



# HIPERBARYCZNA TERAPIA TLENOWA - CZ. 1. ZARYS HISTORYCZNY, ZASADA DZIAŁANIA KOMORY HIPERBARYCZNEJ, WSKAZANIA I PRZECIWWSKAZANIA

Hyperbaric oxygen therapy – Part 1. Historical outline,  
the principle of operation of hyperbaric chamber,  
indications and contraindications



Małgorzata Chochowska, Łukasz Martowski

Zakład Fizjoterapii, Akademia Wychowania Fizycznego w Poznaniu, ZWKF w Gorzowie Wielkopolskim, Polska

Małgorzata Chochowska –  0000-0002-7391-647X

**Streszczenie:** Wzrost zainteresowania wykorzystaniem tlenu hiperbarycznego (ang. *hyperbaric oxygen therapy*, HBOT) w medycynie skłonił autorów do przeanalizowania dostępnych przeglądów badań i metaanaliz oraz uszeregowania danych dotyczących HBOT. W pierwszej części artykułu przedstawiono: zarys historyczny badań na HBOT, zasady działania komór hiperbarycznych oraz wskazania i przeciwwskazania do stosowania tej formy leczenia.

**Abstract:** The increased interest in the use of hyperbaric oxygen therapy (HBOT) in medicine prompted the authors to analyze the available research reviews and meta-analyses, and to rank the data on HBOT. The first part of the article presents: a historical outline of research on HBOT, the principles of operation of hyperbaric chambers, as well as indications and contraindications for the use of this form of treatment.

**Słowa kluczowe:** tlenowa terapia hiperbaryczna, rys historyczny, komora hiperbaryczna, wskazania, przeciwwskazania.

**Keywords:** hyperbaric oxygen therapy, history, hyperbaric chamber, indications, contraindications.

DOI 10.53301/lw/170841

Praca wpłynęła do Redakcji: 06.07.2023

Zaakceptowano do druku: 08.08.2023

**Autor do korespondencji:**

Małgorzata Chochowska  
Zakład Fizjoterapii, Akademia Wychowania Fizycznego  
w Poznaniu, ZWKF w Gorzowie Wielkopolskim,  
ul. Estkowskiego 13, 66-400 Gorzów Wielkopolski  
e-mail: chochowska.malgorzata@gmail.com

## Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania hiperbaryczną terapią tlenową (ang. *hyperbaric oxygen therapy*, HBOT), co widać w liczbie publikacji na ten temat w bazach naukowych: 15.325 rekordów w latach 1965-2023 r., z czego 4421 (29%) w ostatnich 10 latach (2013-2023 r.). Największy wzrost zainteresowania HBOT zanotowano w latach 2020-2021, prawdopodobnie jako pokłosie poszukiwania leczenia następstw COVID-19 [1] (wyszukiwarka PubMed/05.2023, hasło: „*hyperbaric oxygen therapy*”).

Obserwuje się również olbrzymi wzrost ośrodków oferujących komercyjnie HBOT (Google./05.2023, liczba rekordów na hasło: „*hyperbaric oxygen therapy*” – 6.690.000, a na „*hyperbaric chamber*” – 2.590.000). Jest to zauważalne również w Polsce (Google/05.2023, liczba rekordów na hasło: „terapia tlenowa” – 83.700, na „leczenie tlenem” – 82.400, na „komora hiperbaryczna” – 65.000). Zachęceniu reklamą pacjenci korzystają z HBOT w leczeniu schorzeń, w których skuteczność tej metody nie została dostatecznie potwierdzona w badaniach naukowych, nie była nigdy badana lub wręcz jest niezaleca-

na. Osobną kwestią jest też brak regulacji dotyczących przeszkolenia personelu zajmującego się HBOT [2], warunki wykonywania HBOT i możliwości techniczne wykorzystywanego sprzętu (często niedostateczne, nieopowalające na uzyskanie terapeutycznej prężności tlenu).

