau. For example, we may calculate the demand for oxygen used in the supplementation of the atmosphere of the diving complex per a single diver during his stay at the saturation plateau lasting τ - 4 days. In practice, the question concerns the volume of oxygen $V_{\text{O}_2}^0 \equiv V_{\text{O}_2}$ as compared with regular conditions.

Assuming that oxygen consumption \dot{v}_0 is not dependent on depth we may write that the demand for oxygen V_{O_2} in relation to regular conditions will be equal to: $V_{\text{O}_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau$, where: \dot{v}_0 – assumed oxygen consumption, τ – diving time, V_{O_2} – demand for the breathing mix juxtaposed with regular conditions. Assuming the diver's light effort during the stay at the saturation plateau we may conclude that the maximum oxygen consumption \dot{v}_0 will reach $\dot{v}_0^{\text{max}} \equiv \dot{v}_0 = 0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Thus, the oxygen demand will be as follows: $V_{\text{O}_2} = 4032 \text{ dm}^3 \cong 4 \text{ Nm}^3$. Good practice ensures a 100% oxygen surplus in the planning of the dives of this kind. And so, according to this principle it is required to provide $V_0 = 8 \text{ Nm}^3$ of oxygen per one diver.

Soda lime demand

During a stay at the saturation plateau the atmosphere undergoes a regeneration process, among other things, consisting in the disposal of the produced CO_2 through chemisorption based on soda lime. Thus, it is important to estimate the necessary quantity of soda lime used in saturation diving.

By way of example, we may calculate the demand for soda lime used in the removal of CO_2 from the habitat's atmosphere during the entire saturation process of τ – 6 days

Carbon dioxide CO_2 is a product of metabolism. Its emission depends on oxygen consumption \dot{v}_{O_2} . The most common presumption is that the production of carbon dioxide \dot{v}_{CO_2} constitutes 80% of oxygen consumption \dot{v}_{O_2} : $\dot{v}_{\text{CO}_2} \cong 0,8 \cdot \dot{v}_{\text{O}_2}$; however, in calculations it is assumed that these values are equivalent. Consequently, the level of CO_2 production may be calculated in the following way: $V_{\text{CO}_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau$, where: \dot{v}_0 – assumed CO_2 production equivalent to oxygen consumption level, τ – diving time, V_{CO_2} – production in relation to regular conditions.

Zapotrzebowanie na wapno sodowane

Podczas pobytu na plateau saturacji atmosfera podlega regeneracji polegającej między innymi na usuwaniu powstającego CO_2 realizowanemu przez chemisorpcję na wapnie sodowanym. Oczywiście istotnym jest zaplanowanie ilości wapna sodowanego do przeprowadzenia nurkowania saturowanego.

Przykładowo można obliczyć zapotrzebowanie na wapno sodowane do usuwania powstającego CO_2 z atmosfery habitatu podczas całego procesu saturacji trwającego $\tau = 6$ dni.

Ditlenek węgla CO_2 powstaje w procesie wymiany gazowej. Jego emisja zależy od konsumpcji tlenu \dot{v}_{O_2} . Najczęściej przyjmuje się, że produkcja ditlenku węgla \dot{v}_{CO_2} stanowi 80% konsumpcji tlenu \dot{v}_{O_2} : $\dot{v}_{\text{CO}_2} \cong 0,8 \cdot \dot{v}_{\text{O}_2}$, lecz przy obliczeniach przyjmuje się, że te wielkości są sobie równoważne. Dlatego produkcję CO_2 można przyjąć na poziomie: $V_{\text{CO}_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau$, gdzie: \dot{v}_0 – założona produkcja CO_2 równoważna konsumpcji tlenu, τ – czas nurkowania, V_{CO_2} – produkcja CO_2 odniesiona do warunków normalnych Zakładając, że średnio wydatkowany wysiłek umiarkowanie lekki można przyjąć produkcję CO_2 na poziomie $\dot{v}_0^{\text{max}} = 1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Przyjmuje się, że dynamicznie masa $m = 1 \text{ kg}$ wapna sodowanego potrafi usunąć do $\frac{V_0}{m} = 90 \text{ dm}^3 \text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ wapna sodowanego. Stąd szacunkowa masa wapna m potrzebna na saturację wyniesie: $m = \frac{\dot{v}_0 \tau}{V_0}$, stąd masa potrzebnego wapna sodowanego wyniesie $m \cong 96 \text{ kg}$. Efektywność chemisorpcji zależy od ciśnienia i temperatury. Uwzględnienie tego faktu wiąże się z przyjmowaniem odpowiedniego nadmiaru zapasu wapna sodowanego na saturację. W rozpatrywanym przypadku należy przyjąć, że potrzebny jest trzykrotny nadmiar $m = 3 \cdot 96 \cong 300 \text{ kg}$ wapna sodowanego pochodzący z przynajmniej dwóch 150 kg różnych partii tego materiału. Oczywiście niewykorzystane wapno może stanowić zabezpieczenie dla następnych nurkowań saturowanych.

