

A. Charchalis, A. Olejnik

METODYKA WENTYLACJI ATMOSFERY KOMORY DEKOMPRESYJNEJ PODCZAS POWIETRZNYCH EKSPOZYCJI HIPERBARYCZNYCH

W artykule przedstawiono wyniki doświadczalnej weryfikacji modelu wentylacji atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych.

WSTĘP

Komora dekompresyjna jest urządzeniem szeroko stosowanym w realizacji prac podwodnych, jej zastosowanie umożliwia prowadzenie dekompresji w warunkach komfortu cieplnego, uniezależnia jej przebieg od warunków hydrometeorologicznych i ogranicza pobyt nurków w toni wodnej do czasu potrzebnego jedynie na wykonanie zadania [1,3,4,7,13,15]. Ponadto, za pomocą komory dekompresyjnej można prowadzić szereg procedur leczniczych i treningowych. Te przesłanki zadecydowały o powszechnym stosowaniu komór dekompresyjnych w technologiach prac podwodnych jako urządzeń wpływających na wzrost komfortu i bezpieczeństwa pracy nurków [2,15]. Specyfika eksploatacji komory dekompresyjnej powoduje, że musi ona charakteryzować się odpowiednią szczelnością, co stwarza w jej wnętrzu warunki ekologicznie zamkniętej atmosfery. Atmosfera ta jest źródłem czynnika oddechowego dla przebywających w komorze nurków. Podlega jednak szybkiemu zanieczyszczeniu [12]. Ponieważ konstrukcja komory oraz warunki jej bezpiecznej eksploatacji uniemożliwiają realizację naturalnej wentylacji to jednym z podstawowych wymagań stawianych obsłudze jest zapewnienie nurkom wymiany atmosfery, realizowanej w odpowiednim czasie i z parametrami nie wywołującymi incydentów dekompresyjnych [5,12,14].

W Zakładzie Technologii Nurkowania i Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni od szeregu lat prowadzone są prace związane z określeniem bezpiecznego i efektywnego sposobu prowadzenia procesu wentylacji dla hiperbarycznej ekspozycji powietrznej [8,9,11,14]. Ostatnio zrealizowane prace zaowocowały opracowaniem zmodyfikowanej metodyki wentylacji opartej o aktualny stan atmosfery w komorze dekompresyjnej. Celem powyższych prac było określenie modelu wentylacji oraz jego weryfikacja na obiekcie rzeczywistym. W dotychczas stosowanym modelu wentylacji określano czas do rozpoczęcia pierwszej i kolejnych wentylacji oraz ilość czynnika wentylacyjnego potrzebnego do wykonania skutecznej wentylacji. Czas do rozpoczęcia pierwszej wentylacji był funkcją o relacji [13]:

$$\tau_1 = f\left(V_k, C_{CO2_{max}}, p, C_{CO2_{wyd}}, \dot{V}_p, k, p_0\right) \quad (1)$$

gdzie: V_k - objętość komory dekompresyjnej [dm^3], $C_{\text{CO}_2 \text{ max}}$ - dopuszczalna zawartość CO_2 w atmosferze komory na danej głębokości ekspozycji [%], p - ciśnienie robocze komory [kPa], $C_{\text{CO}_2 \text{ wyd}}$ - zawartość CO_2 w powietrzu wydychanym przez nurków [%], V_p - minutowa wentylacja płuc nurka powietrzem [dm^3/min], k - ilość nurków przebywających w przedziale wentylowanej komory, p_0 - ciśnienie atmosferyczne – 101,325 kPa.

Natomiast czas do rozpoczęcia kolejnej wentylacji był zależny od powyższych parametrów i współczynnika efektywności wentylacji, który określał ilość strat czynnika wentylacyjnego uzyskanych w czasie realizacji procesu wentylacji. Wartość współczynnika uzależniano od konstrukcji komory i warunków przeprowadzania ekspozycji. Zakładano że jego wartość waha się w granicach od 0,5 do 0,8. Ponieważ jak dotąd nie przeprowadzono badań które pozwalały by ustalić dokładną wartość powyższego współczynnika przyjmowano najgorsze warunki prowadzenia wentylacji czyli starty na poziomie 50% [13,14]. Powyższy model był wykorzystywany praktycznie ze względu na prostotę obliczeń wymaganych przy określaniu parametrów wentylacji. Jest jednak obciążony błędem związanym z nieuwzględnieniem zawartości domieszki szkodliwej w atmosferze komory na początku ekspozycji oraz przyjęciem znacznych strat czynnika wentylacyjnego. Z tego powodu opracowano nową formułę na określanie parametrów wentylacji, w której [12]:

