

**UWAGI NAD PRZEBIEGIEM WYDALANIA AZOTU Z USTROJU NURKA W WARUNKACH
OBNIŻONEGO CIŚNIENIA NA STACJI KOŃCOWEJ (<1 ATA)**

**COMMENTS ON NITROGEN EXCRETION FROM THE DIVER'S ORGANISM DURING THE REDUCED
PRESSURE AT THE FINAL DECOMPRESSION STATION (<1 ATA)**

**НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ХОДОМ УДАЛЕНИЯ АЗОТА ИЗ ОРГАНИЗМА ВОДОЛАЗА ПРИ
ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ НА КОНЕЧНОЙ СТАНЦИИ (<1 АТМ)**

Tadeusz Doboszyński, Bogdan Łokucijewski

Department of Maritime and Tropical Medicine of the Military Medical Academy
Katedra Medycyny Morskiej i Tropikalnej, Wojskowa Akademia Medyczna

STRESZCZENIA / ABSTRACTS

The authors discuss the effect of reduced pressure at the final decompression station on nitrogen excretion from the organism of a diver. The assumed basis for the said considerations was the course of decompression during dives performed in lakes located at a significant altitude above sea level and diver transportation by plane following dive completion. Based on the presented calculations the authors conclude that air transport can take place only upon the lapse of time calculated with regard to the diving conditions and the expected altitude of the flight. Diving in mountain lakes requires proper consideration of the effects of the decreased atmospheric pressure.

Key words: decompression, mathematical modelling, mountain diving, air transport.

Autorzy omawiają wpływ obniżonego ciśnienia na stacji końcowej na wydalanie azotu z ustroju pletwonurka. Jako podstawę do rozważań przyjmują przebieg dekompresji podczas nurkowania w jeziorach położonych na znacznej wysokości n.p.m., oraz podczas transportu pletwonurka samolotem po ukończonym nurkowaniu. W oparciu o przedstawione wyliczenia stwierdzają, że transport pletwonurków drogą lotniczą może mieć miejsce dopiero po upływie określonego czasu, uzależnionego od warunków nurkowań, oraz przewidywalnej wysokości lotu. Nurkowania w jeziorach górskich wymagają uwzględnienia wpływu obniżonego ciśnienia atmosferycznego.

Słowa kluczowe: dekompresja, modelowanie matematyczne, nurkowanie w górach, transport lotniczy.

Авторы обсуждают влияние пониженного давления на выделение азота из тела водолаза на конечной станции. В качестве основы для решения принимают путь декомпрессии во время погружений в озерах, расположенных на значительной высоте над уровнем моря, а также во время транспорта водолаза самолетом после завершеного погружения. Исходя из представленных цифр, они утверждают, что воздушная транспортировка водолазов может иметь место лишь по истечении определенного времени, которое зависит от условий погружений и предсказуемой высоты полета. Нырание в горных озерах должно учитывать влияние пониженного атмосферного давления.

Ключевые слова: декомпрессия, математическое моделирование, ныряние в воду в горах, воздушный транспорт.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2016 Vol. 54 Issue 1 pp. 31-36

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.1515/phr-2016-0004

Pages: 6, figures: 2, tables: 0

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

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: oryginalny
Original article

Praca pierwotnie opublikowana w Biuletynie
Wojskowej Akademii Medycznej nr 3 1966

Zatwierdzono do druku w PolHypRes: 20.01.2016r.



WSTĘP

Szybki rozwój swobodnego nurkowania zarówno na płaszczyźnie amatorskiej, jak i coraz szersze jego zastosowanie jako specjalności zawodowej, skłania do zwrócenia wnikliwej uwagi na zagadnienia wyjątkowe związane z dekompresją.

Uwzględniony w różnych tabelach nurkowych margines bezpieczeństwa nie jest wprawdzie jednakowy [2, 3, 4, 5, 9, 10, 11], jednakże można określić, że jest on stosunkowo niewielki. Przedział bezpieczeństwa może się więc okazać niewystarczający, między innymi w warunkach w których płetwonurek wyraźnie odbiega od normy uwzględnianej w obliczeniach i weryfikacji tabel; np. otyłość [6,7,10], bądź w warunkach w których ciśnienie atmosferyczne na stacji końcowej jest mniejsze od jednej ata.

W tym wypadku narażenie na chorobę dekompresyjną jest uwarunkowane obecnością w tkankach proporcjonalnie większej ilości rozpuszczonego gazu aniżeli ta która jest dopuszczalna przy przejściu do ciśnienia niższego od jednej atm.

