

Adam Olejnik

Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

Wojciech Giermaziak

Główna Biblioteka Lekarska, Warszawa

MODEL MATEMATYCZNY PROCESU WENTYLACJI DLA HIPERBARYCZNEJ EKSPOZYCJI POWIETRZNEJ

MATHEMATICAL MODEL OF THE VENTILATION PROCESS FOR HYPERBARIC AIR EXPOSURE

1 Założenia upraszczające model fizyczny

W niniejszej pracy obiektem badań jest proces wentylacji atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych z udziałem ludzi. Realizacja takiej ekspozycji w komorze dekompresyjnej związana jest z wykorzystaniem kompleksu hiperbarycznego, składającego się z następujących systemów:

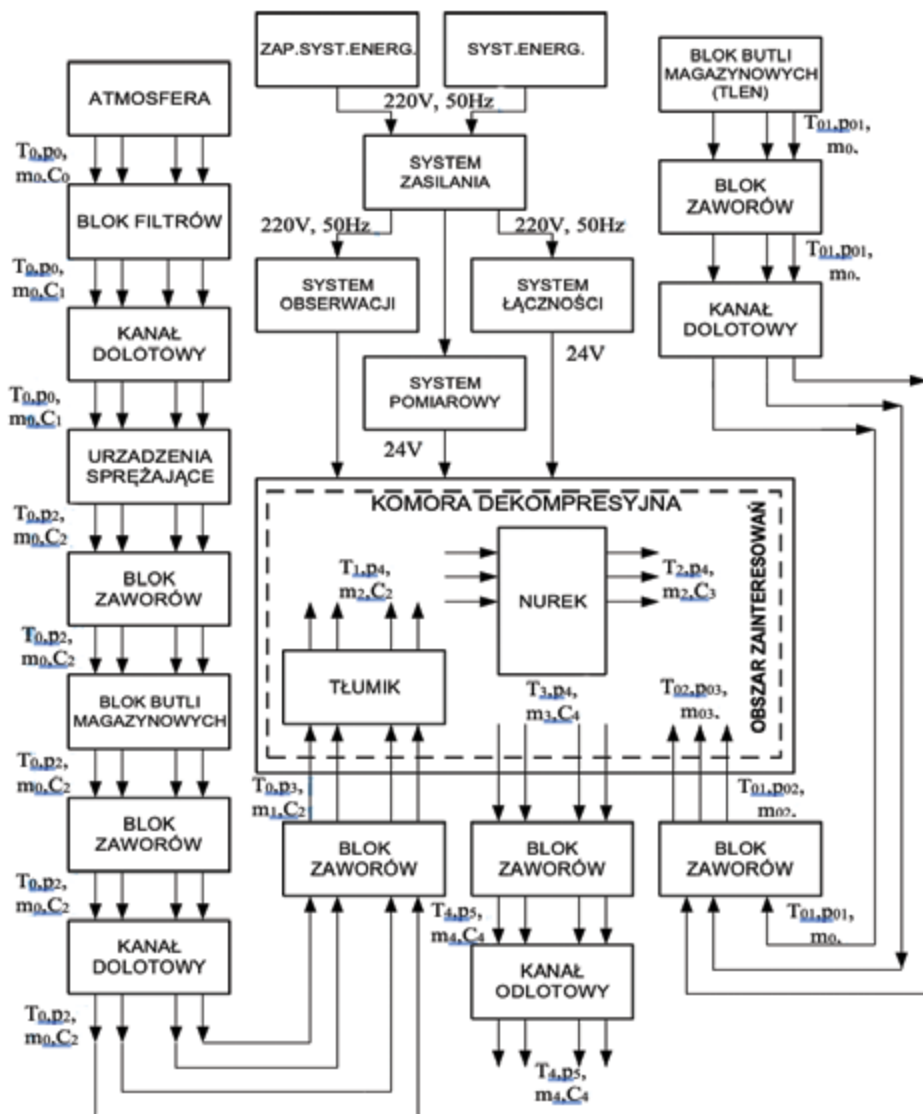
- ▶ systemu energetycznego,
- ▶ systemu łączności,
- ▶ systemów gazowych,
- ▶ systemów pomiarowych.

Konfiguracja oraz parametry techniczne kompleksu muszą zapewnić realizację ekspozycji z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa. Na przykład średnice rurociągów dolotowych i odlotowych oraz zawory musi cechować odpowiednia przepustowość umożliwiająca sprężanie i rozprężanie nurków z przewidzianą w tabeli dekompresji prędkością. Natomiast przyrządy pomiarowe powinny zapewnić pomiar wielkości umożliwiających kontrolowanie przebiegu ekspozycji z określoną dokładnością. Ze względu na proces wentylacji najważniejszym elementem kompleksu jest system gazowy, za pomocą którego jest magazynowany i dostarcza-

ny do komory hiperbarycznej czynnik oddechowy. Na rysunku 3.1 przedstawiono konfigurację systemu hiperbarycznego z zaznaczeniem części właściwej czyli komory dekompresyjnej oraz całej infrastruktury umożliwiającej przeprowadzenie ekspozycji powietrznej.

Z przeprowadzeniem badań doświadczalnych określonego procesu lub zjawiska nierozzerwalnie wiąże się opracowanie jego modelu matematycznego [27, 40]. W celu jego określenia konieczne jest zdefiniowanie zbioru wielkości charakteryzujących dany obiekt badań. Wielkości te określa się na podstawie modelu fizycznego obiektu i następnie wyodrębnia się jego model jakościowy [40].

Rys. 1. Konfiguracja systemu hiperbarycznego podczas realizacji ekspozycji powietrznej.



Budowa tego modelu musi opierać się o wielkości wzajemnie niezależne zdefiniowane na podstawie informacji i teorii dotyczących danego obiektu [27]. Kompletny model jakościowy zawiera wielkości charakteryzujące obiekt sklasyfikowane w następujący sposób:

- ▶ wielkości wejściowe, jako wielkości niezależne,
- ▶ wielkości wyjściowe, jako wielkości wynikowe,
- ▶ wielkości stałe czyli wielkości, które mają wpływ na obiekt ale ich wartości nie ulegają zmianie,
- ▶ wielkości zakłócające czyli wielkości mające przypadkowy wpływ na obiekt, których parametrów nie możemy kontrolować.

Proces wentylacji jest zbiorem zdarzeń związanych z wymianą zanieczyszczonej atmosfery komory dekompresyjnej. Jakościowy model tego procesu można przedstawić w postaci relacji:

$$F(x_1, x_w, x_k, \overset{\circ}{V}_{co2}, \overset{\circ}{V}_l, V_k, w_k, p, k, T, \varphi, \tau_1, \tau_w, \tau_2)=0 \quad (1)$$

gdzie:

