

WPŁYW SPRAWNOŚCI PSYCHOMOTORYCZNEJ ORAZ TEMPERATURY WEWNĘTRZNEJ CIAŁA NA WYDOLNOŚĆ FIZYCZNĄ U SPORTOWCÓW

IMPACT OF PSYCHOMOTOR PERFORMANCE AND CORE BODY TEMPERATURE ON EXERCISE PERFORMANCE IN ATHLETES

Robert Skalik^{1,2}, Anna Janocha¹, Wojciech Kustrzycki^{1,3}

¹ Politechnika Wrocławska / Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Wydział Medyczny, Katedra Nauk Przedklinicznych, Farmakologii i Diagnostyki Medycznej / Faculty of Medicine, Department of Preclinical Sciences, Pharmacology and Medical Diagnostics

² Centrum Medyczne „PZU Zdrowie” / Medical Centre „PZU Health”, Wrocław, Poland

³ Dolnośląski Ośrodek Leczenia Chorób Serca im. prof. Zbigniewa Religi MEDINET / Heart Centre MEDINET, Wrocław, Poland
Oddział Kardiologii / Department of Cardiac Surgery

INFORMACJE KLUCZOWE

- Sprawność psychomotoryczna wpływa na parametry wydolnościowe.
- Wskaźnik neurotermometaboliczny jest wiarygodnym wskaźnikiem wydolności fizycznej.
- Temperatura wewnętrzna ciała w trakcie intensywnego wysiłku wpływa na sprawność psychomotoryczną.

HIGHLIGHTS

- Psychomotor performance affects exercise capacity.
- Neurothermometabolic index is a reliable marker of exercise capacity.
- Core body temperature during acute exercise affects psychomotor performance.

STRESZCZENIE

Wstęp: Rozwój badań nad fizjologią wysiłku w ostatnich kilkunastu latach pozwolił na lepsze zrozumienie mechanizmów wpływających na wydolność fizyczną u sportowców. Mimo to przyczyny nietolerancji wysiłku fizycznego u sportowców nie są w pełni jasne. Wydolność fizyczna jest procesem złożonym i niezależnie od prawidłowego funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego może podlegać istotnym zmianom pod wpływem układu nerwowego oraz mechanizmów termoregulacyjnych. Celem niniejszej pracy jest ocena związków pomiędzy sprawnością psychomotoryczną (SP) i temperaturą wewnętrzną ciała (*core body temperature* – Tc) a wybranymi parametrami wydolnościowymi w teście spiroergometrycznym (sercowo-płucny test wysiłkowy, *cardiopulmonary exercise testing* – CPX) oraz wartości diagnostycznej wskaźnika neurotermometabolicznego (*neurothermometabolic index* – NTMI) jako nowego markera wydolności fizycznej u sportowców. **Materiał i metody:** W badaniu uczestniczyło 44 zdrowych sportowców. U wszystkich przeprowadzono CPX w celu oceny parametrów wentylacyjnych, tj. maksymalnego poboru tlenu przez tkanki (*maximum oxygen consumption* – $\dot{V}O_{2max}$), wentylacji minutowej (*minute ventilation* – VE), ekwiwalentu wentylacyjnego dla dwutlenku węgla na progu beztlenowym (*ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold* – $VECO_{2AT}$), wydalania dwutlenku węgla podczas maksymalnego wysiłku (*maximal carbon dioxide output* – $\dot{V}CO_{2max}$) i progu beztlenowego, ocenę SP (średni czas reakcji złożonej na bodziec świetlny, liczba poprawnych i błędnych odpowiedzi na bodziec świetlny) przed i bezpośrednio po CPX oraz pomiar Tc w CPX. Na podstawie uzyskanych wartości Tc podczas maksymalnego wysiłku, wartości poboru tlenu na progu beztlenowym i średniego czasu reakcji na bodziec świetlny zmierzonego po CPX wyznaczono NTMI. **Wyniki:** Stwierdzono istotny związek pomiędzy Tc podczas maksymalnego wysiłku a SP ocenianą zaraz po zakończeniu CPX. Potwierdzono istotny związek pomiędzy SP przed CPX a $VECO_{2AT}$ w CPX. Sprawność psychomotoryczna oceniona po zakończeniu CPX była istotnie związana z $\dot{V}CO_{2max}$. Wskaźnik neurotermometaboliczny był istotnie związany z $\dot{V}O_{2max}$, VE i $\dot{V}CO_{2max}$ w CPX. **Wnioski:** Wyniki badań potwierdziły istotny związek pomiędzy SP, obciążeniem termicznym i parametrami wentylacyjnymi w CPX u sportowców. Wskaźnik neurotermometaboliczny jest wartościowym markerem wydolności fizycznej u sportowców. Med Pr Work Health Saf. 2025;76(3):179–192

Słowa kluczowe: wydolność fizyczna, ośrodkowy układ nerwowy, sportowcy, sprawność psychomotoryczna, temperatura wewnętrzna ciała, spiroergometria

ABSTRACT

Background: The development of research on exercise physiology in the last several years has allowed to better understand mechanisms affecting exercise performance in athletes. Despite this, the causes of exercise intolerance in athletes are not fully elucidated. The exercise

performance is a complex process and regardless of the proper functioning of the cardiovascular system may be subject to significant changes under the influence of nervous system and thermoregulatory mechanisms. The purpose of this work is to assess the relationship between psychomotor performance (*sprawność psychomotoryczna* – SP), core body temperature (Tc) and exercise performance parameters as measured by spirometry (cardiopulmonary exercise testing – CPX) and the diagnostic accuracy of neurothermometabolic index (NTMI) as a new marker of exercise performance in athletes. **Material and Methods:** Forty-four healthy athletes participated in the study. Each of the examined athletes underwent CPX for the assessment of ventilatory parameters (maximal oxygen consumption – $\dot{V}O_{2\max}$, minute ventilation – VE, ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold – $\dot{V}E_{CO_2AT}$, maximal carbon dioxide output – $\dot{V}CO_2$ and anaerobic threshold), SP tests (average reaction time to light stimulus, the number of correctly received light stimuli, number of missed light stimuli) before and immediately after CPX. In addition, Tc was continually measured during CPX. Following, NTMI was calculated using Tc during the maximum exercise, oxygen consumption at anaerobic threshold and average reaction time to light stimulus as measured after CPX. **Results:** A significant relationship was found between Tc during the maximum effort in CPX and SP after CPX. A significant relationship between SP before CPX and $\dot{V}E_{CO_2AT}$ during CPX was also confirmed. Psychomotor performance shortly after CPX was also significantly related to $\dot{V}CO_2$. In addition, NTMI was significantly associated with CPX parameters. **Conclusions:** The study results confirmed the relevant relationship between SP, Tc during the maximum exercise and ventilatory parameters as measured by CPX in athletes. Neurothermometabolic index is a reliable marker of exercise performance in athletes. *Med Pr Work Health Saf.* 2025;76(3):179–192

Key words: exercise performance, central nervous system, athletes, psychomotor performance, core body temperature, spirometry

Autor do korespondencji / Corresponding author: Robert Skalik, Politechnika Wrocławska, Wydział Medyczny, Katedra Nauk Przedklinicznych, Farmakologii i Diagnostyki Medycznej, ul. Hoene-Wrońskiego 13c, 58-376 Wrocław, e-mail: robert.skalik@pwr.edu.pl

Nadesłano: 27 lutego 2025, zatwierdzono: 13 czerwca 2025

WSTĘP

W trakcie wysiłku fizycznego produkcja ciepła przez organizm człowieka istotnie się zwiększa, co jest wynikiem nasilenia procesów metabolicznych w organach i układach zaangażowanych w wysiłek fizyczny, w tym w mięśniach szkieletowych (oddechowych oraz kończyn dolnych i górnych). Wydolność fizyczna jest procesem złożonym i niezależnie od prawidłowego funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego może podlegać istotnym zmianom pod wpływem takich czynników jak sprawność działania układów nerwowego i mięśniowo-szkieletowego, intensywność przemian metabolicznych w trakcie wysiłku (przemiany tlenowe i beztlenowe) oraz efektywność układów hormonalnego i termoregulacji [1,2].

W ostatnich kilkunastu latach dynamiczny rozwój badań nad fizjologią wysiłku oraz patofizjologią przewlekłej niewydolności serca pozwolił na lepsze zrozumienie mechanizmów wpływających na objawy zmęczenia i upośledzenie wydolności fizycznej u sportowców oraz w przebiegu różnych schorzeń kardiologicznych, w tym szczególnie u chorych z niewydolnością układu krążenia [1,3–5]. Przyczyny zmęczenia lub nietolerancji wysiłku fizycznego zarówno u osób uprawiających różne dyscypliny sportowe, jak i w przebiegu przewlekłej niewydolności serca nie są jednak jeszcze w pełni poznane [6,7]. Utrzymująca się wysoka śmiertelność przy przewlekłej niewydolności serca, mimo dostępności licznych nowoczesnych metod leczenia farmakologicznego i inwazyjnego, jest dowodem na konieczność poszukiwania nowych mechanizmów regulujących działanie układu krążenia [7].

W piśmiennictwie można znaleźć dowody potwierdzające znaczący związek pomiędzy działaniem ośrodkowego układu nerwowego (OUN) (kora mózgowa, struktury podkorowe), mechanizmami termoregulacyjnymi, układem nerwowo-mięśniowym, sprawnością psychomotoryczną (SP) (funkcjami poznawczymi) a wydolnością fizyczną organizmu człowieka i nasileniem zmęczenia lub duszności w trakcie wysiłku [8–12]. Podwzgórze jako główny ośrodek regulacji temperatury wewnętrznej ciała (*core body temperature* – Tc) człowieka i część OUN jest w anatomicznym oraz funkcjonalnym związku z korą mózgową, ośrodkami regulacji układów sercowo-naczyniowego i oddechowego oraz układem mięśniowo-szkieletowym [13]. Upośledzenie działania jakiegokolwiek elementu tego swoistego systemu naczyń połączonych może przyczynić się do zmniejszenia wydolności fizycznej człowieka i nasilenia objawów zmęczenia zarówno u zdrowych sportowców, jak i chorych z niewydolnością serca.

