

Anna Majchrzycka

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Techniki Ciepłej
70-310 Szczecin, Piastów 19
tel.(48)91 449 43 76,
e-mail. Anna.Majchrzycka@zut.edu.pl

**WŁAŚCIWOŚCI TERMODYNAMICZNE SKŁADNIKÓW
MIESZANIN ODDECHOWYCH**

W pracy przedstawiono równania regresji, opisujące właściwości termodynamiczne składników czynników oddechowych: gazów obojętnych, zanieczyszczeń metabolicznych (dیتlenek węgla, przegrzana para wodna) oraz dodatku gazowego - sześciofluorku siarki, poprawiającego właściwości użytkowe mieszaniny oddechowej.

Słowa kluczowe: *właściwości termodynamiczne mieszanin oddechowych.*

**THERODYNAMIC PROPERTIES OF BREATHING MIXTURES
COMPONENTS**

The paper reports regression functions describing thermal properties of gas components of breathing mixtures, metabolic gaseous contaminants (carbon dioxide, superheated water vapour) and gaseous additive sulphur hexafluoride improving properties of breathing mixture.

Keywords: *thermodynamic properties of gases.*

WSTĘP

W zaawansowanej technice nurkowej stosuje się różne mieszaniny oddechowe, których wybór podyktowany jest wieloma czynnikami, które szczegółowo przedstawione są w pracach [2,4,5,9]. Mieszaniny oddechowe stosowane podczas nurkowania saturowanego składają się z tlenu, gazów obojętnych oraz dodatków gazowych, poprawiających ich właściwości użytkowe, ponadto w mieszaninie oddechowej może znajdować się również pewna dopuszczalna ilość zanieczyszczeń gazowych.

Gazami obojętnymi, stosowanymi w standardowych mieszaninach oddechowych są hel i azot, natomiast w mieszaninach niestandardowych może być stosowany wodór, neon lub mieszanina neonu i helu (Ne-75), uzyskiwana w procesie destylacji powietrza [2,9]. Do gazów obojętnych, które są stosowane w technice nurkowej należy zaliczyć również argon, który stosowany jest jako gaz dekompresyjny [2], obniżający ciśnienie cząstkowe azotu i helu podczas dekompresji w mieszaninach TRIMIX lub jako gaz izolacyjny w skafandrach nurkowych.

Zanieczyszczenia gazowe to przede wszystkim: ditlenek węgla, przegrzana para wodna oraz niewielkie ilości innych gazów (tlenek węgla, węglowodory, czterochlorek węgla i inne) [2,4,5,9], które mogą być produktami przemian metabolicznych lub pochodzić z innych źródeł, np. z materiałów wyposażeniowych obiektu hiperbarycznego. Zagadnienia te szczegółowo przedstawione są w pracach [4,5]. Ponadto do mieszanin gazowych możliwe jest wprowadzenie dodatków gazowych [2] (freony, czterofluorek węgla, sześćfluorek siarki), których zadaniem jest poprawa właściwości użytkowych mieszanin oddechowych. Zastosowanie tych dodatków przyczynia się do zmniejszenia zniekształcenia głosu i poprawy komunikacji z nurkiem, a także poprawy ochrony przeciwpożarowej.

Przy wykonywaniu obliczeń, związanych z projektowaniem systemów podtrzymywania życia w obiektach hiperbarycznych, systemów przygotowania, magazynowania lub regeneracji mieszanin oddechowych niezbędną jest znajomość właściwości termodynamicznych mieszanin oddechowych, które zależą od ich składu jakościowego oraz ilościowego, a także od ciśnienia i temperatury.

Zagadnienia obliczania składu jakościowego właściwości mieszanin oddechowych przedstawione są, między innymi w pracach [6, 7, 8, 10].

WŁAŚCIWOŚCI TERMODYNAMICZNE SKŁADNIKÓW MIESZANIN ODDECHOWYCH

Obliczanie właściwości termodynamicznych mieszanin oddechowych wymaga znajomości właściwości termodynamicznych ich składników w zależności od temperatury i ciśnienia. Dane doświadczalne, dotyczące właściwości termodynamicznych czystych gazów zwykle w literaturze podawane są w formie tabelaryzowanej [1,3,11].

Dla usprawnienia obliczania właściwości termodynamicznych mieszanin gazowych najdogodniej jednak byłoby się posługiwać funkcjami, opisującymi zmienność tych właściwości wraz z temperaturą i ciśnieniem.

