

A. Majchrzycka

MIESZANINY NEONOWE W NURKOWANIU SATUROWANYM

Cz.II MIESZANINY TLEN-NEON-75. NEOX-75¹

Praca dotyczy mieszanin tlenowo-neonowo-helowych, NEOX-75. W pracy obliczono własności fizyczne mieszanin NEOX-75, opracowano równania regresji, opisujące własności fizyczne mieszanin w funkcji ciśnienia, temperatury oraz molowego udziału neonu. Równania regresji wykorzystano do rozwiązania równania komfortu cieplnego, w efekcie czego obliczono temperaturę komfortu cieplnego wewnątrz obiektu hiperbarycznego.

W pracy przedstawiono również wykresy i-t, sporządzone w układzie entalpia właściwa mieszaniny NEOX-75 – temperatura bezwzględna mieszaniny oraz wykresy i-X, sporządzone w układzie entalpia właściwa mieszaniny – stopień zawilżenia mieszaniny. Przetworzone wykresy mają istotne znaczenie przy analizie warunków mikroklimatu w środowisku hiperbarycznym.

Słowa kluczowe

Mieszaniny neonowe, własności termodynamiczne mieszanin oddechowych, bilans cieplny, komfort cieplny.

NEON (Ne) MIXTURE FOR SATURATION DIVING PART II. OXYGEN-NEON-75. NEOX-75

The paper discusses physical properties of oxygen-neon-helium gas mixtures, thermal comfort and humidity charts for NEOX-75. Regression functions describing physical properties of NEOX-75 were developed and used to determine the range of environmental temperatures necessary to maintain thermal comfort in NEOX-75 during simulated saturation dives up to the depth of 190m. Humidity charts for NEOX-75 have been developed and presented as well.

Key words

Neon mixtures, thermal properties of the breathing gas mixtures, human thermal balance, thermal comfort.

¹ Artykuł stanowi kontynuację problematyki przedstawionej w publikacji autorki w PHR 1(10) 2005 rok str. 41 – 53 (przyp. Red.)

WSTĘP

Do niekonwencjonalnych, eksperymentalnych mieszanin oddechowych, zawierających neon zalicza się mieszaniny typu: NEOX ($O_2 + Ne$), NEOX-75 ($O_2 + Ne-75$) oraz NEOQUAD ($O_2 + Ne + He + N_2$).

W składzie mieszaniny oddechowej NEOX-75 znajduje się tlen oraz Neon –75, który jest zamiennikiem trudnodostępnego i kosztownego czystego neonu. NEOX-75 jest mieszaniną neonu i helu o następujących udziałach molowych $x'_{Ne}=0,75$ oraz $x'_{He}=0,25$, uzyskiwaną w procesie destylacji powietrza [1].

Mieszaniny NEOX-75 są zatem mieszaninami trójskładnikowymi, składającymi się z tlenu, neonu oraz helu, a na ich własności fizyczne wpływa zarówno ciśnienie, temperatura jak i proporcje obu gazów inertnych, czyli neonu i helu. W pracy przeanalizowane zostaną właściwości mieszanin NEOX-75 w zakresie ciśnienia $p=0,1\div 1,9$ MPa, temperatury bezwzględnej $T=273,15\div 333,15$ K oraz molowego udziału neonu $x_{Ne}=0,450-0,736$ oraz zagadnienia związane z komfortem cieplnym w atmosferze tych mieszanin.

1. WŁASNOŚCI FIZYCZNE HELU

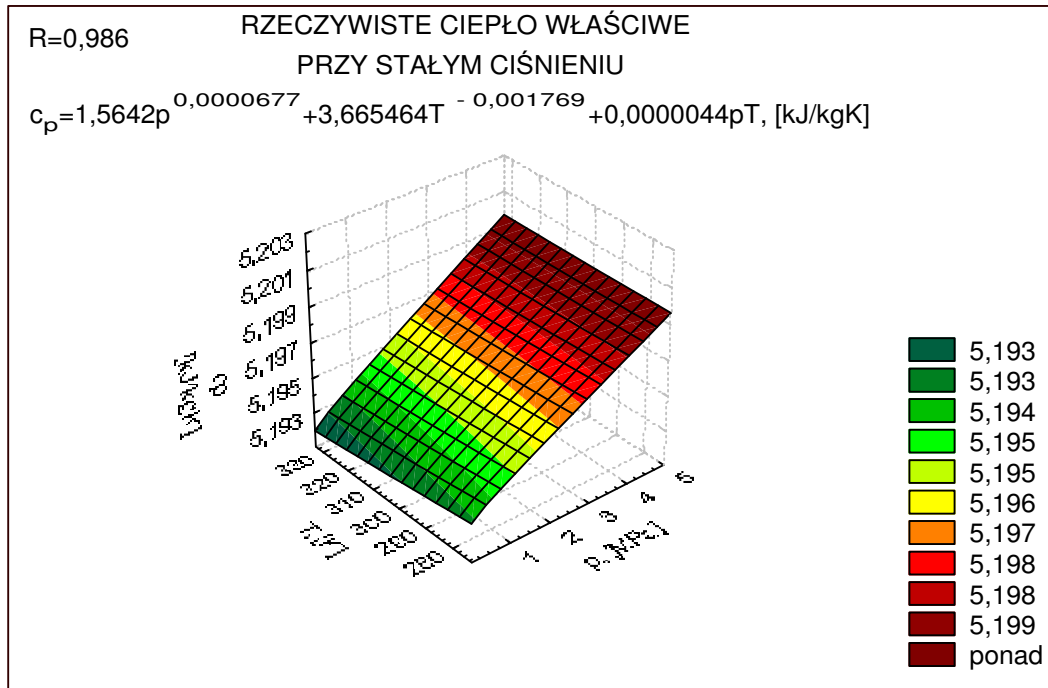
Na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych dla helu, a opublikowanych w pracy [6], opracowano równania regresji, opisujące własności fizyczne helu w zakresach ciśnienia i temperatury. Równania regresji wraz ze współczynnikami regresji podano w Tablicy 1.