Zgodnie z prawem van't Hoffa, które określa zmianę szybkości reakcji w zależności od temperatury, jej wzrost o 10 K powoduje 2–4-krotne przyspieszenie reakcji chemicznych [14]. Wynika to ze wzrostu aktywności enzymów metabolicznych pod wpływem zwiększenia temperatury. Na tej podstawie można przypuszczać, że stopień aktywacji układów nerwowego, sercowo-naczyniowego, oddechowego i mięśniowo-szkieletowego pod wpływem jednorazowego wysiłku fizycznego może być również zależny od dynamiki wzrostu Tc w trakcie wysiłku fizycznego oraz związanej z nią intensywności reakcji enzymatycznych zachodzących w układach zaangażowanych w wysiłek. Wiadomo również, że nadmierne obciążenie

termiczne (*heat stress*) istotnie zmniejsza aktywność kinazy pirogronianowej mięśni szkieletowych [15]. Może się to przyczyniać do zmniejszenia produkcji energii (adenozynotrifosforanu, *adenosine triphosphate* – ATP) przez mięśnie szkieletowe, potrzebnej do ich efektywnego skurczu w trakcie wysiłku fizycznego, a w dalszej kolejności do ich szybszego zmęczenia (*muscle fatigue*), zmniejszenia maksymalnej wydolności tlenowej organizmu (VO_2max) oraz wcześniejszego wystąpienia objawów nietolerancji wysiłku zarówno u sportowców, jak i chorych z przewlekłą niewydolnością serca.

Pobór tlenu przez mięśnie szkieletowe na progu bez-tlenowym w trakcie wysiłku (*oxygen consumption at anaerobic threshold* – VO_2AT) jest jednym z głównych czynników determinujących siłę ich skurczu i może być modyfikowany przez obciążenie termiczne w trakcie wysiłku. Ponadto niektórzy badacze zwracają uwagę na znaczenie czynnika mentalnego (np. depresji), zaburzeń metabolicznych (np. cukrzycy) i związanych z nimi zaburzeń funkcji poznawczych w ocenie stopnia nasilenia duszności lub zmęczenia w trakcie wysiłku fizycznego u chorych z przewlekłą niewydolnością serca, u sportowców i u osób w podeszłym wieku [16]. Należy pamiętać, że u części aktywnych sportowców, zarówno zawodowych, jak i amatorów, obserwowano wymienione zaburzenia.

Celem niniejszej pracy była ocena związków pomiędzy SP, Tc a wybranymi parametrami wentylacyjnymi w trakcie testu spiroergometrycznego (*cardiopulmonary exercise testing* – CPX) u sportowców.

MATERIAŁ I METODY

W badaniu uczestniczyło 44 zdrowych sportowców (mężczyźni w wieku $M \pm \text{SD}$ 25 ± 3 lat) uprawiających rekreacyjnie biegi długodystansowe (10 km 2 razy w tygodniu od $M \pm \text{SD}$ 8 ± 2 lat). Wszyscy ochotnicy zostali dokładnie poinformowani o celach i metodyce badania oraz podpisali zgodę na uczestnictwo. Każdy został poddany szczegółowemu badaniu podmiotowemu i przedmiotowemu w kierunku chorób układów sercowo-naczyniowego i oddechowego oraz innych schorzeń mogących utrudniać przeprowadzenie testów wydolnościowych. Z badania wykluczono osoby palące tytoń. U każdego z badanych przeprowadzono ocenę parametrów wentylacyjnych w trakcie CPX, SP i Tc w spoczynku przed badaniem wydolnościowym oraz w jego trakcie. Zastosowane procedury były zgodne ze standardami komisji bioetycznych (instytucjonalnych lub regionalnych) i z Deklaracją helsińską (wersja z 2013 r.).

Protokół badania został zaakceptowany przez komisję bioetyczną (nr KB – 487/2007).

Wszyscy uczestnicy zostali poddani badaniu wydolnościowemu (CPX) na bieżni ruchomej z ciągłym zapisem elektrokardiograficznym i ciągłym pomiarem Tc. Ponadto poproszono ich o wykonanie testów oceniających SP (czas reakcji złożonej na bodziec świetlny) zarówno przed CPX, jak i tuż po jego zakończeniu (do 1 min od zakończenia badania).

Test spiroergometryczny przeprowadzono za pomocą przenośnego zestawu do badań spiroergometrycznych (MES, START 2000M, Kraków, Polska) i zestawu do wykonywania elektrokardiograficznych prób wysiłkowych (bieżnia trackmaster TMX425 Full Vision Inc. oraz oprogramowanie X-SCRIBE II, Mortara Instrument, Inc. 2007, Milwaukee, Wisconsin, USA).

Badania wydolnościowe przeprowadzono na bieżni ruchomej według protokołu Bruce'a. Zastosowano go, ponieważ jest on często wykorzystywany w praktyce klinicznej i pozwala na wiarygodne wyznaczenie progu bez-tlenowego na podstawie parametrów oddechowych u osób zdrowych, sportowców i ludzi z istotnym upośledzeniem tolerancji wysiłku. Ponadto protokół ten był już stosowany przez innych badaczy w trakcie CPX do oceny wydolności fizycznej u sportowców [17].

Wszyscy badani sportowcy zostali poproszeni o powstrzymanie się od spożywania napojów alkoholowych i tych zawierających kofeinę oraz od wykonywania intensywnych ćwiczeń fizycznych na 2 dni przed planowanymi testami. Każdy z nich w dniu badania w godzinach porannych zjadł lekki posiłek w celu uniknięcia ewentualnej hipoglikemii powysiłkowej. Test spiroergometryczny przeprowadzano zawsze o godzinie 9:00 rano bez wstępnej rozgrzewki. Na podstawie dotychczasowych badań wykazano, że aktywna rozgrzewka przed wysiłkiem fizycznym może powodować wzrost temperatury skóry i szybszą aktywację gruczołów potowych jeszcze przed rozpoczęciem właściwego wysiłku, a to może wpływać na obiektywną ocenę zmian Tc rejestrowanej podczas badania wydolnościowego [18].

Tuż przed rozpoczęciem CPX u każdego badanego wykonywano spoczynkowe badanie elektrokardiograficzne. W trakcie testu wysiłkowego stale monitorowano czas jego trwania, częstość skurczów serca na minutę i zapis elektrokardiograficzny w 12 standardowych odprowadzeniach. Co 3 min wykonywano pomiar ciśnienia tętniczego za pomocą manometru zegarowego. W trakcie CPX rejestrowano w trzyminutowych odstępach następujące parametry: częstość oddechów na minutę (*breath frequency* – BF), wentylację minutową (*mi-*

nute ventilation – VE), pobór tlenu przez tkanki (VO_2) i wydalanie dwutlenku węgla (VCO_2).

Dodatkowo na podstawie wartości parametrów wentylacyjnych (VO_2 , VCO_2) wyznaczono próg beztlenowy. Próg beztlenowy jest to moment w trakcie wysiłku, gdy wydalanie dwutlenku węgla przez płuca (VCO_2) zaczyna być wyższe w stosunku do VO_2 ($\text{VCO}_2/\text{VO}_2 > 1$, *gas exchange threshold*). Na tej podstawie uznano, że próg beztlenowy został osiągnięty przez badanych sportowców, gdy zarejestrowano wartość $\text{VCO}_2/\text{VO}_2 > 1$. Istotny wzrost VCO_2 powyżej wartości VO_2 ($\text{VCO}_2/\text{VO}_2 > 1$) następuje z nieznacznym opóźnieniem w stosunku do progu mleczanowego. Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić porównywalną wartość oceny progu beztlenowego przy użyciu parametrów wentylacyjnych i poprzez pomiar stężenia mleczanów we krwi w trakcie wysiłku [19,20].

Na podstawie analizy uzyskanych wartości VO_2 wyznaczono $\text{VO}_{2\text{max}}$, przyjmując za wartość maksymalną badanego parametru ostatni uzyskany jego pomiar, po którym nie następowało dalsze zwiększenie jego wartości w trakcie CPX (w 5 kolejnych pomiarach nie obserwowano istotnej zmiany wartości VO_2 – faza *plateau*). Dodatkowo w analizie zebranego materiału uwzględniono wartość $\text{VO}_{2\text{AT}}$, VE podczas maksymalnego wysiłku oraz ekwiwalentu wentylacyjnego dla dwutlenku węgla na progu beztlenowym (*ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold* – $\text{VECO}_{2\text{AT}}$).

Przed każdym CPX wykonywano kalibrację gazową i objętościową w celu zapewnienia wiarygodności uzyskiwanych danych. Wszystkie badania wysiłkowe przeprowadzono we względnie stałych i neutralnych warunkach temperatury oraz wilgotności ($M \pm SD$ $22 \pm 1^\circ\text{C}$, wilgotność względna 50%).

Badania psychomotoryczne (ocena czasu reakcji złożonej na bodziec świetlny) przeprowadzono u wszystkich badanych dwukrotnie – tuż przed CPX i po jego zakończeniu. Sprawność psychomotoryczną oceniano natychmiast po zakończeniu CPX, gdy wartości badanych parametrów wentylacyjnych nie odbiegały jeszcze istotnie od wartości zanotowanych podczas maksymalnego wysiłku fizycznego. Na tej podstawie można założyć, że warunki oceny parametrów SP po próbie wysiłkowej były takie same lub bardzo zbliżone do tych podczas maksymalnego wysiłku fizycznego.

Do przeprowadzenia badań psychomotorycznych użyto miernika czasu reakcji MCR-2001E (Psychotronics, Tychy, Polska). Każdy badany został poproszony o natychmiastowe naciśnięcie 1 z 10 przycisków na konsoli miernika czasu reakcji MCR-2001E w momencie,

gdy zostanie on podświetlony. Kolejność zapalania się światła na przyciskach była przypadkowa. Każdy test trwał 30 s, a częstotliwość, z jaką zapalały się przyciski, wynosiła 125 impulsów na minutę. Uzyskane dane były automatycznie poddawane analizie komputerowej. W dalszej analizie uwzględniano następujące parametry: średni czas reakcji na bodziec świetlny oraz liczbę poprawnych i błędnych odpowiedzi na bodziec świetlny (odpowiedź na bodziec świetlny uznawano za błędną, jeżeli badany nie nacisnął podświetlonego przycisku lub przycisnął niewłaściwy). Uczestnicy nie byli wcześniej poddani treningowi przygotowawczemu do wykonywania badań psychomotorycznych ani nie brali udziału w tego typu testach (informację o sposobie przeprowadzenia badania psychomotorycznego podawano w dniu testu wydolnościowego, tuż przed jego rozpoczęciem).

