

## Arnold Dziambor, Ryszard Kłos

mgr inż. Arnold Dziambor  
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>

### SYSTEM UTRZYMANIA CIŚNIENIA CZĄSTKOWEGO TLENU W KOMPLEKSIE HIPERBARYCZNYM

*W artykule przedstawiono system do utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu w kompleksach hiperbarycznych podczas nurkowań saturowanych. Składa się on z dyszy dozującej współpracującej z reduktorem ciśnienia pod kontrolą programu komputerowego bazującego na aktualnych pomiarach ciśnienia cząstkowego tlenu.*

**Słowa kluczowe:** systemy utrzymania życia, nurkowanie saturowane

### UPKEEPING OXYGEN CONSTANT PARTIAL PRESSURE SYSTEM FOR HYPERBARIC COMPLEXES

*This paper presents the technology for upkeeping oxygen partial pressure into hyperbaric complexes during saturation diving. This device consist on collaboration pressure reducer and dosing nozzle system numerically controlled by computer program based on oxygen partial pressure measurements.*

**Key Words:** live support systems, saturation diving

#### WSTĘP

Podczas prowadzenia nurkowań, zwłaszcza saturowanych, istotnym jest utrzymanie z wymaganą dokładnością stałego poziomu ciśnienia cząstkowego tlenu w atmosferze kompleksu hiperbarycznego. Utrzymanie ciśnienia cząstkowego nie jest sprawą łatwą, gdyż wymagane wartości są zmienne w czasie<sup>1</sup>.

Badania prowadzono celem opracowania systemu dozowania tlenu do utrzymania jego ciśnienia cząstkowego w atmosferze kompleksu nurkowego DGKN-120 przy zmianach powodowanych jego konsumpcją czy fluktuacją ciśnienia całkowitego.

---

<sup>1</sup>np. wymagane technologią podnoszenie ciśnienia cząstkowego tlenu przed rozpoczęciem dekompresji czy zmiany wartości ciśnienia cząstkowego w poszczególnych fazach dekompresji

*Projekt układu stało–dozującego*

Jako dozownika tlenu użyto układu stało–dozującego złożonego z reduktora ciśnienia i współpracującej z nim dyszy dozującej. Na wartość strumienia masy gazu takiego układu mają wpływ: parametry czynnika gazowego, wartość ciśnienia zasilania oraz ciśnienia za dyszą dozującą<sup>2</sup> [4].

Doświadczalnie stwierdzono, że po przekroczeniu pewnej granicy ciśnień pomiędzy wlotem i wylotem dyszy, pomimo podnoszenia ciśnienia na wylocie do pewnej wartości granicznej, strumień masy przepływającego czynnika gazowego jest stały. Innymi słowy, zwiększenie ciśnienia wstecznego poniżej pewnej granicy, nie spowoduje zmniejszenia strumienia masy przepływającego czynnika. Prawidłowo dobrany zespół reduktora ciśnienia oraz dyszy dozującej, zapewnia dostarczenie stałego strumienia gazu do założonego, maksymalnego ciśnienia wstecznego. Celem wyprowadzenia potrzebnych zależności należy wyjść od różniczkowej formy *równania Bernoullego* [1,3]. Równanie to wywodzi się z zasady zachowania energii.

Zakładając, że nie występuje tarcie wewnętrzne<sup>3</sup> dla **1 mola** gazu można zapisać różniczkowy bilans energetyczny:

$$dE = dE_k + dE_p + dE_o + dU = Q_{el} - W_{el} \quad (1)$$

gdzie:  $E$  – molowa energia całkowita układu  
 $E_k$  – molowa energia kinetyczna układu  
 $E_p$  – molowa energia potencjalna układu  
 $E_o$  – molowa energia objętościowa układu  
 $U$  – molowa energia wewnętrzna układu  
 $Q_{el}$  – molowa energia wymieniana na sposób ciepła pomiędzy układem a otoczeniem  
 $W_{el}$  – molowa energia wymieniana na sposób pracy, z wyłączeniem pracy objętościowej, pomiędzy układem a otoczeniem

W zależności (1) użyto symbolu *el* zamiast symbolu różniczki zupełnej do oznaczania granicznie małych energii molowych wymienionych na sposób ciepła i pracy nieobjętościowej. Postępowanie takie podyktowane było odróżnieniem funkcji stanu od innych funkcji. Ciepło i praca<sup>4</sup> nie są na ogół jednoznacznie funkcjami stanu<sup>5</sup>. Poszczególne człony energetyczne występujące w bilansie (1) można rozisać, jako:

$$dE_k = d\left(\frac{w^2}{2}\right) \quad (2)$$

gdzie:  $w$  – prędkość strumienia gazu

$$dE_p = g \cdot dh \quad (3)$$

gdzie:  $g$  – przyciąganie ziemskie  
 $h$  – wysokość od powierzchni Ziemi

<sup>2</sup>ciśnienie komorowe działające wstecznie w stosunku do ciśnienia dozowanego tlenu

<sup>3</sup>gaz doskonały

<sup>4</sup>inaczej niż przykładowo energia wewnętrzna układu

<sup>5</sup>np. wielkość wykonywanej przez układ pracy objętościowej, określona jest wartością ciśnienia zewnętrznego, a nie ciśnienia gazu wykonującego pracę [2,6]

$$dU = dI - d(p \cdot v) \quad (4)$$

gdzie:  $I$  – entalpia molowa  
 $p$  – ciśnienie  
 $v$  – objętość molowa

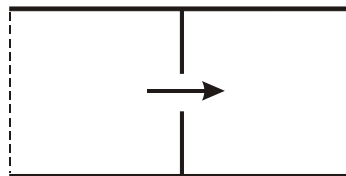
$$Q_{st} = dU + p \cdot dv \quad (5)$$

$$dE_o = d(p \cdot v) \quad (6)$$

Po wstawieniu do bilansu (1) zależności (2)–(6) i po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się różniczkową postać równania *Bernoullego*:

$$d\left(\frac{w_2}{2}\right) + g \cdot dh + v \cdot dp = -W_{st} \quad (7)$$

$$n=0; dh=0; w_0=0$$



przekroje	1	0	2
ciśnienia	$p_1$	$p_0$	$p_2$
gęstość	$q_1$		$q_2$
prędkość	$w_1 \cong 0$	$w_0 = f(q)$	
temperatura	$T_1$		$T_2$
powierzchnia		$A_0$	

Rys. 1. Warunki przepływu gazu przez poziomą rurę z kryzą o powierzchni otworu równej  $A_0$

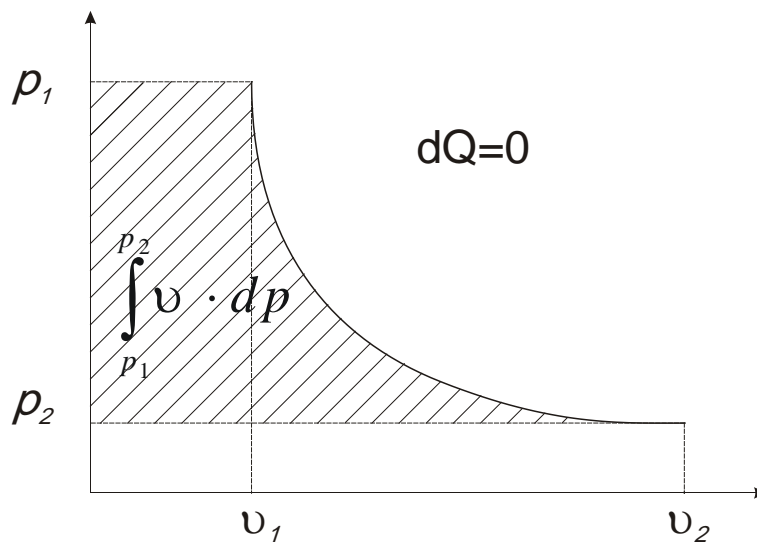
Dla gazu niewykonywającego pracy nieobjętościowej  $W_{st} = 0$  przepływającego przez poziomą rurę  $dh = 0$  od przekroju 1 poprzez kryzę 0 o powierzchni otworu  $A_0$  do przekroju 2, równanie *Bernoullego* (1) dla przepływu od przekroju 1 poza przekrój 0 przybierze postać<sup>6</sup>:

$$\int_0^{w_0} d\left(\frac{w^2}{2}\right) = \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp \quad \rightarrow \quad \frac{w^2}{2} = \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp \quad (8)$$

Korzystając z graficznej interpretacji całki, przedstawionej graficznie na **rys.2**, można zapisać:

$$\begin{aligned} \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp &= \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv - Pole(p_2, 2, v_2, 0) + Pole(p_1, 1, v_1, 0) = \\ &= \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv - p_2 \cdot v_2 + p_1 \cdot v_1 \end{aligned} \quad (9)$$

<sup>6</sup>warunki panujące w poszczególnych przekrojach zaznaczono na **rys.1**



Rys. 2. Graficzna interpretacja całki  $\int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp$  we współrzędnych  $(p, v)$  dla przemiany adiabatycznej  $dQ = 0$

Oznaczając, jako  $c_v$  molową pojemność cieplną układu, można korzystając z pierwszej zasady termodynamiki, dla układu izolowanego zapisać  $p \cdot dv = c_v \cdot dT$ , stąd:

$$\int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = \int_{T_1}^{T_2} c_v \cdot dT \equiv c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (10)$$

