

Anna Majchrzycka

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Techniki Ciepłej
70-310 Szczecin, Piastów 19, tel.(48)91449 43 76,
e-mail:Anna.Majchrzycka@zut.edu.pl

**BADANIE KONWEKCYJ SWOBODNEJ Z POWIERZCHNI
PIONOWEGO WALCA W ŚRODOWISKU HIPERBARYCZNYM**

W pracy przedstawiono badania, dotyczące konwekcji swobodnej z powierzchni pionowego walca odwzorowującego sylwetkę nurka o zmiennym wydatku energetycznym. Badania wykonano w helu o ciśnieniu $p = 0,5-5\text{MPa}$, a wyniki przedstawiono postaci równania kryterialnego $Nu = f(Ra)$ oraz korelacji, która umożliwia obliczenie współczynnika przejmowania ciepła w funkcji ciśnienia gazu i symulowanego wydatku energetycznego nurka.

Słowa kluczowe: konwekcja swobodna, pionowy walec, hel

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NATURAL
CONVECTION FROM VERTICAL CYLINDER IN
THE HYPERBARIC ENVIRONMENT**

The paper reports experimental investigation of natural convection from vertical cylinder that simulates the diver's body of the different activity level. Experiments were carried out in the hyperbaric helium at absolute pressure range of $p=0,5-5\text{ MPa}$. The results are given as the correlation $Nu=f(Ra)$ and correlation between convective heat transfer coefficient from the outer surface of vertical cylinder, pressure and simulated activity level.

Keywords: natural convection, vertical cylinder, helium

WSTĘP

Własności chemiczne i fizyczne helu powodują, że jest to najczęściej wykorzystywany składnik mieszanin oddechowych [6,12,14,15,16,17,18,19,20,25,26,27], stosowanych w zaawansowanej technologii nurkowania. Stosowanie helu ma wiele zalet, ale również i wad, wynikających z jego dużej przewodności cieplnej i dużego ciepła właściwego. Ponieważ ciśnienie i skład ilościowy mieszaniny oddechowej zależą od warunków realizacji operacji nurkowej, wobec tego również własności fizyczne mieszanin helowych będą zmieniały się stosownie do tych warunków. Zagadnienie własności fizycznych oraz termodynamiki mieszanin oddechowych przedstawione jest, między innymi, w pracy [21]. Wzrost ciśnienia mieszaniny oddechowej i związany z tym zwiększony udział helu powodują wzrost

współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego, co przyczynia się do nadmiernych strat ciepła z organizmu nurka. Ponieważ długotrwałe kompensowanie dużych strat ciepła przekracza możliwości organizmu człowieka, wobec tego w obiekcie hiperbarycznym należy wytworzyć mikroklimat o parametrach komfortu cieplnego, kompensujących te straty.

Temperaturę komfortu cieplnego określa się na podstawie równania komfortu cieplnego, opracowanego dla środowiska hiperbarycznego na podstawie bilansu cieplnego organizmu nurka [9]. Z równania komfortu cieplnego można obliczać optymalne, dla odczuwania komfortu cieplnego, kombinacje parametrów mikroklimatu środowiska hiperbarycznego. Temperatura komfortu cieplnego w obiekcie hiperbarycznym jest funkcją składu jakościowego i ilościowego mieszaniny oddechowej oraz jej ciśnienia, wilgotności względnej i prędkości, a także średniej temperatury promieniowania otoczenia, wydatku energetycznego nurka oraz oporu cieplnego odzieży.

Zrównoważenie bilansu cieplnego organizmu jest pierwszym, koniecznym warunkiem homeostazy termicznej człowieka [5]. Jednym z istotnych składników bilansu cieplnego jest strumień ciepła, traconego przez konwekcję z powierzchni ciała:

$$\dot{Q}_k = \alpha \cdot f_{cl} \cdot A_{Du} \cdot (t_{cl} - t) \quad (1)$$

gdzie:

A_{Du} - powierzchnia Du Bois, m²,

f_{cl} - współczynnik, określający stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała nie okrytego odzieżą, $f_{cl}=1$ – bez odzieży,

\dot{Q}_k - strumień ciepła traconego przez konwekcję, W

t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży, °C,

t - temperatura komfortu cieplnego, °C,

α - współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni ciała nurka, [W/m²K]

Znajomość współczynnika przejmowania ciepła z powierzchni ciała nurka w warunkach hiperbarycznych jest niezbędna przy rozwiązywaniu równania komfortu cieplnego, czyli do określenia temperatury komfortu cieplnego. Współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni ciała człowieka zależy od właściwości fizycznych otaczającej go atmosfery, geometrii ciała wymieniającego ciepło z otoczeniem oraz prędkości i kierunku przepływu otaczającej atmosfery gazowej.

W literaturze odnotowuje się duży postęp w dziedzinie badań nad konwekcją swobodną i wymuszoną z powierzchni ciała człowieka lub manekinów termicznych w warunkach powietrza atmosferycznego. Informacje na ten temat można znaleźć, między innymi, w pracach [2,4,5,10]. Dobrze udokumentowane są również podstawowe badania nad konwekcyjną wymianą ciepła z powierzchni różnych brył: walca, kuli, pionowych płyt [1,3,11]. Zagadnienia konwekcyjnej wymiany ciepła z powierzchni ciała nurka lub pionowego walca w środowisku hiperbarycznym przedstawione są, między innymi, w pracach [7,12,19,20,23,21,22, 25,26,27].