Temperatura wewnętrzna ciała była stale rejestrowana w trakcie całego CPX za pomocą termodetektora z czujnikiem (rejestrator temperatur firmy MES, Kraków, Polska) umieszczonego w kanale zewnętrznym lewego ucha, w pobliżu błony bębenkowej. Użyty w badaniu aparat rejestrował zmiany T_c już o $0,01^\circ\text{C}$. Po zakończeniu zapisu dane z rejestratora były przesyłane do komputera z programem do analizy zmian T_c . W dalszej analizie użyto wartości T_c zarejestrowane na koniec każdego z trzypięciominutowych etapów badania wysiłkowego (wg protokołu Bruce'a) oraz wartości T_c odnotowane podczas maksymalnego wysiłku fizycznego u każdej z badanych osób.

W celu oceny wpływu związków pomiędzy obciążeniem termicznym w trakcie maksymalnego wysiłku (T_c na szczycie wysiłku), SP i wydolnością tlenową na progu beztlenowym na wybrane parametry wentylacyjne podczas maksymalnego wysiłku wyznaczono dodatkowo wskaźnik neurotermometaboliczny (*neurothermometabolic index* – NTMI). U podstaw fizjologicznych wyznaczenia tego wskaźnika leży założenie, że wydolność fizyczna człowieka jest wypadkową 3 głównych parametrów fizjologicznych, tj. $\text{VO}_{2\text{AT}}$, odzwierciedlającego intensywność procesów oksydacyjnych zachodzących w mięśniach szkieletowych (oddechowce oraz kończyny dolne i górne) na progu beztlenowym w trakcie wysiłku, obciążenia termicznego w trakcie badania wysiłkowego ($T_{c\text{peak}}$) oraz SP (funkcja motorycznej kory mózgowej oraz sprawność przewodzenia bodźca elektrycznego z kory mózgowej motorycznej do pracujących mięśni szkieletowych w trakcie badania wysiłkowego) (rycina 1).

Na podstawie uzyskanych wartości $\text{VO}_{2\text{AT}}$ w trakcie badania wydolnościowego, $T_{c\text{peak}}$ i średniego czasu reak-

cji na bodziec świetlny ocenianego natychmiast po zakończeniu wysiłku obliczono wartość NTMI, dzieląc uzyskaną wartość VO_2AT przez sumę $T_{c_{peak}}$ i średniego czasu reakcji na bodziec świetlny po zakończeniu wysiłku (*average reaction time to light stimulus as measured shortly after spirometry* – ART2):

$$NTMI = VO_2AT / (T_{c_{peak}} + ART2) \quad (1)$$

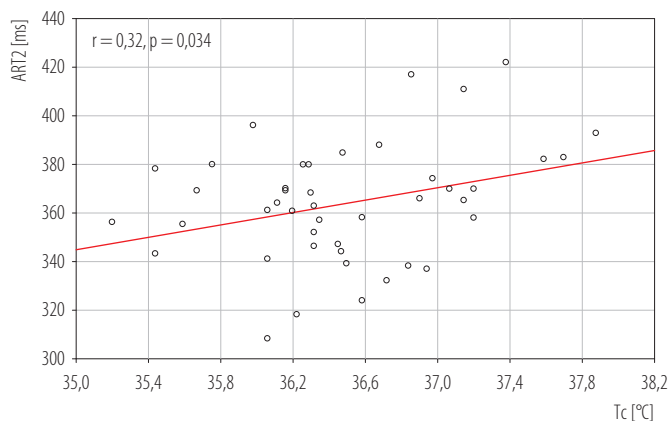
Do wyznaczenia wartości w NTMI użyto VO_2AT , ponieważ parametr ten najlepiej odzwierciedla sprawność oksydacyjną mięśni szkieletowych sportowca w trakcie wysiłku. Maratończycy osiągają większą prędkość biegu na progu beztlenowym niż zawodnicy innych specjalności, dzięki czemu mogą wykonywać cały wysiłek, wykorzystując przemiany tlenowe [21].

Analizę statystyczną przeprowadzono przy wykorzystaniu komputerowego pakietu Statistica PL (StatSoft, ver. 6.0, Kraków, Polska). Uwzględnione zmienne miały rozkłady normalne. Dla poszczególnych zmiennych obliczono wartości średnie i odchylenia standardowe, co pozwoliło na zastosowanie metod parametrycznych. Średnie pomiędzy 2 okresami badań porównano testem t-Studenta dla prób powiązanych. Zmienność wartości cech (np. temperatury) w kolejnych okresach (9 pomiarów) badano za pomocą analizy wariancji z powtórzeniami. Test LSD (*least significant difference*) został użyty jako test *post hoc* do porównania średnich w kolejnych okresach badań. Związek liniowy pomiędzy cechami oceniano za pomocą współczynnika korelacji Pearsona i regresji liniowej. Hipotezy zero weryfikowano na poziomie istotności $p = 0,05$.

WYNIKI

Średnia T_c zmierzona w uchu zewnętrznym w spoczynku u badanych sportowców wynosiła $M \pm SD$ $35,81 \pm 0,56^\circ C$, co nie odbiegało istotnie od wartości fizjologicznych [22]. Temperatura wewnętrzna ciała mierzona w okolicy błony bębenkowej jest ok. $0,7^\circ C$ niższa od temperatury w odbytnicy (36 – $38^\circ C$) [22]. Wysiłek fizyczny w trakcie CPX spowodował istotne zmiany T_c do $M \pm SD$ $36,48 \pm 0,61^\circ C$ podczas maksymalnego wysiłku fizycznego w całej badanej grupie. U 20,45% uczestników projektu (9 osób) T_c podczas maksymalnego wysiłku fizycznego przekroczyła $37^\circ C$, przy czym u 2 osiągnęła prawie $38^\circ C$. Istotny wzrost T_c był odnotowywany już w 3 min CPX, kiedy osiągnęła ona wartość $M \pm SD$ $35,98 \pm 0,61^\circ C$.

U wszystkich sportowców badanie wysiłkowe przebiegało bez powikłań. Średni czas jego trwania wyno-



Rycina 1. Zależność pomiędzy temperaturą wewnętrzną ciała (*core body temperature* – T_c) podczas maksymalnego wysiłku fizycznego a średnim czasem reakcji na bodziec świetlny tuż po zakończeniu testu spiroergometrycznego (*average reaction time to light stimulus as measured shortly after spirometry* – ART2) wykonanego w grupie 44 sportowców w Pracowni Badań Wysiłkowych, Polska, 2008–2009 **Figure 1.** Relationship between core body temperature (T_c) during the maximum physical exercise and average reaction time to light stimulus as measured shortly after spirometry (ART2) performed in 44 athletes in Exercise Testing Laboratory, Poland, 2008–2009

sił 22 min. W tabeli 1 przedstawiono wartości ocenianych parametrów wydolnościowych. Średnia wartość VO_{2max} (z odchyleniem standardowym) wynosiła $M \pm SD$ $2,76 \pm 0,53$ l/min przy średniej wartości jednostki określającej koszt energetyczny wysiłku (*metabolic equivalent* – MET) $M \pm SD$ $11,43 \pm 1,81$ ml O_2 /min/kg. Średnia wartość VE podczas maksymalnego wysiłku fizycznego wyniosła $M \pm SD$ $85,28 \pm 21,56$ l/min przy prawidłowej średniej wartości $VECO_2AT$. Obserwowana średnia BF podczas maksymalnego wysiłku fizycznego w całej badanej grupie wynosiła ok. 35 oddechów na minutę. Średnia wartość stosunku czasu wdechu do wydechu podczas maksymalnego wysiłku fizycznego również była prawidłowa, co z istotnym prawdopodobieństwem pozwoliło dodatkowo wykluczyć ewentualne zwężenie w obrębie dróg oddechowych wywołane wysiłkiem fizycznym.

Badania psychomotoryczne wykonano u 44 sportowców. Średni czas reakcji na bodziec świetlny przed CPX (ART1) w całej tej grupie wyniósł $M \pm SD$ $388,8 \pm 27$ ms. Średni czas reakcji wkrótce po zakończeniu CPX w całej grupie badanej był istotnie krótszy w stosunku do pomiaru wyjściowego (ART1) i wyniósł $M \pm SD$ 364 ± 24 ms (ART2). Średnia liczba reakcji poprawnych na bodziec świetlny przed CPX (*number of correctly received light stimuli before spirometry* – NCRLS1) w całej omawianej grupie wyniosła $M \pm SD$ $52,5 \pm 8,3$. Średnia liczba reakcji poprawnych na bodziec świetlny wkrótce po zakończeniu CPX (NCRLS2) była istotnie większa ($p < 0,05$) i wyniosła $M \pm SD$ $57,63 \pm 5$. Średnia liczba reakcji błędnych na bodziec świetlny przed

Tabela 1. Średnie wartości badanych parametrów wydolnościowych uzyskanych w trakcie testu spiroergometrycznego wykonanego w grupie 44 sportowców w Pracowni Badań Wysiłkowych, Polska, 2008–2009

Table 1. Average values of the examined parameters during spiroergometry performed in 44 athletes in Exercise Testing Laboratory, Poland, 2008–2009

Zmienna Variable	Wartość Value (M±SD)
MET	11,43±1,81
BF	35,57±6,56
VE [l/min]	85,28±21,56
TI/TE	1,01±0,08
VO ₂ max [l/min]	2,76±0,53
VCO ₂ [l/min]	2,95±0,56
VO ₂ [ml/kg/min]	
VO ₂ /kg	40,2±6,35
VO ₂ AT	35,83±7,03
VECO ₂ AT	27,75±3,70