W tym celu, podjęto próbę opracowania równań regresji opisujących zależność rzeczywistego ciepła właściwego, entalpii właściwej, objętości właściwej, dynamicznego współczynnika lepkości oraz współczynnika przewodzenia ciepła składników mieszanin oddechowych, zanieczyszczeń metabolicznych oraz dodatku SF₆ od ciśnienia i temperatury.

INTRODUCTION

In advanced diving, different breathing mixtures are used, the choice of which is determined by many factors presented in detail in [2,4,5,9]. Breathing mixtures used in saturation diving consist of oxygen, inert gases and gas additives that improve their performance; in addition, in the breathing mixture there may also be a certain allowed amount of gaseous contaminants.

The inert gases used in standard breathing mixtures are helium and nitrogen, while in custom mixtures, hydrogen, neon or a mixture of neon and helium (Ne -75), obtained by the distillation of air [2,9] can be used. Another inert gas which is used in diving and should also be mentioned here is argon, used as a decompression gas [2], lowering the partial pressure of nitrogen and helium during decompression in Trimix mixtures or as insulating gas in diving suits.

Gaseous contaminants are mainly: carbon dioxide, superheated water vapour and small amounts of other gases (carbon monoxide, hydrocarbons, carbon tetrachloride, and others) [2,4,5,9], which may be products of metabolism or come from other sources, such as the equipment of a hyperbaric facility. These issues are presented in detail in [4,5]. In addition, gas additives [2] (chlorofluorocarbons, carbon tetrafluoride, sulfur hexafluoride) can be added to gas mixtures; their task is to improve the performance of breathing mixtures. The use of these additives helps to reduce voice distortion and improve communication with the diver, as well as fire protection.

When performing calculations related to the design of life support systems in hyperbaric facilities, preparation systems, storage systems or regeneration of breathing mixtures, it is necessary to know the thermodynamic properties of breathing mixtures, which depend on their composition and quality, as well as pressure and temperature.

The issues connected with calculating properties of breathing mixtures are presented in [6, 7, 8, 10].

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF BREATHING MIXTURE COMPONENTS

Calculating thermodynamic properties of breathing mixtures requires knowledge of thermodynamic properties of their ingredients, depending on the temperature and pressure. Experimental data concerning the thermodynamic properties of pure gases is usually presented in tables in specialist literature [1,3,11]. In order to facilitate the calculation of thermodynamic properties of breathing mixtures, it would be most convenient to use functions that describe the variability of these properties along with temperature and pressure.

For this purpose, an attempt was made to develop regression equations describing the dependence of actual specific heat, specific enthalpy, specific volume, dynamic viscosity coefficient and thermal conductance coefficient of the components of breathing mixtures, metabolic gaseous contaminants, and SF₆ additive on pressure and temperature.

To develop regression equations, experimental data published in [1,3,11] for the following gases: oxygen, helium, nitrogen, hydrogen, neon, argon, carbon dioxide, superheated water vapour and sulfur hexafluoride [3] was used.

The functions describing the dependence of thermodynamic properties of gaseous mixture components on temperature and pressure was developed according to the method of nonlinear estimation used in Statistica.

Do opracowania równań regresji wykorzystano dane doświadczalne, opublikowane w literaturze [1,3,11] dla następujących gazów: tlenu, helu, azotu, wodoru, neonu, argonu, ditlenku węgla, przegrzanej pary wodnej oraz sześćfluorku siarki [3].

Funkcje opisujące zależności właściwości termodynamicznych składników mieszanin gazowych od temperatury i ciśnienia, opracowano posługując się metodą estymacji nieliniowej programu Statistica.

O wyborze funkcji opisującej właściwości termodynamiczne składników gazowych mieszanin oddechowych decydowała wartość współczynnika korelacji (R) oraz postać funkcji regresji.

Zależności właściwości fizycznych czystych gazów od ciśnienia i temperatury od ciśnienia i temperatury aproksymowano równaniami regresji, które wraz z zakresami stosowania, przedstawiono w tabelach 1÷5.

Tabela 1.

Zestawienie równań regresji, opisujących rzeczywiste ciepło właściwe gazowych składników mieszanin oddechowych.