Oznaczając, jako  $c_p$  molową pojemność cieplną układu dla przemiany izobarycznej i korzystając z równania *Clapeyrona* oraz ogólnych zależności termodynamicznych dla gazu doskonałego, można zapisać  $\frac{c_p}{c_v} = \kappa \wedge c_p - c_v = R$ , skąd:

$$c_v = \frac{p \cdot v}{(\kappa - 1) \cdot T} \quad (11)$$

Wstawiając równanie (11) do równania (10), można otrzymać:

$$\int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (12)$$

Korzystając z równania *Clapeyrona* oraz wzoru *Poissona*<sup>7</sup> można zapisać:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} = \frac{p_2}{p_1} \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\kappa} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\kappa-1/\kappa} \quad (13)$$

Następnie wstawiając równanie (13) do równania (12), można otrzymać:

$$\int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp = \frac{p_1 \cdot v_1}{\kappa - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\kappa-1/\kappa}\right] + p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2 \quad (14)$$

<sup>7</sup>równanie adiabaty

Powtórnie korzystając z równania (13) można zależność (14) przekształcić do postaci:

$$\int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp = p_1 \cdot v_1 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\kappa-1/\kappa} \right] \quad (15)$$

Wstawiając równanie (15) do zależności (9) można otrzymać wzór na prędkość wypływu gazu przez kryżę o powierzchni otworu  $A_0$ , jako funkcję początkowego stanu gazu ( $p_1, v_1$ ) oraz stosunku ciśnień  $\beta = p_2/p_1$  – **rys.1**:

$$w_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\kappa-1/\kappa} \right]} \quad (16)$$

gdzie:  $\rho_1$  – początkowa gęstość molowa  $\rho_1 = 1/v_1$

Na podstawie prawa ciągłości strugi, można zapisać  $\dot{m} = A_0 \cdot w_0 \cdot \rho_0$ , zaś wartość  $\rho_2$  można wyznaczyć korzystając z równania *Clapeyrona* i zależności (13), stąd po przekształceniach można zapisać:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{p_2 \cdot T_2}{p_1 \cdot T_1} = \rho_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1-\kappa/\kappa} = \rho_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \quad (17)$$

Skąd, masowe natężenie przepływu gazu można obliczyć, jako:

$$\dot{m} = A_0 \cdot \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right]} \quad (18)$$

Równanie (18) nosi nazwę równania *Saint-Venanta-Wantzela*. Wprowadzając tzw. liczbę przepływu  $\Psi$ :

$$\Psi = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\kappa} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\kappa+1/\kappa} \right]} = f \left( \frac{p_2}{p_1}; \kappa \right) \quad (19)$$

można równanie (19) zapisać w formie [5]:

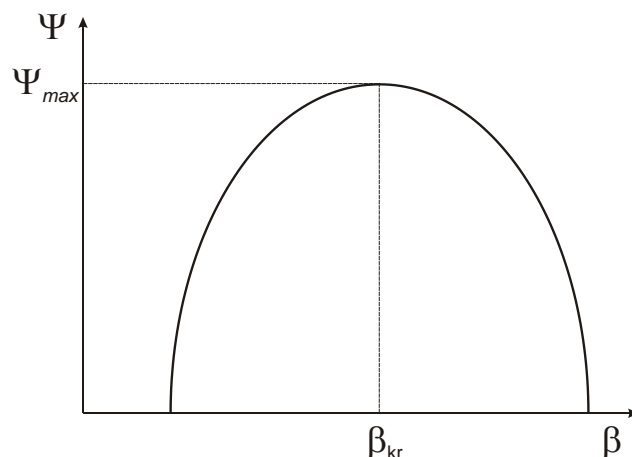
$$\dot{m} = A_0 \cdot \Psi \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \quad (20)$$

Odwzorowaniem graficznym funkcji  $\Psi$  vs  $\beta = p_2/p_1$  jest linia mająca maksimum dla pewnego  $\beta_{kr}$  zwanego krytycznym – **rys.3**. Wartość  $\beta_{kr}$  można znaleźć obliczając pochodną  $\partial\Psi/\partial\beta$  i przyrównując ją do zera, stąd:

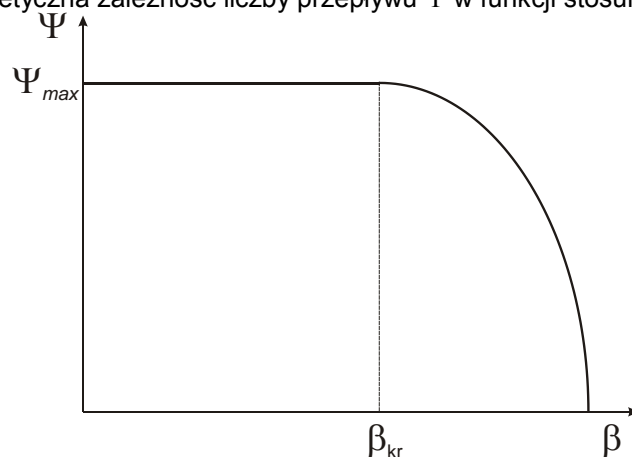
$$\beta_{kr} = \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\kappa/\kappa-1} \quad (21)$$

Wartość  $\Psi_{max}$  można znaleźć wstawiając wzór (21) do (19):

$$\Psi_{max} = \sqrt{\kappa \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa+1/\kappa-1}} \quad (22)$$



Rys.3. Teoretyczna zależność liczby przepływu  $\Psi$  w funkcji stosunku ciśnień  $\beta$



Rys.4. Praktyczna zależność liczby przepływu  $\Psi$  w funkcji stosunku ciśnień  $\beta$

## METODA

Praktyczna zależność liczby przepływu  $\Psi$  od stosunku ciśnień  $\beta = p_2/p_1$  będzie wyglądała trochę inaczej – rys.4. Wartości  $\kappa$ ,  $\beta_{kr}$ ,  $\Psi_{max}$  oraz średnie masy molowe  $\bar{M}$  dla typowych gazów wchodzących w skład czynników oddechowych zebrano w tab.1.

### Ciśnienie zasilania

Zgodnie z zależnością (21) przy dozowaniu tlenu do kompleksu DGKN-120, minimalne ciśnienie zasilania  $p_1 \equiv p_z(kr)$  dyszy powinno wynosić w przybliżeniu:

$$p_z(kr) = \frac{p_0}{\beta_{kr}} = \frac{1300 \text{ kPa}}{0,528} \cong 2,5 \text{ MPa} \quad (23)$$

gdzie:  $p_z$  – ciśnienie zasilania [Pa]

Ze względu na stosowanie pomiarów rotametrycznych strumienia objętościowego a nie masowego, zależność (20) wygodniej jest przekształcić do postaci:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_1} = \Psi \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{p_1 \cdot \rho_1}{\rho_1^2}} = \Psi \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{p_1}{\rho_1}} \quad (24)$$

gdzie:  $\dot{V}$  – strumień objętościowy dozowanego czynnika gazowego, odniesiony do warunków panujących podczas pomiarów przed dyszą [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $\rho_1$  – gęstość czynnika gazowego przed dyszą [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Tabela 1

Wartości wybranych parametrów dla typowych składników czynników oddechowych.

	$\kappa$	$\beta_{kr}$	$\Psi_{max}$	$\bar{M}$ [g · mol <sup>-1</sup> ]
powietrze	1,4	0,528	0,685	28,96
tlen	1,4	0,528	0,685	31,999
azot	1,4	0,528	0,685	28,01
hel	1,677	0,486	0,728	4,003
CO <sub>2</sub>	1,3	0,546	0,667	44,01

Korzystając z równania Clapeyrona  $\rho_1 = p_1 \cdot \frac{\bar{M}}{R \cdot T}$  można przekształcić zależność (24), do postaci:

$$\dot{V} = \Psi \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{\bar{M}}} = idem \quad \left| \quad \beta > \beta_{kr} \wedge T = idem \right. \quad (25)$$

Odnosząc strumień z równania (25) do warunków normalnych, można zapisać:

$$\dot{V}_0 = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \dot{V} \quad (26)$$

gdzie:  $\dot{V}$  – zmierzona wartość strumienia dozowanego gazu [ $dm^3 \cdot min^{-1}$ ]  
 $p$  – ciśnienie atmosferyczne panujące podczas pomiarów [Pa]

Nachylenie prostej będącej wykresem zależności  $\dot{V}_0 = f(p_z)$  równe jest różniczce strumienia po ciśnieniu zasilania, wyrażonego zależnościami (25)–(26):

$$\left( \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right)_{\beta > \beta_{kr}} = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\Psi_{max}}{p_0} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{\bar{M}}} \cdot A_0 \quad (27)$$

Stąd można obliczyć wymagane pole przekroju dyszy  $A_0$ :

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{p_0 \cdot T}{T_0 \cdot \Psi_{\max} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{M}}} \left( \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right)_{\beta > \beta_{kr}} \quad (28)$$