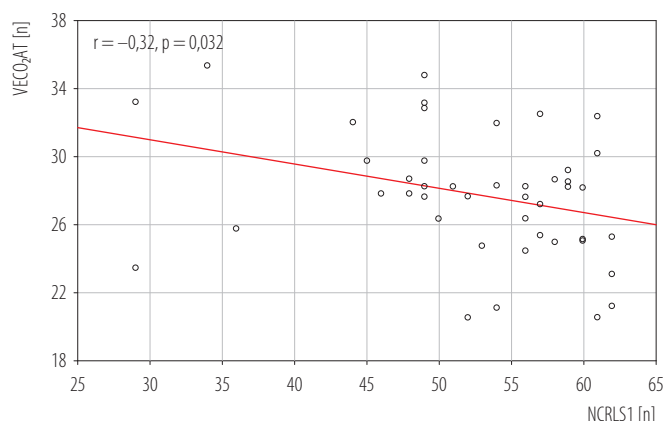
BF – częstość oddechów na minutę podczas maksymalnego wysiłku fizycznego / breath frequency during the maximum physical exercise, MET – jednostka określająca koszt energetyczny wysiłku, 1 MET = 3,7 ml O₂/min/kg / metabolic equivalent, TI/TE – stosunek czasu trwania wdechu do wydechu / inspiration to expiration time ratio, VCO₂ – wydalenie dwutlenku węgla podczas maksymalnego wysiłku fizycznego / carbon dioxide output during the maximum physical exercise, VE – wentylacja minutowa podczas maksymalnego wysiłku fizycznego / minute ventilation during the maximum physical exercise, VECO₂AT – ekwiwalent wentylacyjny dla dwutlenku węgla na progu beztlenowym / ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold, VO₂AT – pobór tlenu przez tkanki na progu beztlenowym / oxygen consumption at anaerobic threshold, VO₂/kg – maksymalny pobór tlenu przez tkanki w ml w ciągu 1 min na kg masy ciała / maximum oxygen consumption in ml per kg of body weight per 1 min, VO₂max – maksymalny pobór tlenu przez tkanki / maximum oxygen consumption.

CPX (RB1) wyniosła M±SD 10,4±8,3. Średnia liczba reakcji błędnych na bodziec świetlny po CPX (RB2) była natomiast istotnie niższa ($p < 0,05$) niż w badaniu wyjściowym (RB1) i wynosiła M±SD 4,79±4,76.

Stwierdzono statystycznie istotny związek liniowy pomiędzy wartością Tc zmierzonej podczas maksymalnego wysiłku w CPX a średnim czasem reakcji na bodziec świetlny (ART2) oraz liczbą poprawnych odpowiedzi na bodziec świetlny (NCRLS2) ($r = -0,30$, $p = 0,045$) zaraz po zakończeniu badania wysiłkowego (rycina 1).

Stwierdzono statystycznie istotną zależność liniową pomiędzy NCRLS1 a wartością VECO₂AT w CPX (rycina 2). Dodatkowo ART2 był istotnie związany z VCO₂ (rycina 3). Pozostałe badane parametry psychomotoryczne nie wykazywały statystycznie istotnego związku liniowego z analizowanymi parametrami wydolnościowymi.

W całej grupie badanej wartość NTMI była istotnie związana z VO₂ (rycina 4a), VE podczas maksymalnego wysiłku (rycina 4b) i VCO₂ ($r = 0,41$, $p = 0,006$) w CPX.



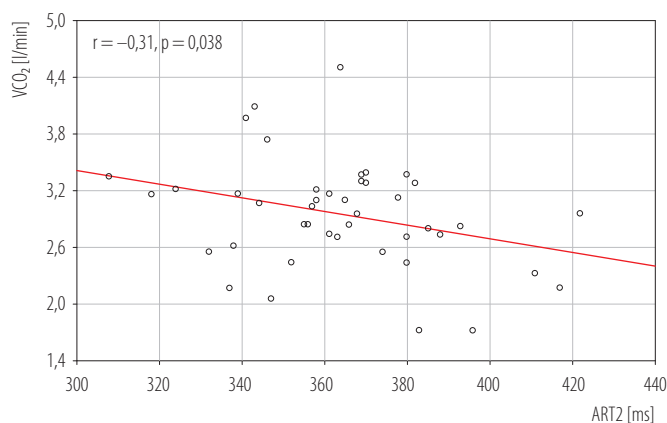
Rycina 2. Zależność pomiędzy liczbą poprawnych reakcji na bodziec świetlny przed testem spiroergometrycznym (*number of correctly received light stimuli before spiroergometry* – NCRLS1) a wartością ekwiwalentu wentylacyjnego dla dwutlenku węgla ocenianego na progu beztlenowym (*ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold* – VECO₂AT) w teście spiroergometrycznym wykonanym w grupie 44 sportowców w Pracowni Badań Wysiłkowych, Polska, 2008–2009

Figure 2. Relationship between number of correctly received light stimuli before spiroergometry (NCRLS1) and ventilatory equivalent for carbon dioxide at anaerobic threshold (VECO₂AT) as measured by spiroergometry performed in 44 athletes in Exercise Testing Laboratory, Poland, 2008–2009

OMÓWIENIE

Ogromny postęp, jaki dokonał się w ciągu ostatnich kilkunastu lat w naukach klinicznych oraz w badaniach nad fizjologią i patofizjologią układu krążenia, przyczynił się do rozwoju wysoko zaawansowanych technologii diagnostycznych i leczniczych w kardiologii. Mimo to mechanizmy wydolności fizycznej i czynniki ją determinujące u osób zdrowych, sportowców wyczynowych oraz w przebiegu przewlekłej niewydolności serca są nadal przedmiotem dyskusji. Dogłębne zrozumienie fizjologicznych i patofizjologicznych mechanizmów kontrolujących wysiłek fizyczny oraz wpływających na nasilenie uczucia zmęczenia lub duszności w trakcie wysiłku może przyczynić się do powstania zupełnie nowych metod leczenia u chorych z przewlekłą niewydolnością serca, a także technik fizjologicznych poprawiających wydolność fizyczną u sportowców lub osób w podeszłym wieku.

Chociaż wachlarz dostępnych narzędzi diagnostycznych i metod leczenia niewydolności serca jest naprawdę imponujący, to nadal istnieje duża grupa chorych oporna na konwencjonalne metody terapeutyczne oparte na wytycznych towarzystw kardiologicznych. Według najnowszych danych śmiertelność wśród chorych z niewydolnością serca jest nadal wysoka [7]. W związku z tym pilnie potrzebne są alternatywne metody leczenia tej choroby. Coraz więcej dowodów wskazuje na istotną rolę mózgu,



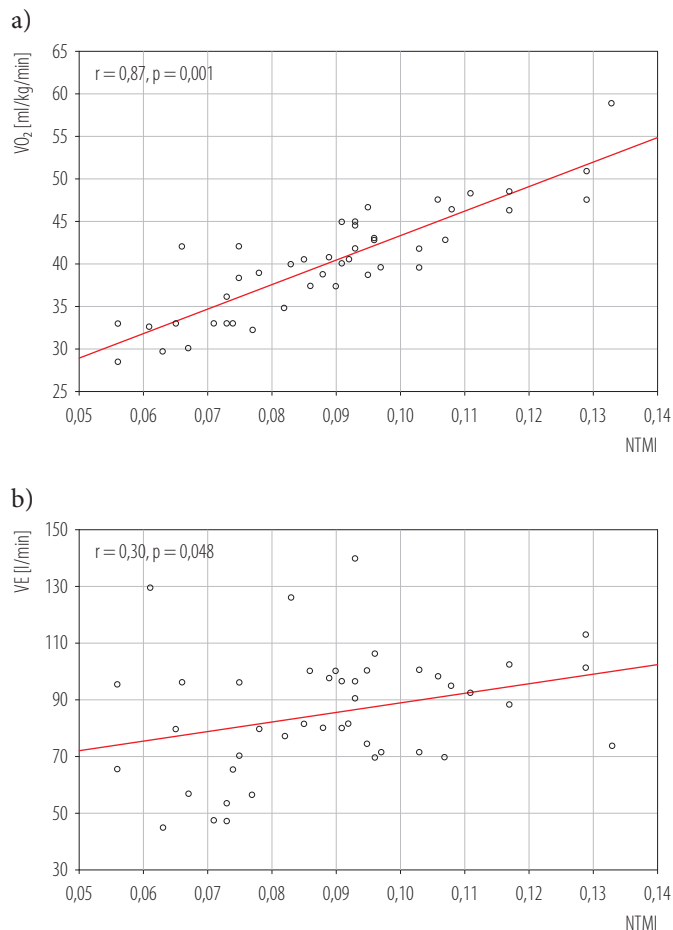
Rycina 3. Zależność pomiędzy średnim czasem reakcji na bodziec świetlny wkrótce po zakończeniu testu spiroergometrycznego (*average reaction time to light stimulus shortly after spiroergometry – ART2*) a wydaleniem dwutlenku węgla podczas maksymalnego wysiłku (*carbon dioxide output during the maximum physical exercise – VCO₂*) w teście spiroergometrycznym wykonanym w grupie 44 sportowców w Pracowni Badań Wysiłkowych, Polska, 2008–2009

Figure 3. Relationship between average reaction time to light stimulus shortly after spiroergometry (ART2) and carbon dioxide output during the maximum physical exercise (VCO₂) during spiroergometry performed in 44 athletes in Exercise Testing Laboratory, Poland, 2008–2009

jego różnych struktur (kory ruchowej mózgu, podwzgórza, autonomicznego układu nerwowego) oraz obwodowego układu nerwowego (układ nerwowo-mięśniowy) w regulacji wydolności fizycznej zarówno u chorych z przewlekłą niewydolnością serca, jak i u zdrowych sportowców.

Wśród czynników, które istotnie wpływają na wydolność fizyczną, należy również wymienić budowę włókien mięśni szkieletowych, układ powięziowy mięśni szkieletowych, zdolność mitochondriów do wytwarzania odpowiedniej ilości ATP dla pracujących mięśni szkieletowych podczas wysiłku, czynniki hormonalne i immunologiczne, ergoreceptory (receptory mięśniowe, które przyczyniają się do zwiększenia częstości oddechów podczas wysiłku), chemoreceptory (receptory zlokalizowane w pniu mózgu oraz szyjnych naczyniach tętniczych odpowiedzialne za regulację oddychania w trakcie wysiłku) oraz obciążenie termiczne. Wymienione czynniki podlegają kontroli OUN i obwodowego układu nerwowego [1,2].