## Zarys historyczny badań nad hiperbarią

Sprężone powietrze zostało użyte po raz pierwszy w lecnictwie w 1662 r. przez brytyjskiego lekarza Nathaniela Henshawa [3], który w 1664 r. wydał traktat opisujący „*domicilium* lub inaczej komory tlenowe”, w których powietrze o ciśnieniu atmosferycznym mogło być skondensowane lub rozrzedzone w celu leczenia chorób i poprawy stanu zdrowia [4]. Ponad 100 lat później (w 1775 r.) John Priestly odkrył tlen. Wczesne doniesienia o szkodliwości skoncentrowanego O<sub>2</sub> opóźniły jednak rozwój badań nad hiperbarią aż do XIX w. [3] W 1877 r. Fontaine zbudował pierwszą mobilną salę hiperbaryczną [5]. Od tego czasu prace nad różnymi komorami hiperbarycznymi były rozwijane z równoczesnym badaniem ich skutków terapeutycznych. W efekcie tych prac: wybudowano hotel hiperbaryczny w Cleveland w 1928 r. (mogący pomieścić ok. 70 gości), zastosowa-

no HBOT w leczeniu choroby dekompresyjnej u nurków amerykańskiej Marynarki Wojennej podczas II wojny światowej oraz opublikowano w 1959 r. wyniki głośnego badania Boerema na świniach w pracy pod tytułem „Life without blood” (tematem było utrzymanie zwierząt przy życiu za pomocą HBOT pomimo poziomu hemoglobiny uniemożliwiającego przeżycie w warunkach normalnych) [4-6]. Od czasu pierwszego skutecznego leczenia choroby dekompresyjnej w 1937 r. [3] HBOT jest stosowana i badana w coraz to nowszych dziedzinach lecznictwa.

### Komora hiperbaryczna- zasada działania

Komory hiperbaryczne wykorzystywane w HBOT dzielą się na jednostki jednomiejscowe oraz wielomiejscowe. Niezależnie od ich typu procedura terapii przebiega w ten sam sposób. Pacjent oddycha w niej 100-proc. O<sub>2</sub> pod ciśnieniem 1,5-3 razy wyższym niż panujące nad poziomem morza (1,5-3 atm) [7]. W jednostkach jednomiejscowych pacjent oddycha O<sub>2</sub> bezpośrednio wypełniając komorę. W jednostkach wielomiejscowych O<sub>2</sub> podawany jest bezpośrednio przez specjalną maskę lub nakrycie głowy [8]. Istnieją także komory jednomiejscowe wykorzystujące zakres ciśnienia od 1,2 do 1,3 atm. Są to zwykle urządzenia składane, przenośne, zbudowane z tworzyw sztucznych [3].

Zasada metody koncentruje się na zwiększeniu dostarczenia O<sub>2</sub> do tkanek. W efekcie dochodzi do poprawy w zakresie gojenia się stanów zapalnych, zaburzeń krążenia i innych dolegliwości. Na dostarczenie O<sub>2</sub> do tkanek ma wpływ wiele czynników, w tym zdolność krwi tętniczej do jego transportu i perfuzja tkanek [7].

Aspekt fizyczny nie pozostaje bez znaczenia. Na dostarczenie O<sub>2</sub> wpływa jego stężenie w roztworze, a także wydajność procesu dyfuzji. Wpływ ciśnienia gazu na jego stężenie w roztworze (surowicy/tkance) opisuje prawo Henry’ego. Według niego stężenie gazu rozpuszczonego ( $C_{gazu}$ ) jest równe ciśnieniu ( $P$ ) pomnożonemu przez współczynnik rozpuszczalności ( $S$ ) danego gazu (mierzonego w tym przypadku w temperaturze normalnej ciała ludzkiego) [3].

$$C_{gazu} = PS$$

Współczynniki rozpuszczalności trzech głównych gazów stanowiących mieszaninę powietrza atmosferycznego, mierzone w temperaturze ludzkiego ciała przedstawiają się następująco [9]:

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Tlen            | 0,024 |
| Dwutlenek węgla | 0,57  |
| Azot            | 0,012 |

Prawo Ficka opisuje szybkość procesu przepływu gazu przez tkankę/płyn. Zgodnie z nim objętość gazu przechodząca przez błonę ( $V_{gazu}$ ) jest równa ilorazowi powierzchni ( $A$ ) i grubości ( $T$ ) błony pomnożonemu przez iloczyn stałej dyfuzji ( $D$ ) i różnicy ciśnień po obu stronach błony ( $P_1 - P_2$ ) [17, 24].

$$V_{gazu} = \frac{A}{T} D(P_1 - P_2)$$

W związku z niemal niemierzalnymi wartościami grubości i powierzchni błony wzór ten upraszcza się do postaci:

$$V_{gazu} = D(P_1 - P_2)$$

Zaś stała dyfuzji przyjmuje wartość ilorazu współczynnika rozpuszczalności ( $S$ ) i pierwiastka kwadratowego z masy molowej gazu ( $\sqrt{MW}$ ) [3].