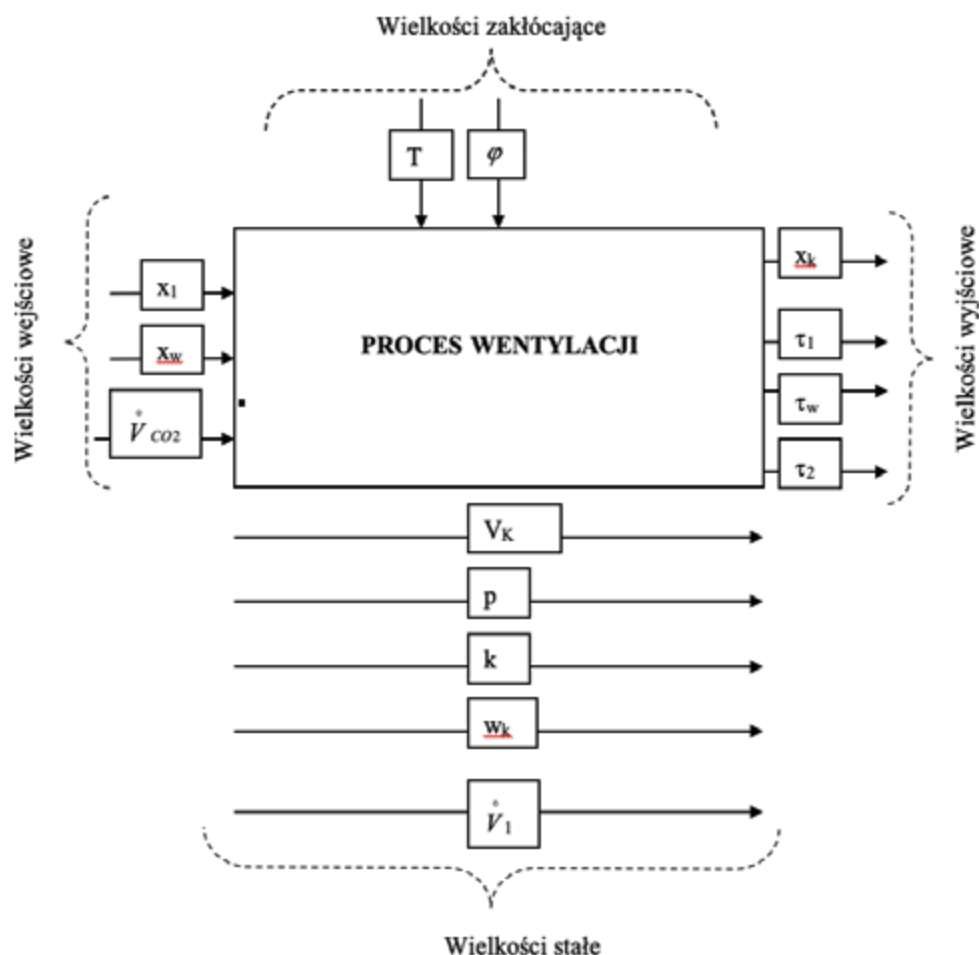
x_1	początkowy udział molowy CO ₂ w atmosferze komory dekompresyjnej
x_w	udział molowy CO ₂ w czynniku wentylacyjnym
x_k	udział molowy CO ₂ w atmosferze komory dekompresyjnej na końcu wentylacji
$\overset{\circ}{V}_{co2}$	strumień objętości CO ₂ emitowany przez jednego nurka
$\overset{\circ}{V}_l$	strumień objętości czynnika wentylacyjnego
V_k	objętość komory dekompresyjnej
w_k	współczynnik wypełnienia komory dekompresyjnej
p	ciśnienie robocze komory dekompresyjnej
k	liczba nurków biorących udział w ekspozycji ciśnieniowej
T	temperatura
φ	wilgotność
τ_1	czas do rozpoczęcia pierwszej wentylacji
τ_w	czas prowadzenia wentylacji
τ_2	czas do rozpoczęcia drugiej wentylacji

Wielkości wejściowe określono na podstawie analizy zanieczyszczeń atmosfery w prze-dziale komory dekompresyjnej. Na jej podstawie stwierdzono, że najbardziej zagrażającym zdrowiu nurków jest wzrost ciśnienia parcjalego dwutlenku węgla powiązany ze zmianą jego udziału molowego w atmosferze komory. Ponadto, ciśnienie parcjale CO₂ w atmosferze komory jest zależne od udziału molowego tego gazu w czynniku wentylacyjnym i emisji dwutlenku węgla przez nurków.

Wielkości wyjściowe to wielkości charakteryzujące sposób prowadzenia wentylacji oraz jej skuteczność. Zalicza się do nich czas po którym należy rozpocząć pierwszą wentylację

komory (τ_1). Jest to czas, w którym ciśnienie parcyjne CO_2 w atmosferze komory narasta od wartości początkowej do dopuszczalnej wartości maksymalnej. Drugą wielkością wyjściową jest czas prowadzenia wentylacji (τ_w). Jest to czas, w którym na skutek prowadzenia wentylacji ciśnienie parcyjne dwutlenku węgla w rozpatrywanym przedziale komory zmniejsza się od wartości osiągniętej na koniec czasu t_1 do przyjętej wartości minimalnej. Kolejną wielkość wyjściową to czas do następnej wentylacji (τ_2). Jest to czas, w którym ciśnienie parcyjne CO_2 ponownie narasta od wartości osiągniętej na koniec czasu t_w do dopuszczalnej wartości maksymalnej. Po upływie czasu t_2 należy ponownie rozpocząć wentylację przedziału komory. Wielkością charakteryzującą skuteczność wentylacji jest zawartość CO_2 w atmosferze komory na końcu procesu wentylacji, wielkość ta jest uzależniona od udziału molowego dwutlenku węgla w atmosferze komory na końcu wentylacji (x_k).

Rys. 2. Model jakościowy obiektu badań.



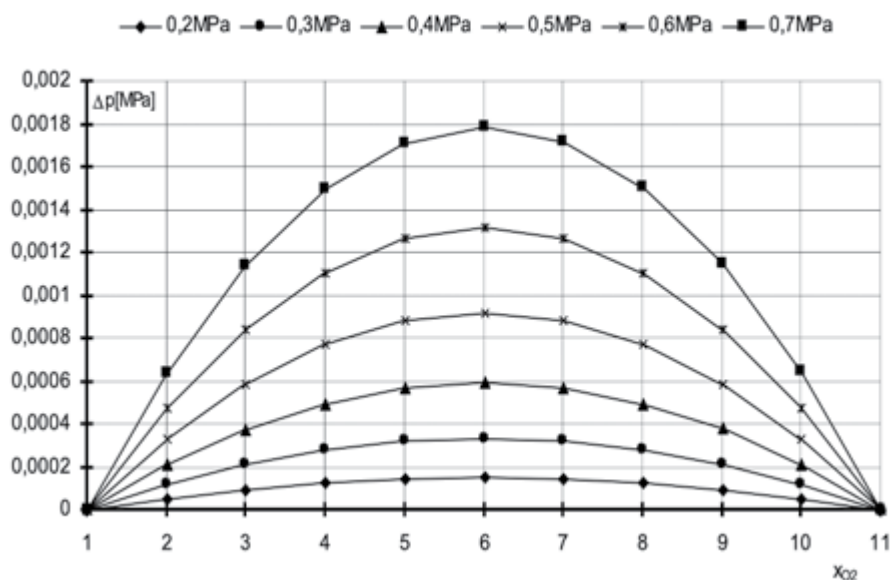
Jako wielkości stałe sklasyfikowano wielkości mające wpływ na proces wentylacji, ale nie zmieniające się podczas jego przebiegu i określone konstrukcją komory oraz parametrami ekspozycji. Do wielkości zdefiniowanych konstrukcyjnie zaliczono objętość komory (V_K), strumień czynnika wentylacyjnego ($\dot{V}_1$), który jest funkcją przekroju rurociągów dolotowych oraz współczynnik wypełnienia komory (w_k), będący wielkością określającą stopień jej zabudowy. Do wielkości zdefiniowanych parametrami ekspozycji zaliczono ciśnienie robocze komory (p) oraz liczbę nurków biorących w niej udział (k). Ciśnienie panujące w przedziale komory dekompresyjnej w czasie ekspozycji hiperbarycznej jest wielkością zmienną, co wynika wprost z podziału ekspozycji na etap sprężania, pobytu na głębokości i etap rozprężania. Jednak w przypadku ekspozycji z wykorzystaniem powietrza proces wentylacji najczęściej ma miejsce podczas pobytu nurków na głębokości oraz przystankach dekompresyjnych w czasie rozprężania. Można więc przyjąć, że dla procesu wentylacji wartość ciśnienia jest wielkością stałą. Liczba nurków (k) biorących udział w ekspozycji jest wielkością niezmienną podczas całej ekspozycji. W wyjątkowych przypadkach może ona ulec zmianie na drodze służowania człowieka do przedziału komory. Są to sytuacje awaryjne nie mające miejsca w przypadku normalnej procedury.

