

Ryszard Kłos

kmdr rez. dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw. AMW
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3, ul. Śmidowicza 69
tel.: +58 626 27 46, fax.: +58 626 27 61
<http://www.amw.gdynia.pl>

KOMOROWY SYSTEM ZACHOWANIA ŻYCIA ZABEZPIECZAJĄCY GÓRNIKÓW W PRZYPADKU POWSTANIA ATMOSFERY NIEZDATNEJ DO ODDYCHANIA

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w Zakładzie Górniczym Rudna, należącym do KGHM Polska Miedź S.A. Obiektem badań był prototyp komory ratowniczej dla załóg podziemnych zakładów górniczych KGHM Polska Miedź S.A. na wypadek powstania atmosfery niezdanej do oddychania. Komora przewidziana była do zabezpieczenia maksymalnie 40 górników w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania przez okres do 6 godz. Podstawowym elementem systemu zachowania życia były zestawy inhalatorów, wyposażonych w półmaski wykorzystujące powietrze znajdujące się w butlach wysokociśnieniowych.

Słowa kluczowe: systemy utrzymania życia, ratownictwo górnicze

LIFE SUPPORT SYSTEM BASED ON ISOLATED CHAMBER COMPLEX FOR MINERS PROTECTING AGAINST HARMFUL ATMOSPHERE

The results of scientific investigations carried out in copper mine RUDNA being part of KGHM Polska Miedź SA has been presented. The prototype of rescue chamber designated for mining staff of KGHM Polska Miedź SA equipped with live support system against harmful atmosphere has been the test bed. This system consists of air high pressure air tanks connected with built-in-breathing systems equipped with half-face masks for independent breathing from live support system for every victim. The rescue chamber was designed to support maximum of 40 miners through 6 hours in harmful breathing atmosphere.

Key Words: Live support systems, mining rescue

WSTĘP

W zakładach górniczych występuje zagrożenie powstaniem atmosfery niezdanej do oddychania. Szkodliwe zanieczyszczenia mogą pochodzić z różnych źródeł – w górnictwie miedziowym powstać mogą podczas pożarów maszyn i przenośników taśmowych. W czasie pożaru mogą wydzielać się duże ilości gazów toksycznych, które szybko rozprzestrzeniając się mogą zaskoczyć załogę, nawet w odległych miejscach od ognisk pożaru. Jednocześnie pojawiające się zadymienie wyrobisk

utrudnia zagrożonej załodze wycofywanie się określonymi drogami uciezkowymi. W skrajnych przypadkach, załoga nie będzie w stanie wycofać się z zagrożonych wyrobisk.

Na wypadek wystąpienia w kopalni zagrożeń opracowuje się plan ratownictwa, w którym określone są między innymi drogi uciezkowe. Tymi drogami załoga wycofuje się ze strefy zagrożonej do bezpiecznego miejsca. Ze względu na wydłużanie powyżej 5 km dróg ewakuacyjnych, stosowany obecnie przez załogę sprzęt ochrony układu oddechowego¹, mogą okazać się niewystarczające dla zapewnienia bezpiecznego wyjścia ze strefy zagrożenia. Propozycją rozwiązania tego problemu była budowa komór ratowniczych, które w przypadku pożaru zagwarantują bezpieczne schronienie dla załogi. Przetrwanie przez załogę określonego okresu zagrożenia w takich komorach daje kierownictwu akcji ratowniczej czas niezbędny do podjęcia działań w celu udzielenia im pomocy.

Wyposażenie eksperymentalnej komory ratowniczej w izolacyjny system oddechowy pozwalał na przetrwanie maksymalnie 40 górnikom, w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania, przez okres minimum 6 godz. Podstawowym elementem systemu zachowania życia były zestawy inhalatorów, wyposażonych w półmaski wykorzystujące powietrze znajdujące się w butlach wysokociśnieniowych. Komora wyposażona była w niezbędną aparaturę kontrolno-pomiarową, środki łączności itp., zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Punktem wyjścia do projektu i badań były wymagania przepisów dotyczących urządzeń ciśnieniowych zgodnie z punktem 3.4.1. Załącznika nr.4 do Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002 r. [Dz. U. Nr 139, poz.1169] w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (z późniejszymi zmianami) oraz wymagania Dyrektywy z dnia 21 grudnia 1989 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstwa Państw Członkowskich odnoszących się do środków ochrony osobistej (89/686/EWG) – Ustawa z dnia 29 sierpnia 2003 r. o zmianie ustawy o systemie oceny zgodności oraz zmianie niektórych ustaw [Dz. U. z 2003 r. nr 170, poz.1652].

Prace projektowe, badawcze i wdrożenie były sponsorowane przez *KGHM Polska Miedź S.A.* a wykonane zostały przez *Akademii Marynarki Wojennej*, przy współdziałaniu przedsiębiorstw krajowych sektora małych i średnich przedsiębiorstw – *MŚP*. Certyfikacja wykonana została przez *Centralny Instytut Ochrony Pracy- Państwowy Instytut Badawczy* .

METODA

Wymagania dla systemu zachowania życia

Jako podstawę do obliczeń systemu zachowania życia przyjęto wartości strumieni zużywanego tlenu i wentylacji płuc w zależności od wysiłku fizycznego zebrane w **tab.1** [1].

Ogólne założenia do projektu

Przy założeniu, że jedna butla powietrzna będzie przeznaczona dla 2 górników, to zastosowanie 20 szt. butli powietrznych dla 40 górników powinno zapewnić wentylację płuc dla wysiłku „lekkiego” wg **tab.1**.

Praca oddechowa inhalatora zdefiniowana według PN-EN 250 nie powinna przekraczać wartości $3 \text{ J} \cdot \text{dm}^{-3}$.

¹tlenowe aparaty uciezkowe oraz stacje aparatów rezerwowych

Tabela 1
Strumienie zużywanego tlenu i wentylacja płuc w zależności od wysiłku fizycznego [1]

Wysiłek fizyczny		Strumień zużywanego tlenu	Liczba oddechów na minutę	Wentylacja płuc	Graniczny strumień zużywanego tlenu
Intensywność	Przykład	[dm ³ ·min ⁻¹]	[min ⁻¹]	[dm ³ ·min ⁻¹]	[dm ³ ·min ⁻¹]
bardzo lekki	leżenie w łóżku	0,25	do 20	8÷10	do 0,5
	spokojne siedzenie	0,30			
	stanie w bez ruchu	0,40			
lekki	spacer 3,5 km h ⁻¹	0,7	20÷25	10÷20	0,5÷1,0
umiarkowany	marsz 6,5 km h ⁻¹	1,2	25÷30	20÷30	1,0÷1,5
ciężki	pływanie z prędkością 30 m min ⁻¹	1,8	30÷35	30÷50	1,5÷2,0
bardzo ciężki	bieg z prędkością 13 km h ⁻¹	2,0	35÷40	50÷65	2,0÷2,5
krańcowo ciężki	bieg pod górę	4,0	>40	>65	>2,5

Wyposażenie komory ratowniczej miało posiadać konstrukcję zapewniającą wymianę elementów i podzespołów metodą modułową. Inhalatory powietrzne miały być w łatwy sposób demontowane do przeprowadzenia ich okresowych przeglądów na powierzchni. Okres pomiędzy obowiązkowymi przeglądami powinien być nie krótszy niż 1 rok. Przeglądy powinny być prowadzone przez producenta lub osoby, przez niego upoważnione i przeszkolone.

Armatura wykonana z mosiądzu lub stali. Elementy konstrukcyjne ze stali malowane farbami.