$$V_{gazu} = \frac{S}{\sqrt{MW}}(P_1 - P_2)$$

Masa molowa dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) wynosi 44 g/mol, a tlenu (O<sub>2</sub>) 32 g/mol. Różnica ta nie rekompensuje niemal 24-krotnie większego współczynnika rozpuszczalności CO<sub>2</sub>. Zatem w takich samych warunkach to O<sub>2</sub> będzie gorzej docierał do tkanek niż CO<sub>2</sub> i to zarówno ze względu na niższe stężenie gazu rozpuszczonego (prawo Henry’ego), jak i mniej wydajny proces dyfuzji (prawo Ficka).

Komora hiperbaryczna generuje wysokie ciśnienie 100% O<sub>2</sub>, powodując zwiększanie się gradientu ciśnień [7]. Przyspiesza to proces wysycania płynów tlenem oraz dyfuzję tego gazu. W następstwie dochodzi do skumulowanego efektu dostarczania O<sub>2</sub> do tkanek [10-11].

Potrzeba sprawniejszego dostarczania O<sub>2</sub> do tkanek jest podyktowana jego niedoborem w stanach patologicznych (np. urazy, trudno gojące się rany czy zatory gazowe). Wyższa podaż O<sub>2</sub> do komórek to wydajniejsze procesy powstawania nośników energii – adenozyntriofosforanów (ATP) syntezowanych w mitochondriach [3, 7].

Ponadto wiele procesów zapalnych, reumatycznych czy autoimmunologicznych może powodować zaburzenia transportu O<sub>2</sub> w organizmie. W związku z tym maksymalna jego koncentracja, w podwyższonym ciśnieniu, zapewnia poprawę danych procesów fizjologicznych [11].

### Zalecenia dotyczące zastosowania HBOT

Owoce X Europejskiej Konferencji Konsensusu w sprawie Medycyny Hiperbarycznej są rekomendacje dotyczące akceptowanych i nieakceptowanych wskazań klinicznych i praktyki stosowania HBOT ([12], z późniejszymi zmianami [13]) – Tabela.

### Przeciwwskazania i środki ostrożności do stosowania HBOT

Zwiększone ciśnienie parcjalne O<sub>2</sub> we krwi (hiperoksemia) i tkankach (hiperoksja) jest korzystne z uwagi na leczenie wielu chorób, jednakże należy pamiętać, że nadmiar reaktywnych form O<sub>2</sub> i/lub związane z tym niedobory aktywności antyoksydacyjnej mają działanie cytotoksyczne i mogą przyczynić się do powikłań HBOT. Problem jest o tyle skomplikowany, że w przypadku HBOT nie można precyzyjnie ustalić, jakie finalnie ciśnienie O<sub>2</sub> zostanie uzyskane w tkankach [14].

Wśród powikłań HBOT wymieniane są: zaćma, zwyrodnienie plamki żółtej i stożek rogówki (stres oksydacyjny nasila apoptozę komórek nabłonka barwnikowego siatkówki [15]) oraz retinopatia wcześniacza (w przypadku kobiet w ciąży korzystających HBOT [14]); a ponadto uraz ciśnieniowy (barotrauma), który powstaje w odpo-

Tabela. Rekomendacje dotyczące zaleceń stosowania HBOT [12-13].