Tablica 1. Równania regresji opisujące własności fizyczne helu.

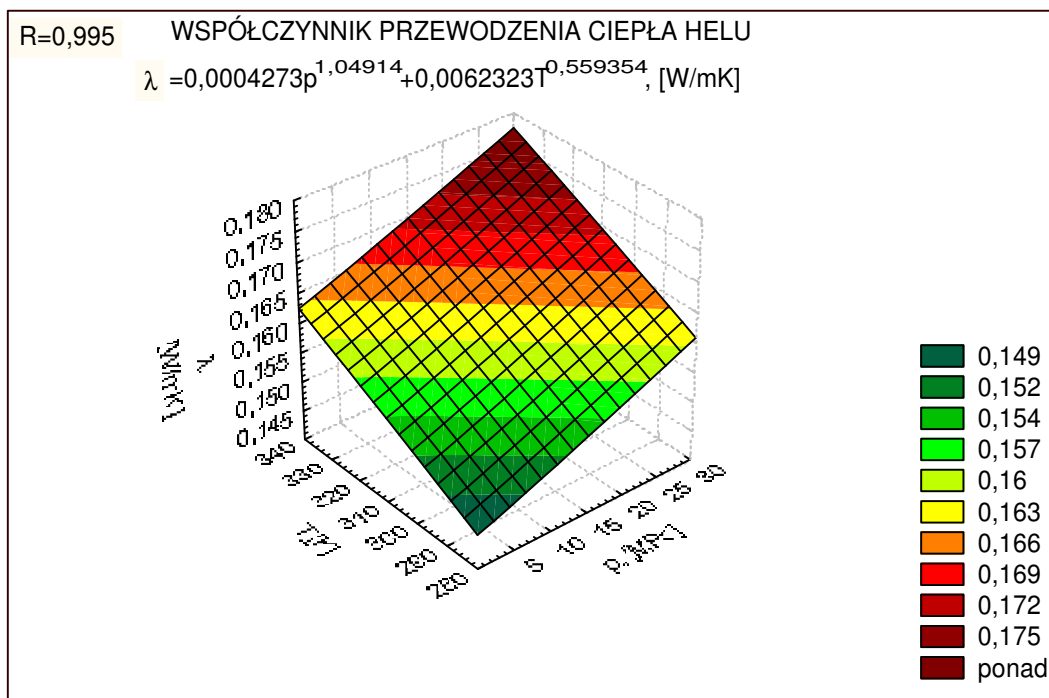
Hel	ZAKRES STOSOWANIA		R
	p	T	
	[MPa]	[K]	
$c_p = 1,5642 \cdot p^{0,0000677} + 3,665464 \cdot T^{0,001769} + 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot T$	0,05 - 5	273-573	0,9000
$\lambda = 0,0004273 \cdot p^{1,04914} + 0,00623223 \cdot T^{0,559354}$	0,05 - 5	273-573	0,9990
$\eta = [1,850308 \cdot p^{0,00092} + 0,00856(T - 273,15)^{0,86926}] \cdot 10^{-5}$	0,10 - 5	273-573	0,9990
$i = -1418,467 + 5,19300 \cdot T + 3,36408 \cdot p - 0,00035 \cdot T \cdot p$	0,10 - 6	280-330	1,0000
$v = 0,625946 \cdot p^{-0,9980217} + 0,216749 \cdot T^{-4,88809}$	0,05 - 5	273-573	0,9970

Poniżej, na rys.1,2 przedstawiono przykładowe wykresy, ilustrujące zależność rzeczywistego ciepła właściwego oraz współczynnika przewodzenia ciepła helu od temperatury i ciśnienia. Wykresy te zostały sporządzone na podstawie równań regresji, które charakteryzują się dużymi wartościami współczynnika korelacji.