1.5. NURKOWANIA Z PLATEAU SATURACJI

W czasie nurkowania saturowanego nurek może zmieniać głębokość zarówno w dół jak i w górę, przy czym należy unikać prac na głębokościach mniejszych niż plateau saturacji – tab. 7 i tab. 8. Obie tabele wykorzystywane są do planowania wycieczek z plateau saturacji przy pracach podwodnych. Limitują one jedynie zasięg i głębokość – wycieczki nie wymagają podejmowania dekompresji podczas powrotu na plateau saturacji.

By way of example, we may calculate the demand for soda lime used in the removal of CO_2 from the habitat's atmosphere during the entire saturation process of $\tau = 6$ days

Carbon dioxide CO_2 is a product of metabolism. Its emission depends on oxygen consumption \dot{v}_{O_2} . The most common presumption is that the production of carbon dioxide \dot{v}_{CO_2} constitutes 80% of oxygen consumption \dot{v}_{O_2} : $\dot{v}_{\text{CO}_2} \cong 0,8 \cdot \dot{v}_{\text{O}_2}$; however, in calculations it is assumed that these values are equivalent. Consequently, the level of CO_2 production may be calculated in the following way: $V_{\text{CO}_2} = \dot{v}_0 \cdot \tau$, where: \dot{v}_0 – assumed CO_2 production equivalent to oxygen consumption level, τ – diving time, V_{CO_2} – production in relation to regular conditions.

Assuming the diver is only exerting a relatively light effort we may conclude that the CO_2 production will reach $\dot{v}_0^{\text{max}} = 1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. It is assumed that the mass $m = 1 \text{ kg}$ of soda lime is capable of removing up to: $\frac{V_0}{m} = 90 \text{ dm}^3 \text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ soda lime. Thus, the estimated lime mass m required in the saturation will reach: $m = \frac{V_0 \tau}{V_0}$, whereas the mass of soda lime will amount to $m \cong 96 \text{ kg}$. Chemisorption efficiency is dependent on pressure and temperature. This last fact being consideration is connected with the assumption made in order to ensure a proper surplus in the soda lime reserve per saturation. In the examined case we need to assume that it is required to provide triple surplus $m = 3 \cdot 96 \cong 300 \text{ kg}$ of soda lime coming from at least two different 150kg lots of this material. Of course it is possible to use the remaining lime as a security in consecutive saturation dives.

1.5. DIVING FROM SATURATION PLATEAU

During a saturation dive a diver may alter the depth in both directions, up and down, however he needs to avoid working at the depths shallower than the saturation plateau – tab. 7 and tab. 8. Both the tables are applied in planning excursions from the saturation plateau when carrying out underwater works. They limit only the scope and depth – excursions do not require undergoing decompression in the return to the saturation plateau.

Tabela 7.

Dozwolone nurkowania na głębokości większe od głębokości plateau saturacji.

Głębokość plateau saturacji		Dozwolona głębokość		Dozwolona zmiana głębokości		Głębokość plateau saturacji		Dozwolona głębokość		Dozwolona zmiana głębokości	
[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]	[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]
30	9	70	21	40	12						
40	12	83	25	43	13	410	124	516	156	106	32
50	15	96	29	46	14	420	127	527	160	107	33
60	18	108	33	48	15	430	130	538	163	108	33
70	21	121	37	51	16	440	133	549	166	109	33
80	24	133	40	53	16	450	136	561	170	111	34
90	27	146	44	56	17	460	139	572	173	112	34
100	30	158	48	58	18	470	142	583	177	113	35
110	33	170	52	60	19	480	145	594	180	114	35
120	36	182	55	62	19	490	148	605	183	115	35
130	39	194	59	64	20	500	152	616	187	116	35
140	42	206	62	66	20	510	155	627	190	117	35
150	45	218	66	68	21	520	158	638	193	118	35
160	48	230	70	70	22	530	161	649	197	119	36
170	52	242	73	72	21	540	164	660	200	120	36
180	55	253	77	73	22	550	167	672	204	122	37
190	58	265	80	75	22	560	170	683	207	123	37
200	61	277	84	77	23	570	173	694	210	124	37
210	64	288	87	78	23	580	176	705	214	125	38
220	67	300	91	80	24	590	179	716	217	126	38
230	70	312	95	82	25	600	182	727	220	127	38
240	73	323	98	83	25	610	185	738	224	128	39
250	76	335	102	85	26	620	188	749	227	129	39
260	79	346	105	86	26	630	191	760	230	130	39
270	82	358	108	88	26	640	194	771	234	131	40
280	85	368	112	88	27	650	197	782	237	132	40
290	88	380	115	90	27	660	200	793	240	133	40
300	91	392	119	92	28	670	203	803	243	133	40
310	94	403	122	93	28	680	206	814	247	134	41
320	97	415	126	95	29	690	209	825	250	135	41
330	100	426	129	96	29	700	212	836	253	136	41
340	103	437	132	97	29	710	215	847	257	137	42
350	106	448	136	98	30	720	218	858	260	138	42
360	109	460	139	100	30	730	221	869	263	139	42
370	112	471	143	101	31	740	224	880	267	140	43
380	115	482	146	102	31	750	227	891	270	141	43
390	118	493	149	103	31	760	230	902	273	142	43
400	121	505	153	105	32	770	233	913	277	143	44
380	115	482	146	102	31	780	236	924	280	144	44
390	118	493	149	103	31	790	239	934	283	144	44
400	121	505	153	105	32	800	242	946	287	146	45
						810	245	956	290	146	45
						820	248	967	293	147	45
						830	252	978	296	148	44
						840	255	989	300	149	45
						850	258	1000	303	150	45

Table 7.

