

CECHY REAKCJI ORGANIZMU NA WYSIŁEK FIZYCZNY W NISKIEJ TEMPERATURZE WODY

Aneta Teległów¹, Jan Bilski², Anna Marchewka¹, Jacek Głodzik³, Jerzy Jaśkiewicz⁴, Przemysław Staszek⁵

¹ Katedra Rehabilitacji Klinicznej, Wydział Rehabilitacji Ruchowej AWF, Kraków

² Zakład Ergonomii i Fizjologii Wysiłku Fizycznego, Wydział Nauk o Zdrowiu CMUJ, Kraków

³ Katedra Fizjoterapii, Wydział Rehabilitacji Ruchowej AWF, Kraków

⁴ Katedra Fizjologii i Biochemii, Wydział Rehabilitacji Ruchowej AWF, Kraków

⁵ Specjalny Ośrodek Szkolno-Wychowawczy, Tarnów

Streszczenie

Termoregulacja odgrywa ważną rolę w utrzymywaniu homeostazy w czasie odpoczynku i wysiłku. W niskiej temperaturze termoreceptory reagując na zmianę temperatury stymulują ośrodek termoregulacji zlokalizowany w podwzgórzu, uruchamiając mechanizmy oszczędzania i wytwarzania ciepła. W czasie ekspozycji na bardzo niską temperaturę, szczególnie w środowisku wodnym, metaboliczne wytwarzanie ciepła przez organizm nie jest w stanie wyrównać jego utraty i może dojść do hipotermii. Jej mechanizmy w środowisku w wodnym, przeciwnie niż na powietrzu związane są z utratą ciepła przez przewodzenie. Podczas przebywania w zimnej wodzie dochodzi do przyspieszonej utraty ciepła ze skóry, połączone ze skurczem naczyń obwodowych, a także z odpływem krwi ze skóry i warstwy podskórnej, co prowadzi do spadku temperatury skórnej. Temperatura wody o wartości 18°C może być uważana za wartość graniczną niskich temperatur – poniżej tego poziomu temperatura wewnętrzna obniża się szybciej w trakcie pływania niż w spoczynku. Zanurzenie głowy w zimnej wodzie, prowadzi do nieproporcjonalnie dużego spadku temperatury wewnętrznej. Przebywanie w środowisku wodnym o niskiej temperaturze może u niezaadaptowanych ludzi prowadzić do poważnego zagrożenia zdrowia, podczas gdy u osobników regularnie pływających w zimie tzw. morsów, rozwija się tolerancja na zimno. Co więcej te mechanizmy adaptacyjne mogą prowadzić do zjawiska „hartowania” – zapobiegania wielu innym chorobom.

Słowa kluczowe: termoregulacja w wodzie, układ krążenia, układ współczulny, mechanizm, termoregulacji „morsów”

Abstract

The thermoregulation play important roles in maintaining homeostasis during rest and physical exercise. A low temperature stimulates thermoreceptors to provide feedback to the hypothalamus to activate the mechanisms that conserving body heat and increasing heat production. In cold water these mechanisms are often not adequate and exercising could leads to hypothermia which is usually attributed to convective and conductive heat loss from the body. Heat loss by convection from the body surface is a major pathway but in water, conduction is the most important factor. Head submersion increases the rate of core cooling disproportionately more than the relative increase in total heat loss. Cold water exposure immediately increases the rate of heat loss from the skin, which causes a decrease in skin temperature. If the water temperature fall below 18°C temperature exercise in fact could increase the rate of heat loss.

Immersion in cold water in unaccustomed persons may lead to detrimental consequences, while in regular winter swimmers, adaptive physiologic mechanisms increase tolerance to cold. Furthermore, these mechanisms may prevent the occurrence of a wide variety of diseases.