Uzyskane w niniejszym badaniu wyniki potwierdziły istotny związek pomiędzy SP ocenianą przy użyciu testów psychomotorycznych, obciążeniem termicznym (Tc) w trakcie wysiłku fizycznego a parametrami wydolnościowymi w CPX u sportowców. Testy psychomotoryczne pozwalają stosunkowo prosto ocenić efektywność działania układu nerwowego (motorycznej kory mózgowej, nerwów obwodowych przewodzących impulsy nerwowe z mózgu do pracujących mięśni szkieletowych) oraz mięśni szkieletowych w odpowiedzi na wysiłek fizyczny. Z kolei po-



Rycina 4. Zależność pomiędzy wartością wskaźnika neurotermometabolicznego (*neurothermometabolic index – NTMI*) a a) poborem tlenu przez tkanki podczas maksymalnego wysiłku (*oxygen consumption during the maximum physical exercise – VO₂*), b) wentylacją minutową podczas maksymalnego wysiłku (*minute ventilation during the maximum physical exercise – VE*) w teście spiroergometrycznym wykonanym w grupie 44 sportowców w Pracowni Badań Wysiłkowych, Polska, 2008–2009

Figure 4. Relationship between neurothermometabolic index (NTMI) and a) oxygen consumption during the maximum physical exercise (VO₂), b) minute ventilation during the maximum physical exercise (VE) in spiroergometry performed in 44 athletes in Exercise Testing Laboratory, Poland, 2008–2009

miar zmian Tc człowieka podczas CPX pozwala ocenić sprawność mechanizmów termoregulacyjnych w trakcie wysiłku oraz wpływ obciążenia termicznego podczas wysiłku na parametry wydolnościowe.

Wykazano, że niektóre z badanych parametrów sprawności psychomotorycznej (ART2, NCRLS1) istotnie korelowały z wybranymi parametrami wentylacyjnymi w CPX, tj. VECO₂AT i VCO₂. Chmura i Nazar [23] potwierdzili istotną zależność pomiędzy SP w trakcie wysiłku fizycznego a momentem wystąpienia progu beztlenowego u sportowców wyczynowych. Moment wystąpienia progu beztlenowego w trakcie badania wysiłkowego jest niezmiernie ważnym parametrem oceny wydol-

ności zarówno u sportowców, jak i chorych z przewlekłą niewydolnością serca [21]. Poprawa wydolności fizycznej pod wpływem treningu u sportowców wynika nie tylko ze zmian metabolicznych, lecz także z poprawy SP [23]. W niniejszym badaniu wykazano, że wyższa powysiłkowa SP wiąże się z poprawą niektórych parametrów wydolnościowych w CPX, w tym VCO_2 .

W dostępnej literaturze można jednak znaleźć sprzeczne doniesienia dotyczące zależności pomiędzy SP a parametrami wydolnościowymi. Niektórzy badacze uważają, że wydolność fizyczna wyrażona wartością VO_2max nie ma bezpośredniego związku z SP [24]. Należy jednak wziąć pod uwagę, że w innych badaniach testy oceniające SP były wykonywane w odmiennych odstępach czasowych od zakończenia wysiłku fizycznego, a protokół testu wysiłkowego odbiegał od schematu użytego w niniejszym badaniu [24]. Znaczne opóźnienie wykonania testów psychomotorycznych po zakończeniu CPX może wpłynąć na obiektywną ocenę związku pomiędzy SP a parametrami wydolnościowymi badanymi w trakcie próby wysiłkowej. W niniejszym badaniu testy psychomotoryczne zostały przeprowadzone u sportowców natychmiast po zakończeniu badania wydolnościowego.

W rdzeniu przedłużonym są zlokalizowane obszary chemowrażliwe mózgu, które reagują na zmianę stężenia dwutlenku węgla we krwi. W wyniku pobudzenia tych obszarów przez dwutlenek węgla dochodzi do wzrostu wentylacji minutowej płuc. Ten wzrost wentylacji stanowi jednak jedynie 10% odpowiedzi wentylacyjnej płuc na wzrost prężności tego gazu we krwi. Stąd przypuszcza się, że w obrębie OUN znajdują się dodatkowe obszary chemowrażliwe odpowiedzialne za wzrost VE w odpowiedzi na wzrost produkcji dwutlenku węgla w trakcie wysiłku [25]. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że kora mózgowa może stanowić ten dodatkowy obszar reagujący na zmiany prężności dwutlenku węgla we krwi w trakcie CPX (rycina 3).

Sprawność psychomotoryczna jest wypadkową funkcjonowania obszarów motorycznych kory mózgowej oraz sprawności przewodzenia impulsów nerwowych z kory mózgowej do nerwów obwodowych i następnie mięśni szkieletowych oddechowych oraz tych w obrębie kończyn dolnych i górnych, szczególnie zaangażowanych w wysiłek fizyczny. Z tego powodu kora mózgowa, a tym samym SP, może mieć związek z parametrami wydolnościowymi ocenianymi w trakcie badania wysiłkowego.

W spoczynku i podczas wysiłku fizycznego występuje istotna zależność pomiędzy ilością wytwarzanego dwutlenku węgla a VE. Powyższa zależność jest nawet silniejsza niż ta między VE a pochłanianiem tlenu przez tkanki [26].

Wysoka SP pozwala najprawdopodobniej na istotnie szybsze i sprawniejsze reagowanie kory mózgowej na narastającą zawartość dwutlenku węgla w organizmie podczas wysiłku fizycznego. W rezultacie prowadzi to do odpowiedniego zwiększenia VE i bardziej nasilonego wydalenia dwutlenku węgla przez płuca w trakcie wysiłku.

Uzyskane wyniki wykazały również, że istnieje istotny statystycznie związek pomiędzy SP ocenianą w spoczynku przed CPX a VECO_2AT w trakcie badania wysiłkowego. Na tej podstawie można stwierdzić, że SP oceniana w spoczynku przed badaniem wysiłkowym może istotnie wpływać na wydolność fizyczną u sportowców. Wartość VECO_2AT jest zależna od VE i sprawności usuwania dwutlenku węgla przez płuca po osiągnięciu progu beztlenowego. Im lepsza SP była stwierdzana u badanych sportowców przed CPX, tym niższą wartość VECO_2AT obserwowano w trakcie badania wydolnościowego.

Istotny wzrost wartości VECO_2AT , charakterystyczny dla osób chorych z istotnym upośledzeniem wydolności fizycznej w przebiegu przewlekłej niewydolności serca, jest spowodowany spadkiem prężności wydalanego dwutlenku węgla w pęcherzykach płucnych na skutek zaburzeń perfuzji płucnej i może być związany także z upośledzeniem SP [27]. Ekwiwalent wentylacyjny dla dwutlenku węgla jest bardzo czułym i stabilnym wskaźnikiem oceny wydolności układu krążenia oraz oddechowego podczas wysiłku fizycznego w CPX [28]. Czynnikiem wpływającym na niektóre parametry wydolnościowe (VCO_2 , VECO_2AT) może być zarówno indywidualna odpowiedź kory mózgowej na wysiłek fizyczny w CPX (ART2), jak i poziom SP oceniany w spoczynku przed CPX (NCRLS1).

Określony poziom SP oceniany w spoczynku może być uwarunkowany osobniczo lub uzyskany na skutek treningu fizycznego. Niektórzy badacze potwierdzili istotny korzystny wpływ nawet jednorazowego wysiłku fizycznego na funkcje poznawcze [29,30]. W niniejszym badaniu jednorazowy wysiłek fizyczny także spowodował poprawę SP wyrażonej przez istotne skrócenie czasu reakcji na bodziec świetlny po wysiłku w stosunku do jego wartości przed testem wysiłkowym, wzrost liczby prawidłowych odpowiedzi na bodziec świetlny oraz zmniejszenie liczby błędnych odpowiedzi na bodziec świetlny po wysiłku.

Istotne korelacje pomiędzy NTMI a VE oraz wydaleniem dwutlenku węgla przez płuca w CPX potwierdzają, że w trakcie wysiłku fizycznego u sportowców z wysoką sprawnością wentylacyjną płuc dochodzi do przesunięcia momentu przekroczenia progu beztlenowego w kierunku wyższych wartości poboru tlenu przez tkanki.

Jednocześnie u tych sportowców obserwowana była istotnie lepsza SP (ART2). Pogorszenie SP podczas wysiłku fizycznego występuje tym później, im później dochodzi do przekroczenia progu beztlenowego [23].

Niektórzy badacze zwracają również uwagę na istotny wpływ kory mózgowej na wystąpienie hiperwentylacji podczas wysiłku fizycznego [29,31]. W badaniach eksperymentalnych na zwierzętach udowodniono istotny wpływ „krzywej uczenia” na modulowanie odpowiedzi wentylacyjnej w trakcie wysiłku fizycznego. Może to potwierdzać istotne znaczenie funkcjonowania samej kory mózgowej dla sprawności oddechowej w trakcie wysiłku [30,32].

Wyniki dotychczasowych badań eksperymentalnych i klinicznych pokazują również, że sama aktywność fizyczna powoduje adaptacyjne zmiany metabolizmu w obrębie płotów czołowych mózgu i w innych strukturach mózgowia [31–34]. Wykonywanie zadań umysłowych w trakcie wysiłku fizycznego upośledza wzrost VE na początku jego trwania [33,35]. Wykonywanie takich zadań w trakcie wysiłku fizycznego może powodować zmniejszenie napędu oddechowego biegnącego z kory mózgowej na początku wysiłku fizycznego poprzez „przestawienie” aktywności korowej na inne zadanie niezwiązane bezpośrednio z pobudzaniem ośrodka oddechowego w pniu mózgu i hiperwentylacją wysiłkową. W dotychczasowych badaniach potwierdzono istotny wpływ zmiany aktywności kory mózgowej na regulację autonomiczną układu sercowo-płucnego [34,36].