Allowable dives to the depths greater than the saturation plateau depth.

Saturation plateau depth		Allowable depth		Allowable depth alteration		Saturation plateau depth		Allowable depth		Allowable depth alteration	
[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]	[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]
30	9	70	21	40	12						
40	12	83	25	43	13	410	124	516	156	106	32
50	15	96	29	46	14	420	127	527	160	107	33
60	18	108	33	48	15	430	130	538	163	108	33
70	21	121	37	51	16	440	133	549	166	109	33
80	24	133	40	53	16	450	136	561	170	111	34
90	27	146	44	56	17	460	139	572	173	112	34
100	30	158	48	58	18	470	142	583	177	113	35
110	33	170	52	60	19	480	145	594	180	114	35
120	36	182	55	62	19	490	148	605	183	115	35
130	39	194	59	64	20	500	152	616	187	116	35
140	42	206	62	66	20	510	155	627	190	117	35
150	45	218	66	68	21	520	158	638	193	118	35
160	48	230	70	70	22	530	161	649	197	119	36
170	52	242	73	72	21	540	164	660	200	120	36
180	55	253	77	73	22	550	167	672	204	122	37
190	58	265	80	75	22	560	170	683	207	123	37
200	61	277	84	77	23	570	173	694	210	124	37
210	64	288	87	78	23	580	176	705	214	125	38
220	67	300	91	80	24	590	179	716	217	126	38
230	70	312	95	82	25	600	182	727	220	127	38
240	73	323	98	83	25	610	185	738	224	128	39
250	76	335	102	85	26	620	188	749	227	129	39
260	79	346	105	86	26	630	191	760	230	130	39
270	82	358	108	88	26	640	194	771	234	131	40
280	85	368	112	88	27	650	197	782	237	132	40
290	88	380	115	90	27	660	200	793	240	133	40
300	91	392	119	92	28	670	203	803	243	133	40
310	94	403	122	93	28	680	206	814	247	134	41
320	97	415	126	95	29	690	209	825	250	135	41
330	100	426	129	96	29	700	212	836	253	136	41
340	103	437	132	97	29	710	215	847	257	137	42
350	106	448	136	98	30	720	218	858	260	138	42
360	109	460	139	100	30	730	221	869	263	139	42
370	112	471	143	101	31	740	224	880	267	140	43
380	115	482	146	102	31	750	227	891	270	141	43
390	118	493	149	103	31	760	230	902	273	142	43
400	121	505	153	105	32	770	233	913	277	143	44
380	115	482	146	102	31	780	236	924	280	144	44
390	118	493	149	103	31	790	239	934	283	144	44
400	121	505	153	105	32	800	242	946	287	146	45
						810	245	956	290	146	45
						820	248	967	293	147	45
						830	252	978	296	148	44
						840	255	989	300	149	45
						850	258	1000	303	150	45

Tabela 8.

Dozwolone nurkowania na głębokości mniejsze od głębokości plateau saturacji.