$$\tau_1 = f\left(V_k, k, \dot{V}_{O_2}, p_{\text{CO}_2 \text{ max}}, p, p_0, x_1\right) \quad (2)$$

$$\tau_w = f\left(p, V_k, p_0, \dot{V}_1, x_k, x_w, \dot{V}_{O_2}, k, x_0\right) \quad (3)$$

$$\tau_2 = f\left(V_k, k, \dot{V}_{O_2}, p_{\text{CO}_2 \text{ max}}, p, p_0, x_k\right) \quad (4)$$

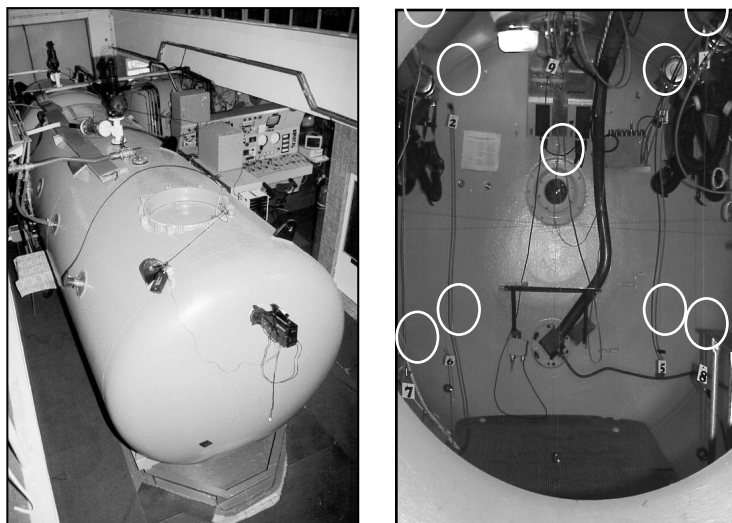
gdzie: x_1 - początkowy udział molowy CO_2 w atmosferze komory dekompresyjnej, x_w - udział molowy CO_2 w czynniku wentylacyjnym, x_k - udział molowy CO_2 w atmosferze komory dekompresyjnej na końcu wentylacji, x_0 - udział molowy CO_2 w atmosferze komory na początku procesu wentylacji, \dot{V}_{O_2} - strumień objętości konsumowanego tlenu [dm^3/min], \dot{V}_1 - strumień objętości czynnika wentylacyjnego [dm^3/min], V_k - objętość komory dekompresyjnej [dm^3], p - ciśnienie robocze komory dekompresyjnej [kPa], k - liczba nurków biorących udział w ekspozycji ciśnieniowej, τ_1 - czas do rozpoczęcia pierwszej wentylacji [min], τ_w - czas prowadzenia wentylacji [min], τ_2 - czas do rozpoczęcia drugiej wentylacji [min].

1. METODA WERYFIKACJI MODELU WENTYLACJI

Weryfikację modelu realizowano w trzech etapach. W pierwszym wykonano numeryczne badania symulacyjne, realizowane w kierunku ustalenia różnic pomiędzy stosowanym i opracowanym modelem wentylacji. Ponadto, analizowano podatność modeli na zmiany wielkości wejściowych. Drugi etap weryfikacji stanowiły badania na obiekcie rzeczywistym, które wykonano jako badania wstępne i badania właściwe. Na podstawie badań wstępnych zmodyfikowano konstrukcję stanowiska pomiarowego i sposób zbierania próbek. W badaniach wstępnych ekspozycje hiperbaryczne realizowano z udziałem ludzi i symulatora emisji dwutlenku węgla za pomocą którego symulowano pobyt ludzi w przestrzeni komory dekompresyjnej. Badania te potwierdziły

użyteczność powyższego symulatora, co pozwoliło przeprowadzić badania właściwe bez udziału nurków i w powtarzalnych warunkach.

Badania właściwe przeprowadzono z wykorzystaniem Doświadczalnego Głębokowodnego Kompleksu Nurkowego typu DGKN-120 stanowiącego wyposażenie Pracowni Komór Dekompresyjnych Zakładu Technologii Nurkowań i Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej.