Na rys.1 przedstawiono zależność rzeczywistego ciepła właściwego helu od ciśnienia i temperatury, z której wynika, że wzrost ciśnienia powoduje zwiększenie rzeczywistego ciepła właściwego helu, natomiast wzrost temperatury powoduje nieznaczną jego zmianę. Na rys.2 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła helu od ciśnienia i temperatury. Z rys. 2 wynika, że wzrost temperatury powoduje dość duży wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła, natomiast wpływ ciśnienia jest mniejszy.



rys.1. Zależność rzeczywistego ciepła właściwego helu od ciśnienia i temperatury.



rys.2. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła helu od ciśnienia i temperatury

3. WŁASNOŚCI FIZYCZNE MIESZANIN NEOX-75

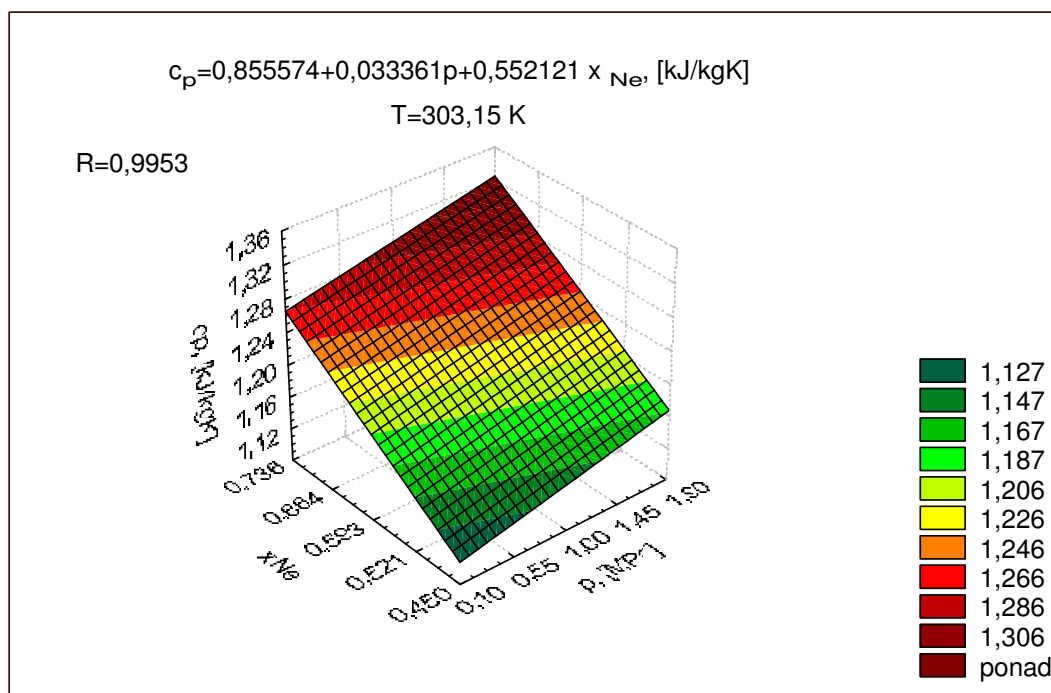
W obliczeniach, dotyczących wszystkich analizowanych mieszanin, zawierających neon, udziały molowe składników mieszanin zostały określone w zgodzie z zasadami fizjologii nurkowania [1]. Własności fizyczne mieszanin NEOX-75 określono w zakresie ciśnień od $p=0,1-1,9$ MPa oraz temperatur bezwzględnych gazu $T=273,15$ K - 333K. Obliczenia wykonano dla mieszanin wilgotnych, w zakresie wilgotności względnej mieszanin $\varphi=0,4-0,7$.

Na podstawie danych doświadczalnych z literatury [6], dotyczących własności fizycznych składników mieszanin oraz metodyki określania własności fizycznych mieszanin gazowych [3,7,8] opracowano równania regresji dla niekonwencjonalnych mieszanin tlenowo-neonowych NEOX-75 wykorzystując metodę estymacji nieliniowej w programie Statistica. Kryterium doboru równania stanowiła najwyższa wartość współczynnika korelacji R który jest miarą stopnia dopasowania regresji do danych doświadczalnych, w tym przypadku eksperymentu numerycznego.

W Tabelicy 2 zestawiono równania regresji opisujące: ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, entalpię właściwą, objętość właściwą, dynamiczny współczynnik lepkości oraz współczynnik przewodzenia ciepła wilgotnej mieszaniny NEOX-75.

Na rys. 3 przedstawiono zależność ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu wilgotnej ($\varphi=0,4-0,7$) mieszaniny NEOX-75 od ciśnienia i molowego udziału neonu, przy temperaturze bezwzględnej $T=303,15$ K. Z wykresu wynika, że ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu wzrasta wraz z ciśnieniem oraz molowym udziałem neonu w mieszaninie.