Głębokość		Dozwolona głębokość		Dozwolona zmiana głębokości		Głębokość		Dozwolona głębokość		Dozwolona zmiana głębokości	
[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]	[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]
						510	155	405	123	105	32
29	9	0	0	29	9	520	158	414	125	106	33
30	9	1	0	29	9	530	161	423	128	107	33
40	12	8	2	32	10	540	164	432	131	108	33
50	15	15	5	35	10	550	167	440	133	110	34
60	18	23	7	37	11	560	170	449	136	111	34
70	21	30	9	40	12	570	173	458	139	112	34
80	24	38	12	42	12	580	176	467	142	113	34
90	27	46	14	44	13	590	179	476	144	114	35
100	30	53	16	47	14	600	182	485	147	115	35
110	33	61	18	49	15	610	185	494	150	116	35
120	36	69	21	51	15	620	188	503	152	117	36
130	39	77	23	53	16	630	191	512	155	118	36
140	42	85	26	55	16	640	194	521	158	119	36
150	45	94	28	56	17	650	197	531	161	119	36
160	48	102	31	58	17	660	200	540	164	120	36
170	52	110	33	60	19	670	203	549	166	121	37
180	55	118	36	62	19	680	206	558	169	122	37
190	58	127	38	63	20	690	209	567	172	123	37
200	61	135	41	65	20	700	212	576	175	124	37
210	64	143	43	67	21	710	215	585	177	125	38
220	67	152	46	68	21	720	218	594	180	126	38
230	70	160	48	70	22	730	221	603	183	127	38
240	73	169	51	71	22	740	224	612	185	128	39
250	76	177	54	73	22	750	227	621	188	129	39
260	79	186	56	74	23	760	230	630	191	130	39
270	82	194	59	76	23	770	233	639	194	131	39
280	85	203	62	77	23	780	236	649	197	131	39
290	88	211	64	79	24	790	239	658	199	132	40
300	91	220	67	80	24	800	242	667	202	133	40
310	94	229	69	81	25	810	245	676	205	134	40
320	97	237	72	83	25	820	248	685	208	135	40
330	100	246	75	84	25	830	252	694	210	136	42
340	103	255	77	85	26	840	255	703	213	137	42
350	106	263	80	87	26	850	258	713	216	137	42
360	109	272	82	88	27	860	261	722	219	138	42
370	112	281	85	89	27	870	264	731	222	139	42
380	115	290	88	90	27	880	267	740	224	140	43
390	118	298	90	92	28	890	270	749	227	141	43
400	121	307	93	93	28	900	273	758	230	142	43
410	124	316	96	94	28	910	276	768	233	142	43
420	127	325	98	95	29	920	279	777	235	143	44
430	130	334	101	96	29	930	282	786	238	144	44
440	133	343	104	97	29	940	285	795	241	145	44
450	136	351	106	99	30	950	288	804	244	146	44
460	139	360	109	100	30	960	291	814	247	146	44
470	142	369	112	101	30	970	294	823	249	147	45
480	145	378	115	102	30	980	297	832	252	148	45
490	148	387	117	103	31	990	300	841	255	149	45
500	152	396	120	104	32	1000	303	850	258	150	45

Table 8.

Allowable dives at the depths shallower than the saturation plateau depth.

Depth		Allowable depth		Allowable depth alteration		Depth		Allowable depth		Allowable depth alteration	
[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[ft]	[m]	[fsw]	[mH ₂ O]	[fsw]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[m]
						510	155	405	123	105	32
29	9	0	0	29	9	520	158	414	125	106	33
30	9	1	0	29	9	530	161	423	128	107	33
40	12	8	2	32	10	540	164	432	131	108	33
50	15	15	5	35	10	550	167	440	133	110	34
60	18	23	7	37	11	560	170	449	136	111	34
70	21	30	9	40	12	570	173	458	139	112	34
80	24	38	12	42	12	580	176	467	142	113	34
90	27	46	14	44	13	590	179	476	144	114	35
100	30	53	16	47	14	600	182	485	147	115	35
110	33	61	18	49	15	610	185	494	150	116	35
120	36	69	21	51	15	620	188	503	152	117	36
130	39	77	23	53	16	630	191	512	155	118	36
140	42	85	26	55	16	640	194	521	158	119	36
150	45	94	28	56	17	650	197	531	161	119	36
160	48	102	31	58	17	660	200	540	164	120	36
170	52	110	33	60	19	670	203	549	166	121	37
180	55	118	36	62	19	680	206	558	169	122	37
190	58	127	38	63	20	690	209	567	172	123	37
200	61	135	41	65	20	700	212	576	175	124	37
210	64	143	43	67	21	710	215	585	177	125	38
220	67	152	46	68	21	720	218	594	180	126	38
230	70	160	48	70	22	730	221	603	183	127	38
240	73	169	51	71	22	740	224	612	185	128	39
250	76	177	54	73	22	750	227	621	188	129	39
260	79	186	56	74	23	760	230	630	191	130	39
270	82	194	59	76	23	770	233	639	194	131	39
280	85	203	62	77	23	780	236	649	197	131	39
290	88	211	64	79	24	790	239	658	199	132	40
300	91	220	67	80	24	800	242	667	202	133	40
310	94	229	69	81	25	810	245	676	205	134	40
320	97	237	72	83	25	820	248	685	208	135	40
330	100	246	75	84	25	830	252	694	210	136	42
340	103	255	77	85	26	840	255	703	213	137	42
350	106	263	80	87	26	850	258	713	216	137	42
360	109	272	82	88	27	860	261	722	219	138	42
370	112	281	85	89	27	870	264	731	222	139	42
380	115	290	88	90	27	880	267	740	224	140	43
390	118	298	90	92	28	890	270	749	227	141	43
400	121	307	93	93	28	900	273	758	230	142	43
410	124	316	96	94	28	910	276	768	233	142	43
420	127	325	98	95	29	920	279	777	235	143	44
430	130	334	101	96	29	930	282	786	238	144	44
440	133	343	104	97	29	940	285	795	241	145	44
450	136	351	106	99	30	950	288	804	244	146	44
460	139	360	109	100	30	960	291	814	247	146	44
470	142	369	112	101	30	970	294	823	249	147	45
480	145	378	115	102	30	980	297	832	252	148	45
490	148	387	117	103	31	990	300	841	255	149	45
500	152	396	120	104	32	1000	303	850	258	150	45

