

Ryszard Kłos

MODELOWANIE MATEMATYCZNE PROCESU WENTYLACJI

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano trzy przykłady symulacji procesu wentylacji różnych obiektów: przedziału okrętu podwodnego reprezentującego duży obiekt normobaryczny, komory hiperbarycznej reprezentującej duży obiekt hiperbaryczny i aparatu nurkowego reprezentującego mały obiekt hiperbaryczny. Do modelowania procesu wentylacji wykorzystano tę samą formułę matematyczną, dokonując jednocześnie jej sprawdzenia przy wykorzystaniu różnych metod symulacji wymiany gazowej w procesie oddychania.

APARAT NURKOWY

Zasymulowanie procesu oddychania wiąże się z mechanicznym odwzorowaniem wentylacji płuc oraz zasymulowaniem procesu wymiany gazowej. Procesy te nie muszą koniecznie uwidaczniać wszystkich szczegółów, np. można przyjąć sinusoidalne przybliżenie akcji oddechowej [2]. W przypadku symulacji ustrojowej wymiany gazowej należy skupić się przede wszystkim na konsumpcji tlenu (O_2) i emisji w to miejsce tlenku węgla (IV) (CO_2). Najczęściej spotyka się dwie wartości przyjmowanego współczynnika oddechowego $\varepsilon=0,8$ i $0,75$ [1] wskazującego, w jakim stosunku objętościowym następuje emisja metabolicznego CO_2 na miejsce skonsumowanego O_2 . Do zasymulowania tego procesu możliwe jest wykorzystanie reaktora do katalitycznego utlenienia substancji chemicznych w objętości pobranej przez symulator z przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego oraz powtórne jej zwrócenie wraz z produktami spalania. W reakcji wykorzystano keton dimetylowy (Me_2CO), dla którego $\varepsilon=0,75$.

Me_2CO podawany był do reaktora za pomocą dokładnej pompy dozującej typu 40-PS4L firmy Lubrizol, zadającej żądany strumień cieczy pod ciśnieniem. Do reakcji utleniania Me_2CO zastosowano katalizator typu 0.3R73 (0,5% platyny na

3-milimetrowych wałeczkach aluminy) firmy Johnson Matthey Limited. Badania i wdrożenie symulatora zostały opisane wcześniej i nie będą tutaj przedstawiane [5]. Symulator metabolicznej konsumpcji O_2 i emisji CO_2 połączono ze stanowiskiem sztucznych płuc (rys. 1.). Jako czynnika oddechowego do zasilania aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego typu APW-6M użyto powietrza. Jego dozowanie wynosiło $(8,61 \pm 0,06) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Podczas eksperymentu wykonywano pomiary zawartości O_2 , tlenku węgla (II) CO i CO_2 oraz stężenia węglowodorów co 10 s przy wykorzystaniu analizatora typu MULTIWARN produkcji Drägerwerk AG Lübeck [7]. Zawartości węglowodorów były dodatkowo sprawdzane wrywkowo przy wykorzystaniu zestawu chromatografu gazowego sprzężonego ze spektrometrem masowym typu 5973 produkcji firmy Agilent [5]. Przez cały czas eksperymentów stężenie węglowodorów było poniżej progu pomiarowego. Podobnie jak zawartości CO_2 , ze względu na jego ilościowe usuwanie w pochłaniaczu aparatu nurkowego. Zawartości CO dochodziły sporadycznie do 100 ppm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze symulatora oddechowego i metabolicznego: lewa strona – stanowisko zasilania i kontroli reaktora połączonego z symulatorem oddechowym; prawa strona – aparat nurkowy APW-6M podłączony do symulatora

Przy obniżeniu zawartości O_2 poniżej $12\%_{\text{obj.}}$, czyli przy dostatecznie dużym dozowaniu $Me_2 \cdot CO$, pojawiały się kłopoty z osiągnięciem warunków pełnej stabilizacji reakcji utleniania, gdyż jej wydajność na katalizatorze znacznie malała. Jest to typowe zjawisko znane z termodynamiki pożarów [9].