Temperatura, w której będą dokonywane pomiary została tutaj ustalona na  $t=20^\circ\text{C}$  – **tab.2**. Ustalenie temperatury daje możliwość szybkiego projektowania dysz systemu dozującego<sup>9</sup> przy wykorzystaniu zależności funkcyjnej (28) można dla tlenu zapisać:  $\frac{V_0}{p_z} \cong 86,11 \cdot D^2$ , gdzie:  $[D] = \text{mm}$  a  $\left[ \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right] = \text{dm}^3 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Tabela 2

Obliczenia funkcji  $\left( \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right)_{20^\circ\text{C}}$  dla przykładowych gazów czystych i mieszanin

$D[\text{mm}] \rightarrow$	$\left( \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right)_{20^\circ\text{C}} \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{MPa} \cdot \text{min}} \right]$						Równanie $\left( \frac{\partial \dot{V}_0}{\partial p_z} \right)_{20^\circ\text{C}}$
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	
powietrze	0,86	3,44	7,75	13,77	21,53	31,00	$86,11 \cdot D^2$
tlen	0,82	3,28	7,37	13,11	20,48	29,49	$81,92 \cdot D^2$

Tabela 3

Strumienie zużywanego tlenu i wentylacja płuc w zależności od wysiłku fizycznego [7]

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

<sup>8</sup>gdyż nie jest ona dokładnie znana a inna od tutaj założonej wprowadza niewielki błąd

<sup>9</sup>zależność (28) może stanowić podstawę do projektowania dysz dla układów redukcyjno – dozujących



**Założenia projektowe**

Dla stanu początkowego założono, że ciśnienie cząstkowe tlenu  $p$  jest znacznie mniejsze od wymaganego  $p^*$ . Stąd zmiana panującego w obiekcie hiperbarycznym ciśnienia całkowitego  $p_c$  powodowana korektą zawartości tlenu<sup>10</sup> będzie do zaniedbania:  $p_c \cong idem$ . Korekta ta będzie dokonana na tyle szybko, że temperatura  $T$  nie ulegnie praktycznie zmianie:  $T \cong idem$ . Oznaczając, jako  $V$  objętość tlenu w obiekcie hiperbarycznym można dla gazów doskonałych przyjąć, że ułamek objętościowy będzie równy, co do wartości molowemu<sup>11</sup>:

$$x \equiv \frac{V}{V_k} \equiv \frac{p}{p_c} \quad \Bigg| \quad R = const \quad (29)$$

gdzie:  $x$  – ułamek zawartości tlenu [ $mol \cdot mol^{-1}$ ;  $m^3 \cdot m^{-3}$ ]  
 $p_c$  – ciśnienie całkowite w obiekcie hiperbarycznym [ $kPa$ ]  
 $p$  – ciśnienie cząstkowe tlenu w obiekcie hiperbarycznym [ $kPa$ ]  
 $V_k$  – objętość obiektu hiperbarycznego [ $dm^3$ ]  
 $V$  – objętość tlenu odniesiona do  $p_c$  [ $dm^3$ ]

Wychodząc z równania *Clapeyrona* dla przemiany izotermicznej można zapisać:

$$V = \frac{p_0}{p_c} \cdot V_0 \quad \Bigg| \quad T = idem \wedge R = const \quad (30)$$

gdzie:  $p_0$  – ciśnienie normalne [ $101,325 kPa$ ]  
 $V_0$  – wyjściowa objętość tlenu w obiekcie hiperbarycznym odniesiona do ciśnienia normalnego [ $dm^3$ ]

Wyznaczając z zależności (29) objętość tlenu  $V$  i porównując stronami zależności (29)–(30) można zapisać:

$$V_0 = \frac{p}{p_0} \cdot V_k \quad (31)$$

Postępując podobnie, jak poprzednio można wyznaczyć analogiczną zależność dla stanu końcowego<sup>12</sup>:

$$V_0^* = \frac{p^*}{p_0} \cdot V_k \quad (32)$$

gdzie:  $V_0^*$  – wymagana objętość tlenu w obiekcie hiperbarycznym odniesiona do ciśnienia normalnego [ $dm^3$ ]  
 $p^*$  – wymagane ciśnienie cząstkowe tlenu [ $kPa$ ]

Różnica pomiędzy wymaganą (32) a zastaną (31) objętością tlenu musi być skompensowana poprzez zadozowanie strumienia tlenu  $\dot{V}_0$  przez okres czasu  $\tau$ . Czas ten można zapisać formułą:

<sup>10</sup> dodaniem brakującej ilości tlenu

<sup>11</sup> zależność ta została udowodniona i opisana wcześniej [4]

<sup>12</sup> wymaganego

$$\tau = \frac{p^* - p}{p_0} \cdot \frac{V_k}{\dot{V}_0} \quad (33)$$

gdzie:  $\dot{V}_0$  – strumień dozowanego tlenu odniesiony do ciśnienia normalnego [ $dm^3 \cdot min^{-1}$ ]

Na **rys.5** pokazano obliczenia, z których wynika, że największy wpływ na dokładność działań korygujących ma pomiar ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_i$  i ciśnienia całkowitego  $p$ . Wstępnie należy przyjąć, że optymalną średnicą dyszy dozującej będzie  $D \cong 1 \text{ mm}$ , gdyż konieczny czas zadziałania systemu daje się stosunkowo dokładnie zmierzyć i możliwość zapewnienia możliwości względnie szybkiej korekty ciśnienia cząstkowego tlenu dla tej średnicy dyszy.

#### Czas przerwy

Po dokonaniu korekty należy odczekać pewien czas, który nie pozwoli na błędnie zwiększenie zawartości tlenu w obiekcie hiperbarycznym<sup>13</sup>. Przyjmując zgodnie z sytuacją przedstawioną na **rys.5**, że korekta spowodowała dodanie  $V_0 = 10 \text{ dm}^3$  tlenu, to zależnie od liczby osób w kompleksie tlen ten zostanie zużyty w różnym czasie: zakładając 3 osoby konsumujące średnio  $1 \text{ dm}^3 \cdot min^{-1}$ , czas ten wyniesie ok.  $3 \text{ min}$ .

Można wstępnie przyjąć, że algorytm powinien blokować możliwość dokonania powtórnej korekty na 60–krotnie dłuższy okres niż czas otwarcia zaworu **7** na **rys.6**. Taka sytuacja ma miejsce przy utrzymywaniu stałego poziomu ciśnienia cząstkowego tlenu<sup>14</sup>. Jednak przy zmianach składu atmosfery<sup>15</sup> takie postępowanie nie dawałoby pożądaných skutków w krótkim czasie, dlatego takie korekty należy wykonać ręcznie lub przy wykorzystaniu innego systemu.

<sup>13</sup> czujnik ciśnienia cząstkowego/zawartości tlenu musi mieć czas „na odczucie” wykonanej korekty po homogenizacji składu atmosfery komory, jeśli program komputerowy dokonałby natychmiastowej analizy sytuacji po wykonaniu korekty mógłby błędnie nakazać dodanie następnej porcji tlenu

<sup>14</sup> np. dla plateau saturacji, gdzie najważniejszym ubytkiem tlenu z atmosfery kompleksu jest jego konsumpcja przez nurków

<sup>15</sup> niektóre systemy wymagają szybkiego podniesienia ciśnienia cząstkowego tlenu o  $10 \text{ kPa}$  przed rozpoczęciem procesu dekompresji

<p>D= 1 mm                  p<sub>z</sub>= 3 MPa  <math>\dot{V}_0 = 4,096 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math>                  p<sub>0</sub>= 100 kPa</p>	<p>p* = 38 kPa                  p = 37,9 kPa                  p<sub>c</sub> = 300 kPa                  V<sub>k</sub> = 10000 dm<sup>3</sup></p>	<p>δp* = 0,1 kPa                  δp = 0,1 kPa                  δp<sub>c</sub> = 0,1 kPa                  δV<sub>k</sub> = 100 dm<sup>3</sup>                  δ<math>\dot{V}_0 = 1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}</math></p>
---	---	---