Jako wielkości zakłócające sklasyfikowano te wielkości, na zmiany których nie można wpływać podczas przebiegu procesu wentylacji. Są to temperatura oraz wilgotność. Doprowadzane podczas wentylacji do komory świeże powietrze ze zbiorników ciśnieniowych rozpręża się i obniża się jego temperatura na wlocie do komory. Podczas wentylacji powietrze zawarte w przedziale komory miesza się ze świeżym, zimniejszym z układów zasilania.

Para wodna pojawia się, z reguły, w fazie dekompresji [33]. Zmniejszanie ciśnienia w obiekcie hiperbarycznym powoduje oziębianie się atmosfery w niej zawartej a przez to zostaje przekroczona temperatura punktu rosy i para wodna pojawia się w postaci mgły.

Proces wentylacji związany jest z wymianą sprężonego gazu, który stanowi atmosferę komory dekompresyjnej. Podczas wentylacji wypełniający przestrzeń komory sprężony gaz wprowadzany jest w ruch. Opisanie ruchu gazów rzeczywistych za pomocą równań matematycznych jest trudne i aby tego dokonać korzysta się z modelu gazu posiadającego niezbędne cechy upraszczające [13]. W warunkach hiperbarycznych na skutek wzrostu ciśnienia oddziaływania międzycząsteczkowe w gazach stają się coraz bardziej intensywne, co jest przyczyną odstępstw od praw gazów doskonałych [33, 64]. Określenia błędu wynikającego z stosowania praw gazów doskonałych przy obliczeniach gazów rzeczywistych można dokonać za pomocą ciśnieniowego efektu izotermicznego mieszania się gazów rzeczywistych [64]. Stosując równania Beattiego-Bridgmana [13] i Clapeyrona [66, 72] dokonano analizy dla binarnej mieszaniny tlenowo-azotowej i różnych ciśnień końcowych mieszaniny oraz różnych udziałach molowych tlenu. Wyniki przedstawiono na rysunku poniżej.

Rys. 3. Ciśnieniowy efekt izotermicznego mieszania tlenu i azotu dla różnych ciśnień mieszaniny w funkcji udziału molowego tlenu [badania własne].



Przy ciśnieniu całkowitym $p = 0,7$ MPa wartość efektu $D_p = 0,0018$ MPa, natomiast przy ciśnieniu $p = 0,2$ MPa wartość ta kształtuje się w granicach 0,0002 MPa ciśnienia końcowego mieszaniny. Tak więc w tym zakresie ciśnień roboczych gazy rzeczywiste zachowują się podobnie jak gazy doskonałe. Potwierdza to również literatura [68, 74]. Powietrze jako czynnik oddechowy jest stosowane w nurkowaniu w zakresie głębokości do 50 mH₂O tj. maksymalne ciśnienie użycia nie wynosi więcej jak 0,6 MPa, co oznacza, że stosując równania gazu doskonałego do obliczeń w tym zakresie ciśnień popełni się błąd mniejszy niż 0,0018 MPa.

Analizując ekspozycję ciśnieniową w komorze dekompresyjnej pod kątem procesu wentylacji przerywanej, można podzielić ją na dwa okresy: okres do rozpoczęcia wentylacji i okres prowadzenia wentylacji. Pierwszy okres rozpoczyna się po wejściu nurków do komory, uszczelnieniu jej i sprężeniu gazu w komorze hiperbarycznej do ciśnienia odpowiadającego głębokości nurkowania i trwa do momentu rozpoczęcia wentylacji. W drugim okresie do komory dostarczane jest świeże powietrze, w tym samym czasie powietrze zużyte jest z komory usuwane. Do opracowania równania bilansu masy dwutlenku węgla konieczne jest określenie objętości kontrolnej. W rozpatrywanym przypadku jest to przedział komory dekompresyjnej, którego granicami są płaszcz zewnętrzny i dennice.

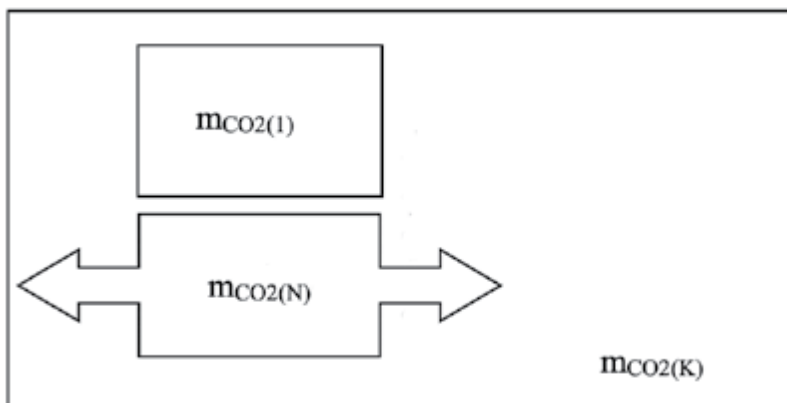
2 Model matematyczny wentylacji dla hiperbarycznej ekspozycji powietrznej

Ekspozycję powietrzną ze względu na proces wentylacji podzielono na stan bez wentylacji i stan z wentylacją. W pierwszym przypadku na skutek oddychania nurków zawartość CO_2 w atmosferze komory narasta do wartości, przy której jego ciśnienie parcjale osiąga przyjętą wartość maksymalną (1,5 kPa). Po osiągnięciu tej wartości zaczyna się proces wentylacji, w wyniku którego zmniejszy się zawartość CO_2 . Przyjęto, że zakończenie wentylacji następuje wtedy gdy zawartość dwutlenku węgla w atmosferze komory osiągnie poziom 30% dopuszczalnej wartości maksymalnej. Po zakończeniu wentylacji zawartość CO_2 ponownie będzie narastać do wartości maksymalnej, po osiągnięciu której rozpocznie się kolejna wentylacja.

2.1 MODEL DLA STANU BEZ WENTYLACJI

W stanie bez wentylacji ciśnienie parcjale CO_2 w objętości kontrolnej jest zależne od ciśnienia całkowitego ekspozycji oraz ilości dwutlenku węgla doprowadzonej do przedziału komory razem ze sprężonym powietrzem wypełniającym komorę i ilości dwutlenku węgla wydychanej przez nurków.