Z badań nad wpływem ciśnienia powietrza na konwekcyjną wymianę ciepła w obiekcie hiperbarycznym, które cytują autorzy [16,25] wynika, że przy podwyższonym ciśnieniu powietrza konwekcyjna wymiana ciepła jest intensywniejsza niż w warunkach normobarycznych. Potwierdzają to również wyniki badania strat ciepła z powierzchni ciała nurka podczas konwekcji swobodnej w atmosferze powietrza hiperbarycznego, które przeprowadzili autorzy pracy [8], wykorzystując w badaniach termograficzną metodę pomiaru różnicy temperatury powierzchni ciała nurka i otaczającego powietrza. W wyniku badań stwierdzono znaczący wpływ

ciśnienia na intensywność wymiany ciepła, a tym samym na wzrost konwekcyjnych strat ciepła z powierzchni ciała nurka.

Z badań, które przeprowadził autor prac [16,17,18,19] wynika, że wzrost ciśnienia atmosfery helowej w zakresie $p=0,1-1,12$ MPa zwiększa ponad czterokrotnie wartość współczynnika przejmowania ciepła podczas konwekcji swobodnej, co przyczynia się do dużej utraty ciepła z organizmu. W stosunku do powietrza atmosferycznego wzrost ten jest ponad sześciokrotny. Również w pracy autorów [12] przedstawiono wyniki badań nad wymianą ciepła z powierzchni walca w warunkach podwyższonego ciśnienia powietrza oraz helu.

Zagadnienie konwekcyjnej wymiany ciepła w warunkach hiperbarycznych poruszają, między innymi, prace autorów [12,14,16,17,18,19,20,] w których omówiono kompleksowo zagadnienia, dotyczące medycyny i techniki hiperbarycznej. W pracach autorów [16,18, 20] stwierdzono, że wzrost ciśnienia w zakresie $p= 0,1\div 1,6$ MPa oraz zamiana czynnika oddechowego: z powietrza na mieszaninę helowo-tlenową powoduje zintensyfikowanie konwekcyjnej wymiany ciepła od 30% do 60%.

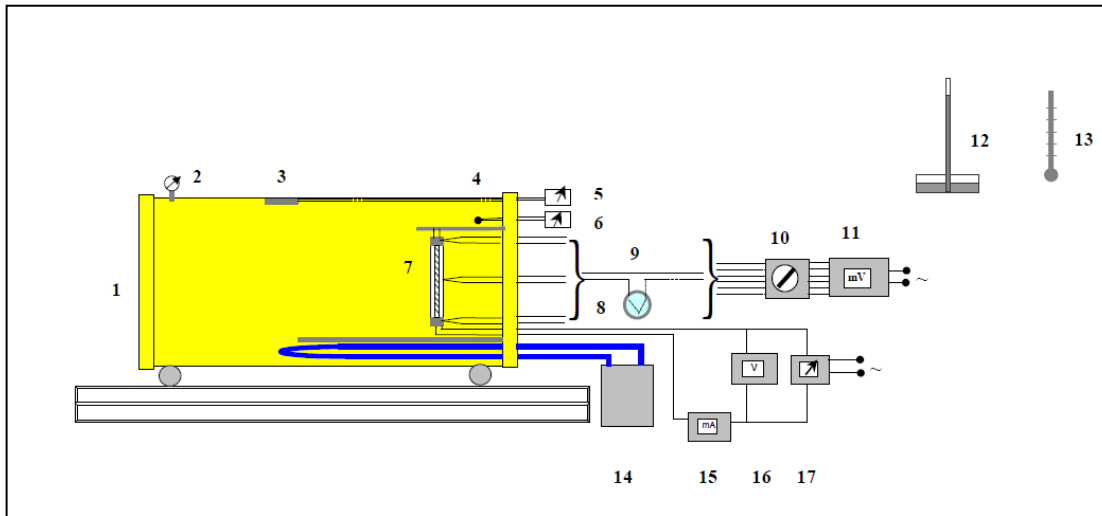
Na wartość współczynnika przejmowania ciepła z powierzchni ciała nurka wpływa wiele czynników, spośród których istotne są własności fizyczne, prędkość i kierunek przepływu mieszaniny oddechowej, wymiary antropometryczne nurka, usytuowanie ciała oraz wydatek energetyczny nurka. W pracy [16] autorzy zwracają uwagę na brak danych, dotyczących badania wpływu wydatku energetycznego nurka, na wartość współczynnika przejmowania ciepła z powierzchni ciała.

Celem podjętych badań doświadczalnych było wyznaczenie średniego współczynnika przejmowania ciepła podczas konwekcji swobodnej z powierzchni walca odwzorowującego sylwetkę nurka w zależności od ciśnienia i symulowanego wydatku energetycznego. Badania przeprowadzono w atmosferze hiperbarycznego helu.