Z powyższych względów warto zwrócić uwagę zarówno na warunki dekompresji w przypadkach nurkowania w jeziorach położonych na znacznej wysokości n.p.m., jak i na zagadnienia związane z ewentualnym transportem płetwonurka samolotem po ukończonym nurkowaniu.

Za celowością poruszania powyższego tematu wydaje się przemawiać dodatkowo okoliczność, że miały już miejsce w Polsce zarówno transport chorego płetwonurka samolotem jak i przypadek choroby dekompresyjnej podczas nurkowania w jeziorze położonym na wysokości około 1500m.n.p.m.

Na odmienny przebieg dekompresji przy nurkowaniach w jeziorach na znacznej wysokości dotychczas nie zwrócono uwagi w piśmiennictwie krajowym. Natomiast w piśmiennictwie obcym zwrócono na to uwagę już stosunkowo dawno [3, 8], znajdując praktyczne rozwiązania poprzez zalecenia stosowania korekty do użytkowych tabel nurkowych.

Istnieje mianowicie zależność uwarunkowana prawem Boyle'a i Mariotte'a pomiędzy głębokością nurkowania, głębokościami stacji dekompresyjnych i ciśnieniem na powierzchni. W wyniku tej zależności głębokości nurkowania odpowiada większa głębokość równoważna, zaś głębokości poszczególnych stacji mniejsze, co wynika z wzorów:

$$h_m = \frac{m \times H_o}{H_n} \quad S_m = \frac{m \times H_n}{H_o}$$

Gdzie: H_o – 760 mm Hg,

H_n - < 760 mm Hg,

h_m - głębokość równoważna nurkowania wyrażona w metrach,

S_m - głębokość równoważna stacji wyrażona w metrach.

Odmiennego rodzaju zależność ma miejsce przy ustalaniu niezbędnego czasu desaturacji na powierzchni (po ukończonym nurkowaniu) przed przejściem do obniżonego ciśnienia.

Ponieważ w piśmiennictwie nie znaleźliśmy interesujących nas danych odnośnie desaturacji podczas pobytu na powierzchni, w oparciu o przedstawione założenia teoretyczne wykonano obliczenia i sporządzono wykresy określające wymagany czas desaturacji dla bezpiecznego przejścia do ciśnienia odpowiadającego wysokości 500, 1000, ..., 3000m.

INTRODUCTION

Rapid development of diving practices both among amateurs and professionals requires special attention to be paid to the exceptional issues connected with decompression.

The safety margin provided in various diving tables tends to vary [2, 3, 4, 5, 9, 10, 11], nonetheless it may be stated that it is relatively narrow. Thus, the safety range may prove inadequate, particularly in conditions where the diver manifestly deviates from the standards considered in the calculation and verification of tables; for example if the diver is obese [6,7,10] or in conditions where the atmospheric pressure at the final station is lower than 1 ata.

In this case exposure to decompression sickness is conditioned by the presence of a proportionally higher quantity of dissolved gas in tissues as compared with the allowable quantities in the transition to the pressure lower than 1 atm.

In view of the above considerations it is worth noting both the conditions of decompression in the case of diving in lakes located at significant altitudes above sea level as well as issues connected with possible diver transportation by plane once the dive is completed.

The benefits of discussing the above topic seems to be additionally supported by the fact that cases of transporting a sick diver by plane as well as cases of decompression sickness during diving in a lake located at the altitude of approximately 1500m a.s.l. have already been reported in Poland.

Varied decompression courses in dives performed in lakes at a significant altitude thus far have not been discussed by Polish literature, whereas foreign publications pointed to this fact already a relatively long time ago [3, 8], finding a practical solution in recommendations to apply corrections in the used diving tables.

Namely, there is a noted relationship between Boyle and Mariotte's law and the diving depth, the depths of decompression stations and the pressure at the surface. As a result of this relationship, the diving depth corresponds to a greater equivalent depth, whereas the depths of particular decompression stations to smaller values, as it stems from the following formulas:

$$h_m = \frac{m \times H_o}{H_n} \quad S_m = \frac{m \times H_n}{H_o}$$

Where: H_o – 760 mm Hg

H_n - < 760 mm Hg .

h_m –equivalent diving depth in metres,

S_m –equivalent depth of station in metres.

A different kind of relationship is noted in the determination of the required desaturation time on the surface (upon diving completion) before transition to a reduced pressure.

Since the authors were not able to find interesting data concerned with desaturation during a stay on the surface, the presented theoretical assumptions were used in performing calculations and determining the required time of desaturation for a safe transition to the pressure corresponding to the altitudes of 500, 1000, ..., 3000m.