Tab. 7 służy do planowania nurkowań poniżej plateau saturacji a tab. 8 na głębokości mniejsze od plateau saturacji. Różnicę pomiędzy tab. 7 i tab. 8 stanowi to, że dla tab. 7 wartością wyjściową do planowania wycieczki jest głębokość plateau saturacji zaś dla tab. 8 może to być też głębokość ostatniej wycieczki z plateau saturacji. Jeśli w ciągu ostatnich **48 godz** nurek wykonywał wycieczki na głębokości większe niż plateau saturacji, to największa osiągnięta w tym czasie głębokość jest prawidłową wartością do planowania wycieczki na głębokości mniejsze od plateau saturacji.

Przykładowo można sprawdzić możliwość wykonania wycieczki na głębokość $h_3 = 55 \text{ mH}_2\text{O}$ z plateau saturacji $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$, gdy nurek wykonał z tej głębokości dwie wycieczki na głębokości: $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ i $h_2 = 65 \text{ mH}_2\text{O}$, pierwszą **40 godz** a drugą **18 godz** przed planowaną następną wycieczką na głębokość $h_3 = 55 \text{ mH}_2\text{O}$. Wycieczki ① i ② były prowadzone na głębokości większe od głębokości plateau saturacji $H < h_1 \wedge H < h_2$. Głębokość wycieczki ③ jest na głębokość mniejszą od plateau saturacji $H > h_3$. Ponieważ czas, jaki upłynął od nurkowania ① i ② jest krótszy niż **24 godz**, to należy wybrać głębokość większą z nich: $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ i przyjąć tę głębokość, jako właściwą daną do zaplanowania wycieczki na głębokość niższą od plateau. Dla głębokości $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ dozwolona jest wycieczka na głębokość $h_3^{\text{max}} = 48 \text{ mH}_2\text{O}$ 21. Ponieważ $h_3 < h_3^{\text{max}}$ dlatego planowana operacja jest możliwa.

Podczas zmian plateau saturacji wycieczki na głębokości większe od nowego plateau saturacji mogą być podejmowane natychmiast po zmianie. Jednak wycieczki na głębokości mniejsze od głębokości nowego plateau saturacji wolno podejmować dopiero po upływie **24 godz** 22. Przykładowo można rozważyć, jakie są możliwe wycieczki z nowego plateau saturacji $H_2 = 45 \text{ mH}_2\text{O}$ po dekompresji z głębokości $H_1 = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ i pobycie powyżej **48 godz** na nowym plateau saturacji. Zgodnie z tab. 7 maksymalna głębokość wycieczki poniżej plateau saturacji wynosi $h_1^{\text{max}} = 66 \text{ mH}_2\text{O}$ co odpowiada maksymalnemu wzrostowi głębokości o $\Delta h_1^{\text{max}} = 21 \text{ mH}_2\text{O}$, oraz zgodnie z tab. 8, po **> 48 godz** na nowym plateau saturacji, maksymalna głębokość wycieczki powyżej plateau saturacji wynosi $h_1^{\text{max}} = 28 \text{ mH}_2\text{O}$ co odpowiada maksymalnemu wzrostowi głębokości o $\Delta h_1^{\text{max}} = 17 \text{ mH}_2\text{O}$.

Jeśli czas spędzony na nowej głębokości plateau saturacji jest krótszy niż **48 godz**, to maksymalne dozwolone wycieczki można ustalić analizując nurkowania odbyte podczas ostatnich **48 godz**. Przykładowo, można rozważyć, jakie są możliwe wycieczki z nowego plateau saturacji $H_2 = 45 \text{ mH}_2\text{O}$ po dekompresji z głębokości plateau $H_1 = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ jeżeli czas przebywania na nowym plateau wynosi **24 godz** a najgłębsze nurkowanie w ciągu ostatnich **48 godz** odbyło się na głębokość $h = 50 \text{ mH}_2\text{O}$. Zgodnie z tab. 7 maksymalna głębokość wycieczki poniżej plateau saturacji wynosi $h_1^{\text{max}} = 66 \text{ mH}_2\text{O}$ co odpowiada maksymalnemu wzrostowi głębokości o $\Delta h_1^{\text{max}} = 21 \text{ mH}_2\text{O}$. Ponieważ nie upłynęło **48 godz**, to zgodnie z procedurą ostatnie najgłębsze nurkowanie stanowi bazę do planowaniu nurkowań płytszych niż nowe plateau saturacji – $h = 50 \text{ mH}_2\text{O}$. Ponieważ głębokość ta nie występuje w tab. 6, to należy przyjąć następną większą wartość: $h = 52 \text{ mH}_2\text{O}$. Zgodnie z tab. 8 maksymalna głębokość wycieczki dla tej wartości wynosi $h_1^{\text{max}} = 33 \text{ mH}_2\text{O}$ co odpowiada maksymalnemu wzrostowi głębokości o $\Delta h_1^{\text{max}} = 45 - 33 = 12 \text{ mH}_2\text{O}$ 23.