1. METODA BADAŃ

Badaniom modelowym poddano pionowy walec, który odwzorowuje sylwetkę nurka. Wymiary walca tak dobrano, aby stosunek wysokości walca do jego średnicy wynosił $l/d \cong 6$, co w przybliżeniu odpowiada proporcjom wymiarów sylwetki nurka. Walec ogrzewano elektrycznie, a system regulacji mocy grzania umożliwił symulowanie wydatku energetycznego nurka przy różnym wydatku energetycznym $\dot{q}_m = 1,0; 1,5; 2,0; 4,0; 4,5$ MET. 1 MET- jest równoważnikiem metabolicznym, który odpowiada zużyciu tlenu w spoczynku i wynosi 3,5 ml O_2 /kg masy ciała/min, co odpowiada wydatkowi energetycznemu $\dot{q}_m = 58,2 \frac{W}{m^2} = 1MET$. Badania przeprowadzono w atmosferze helu w zakresie ciśnienia bezwzględnego $p=0,5-5$ MPa.

Ogólny schemat stanowiska do badania współczynnika przejmowania ciepła z powierzchni pionowego walca w warunkach hiperbarycznych przedstawiono na Rys.1.

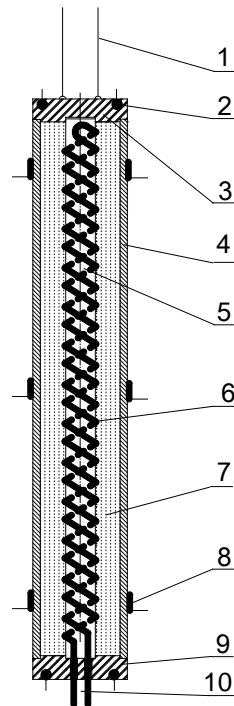


Rys.1 Schemat stanowiska do badania konwekcji swobodnej z powierzchni pionowego walca: 1-komora ciśnieniowa, 2-manometr, 3 - czujnik Pt100 na folii, 4 - czujnik Pt100 do pomiaru temperatury gazu w komorze, 5,6 -oporniki wzorcowe ,7-badany walec, 8 termopary Cu-Konst. 9-naczynie z lodem,10- przełącznik, 11-milivoltmierz,12- barometr, 13-termometr, 14- termostat,15 – miliamperomierz,16-woltmierz,17-zasilacz.

Schemat badanego walca przedstawiony jest na Rys.2. Walec o długości $l=0,130$ m wykonano z miedzi. Wewnątrz walca umieszczono element grzejny, wykonany z taśmy kantalowej nawiniętej na rdzeń, wykonany w postaci rurki ze specjalnego gatunku szkła. Przerzeń pomiędzy ścianką walca a elementem grzejnym wypełniono sproszkowanym tlenkiem magnezu, dzięki czemu stały strumień ciepła wydzielanego przez element grzejny przekazywany był w kierunku promieniowym, do zewnętrznej powierzchni walca, skąd przez konwekcję swobodną przekazywany był do otaczającego gazu. W celu zminimalizowania przewodzenia wzdłużnego przez ścianki badanego walca, końce walca zaizolowano krążkami wykonanymi z materiału o dobrych właściwościach izolacyjnych. Przez dolny krążek izolacyjny wyprowadzone zostały przyłącza elektryczne. Na powierzchni walca oraz w krążkach izolujących umieszczono miniaturowe termopary Cu - Konst do określania temperatury powierzchni walca.

Badany walec wraz z termoparami umieszczano wewnątrz komory hiperbarycznej, a wszystkie przewody elektryczne wyprowadzano na zewnątrz komory przez heloszczelne złącza elektryczne, do których z zewnątrz przyłączano urządzenia pomiarowe. Strumień ciepła wydzielanego przez element grzejny walca określano poprzez pomiar spadku napięcia oraz natężenia prądu przepływającego przez grzejnik, zasilany prądem stałym z zasilacza stabilizowanego. Pomiar ciśnienia gazu w komorze odbywał się za pomocą manometru sprężynowego z rurką Bourdona, typ PRLT S77, zakres 0-10 MPa, o działce elementarnej 0,05 MPa.

Do pomiaru temperatury gazu wewnątrz komory zastosowano termorezystancyjne czujniki Pt-100. Za pomocą termopar powierzchniowych Cu - Konst, dokonywano pomiarów temperatury powierzchni walca oraz temperatur górnego i dolnego krążka izolującego. Temperaturę powierzchni ścian komory mierzono przy użyciu czujników Pt-100 na folii, którą naklejało na ściany komory, temperaturę otoczenia na zewnątrz komory hiperbarycznej mierzono termometrem rtęciowym a ciśnienie atmosferyczne mierzono barometrem rtęciowym z noniuszem.



Rys.2 Schemat pionowego walca pomiarowego: 1-linki mocujące, 2- termopary Cu- Konst , 3- górny krążek izolacyjny, 4-walec wykonany z miedzi, 5- szklany rdzeń grzejnika, 6- kantalowy drut oporowy, 7- tlenek magnezu, 8- termopary powierzchniowe 9- dolny krążek izolacyjny, 10- przyłącze grzejnika.