Gaz	Rzeczywiste ciepło właściwe, c_p , [kJ/kgK]	R	Zakres
O ₂	$c_p = 0,8858 + \exp(-2,3169 + 0,1881 \cdot p - 0,0027 \cdot T)$ (1)	0,976	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280÷330) K
He	$c_p = 1,5642 \cdot p^{6,77 \cdot 10^{-5}} + 3,6654 \cdot T^{-0,0017} + 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot T$ (2)	0,900	p=(0,1÷5,0)MPa T=(273÷323) K
N ₂	$c_p = 1,1090 + 0,01537 \cdot p - 2,275 \cdot 10^{-4} \cdot T$ (3)	0,982	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280÷330)K
H ₂	$c_p = 0,0211 \cdot p + 10,1924 \cdot T^{0,0609}$ (4)	0,979	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280÷350) K
Ar	$c_p = 0,2287 + 0,0099 \cdot p^{1,1036} + 0,9475 \cdot T^{-0,2054}$ (5)	0,985	p=(0,1÷5,0)MPa T=280÷330 K
Ne	$c_p = 1,0302 + 0,0273 \cdot p$ (6)	0,920	p=(0,1÷2,0)MPa T=273,15 K
CO ₂	$c_p = 0,8134 + \exp(-2,2738 + 13,9124 \cdot p^{0,1056} - 2,4787 \cdot T^{0,3059})$ (7)	0,920	p=0,1÷6,0)MPa, T=(273÷330)K
H ₂ O _(pp)	$c_p = 1,6244 + 0,0009 \cdot T$ (8)	0,981	p=0,1 MPa, T=(280÷330) K
SF ₆	$c_p = 0,2296 + 0,00146 \cdot T$ (9)	0,999	p=0,1MPa, T=(273÷400) K

The choice of function describing the thermodynamic properties of breathing mixtures was determined by the value of the correlation coefficient (R) and the form of regression function.

The dependencies of the physical properties of pure gases on pressure and temperature were approximated using regression equations, which, together with their ranges of application, are presented in Tables 1-5.

Table 1.

Summary of regression equations describing actual specific heat of gaseous components of breathing mixtures.

Gas	Actual specific heat, c_p , [kJ/kgK]	R	Range
O ₂	$c_p = 0.8858 + \exp(-2.3169 + 0.1881 \cdot p - 0.0027 \cdot T)$ (1)	0.976	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
He	$c_p = 1.5642 \cdot p^{6.77 \cdot 10^{-5}} + 3.6654 \cdot T^{-0.0017} + 4.4 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot T$ (2)	0.900	p=(0.1÷5.0)MPa T=(273÷323) K
N ₂	$c_p = 1.1090 + 0.01537 \cdot p - 2.275 \cdot 10^{-4} \cdot T$ (3)	0.982	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330)K
H ₂	$c_p = 0.0211 \cdot p + 10.1924 \cdot T^{0.0609}$ (4)	0.979	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷350) K
Ar	$c_p = 0.2287 + 0.0099 \cdot p^{1.1036} + 0.9475 \cdot T^{-0.2054}$ (5)	0.985	p=(0.1÷5.0)MPa T=280÷330 K
Ne	$c_p = 1.0302 + 0.0273 \cdot p$ (6)	0.920	p=(0.1÷2.0)MPa T=273.15 K
CO ₂	$c_p = 0.8134 + \exp(-2.2738 + 13.9124 \cdot p^{0.1056} - 2.4787 \cdot T^{0.3059})$ (7)	0.920	p=0.1÷6.0)MPa T=(273÷330)K
H ₂ O _(pp)	$c_p = 1.6244 + 0.0009 \cdot T$ (8)	0.981	p=0.1 MPa T=(280÷330) K
SF ₆	$c_p = 0.2296 + 0.00146 \cdot T$ (9)	0.999	p=0.1MPa T=(273÷400) K

Tabela 2.

Zestawienie równań regresji, opisujących entalpię właściwą gazowych składników mieszanin oddechowych.