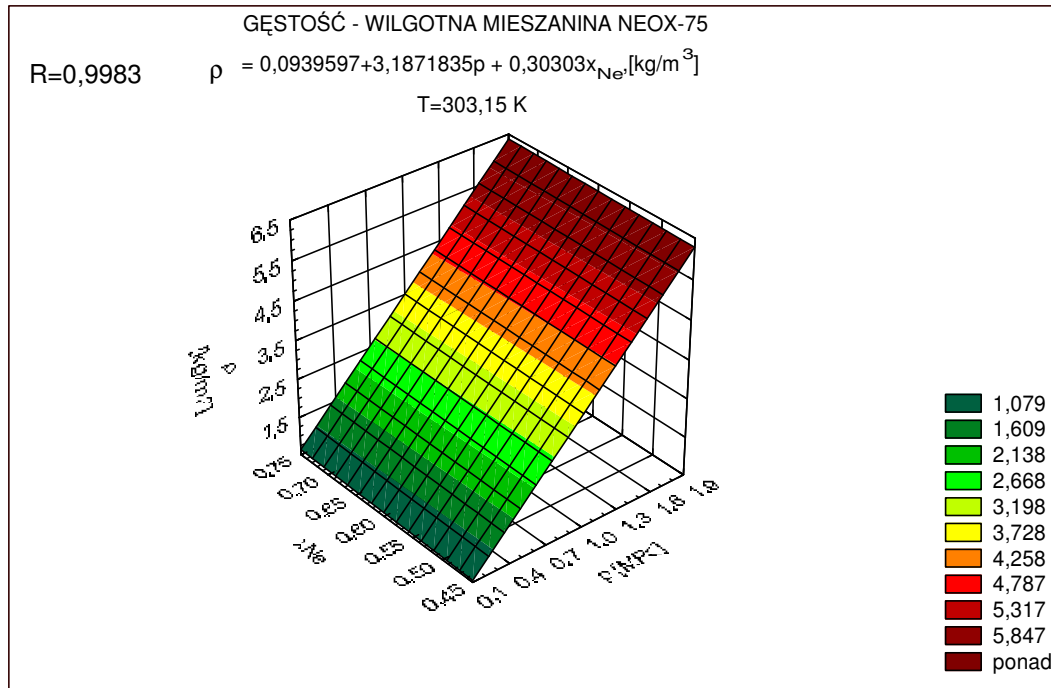
Na rys. 4 przedstawiono zależność gęstości wilgotnej mieszaniny NEOX-75 od ciśnienia i molowego udziału neonu, przy temperaturze $T=303,15$ K. Z wykresu wynika, że wzrastające ciśnienie powoduje stosunkowo duży wzrost gęstości mieszaniny natomiast wpływ udziału molowego neonu jest niewielki.



rys.3. Zależność ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu wilgotnej mieszaniny NEOX-75 od ciśnienia i molowego udziału neonu, przy temperaturze $T=303,15$

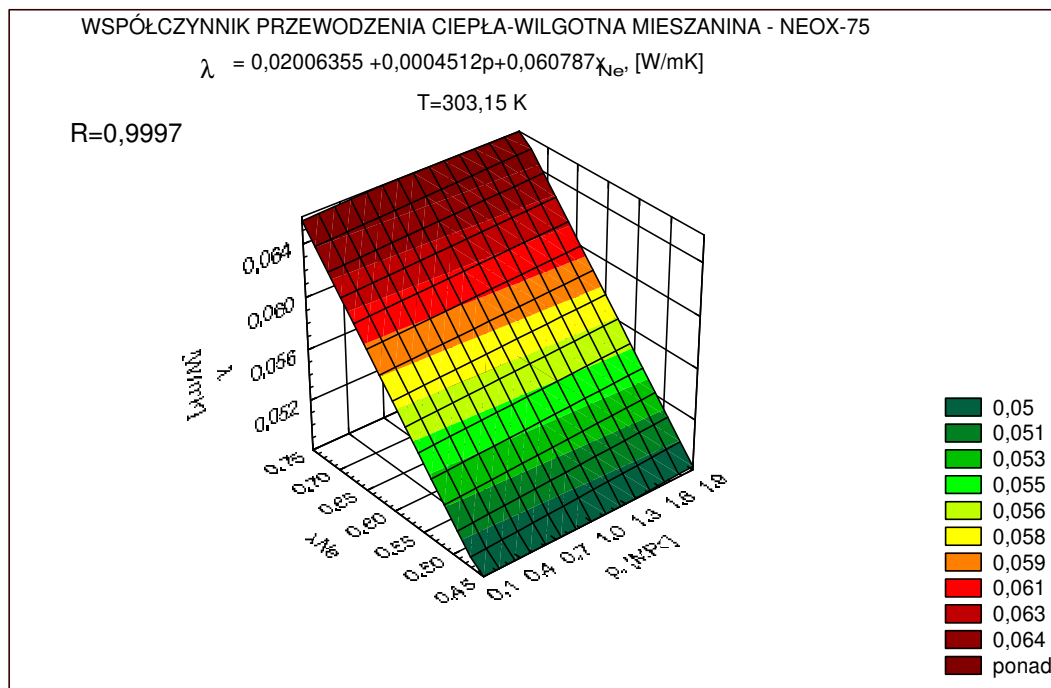
Tablica 2 Równania regresji opisujące własności fizyczne mieszaniny NEOX-75.