|                                 |   |   |
|---------------------------------|---|---|
| Zalecenia do stosowania HBOT    | Zdecydowanie zalecane* (rekomendacje silne) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• zatrucie CO,</li> <li>• otwarte złamania z urazem zmiążdżeniowym,</li> <li>• zapobieganie popromiennej martwicy kości (<i>osteoradionecrosis</i>, ORN) po ekstrakcji zęba,</li> <li>• ORN (żuchwa),</li> <li>• popromienna martwica tkanek miękkich (zapalenie pęcherza moczowego, zapalenie odbytnicy),</li> <li>• choroba dekompresyjna,</li> <li>• zator gazowy,</li> <li>• infekcje bakteryjne (beztlenowe lub mieszane),</li> <li>• nagła głuchota idiopatyczna</li> </ul>  |
|                                 | Zalecane (rekomendacje słabe)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• stopa cukrzycowa,</li> <li>• martwica głowy kości udowej,</li> <li>• uszkodzenia przeszczepów skóry i płatów skórno-mięśniowych,</li> <li>• niedrożność tętnicy środkowej siatkówki (CRAO),</li> <li>• uraz zmiążdżeniowy (bez złamania),</li> <li>• ORN (kości inne niż żuchwa),</li> <li>• popromienne uszkodzenia tkanek miękkich (inne niż zapalenie pęcherza moczowego i zapalenie odbytnicy),</li> <li>• chirurgia i implantacja w obszarze radioterapii (profilaktyka),</li> <li>• owrzodzenia tętnicze (niedokrwiennie),</li> <li>• odporne przewlekłe zapalenie kości i szpiku,</li> <li>• oparzenia II stopnia (ponad 20% powierzchni ciała),</li> <li>• odma śródścienna jelit (pneumatoza),</li> <li>• neuroblastoma (stadium IV)</li> </ul> |
|                                 | Opcjonalne (rekomendacje neutralne)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• urazy mózgu (ostre i przewlekłe TBI, przewlekły udar,</li> <li>• encefalopatia po niedotlenieniu) – ścisła selekcja pacjentów,</li> <li>• popromienne uszkodzenie krtani,</li> <li>• popromienne uszkodzenie centralnego układu nerwowego (ang. <i>central nervous system</i> CNS),</li> <li>• replantacja kończyny,</li> <li>• niegojące się rany wtórne (wybrane),</li> <li>• anemia sierpowatokrwinkowa,</li> <li>• sródmiąższowe zapalenie pęcherza</li> </ul>   |
| Brak zaleceń do stosowania HBOT |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• zapalenie śródpiersia po sternotomii,</li> <li>• złośliwe zapalenie ucha zewnętrznego,</li> <li>• ostry zawał mięśnia sercowego,</li> <li>• barwnikowe zwyrodnienie siatkówki,</li> <li>• porażenie typu Bella</li> </ul>  |
| Zalecenia do niestosowania HBOT |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• zaburzenia ze spektrum autyzmu,</li> <li>• niewydolność łożyska,</li> <li>• stwardnienie rozsiane,</li> <li>• mózgowo porażenie dziecięce,</li> <li>• szumy uszne,</li> <li>• udar (faza ostra)</li> </ul>   |

\* Zalecenia do stosowania HBOT: zdecydowanie zalecane („zaleca się wykorzystanie...”); zalecane („sugeruje się wykorzystanie...”); opcjonalne („wykorzystanie jest rozsądne”).

wiedzi na niemożność wyrównania ciśnienia pomiędzy przestrzenią zewnętrzną (tu komorą hiperbaryczną), a częścią ciała pacjenta zawierającą gaz (nawet śladową ilość) – najczęściej dotyczy on ucha, ale też zębów (uprzednio leczonych), zatok przynosowych i płuc [16]. Do innych niebezpiecznych powikłań HBOT należy ostre zatrucie tlenem typu CNS, zwane efektem Paula Berta, pojawiające się podczas oddychania O<sub>2</sub> pod ciśnieniem przewyższającym 1 atm, który to wywiera toksyczny wpływ na CNS, co przejawia się niemal natychmiast pod postacią drgawek (przemijających) oraz negatywnych wzorców zachowań i zaburzeń poznawczych (nie ustalono, czy mają one charakter trwałe, czy przejściowy [17], choć na modelach mysich zauważono nasiloną apoptozę komórek hipokampa pod wpływem działania O<sub>2</sub> – ale o ciśnieniu 6 atm [18]). Wśród głównych przeciwwskazań do podjęcia HBOT wymienia się: klaustrofobię, nad-

ciśnienie tętnicze, zatorowość płucną, epizody hipoglikemii, drgawki i obecność rozrusznika serca [19].

Szacuje się, że odsetek powikłań rośnie wraz z liczbą zabiegów HBOT i wynosi 8% dla 11-29 zabiegów oraz 17% powyżej 30 zabiegów. Większość doniesień przytoczonych w tym opracowaniu rekomendowała poddanie pacjenta 20-40 zabiegom HBOT [20], co tym bardziej zmusza do zastanowienia się nad doraźnym i nie w pełni uzasadnionym stosowaniem tej metody (por. Tabela).