Key words: thermoregulation in water, circulatory system, sympathetic nervous system, psychological aspect, thermoregulatory mechanism winter swimmers

Ekspozycja na zimno jest jednym z najsilniejszych fizjologicznych i psychologicznych stresorów środowiskowych i prowadzi do wielu znaczących reakcji fizjologicznych. Szczególnie środowisko wodne stanowi wyzwanie dla procesów termoregulacyjnych organizmu.

W czasie ekspozycji organizmu na bardzo niską temperaturę, zwłaszcza w środowisku wodnym, metaboliczne wytwarzanie ciepła nie jest w stanie wyrównać jego utraty i może doprowadzić do hipotermii. O hipotermii mówimy, kiedy temperatura wewnętrzna

organizmu spada poniżej 35°C (1). Ochłodzenia ciała w wodzie następuje 2-3 razy szybciej niż w powietrzu. Utrata ciepła do wody jest 250 razy większa niż do powietrza. Woda jako nośnik energii cieplnej ma pojemność cieplną 4 razy większą niż powietrze, zaś przewodnictwo cieplne jest 25 razy większe od powietrza (2).

Zanurzenie się człowieka w wodzie o temperaturze ok. 33°C nie prowadzi do utraty ciepła przez jego organizm i nazywane jest zanurzeniem termoneutralnym. Poniżej tej temperatury wartość utraty ciepła jest tak

duża, że organizm nie może wyrównać niedoboru ciepła. Przy spadku temperatury wody poniżej 23°C charakterystyczne objawy pogłębiającej się hipotermii pojawiają się znacznie szybciej. Przy spadku temperatury wewnętrznej ciała do 29°C przestaje funkcjonować kora mózgowia, a bezpośrednią przyczyną śmierci przy temperaturze ciała 25–28°C jest zwykle migotanie komór (3).

Zakres temperatur bezpiecznych stosowanych w wodolecznictwie według Straburzyńskiego i wsp. (2) to: woda bardzo zimna (17–20°C), zimna (24–18°C), chłodna (33–25°C), ciepła (38–39°C), woda o temperaturze obojętnej (34–37°C).

Organizm rozebranego człowieka w pomieszczeniu o umiarkowanej temperaturze traci przez promieniowanie 55–65% wytworzonego ciepła. Fizjologicznym czynnikiem zmniejszającym utratę ciepła jest skurcz naczyń krwionośnych skóry, zmniejszający dopływ ogrzanej krwi do powierzchni ciała. Mechanizm utraty ciepła przez przewodzenie powoduje, że tą drogą organizm traci niewielką ilość wytworzonego ciepła. Najczęściej ciało ludzkie jest w kontakcie z otaczającym powietrzem tworzącym różnej grubości warstwę między powierzchnią skóry a odzieżą. Z powodu małej pojemności cieplnej powietrza organizm nie może eliminować tą drogą nadmiaru wytworzonego ciepła. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku wody, której współczynnik cieplny określający pojemność cieplną jest 10–25 razy większy niż powietrza, a człowiek w wodzie nie posiada warstwy izolacyjnej na powierzchni styku ciała z wodą, co umożliwia utratę dużej ilości ciepła przez organizm do wody, prowadząc do zagrażającego życiu ochłodzenia organizmu (4).

Ludzie mogą utrzymać stałą wewnętrzną temperaturę kiedy pozostają nieaktywni w wodzie o temperaturze powyżej 32°C. Kiedy temperatura wody spada poniżej tego punktu, może dojść do hipotermii. Ze względu na dużą utratę ciepła ze strony ciała zanurzonego w zimnej wodzie, długie w niej przebywanie lub niezwykle niska temperatura może prowadzić do zaawansowanej hipotermii i śmierci. U osobników zanurzonych w wodzie o temperaturze 15°C dochodzi do obniżenia temperatury rektalnej w tempie 1°C na godzinę. Jeśli temperatura wody spadnie do 4°C to wówczas temperatura rektalna będzie się obniżać w tempie 3,2°C na godzinę. Spadek temperatury jest większy kiedy osobnik przebywa w ruchomej wodzie i czas przeżycia w takich warunkach może być bardzo krótki. W wypadku zanurzenia ludzi w wodzie o temperaturze bliskiej 0°C może dojść do spadku temperatury rektalnej do 23–25°C i śmierci w ciągu kilku minut. Po spadku temperatury rektalnej poniżej 34,5°C podwzgorze zaczyna tracić możliwość termoregulacji, a do ich całkowitej straty dochodzi przy temperaturze 29,5°C (4).