Komora została zlokalizowana w wyrobisku o długości min. 10 m, szerokości przy spągu 5 m i wysokości 2,0 m, łączącym dwa chodniki. Komora ta od chodników została odizolowana tamami murowymi, w których zabudowano drzwi wejściowe do komory w układzie śluzowym. Wymiary główne komory zostały przyjęte, jako wytyczne do budowy systemu zachowania życia – **rys.1**.

Tamy wykonano z bloczków betonowych, mury obustronnie otynkowano, spąg wyrównano i utwardzono. Szczelność górotworu oraz ścian izolujących komorę od wyrobisk zapewniono poprzez uszczelnienie ich ogólnie dostępnymi środkami.

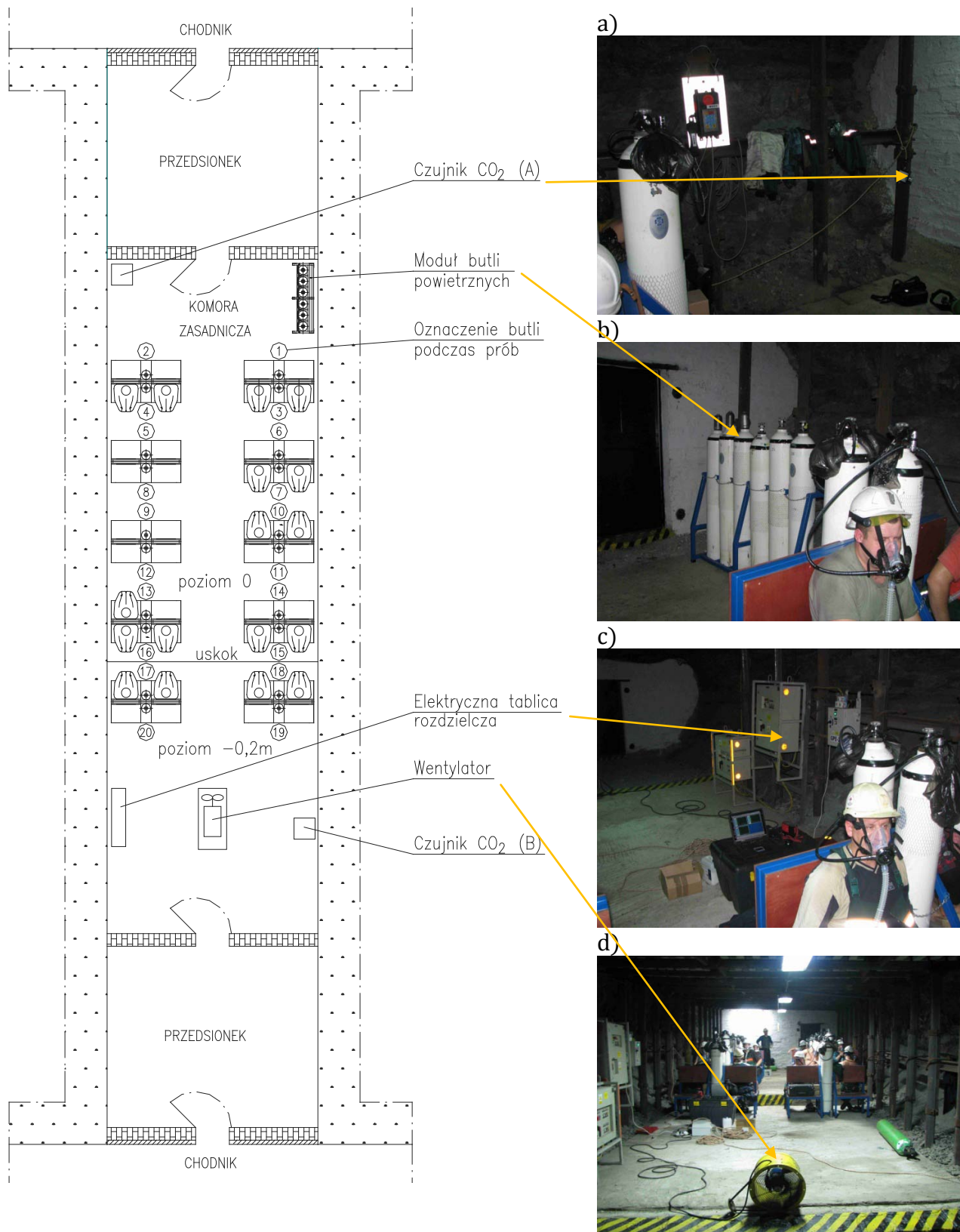
Zagrożenie hiperkapnią

Zakładając, że objętość komory wynosi 100 m³ oraz, że emisja ditlenku węgla dla wysiłku lekkiego zgodnie z **tab.1** wynosi ok.0,8 dm³·min⁻¹, to przy przebywaniu w niej 40 osób stężenie ditlenku węgla CO₂ osiągnie 1%_v już po ok.0,5 godz. Przyjęto, że 1%_v jest dopuszczalną zawartością CO₂ w atmosferze oddechowej a 2%_v jest górnym limitem kiedy komora powinna być, przynajmniej przed jej opuszczeniem, wentylowana. Stąd należało ją uzbroić w system wentylacji lub doposażyć systemy oddechowe w pochłaniacze CO₂ zlokalizowane na wydechu.

Do wentylacji komory przed jej ewakuacją służyć miał jeden bądź dwa stojaki z sześcioma butlami powietrznymi. Wyzwalanie powietrza polegać miało na całkowitym otwarciu zbiornika.

Obiekt badań

Obiektem badań był prototyp komory ratowniczej dla zakładów górniczych. Komora przewidziana była do zabezpieczenia maksymalnie 40 górników w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania przez okres do 6 godz.



Rys.1. Rozmieszczenie stanowisk inhalacyjnych podczas badań



Rys.2. Rozmieszczenie sprzętu podczas badań: a) stanowisko monitoringu b) ratownicy oddychający poprzez inhalatory z podłączonymi pochłaniaczami CO₂ c) stanowisko pomiaru wilgotności i temperatury d) jedno ze stanowisk pomiaru stanu zagrożenia w komorze

Podstawowym elementem systemu zachowania życia był zestaw 40 inhalatorów wyposażonych w półmaski wykorzystujące powietrze znajdujący się w butlach wysokociśnieniowych. Dodatkowo podczas prób, stanowiska inhalacyjne były wyposażone w indywidualne pochłaniacze CO₂, instalowane na wydechu inhalatora.

Elementem systemu był także moduł butli powietrznych, przeznaczony do okresowej wentylacji atmosfery komory tuż przed planowanym zakończeniem pobytu w niej ludzi – **rys.1**.

Ważnym wyposażeniem z punktu widzenia prowadzonych prób był wentylator, którego usytuowanie pokazano na **rys.1d**.

Dobór i rozmieszczenie ludzi

Do prób z udziałem ludzi wytypowano 18 ratowników z ZG RUDNA. Podstawowe dane antropometryczne testerów zebrano w **tab.2** a ustalone rozmieszczenie stanowisk i elementów wyposażenia komory przedstawiono na **rys.1**.