METODA I WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano dla tkanki 120°.

Zależność (dodatkowej) saturacji od czasu nurkowania i głębokości wyrażono w % w oparciu o obliczenia i dane liczbowe wynikające z francuskich tabel nurkowych G.E.R.S. – II/8/rys.1.

Krzywą półnasylenia tkanki 120° aproksymowano metodą średniokwadratową wielomianem stopnia n=5 [5].

Wzorowi wyrażającemu zależność $t = F(x_p\%)$ nadano następującą postać:

$$t_{t120} = \sum_{i=0}^n a_n \left[1 + \frac{100}{z} / p_o - kp \right]^i$$

Gdzie:

t_{t120} – czas desaturacji tkanki 120°,

n – stopień wielomianu aproksymującego,

a_n – współczynnik aproksymowanego wielomianu,

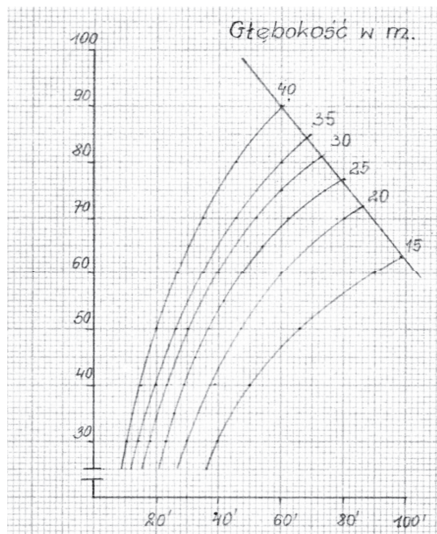
k – współczynnik tkanki 120°,

z - % (dodatkowego) wysycenia tkanki 120° przy P_o ,

p_o – ciśnienie atmosferyczne n.p. morza w atm,

P – ciśnienie atmosferyczne na wysokości 500, 1000, ..., 3000m w atm.

Wykresy bezpiecznego czasu desaturacji przedstawia rys.2.



Rys. 1. Rysunek przedstawia głębokość w metrach.

Fig. 1. Depth in [m].

DYSKUSJA

Przedstawione wykresy rys 1 i 2 pozwalają odczytać czas desaturacji na powierzchni niezbędny przed transportem pletwonurka samolotem. Należy jednak zaznaczyć, że powyższe wartości jako praktycznie nie zweryfikowane wymagają szczególnej ostrożności w ocenie i powinny być traktowane jako dane wyjściowe.

Za podstawy do obliczeń przyjęto założenie, że czas desaturacji będzie ograniczony przez tkankę o najdłuższym okresie półnasylenia. Według danych z piśmiennictwa przy krótkotrwałych nurkowaniach tkankami takimi są: tkanka 80' [11] i 120' [8,11]. Ponieważ z kolei dla obu tych tkanek przyjmuje się

CALCULATION METHOD AND RESULTS

The calculations were conducted in relation to tissue 120°.

The relationship between (additional) saturation and diving time and depth expressed in % on the basis of calculations and numerical data resulting from French diving tables G.E.R.S. – II/8/fig.1.

The semi-saturation curve of tissue 120° was approximated with the mean squared method using polynomial degree n=5 (5).

The formula expressing the relationship $t = F(x_p\%)$ was given the following form:

$$\sum_{i=0}^n a_n \left[1 + \frac{100}{z} / p_o - kp \right]^i$$

Where:

t_{t120} – tissue 120° desaturation time

n – approximate polynomial degree

a_n – approximated polynomial coefficient

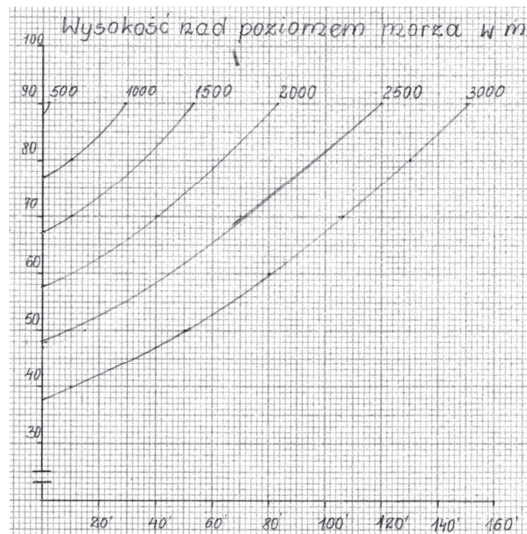
k – tissue 120° coefficient

z – % of (additional) desaturation of tissue 120° with P_o

p_o – atmospheric pressure above sea level in atm

P – atmospheric pressure at the altitude of 500, 1000, ..., 3000m in atm.