Innym czynnikiem, który należy brać pod uwagę rozpatrując zachowanie organizmu w środowisku wodnym jest ciśnienie hydrostatyczne. Ciśnienie hydrostatyczne wody stanowi silny bodziec mechaniczny. Wzrasta ono liniowo wraz z głębokością zanurzenia. Podczas kąpieli całkowitej krew przesuwa się (600 – 800 ml) w części żyłnej układu krążenia z naczyń włosowatych, żył i naczyń chłonnych kończyn, skóry i brzucha do klatki piersiowej, a z żył obwodowych do prawego przedsionka (2). Umożliwia to względnie duży opór, który ciśnieniu hydrostatycznemu przeciwstawia klatka piersiowa z płucami zawierającymi powietrze. Wpływ ciśnienia hydrostatycznego oraz zwiększenie ujemnego ciśnienia śródpiętnego uważany jest za główny mechanizm utrzymujący nasilony przepływ krwi w naczyniach kończyn dolnych w warunkach zanurzenia w wodzie (5,6).

Termoregulacja

Zdolność do regulacji temperatury ciała należy do najważniejszych procesów umożliwiających przeżycie organizmu. U zwierząt stałocieplnych zdolność utrzymania względnie stałej temperatury wewnętrznej jest warunkiem prawidłowego ich funkcjonowania (7). Wysiłek fizyczny należy do tych stanów w których mechanizm termoregulacji warunkuje przetrwanie i efektywną pracę (8). Rozpatrując zagadnienia fizjologii i patofizjologii termoregulacji człowieka można mówić o dwóch przedziałach cieplnych: wewnętrznym (*core*) i zewnętrznym (*shell*). Co za tym idzie możemy mówić o temperaturze wewnętrznej (*core temperature* – T_c) i zewnętrznej ciała (*shell temperature* – T_s). Pojęcie temperatury wewnętrznej odnosi się do jamy brzusznej, klatki piersiowej i czaszki, a zewnętrznej przede wszystkim do skóry, tkanki podskórnej. Niektórzy autorzy ze względów czynnościowych do przedziału zewnętrznego zaliczają także mięśnie szkieletowe. Temperatura wewnętrzna jest regulowana ośrodkowo podczas gdy zewnętrzna zależy od skórniego przepływu krwi i wpływów środowiska. W niskiej temperaturze otoczenia obniża się temperatura zewnętrzna lecz wewnętrzna pozostaje relatywnie stała. Różnica między nimi w ekstremalnych warunkach środowiska może być znaczna (9). Przedział zewnętrzny charakteryzuje zmienna temperatura zależna zarówno od temperatury otoczenia jak i dostarczanego z krwią ciepła z przedziału wewnętrznego, związanego z przemianą materii, wysiłkiem fizycznym itp.

Przedział wewnętrzny tworzą pozostałe tkanki i narządy. Charakteryzuje go stała temperatura około 37°C z dobowymi i sezonowymi wahaniami w przedziale 2°C mimo znacznie większych wahań temperatury otoczenia. Umożliwia to prawidłowe funkcjonowanie tkanek i narządów mimo ciągłego narażania organizmu na działanie zmiennej tempe-

ratury otoczenia, nawet w przypadkach niewielkich zaburzeń termoregulacji

Zwiększona termogeneza występuje w warunkach zwiększonej aktywności ruchowej lub w niskiej temperaturze otoczenia. W zimnym otoczeniu powłoki ciała pełnią przede wszystkim funkcję izolatora, podczas gdy w wysokiej temperaturze są główną drogą usuwania ciepła z głębiej położonych tkanek organizmu, dzięki zmianom w nich przepływu krwi (10).