Tabela 2

Przydział do stanowisk inhalacyjnych oraz dane antropometryczne ratowników

Nr butli	wiek	wzrost	Masa ciała	Nr butli	wiek	wzrost	Masa ciała
	[lata]	[cm]	[kg]		[lata]	[cm]	[kg]
3	37	176	99	15	41	167	72
	33	176	94		42	178	90
4	44	171	87	16	32	185	82
	28	184	82		34	180	93
7	26	185	88	17	38	173	71
	35	180	96		36	187	97
10	36	174	72	18	33	180	74
	36	184	83		45	178	90
13	45	176	85	*)	35	177	87

*) dodatkowy uczestnik zamiennie za 13
górne wartości wieku, wzrostu i masy dotyczą pierwszej z przeprowadzonych prób zaś dolne drugiej

Sprzęt pomiarowy

Podczas testów wykorzystano kilka systemów pomiarowych:

- analizator typu MULTIWARN z pamięcią wewnętrzną² – **tab.3**
- monitoring zawartości CO₂ oparty o sieć RS-485, w której pracował przetwornik analogowo-cyfrowy ADAM 4517, do którego podłączono dwa

Tabela 3

Wybrane dane techniczne analizatora typu MULTIWARN [2]

Warunki otoczenia: -20-40°C / 700-1300hPa / 10-95% _R Czas pracy: >8h Częstotliwość ładowania: co 3tyg Wymiary: (55□110□65)mm Ciężar: 1kg				
Typ sensora:	Sensor CO ₂	Sensor CO	Sensor CH ₄	Sensor O ₂
Zasada działania:	spektrofotometr IR	czujnik elektrochemiczny	czujnik pelistorowy	czujnik magnetodynamiczny
Zakres pomiarowy:	0-25% _v	0-200ppm	0-100%DGW	0-25% _v
Powtarzalność zera:	≤ ±0,01% _v	≤ ±2ppm	≤ ±1%DGW	≤ ±0,2% _v
Czułość:	≤ ±5% _v	≤ ±1% mierzonej wartości	≤ ±2,5% mierzonej wartości	≤ ±1% mierzonej wartości
Efekt ciśnieniowy:	≤ ±0,16% mierzonej wartości/hPa	≤ ±0,01% mierzonej wartości/hPa	≤ ±0,1% mierzonej wartości/hPa	≤ ±0,01% mierzonej wartości/hPa
Dryft długoterminowy:	≤ ±0,4% mierzonej wartości/miesięcznie	≤ ±1% mierzonej wartości/miesięcznie	≤ ±1% mierzonej wartości/miesięcznie	≤ ±1% mierzonej wartości/miesięcznie
Czynniki chemiczne zakłócające pomiar :	aldehydy, ketony, woda	węglowodory i inne związki organiczne	tlenek węgla i związki organiczne	chlor, etan, ditlenek azotu

²zapis danych co 10 s

Tabela 4

Podstawowe właściwości metrologiczne analizatora typu POLYTRON IR CO₂ [3]

Podstawowe właściwości metrologiczne analizatora typu Polytron IR CO ₂	
zasada działania:	spektrofotometr IR
zakres pomiarowy:	0–25% _v
powtarzalność zera:	≤ ±0,01% _v
czułość:	≤ ±5% _v
efekt ciśnieniowy:	≤ ±0,16% mierzonej wartości/hPa
dryft długoterminowy:	≤ ±0,4% mierzonej wartości/miesięcznie
czynniki chemiczne zakłócające pomiar :	aldehydy, ketony, woda

analizatory IR (**tab.4**) posiadające standardowe wyjścia³. Wyniki pomiarów z sieci transmitowane były przez konwerter RS485/RS232⁴ do komputera co 5 s – **rys.1a** i **rys.2a**

– analizatory wielokanałowe OLDHAM – **rys.2d**

W analizatorze typu MULTIWARN wykorzystano jedynie kanały do pomiaru zawartości CO₂ i tlenu. Pozostałe kanały pomiarowe oraz wskazania analizatorów wielokanałowych OLDHAM wykorzystano jedynie, jako czujniki progowe ze względów bezpieczeństwa.

Rozmieszczenie głowic pomiarowych monitoringu CO₂ w komorze pokazano na **rys.1**. Umieszczono je na wysokości ok. 1 m nad spągiem. Analizator typu MULTIWARN umieszczono na tej samej wysokości w pobliżu tablicy elektrycznej i stanowiska inhalacji nr 20 – **rys.1** i **rys.2a**. Analizatory typu OLDHAM rozmieszczone były na stanowiskach 4, 10 i 18 – **rys.1** i **rys.2d**.

Dodatkowo wykonywano w komorze periodycznie pomiary wilgotności temperatury oraz przepływów mas powietrza – **rys.2c**.

Spektroskopia w podczerwieni

Spektroskopia w podczerwieni IR⁵ jest uznaną i cenioną metodą analizy instrumentalnej, wykorzystywaną do jakościowych oznaczeń związków organicznych. Widma cząsteczek w podczerwieni wykazują w fazie gazowej tylko nieznaczne poszerzenie pasm absorpcyjnych. Metoda ta może być wykorzystywana do wykrywania śladowych ilości związków organicznych. Takie gazy, jak CO₂ i CO dają wyraźne i dobrze rozróżnialne pasma absorpcyjne, częściowo tylko zachodzące na siebie. W zakresie liczb falowych od 800–2000 cm⁻¹ widmo jest czyste. Jest to tzw. zakres „finger sprintu”⁶, w którym występują charakterystyczne pasma absorpcyjne wielu związków organicznych. Podobnie jak odciski palców odróżniają ludzi, tak i pasma w tym zakresie pozwalają na odróżnienie związków chemicznych o ile można je prawidłowo zinterpretować. Podobnie w zakresie ok.3000 cm⁻¹ widmo jest czyste. W zakresie tym występują pasma absorpcyjne węglowodorów. Związki organiczne mogące występować w atmosferze oddechowej, jako produkty metabolizmu wykazują dużą aktywność absorpcyjną w zakresach 800–2000 cm⁻¹ i ok.3000 cm⁻¹. W ten sposób, można je oznaczać razem z typowymi zanieczyszczeniami, jakimi są ditlenek i tlenek węgla [4].

Pomiary ilościowe tą metodą nie zawsze mogą być prowadzone z dostateczną dokładnością ze względu na znaczne rozmycie pasm, ich nakładanie się w przypadku

³4–20mA

⁴ADAM 4520

⁵IR – (ang.) Infra Red

⁶finger print – (ang.) odcisk palca

mieszanin, niemożność ich dokładnego rozdzielania i całkowania, zakrzywianie się charakterystyk zależności sygnału od stężenia⁷ oraz kłopotliwe procedury kalibracyjne. Aparatura, ze względu na rozpowszechnienie metod spektroskopii IR, jest dostępna w formie specjalizowanej do pomiarów w mieszaninach gazowych do pomiarów zawartości CO₂ [4].

Analizatory specjalne

Niektóre związki chemiczne wykazują specyficzne właściwości. Właściwości te stają się podstawą tworzenia analizatorów specjalnych. Analizatory takie wykazują często bardzo małą podatność na zakłócenia, przez co związki chemiczne posiadające te specyficzne właściwości można oznaczać z dobrymi dokładnościami bez względu na występujące obok nich składniki analizowanej próbki. Nie mniej jednak, przed zastosowaniem takiego analizatora należy zawsze sprawdzić możliwość wystąpienia zakłóceń takiego pomiaru⁸. Za przykład może posłużyć zastosowana tutaj metoda magnetodynamiczna pomiaru zawartości tlenu, wykorzystująca zjawisko paramagnetyczności tlenu [4].

Organizacja prób

Próby prowadzono przez dwa dni. Każdego dnia przeprowadzono próbę systemów oddechowych z udziałem ludzi a po niej próbę wentylacji komory bez udziału ludzi. Pierwszego dnia ratownicy oddychali przez 1,5 godz z inhalatorów, które nie były wyposażone w pochłaniacze ditlenku węgla. Drugiego dnia powtórzono 1,5 godz próbę oddychania przy wykorzystaniu inhalatorów, wyposażonych w pochłaniacze ditlenku węgla – **rys.2d**. Podczas pierwszego dnia próby prowadzono bez działającego wentylatora WOO 40ws a w drugim dniu pracował on przez cały czas prowadzenia prób – **rys.1d**.