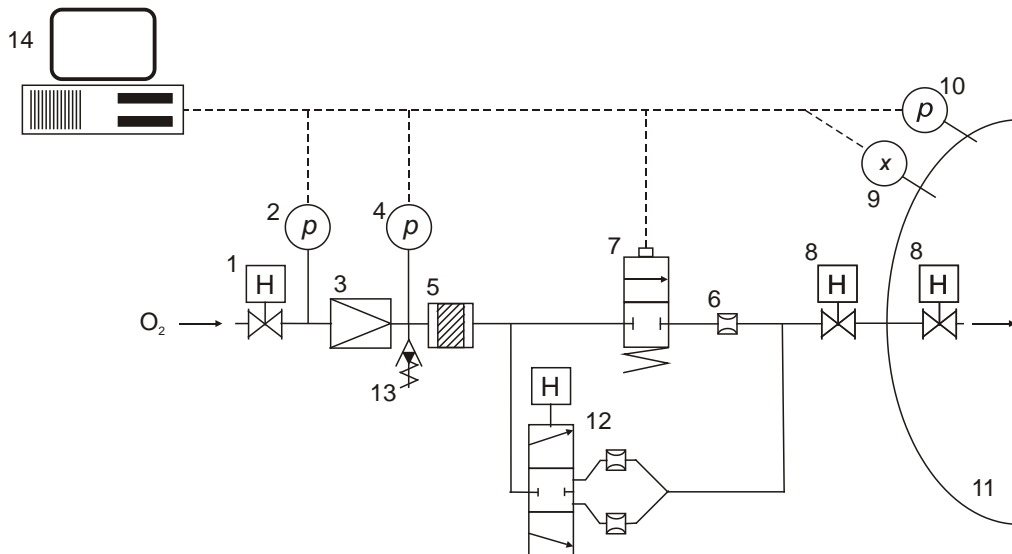
  

$\left  \frac{\partial \tau}{\partial p^*} \cdot \delta p^* \right  = \frac{V_k}{p_0 \cdot \dot{V}_0} \cdot \delta p^* \cong 2,44 \text{ s}$ $\left  \frac{\partial \tau}{\partial p} \cdot \delta p \right  = \frac{V_k}{p_0 \cdot \dot{V}_0} \cdot \delta p \cong 2,44 \text{ s}$ $\left  \frac{\partial \tau}{\partial V_k} \cdot \delta V_k \right  = \frac{p^* - p}{p_0 \cdot \dot{V}_0} \cong 0,02 \text{ s}$ $\left  \frac{\partial \tau}{\partial p_c} \cdot \delta p_c \right  = \frac{p^* - p}{p_0^2} \cdot \frac{V_k}{\dot{V}_0} \cong 0,00 \text{ s}$ $\left  \frac{\partial \tau}{\partial \dot{V}_0} \cdot \delta \dot{V}_0 \right  = \frac{p^* - p}{p_0} \cdot \frac{V_k}{\dot{V}_0^2} \cong 0,60 \text{ s}$	$x = \frac{V}{V_k} = \left\  T, R = idem ; V \cdot p_c = V_0 \cdot p_0 \Rightarrow V = \frac{p_0}{p_c} \cdot V_0 \right\  = \frac{p_0}{p_c} \cdot \frac{V_0}{V_k}$ $V_0 = x \cdot \frac{p_c}{p_0} \cdot V_k = \left\  x = \frac{p}{p_c} \right\  = \frac{p}{p_0} \cdot V_k \rightarrow V_0^* = \frac{p^*}{p_0} \cdot V_k$ $\left. \begin{aligned} \delta V_0 &= \frac{p^* - p}{p_0} \cdot V_k \\ \delta V_0 &= \dot{V}_0 \cdot \tau \end{aligned} \right\} \tau = \frac{p^* - p}{p_0} \cdot \frac{V_k}{\dot{V}_0}$
---	--

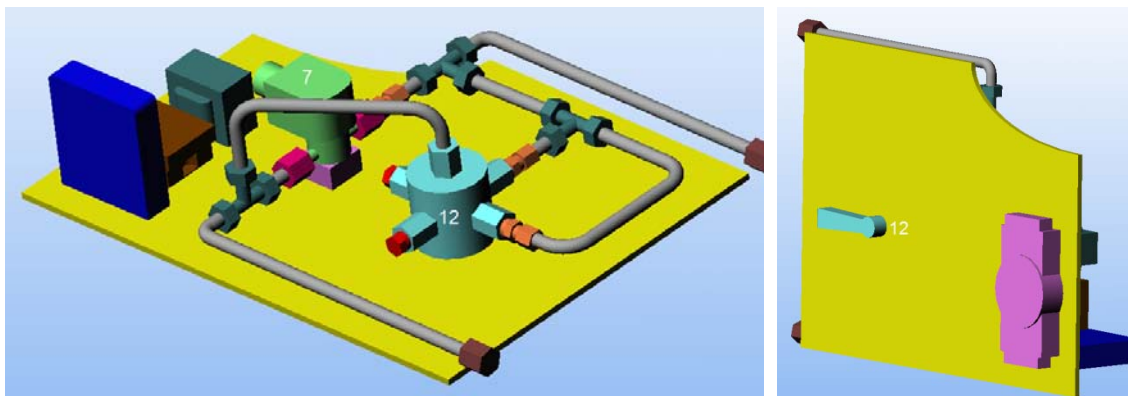
τ = 2,4 s
ΔV <sub>0</sub> = 10,0 dm <sup>3</sup>
ΔV = 3,3 dm <sup>3</sup>
Δp = 0,10 kPa

Rys.5. Dobór dyszy układu stała dozującego



Rys.6. Projekt systemu utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu w obiekcie hiperbarycznym

- |   |  |
|---|--|
| <p>1–zawór odcinający wysokociśnieniowy<br/>                 2–pomiar ciśnienia zasilania (1,5–3,5)MPa<br/>                 3–reduktor 20 MPa/3 MPa<br/>                 4–pomiar ciśnienia zredukowanego<br/>                 5–filtr średnociśnieniowy<br/>                 6–dysza ograniczająca przepływ tlenu<br/>                 7–zawór elektromagnetyczny Dn = 1,2mm</p> | <p>8–zawór odcinający średnociśnieniowy<br/>                 9–pomiar zawartości tlenu w obiekcie hiperbarycznym<br/>                 10–pomiar ciśnienia w obiekcie hiperbarycznym<br/>                 11–obiekt hiperbaryczny<br/>                 12–zespół dysz dozujących z przełącznikiem<br/>                 13–zawór bezpieczeństwa<br/>                 14–komputer wraz z przetwornikami elektronicznymi</p> |
|---|--|



Rys.7. Projekt wstępny architektoniczny systemu utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu wraz z częścią systemu elektrycznego sterowania (oznaczenia jak na rys.6)

#### Stale dozowanie

Nie jest możliwym, aby strumień konsumowanego tlenu<sup>16</sup> wynosił zero. Przyjmuje się, że graniczną obserwowaną wartością średnią tego strumienia jest  $\dot{v} = 0,35 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Można zatem zastosować dwie drogi uzupełniania tlenu w obiekcie hiperbarycznym celem zminimalizowania wahań jego ciśnienia cząstkowego. Jedną będzie stałe dozowanie tlenu. Bezpieczną granicą dla 3 osób znajdujących się w obiekcie hiperbarycznym byłaby wartość  $\dot{v} = 0,80 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Drugą będzie automatyczny proces korekcy ciśnienia cząstkowego tlenu realizowany na podstawie wyników jego pomiarów.

#### Projekt systemu

Projekt ideowy systemu do utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu przedstawiono na rys.6. Tlen ze zbiorników podawany jest przez ręcznie sterowany zawór odcinający 1 na reduktor ciśnienia 3. Po redukcji ciśnienia tlen przechodzi przez filtr 5<sup>17</sup> po czym strumień zostaje rozdzielony na linię stało-dozującą i linię korekty ciśnienia cząstkowego w obiekcie hiperbarycznym 11. Wyboru dyszy linii stałego dozowania 12 dokonuje się poprzez ręcznie sterowany zawór przełączający. Dozowanie na linii korekty uruchamiane jest poprzez otwarcie zaworu elektromagnetycznego 7 sterowanego przez system wykonawczy sterowany programem komputerowym<sup>18</sup> wykorzystującym formuły (35)–(37). Zgodnie z zasadami bezpieczeństwa zabudowy armatury kompleksu hiperbarycznego, system posiada odcięcie zaworami sterowanymi ręcznie 8.

Nad pracą systemu utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego w obiekcie hiperbarycznym czuwa system sterowany przez program komputerowy<sup>19</sup> 14 monitorujący ciśnienie zasilania 2, ciśnienie zredukowane 4, ciśnienie w obiekcie hiperbarycznym 10 oraz zawartość tlenu w atmosferze obiektu 9. Na ich podstawie odbywa się opracowywanie decyzji o czasie otwarcia zaworu dozującego tlen 7. Wstępny projekt architektoniczny części wykonawczej systemu utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu pokazano na rys.7.

Dotychczas ogólnozakładowe ciśnienie tlenu w linii średniociśnieniowej wynosiło (1,0–1,2)MPa a dopuszczalna wartość tego ciśnienia 2,0 MPa. Wartości te były poniżej ciśnienia krytycznego (23). Utrzymywanie dwóch różnych ciśnień zredukowa-

<sup>16</sup>przez ludzi znajdujących się w obiekcie hiperbarycznym

<sup>17</sup>linie i armatura średniociśnieniowa zabezpieczone są przez zawór bezpieczeństwa 13 a ciśnienie w linii monitorowane jest czujnikiem 4

<sup>18</sup>przepływ w linii korekty ograniczony jest przez dyszę dozującą 6

<sup>19</sup>wykorzystujący formuły (31)–(33)

nych na terenie komór hiperbarycznych, lub przeciąganie dodatkowej linii wysokiego ciśnienia tlenu wydaje się niewygodne. W związku z przebudową systemu inhalatorów tlenowych w kompleksie nurkowym DGKN-120 podniesiono ciśnienie zredukowane w ogólnozakładowej linii tlenowej do  $p \cong 2,7 \text{ MPa}$ , doposażając inhalatory we własne reduktory ciśnienia. Stąd system dozowania może pracować w zakresie przepływów nadkrytycznych dysz dozujących.

a)



b)



Rys.8.a)Symulator emisji  $\text{CO}_2$  azotu b)na stanowisku badawczym na komorze DZWONIEC kompleksu nurkowego DGKN-120