Ciepło jest oddawane do otoczenia za pośrednictwem czterech zjawisk fizycznych: promieniowania, przewodzenia, konwekcji i parowania.

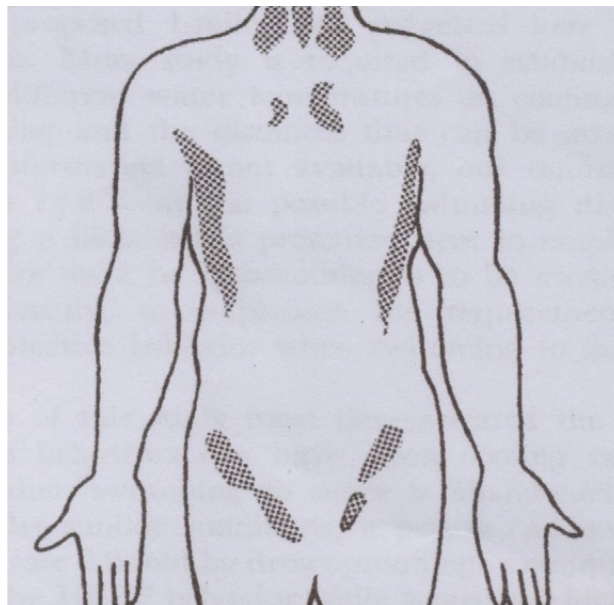
Za proces termoregulacji odpowiada układ w skład którego wchodzi ośrodek termoregulacji, termodetektory, termoreceptory i efekторы układu termoregulacji. Elementy te są połączone ze sobą za pośrednictwem odpowiednich dróg nerwowych. Ośrodek termoregulacji zlokalizowany w podwzgórzu, jest dwuczęściowy. Wyróżnia się w nim ośrodek eliminacji ciepła i ośrodek zachowania ciepła. Ośrodek eliminacji ciepła zlokalizowany jest w przedniej części podwzgórza i kontroluje reakcje termoregulacyjne związane z utratą ciepła. Ośrodek zachowania ciepła znajduje się w tylnej części podwzgórza i odpowiada za produkcję i zachowanie ciepła (10). Termodetektory zlokalizowane są w podwzgórzu i w szyjnym odcinku rdzenia kręgowego. Reagują na zmianę temperatury docierającej do nich krwi (10). Termoreceptory obwodowe dzielą się na receptory ciepła i zimna. Zlokalizowane są one w skórze, mięśniach, górnych drogach oddechowych, ścianach naczyń żylnych a także niektórych odcinkach przewodu pokarmowego.

Najważniejszymi efektorami termoregulacji u człowieka są: układ krążenia, gruczoły potowe, mięśnie szkieletowe, tkanka tłuszczowa, wątroba i inne narządy (10).

Skutkiem zanurzenia w zimnej wodzie są natychmiastowe fizjologiczne zmiany m.in. metaboliczne, kardiologiczne i hormonalne.

Ogólnie przyjęte jest, iż największa utrata ciepła w ciele człowieka następuje przez głowę (11). Według Haywarda i wsp. (12) częściami ciała charakteryzującymi się wysokim stopniem oddawania ciepła jest także szyja, okolica mostkowa, boczne powierzchnie klatki piersiowej oraz okolice pachwin (ryc. 1).

Zanurzenie głowy w zimnej wodzie, prowadzi do nieproporcjonalnie dużego spadku temperatury wewnętrznej. Zjawisko to może być tłumaczone obwodowym skurczem naczyń, w wypadku zanurzenia twarzy indukowanym nie tylko zwykłymi mechanizmami termoregulacyjnymi ale prawdopodobnie także wywołanym odruchem „na nurkowanie” w którym pośredniczy nerw trójdzielny. Powyższe obserwacje mają duże znaczenie dla przebywających w zimnej wodzie nurków i pływaków, którzy mogą być narażeni na hipotermię (13,14).