Z bilansu energetycznego walca wynika, że strumień ciepła, wydzielonego przez element grzejny \dot{Q}_C jest równy sumie konwekcyjnego strumienia ciepła wymianianego pomiędzy powierzchnią walca a otoczeniem \dot{Q}_K , strumienia strat ciepła, traconego wskutek przewodzenia ciepła przez górny i dolny krążek izolacyjny walca \dot{Q}_S oraz strumienia ciepła wymianianego z otoczeniem przez promieniowanie \dot{Q}_r :

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_K + \dot{Q}_S + \dot{Q}_r \quad (2)$$

gdzie :

\dot{Q}_C - strumień ciepła, wydzielonego przez element grzejny, W,

\dot{Q}_K - konwekcyjny strumień ciepła wymianianego pomiędzy powierzchnią walca a otoczeniem, W,

\dot{Q}_S - strumień strat ciepła traconego wskutek przewodzenia ciepła przez górny i dolny krążek izolacyjny, W

\dot{Q}_r - strumień ciepła, wymianianego z otoczeniem przez promieniowanie, W.

Na podstawie równania (2) określono konwekcyjny strumień ciepła wymienianego pomiędzy powierzchnią walca a otoczeniem:

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_c - \dot{Q}_s - \dot{Q}_r \quad (3)$$

Ponieważ założono, że badany walec w przybliżeniu odwzorowuje sylwetkę nurka bez odzieży, wobec tego równanie (1) można zapisać w postaci:

$$\dot{Q}_k = \alpha \cdot A \cdot (t_w - t) \quad (4)$$

gdzie:

A - powierzchnia pobocznic walca, m²,

\dot{Q}_k - konwekcyjny strumień ciepła wymienianego z otoczeniem, W,

t_w - temperatura powierzchni walca, °C,

t - temperatura gazu, °C,

α - współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni walca, W/m²K.

Z równań (4) oraz (3) wyznaczono średni współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni walca:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_c - \dot{Q}_s - \dot{Q}_r}{A \cdot (t_w - t_f)} \quad (5)$$

Podczas badań dokonywano pomiarów temperatury powierzchni bocznej walca oraz powierzchni elementów izolujących walec, temperatury gazu oraz temperatur powierzchni ścian komory hiperbarycznej. W celu określenia strumienia ciepła wydzielonego z elementu grzejnego walca dokonywano pomiaru spadku napięcia i natężenia prądu. Moc elementu grzejnego walca w przybliżeniu symuluje wydatek energetyczny nurka:

$$\dot{q}_m = \frac{\dot{Q}_c}{A} \quad (6)$$

2. WYNIKI BADAŃ

Wykonano badania konwekcji swobodnej ciepła z powierzchni pionowego walca odwzorowującego w przybliżeniu sylwetkę nurka. Badania wykonano w atmosferze helu o ciśnieniu w zakresie p=0,5-5 MPa. Podczas badań tak dobierano moc grzania walca, aby symulować różny poziom wydatku energetycznego począwszy od stanu spoczynku nurka $\dot{q}_m = 1\text{MET}$, poprzez lekki wysiłek $\dot{q}_m = 1,5\text{MET}$ aż do wysiłku przy większym obciążeniu pracą $\dot{q}_m = 2\text{MET}$, $\dot{q}_m = 3\text{MET}$, $\dot{q}_m = 3,5\text{MET}$, $\dot{q}_m = 4,5\text{MET}$ (duży wysiłek fizyczny).

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości współczynników przejmowania ciepła oraz liczby kryterialne niezbędne do opracowania zależności uogólnionej.

Liczby kryterialne określono z następujących równań:

-liczba Nusselta:
$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (7)$$

$$\text{- liczba Prandtla:} \quad \text{Pr} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (8)$$

$$\text{-liczba Grashofa:} \quad \text{Gr} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |\Delta t|}{\nu^2} \quad (9)$$

$$\text{-liczba Rayleigha} \quad \text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (10)$$

Własności fizyczne helu, występujące w równaniach (7),(8),(9),(10) określono przy temperaturze odniesienia odpowiadającej średniej temperaturze warstwy przyściennej:

$$t_m = 0,5 \cdot (t_w + t) \quad (11)$$

gdzie:

- c_p - ciepło właściwe gazu, [J/kgK],
- g - przyspieszenie ziemskie, [m/s²],
- l - charakterystyczny wymiar liniowy, [m],
- t - temperatura atmosfery gazowej, [°C],
- t_m - temperatura warstwy przyściennej, [°C],
- t_w - temperatura powierzchni walca, [°C],
- α - współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni walca, [W/m²K],
- β - współczynnik rozszerzalności objętościowej gazu, [1/K],
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła gazu, [W/mK],
- η - dynamiczny współczynnik lepkości gazu, [kg/ms],
- ν - kinematyczny współczynnik lepkości gazu, [m²/s],
- Δt - różnica temperatury, [K].

Wyniki badań opracowano w postaci równania uogólnionego (12) słusznego w zakresie liczb Rayleigha $4,3 \cdot 10^4 < \text{Ra} < 5 \cdot 10^6$ (obszar konwekcji laminarnej):

$$\text{Nu} = 1,82 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Ra}^{0,6876+0,7757 \cdot p^{-0,2477}} \quad (12)$$

Współczynnik korelacji dla dopasowanej funkcji regresji (12) wynosi $R=0,9071$, co jest wartością świadczącą o dobrym dopasowaniu funkcji. Na Rys. 3 przedstawiono wykres ilustrujący zależność liczby Nusselta od ciśnienia helu i liczby Rayleigha. Wzrost ciśnienia helu powoduje wzrost wartości liczby Nusselta, a tym samym współczynnika przejmowania ciepła. Ponieważ zagadnienie wpływu wydatku energetycznego nurka na konwekcyjną wymianę ciepła nie było dotychczas przedmiotem szczegółowych badań w środowisku hiperbarycznym, wobec tego, mając pełną świadomość dużego uproszczenia zagadnienia, postanowiono również oszacować wpływ symulowanego wydatku energetycznego nurka na konwekcyjną wymianę ciepła z powierzchni bocznej pionowego walca.