Przeprowadzono eksperymentalną weryfikację (walidację) modelu matematycznego [4] procesu wentylacji dwuworkowego aparatu nurkowego typu APW-6M [6], przyjmując następujący plan przeprowadzenia badań:

- po ustabilizowaniu się składu dla głębokości 0 m przechodzą na głębokość 10 m;
- po ustabilizowaniu się składu dla głębokości 10 m przechodzą na głębokość 20 m;
- po ustabilizowaniu się składu dla głębokości 20 m przechodzą z powrotem na 10 m;
- po ustabilizowaniu się składu dla głębokości 10 m przechodzą na 0 m.

W ciągu pięciu dni wykonano 33 pomiary stabilnej wartości konsumpcji O_2 po zmianie głębokości według opisanego programu badań. Traktując je jako pomiary tego samego parametru, po stwierdzeniu, że badana zbiorowość ma rozkład normalny (testy Lilieforsa, Shapiro – Wilka i K-S), obliczono z nich wartość średnią, która wyniosła $(1,22 \pm 0,02) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Stosunkowo duża dokładność uzyskana z pomiarów rzeczywistych sugeruje, że podczas całych badań warunki były stabilne. Otrzymana wartość konsumpcji O_2 jest zgodna z przewidywaną, według proponowanego modelu matematycznego procesu wentylacji takiej konstrukcji aparatu nurkowego [2], dla którego wartość stabilną konsumpcji O_2 można przedstawić zależnością:

$$\dot{V} = \frac{\frac{p}{p_o} \cdot \frac{x_w - x_s}{x_w} \dot{V}_{od} + \dot{V}}{1 + \frac{p}{p_o} \cdot \frac{1 - x_s}{x_w} \cdot \frac{\dot{V}_{od}}{\dot{V}}} \quad (1)$$

Dotychczasowe wdrożenia nowo opracowanych technologii nurkowania i rozwiązań konstrukcyjnych aparatów nurkowych, prowadzone od wielu lat w Akademii Marynarki Wojennej, wiązały się z ryzykiem wykonywania eksperymentów na ludziach. Zbudowanie symulatora metabolicznej wymiany gazowej zmniejsza ryzyko i koszty części takich badań oraz pozwala na weryfikację teoretycznego modelu matematycznego procesu wentylacji zachodzącego w aparatach nurkowych o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego.

Do chwili obecnej prototyp symulatora metabolicznej wymiany gazowej zbudowali jedynie Szwedzi [8], natomiast Amerykanie prowadzą prace nad wykonaniem i wdrożeniem podobnego stanowiska badawczego.