Próby wentylacji prowadzono bez udziału ludzi. Do pustej komory wyzwalało 8 kg CO₂, który zmagazynowany był w dwóch butlach o pojemności 50 dm³, dokładnie po 4 kg CO₂ i 1 kg N₂ w każdej⁹. Butle zlokalizowane były w pobliżu czujników systemu monitoringu CO₂ – **rys.1a,d**. Dodatek azotu miał za zadanie ilościowe wyzwolenie całej zawartości butli. Pierwszego dnia, po ustabilizowaniu się stężenia CO₂ w komorze wyzwolono do niej jak najszybciej, sekwencyjnie zawartość 3 butli powietrznych 20 MPa/50dm³. Drugiego dnia wyzwolono możliwie wolno zawartość jednej butli powietrznej 15 MPa/50dm³.

WYNIKI BADAŃ

Obserwacje zebrane podczas prób z ludźmi

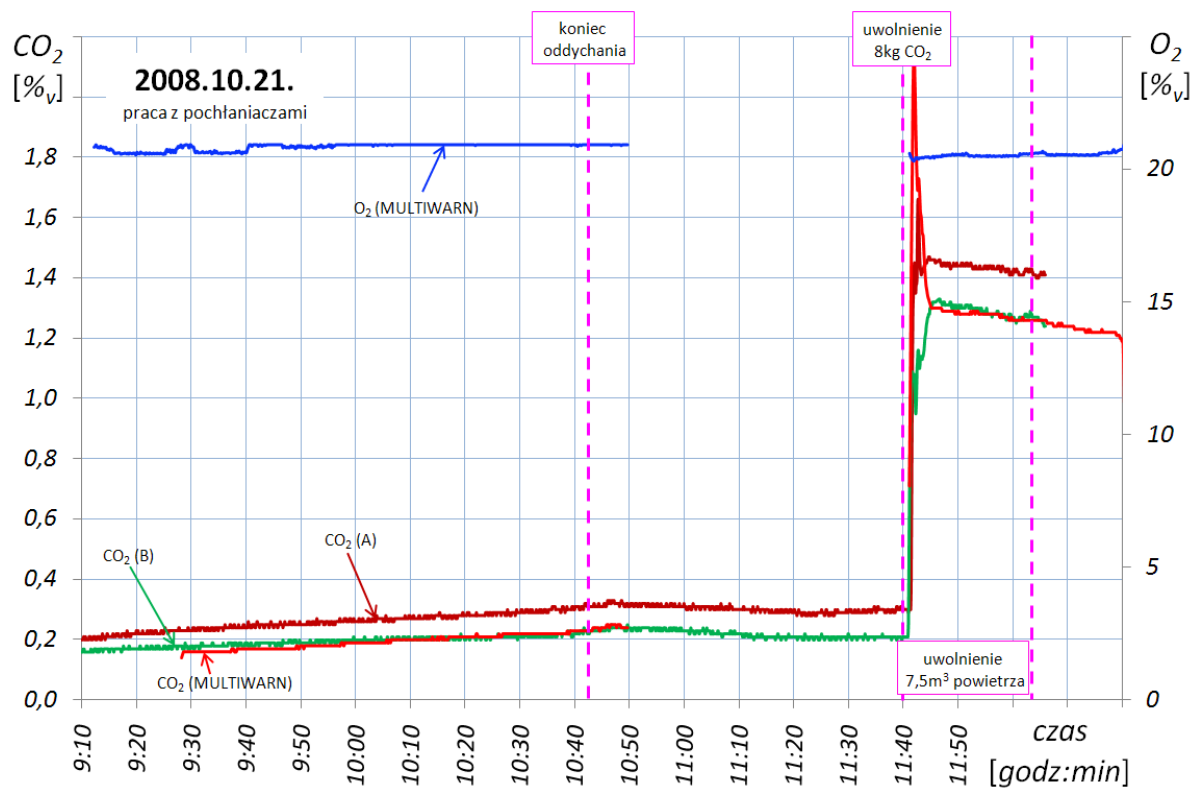
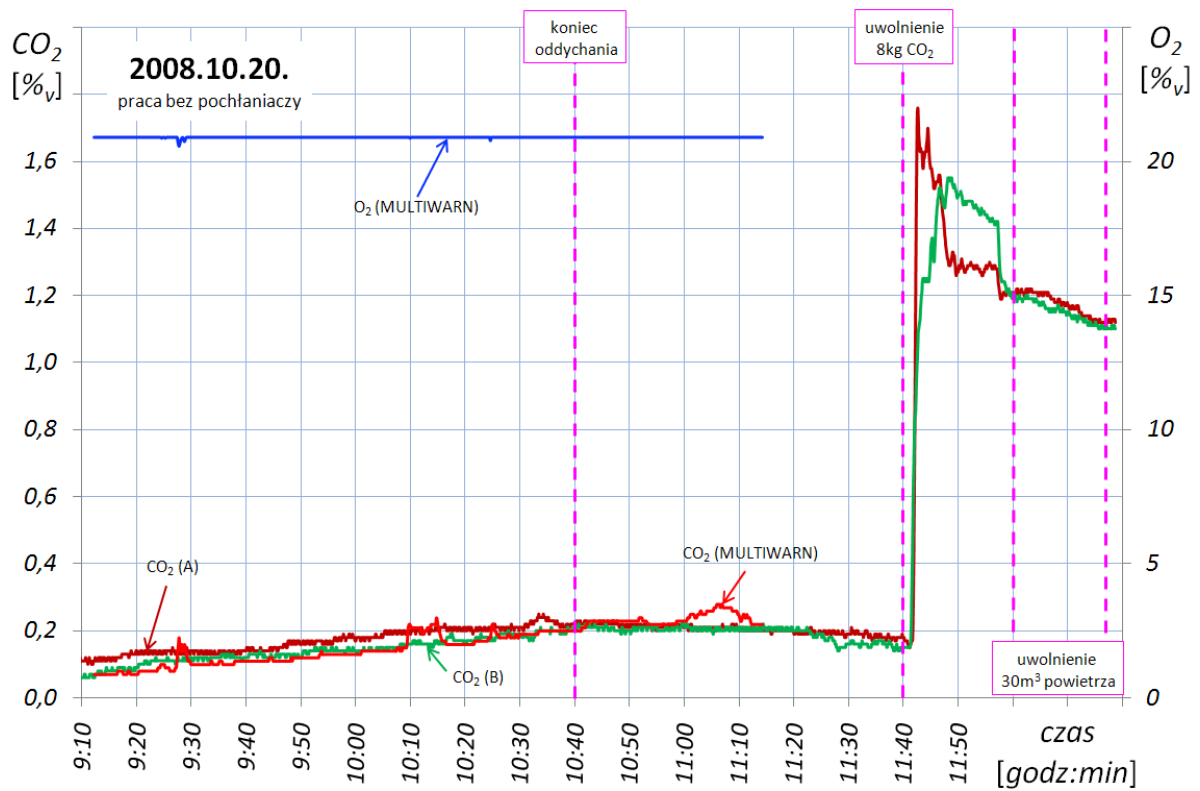
Po przeprowadzeniu prób zebrano wyniki obserwacji poczynionych przez użytkowników systemu inhalatorów, stwierdzono, że:

- transport i rozmieszczenie modułów i stojaka nie przedstawiają większych kłopotów pod warunkiem wyrównania spągu poprzez wykonanie wylewki betonowej
- kotwienie modułów i stojaka na wylewce nie jest konieczne, choć zalecane
- transport butli powietrznych przedstawia kłopoty logistyczne, dlatego nie powinny być one transportowane do napełnienia a uzupełniane na miejscu z mniejszych butli metodą przetaczania
- w dwóch przypadkach użytkownicy uskarżali się na rodzaj zastosowanej maski