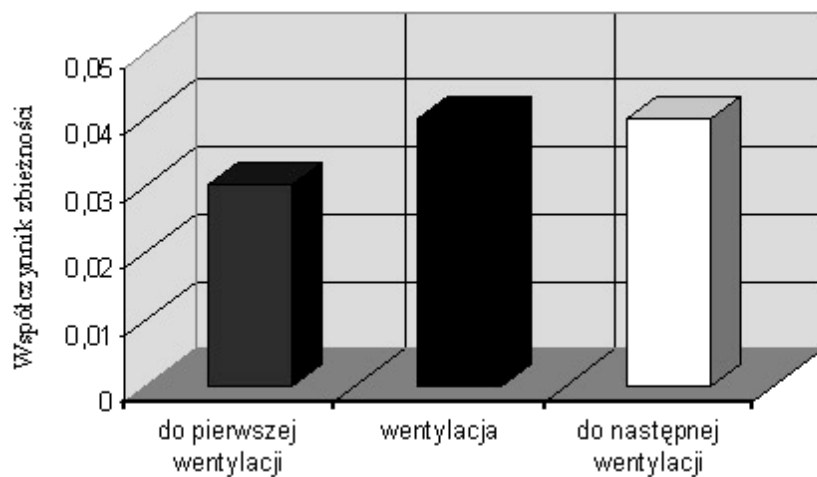


rys. 1. Doświadczalny Głębokowodny Kompleks Nurkowy DGKN-120. (z prawej rozmieszczenie punktów pobierania próbek atmosfery do analizy).

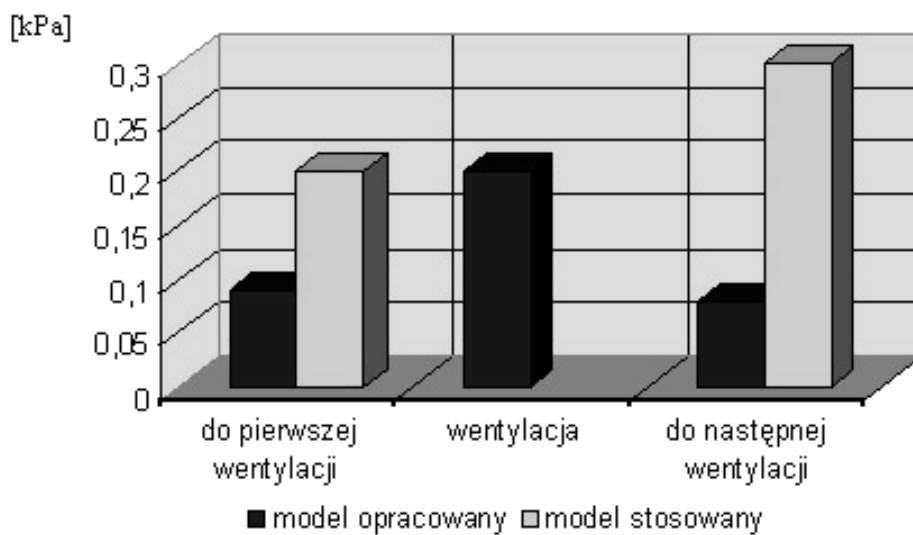
Badania prowadzono za pomocą stanowiska pomiarowego umożliwiającego jednoczesny pobór dziewięciu próbek atmosfery z monitorowanego przedziału komory dekompresyjnej. Pomiar wielkości mierzonej (zawartość procentowa CO₂) zrealizowano za pomocą przyrządu typu Analox 500. Pomiar wykonano na rozprężonej do 0,01 MPa próbce gazu. Eksperymenty prowadzono określając parametry wentylacji na podstawie wskazań przyrządu do pomiaru zawartości CO₂. Oceny uzyskanych wyników pomiarowych dokonano w oparciu o niepewność metody pomiarowej interpretowanej jako średni błąd kwadratowy wyników pomiarów bezpośrednich wielkości niezależnych typu $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ [6]. Wartość średnia błędu liczona z wszystkich wykonanych prób wyniosła 0,06 kPa. Postać funkcji obiektu badań uzyskano na drodze aproksymacji funkcji za pomocą metody najmniejszych kwadratów, natomiast jakość dopasowania funkcji aproksymującej określono za pomocą współczynnika zbieżności funkcji [16].