Gaz	Entalpia właściwa, i_i , [kJ/kg]	R	Zakres
O ₂	$i = 0,7239 + 0,9069 \cdot T - 7,887 \cdot p + 0,0185 \cdot p \cdot T$ (10)	0,9881	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 330)$ K
He	$i = -1418,467 + 5,19300 \cdot T + 3,36408 \cdot p - 0,00035 \cdot p \cdot T$ (11)	1,000	$p=(0,1 \div 6,0)$ MPa $T=(273 \div 330)$ K
N ₂	$i = -0,5794 + 1,0397 \cdot T - 6,6560 \cdot p + 0,01523 \cdot p \cdot T$ (12)	0,999	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 330)$ K
H ₂	$i = -79,80515 + 14,46987 \cdot T - 2,7074 \cdot p + 0,023005 \cdot p \cdot T$ (13)	1,000	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 350)$ K
Ar	$i = -8,3850 + 0,5470 \cdot T - 1,0382 \cdot p^{1,359}$ (14)	0,963	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 330)$ K
Ne	$i = 64,3747 + 1,0302 \cdot T - 0,6321 \cdot p + 0,0029516 \cdot p \cdot T$ (15)	1,000	$p=(0,1 \div 6,0)$ MPa $T=(280 \div 300)$ K
CO ₂	$i = 196,6905 + 0,01840 \cdot T - 542,262 \cdot p + 27,5634 \cdot T^{0,5254} \cdot p^{0,9640}$ (16)	0,859	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(273 \div 330)$ K
H ₂ O(pp)	$i = 2501,0 + 1,8800 \cdot T$ (17)	1,000	$p = 0,1$ MPa $T=(280 \div 330)$ K

Tabela 3.

Zestawienie równań regresji, opisujących objętość właściwą składników mieszanin oddechowych.

Gaz	Objętość właściwa, v , [m ³ /kg]	R	Zakres
O ₂	$v = 0,0776p^{-1,0086} + 5,1000 \cdot 10^{-6} \cdot T$ (18)	0,999	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 330)$ K
He	$v = 0,6259 \cdot p^{-0,9980} + 0,2167 \cdot T^{-4,8881}$ (19)	0,997	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(273 \div 323)$ K
N ₂	$v = 0,0162 + \exp(-9,3552 \cdot p^{0,1384} + 2,6189 \cdot T^{0,1636})$ (20)	0,998	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=280 \div 330$ K
H ₂	$v = 1,0936 \cdot p^{-1,0661} + 1,31890 \cdot 10^{-18} \cdot T^{6,8847}$ (21)	0,999	$p=(1,0 \div 5,0)$ MPa $T=(280 \div 350)$ K
Ar	$v = 0,5603 + 0,0056 \cdot p^{-1,9801} + 2,6664 \cdot T^{-0,3048} - 6,6510 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot T$ (22)	0,987	$p=(0,1 \div 5,0)$ Ma $T=(280 \div 330)$ K
Ne	$v = 0,11917 \cdot p^{-1,0008} + 3,1999 \cdot T^{-5,4500}$ (23)	0,999	$p=(0,1 \div 6,0)$ MPa $T=(280 \div 300)$ K
CO ₂	$v = 0,01635 + \exp(-3,8580 \cdot p^{0,7028} + 2,59T \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,4167})$ (24)	0,983	$p=(0,1 \div 5,0)$ MPa $T=(273 \div 330)$ K
H ₂ O(pp)	$v = -220,2435 + 554,9883 \cdot p + 0,6268 \cdot T + 67,5921 \cdot (p \cdot T)^{-0,7676}$ (25)	0,998	$p=(0,002 \div 0,01)$ Pa $T=(280 \div 330)$ K
SF ₆	$v = -10,2535 \cdot p^{0,0067} + 10,4642 \cdot T^{-0,0035} + 7,65 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot T$ (26)	0,989	$p=(0,1 \div 5,0)$ Ma $T=273 \div 323$ K

Table 2.

Summary of regression equations describing specific enthalpy of gaseous components of breathing mixtures.

Gas	Specific enthalpy, i_i , [kJ/kg]	R	Range
O ₂	$i = 0.7239 + 0.9069 \cdot T - 7.887 \cdot p + 0.0185 \cdot p \cdot T$ (10)	0.9881	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
He	$i = -1418.467 + 5.19300 \cdot T + 3.36408 \cdot p - 0.00035 \cdot p \cdot T$ (11)	1.000	p=(0.1÷6.0)MPa T=(273÷330) K
N ₂	$i = -0.5794 + 1.0397 \cdot T - 6.6560 \cdot p + 0.01523 \cdot p \cdot T$ (12)	0.999	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
H ₂	$i = -79.80515 + 14.46987 \cdot T - 2.7074 \cdot p + 0.023005 \cdot p \cdot T$ (13)	1.000	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷350) K
Ar	$i = -8.3850 + 0.5470 \cdot T - 1.0382 \cdot p^{1.359}$ (14)	0.963	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
Ne	$i = 64.3747 + 1.0302 \cdot T - 0.6321 \cdot p + 0.0029516 \cdot p \cdot T$ (15)	1.000	p=(0.1÷6.0)MPa T=(280÷300) K
CO ₂	$i = 196.6905 + 0.01840 \cdot T - 542.262 \cdot p + 27.5634 \cdot T^{0.5254} \cdot p^{0.9640}$ (16)	0.859	p=(0.1÷5.0)MPa T=(273÷330) K
H ₂ O _(pp)	$i = 2501.0 + 1.8800 \cdot T$ (17)	1.000	p = 0.1 MPa T=(280÷330) K