⁷odchylenia od prawa *Lamberta-Beera*

⁸*cross-sensitivity*

⁹próbki sporządzone zostały metodą wagową i posiadały stosowny atest Linde Gas – **rys.1a** i **rys.1d** leżące zielone butle zlokalizowana po prawej stronie rysunków



Rys.3. Wyniki pomiarów

Tabela 5

Zużycie powietrza w jednym dniu prób przez 16 ratowników

Nr butli	Ciśnienie [MPa]	
	przed	po
3	20,0	12,0
4	20,0	16,5
7	20,0	17,5
10	20,0	16,0
15	19,5	14,0
16	20,5	17,0
17	19,5	15,0
18	20,0	16,0

- warunki klimatyczne są trudne do wytrzymania w czasie dłuższym niż 1,5–2 godz, dlatego należy wprowadzić klimatyzowanie komory
- oddychanie z inhalatorów zapewnia komfort a rozprężający się czynnik oddechowy ulega ochłodzeniu, ułatwiając przebywanie w gorącej atmosferze komory
- siedziska powinny być wyposażone w torby w swej spodniej części, w których można włożyć aparat uciezkowy oraz torby plastikowe na ekskrementy
- butle do wentylacji komory powinny znajdować się w modułach a nie w osobnym stojaku

Wyniki pomiarów

Wyniki wykonanych pomiarów zamieszczono na **rys.3**. Pokazują one, że:

- wbrew przewidywaniom teoretycznym zawartość tlenu podczas prób z ludźmi praktycznie nie ulegała zmianom, co daje możliwość zastosowania do oddychania powietrza rezygnując z kłopotliwych ze względów logistycznych i pożarowych mieszanin oddechowych
- wbrew przewidywaniom teoretycznym zawartość CO₂ podczas 1,5 godz próby z ludźmi nie ulega znacznemu wzrostowi¹⁰, co sugeruje, że w tych warunkach nie jest wymagane stosowanie pochłaniaczy CO₂
- zawartości CO₂ podczas próby, z włączonym wentylatorem, wykazują wyższe wartości niż bez mechanicznego mieszania atmosfery komory, co sugeruje występowanie wentylacji tłokowej w przypadku braku mechanicznego mieszania atmosfery komory
- wyniki pomiarów zawartości CO₂ czujnikiem systemu monitoringu CO₂(B) oraz MULTIWARN-em nie wykazywały różnic, co sugeruje na homogenizację atmosfery komory
- Wyniki pomiarów zużycia powietrza do oddychania przez 16 ratowników zebrano w **tab.5**.

Tabela 6

Wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej w jednym z dni prób

Godzina	Temperatura [°C]			Wilgotność względna [% _R]		
	początek	środek	koniec	początek	środek	koniec
0915	36,2	36,2	36,2	78	78	78
0945	36,2	36,2	36,2	80	80	80
1012	36,2	36,2	36,2	78	78	78
1030	36,4	36,4	36,4	77	77	77

¹⁰przy niestosowaniu pochłaniaczy ditlenku węgla na wydechu

- Wyniki pomiarów temperatury i wilgotności w komorze podczas jednego z dnia prób zebrano w **tab.6**.
- W pierwszym dniu badań, po wyzwoleniu 8 kg CO₂ do przestrzeni komory i ustabilizowaniu się jego stężenia na poziomie 1,2%_vCO₂ przeprowadzono próby wentylacji, podczas której wyzwolono równomiernie 30 m³ powietrza do przestrzeni komory, co zajęło 17 min. W drugim dniu, po wyzwoleniu 8 kg CO₂ do przestrzeni komory nie udało się uzyskać tak jednolitego jego stężenia w całej komorze jak poprzednio. Utrzymywała się stała różnica wynosząca 0,1%_vCO₂ pomiędzy przeciwległymi końcami komory. W okolicy wentylatora stężenie CO₂ utrzymywało się na poziomie 1,4%_vCO₂ a po przeciwnej stronie na poziomie 1,3%_vCO₂. W celu zasymulowania wentylacji tłokowej wyzwolono następnie powoli i równomiernie jedynie 7,5 m³ powietrza do przestrzeni komory, co zajęło 25 min.

DYSKUSJA

Przestrzeń wentylowana

Objętość wydzielonego z butli ditlenku węgla V_{CO_2} można obliczyć wykorzystując równanie stanu gazu doskonałego: $V_{R=const} V_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} \quad | \quad T = idem$, gdzie: V_{CO_2} – objętość wyemitowanego ditlenku węgla [m³], m_{CO_2} – masa wyemitowanego ditlenku węgla [kg], ρ_{CO_2} – gęstość ditlenku węgla [kg·m³], T – temperatura [K] [5].

Zaś z drugiej strony¹¹ objętość wydzielonego ditlenku węgla $V_{CO_2} V_{CO_2}$ wyniesie: $V_{R=const} V_{CO_2} = \frac{p}{p_0} \cdot V_k \cdot x \quad | \quad T = idem$, gdzie: p_0 – ciśnienie normalne [kPa], p – ciśnienie w komorze [kPa].

Łącząc powyższe zależności można obliczyć objętość komory $V_k = \frac{m_{CO_2} p_0}{p x \rho_{CO_2}}$. Przyjęto, że gęstość CO₂ pod ciśnieniem atmosferycznym p_0 wynosi: $\rho_{CO_2}(t = 25^\circ C) \cong 1,811 kg \cdot m^{-3}$. Z pomiarów wiadomo, że wyzwolenie 8 kg CO₂ spowodowało powstanie w objętości wolnej komory stabilnego stężenia na poziomie $x = 0,012 m^3 \cdot m^{-3}$. Stąd objętość wentylowana komory, przy założeniu, że $p_0 \cong p$, wyniesie w przybliżeniu: $V_k \cong \frac{8 kg}{0,012 \cdot 1,811 kg \cdot m^{-3}} \cong 368 m^3$.

Emisja ditlenku węgla

Korzystając z **tab.5** można obliczyć średnią konsumpcję powietrza przypadającą na jednego oddychającego na jednostkę czasu. Łączny spadek ciśnienia na 16 oddychających wyniósł 35,5 MPa w butlach o pojemności 50 m³ – **tab.7**. Stąd można obliczyć z równania Clapeyrona łączną objętość zużytego powietrza, w przeliczeniu na warunki normalne, przy założeniu stałości temperatury $T = idem$ oraz $p_0 \cong p$:

$$V_{R=const} V = V_b \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \quad | \quad p \cong p_0 \wedge T = idem \Rightarrow V = 50 dm^3 \cdot \frac{35,5 MPa}{0,1 MPa} \cong 17750 dm^3,$$

gdzie: V_b – objętość butli [dm³], Δp – łączny spadek ciśnienia w butlach [MPa]. Stąd praktyczne średnie minutowe zużycie powietrza na jednego oddychającego wyniosło:

$$\dot{V} = \frac{V}{nt} \cong \frac{17750 dm^3}{16 \cdot 60 min} \cong 12 dm^3 \cdot min^{-1}.$$

Z **tab.1** widać, że wentylacja płuc odpowiada wysiłkowi lekkiemu, któremu towarzyszy konsumpcja tlenu na poziomie $\dot{v} = 0,6 dm^3 \cdot min^{-1}$. Nie cały jednak tlen

¹¹korzystając powtórnie z równania Clapeyrona

Spadek ciśnienia w butlach o pojemności 50 m³ po inhalacji 16 ratowników

Nr butli	Ciśnienie [MPa]		
	przed	po	zużycie
3	20,0	12,0	8,0
4	20,0	16,5	3,5
7	20,0	17,5	2,5
10	20,0	16,0	4,0
15	19,5	14,0	5,5
16	20,5	17,0	3,5
17	19,5	15,0	4,5
18	20,0	16,0	4,0
	Suma		35,5

konwertowany jest w organizmie na ditlenek węgla¹². Przyjmuje się, że jedynie 75–80% tlenu ulegającego reakcjom homeostazy wydalana jest w postaci CO₂. W obserwowanym przypadku można ocenić, że minutowa produkcja CO₂ będzie na poziomie $\dot{V}_{CO_2} = 0,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$.