Prawidłowa odpowiedź adaptacyjna układu sercowo-płucnego na zwiększoną produkcję dwutlenku węgla jest jednym z najważniejszych elementów utrzymania homeostazy gazowej i kwasowo-zasadowej podczas wysiłku fizycznego oraz uzyskania wysokiej wydolności fizycznej w CPX wyrażonej wartością VO_{2max} . Prawidłowe funkcjonowanie układu sercowo-płucnego w trakcie wysiłku pozwala na odpowiednio sprawny transport dwutlenku węgla z tkanek do płuc przez układ naczyń i krew oraz jego wydalanie na drodze wymiany gazowej w płucach.

W warunkach bardzo dużego wysiłku fizycznego w trakcie CPX utrzymanie zawartości dwutlenku węgla we krwi na prawidłowym poziomie jest bardzo trudne ze względu na krótki czas krążenia krwi w układzie naczyń płucnych. Odpowiednie zwiększenie VE i powierzchni wymiany gazowej w płucach podczas wysiłku fizycznego są jednymi z najważniejszych czynników, które mogą pozwolić na spowolnienie narastania stężenia dwutlenku węgla we krwi. Wartość NTMI była istotnie związana nie tylko z VE (rycina 4b), ale rów-

nież z VO_2 (rycina 4a) oraz VCO_2 podczas maksymalnego wysiłku fizycznego w CPX. Im wyższa wartość tego wskaźnika była stwierdzana u badanych sportowców, tym większą osiągalni oni wartość VO_{2max} .

U sportowców z dobrą wydolnością tlenową na progu beztlenowym i jednocześnie z lepszą SP może dochodzić do istotnie większego – niż u sportowców o niższej wydolności tlenowej na progu beztlenowym i słabszej SP – wzrostu VE w odpowiedzi na wysiłek fizyczny. Umożliwia to sprawniejsze wydalenie dwutlenku węgla przez płuca oraz jednocześnie osiągnięcie wyższej wartości VO_{2max} w CPX. Przemawia za tym także stwierdzony istotny związek pomiędzy SP a VCO_2 podczas maksymalnego wysiłku fizycznego (rycina 3) oraz $VECO_{2AT}$ (rycina 2). Bussotti i wsp. [37] potwierdzili wyższą prężność dwutlenku węgla w powietrzu końcowo-wydechowym u sportowców z wysokim VO_{2max} w porównaniu z zawodnikami o niższej wydolności tlenowej w CPX.

Sprawne wydalenie dwutlenku węgla przez płuca podczas wysiłku fizycznego w CPX obniża obciążenie kwasami na poziomie tkanek (również w mózgu), spowalnia narastanie kwasicy i w ten sposób podwyższa próg wystąpienia objawów zmęczenia lub nawet duszności spowodowanych akumulacją mleczanów. Istotny wzrost stężenia jonów wodorowych i w rezultacie nasilenie kwasicy w mięśniach szkieletowych (również w tych oddechowych) w trakcie wysiłku prowadzi do zmniejszenia siły skurczowej mięśni i ich zmęczenia, a następnie uczucia braku tchu lub nawet duszności.

Wykazane w badaniach istotne korelacje pomiędzy NTMI a parametrami wentylacyjnymi potwierdzają również istotny związek pomiędzy termoregulacją i obciążeniem termicznym w trakcie wysiłku a wydolnością fizyczną. Wskaźnik neurotermometaboliczny obejmuje jednoczesną ocenę T_c podczas maksymalnego wysiłku fizycznego, poboru tlenu na progu beztlenowym i czasu reakcji na bodziec świetlny oceniany natychmiast po próbie wysiłkowej (SP). Odpowiedź termiczna na wysiłek fizyczny, wydolność tlenowa na progu beztlenowym oraz SP w CPX tworzą czynnościowy układ regulujący maksymalną wydolność fizyczną. Temperatura wewnętrzna ciała podczas maksymalnego wysiłku fizycznego miała istotny związek ze SP u badanych sportowców w CPX (rycina 1).

Zmniejszenie SP w trakcie wysiłku pod wpływem nadmiernego obciążenia termicznego może przyczyniać się do szybszego zmęczenia mięśni oddechowych, a następnie zmniejszenia VE. W rezultacie może to prowadzić do mniej efektywnego wydalenia dwutlenku węgla przez płuca oraz nieadekwatnej do zapotrzebowania

podąży tlenu do pracujących mięśni szkieletowych i innych systemów zaangażowanych w wysiłek fizyczny. Herman i Lee [15] wykazali, że temperatura może również istotnie wpływać na aktywność kinazy pirogromianowej w mięśniach. Obniżenie aktywności tego enzymu w mięśniach szkieletowych w trakcie wysiłku pod wpływem nadmiernego obciążenia termicznego może prowadzić do zmniejszenia poboru tlenu przez mięśnie oraz w rezultacie spadku produkcji cząsteczek ATP potrzebnych do efektywnego skurczu włókien mięśni szkieletowych.

Wysoka wydajność pracy mitochondriów w mięśniach szkieletowych w trakcie wysiłku jest podstawowym czynnikiem warunkującym wydolność fizyczną człowieka [37,38]. Wysokie obciążenie termiczne w trakcie wysiłku może zatem wpływać negatywnie na parametry wydolnościowe poprzez zarówno obniżenie sprawności psychomotorycznej, jak i hamowanie aktywności enzymów uczestniczących w produkcji energii w pracujących mięśniach szkieletowych (w szczególności w oddechowych), co potwierdziły prezentowane wyniki badań.

Wielkość wzrostu T_c podczas wysiłku fizycznego jest wypadkową wielu czynników, w tym intensywności procesów metabolicznych zachodzących w organach wewnętrznych, a w szczególności w pracujących mięśniach szkieletowych, sprawności mechanizmów wydalania nadmiaru ciepła produkowanego w trakcie wysiłku (sprawność usuwania ciepła przez skórę), gospodarki wodnej i funkcjonowania układu krążenia. Kilkumiesięczny trening nie tylko zwiększa wydolność fizyczną ocenianą na podstawie VO_{2max} , lecz także znacznie usprawnia mechanizmy termoregulacyjne [18]. W rezultacie u osób dobrze wytrenowanych może dochodzić do szybszej wysiłkowej aktywacji procesu pocenia, co zdecydowanie zmniejsza przyrosty wysiłkowe T_c [18].

Podwzgórze, będące integralną częścią OUN, kontroluje prawidłowe działanie mechanizmów termoregulacyjnych u człowieka poprzez współdziałanie z układami sercowo-naczyniowym i hormonalnym oraz mięśniami szkieletowymi [13]. Podwzgórze odgrywa istotną rolę w ośrodkowej regulacji rytmu serca, czynności nerek oraz równowagi wodno-elektrolitowej [37–40]. Zaburzona aktywność podwzgórza została również potwierdzona w przebiegu przewlekłej niewydolności serca, która bardzo często prowadzi do istotnego upośledzenia wydolności fizycznej [8,38–41]. Ponadto proces zapalny towarzyszący przewlekłej niewydolności serca może wpływać na funkcję samego serca poprzez oddziaływanie na podwzgórze [40].

Niektóre hormony (hormon wzrostu, tyroksyna) kontrolowane przez podwzgórze oraz siły mechaniczne przenoszone na mięsień sercowy przez płynącą krew w trakcie wysiłku są w dużej mierze częścią układu sygnalizacyjnego, który stymuluje fizjologiczną przebudowę serca (serce sportowca) lub zmiany patologiczne (dysfunkcja lub niewydolność serca) przy współudziale różnych czynników chorobowych (np. choroba niedokrwienna serca, zapalenie mięśnia sercowego, wady serca) [5,11,41,42]. Podwzgórze razem z korą mózgu uczestniczą, obok ośrodka oddechowego w pniu mózgu, w regulacji hiperwentylacji podczas wysiłku fizycznego w warunkach fizjologicznych poprzez bezpośrednie oddziaływanie na mięśnie oddechowe [42,43]. Woo i wsp. [44] wykazali, że ogniska uszkodzenia mózgu obecne u chorych z przewlekłą niewydolnością serca pojawiają się w obszarach zaangażowanych w fizjologiczną kontrolę temperatury ciała (podwzgórze) oraz w ośrodku odczuwania braku tchu lub duszności (obszar wyspy kory mózgowej) zarówno u zdrowych ludzi, jak i sportowców.

Coraz więcej dowodów potwierdza wpływ ośrodkowych mechanizmów termoregulacyjnych na wydolność fizyczną. Manteuffel-Szoegge [45] jako pierwszy zasugerował, że energia kinetyczna krwi wynikająca z warunków termicznych tkanek może wpływać na przepływ krwi w naczyniach. Obserwacje tego wybitnego polskiego kardiochirurga, uzyskane na podstawie przeprowadzonych przez niego nowatorskich eksperymentów na zwierzętach, zostały opublikowane w 1960 r. w prestiżowym czasopiśmie medycznym „Thorax” [45].

Stworzyły one podstawy koncepcji, że oprócz pracy serca istnieją jeszcze inne, dodatkowe źródła energii wpływające na przepływ krwi w układzie krążenia. Ta dodatkowa energia napędzająca krążenie krwi jest ściśle związana z temperaturą poszczególnych narządów w spoczynku oraz tą podczas wysiłku kontrolowaną przez podwzgórze [11,44,45]. Szybkość przepływu krwi w układzie krążenia, który jest odpowiedzialny za dostarczanie tlenu z płuc do pracujących mięśni szkieletowych podczas wysiłku fizycznego, jest jednym z głównych czynników determinujących wydolność fizyczną zarówno u sportowców, osób zdrowych, jak i chorych z przewlekłą niewydolnością serca. Furst i González-Alonso [46] uważają, że dotychczasowe badania eksperymentalne na izolowanych preparatach serca przeprowadzone przez takich wybitnych fizjologów jak Krogh, Starling czy Guyton oraz obserwacje kliniczne potwierdzają istotną zależność intensywności pracy serca oraz przepływu krwi przez mięśnie szkieletowe w trakcie róż-

nego typu wysiłku fizycznego od obwodowych czynników termicznych, metabolicznych, mechanicznych oraz neurohormonalnych działających właśnie na mięśnie szkieletowe.