Maksymalna szybkość wynurzania po wycieczce wynosi $v_1^{\text{max}} \leq 60 \text{ fsw} \cdot \text{min}^{-1} \triangleq 18 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ i jeśli nurek wynurza się szybciej należy go natychmiast zatrzymać i nakazać odstanie powstałego przyspieszenia miejscu zatrzymania przed podjęciem dalszego wynurzania do plateau saturacji.

21a nie jak to by wynikało dla głębokości plateau saturacji $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ wycieczka na głębokość $h_1 = 41 \text{ mH}_2\text{O}$ – przyjęto metodą najgorszych okoliczności głębokość następną większą głębokość $H = 61 \text{ mH}_2\text{O}$, gdyż głębokość $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ nie występuje w tab.8 a w kierunku większych głębokości następuje zmniejszenie głębokości wycieczki h_1 ,

22dotyczy to także czasu jaki musi upłynąć od osiągnięcia plateau saturacji do podjęcia pierwszej wycieczki na głębokość mniejszą od głębokości plateau,

23należy zauważyć, że wartość ta jest mniejsza niż w tab.6 gdzie $\Delta h_1^{\text{max}} = 19 \text{ mH}_2\text{O}$,

Tab. 7 is applied in planning dives to depths greater than the saturation plateau, whereas tab. 8 for dives to shallower depths in relation to the saturation plateau. The difference between tab. 7 and tab. 8 is that the starting value for tab. 7 when planning a diving excursion is the saturation plateau depth, whereas in the case of tab. 8 it may also be the depth of the last excursion from the saturation plateau. If within the last 48 hours a diver performed excursions to depths greater than the specified saturation plateau, then the greatest depth reached during that period will constitute the reference value in planning excursions to shallower depths than the saturation plateau.

For instance, let us examine the possibility of performing an excursion to the depth $h_3 = 55 \text{ mH}_2\text{O}$ from the saturation plateau $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$, with the diver's previous excursions from this depth to: $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ and $h_2 = 65 \text{ mH}_2\text{O}$, the former 40 hours and the latter 18 hours before the next planned excursion to the depth $h_3 = 55 \text{ mH}_2\text{O}$. Excursions ① and ② were conducted at greater depths than the saturation plateau $H < h_1 \wedge H < h_2$. The depth of excursion ③ is, on the other hand, shallower than the saturation plateau $H > h_3$. As the time since the dives ① and ② were executed has not exceeded 24 hours, it is required to take the greater depth of the two, i.e.: $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ and use it as a reference when planning an excursion to a depth shallower than the saturation plateau. Thus, an allowable excursion for the depth $h_1 = 70 \text{ mH}_2\text{O}$ is an excursion to $h_3^{\text{max}} = 48 \text{ mH}_2\text{O}$ 14. Therefore, as $h_3 < h_3^{\text{max}}$ the realization of the planned operation is possible.

When changing the saturation plateau depth, excursions to greater depths than the new saturation plateau may be undertaken immediately after such a modification is introduced. However, excursions to shallower depths than the new saturation plateau may be realized no sooner than after the lapse of 24 hours²². By way of example, let us consider possible excursions from a new saturation plateau of $H_2 = 45 \text{ mH}_2\text{O}$ after decompression from the plateau depth $H_1 = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ and a stay of over 48 hours at the new saturation plateau. In accordance with tab. 7 the maximum excursion depth below the saturation plateau is $h_1^{\text{max}} = 66 \text{ mH}_2\text{O}$, which corresponds to the maximum depth increase by $\Delta h_1^{\text{max}} = 21 \text{ mH}_2\text{O}$, and according to tab. 8, after > 48 hours at the new saturation plateau, the maximum excursion depth above the saturation plateau reaches $h_1^{\text{max}} = 28 \text{ mH}_2\text{O}$ which corresponds to the maximum depth increase by $\Delta h_1^{\text{max}} = 17 \text{ mH}_2\text{O}$.

If the time spent at a new saturation plateau depth is shorter than 48 hours, it will be possible to determine the maximum allowable excursion depths by carrying out an analysis of dives realized within the previous 48 hours. For example, let us see the possible excursions from a new saturation plateau $H_2 = 45 \text{ mH}_2\text{O}$ after the decompression from plateau depth $H_1 = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ assuming that the stay time at the new saturation plateau was 24 hours and the deepest dive within the last 48 hours was made to the depth $h = 50 \text{ mH}_2\text{O}$. In accordance with tab. 7 the maximum excursion depth below the saturation plateau reaches $h_1^{\text{max}} = 66 \text{ mH}_2\text{O}$, which corresponds to the maximum depth increase by $\Delta h_1^{\text{max}} = 21 \text{ mH}_2\text{O}$.