Właściwość	Równanie	Zakres	R
Ciepło właściwe c_p , $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$	$c_p = 0,688841 + 0,134613 \cdot p + 0,000555 \cdot T - 0,000334 \cdot p \cdot T + 0,552121 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9954
Entalpia i_g , $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$i_g = -334,166 + 194,045 \cdot p + 2,382613 \cdot T - 0,635359 \cdot p \cdot T - 35,7620 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9744
Objętość właściwa v , $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$	$v = 5,686451 + 0,11956 \cdot p + 0,00086 \cdot T - 0,000357 \cdot p \cdot T - 7,65557 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9985
Gęstość ρ , $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\rho = 0,143070 + 6,737072 \cdot p - 0,000162 \cdot T - 0,01171 \cdot p \cdot T + 0,30303 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9983
Dynamiczny współczynnik lepkości η , $\left[\frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right]$	$\eta = 2,99 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot p + 4 \cdot 10^{-8} \cdot T + 10^{-9} \cdot p \cdot T + 1,282 \cdot 10^{-5} \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9953
Współczynnik przewodzenia ciepła λ , $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$	$\lambda = -0,015405 - 0,001974 \cdot p + 0,000117 \cdot T + 0,000008 \cdot p \cdot T + 0,060787 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9997
Kinematyczny współczynnik dyfuzji pary wodnej przez mieszaninę D_{w-g} , $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$D_{w-g} = 0,000061 + 0,000004 \cdot p + 2,3 \cdot 10^{-8} \cdot T - 1,3 \times 10^{-8} \cdot p \cdot T - 0,000089 \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,9991
Współczynnik ściśliwości z [-]	$z = 1,878218 + 58,52191 \cdot p - 0,006862 \cdot T + 0,000329 \cdot p \cdot T - 78,1575 \cdot p \cdot x_{\text{Ne}}$	$T=273,15\div 333,15$ [K] $p=0,1\div 1,9$ [MPa] $x_{\text{Ne}}=0,450\div 0,736$	0,8819



rys. 4. Zależność gęstości wilgotnej mieszanki NEOX-75 od ciśnienia i molowego udziału neonu przy temperaturze T=303,15 K

Na rys.5 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła wilgotnej mieszanki NEOX od ciśnienia i molowego udziału neonu przy temperaturze T=303,15 K, z którego wynika, że zarówno wzrost ciśnienia, jak i udziału molowego neonu powoduje wzrost współczynnika przewodzenia ciepła czynnika oddechowego, aczkolwiek wpływ ciśnienia jest znacznie mniejszy.



rys.5. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła wilgotnej mieszanki NEOX-75 od ciśnienia i molowego udziału neonu przy temperaturze T=303,15 K

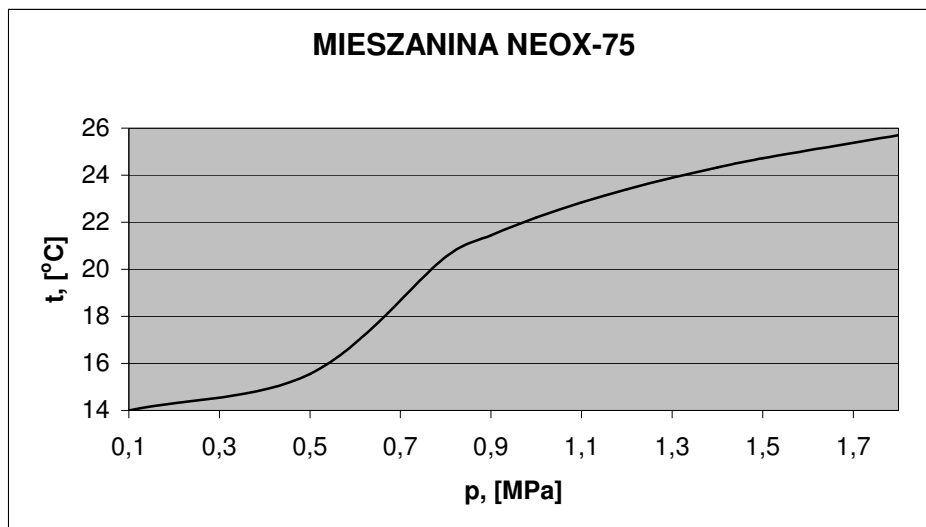
Spośród wszystkich, przedstawionych w Tabelicy 2 równań regresji, opisujących zmienność własności wilgotnych mieszanin NEOX, w formie graficznej przedstawiono jedynie te, które wpływają na straty ciepła oraz opór przepływu mieszaniny podczas oddychania. Pozostałe wielkości, aczkolwiek ważne w algorytmie obliczania temperatury komfortu cieplnego oraz wentylacji obiektów hiperbarycznych, podane są jedynie w postaci równań regresji w Tabelicy 2.