Aktywność OUN, który kontroluje u ludzi T_c oraz determinuje napęd nerwowy dla pracy układu sercowo-naczyniowego oraz mięśniowo-szkieletowego, może ulec zaburzeniu zarówno u chorych z przewlekłą niewydolnością serca, jak i zdrowych osób lub u sportowców o zmniejszonej wydolności wysiłkowej (faza przetrenowania lub nieodpowiednie przygotowanie treningowe). Ostatnie badania pokazują, że informacje płynące z serca do mózgu opierają się na szlakach nerwowych, które kończą się w korze mózgowej, w tym w obrębie wyspy odpowiadającej za odczucie zmęczenia w trakcie wysiłku u osób zdrowych oraz chorych z niewydolnością serca [46,47]. Robertson i wsp. [48] uważają, że zmniejszenie aktywności elektrycznej kory mózgu w trakcie wysiłku fizycznego u sportowców ma istotny wpływ na czas zakończenia wysiłku. Autorzy badania wykazali, że w trakcie wysiłku fizycznego aktywność fal mózgowych ocenianych w elektroencefalografii wzrasta do momentu osiągnięcia maksymalnego wysiłku fizycznego, a następnie ulega spadkowi [47,48].

Powyższe obserwacje badaczy oraz wyniki niniejszych badań mogą potwierdzać kluczową rolę OUN i termoregulacji w wydolności fizycznej człowieka. Ciepło, które jest w dużej ilości uwalniane do krwioobiegu w trakcie intensywnego wysiłku fizycznego, jest nie tylko produktem ubocznym metabolizmu, ale także prawdopodobnie odgrywa istotną rolę (obok serca) w zapewnieniu odpowiedniego przepływu krwi do pracujących mięśni szkieletowych, w tym oddechowych, co ma zasadniczy wpływ na osiągane wartości parametrów wentylacyjnych w CPX.

Ahmed i wsp. [49] udowodnili, że obniżona T_c może być ważnym markerem zaostżenia przewlekłej niewydolności serca oraz zwiększonej śmiertelności w tym schorzeniu. Z kolei nadmierne obciążenie termiczne w trakcie wysiłku spowodowane nieefektywnym działaniem mechanizmów termoregulacyjnych (niewłaściwe przygotowanie treningowe do wysiłku u sportowców, osoby w wieku podeszłym, chorzy z przewlekłą niewydolnością serca) może negatywnie wpływać na funkcjonowanie OUN, a następnie na parametry wydolnościowe, przyczyniając się do nasilenia objawów zmęczenia oraz wcześniejszego zakończenia wysiłku.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły istotny związek pomiędzy wielkością wzrostu T_c w trakcie wysiłku, SP oraz wartością parametrów wentylacyjnych w trak-

cie CPX u sportowców. Analiza SP i odpowiedzi termicznej organizmu sportowca podczas badania wysiłkowego powinna stać się podstawowym elementem oceny jego przygotowania do zawodów sportowych, szczególnie w dyscyplinach wymagających dużego wysiłku fizycznego. Ponadto szersze wprowadzenie do codziennej praktyki dostępnych technik poprawiających SP oraz działanie mechanizmów termoregulacyjnych u sportowców może przyczynić się do istotnej poprawy parametrów wentylacyjnych, a w rezultacie do lepszych wyników osiąganych podczas rywalizacji sportowej [50,51].

Biorąc pod uwagę istotny wzrost T_c w trakcie testów wysiłkowych, które były przeprowadzane w badanej grupie w neutralnych warunkach klimatycznych otoczenia (odpowiednia oraz względnie stała temperatura i wilgotność powietrza), tym bardziej należy zwrócić szczególną uwagę na obciążenie termiczne występujące u sportowców podczas intensywnego i często długotrwałego wysiłku fizycznego (np. mecz piłki nożnej, maraton) w warunkach pogodowych zwiększających ryzyko przegrzania organizmu. Często zawody sportowe są przeprowadzane w niekorzystnych warunkach klimatycznych otoczenia (np. wysoka temperatura powietrza i wilgotność), co w połączeniu z niewłaściwym przygotowaniem treningowym oraz nieodpowiednim nawodnieniem organizmu zarówno przed rywalizacją, jak i w jej trakcie może prowadzić nie tylko do gorszego wyniku sportowego, ale także do groźnej dla zdrowia i życia sportowca hipertermii [52].

Po przeanalizowaniu dostępnej literatury dotyczącej poruszanego w pracy problemu można stwierdzić, że prezentowane badanie własne jest jedną z pierwszych tego typu analiz, w której oceniano jednocześnie związki pomiędzy SP, obciążeniem termicznym u sportowca w trakcie wysiłku oraz parametrami wentylacyjnymi w CPX w neutralnych i względnie stałych warunkach klimatycznych otoczenia (pracownia badań wysiłkowych). Uzyskane wyniki mogą wskazywać na istotne znaczenie funkcji poznawczych oraz zmian T_c podczas wysiłku zarówno przy ocenie wydolności fizycznej sportowca przed zawodami sportowymi, a tym bardziej w trakcie rywalizacji.

Wprowadzenie do codziennej pracy lekarza medycyny sportowej i kardiologa sportowego kompleksowej oceny wydolności fizycznej w CPX poszerzonej o badanie odpowiedzi termicznej na wysiłek fizyczny oraz SP może przyczynić się do wypracowania nowego modelu monitorowania nie tylko stanu zdrowia, ale również procesu treningowego zawodników przygotowujących do podejmowania rywalizacji sportowej.

Pewnym ograniczeniem przeprowadzonych badań może być brak możliwości oceny SP w trakcie CPX, co pozwoliłoby na dokładniejszą analizę zmian badanych parametrów i ich dynamikę na poszczególnych etapach badania wysiłkowego w odniesieniu do dynamiki zmian wartości badanych parametrów wentylacyjnych oraz Tc [53]. Dodatkowym ograniczeniem może być również zastosowana tutaj metoda pomiaru Tc za pomocą miernika temperatury umieszczonego w kanale zewnętrznym ucha. Mimo że jest ona wiarygodna i akceptowana przez badaczy, to obecnie są już dostępne dokładniejsze narzędzia do monitorowania Tc podczas wysiłku bezpośrednio z wnętrza ciała ludzkiego za pomocą pigułki połykanej przez badanego zawodnika (*ingestible telemetric temperature pill*) [22,54]. Ponadto zastosowany w niniejszej pracy protokół badania wysiłkowego (protokół Bruce'a) może prowadzić do niedoszacowania wartości parametrów wentylacyjnych w CPX ze względu na duże skoki obciążeń, dlatego inni badacze proponują jednak stosowanie protokołu typu RAMP przy ocenie wydolności fizycznej u sportowców.

WNIOSKI

Wyniki badań potwierdziły istotny związek pomiędzy SP, obciążeniem termicznym w trakcie wysiłku fizycznego i badanymi parametrami wentylacyjnymi w CPX u sportowców.

Wartość Tc podczas maksymalnego wysiłku fizycznego była istotnie związana ze średnim czasem reakcji na bodziec świetlny oraz liczbą prawidłowych odpowiedzi na bodziec świetlny natychmiast po zakończeniu badania wysiłkowego. Średni czas reakcji na bodziec świetlny po zakończeniu CPX był istotnie związany z $\dot{V}O_{2\max}$, a liczba poprawnych odpowiedzi na bodziec świetlny przed testem wysiłkowym istotnie korelowała z wartością $\dot{V}E_{\max}$ w CPX. Wykazano również istotny związek pomiędzy wartością NTMI a poborem tlenu przez tkanki, $\dot{V}E$ oraz $\dot{V}O_2$ w CPX, co może potwierdzać dużą wartość kliniczną tego wskaźnika w kompleksowej ocenie wydolności fizycznej u sportowców.

Uzyskane wyniki potwierdziły istotny wpływ czynników pozasercowych, w tym obciążenia termicznego w trakcie wysiłku fizycznego i SP, na wydolność fizyczną u sportowców ocenianą w CPX. Temperatura wewnętrzna ciała w trakcie wysiłku fizycznego, SP oraz stopień nasilenia metabolizmu tlenowego na progu bez-tlenowym (wskaźnik sprawności procesów metabolicznych zachodzących w mięśniach szkieletowych w trakcie wysiłku) tworzą 1 czynnościowy kompleks regulujący maksymalną wydolność fizyczną u sportowców.

WKŁAD AUTORÓW

Koncepcja badań: Robert Skalik

Metodyka badań: Robert Skalik

Zbieranie materiału: Robert Skalik

Analiza statystyczna: Robert Skalik

Interpretacja wyników: Robert Skalik, Anna Janocha, Wojciech Kustrzycki

Piśmiennictwo: Robert Skalik, Anna Janocha, Wojciech Kustrzycki

PIŚMIENNICTWO

1. Skalik R, Borodulin-Nadzieja L, Woźniak W, Girek M, Kosiński A, Janocha A. Znaczenie termoregulacji dla wydolności fizycznej człowieka – czy zaburzenia regulacji temperatury wewnętrznej i jej percepcji przez korę mózgową mogą mieć wpływ na przebieg przewlekłej niewydolności serca? *Kardiologia Polska*. 2009;67(supl. 6):449–454.
2. Wassermann K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ. *Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications*. 4th Edition. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins; 2004.
3. Piepoli MF, Scott AC, Capucci A, Coats AJ. Skeletal muscle training in chronic heart failure. *Acta Physiologica Scandinavica*. 2001; 171(3):295–303. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2001.00831.x>.
4. Ament W, Verkerke GJ. Exercise and fatigue. *Sports Medicine*. 2009;39(5):389–422. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939050-00005>.
5. Skalik R, Furst B. Heart failure in athletes: pathophysiology and diagnostic management. *e-Journal of Cardiac Practice*. 2017; 14(35):1–16.
6. Tornero-Aguilera JF, Jimenez-Morcillo J, Rubio-Zarapuz A, Clemente-Suarez VJ. Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(7):3909. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073909>.
7. Furrer R, Hawley JA, Handschin C. The molecular athlete: exercise physiology from mechanisms to medals. *Physiological Reviews*. 2023;103(3):1693–1787. <https://doi.org/10.1152/physrev.00017.2022>.
8. Singh RB, Hristova K, Fedacko J, El-Kilany G, Cornelissen G. Chronic heart failure: a disease of the brain. *Heart Failure Reviews*. 2019;24:301–307. <https://doi.org/10.1007/s10741-018-9747-3>.
9. Schroeter ML, Godulla J, Thiel F, Taskin B, Beutner F, Dubovoy VK, et al. Heart failure decouples the precuneus in interaction with social cognition and executive functions. *Scientific Reports*. 2023;13(1):1236. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28338-0>.