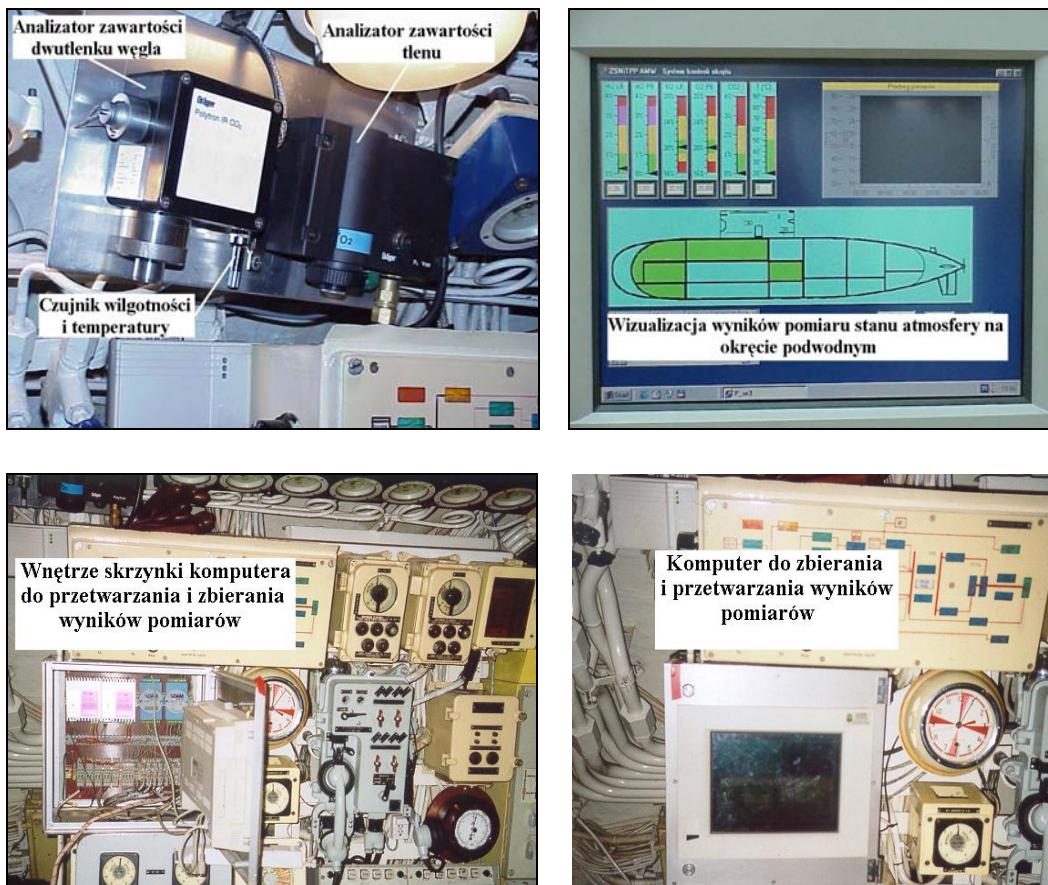
OKRĘT PODWODNY

Monitorowanie stanu atmosfery okrętu podwodnego jest istotne, szczególnie w sytuacji zagrożenia. Podczas normalnej pracy znajomość stanu atmosfery jest użyteczna w takich sytuacjach, jak: podjęcie decyzji o włączeniu/wyłączeniu systemu dopalania wodoru, systemu regeneracji atmosfery okrętu, wentylacji jam bateryjnych, decyzji o możliwości wejścia do przestrzeni z ograniczoną wentylacją itp. W sytuacji awaryjnej stanowi podstawę do podjęcia decyzji o konieczności opuszczenia zagrożonego okrętu podwodnego (np. podczas próby samoratowania się załogi).

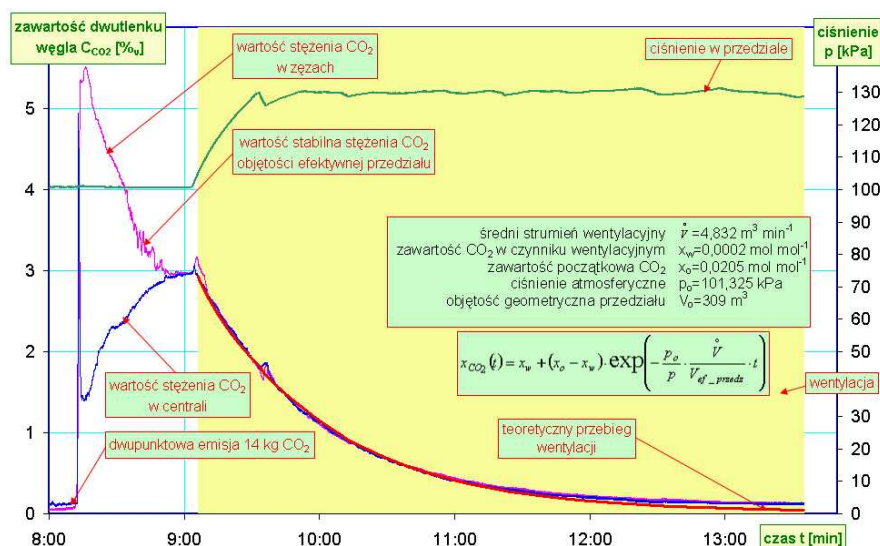
Rejestrację pomiarów podczas badań wentylacji przedziału okrętu podwodnego oparto na eksperymentalnej sieci pomiarowej RS485 (rys. 2.) zbudowanej z przetworników analogowo-cyfrowych ADAM 4517, do których podłączono analizatory i czujniki mające standardowe wyjścia (z reguły 4 – 20 mA). Wyniki pomiarów transmitowane były przez sieć do konwertera RS485/RS232 (ADAM 4520) i dalej do komputera przemysłowego typu PPC-120E firmy Advantech [3]. Wyniki pomiarów mogą być archiwizowane co 1 s lub rzadziej. Podczas badań zapisywano wyniki co 10 s. Sieć RS485 umożliwia podłączenie dodatkowego komputera do rejestracji danych bez wyraźnego zwiększenia kłopotów z ich transmisją i zwiększenia propagacji błędów, gdyż zachodzące podczas wentylacji procesy są wolnozmiennie, a częstotliwość odczytywania wyników stosunkowo mała. Integracja systemu monitoringu z podglądem zewnętrznym umożliwiła przeprowadzenie badań wentylacji okrętu podwodnego.