3. KOMFORT CIEPLNY

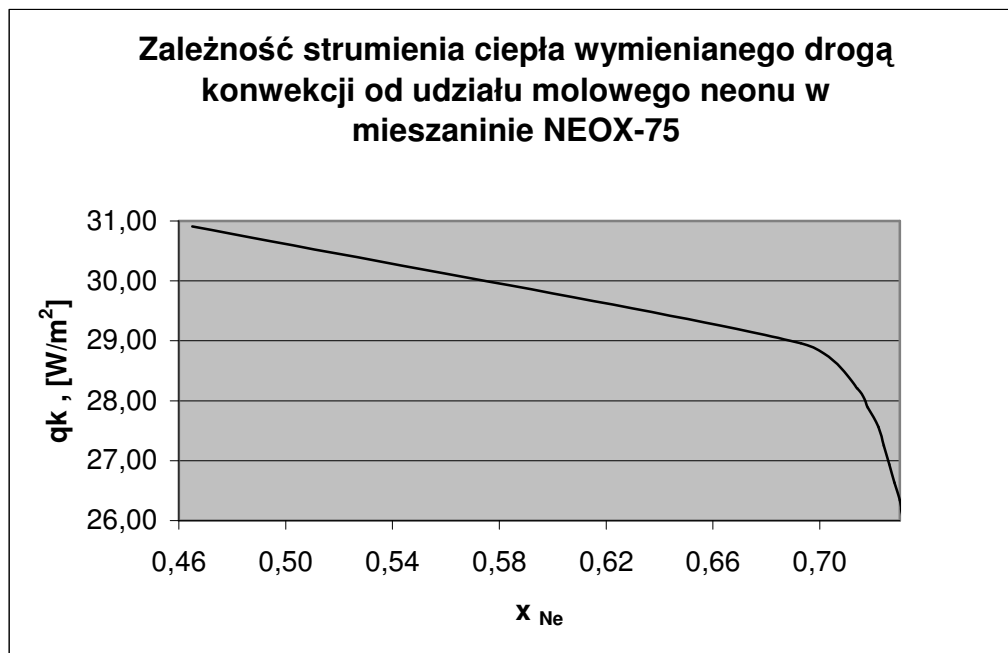
Korzystając z wyprowadzonego w pracach [4, 5] równania bilansu cieplnego dla środowiska hiperbarycznego, obliczono temperaturę komfortu cieplnego. Obliczenia wykonano dla mieszaniny NEOX-75 przyjmując następujący zakres parametrów:

- ciśnienie mieszaniny $p=0,1-1,9$ MPa,
- ciśnienie cząstkowe tlenu $p_{O_2}=35$ kPa
- wilgotność względna $\varphi=0,4-0,7$,
- wydatek energetyczny nurka $\dot{q}_m=58$ W/m²,
- opór cieplny odzieży $I_{cl}=0,25$ clo,
- prędkość mieszaniny $v=0$ m/s, konwekcja swobodna
- średnia temperatura promieniowania otoczenia $t_r=0,10,20,30, 40, 50$ °C

rys.6 ilustruje rozwiązanie równania komfortu cieplnego [2] dla mieszaniny NEOX-75, o wilgotności względnej $\varphi=0,5$, przy średniej temperaturze promieniowania otoczenia $t_r=30$ °C wydatku energetycznym nurka, będącego w spoczynku $\dot{q}_m=58$ W/m², ubranego w odzież o oporze cieplnym $I_{cl}=0,25$ clo = 0,039 m²W/K, prędkości mieszaniny $v=0$ m/s .



rys.6 Zależność temperatury komfortu cieplnego od ciśnienia wilgotnej mieszaniny NEOX-75, średnia temperatura promieniowania $t_r=30$ °C, wilgotność względna $\varphi=0,5$, wydatek energetyczny nurka będącego w spoczynku $\dot{q}_m=58$ W/m², opór cieplny odzieży $I_{cl}=0,25$ clo, prędkość mieszaniny $v=0$ m/s, konwekcja swobodna



rys.7. Zależność gęstości konwekcyjnego strumienia ciepła, a molowym udziałem neonu w mieszaninie NEOX-75, średnia temperatura promieniowania $t_r = 30$ °C, wilgotność względna $\phi = 0,5$, wydatek energetyczny nurka będącego w spoczynku $q_m = 58$ W/m², opór cieplny odzieży $l_{cl} = 0,25$ clo, prędkość mieszanki $v = 0$ m/s, konwekcja swobodna.

Z rys. 6 wynika, że w przypadku konwekcji swobodnej temperatura komfortu cieplnego w mieszaninie NEOX-75 wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia, przy czym w zakresie ciśnienia $p = 0,1-0,5$ MPa wzrost ten jest niewielki, około $\Delta t = 1,5$ K, natomiast po przekroczeniu ciśnienia $p = 0,5$ MPa, wzrost temperatury komfortu w zakresie ciśnienia $p = 0,5-1,9$ MPa wynosi około $\Delta t = 10$ K.

Na rys.7 przedstawiono zależność gęstości konwekcyjnego strumienia ciepła, a molowym udziałem neonu w mieszaninie NEOX-75.