Trzeci etap weryfikacji stanowiły badania adekwatności modelu wentylacji. W trakcie badań analizując odległości pomiędzy funkcjami oraz określając współczynnik zbieżności funkcji szacowano jakość dopasowania funkcji modelowanych do funkcji obiektu badań.

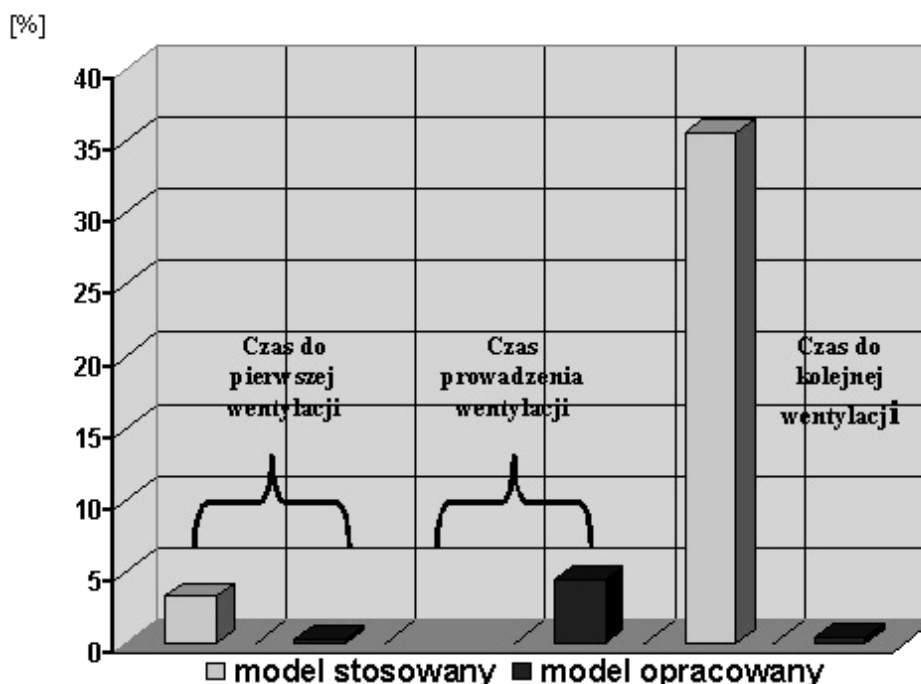
2. WYNIKI BADAŃ



rys. 2. Współczynnik zbieżności funkcji aproksymującej wyniki pomiarów.



rys. 3. Maksymalne odległości pomiędzy funkcjami modelowanymi a funkcją aproksymującą wyniki pomiarów.



rys. 4. Średnie odchylenia wartości funkcji modelowanych od funkcji aproksymującej wyniki pomiarów.

3. WNIOSKI

Maksymalne odległości pomiędzy funkcjami modelowanymi a funkcją aproksymującą uzyskano dla funkcji liczonych za pomocą obecnie stosowanego modelu wentylacji (rys. 3). Odległości funkcji liczonej za pomocą opracowanego modelu są znacznie od nich mniejsze. Model opracowany wykazał największą odległość od funkcji aproksymującej dla czasu prowadzenia wentylacji. Średnie odchylenia wartości funkcji modelowanych od funkcji aproksymującej są znacznie większe dla wartości obliczanych za pomocą dotychczas stosowanego modelu (rys. 4). Wynika to z faktu, że dotychczas stosowany model nie uwzględnia zawartości początkowej dwutlenku węgla przed rozpoczęciem ekspozycji w czasie do pierwszej wentylacji. Natomiast w czasie do rozpoczęcia kolejnej wentylacji wykorzystuje współczynnik określający straty czynnika wentylacyjnego na poziomie 50%. Model opracowany również wykazuje odchylenia od funkcji aproksymującej, które wynikają z przyjętych założeń upraszczających model. Założono, że w komorze następuje natychmiastowe wymieszanie się gazów ją wypełniających. Takie podejście do zagadnienia powoduje daleko idące uproszczenia w zapisie matematycznym polegające na pominięciu wszystkich gradientów parametrów intensywnych w kierunku osi układu i pozostawienie tylko pochodnej względem czasu. Jednak opracowany model jest dokładniejszy od dotychczas stosowanego i można go przyjąć jako podstawę modyfikacji metodyki wentylacji atmosfery dla hiperbarycznej ekspozycji powietrznej.