Rys. 4. Bilans masowy dwutlenku węgla w przedziale komory dekompresyjnej w stanie bez wentylacji



$m_{\text{CO}_2(1)}$ – początkowa masa dwutlenku węgla w sprężonym powietrzu – atmosferze komory, przyjmujemy $m_{\text{CO}_2(1)} = m_1$,

$m_{\text{CO}_2(N)}$ – masa dwutlenku węgla w gazie wydychanym przez nurków, przyjmujemy $m_{\text{CO}_2(N)} = m_2$,

$m_{\text{CO}_2(K)}$ – masa dwutlenku węgla w atmosferze komory, przyjmujemy $m_{\text{CO}_2(K)} = m$.

W związku z powyższym bilans masowy CO₂ w komorze można zapisać:

$$\Delta m = m_1 + \Delta m_2 \quad (2)$$

gdzie:

Δm przyrost masy CO₂ w przedziale komory dekompresyjnej

m_1 początkowa masa CO₂ w przedziale komory dekompresyjnej

Δm_2 przyrost masy CO₂ w przedziale komory dekompresyjnej spowodowany emisją CO₂ przez nurków

Ponieważ dla $\tau = 0$, $m_1 = m$, z równania (2) wynika, że w pierwszym rozpatrywanym okresie przyrost masy CO₂ w przedziale komory dekompresyjnej jest zależny wyłącznie od emisji tego gazu przez nurków, a zatem:

$$\Delta m = \Delta m_2 \quad (3)$$

Dla $\Delta \tau \rightarrow 0$ równanie (3) można zapisać:

$$\frac{d(m)}{d\tau} = \frac{d(m_2)}{d\tau} \quad (4)$$

Masa i-tego składnika mieszaniny gazowej powiązana jest z jego udziałem masowym oraz masą mieszaniny. Wobec tego równanie (4) można zapisać jako:

$$\frac{d(gm_K)}{d\tau} = \frac{d(g_2m_N)}{d\tau} \quad (5)$$

gdzie:

g udział masowy CO₂ w objętości kontrolnej,

m_K masa atmosfery w objętości kontrolnej,

g_2 udział masowy CO₂ w wydychanym przez nurków gazie,

m_N masa wydychanego przez nurków gazu.

wtedy

$$g \frac{dm_K}{d\tau} + m_K \frac{dg}{d\tau} = g_2 \frac{dm_N}{d\tau} + m_N \frac{dg_2}{d\tau} \quad (6)$$

Przy założeniu stałej masy atmosfery w komorze $m_K = \text{const}$, oraz stałego wysiłku nurków, również $g_2 = \text{const}$, wtedy równanie (6) można zapisać:

$$m_K \frac{dg}{d\tau} = g_2 \frac{dm_N}{d\tau} \quad (7)$$

Masa mieszaniny gazów wyrażona w kilogramach jest związana z ilością substancji oraz masą molową mieszaniny. Wtedy równanie (7) można zapisać:

$$nM \frac{dg}{d\tau} = g_2 \frac{d(n_2 M_2)}{d\tau} \quad (8)$$

$$nM \frac{dg}{d\tau} = g_2 M_2 \frac{dn_2}{d\tau} \quad (9)$$

gdzie:

- n liczba moli w atmosferze komory
 n_2 liczba moli w wydychanym przez nurków gazie
 M masa molowa atmosfery komory
 M_2 masa molowa wydychanego przez nurków gazu.

Zgodnie z równaniem Clapeyrona pomiędzy parametrami stanu gazu doskonałego zachodzi następująca zależność [66, 72]:

$$\bar{p}\bar{V}=\bar{R}\bar{T} \quad (10)$$

Wtedy równanie (9) przyjmuje postać:

$$\frac{\bar{p}\bar{V}}{\bar{R}\bar{T}}M\frac{d\bar{g}}{d\tau}=g_2M_2\frac{d}{d\tau}\left(\frac{\bar{p}_2\bar{V}_2}{\bar{R}\bar{T}_2}\right) \quad (11)$$

$$\frac{\bar{p}\bar{V}}{\bar{R}\bar{T}}M\frac{d\bar{g}}{d\tau}=g_2M_2\left[\frac{\bar{R}\bar{T}_2\frac{d(\bar{p}_2\bar{V}_2)}{d\tau}-\bar{p}_2\bar{V}_2\frac{d(\bar{R}\bar{T}_2)}{d\tau}}{(\bar{R}\bar{T}_2)^2}\right] \quad (12)$$

Ponieważ $T=T_2=const$ to równanie przyjmuje postać:

$$\bar{p}\bar{V}M\frac{d\bar{g}}{d\tau}=g_2M_2\bar{p}_2\frac{d\bar{V}_2}{d\tau} \quad (13)$$

Dla

$$\frac{d\bar{V}_2}{d\tau}=\dot{\bar{V}}_2 \quad (14)$$

gdzie:

$\bar{V}_2$ strumień objętości emitowanego przez nurków dwutlenku węgla

To równanie (13) można zapisać:

$$\bar{p}\bar{V}M\frac{d\bar{g}}{d\tau}=g_2M_2\bar{p}_2\dot{\bar{V}}_2 \quad (15)$$

Udziały masowe i -tego składnika mieszaniny gazowej oraz jego udziały objętościowe można zwiazać równaniem:

$$r_i=g_i\frac{R_i}{R} \quad (16)$$

Ponieważ udziały objętościowe (r_i) są równe udziałom kilomolowym (x_i) można zapisać [66]:

$$g_i=\frac{x_iR}{R_i} \quad (17)$$

gdzie:

- g_i udział masowy i -tego składnika mieszaniny,
 x_i udział molowy i -tego składnika mieszaniny,
 R uniwersalna stała gazowa
 R_i indywidualna stała gazowa

Wtedy równanie (15) przyjmuje postać:

$$pVM \frac{d}{d\tau} \left(\frac{x \bar{R}}{R_{CO_2}} \right) = \frac{x_2 \bar{R}}{R_{CO_2}} M_2 p_2 \dot{V}_2 \quad (18)$$

Zakładając, że $M=M_2$ to:

$$pV \frac{d(x \bar{R})}{d\tau} = x_2 p_2 \bar{R} \dot{V}_2 \quad (19)$$

Wtedy:

$$pV \frac{dx}{d\tau} = x_2 p_2 \dot{V}_2 \quad (20)$$

Prawa strona równania (3. 20) opisuje emisję dwutlenku węgla przez nurków znajdujących się w komorze. Ilość wydzielanego przez człowieka dwutlenku węgla jest proporcjonalna do jego konsumpcji tlenu i wynosi od 75% do 100% konsumpcji oraz jest zależna od rodzaju diety i wysiłku [73]. Zakładając do dalszych rozważań, że emisja CO_2 jest równa co do wartości konsumpcji tlenu, więc:

$$\dot{V}_{CO_2} = x_2 \dot{V}_2 \quad (21)$$

można równanie (3. 20) zapisać:

$$pV \frac{dx}{d\tau} = p_2 \dot{V}_{O_2} \quad (22)$$

Wtedy:

$$\int dx = \int \frac{p_2 \dot{V}_{O_2}}{pV} d\tau \quad (23)$$

$$x(\tau) = \frac{p_2 \dot{V}_{O_2}}{pV} \tau + C \quad (24)$$

Dla $t=0 \Rightarrow x(0)=x_1$ wtedy równanie (24) przyjmuje postać:

$$x(\tau) = x_1 + \frac{p_2 \dot{V}_{O_2}}{pV} \tau \quad (25)$$

Dla większej ilości nurków można zapisać:

$$x(\tau) = x_1 + \frac{k p_2 \dot{V}_{O_2}}{pV_k} \tau \quad (26)$$

gdzie:

x udział molowy CO_2 w atmosferze komory dekompresyjnej [-]

x_1 początkowy udział molowy CO_2 w atmosferze komory dekompresyjnej [-], uniwersalna stała gazowa

k liczba nurków przebywających w komorze [-],

V_k objętość komory dekompresyjnej [dm^3],

$\dot{V}_{CO_2}$ konsumpcja tlenu przez jednego nurka [dm^3/min],

τ czas [min].