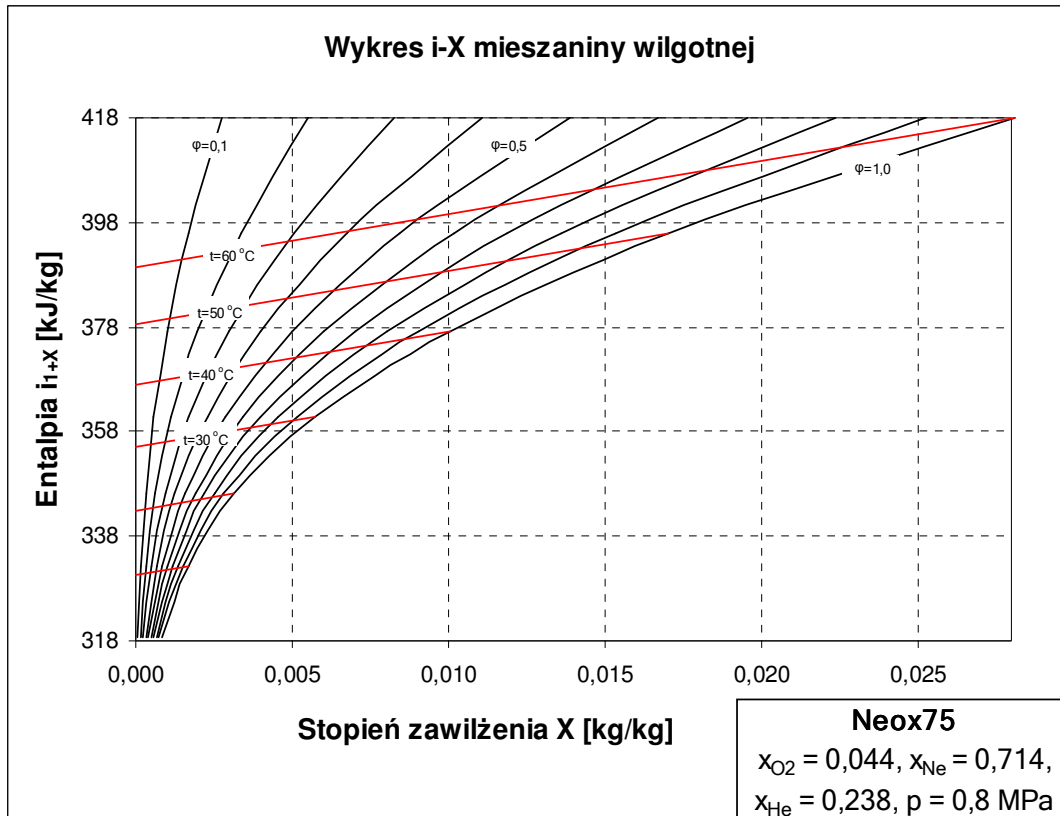
Z rys. 7 wynika, że gęstość strumienia ciepła, wymianianego pomiędzy zewnętrzną powierzchnią ciała nurka a otoczeniem, maleje wraz ze wzrostem molowego udziału neonu w mieszaninie NEOX-75.

4. WYKRESY PSYCHROMETRYCZNE

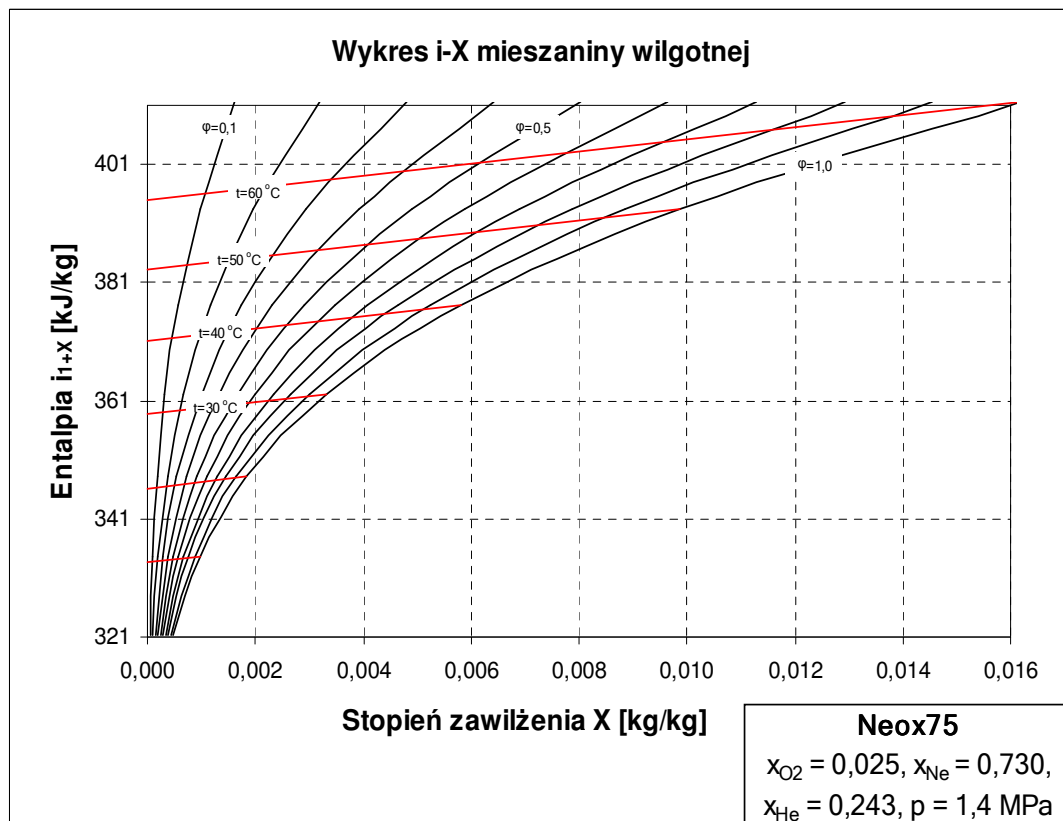
Wykresy $i - X$ oraz $X-t$, są wykresami psychrometrycznymi, sporządzonymi odpowiednio w układach : entalpia właściwa i - stopień zawilżenia mieszanki oddechowej X oraz stopień zawilżenia mieszanki X - temperatura mieszanki oddechowej- t .