Zakres czynności objętych proponowaną metodyką zawiera standardowe procedury nurkowe oraz eksploatacyjne realizowane podczas każdego rodzaju ekspozycji. Całokształt proponowanej metodyki wywodzi się z dotychczas stosowanej a modyfikacji poddano sposób określania niektórych parametrów. W obliczaniu czasu do pierwszej wentylacji zaleca się stosowanie formuły uwzględniającej zawartość CO_2 w atmosferze komory przed rozpoczęciem ekspozycji. Realizację wentylacji zaleca się

przewodzą w określonym czasie z ustalonym na drodze pomiarów strumieniem czynnika wentylacyjnego. W obliczeniach czasu do następnej (kolejnych) wentylacji zaleca się stosować formułę uwzględniającą zawartość CO₂ w komorze po zakończeniu wentylacji.

Proponowana metodyka, w odróżnieniu od dotychczas stosowanej, skraca czas do pierwszej wentylacji oraz wydłuża czas do kolejnej. Za jej pomocą można określać również sposób prowadzenia wentylacji. Stosowanie powyższej metodyki stwarza możliwość zwiększenia bezpieczeństwa pobytu nurków w habitatach z uwagi na uwzględnienie stanu atmosfery oddechowej w planowaniu procesu wentylacji ze szczególnym zwróceniem uwagi na ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla. Ponadto, metodyka ta może być przydatna przy opracowywaniu dokumentów normatywnych oraz szkoleniowych dotyczących eksploatacji obiektów hiperbarycznych i jest punktem wyjściowym do badań nad dyfuzyjnym modelem wentylacji dla komory dekompresyjnej.

WYKAZ LITERATURY

1. Bednarski L. „Technologia podwodna – przegląd problemów” Cz. I Instytut Okrętowy Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1990 rok,
2. Bennet P.B., Elliot B.H. „The physiology and medicine of diving” London 1993 rok,
3. Charchalis A., Przyłipiak M. „Nurkowanie saturowane – problematyka techniczna” WSMW Gdynia 1985 rok,
4. Doboszyński T. Łokuciejewski B. „Wybór optymalnego w warunkach krajowych systemu nurkowania saturowanego do głębokości 120m” CPBR 9.5 Cel 31 Etap 1 p. 1.3 Zakład Medycyny Podwodnej WAM Gdynia 1986 rok,
5. Dobrociński St., Świtek J., Skrzyński St., Kłos R. „Zasady prowadzenia wentylacji podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych” Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 7 T07C 034 19 AMW Gdynia 2002 rok,
6. Dobosz M. „Statystyczna analiza wyników badań” Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT Warszawa 2001 rok,
7. Haux G. „Subsea manned engineering” Bailolie’re Tindall London 1982 rok,
8. Kłos R., Olejnik A., Khan A. „Monitoring of the composition of submarine atmospheres” Dräger Review 8 (2001) 28-30,
9. Olejnik A. „Wentylacja atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych” referat na Seminarium Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN, AMW Gdynia 2002 rok,
10. Olejnik A. „Wielopunktowy monitoring atmosfery komory dekompresyjnej” Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej Gdynia 2002 rok,
11. Olejnik A., Kłos R. „Makroskopowy model wentylacji atmosfery komory dekompresyjnej” Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej Gdynia 2002 rok,
12. Olejnik A. „Metodyka wentylacji atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych” rozprawa doktorska AMW Gdynia 2004 rok,
13. Przyłipiak M., Torbus J. „Sprzęt i prace nurkowe – poradnik” Wyd. MON Warszawa 1981 rok,
14. Przyłipiak M. „Wentylacja komór hiperbarycznych przy stosowaniu zewnętrznych układów regeneracji” WSMW „Nurkowanie saturowane – problematyka techniczna” Gdynia 1995 rok,

15. Skrzyński St., Kłos R., Olejnik A., Poleszak St. „Systemy nurkowe – problemy bezpieczeństwa” Praca statutowa pk. „Bazonur” Etap I 2000 rok i Etap II AMW Gdynia 2001 rok,
16. Sobczyk M. „Statystyka” PWN Warszawa 1998 rok.

Recenzent: dr hab. inż. Z. Korczewski

Autorzy:

*prof. dr hab. inż. A. Charchalis – Akademia Morska w Gdyni,
dr inż. A. Olejnik – Akademia Marynarki Wojennej*