Początkowe stężenie CO₂ w wybranym przedziale okrętu wytwarzano, uwalniając go z butli gazowych. Do prób przygotowano jeden rodzaj butli napełnionych (3,50±0,01) kg CO₂ i (0,25±0,01) kg N₂. Przedział składał się z dwóch pokładów dzielących go na trzy pomieszczenia, w przybliżeniu o tej samej objętości. Pomiedzy pomieszczeniem górnym i dolnym znajdowały się schody. Pomiedzy dwoma dolnymi właz ładunkowy o powierzchni około 2 m². Analizatory CO₂ zlokalizowane były na szczycie pokładu górnego i w zęzach w pomieszczeniu dolnym. Do wytworzenia wstępnego stężenia CO₂ w przedziale użyto zawartości czterech butli. Dwie opróżniono na górnym pokładzie i dwie na dolnym. Homogenizacja atmosfery przebiegła stosunkowo szybko (rys. 3.), w czasie krótszym niż 1 godzina. Znając objętość pustego przedziału, masę wyemitowanego CO₂ oraz wartość stabilną jego stężenia po homogenizacji, można obliczyć objętość efektywną przedziału.

Dokładne wyznaczenie wartości tej wielkości ma kluczowe znaczenie dla modelowania procesu wentylacji. Dysponując protokołem z monitoringu stanu atmosfery w przedziale i wartością strumienia czynnika wentylacyjnego można uzyskać wyniki porównać z teoretycznymi. Strumień wentylacyjny policzono ze spadku ciśnienia w bateriach butli zasilających zlokalizowanych na okręcie ratowniczym. Wyniki pomiarów zawartości CO₂ wraz z obliczonymi według modelu matematycznego wentylacji, będącego adaptacją modelu wentylacji aparatu nurkowego, pokazano na rysunku 3.



Rys. 2. Elementy eksperymentalnej sieci pomiarowej na okręcie podwodnym klasy KILO



Rys. 3. Zawartość dwutlenku węgla i ciśnienie w przedziale okrętu podwodnego

Z rysunku 3. wynika, że występuje zadowalająca zgodność danych eksperymentalnych z teoretycznym przebiegiem tego procesu. Przy niskich stężeniach CO_2 pomiary rzeczywiste odbiegają lekko od krzywej teoretycznej. Spowodowane jest to faktem zmniejszenia się różnicy stężeń CO_2 w czynniku wentylacyjnym w stosunku do atmosfery wentylowanego przedziału. Powoduje to zmniejszenie się efektywności procesu wentylacji (mały moduł napędowy) poprzez spowolnienie procesu homogenizacji, czego objawem jest obserwowana niezgodność. Rozbieżność ta jest jednak niewielka i można uznać, że przyjęty model doskonale spełnia wymogi związane z jego zastosowaniem przy określaniu efektywnej wentylacji okrętu.

Opracowanie i sprawdzenie matematycznego modelu procesu wentylacji okrętu podwodnego było możliwe dzięki wcześniejszemu zbudowaniu i wdrożeniu przez Akademię Marynarki Wojennej systemu monitorowania stanu jego atmosfery [3, 7].