Because the time lapse did not exceed 48 hours according to the procedure it is required to use the last deepest dive as a reference point in planning shallower dives than the new saturation plateau – $h = 50 \text{ mH}_2\text{O}$. As this depth does not figure in tab. 6, it is necessary to adopt the next higher value: $h = 52 \text{ mH}_2\text{O}$. In accordance with tab. 8 the maximum excursion depth for this value reaches $h_1^{\text{max}} = 33 \text{ mH}_2\text{O}$, which corresponds to the maximum depth increase by $\Delta h_1^{\text{max}} = 45 - 33 = 12 \text{ mH}_2\text{O}$ ³.

The maximum ascending speed after a complete excursion amounts to $v_1^{\text{max}} \leq 60 \text{ fsw} \cdot \text{min}^{-1} \triangleq 18 \text{ mH}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$; therefore, if a diver proceeds faster he must be immediately stopped and ordered to wait out the required time before moving on to the saturation plateau.

²²this also concerns the time that must pass between the moment of reaching the saturation plateau and undertaking the first excursion to a shallower depth than the saturation plateau,

Maksymalny czas pracy w wodzie wynosi do **4 godz.** Najmniejszą pracującą formacją jest dwójka. Stąd należy planować tak prace aby dzień pracy zawierał się w **4 godz** nurkowania i **4 godz** pełnienia funkcji nurka zabezpieczającego w dzwonie.

1.6. WYCIECZKI Z PLATEAU SATURACJI

Zapotrzebowanie na helioks

Procedury nurkowań z plateau saturacji są bezpieczne, jeżeli używa się do oddychania helioksu o takiej zawartości tlenu, że ciśnienie cząstkowe podczas procesu nurkowania zawiera się w przedziale $p_{O_2} \in [44; 125] \text{ kPa}$. Dlatego zawsze należy zastanowić się jakie helioksy będą potrzebne do prowadzenia nurkowań z plateau saturacji. Przykładowo, Jakie helioksy²⁴ mogą być wykorzystane do nurkowań z głębokości plateau saturacji $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ na maksymalną głębokość $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$. Zawartość tlenu w helioksie można zapisać wzorem: $x_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p}$, gdzie: p_{O_2} – ciśnienie cząstkowe tlenu, p – ciśnienie całkowite, x_{O_2} – ułamek molowy tlenu w mieszaninie. Helioks użyty do oddychania podczas wycieczki z plateau saturacji powinien zawierać taką ilość tlenu, aby ciśnienie cząstkowe podczas procesu nurkowania na głębokości $h \in [60; 70] \text{ mH}_2\text{O} \cong [700; 800] \text{ kPa}$ zawierało się w przedziale $p_{O_2} \in [44; 125] \text{ kPa}$. Minimalną wartość ciśnienia cząstkowego tlenu $p_{O_2}^{\text{min}}$ otrzyma się dla minimalnej zawartości tlenu $x_{O_2}^{\text{min}}$ i minimalnego ciśnienia na głębokości nurkowania p^{min} . Podobnie maksymalną wartość ciśnienia cząstkowego tlenu $p_{O_2}^{\text{max}}$ otrzyma się dla maksymalnej zawartości tlenu $x_{O_2}^{\text{max}}$ i maksymalnego ciśnienia na głębokości nurkowania p^{max} : $x_{O_2}^{\text{min}} = \frac{p_{O_2}^{\text{min}}}{p^{\text{min}}} \wedge x_{O_2}^{\text{max}} = \frac{p_{O_2}^{\text{max}}}{p^{\text{max}}}$. Stąd zakres dozwolonych stężeń tlenu wynosi $x_{O_2} \in (6,3; 15,6) \%_v$.

Przy planowaniu prac nurkowych istotnym jest także zapotrzebowanie na helioks. Przykładowo, jakie jest zapotrzebowanie helioksu na 2 trwające $\tau = 30 \text{ min}$ nurkowania z plateau saturacji $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ na maksymalną głębokość $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$. Praktycznie pytanie dotyczy objętości helioksu V_0 odniesionej do warunków normalnych. Przyjmując, że podczas wszelkich operacji z gazami podczas nurkowania z plateau saturacji temperatura będzie taka sama $T = \text{idem}$, to równanie stanu dla gazów doskonałych przybierze formę równania Boyle'a–Mariottea: $p \cdot V = \text{idem}$. Stąd dla oczekiwanej wentylacji płuc \dot{V}_0 oraz przy założeniu, że nie ulega ona zmianie podczas zmiany głębokości $\dot{V}_0 \neq f(H) \rightarrow \dot{V}_0 \equiv \dot{V}$ można zapisać: $p_H^{\text{max}} \cdot \dot{V} \cdot \tau = p_0 \cdot V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{p_H^{\text{max}}}{p_0} \cdot \dot{V} \cdot \tau$, gdzie: p_H^{max} – ciśnienie na maksymalnej głębokości nurkowania, \dot{V} – założona wentylacja płuc, τ – czas nurkowania, p_0 – ciśnienie normalne, V_0 – zapotrzebowanie na czynnik oddechowy odniesione do warunków normalnych.