Wyniki badań doświadczalnych opracowano również w postaci korelacji (13), dla której współczynnik korelacji wynosi $R=0,985$:

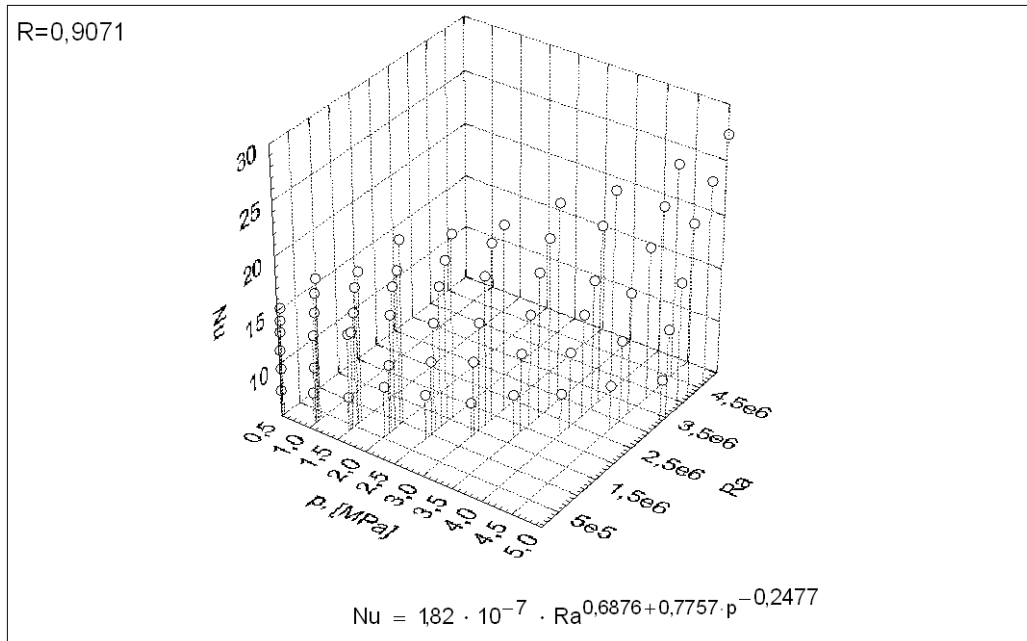
$$\alpha = -15271,2 + 11116,55p^{7,63 \cdot 10^{-5}} + 4162,44q_m^2 \cdot 10^{-3} + 0,4815p q_m \quad (13)$$

-gdzie:

p - ciśnienie helu, [MPa],

\dot{q}_m - wydatek energetyczny, [MET],

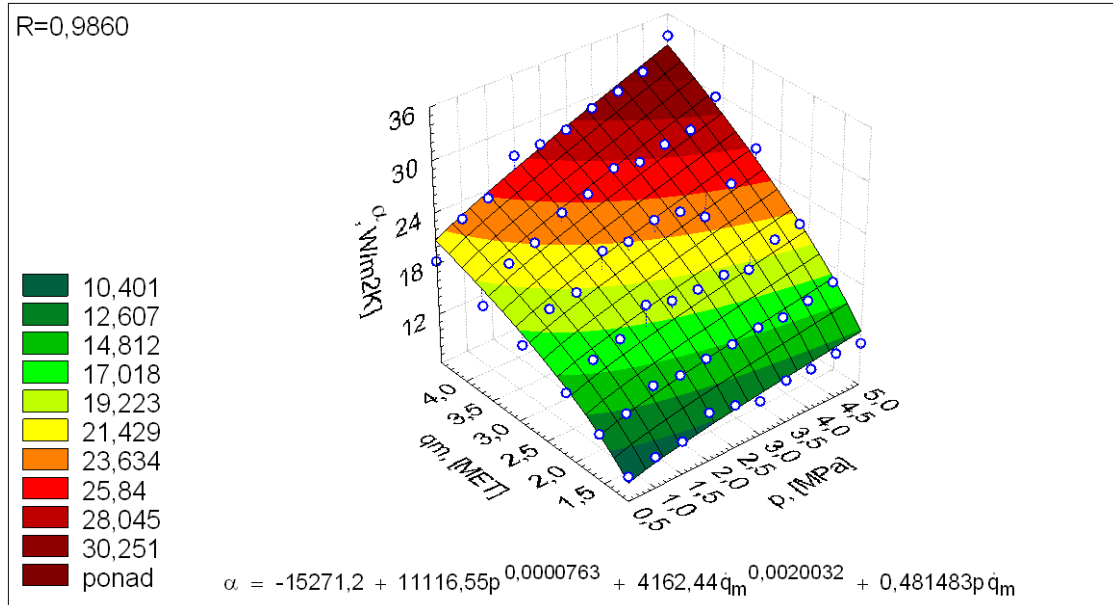
α - współczynnik przejmowania ciepła, [W/m²K].