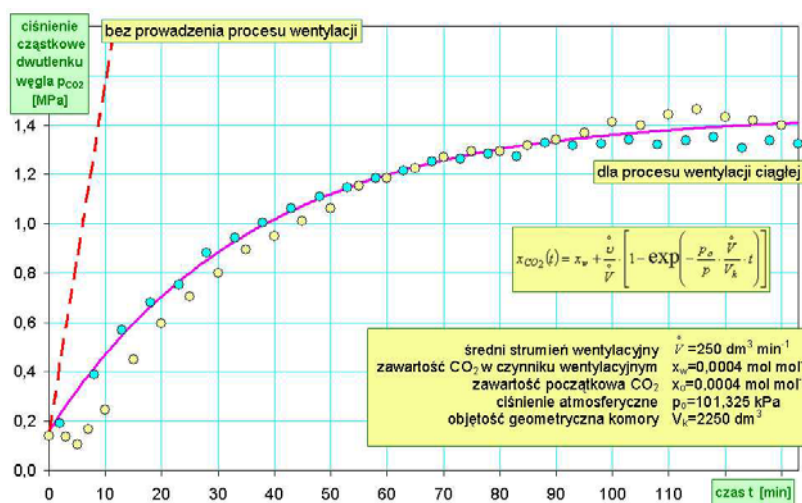
KOMORA HIPERBARYCZNA

Badania walidacyjne matematycznego modelu procesu wentylacji ciągłej komory hiperbarycznej przeprowadzono przy wykorzystaniu symulatora emisji CO_2 . Zdecydowano się wykorzystać w tym celu układ złożony z reduktora ciśnienia

i współpracującej z nim dyszy [2]. Układ dobrany był tak, że przy jego zasilaniu mieszaniną CO₂ w N₂ dysza pracowała w zakresie przepływów nadkrytycznych aż do ustalonego granicznego ciśnienia wstecznego (dla maksymalnego ciśnienia w komorze hiperbarycznej).

Wykonano dwa eksperymenty polegające na prowadzeniu hiperbarycznej wentylacji ciągłej przy stałej emisji CO₂ do wnętrza komory. Ich parametry oraz porównanie z obliczeniami teoretycznymi zobrazowano na rysunku 4. Przyjęty do walidacji model był, podobnie jak poprzednio, modyfikacją modelu wentylacji aparatu nurkowego.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły zadowalającą zgodność wyników pomiarów uzyskanych w warunkach rzeczywistych z obliczeniami teoretycznymi. Daje to możliwość modelowania procesu wentylacji przestrzeni oddechowej zarówno w warunkach normo-, jak i hiperbarycznych. Zastosowanie tego samego podejścia do aparatów nurkowych i habitatów pokazuje, że proponowany sposób modelowania sprawdza się w skali mikro i makro spotykanej w technice hiperbarycznej. Sugeruje to ogólność prezentowanego sposobu podejścia do modelowania procesów wentylacji. Zastosowanie modeli analitycznych, a nie empirycznych czy półempirycznych, daje możliwość interpretacji zachodzących zjawisk fizycznych, gdyż mają one oparcie w makroskopowych prawach fizycznych. Wynika z tego, że proces wentylacji pomieszczeń (zarówno w warunkach normo-, jak i hiperbarycznych) oraz aparatu nurkowego przebiega zgodnie z tym samym mechanizmem. Daje to zaproponowanemu sposobowi modelowania znamiona ogólności.



Rys. 4. Porównanie wyników pomiarów z danymi teoretycznymi dla procesu wentylacji ciągłej bazy typu ORTOLAN L-80

WNIOSKI

Projektowanie i modelowanie regeneracyjnych aparatów oddechowych oraz ocena bezpieczeństwa wykorzystania ich przy założonej technologii nurkowania opiera się, w znacznej mierze, na poznaniu i przewidywaniu zachodzących zmian podczas procesu wentylacji ich przestrzeni oddechowej. Posiadanie sprawdzonego modelu matematycznego procesu wentylacji aparatów nurkowych ułatwia także analizy symulacyjne prowadzone przy wykorzystaniu elektronicznej techniki obliczeniowej. Wymagania w stosunku do poprawności takiego modelu są stosunkowo wysokie, chociażby ze względu na to, że zaburzenia w wentylacji takiej konstrukcji mogą w przeciągu około 1 minuty doprowadzić do śmierci nurka.