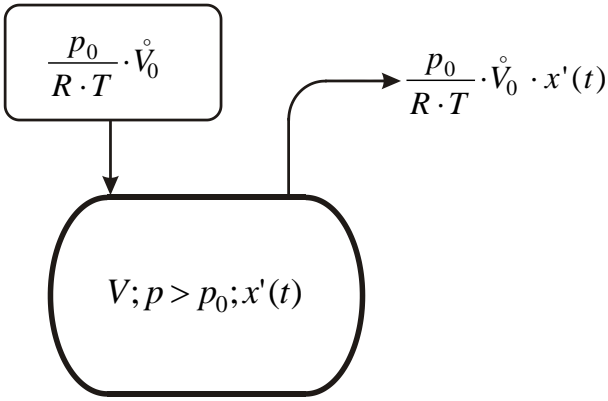
Tabela 4

Wyznaczenie wartości dozowania  $\dot{V}$  przez symulator emisji azotu

Data: 2009-01-24		Aparat/dozownik typu: symulator		nr aparatu/dozownika:						
		Dysza nr: I								
<b>Warunki pomiarów</b>										
Temperatura t= 20 °C		Ciśnienie atmosferyczne p= 98,4 kPa								
Czynnik oddechowy % $(CO_2)$ = 0		% $(O_2)$ = 0		% $(N_2)$ = 100						
<b>Dane statystyczne</b>										
ilość pomiarów n= 7		poziom istotności P= 0,05		współ. t-Studenta= 2,447						
ilość pomiarów n=		poziom istotności P=		współ. t-Studenta=						
niezaliczane	Głębokość	Ciśnienie zasilania	Ciśnienie zredukow.	Wskaźnik rotametri	Dozowanie	Objętość geometryczna dzwonu	Czas napełniania		Dozowanie	
	[mH <sub>2</sub> O]	[MPa]	[MPa]	[dm <sup>3</sup> /godz]	[dm <sup>3</sup> /min]	[dm <sup>3</sup> ]	[min]	[s]	[części s]	[dm <sup>3</sup> /min]
	0	10,2	1,08	222,0	3,578					
	10	10,2	1,08	222,0	3,578					
	20	10,1	1,08	221,0	3,562					
	30	10,1	1,08	222,0	3,578					
	40	10,1	1,08	220,0	3,546					
	50	10,1	1,08	215,0	3,465					
	60	10,1	1,08	210,0	3,385					
	70	10,1	1,08	192,0	3,095					
	80	10,1	1,08	172,0	2,772					
	90	10,1	1,08	115,0	1,854					
100	10,1	1,08	21,0	0,338						
0	10,1	1,08	222,0	3,578						
odchylenie standardowe				0,0414679						
wartość średnia dozowania				3,555						
błąd wartości średniej dozowania				0,038						

Tabela 5

Wyznaczenie modelu matematycznego przy prowadzeniu ciągłej emisji azotu do habitatu, jako rozwiązanie zwyczajnego równania różniczkowego rzędu pierwszego pochodzącego z bilansu molowego masy

		<p><math>p</math> - ciśnienie odpowiadające głębokości [Pa]</p> <p><math>p_0</math> - ciśnienie normalne [Pa]</p> <p><math>R</math> - uniwersalna stała gazowa [J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>]</p> <p><math>T</math> - temperatura [K]</p> <p><math>V</math> - efektywna objętość komory [dm<sup>3</sup>]</p> <p><math>x'</math> - ułamek molowy N<sub>2</sub> w komorze [mol·mol<sup>-1</sup>]</p> <p><math>t</math> - czas [min<sup>-1</sup>]</p> <p><math>\dot{V}_0</math> - strumień N<sub>2</sub> w odniesieniu do <math>p = p_0</math> [dm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>]</p>	
Z:	$\dot{V}_0 \neq f(H, t)$		
T:	$x \equiv x_{O_2} = f(t)$		
D:	1°	$\frac{p}{R \cdot T} \cdot V \cdot \frac{dx'}{dt} = \frac{p_0}{R \cdot T} \cdot (\dot{V}_0 - \dot{V}_0 \cdot x')$   $x_{N_2} \equiv x'$	z bilansu moli CO <sub>2</sub>
	2°	$\frac{dx'}{dt} = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{V}_0}{V} - \frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{V}_0}{V} \cdot x'$	dla: $\dot{V}_0 = idem$
	3°	$dx' = (a - a \cdot x') \cdot dt$   $a = \frac{p_0 \cdot \dot{V}_0}{p \cdot V}$	z 2°
	4°	$\frac{dx}{a \cdot x' - a} + dt = 0$	z 3° po podzieleniu stronami przez $a \cdot x' - a$
	5°	$\int \frac{dx}{a \cdot x' - a} + \int dt = const = c$	z 4° i definicji całki
	6°	$\frac{1}{a} \cdot \ln a \cdot x' - a  + t = c$ $\ln a \cdot x' - a  = a \cdot (c - t) = c' - a \cdot t$   $a \cdot c \equiv c'$	z 5° c'-nowa stała całkowania
	7°	$e^{(c' - a \cdot t)} \equiv c'' \cdot e^{-a \cdot t} = a \cdot x' - a$   $c'' \equiv e^{c'}$ $\forall_{t \rightarrow 0} x \rightarrow x_0 \Rightarrow c'' = a \cdot x'_0 - a$	z 6° oraz definicji logarytmu naturalnego c''-nowa stała całkowania
	8°	$(a \cdot x'_0 - a) \cdot e^{-a \cdot t} = a \cdot x' - a$ $x'(t) = 1 - (1 - x'_0) \cdot \exp\left(-\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{V}_0}{V} \cdot t\right)$	z 7°
	9°	$x(t) = x_0 \cdot \exp\left(-\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{V}_0}{V} \cdot t\right)$   $x \equiv 1 - x'$	z 2° i 8° <b>cmd.</b>
W:	$\lim_{t \rightarrow 0} x(t) = x_0 \wedge \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$		z 9°
gdzie: Z-założenie; T-teza; D-dowód; W-wniosek			

### Symulator

Badania skuteczności systemu utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu zrealizowano przy pomocy zaprojektowanego w tym celu symulatora do obniżenia zawartości tlenu w atmosferze komory hiperbarycznej odzwierciedlając proces obniżania zawartości tlenu podczas nurkowań saturowanych. Symulator taki, emitujący stały strumień azotu, zbudowano w oparciu o tę samą zasadę, co system dozowania tlenu<sup>20</sup> – **rys.8**. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczony strumień dozowanego przez symulator azotu  $\dot{V}_0$  można uznać za stały i równy  $\dot{V}_0 = (3,56 \pm 0,03) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cong 3,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  do głębokości  $H \leq 50 \text{ mH}_2\text{O}$  – **tab4**.

Model matematyczny dla procesu wentylacji przestrzeni komory hiperbarycznej powinien uwzględniać strumień azotu dostarczany do komory, strumień pobieranej próbki atmosfery do badań<sup>21</sup>, inne ubytki atmosfery<sup>22</sup>, oraz zmiany stanu atmosfery. Zakładając, że strumień traconej masy z atmosfery komory nie przewyższa wartości strumienia dozowanego azotu można wyprowadzenie modelu matematycznego oprzeć o ogólny bilans masy – **tab.5**. Korzystając z niego można wyprowadzić ogólną formułę wentylacyjną dla przypadku utrzymywania stałego ciśnienie  $p$  w komorze hiperbarycznej:

$$x(t) = x_0 \cdot \exp\left(-\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\dot{V}_0}{V} \cdot t\right) \quad \left| \quad \dot{V}_0 \neq f(H, t); T = \text{idem} \right. \quad (34)$$

gdzie:  $x(t)$  – ułamek molowy tlenu w chwili  $t$  [mol·mol<sup>-1</sup>]  
 $x_0$  – ułamek molowy tlenu w chwili  $t = 0$  [mol·mol<sup>-1</sup>]  
 $p$  – ciśnienie odpowiadające głębokości [Pa]  
 $p_0$  – ciśnienie normalne [Pa]  
 $t$  – czas [min]  
 $T$  – temperatura [K]  
 $\dot{V}_0$  – strumień azotu [dm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>]  
 $V$  – objętość efektywna komory hiperbarycznej [dm<sup>3</sup>]

Drugim skrajnym przypadkiem jest brak strat atmosfery komory – **rys.9**. Dla tego przypadku można zapisać bilans masy, jako:  $x(t) = \frac{n_{O_2} - p \cdot V \cdot x_0(O_2)}{n_0 + \Delta n} = \frac{n_{O_2} - p \cdot V \cdot x_0(O_2)}{n_0 + \Delta n} = \frac{n_{O_2} - p \cdot V \cdot x_0(O_2)}{n_0 + \Delta n} = \frac{n_{O_2} - p \cdot V \cdot x_0(O_2)}{n_0 + \Delta n}$ , stąd można zapisać:

$$\forall n_{O_2} = \frac{p \cdot V \cdot x_0(O_2)}{R \cdot T} \wedge n_c = \frac{p_0 \cdot \dot{V} \cdot t + p \cdot V}{R \cdot T} \quad x(t) = \frac{n_{O_2}}{n_c} = \frac{x_0(O_2)}{1 + \frac{p_0 \cdot \dot{V}}{p \cdot V} \cdot t} \quad \left| \quad \dot{V}_0 \neq f(H, t); T = \text{idem} \right. \quad (35)$$