Rys.3 Zależność liczby Nusselta od ciśnienia helu i liczby Rayleigha

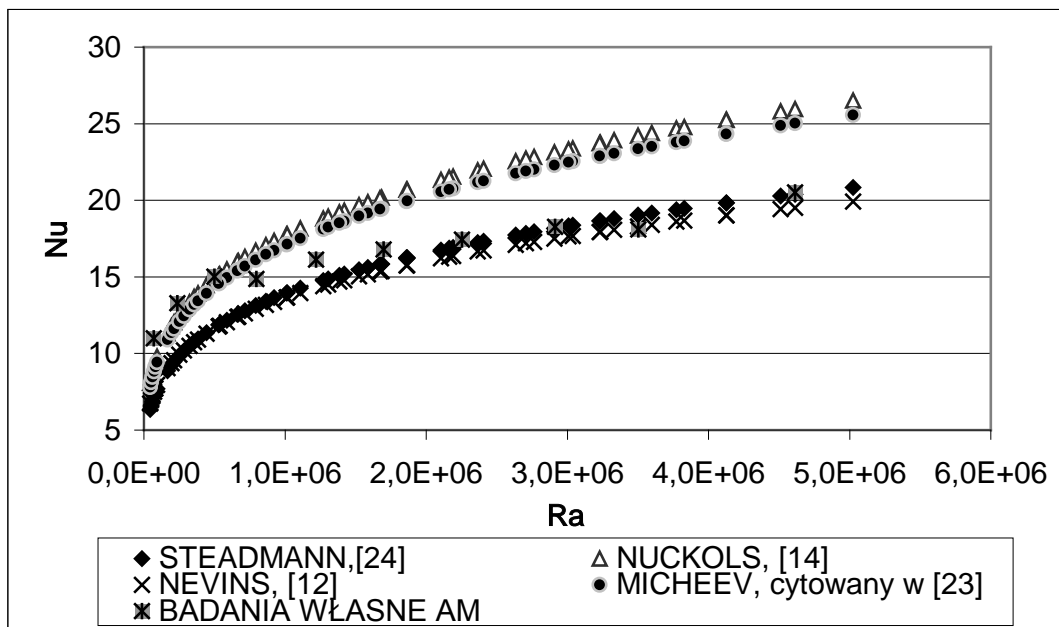
Równanie (13) można stosować w zakresie ciśnienia helu $p=0,5-5$ MPa oraz symulowanego wydatku energetycznego $\dot{q}_m = 1 \div 4,5$ MET. Na Rys.4 przedstawiono zależność współczynnika przejmowania ciepła od ciśnienia helu i symulowanego wydatku energetycznego.

Przy małym wydatku energetycznym $\dot{q}_m \cong 1$ MET zmiana ciśnienia helu w zakresie $p= 0,5 -5,0$ MPa powoduje wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła o około 25% , natomiast przy bardzo dużym wydatku $\dot{q}_m \cong 4,5$ MET wzrost ten wynosi około 83%. Natomiast przy niższym ciśnieniu helu $p=0,5$ MPa, gdy wydatek energetyczny zmieniał się w zakresie $\dot{q}_m = 1 \div 4,5$ MET wartość współczynnika przejmowania ciepła zwiększyła się dwukrotnie, a przy ciśnieniu $p=5$ MPa ponad 3 -krotnie. Przeprowadzone badania wykazały wpływ ciśnienia helu na wzrost intensywności wymiany ciepła przez konwekcję swobodną z powierzchni pionowego walca. Błąd względny określania współczynnika przejmowania ciepła w całym zakresie badań wynosił $\varepsilon = 1,6 \div 4,1\%$. Z analizy wynika, że błąd względny określania współczynnika przejmowania ciepła w niewielkim stopniu wzrasta wraz z ciśnieniem helu, natomiast istotny jest wpływ mocy grzania, symulującej wydatek energetyczny nurka. W całym badanym zakresie ciśnienia helu błąd względny pomiaru współczynnika przejmowania ciepła wzrasta w miarę zmniejszania się mocy grzania.



Rys.4 Zależność współczynnika przejmowania ciepła od ciśnienia helu i symulowanego wydatku energetycznego.

Interesujące jest porównanie uzyskanych wyników badań z wynikami obliczeń uzyskanych na podstawie korelacji dla pionowych cylindrów, przedstawionych w pracach, między innymi, autorów Nevins'a [12], Nuckols'a [14], Steadmann'a [24] oraz Micheeva, cytowanego przez autora pracy [23]. Na Rys.5 przedstawiono graficzne porównanie uzyskanych wyników badań z wynikami obliczeń uzyskanych na podstawie równań uogólnionych podanych przez wymienionych wcześniej autorów.