Ryc. 1. Okolice powierzchni ciała człowieka, w których dochodzi do największych strat ciepłych podczas przebywania w zimnej wodzie według Haywarda (12)

Tkanka tłuszczowa

Reakcja organizmu na zanurzenie i wysiłek w zimnej wodzie może zależeć w dużym stopniu od takich osobniczych cech jak indywidualny poziom metabolizmu i wielkość podskórnej tkanki tłuszczowej. Jest ona ważnym czynnikiem izolacyjnym ze względu na małe przewodnictwo cieplne i niskie unaczynienie. Jeden milimetr grubości tkanki tłuszczowej pozwala dobrze znosić ochłodzenie o 1–2°C (4). Tripton i wsp. (15) wykazali relację między grubością podskórnej warstwy tłuszczowej, a wydajnością pływania w zimnej wodzie i poparli to następującymi stwierdzeniami:

- szczególnie podatne na wychłodzenie są ręce,
- większa podskórna warstwa tłuszczu zmniejsza tempo wychłodzenia mięśni rąk
- praca mięśni rąk, tempo wysiłku i bardziej pozioma pozycja pływaka pozwalają na dłuższe pływanie.

U otyłych pływaków, którzy pokonali Kanał La Manche w wodzie o temperaturze 15,8°C, temperatura ciała po 7 godzinach wynosiła 37,4°C, a u szczupłych już po 30 minutach obniżyła się do 34,5°C (16). Wysiłek w wodzie przyspieszył spadek temperatury rektalnej u szczupłych pływaków, podczas gdy otyli utrzymywali ją na stałym poziomie (17).

Wpływ wysiłku fizycznego w zimnej wodzie na temperaturę wewnętrzną organizmu

Wpływ wysiłku fizycznego w zimnej wodzie na temperaturę wewnętrzną organizmu może zależeć od wielu czynników, jak:

- Intensywność wysiłku fizycznego
- Rodzaj podjętego wysiłku
- Temperatura wody,
- Ruch wody
- Ubiór.

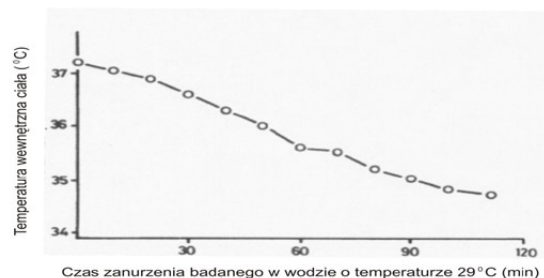
U osobnika pozostającego w spoczynku, nawet relatywnie umiarkowanie zimna woda może prowadzić do hipotermii. Lekki i umiarkowany wysiłek w zimnej wodzie prowadzi do większego zużycia tlenu i obniża temperaturę ciała w stosunku do identycznego wysiłku w wodzie o neutralnej temperaturze. Jest to szczególnie widoczne w czasie pływania kiedy ruch wody przyspiesza oddawanie ciepła, głównie na drodze konwekcji (18).

Intensywniejszy wysiłek fizyczny w tym środowisku prowadzi do zwiększenia metabolizmu i częściej zapobiega utracie ciepła. Chociaż podczas pływania mamy do czynienia ze zwiększoną utratą ciepła do pewnych granicach temperatur środowiska zewnętrznego, to zwiększona produkcja ciepła z nadkładem to kompensuje. Mechanizm ten dobrze się sprawdza podczas pływania w wodzie w zakresie temperatur pomiędzy 23,9–27,8°C. Wysiłek fizyczny, angażujący całe ciało wykonywany przy temperaturze wody poniżej tego zakresu, przyspiesza spadek temperatury wewnętrznej w stosunku do spoczynku, ponieważ w takich warunkach zmniejszają się właściwości izolacyjne skóry i mięśni (4).