p ciśnienie robocze komory [kPa]

$p_2=p_O$ ciśnienie atmosferyczne [kPa]

Równanie (26) opisuje zmianę udziału molowego dwutlenku węgla w atmosferze komory dekompresyjnej podczas ekspozycji ciśnieniowej dla stanu bez wentylacji, w związku z powyższym zmiany ciśnienia parcjalego CO_2 będą zachodzić według równania:

$$p_{\text{CO}_2} = x_1 p + p_0 \frac{k \dot{V}_2}{V_k} \tau \quad (27)$$

Przekształcając równanie (27) względem τ można wyznaczyć czas, po którym należy rozpocząć pierwszą wentylację przedziału komory dekompresyjnej:

$$\tau_1 = \frac{V_k}{k \dot{V}_{\text{O}_2}} \left(\frac{p_{\text{CO}_2 \text{max}} - p x_1}{p_0} \right) \quad (28)$$

gdzie:

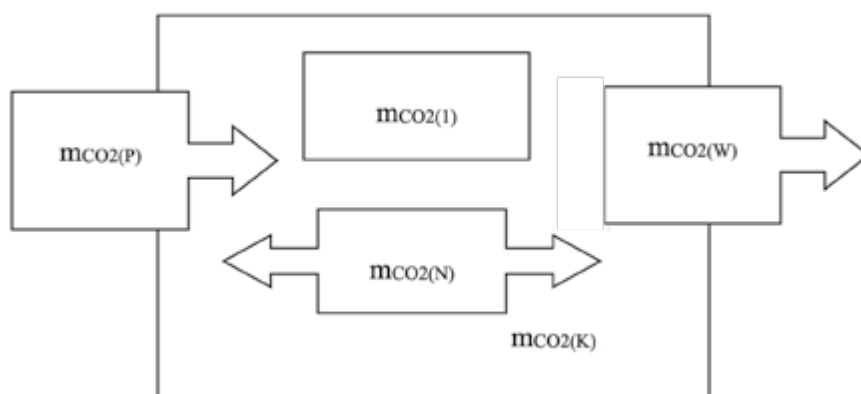
τ_1 czas do rozpoczęcia pierwszej wentylacji w [min],

$p_{\text{CO}_2 \text{max}}$ maksymalne dopuszczalne ciśnienie parcjale dwutlenku węgla w atmosferze komory dekompresyjnej przy ciśnieniu roboczym komory p w [kPa], (przyjmuje się 1,5 kPa).

2.2 MODEL DLA STANU Z WENTYLACJĄ

W stanie z wentylacją ciśnienie parcjale CO_2 zależy od całkowitego ciśnienia ekspozycji oraz aktualnej ilości dwutlenku w komorze, ilości dwutlenku węgla emitowanej przez nurków oraz ilości dwutlenku węgla dostarczanej do przedziału komory razem z czynnikiem wentylacyjnym. Podczas wentylacji dwutlenek węgla jest usuwany razem z zanieczyszczoną atmosferą tak więc jego ciśnienie parcjale zależy również od ilości usuwanego CO_2 .

Rys. 5. Bilans masowy dwutlenku węgla dla stanu z wentylacją



gdzie:

$m\text{CO}_2(\text{P})$ – masa dwutlenku węgla w czynniku wentylacyjnym,

$m\text{CO}_2(\text{W})$ – masa dwutlenku węgla w wymienianej atmosferze.

(pozostałe oznaczenia jak na rys. 3. 4)

Dla $\tau=0$, $m_{\text{CO}_2(\text{K})}=m_{\text{CO}_2(\text{I})}=m$ oraz przyjmując dla uproszczenia zapisu: $m_{\text{CO}_2(\text{P})}=m_1$, $m_{\text{CO}_2(\text{N})}=m_2$, $m_{\text{CO}_2(\text{W})}=m_3$ to bilans masowy dwutlenku węgla w przedziale komory dekompresyjnej dla stanu z wentylacją można zapisać:

$$\Delta m = \Delta m_1 + \Delta m_2 - \Delta m_3 \quad (29)$$

gdzie:

Δm zmiana masy CO_2 w objętości kontrolnej

Δm_1 masa CO_2 doprowadzana do objętości kontrolnej z czynnikiem wentylacyjnym

Δm_2 masa CO_2 wydychana przez nurków

Δm_3 masa CO_2 usuwana wraz z zanieczyszczoną atmosferą

dla $\Delta\tau \rightarrow 0$

$$\frac{d(gm)}{d\tau} = \frac{d(g_1m_1)}{d\tau} + \frac{d(g_2m_2)}{d\tau} - \frac{d(g_3m_3)}{d\tau} \quad (30)$$

Następnie zakładając stały wysiłek nurków i stałą masę atmosfery w komorze oraz natychmiastową jednorodność atmosfery po rozpoczęciu wentylacji można zapisać:

$$nM \frac{dg}{d\tau} = g_1 \frac{d(m_1M_1)}{d\tau} + g_2 \frac{d(n_2M_2)}{d\tau} - g_3 \frac{d(n_3M_3)}{d\tau} \quad (31)$$

ponieważ $M_1 = \text{const}$, $M_2 = \text{const}$, $M_3 = \text{const}$ powyższe równanie można zapisać:

$$\frac{pV}{\bar{R}T} M \frac{dg}{d\tau} = g_1 M_1 \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_1 V_1}{\bar{R} T_1} \right) + g_2 M_2 \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_2 V_2}{\bar{R} T_1} \right) - g_3 M_3 \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_3 V_3}{\bar{R} T_1} \right) \quad (32)$$

dla $T = T_1 = T_2 = T_3 = \text{const}$

$$pVM \frac{dg}{d\tau} = g_1 M_1 \left(\frac{d(p_1 V_1)}{d\tau} - p_1 V_1 \frac{d(\bar{R} T_1)}{d\tau} \right) + g_2 M_2 \left(\frac{d(p_2 V_2)}{d\tau} - p_2 V_2 \frac{d(\bar{R} T_2)}{d\tau} \right) + g_3 M_3 \left(\frac{d(p_3 V_3)}{d\tau} - p_3 V_3 \frac{d(\bar{R} T_3)}{d\tau} \right) \quad (33)$$

$$pVM \frac{dg}{d\tau} = g_1 M_1 \frac{d(p_1 V_1)}{d\tau} + g_2 M_2 \frac{d(p_2 V_2)}{d\tau} - g_3 M_3 \frac{d(p_3 V_3)}{d\tau} \quad (34)$$

$$pVM \frac{dg}{d\tau} = g_1 M_1 \left(p_1 \frac{dV_1}{d\tau} + V_1 \frac{dp_1}{d\tau} \right) + g_2 M_2 \left(p_2 \frac{dV_2}{d\tau} + V_2 \frac{dp_2}{d\tau} \right) + g_3 M_3 \left(p_3 \frac{dV_3}{d\tau} + V_3 \frac{dp_3}{d\tau} \right) \quad (35)$$