Safe desaturation time charts are presented in fig. 2.



Rys. 2. Rysunek przedstawia wysokość nad poziomem morza w metrach.

Fig. 2. Altitude above sea level in [m].

DISCUSSION

The graphs presented in fig. 1 and 2 identifies the desaturation time on the surface required before a diver can be transported by air. However, it should be emphasised that the above values, being practically unverified, require particular caution in evaluation and should be treated as output data.

The basis of these calculations was found in the assumption that the desaturation time was limited by tissues characterised by the longest semi-saturation period. According to data seen in literature, with regard to short-term diving, such tissues are: tissue 80' [11] and 120° [8, 11]. And since with regard to both these tissues



nieomal ten sam współczynnik, uznaliśmy za słuszniejszy (po wstępnych przeliczeniach) wybór tkanki 120'. Z tego względu wykres na rysunku 1 został opracowany w oparciu o dane wynikające z tabeli G.E.R.S. – II.

Procent saturacji tkanki 120' został obliczony w odniesieniu do górnej dopuszczalnej wartości, którą przyjęto za 100. 100% stanowi więc górną bezpieczną granicę saturacji przy ciśnieniu 1 atm.

Jak wynika z wykresu % saturacji przy prawidłowej dekompresji jest uzależniony zarówno od głębokości jak i czasu nurkowania. Z powyższego względu dla poszczególnych głębokości zostały wykreślone odrębne krzywe. Przebieg poszczególnych krzywych wykazuje na wykresie pewne odchylenia od wartości wynikających z tabel (nie ma kształtu schodów), ponieważ przy ich wykreślaniu dokonano przybliżeń z uwzględnieniem najwyższych wartości (dekompresja ciągła nie zaś stopniowana).

Tego rodzaju rozwiązanie uwzględnia ponadto, że czas dekompresji podany w tabelach G.E.R.S.-II jest stosunkowo krótki, pozwala naszym zdaniem wykorzystywać wykres w przypadku gdy płetwonurek posługuje się praktycznie dowolnymi tabelami dekompresji.

Wykres 2 przedstawia krzywe niezbędnego czasu desaturacji na powierzchni umożliwiające przejście do obniżonego ciśnienia odpowiadającego wartościom od 500 do 3000m [1].

Poszczególne krzywe zostały wykreślone dla wartości wynikających z rys.1 przy współczynniku 2,0,1. Obliczenia wykonano zgodnie z założeniem przyjętym w poprzedniej pracy [5].

Jak wynika z wykresu krzywe określające granicę czasu dla niezbędnej saturacji są uzależnione od dwóch wartości; wysycenia tkanki oraz wysokości n.p.m. W zakresie przyjętych wartości najwyższe wysycenie ma miejsce po ukończonym nurkowaniu i prawidłowej dekompresji z głębokości 40m po czasie 60'. W powyższym wypadku dodatkowe wysycenie wynosi 90%. Przejście z tych warunków do ciśnienia odpowiadającego wysokości 3000m wymaga 2^h 30' desaturacji na powierzchni. Wcześniejsze przejście do obniżonego ciśnienia grozi wystąpieniem epizodu choroby dekompresyjnej.

Przedstawione wykresy pozwalają więc określić niezbędny okres czasu, który powinien upłynąć zanim będzie możliwy transport lotniczy w warunkach obniżonego ciśnienia.

W przeciwieństwie do rozpatrywanych warunków złożonego zjawiska desaturacji na powierzchni, ustalenie prawidłowych warunków dekompresji przy nurkowaniu w jeziorze górskim wynika z następującej zależności: pierwsze podwojenie ciśnienia ma miejsce nie na głębokości 10m jak przy nurkowaniach w warunkach normalnego ciśnienia, ale na głębokości odpowiednio mniejszej. Z tego względu w przypadku nurkowania na głębokości n.p. 40m w jeziorze położonym na wysokości 1500m n.p.m. głębokości równoważnej nurkowania będzie odpowiadała głębokość 48m, zaś stacjom 6m i 3m, stacje 5m i 2,5m.

Jak wynika z przytoczonych danych zawsze powinny być brane pod uwagę dodatkowe okoliczności wynikające z obniżonego ciśnienia, gdyż w przeciwnym wypadku nadmierna saturacja grozi wystąpieniem choroby dekompresyjnej z wszelkimi jej następstwami.

nearly the same coefficient is adopted, it seemed proper (following initial calculations) to select tissue 120'. For this reason, the graph presented in figure 1 was prepared on the basis of data resulting from the table G.E.R.S. – II.