10. Ovsenik A, Podbregar M, Fabjan A. Cerebral blood flow impairment and cognitive decline in heart failure. *Brain Behav.* 2021;11(6):e02176. <https://doi.org/10.1002/brb3.2176>.
11. Skalik R. Can central nervous system be a target for treatment of chronic heart failure and amelioration of exercise performance in athletes? From physiology to clinical setting. *AHHM.* 2020;47:30–35.
12. Isaac AR, Lima-Filho RAS, Lourenco MV. How does the skeletal muscle communicate with the brain in health and disease? *Neuropharmacology.* 2021;197:108744. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2021.108744>.
13. Katz A, Gonen M, Shahar Y, Roichman A, Lerrer B, Cohen HY. Hypothalamus–Muscle Parallel Induction of Metabolic Pathways Following Physical Exercise. *Front Neurosci.* 2022;16:897005. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.897005>.
14. Huang P, Cai M, Chen F, Liu Z, Ke H, Wang W, et al. Roles of temperature and ventilation in oxygen consumption: A chemical kinetics view from the van't Hoff-based formulation. *Mar Environ Res.* 2024;193:106278. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106278>.
15. Herman P, Lee JC. Functional energetic landscape in the allosteric regulation of muscle pyruvate kinase. 1. Calorimetric study. *Biochemistry.* 2009;48:9448–9455. <https://doi.org/10.1021/bi900279x>.
16. Janocha A, Bolanowski M, Pilecki W, Małyszczak K, Salomon E, Woźniak W, et al. Cognitive disorders in type 2 diabetic patients with recognized depression. *Neuro Endocrinol Lett.* 2010;31:399–405.
17. Oshima Y, Miyamoto T, Tanaka S, Wadazumi T, Kurihara N, Fujimoto S. Relationship between isocapnic buffering and maximal aerobic capacity in athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1997;76:409–414. <https://doi.org/10.1007/s004210050269>.
18. Kaciuba-Uściłko H. Termoregulacja. In: Górski J. *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*. Warszawa: PZWL; 2002. p. 412–425.
19. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Whipp BJ. *Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
20. Cooper CB, Storer TW. *Exercise testing and interpretation. A practical approach*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511545689>.
21. Balsam P, Szmit S, Opolski G. Trening a wydolność fizyczna organizmu – VO_2max oraz VO_2AT . *Kardiologia po Dyplomie.* 2009;8:49–54.
22. Sund-Levander M, Forsberg C, Wahren LK. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review. *Scand J Caring Sci.* 2002;16:122–128. <https://doi.org/10.1046/j.1471-6712.2002.00069.x>.
23. Chmura J, Nazar K. Parallel changes in the onset of blood lactate accumulation (OBLA) and threshold of psychomotor performance deterioration during incremental exercise after training in athletes. *Int J Psychophysiol.* 2010;75:287–290. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.12.011>.
24. Travlos AK, Marisi DQ. Information processing and concentration as a function of fitness level and exercise-induced activation to exhaustion. *Percept Mot Skills.* 1995;80:15–26. <https://doi.org/10.2466/pms.1995.80.1.15>.
25. Czyżewska E, Górski J. Układ oddechowy. In: Górski J. *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*. Warszawa: PZWL; 2002. p. 237–260.
26. Nazar K. Czynność układu oddechowego podczas wysiłku. In: Górski J. *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*. Warszawa: PZWL; 2002. p. 261–268.
27. Skalik R, Woźniak W, Borodulin-Nadzieja L. The efficiency of carbon dioxide output and ventilatory response while cardiopulmonary exercise test is related to cognitive performance irrespective of left ventricular contractile function. *Eur J Heart Fail Supplements.* 2010;9:S169.
28. Sun XG, Hansen JE, Garatachea N, Storer TW, Wasserman K. Ventilatory efficiency during exercise in healthy subjects. *Am J Respir Crit Care Med.* 2002;166:1443–1448. <https://doi.org/10.1164/rccm.2202033>.
29. Mang CS, Snow NJ, Campbell KL, Ross CJD, Boyd LA. A single bout of high-intensity aerobic exercise facilitates response to paired associative stimulation and promotes sequence-specific implicit motor learning. *J Appl Physiol.* 2014;117(11):1325–1336. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00498.2014>.
30. Roig M, Skriver K, Lundbye-Jensen J, Kiens B, Nielsen JB. A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS One.* 2012;7(9):e44594. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044594>.
31. Fink GR, Adams L, Watson JD, Innes JA, Wuyam B, Kobayashi I, et al. Hyperpnea during and immediately after exercise in man. Evidence of motor cortical involvement. *J Physiol.* 1995;489:663–675. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1995.sp021081>.
32. Martin PA, Mitchell GS. Long-term modulation of the exercise ventilatory response in goats. *J Physiol.* 1993;470:601–617. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019877>.
33. McCloskey DP, Adamo DS, Anderson BJ. Exercise increases metabolic capacity in the motor cortex and striatum, but not in the hippocampus. *Brain Res.* 2001;891:168–175. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(00\)03200-5](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(00)03200-5).

34. Seifert T, Brassard P, Wissenberg M, Rasmussen P, Nordby P, Stallknecht B, et al. Endurance training enhances BDNF release from the human brain. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2010;298:R372–R377. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00525.2009>.
35. Bell HJ, Feenstra W, Duffin J. The initial phase of exercise hyperpnoea in humans is depressed during a cognitive task. *Exp Physiol.* 2005;90:357–365. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2004.028779>.
36. Zhang J, Yu X, Xie D. Effects of mental tasks on the cardiorespiratory synchronization. *Respir Physiol Neurobiol.* 2010;170:91–95. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2009.11.003>.
37. Bussotti M, Magri D, Previtali E, Farina S, Torri A, Maturati M, et al. End-tidal pressure of CO₂ and exercise performance in healthy subjects. *Eur J Appl Physiol.* 2008;103:727–732. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0773-z>.
38. Gan Z, Fu T, Kelly DP, Vega RB. Skeletal muscle mitochondrial remodeling in exercise and diseases. *Cell Res.* 2018;28:969–980. <https://doi.org/10.1038/s41422-018-0078-7>.
39. Katsurada K. ATRAP in the paraventricular nucleus of the hypothalamus as another key player in the control of sympathetic outflow. *Hypertens Res.* 2024;47:1084–1086. <https://doi.org/10.1038/s41440-024-01602-0>.
40. Pyner S. The paraventricular nucleus and heart failure. *Exp Physiol.* 2014;99:332–339. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2013.072678>.
41. Rigas A, Farmakis D, Papingiotis G, Bakosis G, Parissis J. Hypothalamic dysfunction in heart failure: pathogenetic mechanisms and therapeutic implications. *Heart Fail Rev.* 2018;23:55–61. <https://doi.org/10.1007/s10741-017-9659-7>.
42. Furst B. *The Heart and Circulation – An Integrative Model.* Switzerland: Springer Nature; 2020. p. 1–376.
43. Ibeas K, Herrero L, Mera P, Serra D. Hypothalamus-skeletal muscle crosstalk during exercise and its role in metabolism modulation. *Biochem Pharmacol.* 2021;190:114640. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2021.114640>.
44. Woo MA, Kumar R, Macey PM, Fonarow GC, Harper RM. Brain injury in autonomic, emotional, and cognitive regulatory areas in patients with heart failure. *J Card Fail.* 2009;15:214–223. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2008.10.020>.
45. Manteuffel-Szoege L. Energy sources of blood circulation and the mechanical action of the heart. *Thorax.* 1960;15:47–53. <https://doi.org/10.1136/thx.15.1.47>.
46. Furst B, González-Alonso J. The heart, a secondary organ in the control of blood circulation. *Exp Physiol.* 2025;110:649–665. <https://doi.org/10.1113/EP091387>.
47. Couto B, Salles A, Sedeño L, Peradejordi M, Barttfeld P, Canales-Johnson A, et al. The man who feels two hearts: the different pathways of interoception. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2014;9:1253–1260. <https://doi.org/10.1093/scan/nst108>.
48. Robertson CV, Marino FE. Prefrontal and motor cortex EEG responses and their relationship to ventilatory thresholds during exhaustive incremental exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2015;115:1939–1948. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3177-x>.
49. Ahmed A, Aboshady I, Munir SM, Gondi S, Brewer A, Gertz SD, et al. Decreasing body temperature predicts early rehospitalization in congestive heart failure. *J Card Fail.* 2008;14:489–496. <https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2008.02.008>.
50. Park J, Kim J. Effects of cooling glove on the human body's recovery after exercise and improvement of exercise ability. *Technol Health Care.* 2023;31(S1):259–269. <https://doi.org/10.3233/THC-236022>.
51. Staiano W, Díaz-García J, García-Calvo T, Ring C. Brain endurance training improves soccer-specific technical skills and cognitive performance in fatigued professional soccer players. *J Sci Med Sport.* 2025;28(1):69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2024.08.203>.
52. Garcia CK, Renteria LI, Leite-Santos G, Leon LR, Latitano O. Exertional heat stroke: pathophysiology and risk factors. *BMJ Med.* 2022;1(1):e000239. <https://doi.org/10.1136/bmjmed-2022-000239>.
53. Skalik R, Woźniak W, Janocha A, Stańda M, Girek M, Kamiński W, et al. Effect of dynamics and timing of thermal response to incremental short lasting physical effort on cognitive functions and cardiopulmonary capacity in athletes. *Gazz Med Ital.* 2009;168(4):225–232.
54. Goods PSR, Maloney P, Miller J, Jennings D, Fahey-Gilmour J, Peeling P, et al. Concurrent validity of the CORE wearable sensor with BodyCap temperature pill to assess core body temperature during an elite women's field hockey heat training camp. *Eur J Sport Sci.* 2023;23(8):1509–1517. <https://doi.org/10.1080/17461391.2023.2193953>.