Stosując równanie (14) i (17):

$$pVM \frac{d}{d\tau} \left(\frac{x \bar{R}}{R_{\text{CO}_2}} \right) = \frac{x_1 \bar{R}}{R_{\text{CO}_2}} p_1 M_1 \dot{V}_1 + \frac{x_2 \bar{R}}{R_{\text{CO}_2}} p_2 M_2 \dot{V}_2 - \frac{x_3 \bar{R}}{R_{\text{CO}_2}} p_3 M_3 \dot{V}_3 \quad (36)$$

Następnie zakładając, że $M_1 = M_2 = M_3$ oraz dla $\tau \rightarrow 0 \Rightarrow x = x_3$ i stosując równanie (21) można powyższe równanie zapisać w postaci:

$$pV \frac{dx}{d\tau} = p_1 x_1 \dot{V}_1 + p_2 \dot{V}_{O2} - p_3 x \dot{V}_3 \quad (37)$$

$$dx = \left(\frac{p_1 x_1 \dot{V}_1 + p_2 \dot{V}_{O2} - p_3 x \dot{V}_3}{pV} \right) d\tau \quad (38)$$

Przyjmując oznaczenia: $a = -\frac{p_3 \dot{V}_3}{pV}$ $b = \frac{p_1 x_1 \dot{V}_1 + p_2 \dot{V}_{O2}}{pV}$

otrzymujemy: $dx = (ax + b)d\tau$ (39)

$$\frac{dx}{ax + b} - d\tau = 0 \quad (40)$$

$$\int \frac{dx}{ax + b} - \int d\tau = C_1 \quad (41)$$

$$\frac{1}{a} \ln|ax + b| + C_2 - (\tau + C_3) = C_1 \quad (42)$$

$$\frac{1}{a} \ln|ax + b| - \tau = C \quad (43)$$

gdzie: $C = C_1 + C_3 - C_2$

$$\ln|ax + b| = a(\tau + C) \quad (44)$$

$$x = \frac{1}{a} \{ \exp[a(\tau + C)] - b \} \quad (45)$$

Dla $\tau=0$

$$C^1 = \frac{\ln|ax + b|}{a}$$

Wtedy równanie (45) przyjmuje postać:

$$x = \frac{1}{a} \left\{ \exp \left[a \left(\frac{1}{a} \ln|ax + b| + \tau \right) \right] - b \right\} \quad (46)$$

$$x = \frac{1}{a} \{ \exp[\ln|ax + b| + a\tau] - b \} \quad (47)$$

$$x = \frac{1}{a} \{ (ax + b) \exp(a\tau) - b \} \quad (48)$$

co dla przyjętych a i b można zapisać:

$$x = -\frac{pV}{p_3 \dot{V}_3} \left\{ \left(\frac{p_1 \dot{V}_1 x_1 + p_2 \dot{V}_{O2}}{pV} - \frac{p_3 \dot{V}_3 x}{pV} \right) \exp \left(-\frac{p_3 \dot{V}_3 \tau}{pV} \right) - \frac{p_1 \dot{V}_1 x_1 + p_2 \dot{V}_{O2}}{pV} \right\} \quad (49)$$

Co dla $\dot{V}_3 = \dot{V}_1$ oraz $p_1 = p_2 = p_3 = p_0$ można zapisać:

$$x = x_1 + \frac{\dot{V}_{O2}}{\dot{V}_1} + \left[x - x_1 - \frac{\dot{V}_{O2}}{\dot{V}_1} \right] \exp \left(-\frac{p_0 \dot{V}_1}{pV} \tau \right) \quad (50)$$

Zakładając, że dla $\tau=0 \Rightarrow x=x_0$ oraz, że $x_1=x_w$ i wstawiając te wartości po prawej stronie równania oraz postępując podobnie jak z równaniem (26) otrzymano:

$$x(\tau) = x_w + \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} + \left(x_0 - x_w - \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} \right) \exp \left(- \frac{p_0 \dot{V}_1}{p V_k} \tau \right) \quad (51)$$

gdzie:

x udział molowy CO_2 w atmosferze komory dekompresyjnej

x_w udział molowy CO_2 w czynniku wentylacyjnym

$\dot{V}_{O_2}$ strumień objętości konsumowanego tlenu przez jednego nurka [dm^3/min],

$\dot{V}_1$ strumień objętości czynnika wentylacyjnego [dm^3/min]

x_0 udział molowy CO_2 w atmosferze komory na początku procesu wentylacji

k liczba nurków biorących udział w ekspozycji ciśnieniowej

τ czas [min]

V_k objętość komory dekompresyjnej [dm^3]

p_0 ciśnienie atmosferyczne [kPa]

P ciśnienie robocze komory [kPa].

Równanie (51) opisuje zmianę udziału molowego dwutlenku węgla w atmosferze komory dekompresyjnej podczas ekspozycji ciśnieniowej dla stanu z wentylacją, w związku z powyższym zmiany ciśnienia parcjalego tego gazu będą dla tego stanu zachodzić zgodnie z zależnością:

$$p_{CO_2} = \left[x_w + \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} + \left(x_0 - x_w - \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} \right) \exp \left(- \frac{p_0 \dot{V}_1}{p V_k} \tau \right) \right] p \quad (52)$$

Przekształcając równanie (3. 51) względem τ i za x wstawiając wartość udziału molowego dwutlenku węgla w atmosferze komory po zakończeniu wentylacji (przyjmując oznaczenie x_k) uzyska się równanie określające wymagany czas prowadzenia wentylacji przy określonym objętościowym strumieniu czynnika wentylacyjnego ($\dot{V}_1$):

$$\tau_w = - \frac{p V_k}{p_0 \dot{V}_1} \left[\ln \left| x_k - x_w - \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} \right| - \ln \left| x_0 - x_w - \frac{k \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_1} \right| \right] \quad (53)$$

Wstawiając wartość x_k do równania (28) otrzymamy równanie określające czas do rozpoczęcia następnej wentylacji:

$$\tau_2 = \frac{V_k}{k \dot{V}_{O_2}} \left(\frac{p_{CO_2(\max)} - p x_k}{p_0} \right) \quad (54)$$

Przedstawione zależności umożliwiają określenie następujących parametrów wentylacji:

- czas do rozpoczęcia pierwszej wentylacji (τ_1),
- czas prowadzenia wentylacji z określonym strumieniem czynnika wentylacyjnego (t_w),
- czas do rozpoczęcia następnej wentylacji (τ_2).

Formuły matematyczne na powyższe parametry określano poszukując równania opisującego zmiany udziału molowego dwutlenku węgla w atmosferze komory dekompresyjnej w czasie ekspozycji ciśnieniowej i następnie przekształcając je względem czasu, przy założeniu

stałej wartości maksymalnego ciśnienia parcjalego CO_2 ($p_{\text{CO}_2\text{max}}=1,5$ kPa). Założono, że wentylację prowadzić się będzie w określonym czasie z wyznaczonym na podstawie pomiarów strumieniem czynnika wentylacyjnego. Wielkość strumienia nie może być uzależniona od subiektywnych odczuć obsługi komory. Dlatego też należy dla każdej komory określić zakres dostępnych wartości strumienia świeżego powietrza z zależności:

$$\dot{V}_1 = \frac{V_k p_1 - p_2}{p_0 \tau} = \frac{V \Delta p}{p_0 \tau} \quad (55)$$

gdzie:

$\dot{V}_1$ strumień czynnika wentylacyjnego [m³/min]

V_k objętość komory dekompresyjnej [m³],

Δp spadek ciśnienia w komorze w czasie τ , [kPa]

p_0 ciśnienie atmosferyczne [kPa],

τ czas w którym uzyskano spadek ciśnienia Δp , [min]

Podczas konstruowania komory czynnikiem decydującym o wartości strumieni powietrza dolotowego i odlotowego z komory hiperbarycznej jest nakazany czas sprężania i rozprężania zdefiniowany stosowaną tabelą dekompresji. Ten czas narzuca możliwości konstrukcyjne układów dolotowych i odlotowych komory.