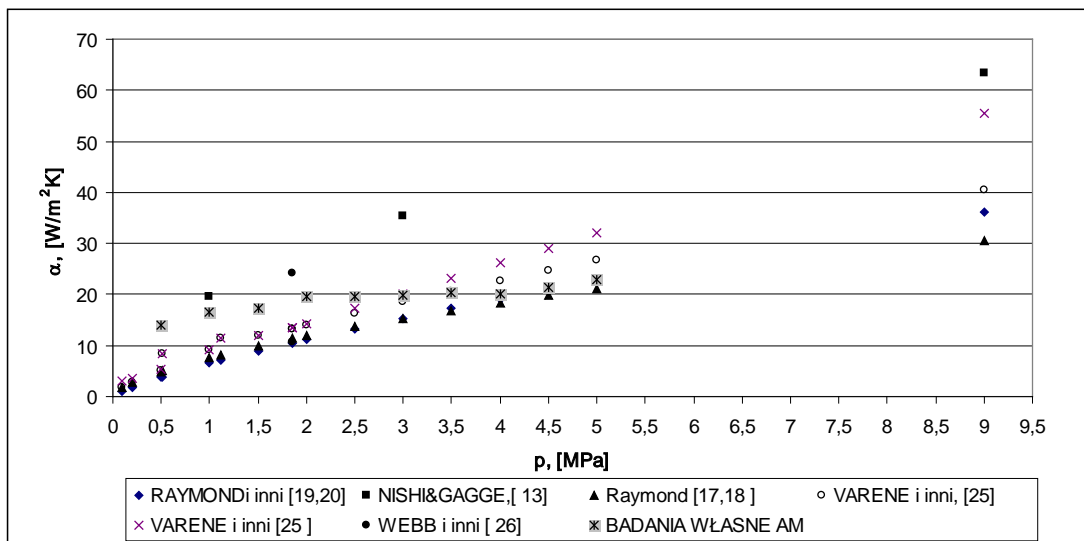
Rys. 5 Porównanie uzyskanych wyników badań konwekcji swobodnej z powierzchni pionowego walca z wynikami z literatury .

Z przebiegu krzywych na Rys.5 wynika, że uzyskane wyniki badań w obszarze liczb Rayleigha $Ra < 5 \cdot 10^5$ dosyć dobrze korelują z wynikami otrzymanymi

z zależności autora [14] oraz Micheev'a, cytowanego przez [23], natomiast w zakresie liczb Rayleigh'a $5 \cdot 10^5 < Ra < 1,7 \cdot 10^6$ mieszczą się pomiędzy wynikami autorów prac [12,14,24] oraz autora cytowanego w pracy [23]. W obszarze liczba Rayleigha $Ra > 1,7 \cdot 10^6$ wyniki badań dość dobrze korelują z wynikami uzyskanymi przez autorów [12,24].

Na Rys.6 przedstawiono zależność współczynnika przejmowania ciepła od ciśnienia, uzyskaną z badań własnych w atmosferze helu oraz z obliczeń [18] i badań innych autorów, które przeprowadzono w atmosferze o dużym udziale helu [17,18,19,20,25,26]. Wyniki uzyskane przez wymienionych autorów wykazują również na duży wpływ ciśnienia na wartość współczynnika przejmowania ciepła. We wszystkich analizowanych przypadkach wraz ze wzrostem ciśnienia helu następuje wzrost współczynnika przejmowania ciepła. Na Rys.6 widać pewną rozbieżność między wynikami, uzyskanymi przez autorów pracy [13] a wynikami pozostałych autorów, co wynika z różnych warunków przeprowadzania badań.

W obszarze ciśnienia helu do $p = 2,5$ MPa eksperymentalnie określony współczynnik przejmowania ciepła z powierzchni walca jest wyższy od wyników uzyskanych przez autorów [17,18,19,20,25,26], co można uzasadnić tym, że badania były przeprowadzane w czystym helu. Przy ciśnieniu helu $p=1$ MPa uzyskana wartość współczynnika przejmowania ciepła jest niższa o ok.16% od wartości podanej przez autorów [13]. W obszarze ciśnienia $p>2,5$ MPa wyniki badań dosyć dobrze korelują z wynikami badań [17,18,19,26] natomiast są niższe od wyników, które uzyskali autorzy [25].



Rys. 6 Porównanie eksperymentalnie uzyskanej zależności współczynnika przejmowania ciepła od ciśnienia z danymi literaturowymi.

WNIOSKI

Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań można zawrzeć w następujących wnioskach:

- opracowano równanie uogólnione umożliwiające obliczanie liczby Nusselta w funkcji liczby Rayleigha, w zakresie $4,3 \cdot 10^4 \leq Ra \leq 5,0 \cdot 10^6$ oraz bezwzględnego ciśnienia helu w zakresie $p=0,5-5$ MPa,

- opracowano korelację słuszną w zakresie ciśnienia helu $p=0,5-5$ MPa oraz symulowanego wydatku energetycznego $\dot{q}_m = 1 \div 4,5$ MET, umożliwiającą obliczanie współczynnika przejmowania ciepła w zależności od ciśnienia helu i wydatku energetycznego nurka,
- stwierdzono istotny wpływ wzrostu ciśnienia helu na wzrost intensywności konwekcji swobodnej z powierzchni pionowego walca,
- stwierdzono, że przy stałym ciśnieniu helu zmiana wydatku energetycznego w zakresie $\dot{q}_m = 1 \div 4,5$ MET powoduje wzrost konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła, przy czym wpływ ten jest zdecydowanie większy przy wyższym ciśnieniu helu,
- uzyskano dosyć dobrą zgodność wyników badań dostępnymi danymi z literatury, co pozwala sądzić o poprawności przyjętej metodyki badań,
- ponieważ badania przeprowadzono jedynie w atmosferze hiperbarycznego helu, wobec tego należałoby jeszcze przeprowadzić badania konwekcyjnej wymiany ciepła podczas ekspozycji tlenowo-helowych z udziałem ludzi,
- pomimo tego, że przeprowadzone badania dotyczyły uproszczonego modelu konwekcyjnej wymiany ciepła w środowisku hiperbarycznego helu, to jednak uzyskane wyniki pozwalają na uściślenie obliczania strat konwekcyjnych strat ciepła, a tym samym na dokładniejsze określenie temperatury komfortu cieplnego w środowisku hiperbarycznym, co ma duże znaczenie ergonomiczne.