Opracowanie makroskopowych modeli wentylacji aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego nie stwarza problemów. Kłopotliwa jest ich walidacja. Prowadzenie takich prac obłożone jest wieloma obostrzeniami, gdyż zawsze próbą końcową w takich badaniach są eksperymenty z udziałem ludzi, na które trzeba uzyskać zgodę Komisji Etyki Badań Naukowych.

Zaprezentowane badania były odpowiedzią na potrzebę optymalizacji procedur nurkowych, wentylacji okrętów podwodnych i kompleksów hiperbarycznych. Ich modyfikację wymusiły wypadki oraz wdrażanie nowych technologii. Przedstawione wyniki nie pochodzą więc z konkretnego zamysłu badawczego, lecz są raczej dziełem przypadku podyktowanego koniecznością.

W przyszłości planowane jest połączenie modelu wentylacji z modelem dekompresji w oparciu o pomiary parametrów atmosfery oddechowej, co da możliwość modyfikowania procesu dekompresji w czasie rzeczywistym. Wymaga to zmiany oprogramowania produkowanych już dekompresjometrów elektronicznych. Projekt taki zaproponowano w ramach prac dla Underwater Diving Working Group NATO Standardization Agency.

INFORMACJE UZUPEŁNIAJĄCE

Prezentowane wyniki są efektem realizacji projektu badawczego przyznanego przez Komitet Badań Naukowych KBN nr 0 T00A 072 18 „Modele matematyczne wentylacji atmosfery aparatów nurkowych z częściową regeneracją czynnika

oddechowego”, pracy badawczej prowadzonej na zlecenie Departamentu Polityki Zbrojeniowej MON pt. „Systemy podtrzymania życia na okręcie podwodnym” – umowa nr 20/DPZ/3/OTM/S/WR/MON/2002/706 – oraz ekspertyzy zleconej przez Departament Polityki Zbrojeniowej MON pt. „Zasady wentylacji kompleksów nurkowych podczas powietrznych ekspozycji hiperbarycznych z uwzględnieniem wykorzystania wewnętrznych instalacji tlenowych podczas dekompresji oraz leczenia wypadków nurkowych”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Guide for the classification of manned submersibles*, Bureau Special Committee on Submersible Vehicles, 1972
- [2] Kłos R., *Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego*, KOOPgraf, Poznań 2000.
- [3] Kłos R., Olejnik A., Khan A., *Monitoring of the submersible atmosphere composition*, „Dräger Review”, 2001, 87.
- [4] Kłos R., *Mathematical modelling of the breathing space ventilation of semi-closed circuit diving apparatus*, „Biocybernetics and Biomedical Engineering”, 2002, 22.
- [5] Kłos R., *Metabolic Simulator Supports Diving Apparatus Researches*, „Sea Technology”, 2002, 12.
- [6] Kłos R., *Experimental verification of a new mathematical model of ventilation of semi-closed circuit breathing apparatus*, „Polish Maritime Research”, 2003, 1.
- [7] Kłos R., *Monitorowanie podstawowych parametrów stanu atmosfery okrętu podwodnego*, „Podstawowe Problemy Metrologii”, Polska Akademia Nauk, Oddział w Katowicach, 2003.
- [8] Loucar M., *Breathing apparatus simulates human oxygen intake*, „Offshore Oct.”, 1992, 82.
- [9] *Safety AT 8% oxygen – 15 minutes*, Fire Research, Test, Development and Education Centra, Copenhagen 1993.

ABSTRACT

The paper presents three examples of a ventilation process simulation for various objects: submarine compartment representing a large normobaric object, hyperbaric chamber representing a large hyperbaric object and a diving gear representing a small hyperbaric object. To model the ventilation process the same mathematical formula was used. At the same time it was tested with various methods of gas exchange simulation in the breathing process.

Recenzent dr hab. inż. Lech Rowiński