Proponowany model wentylacji pozwala na określenie nie tylko momentu jej rozpoczęcia, ale również sposobu jej realizacji, tzn. czasu trwania oraz czasu rozpoczęcia kolejnej wentylacji. Model ten różni się od dotychczas stosowanego w pracach nurkowych, różnice te pokazano w Tabeli 1.

Tabela 1 Różnice pomiędzy stosowanym i opracowanym modelem wentylacji

Model dotychczasowy	Model opracowany
Czas do wentylacji:	
$\tau_1 = \frac{V_k C_{\text{CO}_2\text{max}} p_r}{C_{\text{CO}_2\text{wyd}} \dot{V}_p k p_0}$	$\tau_2 = \frac{V_k}{k \dot{V}_{O2}} \left(\frac{p_{\text{CO}_2(\text{max})} - p x_1}{p_0} \right)$
Czas wentylacji:	
nie ujmuje	$\tau_w = -\frac{p V_k}{p_0 \dot{V}_1} \left[\ln \left x_0 - x_w - \frac{k \dot{V}_{O2}}{\dot{V}_1} \right - \ln \left x_0 - x_w - \frac{k \dot{V}_{O2}}{\dot{V}_1} \right \right]$
Czas do następnej wentylacji:	
$\tau_1 = \frac{\lambda \cdot V_k C_{\text{CO}_2\text{max}} p_r}{C_{\text{CO}_2\text{wyd}} \dot{V}_p k p_0}$	$\tau_1 = \frac{V_k}{k \dot{V}_{O2}} \left(\frac{p_{\text{CO}_2\text{max}} - p x_1}{p_0} \right)$

BIBLIOGRAFIA

1. Adiv P-2 „Poradnik Sprzymierzonych. Choroby nurkowe”.
2. Bednarski L. „Technologia podwodna – przegląd problemów” Cz. I Instytut Okrętowy Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1990.
3. Bennet P.B., Elliot B.H. „The physiology and medicine of diving” London 1993.
4. Charchalis A., Przylipek M. „Nurkowanie satutowane – problematyka techniczna” WSMW Gdynia 1985.
5. Charchalis A., Czarnecki St., „IV Sympozjum nurkowanie – problematyka techniczna” AMW Gdynia 1994.
6. Chomoniuk W. „Tabele dekompresyjne” Wyd. Aldiv Białystok 1992.
7. Czermiński J. B., Iwasiewicz A., Paszek Z., Sikorski A., „Metody statystyczne dla chemików” PWN Warszawa 1986.
8. Doboszyński T. Łokuciejewski B. „Wybór optymalnego w warunkach krajowych systemu nurkowania satutowanego do głębokości 120m” CPBR 9.5 Cel 31 Etap 1 p. 1.3 Zakład Medycyny Podwodnej WAM Gdynia 1986.
9. Doboszyński T. Łokuciejewski B. „Analiza systemów ekspozycji satutowanych w strefie do 100m” Zakład Medycyny Podwodnej WAM Gdynia 1988.
10. Doboszyński T. Łokuciejewski B. „Trimiksowe symulowane nurkowania doświadczalne” CPBR 9.2 Cel 17.07 pkt. 1.4, 1.6.1 Zakład Medycyny Podwodnej WAM Gdynia 1989.
11. 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.
12. Dobosz M. „Statystyczna analiza wyników badań” Akademicka Oficyna wydawnicza EXIT Warszawa 2001.
13. Domański R., Jaworski M., Rebow M., Kołtyś J. „Wybrane zagadnienia z termodynamiki w ujęciu komputerowym” PWN Warszawa 2000.
14. Doświadczalny Głębokowodny Kompleks Nurkowy (DGKN-120) – Opis techniczny – WSMW 1990.
15. Fanger P.O. „Komfort cieplny” Arkady Warszawa 1974.
16. Ferencowicz J. „Wentylacja i klimatyzacja” Wyd. Arkady 1962.
17. Haux G. „Subsea manned engineering” Bailolier Tindall London 1982.
18. Hobler T. „Dyfuzyjny ruch masy i absorbery” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1976.
19. Kłos R. „Matematyczne modele analityczne wentylacji obiektów hiperbarycznych” Ergonomia 18 (1995) 41 – 48.
20. Kłos R., Olejnik A., Khan A. „Monitoring of the composition of submarine atmospheres” DCIEM Toronto, Canada 2000rok.

21. Kłos R., Olejnik A., Khan A. „Monitoring of the composition of submarine atmospheres” Dräger Review 8 (2001) 28-30.
22. Kłos R. „Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego” Wyd. KOOPgraf Poznań 2000.
23. Kłos R. „Metodyka pomiaru składu mieszanin oddechowych w nurkowych kompleksach hiperbarycznych” (praca doktorska) AMW Gdynia 1990.
24. Kowalski St. J. „Teoria procesów przepływowych, cieplnych i dyfuzyjnych” Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
25. Krzyżak J. „Medycyna dla nurków – fizjopatologia nurkowania” Wyd. KOOPgraf Poznań 1998.
26. Kryszicki Wł., Włodarski L. „Analiza matematyczna w zadaniach” PWN Warszawa 1971.
27. Malczewski J., Piekarski M. „Modelowanie procesów transportu masy, pędu i energii” PWN Warszawa 2000.
28. Massalski M. J., Studnicki J. „Legalne jednostki miar i stałe fizyczne” PWN Warszawa 1988.
29. Materiały reklamowe firm : Dräger AG Lübeck, Haux-Life-Support GmbH, Comex, Southern Oceanics Dive Systems.
30. Mountain A. „Nurkowanie – poradnik” Wyd. Galaktyka Łódź 1997.
31. Multimedialna Encyklopedia PWN, Warszawa 2001.
32. NO-07-A005:1999 „Nurkowanie w celach militarnych. Czynniki oddechowe. Klasyfikacja, wymagania, badania”.
33. Nowak W., Sobański R. „Termodynamiczne podstawy obliczeń pomieszczeń w kompleksach do badań podwodnych” referat na Sympozjum „Nurkowanie – problematyka techniczna” AMW Gdynia 1994 r.
34. Olszański R., Kłos R., Skrzyński St. „Problemy medycyny i techniki nurkowej” Wyd. Okrętownictwo i Żegluga Gdańsk 1997.
35. Olszański R., Siermontowski P. „ABC zdrowia nurka” Zakład Poligraficzny Druk-Ar s.c. Łódź 2000.
36. Olejnik A. „Wentylacja atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych” referat na Seminarium Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN, AMW Gdynia 2002.
37. Olejnik A. „Wielopunktowy monitoring atmosfery komory dekompresyjnej” Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej Gdynia 2002.
38. Olejnik A., Kłos R. „Makroskopowy model wentylacji atmosfery komory dekompresyjnej” Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej Gdynia 2002.
39. Olejnik A. „Przyszłość technologii podwodnych: nurek czy robot” „Podwodny Świat” 6 (2002) 22 – 26.
40. Polański Z. „Planowanie doświadczeń w technice” PWN Warszawa 1984.
41. Przyłipiak M., Torbus J. „Sprzęt i prace nurkowe – poradnik” Wyd. MON Warszawa 1981.
42. Przyłipiak M. „Wentylacja komór hiperbarycznych przy stosowaniu zewnętrznych układów regeneracji” WSMW „Nurkowanie satutowane – problematyka techniczna” Gdynia 1995.
43. PN-V-85001:1999: „Nurkowanie: Komory dekompresyjne. Ogólne wymagania i badania”.