Teoretycznie wzrost stężenia CO₂ w atmosferze komory można policzyć z jej objętości wolnej, która wyniosła w przybliżeniu $V_k \cong 368 \text{ m}^3$, oraz średniej emisji CO₂, która wynosi około $\dot{V}_{CO_2} = 0,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$. Stąd przy oddychaniu 17 osób wzrost stężenia CO₂ w komorze wyniesie: $\dot{C} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{V_k} = \frac{17 \text{ osoba} \cdot 0,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}}{368000 \text{ dm}^3} \cdot 60 \text{ min} \cdot \text{godz}^{-1} \cong 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{godz}^{-1}$, gdzie: \dot{C} – wzrost stężenia CO₂ w czasie [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{godz}^{-1}$]. Odpowiada to przyrostowi stężenia CO₂ na poziomie około $\dot{C} \cong 0,14\%_v \cdot \text{godz}^{-1}$. Obserwowany praktycznie przyrost w obu próbach był na poziomie prawie dwukrotnie mniejszym $\dot{C} \cong 0,08\%_v \cdot \text{godz}^{-1}$ – **rys.3**. Sugeruje to występowanie naturalnej wentylacji komory powodowany wydychanym czynnikiem oddechowym.

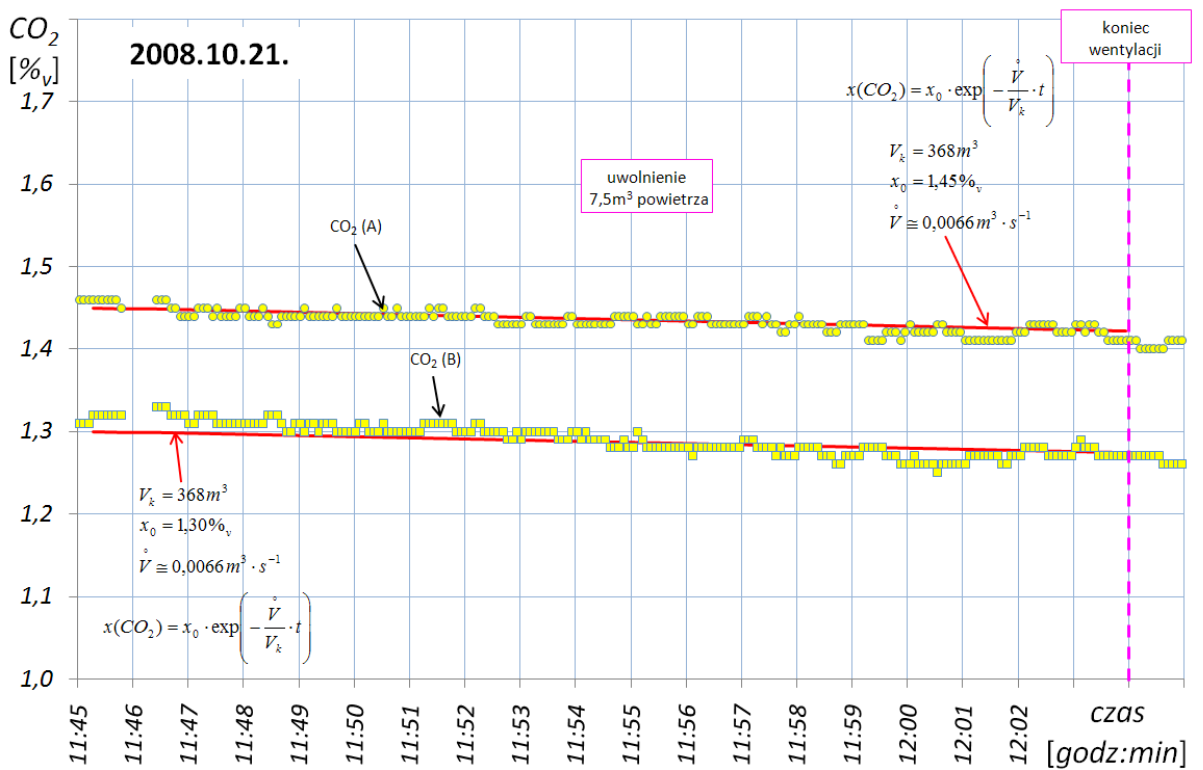
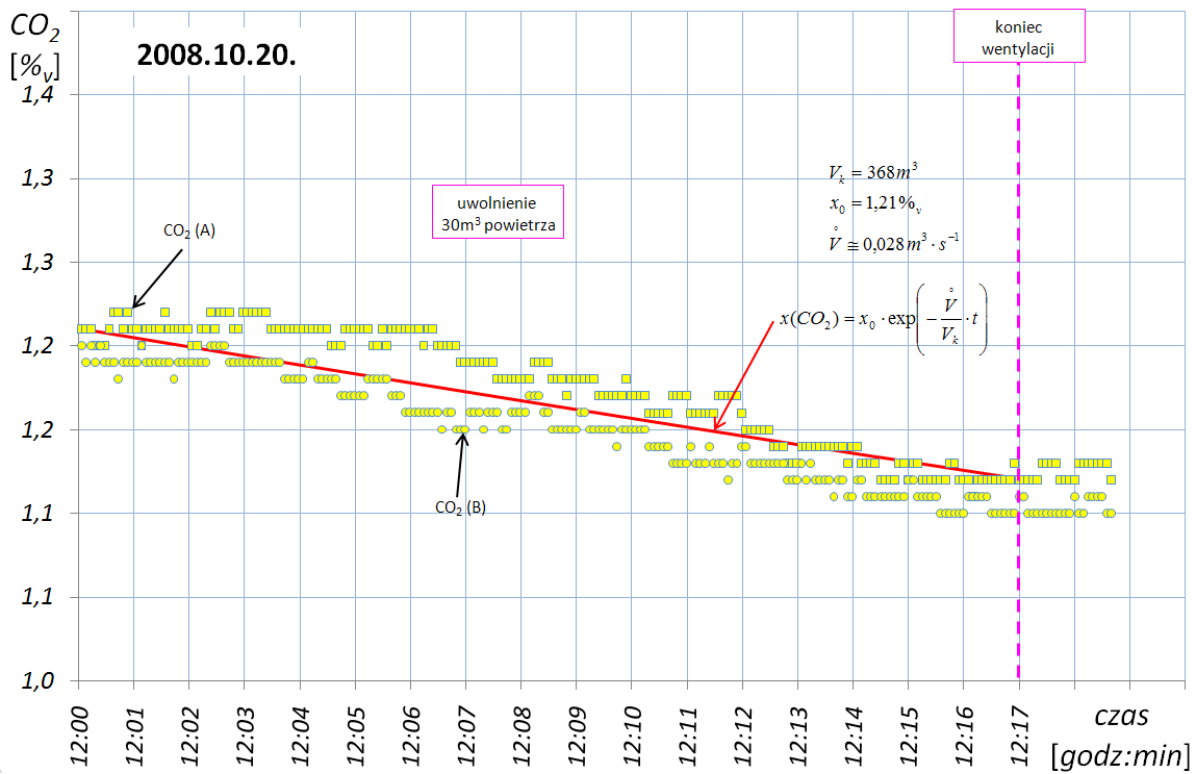
Wyniki pomiarów zawartości CO₂ czujnikiem systemu monitoringu CO₂(B) oraz MULTIWARN-em nie wykazywały różnic co sugeruje, że w poprzek komory na wysokości ok. 1 m rozkład stężenia CO₂ był równomierny. Na tej samej podstawie można także domniemywać, że wykonywane pomiary zapewniały dostateczną dokładność, powtarzalność oraz pobudliwość¹³.