Wykresy umożliwiające ilustrowanie przemian stanu wilgotnych mieszanin oddechowych sporządza się dla mieszanki oddechowej o określonym składzie, ciśnieniu w zakresie temperatur profilu nurkowania (kompresja, plateau saturacji, dekompresja).

Poniżej, na rys.8 oraz rys.9 przedstawiono wykresy psychrometryczne $X-T$ oraz $i-X$ dla mieszanin NEOX-75 o ciśnieniu $p = 0,8$ MPa oraz $p = 1,4$ MPa.



rys. 8 Wykres X – t dla mieszanki NEOX-75.



rys.9 Wykres i-X dla mieszanki Neox-75.

5. WNIOSKI :

- na podstawie danych doświadczalnych z literatury, opracowano równania regresji, uwzględniające wpływ ciśnienia i temperatury na własności fizyczne helu,
- opracowano równania regresji , uwzględniające wpływ ciśnienia, temperatury oraz molowego udziału neonu na własności fizyczne mieszanin NEOX-75,
- zmienność własności fizycznych neonu oraz mieszanin NEOX-75 wraz z ciśnieniem , temperaturą oraz molowym udziałem neonu przedstawiono w postaci graficznej,
- rozwiązano równanie komfortu cieplnego dla mieszanin NEOX-75, a wyniki przedstawiono w formie graficznej,
- stwierdzono wpływ ciśnienia i składu mieszaniny gazowej na temperaturę komfortu cieplnego; ze wzrostem ciśnienia mieszaniny NEOX-75 temperatura komfortu cieplnego wzrasta, natomiast wpływ wilgotności względnej na temperaturę komfortu cieplnego jest niewielki, aczkolwiek wilgotność względna mieszaniny ma duży wpływ na subiektywne odczucie komfortu cieplnego,
- opracowano wykresy psychrometryczne i-X ora X-t, które umożliwiają analizę przemian stanu wilgotnych mieszanin NEOX -75,
- przedstawiona metodyka analitycznego określania temperatury komfortu cieplnego jest przydatna do modelowania mikroklimatu obiektów hiperbarycznych, zasilanych mieszaninami NEOX-75,
- zastosowanie metod analitycznych określania komfortu cieplnego oraz poszczególnych składników bilansu cieplnego organizmu nurka pozwala na ograniczenie, do niezbędnego minimum, kosztownych eksperymentów,
- przedstawione metody analityczne oceny komfortu cieplnego w warunkach hiperbarycznych powinny być doświadczalnie zweryfikowane, co w pełni potwierdziłoby ich przydatność praktyczną. lecz jest to przedsięwzięcie jednak trudne i kosztowne.

Ważniejsze oznaczenia:

i - entalpia właściwa mieszaniny gazowej, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

I_{cl} - opór cieplny odzieży w warunkach powietrza atmosferycznego, clo ,

p - ciśnienie mieszaniny gazowej, MPa

\dot{q}_k - gęstość konwekcyjnego strumienia ciepła , $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

t, T - temperatura komfortu cieplnego, $^{\circ}\text{C}$, K,

x_i - udział molowy i-tego składnika mieszaniny,

z - współczynnik ściśliwości,

V - prędkość gazu, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$,

X - stopień zawilżenia, $\frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg gazu suchego}}$,

η - dynamiczny współczynnik lepkości, $\frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}$,

φ - wilgotność względna,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła, $\frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$,

ρ - gęstość, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,

WYKAZ LITERATURY

1. Shilling C.W., Werts M.F., Schandelmeier N.R. The Underwater Handbook. A Guide to Physiology and Performance for the Engineer. Plenum Press, New York, London, 1976.
2. Hamilton R.W. Jr. –Breathing mixtures, Technical Memorandum CRL-T-750, December, 1973, Ocean Systems and Development Laboratory, Tarrytown, New York.
3. Sobański R. Własności mieszanin oddechowych. *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, No 213, 1982.
4. Majchrzycka A. Conditions for thermal comfort in helium- neon- oxygen saturation diving. Marine technology III, ed. WIT Press, Southampton, Boston, pp.623-631, 2000.
5. Kozak T., A.Majchrzycka: The influence of the total pressure and the kind of the breathing mixture on microclimat of the hyperbaric chambers. *Ergonomia*, 18,1, pp.29-39, 1995.
6. Varhaftik N.B.-Spravočnik po teplofizičeskim svoistvam gazov i židkostej.ed Izd.Nauka, Moskwa 1972.
7. . Bretszneider S. Własności cieczy i gazów. Warszawa PWN, 1962.
8. Nuckols M.L., Tucker W.C, Sarich A.J. –Diving and hyperbaric applications, ed. Simon & Schuster. 1996

Recenzent: prof. dr hab inż. Adam Charchalis, Akademia Morska w Gdyni

Autor: dr inż. Anna Majchrzycka, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej
70-310 Szczecin, Piastów 19
e-mail: Anna.Majchrzycka@ps.pl
tel.449-43-76