Table 3.

Summary of regression equations describing specific volume of gaseous components of breathing mixtures.

Gas	Specific volume, v , [m ³ /kg]	R	Range
O ₂	$v = 0.0776p^{-1.0086} + 5.1000 \cdot 10^{-6} \cdot T$ (18)	0.999	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
He	$v = 0.6259 \cdot p^{-0.9980} + 0.2167 \cdot T^{-4.8881}$ (19)	0.997	p=(0.1÷5.0)MPa T=(273÷323) K
N ₂	$v = 0.0162 + \exp(-9.3552 \cdot p^{0.1384} + 2.6189 \cdot T^{0.1636})$ (20)	0.998	p=(0.1÷5.0)MPa T=280÷330 K
H ₂	$v = 1.0936 \cdot p^{-1.0661} + 1.31890 \cdot 10^{-18} \cdot T^{6.8847}$ (21)	0.999	p=(1.0 ÷5.0)MPa T=(280÷350)K
Ar	$v = 0.5603 + 0.0056 \cdot p^{-1.9801} + 2.6664 \cdot T^{-0.3048} - 6.6510 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot T$ (22)	0.987	p=(0.1÷5.0)Ma T=(280÷330) K
Ne	$v = 0.11917 \cdot p^{-1.0008} + 3.1999 \cdot T^{-5.4500}$ (23)	0.999	p=(0.1÷6.0)MPa T=(280 ÷300) K
CO ₂	$v = 0.01635 + \exp(-3.858 \cdot p^{0.7028} + 2.59T \cdot 10^{-5} \cdot T^{1.4167})$ (24)	0.983	p=(0.1÷5.0)MPa T=(273 ÷330) K
H ₂ O _(pp)	$v = -220.2435 + 554.9883 \cdot p + 0.6268 \cdot T + 67.5921 \cdot (p \cdot T)^{-0.7676}$ (25)	0.998	p=(0.002÷0.01)Pa T=(280÷330) K
SF ₆	$v = -10.2535 \cdot p^{0.0067} + 10.4642 \cdot T^{-0.0035} + 7.65 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot T$ (26)	0.989	p=(0.1÷5.0)Ma T=273÷323 K

Tabela 4.

Zestawienie równań regresji, opisujących dynamiczny współczynnik lepkości składników mieszanin oddechowych.

Gaz	Dynamiczny współczynnik lepkości, η , [kg/ms]	R	Zakres
O ₂	$\eta = (0,7142 \cdot p^{1,5075} + 28,4129 \cdot T^{0,4441} - 149,2896) \cdot 10^{-7}$ (27)	0,999	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280÷330) K
He	$\eta = [1,8503 \cdot p^{0,0009} + 0,0086 \cdot (T - 273)^{0,8693}] \cdot 10^{-5}$ (28)	0,999	p=(0,1÷5,0)MPa T=(273÷473) K
N ₂	$\eta = -6,19 \cdot 10^{-4} p^{-0,0034} + 3,24 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,1586}$ (29)	0,982	p = (0,1÷5)MPa T=(280÷330) K
H ₂	$\eta = (18,6525 \cdot p^{1,2864} + 2,1332 \cdot T^{0,9674} + 355,8386) \cdot 10^{-8}$ (30)	0,995	p =(1÷5,0) MPa T=(280÷350) K
Ar	$\eta = -8,27 \cdot 10^{-5} p^{-0,0029} + 4,28 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,1586}$ (31)	0,949	p = (0,1÷5,0)MPa T=(280÷330) K
Ne	$\eta = 0,1940 - 0,1941 \cdot p^{9,1421 \cdot 10^{-7}} + 1,87 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,2593}$ (32)	0,986	p =(0,1÷20,0)MPa T=298÷348 K
CO ₂	$\eta = (655,0900 - 628,4465 \cdot p^{-0,0070} + 0,3145 \cdot T^{1,0466}) \cdot 10^{-7}$ (33)	0,986	p =(0,1÷5,0)MPa, T=(273÷333)K
H ₂ O _(pp)	$\eta = (-27,4637 + 0,3954 \cdot T) \cdot 10^{-7}$ (34)	0,999	p =0,1MPa, T=(280÷330) K
SF ₆	$\eta = (-151,4917 + 22,3125 \cdot T^{0,4587}) \cdot 10^{-7}$ (35)	0,999	p = 0,1MPa T=(273,15÷400)K

Table 4.