Podczas pomiarów prowadzonych bez wykorzystania wentylatora, obserwowane stężenia CO₂ były niższe niż wtedy, gdy wentylator mieszał atmosferę komory. W przypadku pierwszym zawartość CO₂ wykazywała tendencje do stabilizacji, sugerując istnienie zjawiska usuwania zanieczyszczeń z komory w sposób tłokowy. W przypadku drugim zawartość CO₂ rosła przez cały czas, nie wykazując tendencji do stabilizacji, choć stwierdzona dynamika była taka sama podczas obu prób. Nie wielki narost zawartości CO₂ daje możliwość uproszczenia konstrukcji systemów oddechowych, poprzez wycofanie pochłaniaczy CO₂. Spowoduje to zmniejszenie kosztów inwestycyjnych, poprawę ergonomii konstrukcji przyczyniając się jedynie w niewielkim stopniu do większego zanieczyszczenia atmosfery komory.

W warunkach prowadzonego eksperymentu nie obserwowano zmian w zawartości tlenu w atmosferze komory – **rys.3**.

¹²część tlenu zużywana jest na powstawanie wody oraz niewielkiej ilości innych produktów metabolicznych

¹³pomiary wykazywały te same zmiany w czasie



Rys.4. Wyniki modelowania matematycznego

Wentylacja

Obliczenia wentylacji komory są zgodne z modelem dla bilansu masy: $x_{CO_2} = x_0 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}}{V_k} t\right)$ | $V_k = 358 \text{ m}^3$. Dla procesu wentylacji przeprowadzonego pierwszego dnia eksperymentów parametry do modelowania matematycznego, to: $x_0 = 1,21\%$, i $\dot{V} = 0,028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast dla procesu wentylacji z drugiego dnia eksperymentów parametry do modelowania to: $x_0 = 1,45\%$, $x_0 = 1,30\%$, i $\dot{V} = 0,0066 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wyniki procesu modelowania pokazano na **rys.4**. Ich duża zgodność z wynikami rzeczywistymi sugeruje, że z dużym prawdopodobieństwem proces przebiega z homogenizacją atmosfery¹⁴ komory zarówno przy jej mieszaniu mechanicznym jak i przy braku takiego mieszania. Większy rozrzut wyników pomiarów w stosunku do modelu w pierwszym dniu eksperymentów spowodowany był prawdopodobnie wytworzeniem turbulencji strumienia wentylacyjnego¹⁵.

WNIOSKI

Ogólne wnioski z przeprowadzonych badań można streścić, jako:

- przy wykorzystaniu do oddychania powietrza komora o kubaturze nie mniejszej niż 400 m^3 może zapewnić przetrwanie maksymalnie dla 40 ratowanych
- wyniki badań sugerują uproszczenie konstrukcji systemów zachowania życia poprzez wycofanie pochłaniaczy CO_2
- temperatura i wilgotność w komorze są trudne do wytrzymania dla przebywających w niej ludzi przez czas dłuższy niż 1,5–2 godz. stąd należy ją ciągle klimatyzować, aby była przygotowana do przyjęcia ratowanych
- oddychanie z inhalatorów zapewnia dodatkowo komfort, gdyż rozprężający się czynnik oddechowy ulega ochłodzeniu ułatwiając odprowadzanie ciepła¹⁶
- moduły dają się montować według przewidywanych sposobów aranżowania wnętrza komory a sposób ich mocowania jest funkcjonalny
- należy przedstawić zmiany konstrukcyjne modułu, uwzględniające możliwość zamocowania dwóch butli gazowych z przeznaczeniem jednej, jako czynnik oddechowy a drugiej, jako czynnik wentylacyjny lub rezerwowy czynnik oddechowy,

Tabela 8

Przydział do stanowisk inhalacyjnych oraz dane antropometryczne ratowników

Nr butli	wiek	wzrost	Masa ciała	Nr butli	wiek	wzrost	Masa ciała
	[lata]	[cm]	[kg]		[lata]	[cm]	[kg]
7	47	173	78	16	35	178	89
	36	177	87		30	183	90
11	29	184	103	19	39	182	87
	26	180	92		30	191	81
12	35	178	85	20	50	188	98
	26	182	80		45	176	85
15	30	188	102				
	32	180	77				
górne wartości wieku, wzrostu i masy dotyczą pierwszej z przeprowadzonych prób zaś dolne drugiej							

¹⁴dla systemu mieszania mechanicznego wentylatorem wytworzył się stały, niewielki gradient stężenia

¹⁵szybkie wyzwolenie czynnika wentylacyjnego

¹⁶zjawisko *Jolue'a-Thompsona*

Tabela 9

Spadek ciśnienia w butlach o pojemności 50 m³ po 4 godz. oddychania

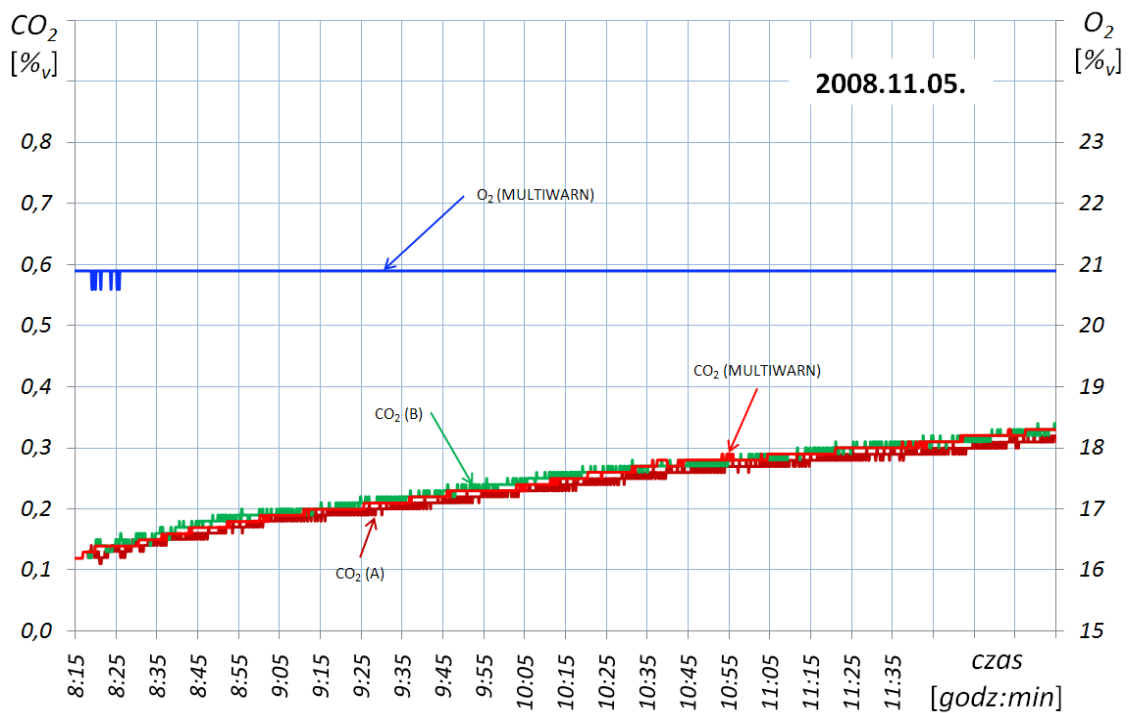
Nr butli	Ciśnienie [MPa]		
	przed	po	zużycie
7	20,0	11,5	8,5
11	20,0	11,5	8,5
12	20,0	9,0	11,0
15	20,0	8,0	12,0
16	20,0	10,0	10,0
19	20,0	13,5	6,5
20	20,0	13,0	7,0
Suma			63,5