## Piśmiennictwo

1. Ubysz D, Giermaziak W, Ostrowska A. Hiperbaria tlenowa w leczeniu COVID-19: skuteczność i bezpieczeństwo. *Pol Hyperb Res*, 2021; 2 (75)
2. Siermuntowski P, Skrzyński S. Wymagania formalne

- i fachowe stawiane personelowi medycznemu, paramedycznemu i technicznemu ośrodków hiperbarycznych. Cz. 2. *Pol Hyperb Res*, 2020; 1 (70). DOI 10.2478/phr-2020-0001
3. Edwards ML. Hyperbaric oxygen therapy. Part 1: history and principles. *J Vet Emerg Crit Care (San Antonio)*, 2010 Jun; 20 (3): 284-8. doi: 10.1111/j.1476-4431.2010.00535.x
  4. Featherstone PJ, Ball CM. The therapeutic use of air under hyperbaric pressure. *Anaesth Intensive Care*, 2021 May; 49 (3): 159-161. doi: 10.1177/0310057X211011298
  5. Jones MW, Brett K, Han N, Wyatt HA. Hyperbaric Physics, 2022 Sep 26; In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023
  6. Krishnamurti C. Historical aspects of hyperbaric physiology and medicine. *Respiratory Physiology*, 2019; 1-18 (6)
  7. Sen S, Sen S. Therapeutic effects of hyperbaric oxygen: integrated review. *Med Gas Res*, 2021 Jan-Mar; 11 (1): 30-33. doi: 10.4103/2045-9912.310057
  8. Shah J. Hyperbaric oxygen therapy. *J Am Col Certif Wound Spec*, 2010 Apr 24; 2 (1): 9-13. doi: 10.1016/j.jcws.2010.04.001
  9. Hall JE. Guyton and Hall textbook of medical physiology. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier, 2011; 486
  10. Modi P, Cascella M. Diffusing Capacity Of The Lungs For Carbon Monoxide, 2023 Mar 13. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023 Jan
  11. Jones MW, Cooper JS. Hyperbaric therapy for wound healing. In: StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing, 2022
  12. Mathieu D, Marroni A, Kot J. Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment. *Diving Hyperb Med*, 2017 Mar; 47 (1): 24-32. doi: 10.28920/dhm47.1.24-32
  13. Mathieu D, Marroni A, Kot J. Correction to Mathieu D, Marroni A, Kot J: Tenth European Consensus Conference on Hyperbaric Medicine: recommendations for accepted and non-accepted clinical indications and practice of hyperbaric oxygen treatment. *Diving Hyperb Med*, 2017 Mar; 47 (1): 24-32. *Diving Hyperb Med*, 2017 Jun; 47 (2): 131-132. doi: 10.28920/dhm47.2.131-132. Erratum for: *Diving Hyperb Med.*, 2017 Mar; 47 (1): 24-32
  14. Ortega MA, Fraile-Martinez O, García-Montero C [i wsp]. A General Overview on the Hyperbaric Oxygen Therapy: Applications, Mechanisms and Translational Opportunities. *Medicina (Kaunas)*, 2021 Aug 24; 57 (9): 864. doi: 10.3390/medicina57090864
  15. McMonnies ChW. Hyperbaric oxygen therapy and the possibility of ocular complications or contraindications. *Clin Exp Optom*, 2015 Mar; 98 (2): 122-125. doi: 10.1111/cxo.12203
  16. Heyboer M, Sharma D, Santiago W [i wsp.]. Hyperbaric Oxygen Therapy: Side Effects Defined and Quantified. *Adv Wound Care*, 2017; 6: 210-224. doi: 10.1089/wound.2016.0718
  17. Domachevsky L, Rachmany L, Barak Y [i wsp.]. Hyperbaric Oxygen-Induced Seizures Cause a Transient Decrement in Cognitive Function. *Neuroscience*, 2013; 247: 328-334. doi: 10.1016/j.neuroscience.2013.05.052
  18. Domachevsky L, Pick ChG, Arieli Y. [i wsp.]: Do hyperbaric oxygen-induced seizures cause brain damage? *Epilepsy Res*, 2012 Jun; 100 (1-2): 37-41. doi: 10.1016/j.eplesyres.2012.01.004
  19. Chilimoniuk Z, Borkowska A, Dobosz M, Chałupnik A, Sobstyl A. Przegląd dostępnych terapii w leczeniu zespołu stopy cukrzycowej. Postępy w diagnostyce medycznej (English title: Improvements in medical diagnostics), 79. (19)
  20. Ambiru S, Furuyama N, Aono M. [i wsp.]. Analysis of risk factors associated with complications of hyperbaric oxygen therapy. *J Crit Care*, 2008; 23: 295-300. doi: 10.1016/j.jcrrc.2007.08.002. (20)