Summary of regression equations describing dynamic viscosity coefficient of gaseous components of breathing mixtures.

Gas	Dynamic viscosity coefficient, η , [kg/ms]	R	Range
O ₂	$\eta = (0.7142 \cdot p^{1.5075} + 28.4129 \cdot T^{0.4441} - 149.2896) \cdot 10^{-7}$ (27)	0.999	p=(0.1÷5.0) MPa T=(280÷330) K
He	$\eta = [1.8503 \cdot p^{0.0009} + 0.0086 \cdot (T - 273)^{0.8693}] \cdot 10^{-5}$ (28)	0.999	p=(0.1÷5.0) MPa T=(273÷473) K
N ₂	$\eta = -6.19 \cdot 10^{-4} p^{-0.0034} + 3.24 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0.1586}$ (29)	0.982	p = (0.1÷5)MPa T=(280÷330) K
H ₂	$\eta = (18.6525 \cdot p^{1.2864} + 2.1332 \cdot T^{0.9674} + 355.8386) \cdot 10^{-8}$ (30)	0.995	p =(1÷5.0) MPa T=(280÷350) K
Ar	$\eta = -8.27 \cdot 10^{-5} p^{-0.0029} + 4.28 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0.1586}$ (31)	0.949	p = (0.1÷5.0)M Pa T=(280÷330) K
Ne	$\eta = 0.1940 - 0.1941 \cdot p^{9.1421 \cdot 10^{-7}} + 1.87 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0.2593}$ (32)	0.986	p =(0.1÷20.0) MPa T=298÷348 K
CO ₂	$\eta = (655.0900 - 628.4465 \cdot p^{-0.0070} + 0.3145 \cdot T^{1.0466}) \cdot 10^{-7}$ (33)	0.986	p =(0.1÷5.0)M Pa T=(273÷333)K
H ₂ O(pp)	$\eta = (-27.4637 + 0.3954 \cdot T) \cdot 10^{-7}$ (34)	0.999	p =0.1MPa T=(280÷330) K
SF ₆	$\eta = (-151.4917 + 22.3125 \cdot T^{0.4587}) \cdot 10^{-7}$ (35)	0.999	p = 0.1MPa T=(273.15÷400)K

Tabela 5.

Zestawienie równań, opisujących współczynnik przewodzenia ciepła składników mieszanin oddechowych.

Gaz	Współczynnik przewodzenia ciepła, λ , [W/mK]		Zakres
O ₂	$\lambda = (0,4282 \cdot p^{1,0758} + 51,8641 \cdot T^{0,1609} - 103,3646) \cdot 10^{-3}$ (36)	0,997	p=(0,1÷6,0) MPa T=(280÷350) K
He	$\lambda = 4,273 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1,0491} + 6,2322 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,5593}$ (37)	0,999	p=(0,1÷5,0) MPa T=(270÷350) K
N ₂	$\lambda = 0,0062 + 4,5020 \cdot 10^{-4} \cdot p + 6,5300 \cdot 10^{-5} \cdot T$ (38)	0,997	p= (0,1÷5,0) MPa T=(280÷320) K
H ₂	$\lambda = (1,9023 \cdot p^{0,6655} + 268,9389 \cdot T^{0,1810} - 573,2475) \cdot 10^{-3}$ (39)	0,999	p=(0,1÷5,0) MPa T=(280÷350) K
Ar	$\lambda = -0,1106 - 3,569 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1,0342} + 0,0695 \cdot T^{0,1073}$ (40)	0,998	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280÷330) K
Ne	$\lambda = 2,647 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1,002} + 0,0014 \cdot T^{0,6263}$ (41)	0,999	p=(0,1÷20,0) MPa T=(298÷348) K
CO ₂	$\lambda = (0,6890p^{1,3455} + 0,0395 \cdot T^{1,0604}) \cdot 10^{-3}$ (42)	0,992	p=(0,1÷5,0)MPa T=(280 ÷ 330) K
H ₂ O _(pp)	$\lambda = (-0,2557 + 0,0651 \cdot T) \cdot 10^{-3}$ (43)	0,998	p=0,1MPa T=(273÷323)K
SF ₆	$\lambda = 0,06501 - 1,3746 \cdot T^{-0,5740}$ (44)	0,999	p=0,1MPa T=(273÷400) K