44. PN-67/B03410 „Wentylacja. Wymiary poprzeczne przewodów wentylacyjnych”.
45. PN-93/W-75056 „Budownictwo okrętowe. Wentylacja ładowni, w których można używać pojazdy napędzane silnikami spalinowymi. Obliczanie całkowitego teoretycznego zapotrzebowania powietrza”.
46. Praca zbiorowa „US Navy diving manual” Best Publishing CO. Carson, USA 1995.
47. Praca zbiorowa „Analiza podstawowych zagadnień związanych z zewnętrznymi systemami regeneracji mieszanin gazowych oraz analiza możliwości zaprojektowania i wykonania w kraju urządzeń do tego celu” WSMW, WAM Gdynia 1977.
48. Praca zbiorowa „Koncepcja układu regeneracji oraz założenia szczegółowe i wytyczne do opracowania koncepcji i konstrukcji poszczególnych zespołów układu regeneracji” WSMW Gdynia 1978.
49. Praca zbiorowa „Metodyka szkolenia pletwonurków III klasy – podręcznik” MON syg. Szkol. 582/77 Warszawa 1978.
50. Praca zbiorowa „Metodyka obsługi komory dekompresyjnej ORTOLAN L-80” MON syg. Szkol. 689/87 Warszawa 1987.
51. Praca zbiorowa „Zasady zabezpieczania medycznego nurkowań głębokich” Marynarka Wojenna, syg. Mar. Woj. 872/82.
52. Praca zbiorowa „Przepisy nurkowania” Marynarka Wojenna syg. Mar. Woj. 913/84 Gdynia 1984.
53. Praca zbiorowa pod red. Przyłipiak M. „Prace podwodne” Wyd. Morskie Gdańsk 1971.
54. Praca zbiorowa pod red. Brahtza J.F. „Oceanotechnika” Wydawnictwo Morskie Gdańsk 1974.
55. Praca zbiorowa pod red. Joiner J.T. „NOAA Diving manual - diving for science and technology” National Oceanic and Atmospheric Administration USA 2001
56. Rocznik Statystyczny GUS <http://www.stat.gov.pl/serwis/polska/2003/rocznik>.
57. Skrzyński St., Kłos R., Olejnik A., Poleszak St. „Nowa generacja analizatorów składu atmosfery okrętu podwodnego” Sprawozdanie z projektu celowego pk. „Atmosfera” KBN nr 148181/C-T00/98 AMW Gdynia 2000.
58. Skrzyński St., Olejnik A. „Komora dekompresyjna jako element bezpieczeństwa na morzu” III Konferencja Morska: „Aspekty bezpieczeństwa nawodnego i podwodnego oraz lotów nad morzem” DMW Gdynia 2000, cz. I str. 91 – 96.
59. Skrzyński St., Olejnik A. „Zasady BHP podczas eksploatacji komór dekompresyjnych” referat na V Sympozjum „Nurkowanie problematyka Techniczna” Gdynia 1998.
60. Skrzyński St., Kłos R., Olejnik A., Poleszak St. „Systemy nurkowe – problemy bezpieczeństwa” Praca statutowa pk. „Bazonur” Etap I 2000 i Etap II AMW Gdynia 2001.
61. Skrzyński St., Jakus B. „Wybrane metody ewakuacji nurków” referat na IV Konferencję Morską „Aspekty bezpieczeństwa nawodnego i podwodnego oraz lotów nad morzem” Cz. II str. 61 – 71 DMW Gdynia 2000.
62. Skrzyński St., Czarnecki St. „Techniczne aspekty dekompresji nurków” referat na IV Sympozjum „Nurkowanie – problematyka techniczna” str. 135 – 143 AMW Gdynia 1994.

63. Skrzyński St., Olejnik A. „Komora dekompresyjna: przeznaczenie i zadania” „Podwodny Świat” 5 (2002) 12 – 15.
64. Sobański R. „Termodynamika mieszanin oddechowych i ich właściwości cieplne” Politechnika Szczecińska, Szczecin 1982.
65. Sobczyk M. „Statystyka” PWN Warszawa 1998.
66. Stefanowski B., Staniszewski B. „Termodynamika techniczna” PWN Warszawa 1959.
67. Świtek J., Kłos R. Olejnik A. „Wstępna weryfikacja przerywanej wentylacji komory dekompresyjnej” II Konferencja Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej Gdynia 2000.
68. Świtek J., Olejnik A. „Regeneracja atmosfery w warunkach hiperbarycznych” Międzynarodowa Konferencja „Perspektywy rozwoju systemów ratowniczych, bezpieczeństwa i obronności w XXI wieku” Gdańsk 2002 r.
69. Reimers S.D., Hansen O.R. „Enviromental control of hiperbaric aplications” raport NEDU 17 – 72 1972.
70. Romer E. „Miernictwo przemysłowe” PWN Warszawa 1970.
71. Talaśka Z. „Metoda ujednorodnienia składu atmosfery oddechowej w komorze hiperbarycznej” (praca doktorska) AMW Gdynia 1994.
72. Teodorczyk A. „Termodynamika techniczna” Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Warszawa 1997.
73. Traczyk Wł, Trzebski A. „Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej” Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1980.
74. Wienke B.R. „Basic decompression theory and application” Best Publishing Company USA 1991.
75. Zaporozec G. I. „Metody rozwiązywania zadań z analizy matematycznej” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1973.

STRESZCZENI:

W materiale przedstawiono założenia i wyprowadzenie modelu matematycznego dla wentylacji przerywanej atmosfery komory dekompresyjnej podczas powietrznej ekspozycji hiperbarycznej z udziałem nurków. Proponowany model matematyczny oparty jest o bilans masy molowej dwutlenku węgla w atmosferze komory podczas stanu bez wentylacji i podczas realizacji wymiany czynnika oddechowego w czasie wentylacji. Model został opracowany podczas realizacji projektu badawczego wykonywanego w Katedrze Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Prezentowany model został poddany weryfikacji eksperymentalnej z wykorzystaniem komory dekompresyjnej i symulacji komputerowych. Wyniki tych eksperymentów będą przedmiotem kolejnych publikacji.

SŁOWA KLUCZOWE: automatyka i robotyka, technologia prac podwodnych, eksploatacja obiektów hiperbarycznych, komory dekompresyjne

ABSTRACT:

The material presents the assumptions and derivation of a mathematical model for intermittent ventilation of the decompression chamber atmosphere during airborne hyperbaric exposure with the participation of divers. The proposed mathematical model is based on the balance of the molar mass of carbon dioxide in the chamber atmosphere during the non-ventilated state and during the implementation of the respiratory medium exchange during ventilation. The model was developed in the course of the implementation of a research project carried out at the Underwater Works Technology Department of the Polish Naval Academy in Gdynia. It was subjected to experimental verification with the use of a decompression chamber and computer simulations. The results of these experiments will be the subject of further publications.

KEYWORDS: automation and robotics, underwater works technology, operation of hyperbaric facilities, decompression chambers