Różnica procentowa  $\Delta_{36}$  pomiędzy modelem (34) i (35) wyznaczona, jako:

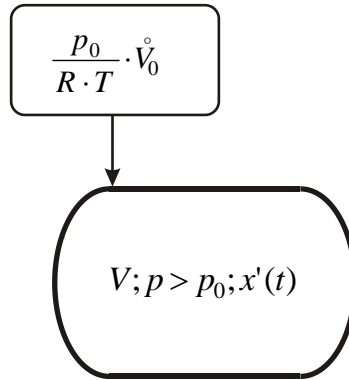
<sup>20</sup>w oparciu o układ reduktora ciśnienia i współpracującej z nim dyszy dozującej

<sup>21</sup>strumień pobieranej do badań próbki wynosił  $\dot{v} \cong 0,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  i był ok. siedmiokrotnie mniejszy od strumienia dozowanego azotu  $\dot{V}$

<sup>22</sup>przykładowo powodowane nieszczelnościami komory



$$\Delta_{\%} = \frac{\left| \frac{x_0}{1 + \frac{p_0 \cdot \dot{V}}{p \cdot V}} - x_0 \cdot \exp\left(-\frac{p_0 \cdot \dot{V}_0}{p \cdot V} \cdot t\right) \right|}{\min\left[ \frac{x_0}{1 + \frac{p_0 \cdot \dot{V}}{p \cdot V}} ; x_0 \cdot \exp\left(-\frac{p_0 \cdot \dot{V}_0}{p \cdot V} \cdot t\right) \right]} \cdot 100\% \quad (36)$$



Rys.9. Emisja azotu bez utrzymywania stałego ciśnienia  $p$  w komorze hiperbarycznej

gdzie:  $x(t)$  – ułamek molowy tlenu w chwili  $t$  [ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];  $x_0$  – ułamek molowy tlenu w chwili  $t = 0$  [ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];  $p$  – ciśnienie odpowiadające głębokości [ $\text{Pa}$ ];  $p_0$  – ciśnienie normalne [ $\text{Pa}$ ];  $t$  – czas [ $\text{min}$ ];  $\dot{V}_0$  – strumień azotu [ $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ];  $V$  – objętość efektywna komory hiperbarycznej [ $\text{dm}^3$ ]

$$\int x_0 \cdot e^{-\xi \cdot t} dt \rightarrow \frac{x_0 \cdot e^{-\xi \cdot t}}{\xi} \qquad \int_0^t x_0 \cdot e^{-\xi b \cdot t} dt \rightarrow \frac{x_0 \cdot (e^{-t \cdot \xi b} - 1)}{\xi b}$$

$$\int \frac{x_0}{1 + \xi t} dt \rightarrow \frac{x_0 \cdot \ln(\xi t + 1)}{\xi} \qquad \int_0^t \frac{x_0}{1 + \xi t} dt \rightarrow \begin{cases} \frac{x_0 \cdot \left( \ln\left(\frac{\xi t + 1}{\xi}\right) - \ln\left(\frac{1}{\xi}\right) + \pi \cdot i \right)}{\xi} & \text{if } \frac{1}{\xi} \leq 0 \leq t + \frac{1}{\xi} \wedge \xi \in \mathbb{R} \\ \frac{x_0 \cdot \left[ \ln\left(\frac{1}{\xi}\right) - \ln\left[\frac{1}{\xi} \cdot (\xi t + 1)\right] \right]}{\xi} & \text{if } 0 > t + \frac{1}{\xi} \vee \frac{1}{\xi} > 0 \end{cases}$$

maksymalny czas:  $t := 170 \text{min}$       ciśnienie atmosferyczne:  $p_0 := 100 \text{kPa}$

początkowa zawartość tlenu:  $x_0 := 0.21 \frac{\text{L}}{\text{L}}$       dozowanie azotu:  $v := 3.55 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

objętość komory:  $V := 9233 \text{L}$       ciśnienie komorowe:  $p := 300 \text{kPa}$

$$\xi := \frac{p_0 \cdot v}{p \cdot V} \quad \xi = 2.136 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} \qquad x_1 := \int_0^t \frac{x_0}{1 + \xi \cdot t} dt \qquad x_2 := \int_0^t x_0 \cdot e^{-\xi \cdot t} dt$$

$$x_1 = 2.119 \times 10^3 \text{s} \quad x_2 = 2.119 \times 10^3 \text{s} \quad \Delta x := x_1 - x_2 \quad \Delta x = 0.165 \text{s}$$

$$\Delta_{\%} := \frac{x_1 - x_2}{x_2} \quad \Delta_{\%} = 7.785 \times 10^{-5} \quad \Delta_{\%} = 7.785 \times 10^{-3} \%$$

Rys.10. Wyniki porównania modeli wentylacji komory hiperbarycznej<sup>23</sup>

<sup>23</sup>obliczenia wykonano w formacie MathCad

Tabela 6

Wyniki pomiaru różnicy pomiędzy zmianami ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2}$  w komorze a wartością nastawy  $p_{O_2} = 60,3 \text{ kPa}$  przy próbie automatycznego utrzymywania ciśnienia cząstkowego tlenu podczas stałego dozowania strumienia azotu  $\dot{V}_0 = (3,55 \pm 0,03) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  do komory

lp	objętość	średnia	wariancja	niepewność rozszerzona
	$[\text{m}^3]$	$[\text{m}^3]$	$[\text{m}^6]$	$[\text{m}^3]$
1	9,405	9,448	0,09354	0,13
2	9,862			
3	9,399			
4	9,124			

jest niewielka dla warunków planowanego procesu eksperymentalnego sprawdzenia skuteczności działania systemu utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu w komorze hiperbarycznej i wynosi  $\Delta_{q\%} < 0,008\%$  – **rys.10**. Stąd nieistotne, który z modeli (34) czy (35) będzie brany pod uwagę.

Można wnioskować, że tak długo jak dozowanie azotu  $\dot{V}$  będzie przewyższało sumaryczne ubytki<sup>24</sup>, to dowolny model (34) czy (35) będzie opisywał dostatecznie dokładnie wentylację komory hiperbarycznej<sup>25</sup> dla przyjętych warunków prowadzenia procesu do maksymalnego czasu  $t = 170 \text{ min}$ .

Wykonano wstępnie dwa pomiary spadku zawartości tlenu w komorze dekompresyjnej podczas emisji azotu bez obniżania ciśnienia, którego wzrost powodowany był dozowaniem azotu. Podczas eksperymentów wykonano przybliżenie modelu (35) funkcją liniową, które to przybliżenie wydaje się być wystarczająco dokładne, gdyż różnica procentowa  $\Delta_{q\%}$  pomiędzy modelem (35)<sup>26</sup> i przybliżeniem liniowym wyznaczona, jako:

$$\Delta_{q\%} = \frac{\left| \frac{x_0}{1 + \frac{p_0 \cdot \dot{V}}{p \cdot V} \cdot t} - x_0 \cdot -\alpha \cdot t \right|}{\min \left[ \frac{x_0}{1 + \frac{p_0 \cdot \dot{V}}{p \cdot V} \cdot t} ; x_0 \cdot -\alpha \cdot t \right]} \cdot 100\% \quad (37)$$

jest niewielka. Dla warunków planowanego procesu eksperymentalnego sprawdzenia skuteczności działania systemu utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego tlenu w komorze hiperbarycznej i wynosi  $\Delta_{q\%} < 0,002\%$  – **rys.11**. Stąd, korzystając z modelu (35) oraz modelu liniowego można zapisać, że

$V_k(\text{efektywna}) = \frac{p_0 \cdot \dot{V} \cdot x_t}{p \cdot \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{x_0 - x_t} = \frac{p_0 \cdot \dot{V} \cdot x_t}{p \cdot \alpha}$ . Na tej podstawie ustalono objętość efektywną komory hiperbarycznej  $V_k(\text{efektywna})$ , która jest mniejsza od jej objętości

<sup>24</sup>związane z poborem próbki atmosfery do analizy czy związane z nieszczelnościami

<sup>25</sup>przy utrzymywaniu temperatury na stałym poziomie  $T = \text{idem}$

<sup>26</sup>model (35) posiada wyższe wartości niż model (34)

geometrycznej<sup>27</sup> – **tab.6**. Po kilku dniach wykonano następny pomiar przesuwając sztucznie punkt zerowy analizatora tlenu tak, aby umieszczone na jednym wykresie wyniki pomiarów nie zachodziły na siebie<sup>28</sup>. Jak widać z **rys.12** można przyjąć, że uzyskana zgodność dla wybranych dwóch pomiarów jest zadawalająca.