The percentage of tissue 120' saturation was calculated in relation to the upper permissible value of 100. Thus, 100% constitutes the upper safe limit of saturation with the pressure of 1 atm.

As results from the chart, the % of saturation with correctly performed decompression depends both on the depth and time of diving. For the above reason, particular depths are represented by separate curves.

The trajectory of particular curves depicts certain deviation from the values resulting from the tables (i.e. does not take the shape of steps), as they were performed on the basis of approximations with consideration of the highest values (continuous decompression, not gradual). Moreover, this type of solution takes into account the fact that the decompression time provided in the G.E.R.S.-II tables is relatively short, which in our opinion allows use of the graph in the situation when a diver operates on just about any decompression table.

Graph 2 presents curves of the necessary desaturation time on the surface enabling transition to the reduced pressure corresponding to the values between 500 and 3000 m [1].

Particular curves were designated for values resulting from fig. 1 with a coefficient of 2.0,1. The calculations were carried out in accordance with the assumption made in the previous work [5].

As stems from the chart, the curves designating the time limit for the necessary saturation depend on two values – tissue desaturation and altitude above sea level. Within the scope of the adopted values the highest desaturation occurs following diving completion and properly conducted decompression from the depth of 40 m after the time of 60'. In the above case, additional desaturation reaches 90%.

The transition from such conditions to the pressure corresponding to the altitude of 3000m requires 2h30' of desaturation on the surface. An earlier transition to a reduced pressure elevates the risk of an occurrence of an episode of decompression sickness.

Therefore, the presented graphs allow to define the required period that should elapse before transportation by air in the conditions of reduced pressure.

Contrary to the considered conditions of the complex phenomenon of desaturation on the surface, determination of proper decompression conditions in performing dives in a mountain lake results from the following relationship: in dives conducted at lower altitudes, the first pressure duplication occurs at a depth of 10m, however at altitude, this duplication happens at a respectively smaller depth. With this regard, in the case of diving to a depth of 40m above sea level in a lake located at the altitude of 1500m a.s.l. the equivalent diving depth corresponds to the depth of 48 m, whereas the equivalent depth of stations located at 6m and 3m falls at 5 m and 2.5m respectively.

According to the provided data, it is always required to consider additional circumstances resulting from reduced pressure, as otherwise excessive saturation involves the risk of decompression sickness along with all its symptoms.

WNIOSKI

- W przypadku konieczności transportowania płetwonurka samolotem po ukończonym nurkowaniu, transport drogą lotniczą może mieć miejsce dopiero po ukończeniu desaturacji na powierzchni.
- Nurkowanie w warunkach obniżonego ciśnienia na powierzchni wymaga uwzględnienia jego wpływu na głębokość nurkowania i głębokości stacji.

CONCLUSIONS

- In the case of necessity to transport a diver by plane after a completed dive it is required to first complete desaturation on the surface.
- Diving in the conditions of a decreased pressure on the surface requires taking into account its effect on the depth of diving and stations.

BIBLIOGRAPHY

1. Armstrong H.G.: Aero-space medicine, The Williams & Wilkins Company, Baltimore 1961;
2. Bogusławski W.: Theoretical considerations on the effect of pressure on human organism. Biul. Inst. Med. Mor. Trop. 6., 292, 1955;
3. Guillerme J., Rivoire J.: Traité de Plongée, Dunod, Paris 1955;
4. Davis M.R.: Deep Diving and Submarine operations. The Saint Catherine Press, London 1951;
5. Doboszyński T.: Safe exit curve without stations as one of the factors for the analysis and calculation of diving tables. In printing;
6. Dolatkowski A.: Collection of works published between 1929-1957. D-wo Mar. Woj. Gdynia 1957;
7. Łaba L.: The application of standard decompression norms in the prophylaxis of decompression sickness in divers. Evaluation of Polish Diving Tables. Biul. Inst. Med. Mor. Gdańsk nr ¼ XV, 157, 1964;
8. Marine Nationale: La Plongee. Arthand 1961;
9. M.O.N. Przepisy Służby Nurkowej Mar. Woj. Gdynia 1964;
10. Submarine Medicine Practice. Washington 1955;
11. Workman R.D.: report No 11-57. N. Exp. Div. Unit. Washington D.C. 1957.

Tadeusz Doboszyński

Katedra Medycyny Morskiej i Tropikalnej
Wojskowa Akademia Medyczna