Przyjmując, że przy nurkowaniach z plateau saturacji nurek będzie wykonywał wysiłek umiarkowany można przyjąć, że maksymalna wentylacja płuc będzie kształtowała się na poziomie $\dot{V}_0^{\text{max}} \equiv \dot{V} = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, stąd zapotrzebowanie na helioks wyniesie: $V_0 = 14,4 \text{ Nm}^3$. Dobrą praktyką je to, że podczas planowania takiego jak tutaj nurkowania zabezpiecza się 100% nadmiar czynnika oddechowego. Stąd należy zabezpieczyć $V_0 = 28 \text{ Nm}^3$ helioksu.

Ciąg dalszy artykułu ukaze się w kolejnym numerze Polish Hyperbaric Research.

²⁴o jakim zakresie zawartości tlenu x_{O_2} ,

The maximum time of work in water amounts to 4 hours. The smallest working unit is a pair of divers. Following these principles works should be planned in such a way so that the diver is able to perform his dive within 4 hours and the securing diver in the bell also works no longer than 4 hours.

1.6. EXCURSIONS FROM THE SATURATION PLATEAU

Heliox demand

Diving procedures from the saturation plateau are safe when using heliox with such an oxygen content that the partial pressure during the diving process is contained within the scope $p_{O_2} \in [44; 125]$ kPa. For this reason, it is always necessary to consider heliox types needed when diving from the saturation plateau. For instance, let us see which helioxes24 may be used in diving from the saturation plateau depth $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ to maximum depth $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$. Oxygen content in heliox may be calculated with the following formula: $x_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p}$, where: p_{O_2} – oxygen partial pressure, p – total pressure, x_{O_2} – mole fraction of oxygen in the mix. The heliox used for breathing in an excursion from the saturation plateau should contain such an oxygen content so that the partial pressure in the course of diving to depths $h \in [60; 70] \text{ mH}_2\text{O} \triangleq [700; 800] \text{ kPa}$ is contained in the scope $p_{O_2} \in [44; 125] \text{ kPa}$. The minimum oxygen partial pressure value $p_{O_2}^{\text{min}}$ is obtained for minimum oxygen content $x_{O_2}^{\text{min}}$ and minimum pressure at the diving depth p^{min} . Similarly, the maximum oxygen partial pressure value $p_{O_2}^{\text{max}}$ is obtained for maximum oxygen content $x_{O_2}^{\text{max}}$ and maximum pressure at the diving depth p^{max} : $x_{O_2}^{\text{min}} = \frac{p_{O_2}^{\text{min}}}{p^{\text{min}}} \wedge x_{O_2}^{\text{max}} = \frac{p_{O_2}^{\text{max}}}{p^{\text{max}}}$. Consequently, the scope of allowable oxygen concentration levels will be $x_{O_2} \in (6,3; 15,6)\%$.

In planning diving works, another important element is the demand for heliox. By way of example, we will calculate such a demand in 2 dives of $\tau = 30 \text{ min}$. from the saturation plateau $H = 60 \text{ mH}_2\text{O}$ to maximum depth $h^{\text{max}} = 70 \text{ mH}_2\text{O}$. In practice, the question concerns heliox volume V_0 in relation to regular conditions. Assuming the diver exerts only that all operations on gases during dives from the saturation plateau will be carried out in the same temperature $T = \text{idem}$, the equation concerned with the state of perfect gases will take the form of Boyle-Mariotte's equation: $p \cdot V = \text{idem}$. Thus, for the expected lung ventilation \dot{V}_0 and assuming that it will not change during depth alteration $\dot{V}_0 \neq f(H) \rightarrow \dot{V}_0 \equiv \dot{V}$ will be expressed as: $p_H^{\text{max}} \cdot \dot{V} \cdot \tau = p_0 \cdot V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{p_H^{\text{max}}}{p_0} \cdot \dot{V} \cdot \tau$, where: p_H^{max} – pressure at maximum diving depth, \dot{V} – assumed lung ventilation, τ – diving time, p_0 – regular pressure, V_0 – demand for a breathing mix in relation to regular conditions.

Assuming the diver exerts only moderate effort in diving from the saturation plateau we may conclude that the maximum lung ventilation reach $\dot{V}_0^{\text{max}} \equiv \dot{V} = 30 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, whereas the demand for heliox will be equal to: $V_0 = 14,4 \text{ Nm}^3$. Good practice ensures a 100% surplus in the volume of available breathing mix in the planning of dives of this kind. Therefore it is necessary to ensure $V_0 = 28 \text{ Nm}^3$ of heliox.

Continuation of the article will be published in the next issue of Polish Hyperbaric Research.

Насыщенные погружения с использованием Гелиокса.

Часть II

Описанная техника ныряния была реализована как подготовка специалистов Польского военно-морского флота и становила реализацию итогов Научно-исследовательского проекта № R00–00014/3 nt: «Методология погружений сатурационных», финансируемого с ресурсов на обучение, которые были реализованы в LOTOS Петробалтик SA.

Ключевые слова: *декомпрессия, погружения сатурационные.*

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