PODSUMOWANIE

Do sporządzania standardowych i niestandardowych mieszanin oddechowych, stosowany jest tlen i różne gazy obojętne. Oprócz tego możliwe jest zastosowanie niewielkiej ilości dodatków poprawiających właściwości użytkowe mieszanin oddechowych. W atmosferze oddechowej obiektu hiperbarycznego zwykle znajduje się jeszcze pewna, ściśle określona, nieprzekraczająca dopuszczalnych wartości, zawartość zanieczyszczeń pochodzenia metabolicznego. Zawartość poszczególnych składników gazowych ma wpływ na właściwości termodynamiczne mieszanin oddechowych, co z kolei wpływa na warunki wymiany ciepła i masy w środowisku hiperbarycznym. Na podstawie danych doświadczalnych, opublikowanych w literaturze, opracowano równania regresji, umożliwiające obliczanie właściwości termodynamicznych gazowych składników mieszanin oddechowych w zależności od ciśnienia i temperatury. Opracowano równania regresji opisujące zależność: objętości właściwej, rzeczywistego ciepła właściwego, dynamicznego współczynnika lepkości, współczynnika przewodzenia ciepła oraz entalpii właściwej od ciśnienia i temperatury dla następujących składników mieszanin oddechowych: O₂, N₂, H₂, He, Ne, Ar, zanieczyszczeń metabolicznych: CO₂, H₂O oraz dodatku gazowego SF₆.

Table 5.

Summary of regression equations describing thermal conductance coefficient of gaseous components of breathing mixtures.

Gaz	Thermal conductance coefficient, λ , [W/mK]	R	Range
O ₂	$\lambda = (0.4282 \cdot p^{1.0758} + 51.8641 \cdot T^{0.1609} - 103.3646) \cdot 10^{-3}$ (36)	0.997	p=(0.1÷6.0) MPa T=(280÷350) K
He	$\lambda = 4.273 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1.0491} + 6.2322 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.5593}$ (37)	0.999	p=(0.1÷5.0) MPa T=(270÷350) K
N ₂	$\lambda = 0.0062 + 4.5020 \cdot 10^{-4} \cdot p + 6.5300 \cdot 10^{-5} \cdot T$ (38)	0.997	p= (0.1÷5.0) MPa T=(280÷320) K
H ₂	$\lambda = (1.9023 \cdot p^{0.6655} + 268.9389 \cdot T^{0.1810} - 573.2475) \cdot 10^{-3}$ (39)	0.999	p=(0.1÷5.0) MPa T=(280÷350) K
Ar	$\lambda = -0.1106 - 3.569 \cdot 10^{-4} \cdot p^{1.0342} + 0.0695 \cdot T^{0.1073}$ (40)	0.998	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280÷330) K
Ne	$\lambda = 2.647 \cdot 10^{-4} p^{1.002} + 0.0014 \cdot T^{0.6263}$ (41)	0.999	p=(0.1÷20.0)MPa T=(298÷348) K
CO ₂	$\lambda = (0.6890p^{1.3455} + 0.0395 \cdot T^{1.0604}) \cdot 10^{-3}$ (42)	0.992	p=(0.1÷5.0)MPa T=(280 ÷ 330) K
H ₂ O _(pp)	$\lambda = (-0.2557 + 0.0651 \cdot T) \cdot 10^{-3}$ (43)	0.998	p=0.1MPa T=(273÷323)K
SF ₆	$\lambda = 0.06501 - 1.3746 \cdot T^{-0.5740}$ (44)	0.999	p=0.1MPa T=(273÷400) K