LITERATURA

1. Advances in heat transfer- Ed. Irvine T.F. .Jr.: Hartnett J.P. vol.11, 1975, Academic Press, New York,
2. Andjulovici A., Georgescu S.:Komfort cieplny w budynkach, Arkady,Warszawa 1971,
3. Bejan A.:Convection heat transfer, New York, J.Wiley and Sons,1997,
4. de Dear R.J., Arens E., Hui Z., Oguro M.: Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments,Int.J.Biometeorol., 40, 1997, s.141-156,
5. Fanger P.O- Komfort cieplny. Arkady, Warszawa, 1974,
6. Kłós R. - Aparaty nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego, 112-143,,Wyd.KOOPgraf S.C., Poznań 2000,
7. Kozak T. Majchrzycka A. Sobański: Wpływ ciśnienia i temperatury na konwekcyjną wymianę ciepła w gazach. Sympozjum „Zagadnienia energetyczne w mechanice”, Bielsko-Biała, 11-15 maja 1987, s.139-145,
8. Koščev W.S., Razran M.A. , Ter-Akopian G.G.- Ocenka estestvennoj konwekcji w giperbaričeskich uslovijach, Gigiena i san, Moskwa, 1981,s.20-22,
9. Majchrzycka A.: Temperatura komfortu cieplnego w środowisku hiperbarycznym, praca doktorska, Politechnika Szczecińska ,1982,
10. Marszałek A.: Zastosowanie manekinów termicznych do badania komfortu cieplnego człowieka, Bezpieczeństwo Pracy, 10, , 20-22, 2002, s.20-22,
11. Morgan V.T.: The overall heat transfer smooth circular cylinders. Advances in heat transfer., vol.11,Academic Press, New York, 1975, s.199-264,
12. Nevins R.G., Holm F.W., Advani G.H.: Heat loss analysis for deep diving oceanauts.ASME Publications 65-WA/HT-25, New York, 1965,s.2-11,
13. Nishi Y., Gagge A.P.: Effective temperature scale useful for hypo-hyperbaric environments Aviat.Space and Environm. Med. 48, n2, 1977, s.97-107,

14. Nuckols M.L., Tucker W.C, Sarich A.J. –Diving and hyperbaric applications, ed. Simon & Schuster, USA, 1996,
15. Praca zbiorowa: Problemy medycyny i techniki nurkowej. Gdańsk, 20-27, 1997, Wyd. Okrętownictwo i Żegluga,
16. Problemy kosmiczkiej biologii, red. Cernigorski V.N., Wyd.Nauka, Moskwa 1980,
17. Raymond L.: Physiologic mechanisms of maintaining thermal balance in high pressure environments. , J .Hydronautics vo.1, No.2 , October 1967,102-107,
18. Raymond L.W.: Temperature problems in multiday exposures to high pressures in the sea. Thermal balance in hyperbaric atmosphere. III-rd Symposium on Under Physiology, Baltimore 1967,s.138-146,
19. Raymond L.W., Thalmann E., Lindgren G. at al. Thermal homeostasis of resting man in helium oxygen at 1-50 atmospheres absolute, Undersea Biomed.Res3, 1975, s.51-67,
20. Shilling C.W., Werts M., Schandelmeier N.R.: The underwater handbook. Plenum Press, New York, London 1976. Sobański R., Termodynamika mieszanin oddechowych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 213 , Szczecin 1982,
21. Sobański R., Termodynamika mieszanin oddechowych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 213 , Szczecin 1982,
22. Sobański R., Natural convection in compressed gases. Bulletin de L'Academie des Sciences, Sèrie des sciences techniques, vol. .XXIX, No.11-12, 1981, s.25-31,
23. Stachel A.A: Problematyka ciepłno-przepływowa obiektów do nurkowania głębinowego, Prace Naukowe PS Nr 584, Katedra Techniki Ciepłej Nr 8, Szczecin 2006,
24. Steadman R.: The free-convective anomaly, Journal of Applied Science. 87(1) 54, 2002,s.54-73,
25. Varène P., Timbal J., Vieillefond H., Guenard H., L'Huiller J.: Energy balance of man in simulated dive from 1,5 to 31 ATA., Proceedings of the Fifth Symposium on Underwater Physiology, Augustm Freeport Bahamas, 1972,ss.755-763,
26. Webb P., Troutman S.J.Jr., Fratalli V., Dwyer J., Moore T.O., Morlock J.F, Smith R.M., Ohta Y. : Energy balance in saturation diving, Report ADA041834 Naval Medicine Research and Development Command, Bethesda, Maryland, 1976,
27. Webb P.: Body heat loss in undersea gaseous environments. Aerospace Medicine, Nov. 1970.

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.