$$\int x_0 - \alpha \cdot t \, dt \rightarrow -\frac{(x_0 - \alpha \cdot t)^2}{2 \cdot \alpha} \qquad \int_0^t x_0 - \alpha \cdot t \, dt \rightarrow t \cdot x_0 - \frac{\alpha \cdot t^2}{2}$$

$$\int \frac{x_0}{1 + \xi \cdot t} \, dt \rightarrow \frac{x_0 \cdot \ln(\xi \cdot t + 1)}{\xi} \qquad \int_0^t \frac{x_0}{1 + \xi \cdot t} \, dt \rightarrow \begin{cases} \frac{x_0 \cdot \left( \ln\left(\frac{\xi \cdot t + 1}{\xi}\right) - \ln\left(\frac{1}{\xi}\right) + \pi \cdot i \right)}{\xi} & \text{if } \frac{1}{\xi} \leq 0 \leq t + \frac{1}{\xi} \wedge \xi \in \mathbb{R} \\ \frac{x_0 \cdot \left[ \ln\left(\frac{1}{\xi}\right) - \ln\left[\frac{1}{\xi} \cdot (\xi \cdot t + 1)\right] \right]}{\xi} & \text{if } 0 > t + \frac{1}{\xi} \vee \frac{1}{\xi} > 0 \end{cases}$$

maksymalny czas:  $t := 170 \text{ min}$       ciśnienie atmosferyczne:  $p_0 := 100 \text{ kPa}$

początkowa zawartość tlenu:  $x_0 := 0.21 \frac{\text{L}}{\text{L}}$       dozowanie azotu:  $v := 3.55 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

objętość komory:  $V := 9233 \text{ L}$       ciśnienie komorowe:  $p := 300 \text{ kPa}$

$$\alpha := 0.0000265 \frac{1}{\text{min}} \quad \xi := \frac{p_0 \cdot v}{p \cdot V} \quad \xi = 2.136 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} \qquad x_2 := \int_0^t \frac{x_0}{1 + \xi \cdot t} \, dt \qquad x_1 := \int_0^t x_0 - \alpha \cdot t \, dt$$

$$x_1 = 2.119 \times 10^3 \text{ s} \quad x_2 = 2.119 \times 10^3 \text{ s} \quad \Delta x := x_1 - x_2 \quad \Delta x = 0.026 \text{ s}$$

$$\Delta_{\%} := \frac{x_1 - x_2}{x_2} \quad \Delta_{\%} = 1.214 \times 10^{-5} \quad \Delta_{\%} = 1.214 \times 10^{-3} \%$$

Rys.11. Wyniki porównania modeli wentylacji komory hiperbarycznej z przybliżeniem liniowym<sup>29</sup>

Dla ustalonej w ten sposób objętości efektywnej komory hiperbarycznej  $V_k(\text{efektywna})$

adjustowano wyniki sześciu pomiarów różnicy pomiędzy wynikami spadku zawartości tlenu w komorze dekompresyjnej<sup>30</sup> a przybliżeniem tych wyników linią prostą – **tab.7**.

Maksymalna średnia różnica  $\Delta$  dla tak otrzymanych wyników wynosi  $\Delta = (0,0648 \pm \pm 0,0001)\%_{\text{obj. } O_2}$ , co jest wartością leżącą poniżej deklarowanej przez producenta niepewności pomiarów zawartości tlenu dla zastosowanego paramagnetycznego czujnika zawartości tlenu firmy Servomex, typ PM1111E000, o zakresie  $(0 - 100)\%_{\text{obj. } O_2}$  i maksymalnej deklarowanej dokładności  $\pm 0,1\%_{\text{obj. } O_2}$ .

<sup>27</sup> różnica ta spowodowana jest, między innymi, wypełnieniem komory jej wyposażeniem, niedokładnościami przybliżenia geometrycznego itp.

<sup>28</sup> do adjustacji modelu (39) wykorzystano wartość objętości efektywnej komory hiperbarycznej otrzymaną

z czterech eksperymentów  $V_k(\text{efektywna}) \cong (9,45 \pm 0,13) \text{ m}^3$  – **tab.6**

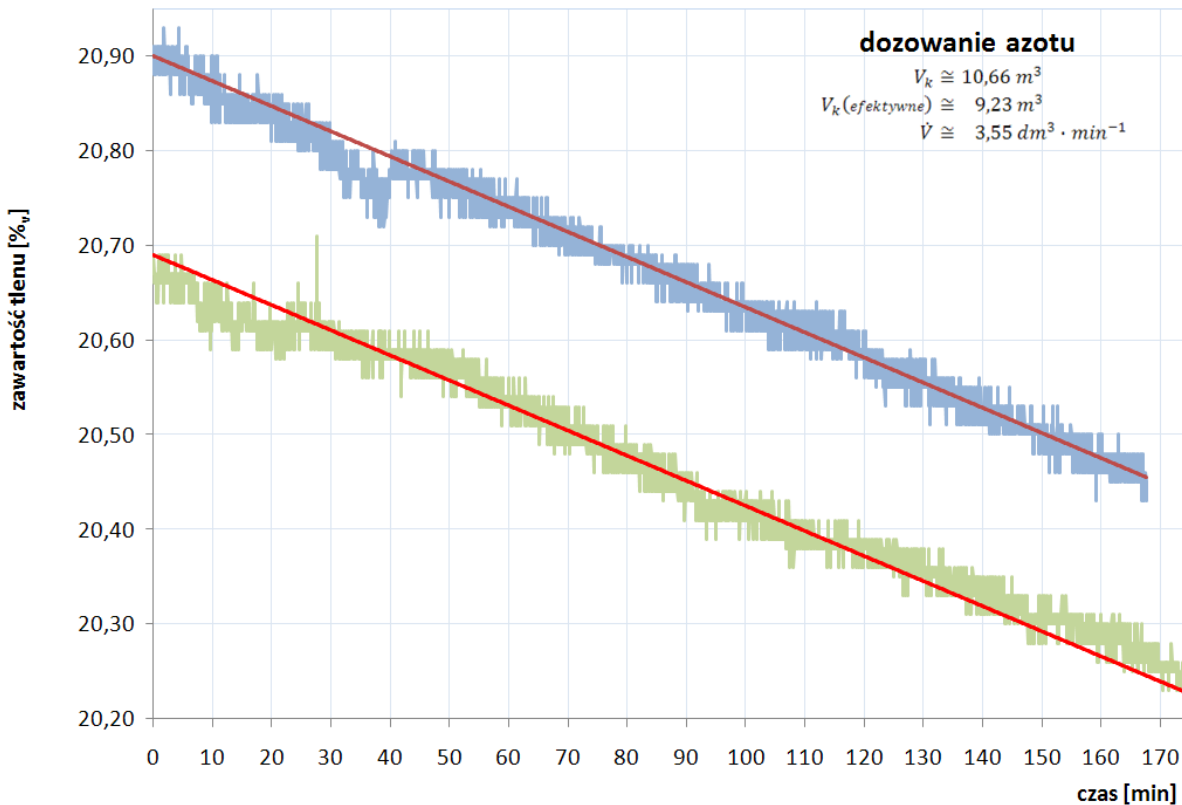
<sup>29</sup> obliczenia wykonano w formacie MathCad

<sup>30</sup> podczas emisji azotu bez obniżania ciśnienia

### Utrzymanie ciśnienia cząstkowego tlenu

Zbudowany system sprawdzono wykonując pomiary zawartości tlenu i ciśnienia. Na tej podstawie wnioskowano o skuteczności utrzymywania ciśnienia cząstkowego tlenu w komorze przy stałej emisji azotu przez wcześniej opisany symulator. Przykładowy wykres wyników pomiarów takiego eksperymentu pokazano na **rys.13**.

Do pomiarów ciśnienia całkowitego zastosowano Czujnik ciśnienia firmy Omega typ PX4200-150GI, o deklarowanej niepewności pomiarów w całym zakresie pomiarowym na poziomie  $[(0-1,02) \pm 0,0025] \text{ MPa}$ . Dla warunków przeprowadzonego eksperymentu można oszacować błąd systematyczny pomiarów, jako:



Rys.12.Wyniki pomiaru zawartości tlenu podczas stałej emisji azotu

$$\Delta p_i = \pm \left( \left| \frac{\partial p_i}{\partial p} \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{\partial p_i}{\partial x} \right| \cdot \Delta x \right) = 0,35 \text{ kPa} \quad (38)$$