Próba końcowa

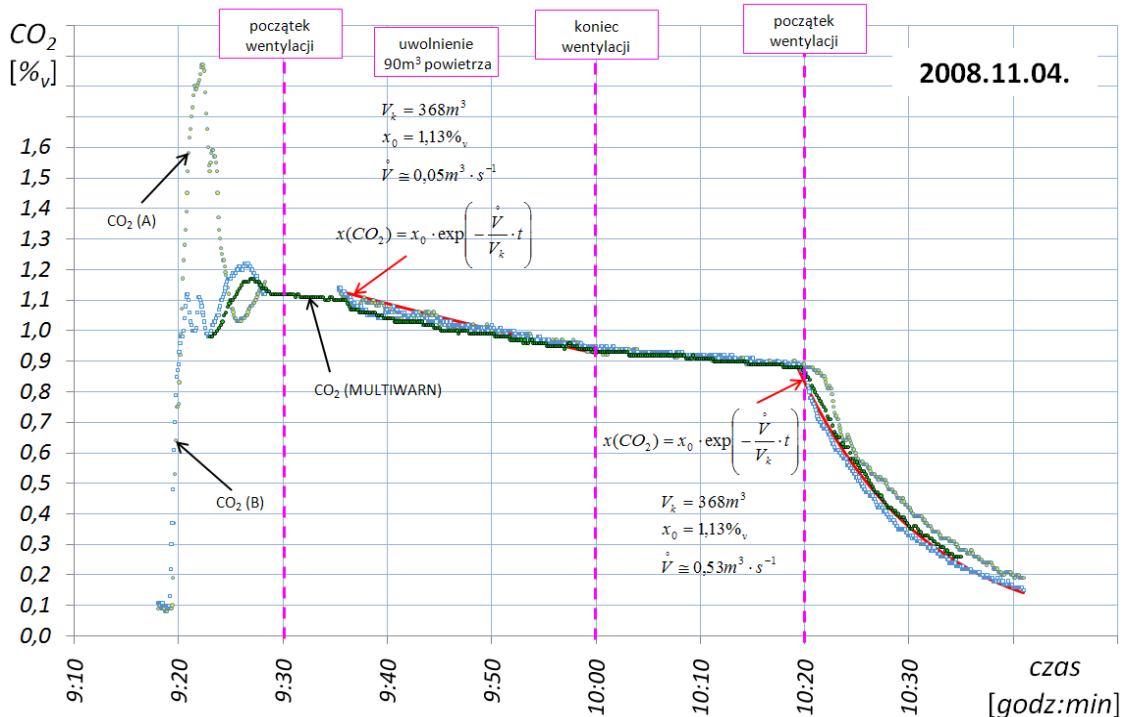
Celem próby końcowej było ustalenie możliwości zabezpieczenia załóg dołowych przez wykorzystanie komory ratowniczej. W czasie próby należało ustalić zapas użyteczny czynnika oddechowego do zabezpieczenia minimum 6 godz oddychania oraz skalę narostu stężenia CO₂ podczas takiej próby.

Organizacja

W próbie wzięło udział 14 ratowników – **tab.8**. Oddychali oni z przerobionych inhalatorów zgodnie z wnioskami po przeprowadzonych próbach wstępnych. Test trwał dokładnie 4 godz. Atmosfera komory była przez cały czas mieszana wentylatorem zamontowanym w urządzeniu klimatyzacyjnym.



Rys.5. Wyniki próby końcowej



Rys.6. Wyniki badań wentylacji

Wyniki próby

Zużycie czynnika oddechowego podczas próby zebrano w **tab.9**. Zapis pomiarów stężenia CO_2 pokazano na **rys.5**. Zawartość początkowa ditlenku węgla wynosiła $0,13\%_{\text{v}}\text{CO}_2$ a końcowa $0,33\%_{\text{v}}\text{CO}_2$. Zawartość tlenu utrzymywała się cały czas na poziomie $20,9\%_{\text{v}}\text{O}_2$. Wyniki pomiarów MULTIWARNem wykonywano na różnych poziomach komory nie obserwując różnic. Temperatura wynosiła ok. 32°C a wilgotność względna ok. $51\%_{\text{R}}$ i nie wykazywały zmian podczas całej 4 godz próby.

W dniu poprzedzającym próbę końcową wykonano dodatkowe badania nad wentylacją komory. Wyniki zebrano na **rys.6**. Metoda była podobna do opisanej wcześniej, przy czym w fazie końcowej przeprowadzono dodatkową wentylację przy wykorzystaniu strumienia powietrza przetłaczanego wentylatorem.

Przedstawione na **rys.6** wyniki badań pokazują, że jest możliwe przewentylowanie komory poprzez jednoczesne wykorzystanie całego ładunku powietrza zawartego w 6. butlach modułu wentylacyjnego¹⁷.

Wnioski z próby końcowej

Na podstawie próby końcowej ustalono, że:

- inhalatory nie muszą być wyposażane w pochłaniacze CO_2 pod warunkiem, że kubatura komory wyniesie min. 400 m^3 i będzie ona przeznaczona co najwyżej dla 40 górników
- wykonanie dwubutlowych modułów pozwoli na łatwiejsze przeprowadzanie procesu wentylacji i umożliwi rezygnację z dodatkowego modułu butlowego
- moduł butlowy z powietrzem przeznaczonym do zapewnienia procesu wentylacji komory posiada zapas powietrza do jednokrotnego jej przewietrzenia

¹⁷jednoczesne, szybkie opróżnienie wszystkich 6 butli

REKOMENDACJE I UZUPEŁNIENIA

- Wyniki badań pokazują, że wykonany prototyp komory zabezpieczy załogę dołową w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania i może być wdrożony w KGHM Polska Miedź S.A.
- Wykonany prototyp komory zabezpieczy 40 górników w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania, przez okres do 6 godz
- Wyniki pracy są zgodne z wymaganiami umowy nr RR/85/2008 zawartej pomiędzy KGHM Polska Miedź S.A. w Lubinie a Akademią Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte w Gdyni pt.: „Zabezpieczenie załóg dołowych przez wykorzystanie komór ewakuacyjnych w przypadku powstania atmosfery niezdanej do oddychania”.

PIŚMIENNICTWO

1. Przyłipiak M., Torbus J. *Sprzęt i prace nurkowe-poradnik*. Warszawa : Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1981. ISBN 83-11-06590-X
2. Dräger Safety AG & Co. KGaA. *Multi-Gas Monitor Multiwarn II Technical Handbook*. Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2003. 90 23 594 - GA 4634.200 de/en
3. Dräger Sicherheitstechnik GmbH. *Transmitter IR CO2 Polytron Instructions for Use*. Lübeck : Dräger Sicherheitstechnik GmbH, 1997. 90 23 260 - GA 4675.650 d/e.
4. Kłós R. *Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego*. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2
5. Pigoń K., Ruziewicz Z. *Chemia Fizyczna*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007. ISBN 978-83-01-15055-6

Autor:

kmdr rez. dr hab. inż. Ryszard Kłós, prof. nadzw. AMW

Zajmuje się projektowaniem, budową i eksploatacją hiperbarycznych systemów zachowania życia oraz załogowymi technologiami prac podwodnych. Od 1988r. jest pracownikiem Zakładu Technologii Prac Podwodnych. W latach 2003 – 2010 pełnił obowiązki Kierownika Zakładu, a w okresie od 2008 do 2010 jednocześnie pełnił obowiązki prodziekana do spraw rozwoju na Wydziale Mechaniczno–Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni.