SUMMARY

Oxygen and various inert gases are used to prepare standard and custom breathing mixtures. In addition, it is possible to apply a small amount of additives to improve the properties of gas mixtures. In the atmosphere of a respiratory hyperbaric facility, there usually still is certain, strictly defined and not exceeding the limit, amount of metabolic gaseous contaminants. The amount of individual gaseous components has some influence on the thermodynamic properties of breathing mixtures, which in turn affects the conditions of heat and mass transfer in a hyperbaric environment. The regression equation was developed on the basis of experimental data, published in specialist literature, enabling the calculation of thermodynamic properties of gaseous components of breathing mixtures depending on pressure and temperature. Regression equations were developed, describing the dependence of specific volume, actual specific heat, dynamic viscosity coefficient, thermal conductance coefficient and specific enthalpy on pressure and temperature for the following components of breathing mixtures: O₂, N₂, H₂, He, Ne, Ar, metabolic contaminants: CO₂, H₂O and gaseous additive SF₆. The regression equations obtained are characterized by high correlation coefficients, indicating that the regression function, describing the thermodynamic properties of gases, is well-fit.

The usefulness of regression equations obtained are not limited to their use in calculating the physical properties of breathing mixtures, as, for example, argon is also used as an insulating gas in diving suits.

Uzyskane równania regresji charakteryzują się dużymi współczynnikami korelacji, co świadczy o dobrym dopasowaniu funkcji regresji, opisujących właściwości termodynamiczne gazów.

Przydatność uzyskanych równań regresji nie ogranicza się jedynie do stosowania ich przy obliczaniu właściwości fizycznych mieszanin oddechowych, gdyż np. argon stosowany jest również jako gaz izolacyjny w skafandrach nurkowych. Ponadto, opracowane równania regresji mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie wymagane jest obliczanie właściwości termodynamicznych czystych gazów lub mieszanin gazów w tych zakresach ciśnienia i temperatury, dla których je opracowano. Opracowane równania regresji umożliwiają usprawnienie obliczanie właściwości termodynamicznych mieszanin oddechowych lub innych mieszanin gazowych.

Moreover, the developed regression equations can be used wherever required to calculate the thermodynamic properties of pure gases or gas mixtures in the pressure and temperature ranges for which they were developed. The regression equations developed here allow the calculation of thermodynamic properties to improve breathing mixtures or other gas mixtures.

LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

1. Bretsznajder S.; „Własności cieczy i gazów”, wyd. PWN, 1965.
2. Hamilton R.W. Jr.; „Breathing mixtures”, Technical Memorandum CRL-T-750, Ocean Systems and Development Laboratory, Tarrytown, New York, December, 1973.
3. „Handbook of compressed gases”, ed. Chapman & Hall, New New York, London, 3 rd edition, 1990, ISBN 0-412-99211-6.
4. Kłós R.; „Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego”, ISBN 83-909187-2-2, wyd. KOOPgraf S.C, Poznań 2000.
5. Kłós R.; „Nurkowanie z wykorzystaniem nitroksu””, ISBN.-83-909187-1-4, wyd. KOOPgraf S.C., Poznań 2000.
6. Majchrzycka A.; Mieszanki neonowe w nurkowaniu saturowanym: cz.1 mieszanki tlenowo-neonowe NEOX, w: „Polish Hyperbaric Research”, 2005, nr 1 , s. 41-52, ISSN1734-7009.
7. Majchrzycka A.; „Mieszanki neonowe w nurkowaniu saturowanym: cz.2 mieszanki tlen-neon-75. Neox-75, w: „Polish Hyperbaric Research”, 2006, nr 2, s. 7-18, ISSN1734-7009.
8. Majchrzycka A.; „Własności cieplno-fizyczne mieszanin helowo-tlenowych”, w: Polish Hyperbaric Research, 2008, nr 3, s. 11-18, ISSN1734-7009.
9. Shilling C.W., Werts M.F., Schandelmeier N.R.; „The Underwater Handbook. A Guide to Physiology and Performance for the Engineer”, ISBN 0-306-30843-6, , ed..Plenum Press, New York, London, 1976.
10. Sobański R.; „Termodynamika mieszanin oddechowych”, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 213 , Szczecin 1982.
11. Varhaftik N.B.; Spravočnik po teplofizičeskim svoistvam gazov i židkостей”, Nauka, Moskwa 1972.

Autor:

dr inż. Anna Majchrzycka - adiunkt w Katedrze Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego (dawna Politechnika Szczecińska), specjalność: technika cieplna, termodynamika, działalność naukowo-badawcza: zagadnienia związane z termodynamiką środowiska hiperbarycznego oraz komfortu cieplnego w obiektach hiperbarycznych.