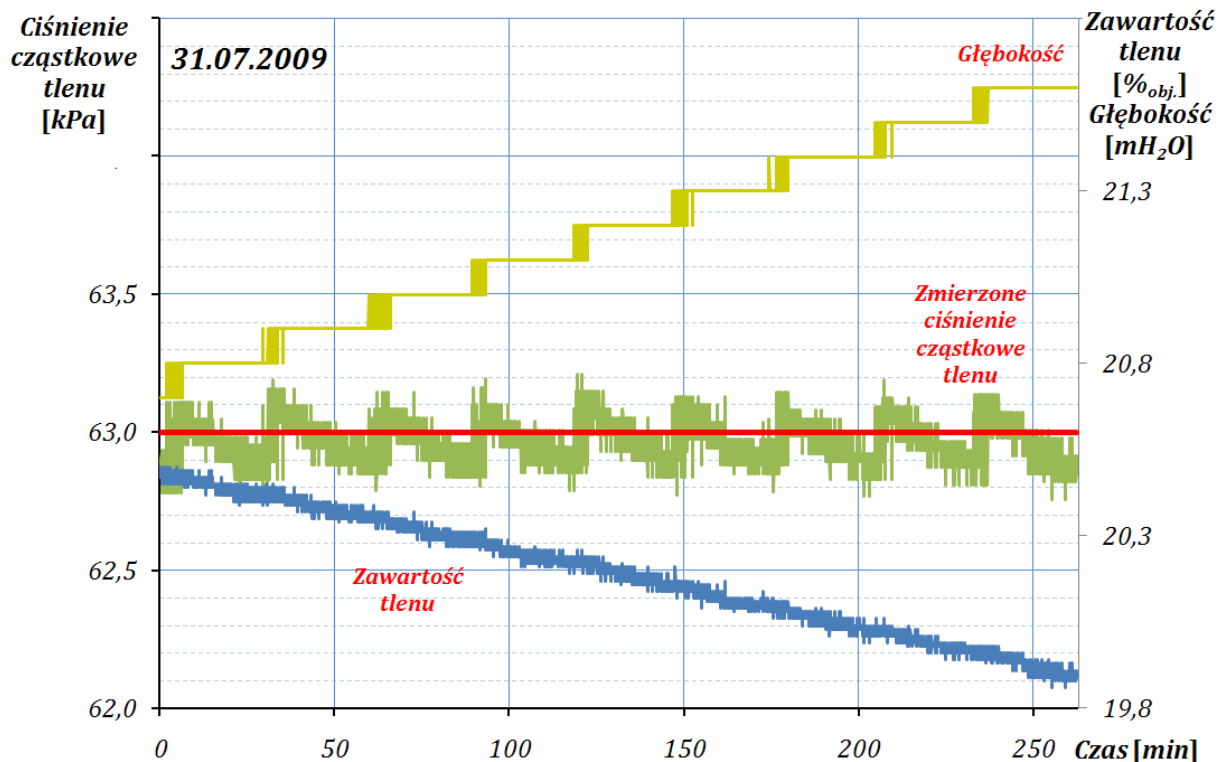
$$\left| \frac{\partial p_i}{\partial p} \right| \cdot \Delta p = x \cdot \Delta p \cong 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,25 \text{ kPa} \cong 0,05 \text{ kPa}$$

$$\left| \frac{\partial p_i}{\partial x} \right| \cdot \Delta x = \Delta x \cdot p \cong 0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot 300 \text{ kPa} \cong 0,3 \text{ kPa}$$

Tabela 7

Różnice pomiędzy pomiarami spadku zawartości tlenu w komorze dekompresyjnej podczas emisji azotu<sup>31</sup> a przybliżeniem tego procesu modelem liniowym

lp	Liczba pomiarów	średnia	wariancja	Niepewność rozszerzona
		[% <sub>obj.</sub> ]	[% <sub>obj.</sub> <sup>2</sup> ]	[% <sub>obj.</sub> ]
1	5034	0,0122	0,000110	$3,05 \cdot 10^{-6}$
2	5251	0,0146	0,000126	$3,41 \cdot 10^{-6}$
3	2041	0,0649	0,002642	$1,15 \cdot 10^{-4}$
4	3601	0,0359	0,001127	$3,68 \cdot 10^{-5}$
5	2052	0,0636	0,001262	$5,46 \cdot 10^{-5}$
6	1954	0,0356	0,000271	$1,20 \cdot 10^{-5}$
<b>Wartości maksymalne</b>		<b>0,0649</b>	<b>0,002642</b>	<b><math>1,15 \cdot 10^{-4}</math></b>



Rys.13. Przykładowy przebieg zmian zawartości tlenu  $x$ , ciśnienia całkowitego  $p$  i ciśnienia cząstkowego tlenu  $p_{O_2}$  przy próbie automatycznego utrzymywania ciśnienia cząstkowego

<sup>31</sup>bez obniżania ciśnienia

tłenu  $p_{O_2}$  podczas stałego dozowania strumienia azotu  $\dot{V}_0 = (3.55 \pm 0.03) \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  do komory

## DYSKUSJA

Zakład Technologii Prac Podwodnych posiada tradycje w projektowaniu i wdrażaniu systemów zachowania życia, w skład których wchodziły także automatyczne lub półautomatyczne urządzenia do utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu. Jeszcze w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego 35.07, w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, wdrożono taki system działający na podstawie opróżniania butli tlenowych napełnianych dożądanego ciśnienia zależnego od ciśnienia panującego w komorze hiperbarycznej. Zasada ta pozwalała dodawać zawsze taką samą ilość porcjowanego tlenu do komory niezależnie od ciśnienia w niej panującego.

Badania skuteczności wykonanego prototypu systemu do utrzymywania zawartości tlenu z dyszowym dozowaniem tlenu, przy wykorzystaniu symulatora prowadzono kilkakrotnie uzyskując podobne wyniki do zamieszczonych na **rys.13**. Prawdopodobnie system ten będzie skuteczny przy prowadzeniu nurkowań długotrwałych.

Prosta konstrukcja systemu utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu powinna zapewnić jego niezawodne działanie – **rys.14 i rys. 15**. Wynika to także z doświadczeń zebranych wcześniej przy użytkowaniu aparatów nurkowych wykorzystujących podobny system dozowania [4].

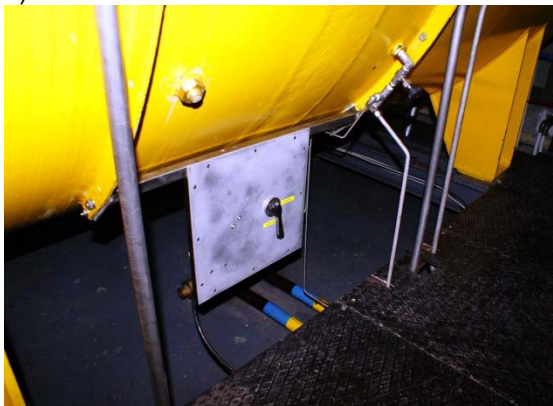
Wadą takiego systemu jest to, że nie może on działać bez wspomaganie komputrowego a jego precyzja zależy od dokładności zastosowanego systemu analitycznego<sup>32</sup>.

Na rynku pojawiły się ostatnio, tanie systemy elektroniczne odmierzające wagowo zadane ilości tlenu. Jak na razie do stosunkowo małych ciśnień wstecznych<sup>33</sup>, lecz należy zastanowić się w przyszłości nad tą drogą rozwoju systemów utrzymywania ciśnienia cząstkowego tlenu w kompleksach hiperbarycznych. System taki potrzebuje nadal danych z niezawodnego i precyzyjnego procesu analitycznego, lecz posiada już własny układ precyzyjnego odmierzania zadanej ilości dodawanego tlenu.

a)



b)



Rys.14. System do utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego w komorze DZWONIEC Doświadczalnego Głębokowodnego Kompleksu Nurkowego DGKN-120:

<sup>32</sup>porównując wartość oszacowanego błędu systematycznego dla ciśnienia cząstkowego tlenu według zależności (38) z wartościami praktycznie utrzymywanego ciśnienia cząstkowego tlenu można zauważyć, że leżą one na granicy dokładności pomiarów zastosowanych urządzeń

<sup>33</sup>0,6 MPa

a) widok z tyłu elementu wykonawczego dozownika dyszowego tlenu, b) widok z przodu elementu wykonawczego dozownika dyszowego tlenu



Rys.15. System do utrzymywania stałego ciśnienia cząstkowego w komorze DZWONIEC Doświadczalnego Głębokowodnego Kompleksu Nurkowego DGKN-120:

a) system komputerowy do sterowania procesem utrzymania ciśnienia cząstkowego tlenu oraz system monitoringu parametrów fizykochemicznych atmosfery komory DZWONIEC, b) czujnik pomiaru ciśnienia zredukowanego tlenu na linii zasilania c) czujnik ciśnienia zasilającego tlenu, d) rampa tlenowa

## REKOMENDACJE

Na podstawie przeprowadzonych badań prototypu systemu do utrzymywania zawartości tlenu z dyszowym dozowaniem tlenu może być dopuszczony do eksperymentów z udziałem ludzi, które ostatecznie powinny potwierdzić jego skuteczność i użyteczność.

## PIŚMIENICTWO

1. Goliński J.A., Troskalański A.T.: Strumienice: WNT Warszawa 1979
2. Gumiński K.: Termodynamika: PWN Warszawa 1974

3. Halupczok J.: Poddźwiękowe strumienice gazowe: Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej Wrocław 1975
4. Kłos R.: Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego: KOOPgraf Poznań 2000
5. Mittleman J.: Computer modeling of underwater breathing systems: †z:† pr.zbiorowej pod red. C.E.G.Lundgren i D.E.Warkander.: Physiological and human engineering aspects of underwater breathing apparatus: Undersea and Hyperbaric Medical Society Bethesda 1989 (UHMS Publication No 76 UNDBR 10/1/89).
6. Pigoń K., Ruziewicz Z.: Chemia fizyczna: PWN 1980
7. Przyłipiak M., Torbus J.: Sprzęt i prace nurkowe-poradnik: WMON Warszawa 1981

Autorzy:

**mgr inż. Arnold Dziambor**

Jest pracownikiem Zakładu Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Zajmuje się projektowaniem, integracją oraz tworzeniem oprogramowania dla systemów pomiarowych stosowanych w ZTPP. Jego obszar zainteresowań obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z pomiarami w obszarze techniki hiperbarycznej. W szczególności dotyczy to m.in. automatyzacji procesów pomiarowych, obróbki danych pomiarowych w czasie rzeczywistym oraz optymalizacją struktur sieci pomiarowych.

**kmdr rez. dr hab. inż. Ryszard Kłos 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.