Przyczyną tego ma być po pierwsze wspomniany ruch wody wokół ciała zaburzający graniczną warstwę i przyspieszający oddawanie ciepła przez konwekcję. Innym ważnym mechanizmem mającym wpływ na utratę ciepła podczas pływania w zimnej wodzie jest zwiększony dopływ krwi do pracujących kończyn. W spoczynku skóra, podskórna tkanka tłuszczowa i mięśnie szkieletowe (w spoczynku przepływ krwi przez nie jest niewielki) zapewniają izolację cieplną dla ciała. Nieperfundowane mięśnie szkieletowe zapewniają 70% izolacji cieplnej całego ciała osobnika w spoczynku zanurzonego w zimnej wodzie (*variable insulation*). W zimnej wodzie przy wysiłku fizycznym o intensywności 150–220 W przepływ krwi w mięśniach kończyn wzrasta do punktu gdzie ich efekt izolacyjny jest stracony i pozostaje tylko izolacja skóry i tkanki tłuszczowej (*fixed insulation*). Zwiększony dopływ krwi do mięśni wiąże się ze zwiększoną dostawą ciepła do kończyn, które zostaje w większości oddane do otaczającej wody. Wysoki stosunek powierzchni do masy (*surface area to mass ratio*) czyni je bardzo podatnymi na oddawanie ciepła. Tempo obniżania się temperatury wewnętrznej jest większe podczas wysiłku fizycznego statycznego (4, 19,20).

W środowisku wodnym o temperaturze 5°C temperatura rektalna obniża się w spoczynku w ciągu 20 minut o 1,2°C, natomiast w tym samym czasie podczas pływania obniża się ona o 1,8°C (21). Galbo i wsp. (22), mierząc temperaturę rektalną podczas pływania, odnotowali jej wzrost w temperaturze wody 33°C (o 1,3±0,2°C) i w temperaturze wody 27°C (o 0,7±0,1°C), natomiast spadek w temperaturze wody

21°C (o 0,8±0,3°C). Ryc. 2 ilustruje przebieg zmian temperatury ciała przy zanurzeniu w wodzie o temperaturze 29°C szczupłego pływaka w wieku 20 lat. Obniżająca się stale temperatura ciała i wystąpienie w późniejszym okresie zanurzenia zaburzeń rytmu serca spowodowały przerwanie badania (23). Zbyt duży spadek temperatury mierzonej rektalnie prowadzi do zakłócenia rytmu serca łącznie z migotaniem komór i zatrzymaniem jego akcji (ryc. 2).



Ryc. 2. Przebieg zmian temperatury ciała w wodzie o temperaturze 29°C (23)

Temperatura wody 18°C może być uważana za wartość graniczną pływania w niskiej temperaturze wody (24), poniżej tej wartości temperatura ciała obniża się szybciej w czasie pływania niż w spoczynku. Aby zmniejszyć straty ciepła przy długotrwałym przebywaniu w środowisku wodnym o temperaturze powyżej 18°C, należy się poruszać (pływać), a poniżej tej temperatury należy pozostawać w bezruchu (25).

Ochłodzenie mięśni szkieletowych, do którego dochodzi podczas pływania w zimnej wodzie, prowadzi do obniżenia ich siły skurczu. Układ nerwowy reaguje na ochłodzenie mięśni szkieletowych zmieniając wzorzec rekrutacji włókien mięśniowych. Dochodzi wtedy zarówno do zmniejszenia szybkości skracania włókien jak i zmniejszenia siły skurczu mięśni. Zwykle zjawisko to nie dotyczy dużych, głęboko położonych mięśni ponieważ są one chronione przed utratą ciepła przez tkanki położone bardziej zewnętrznie i zwiększoną termogenezę.

Jeśli mamy do czynienia z długotrwałym wysiłkiem jak to ma miejsce przy pływaniu długodystansowym w warunkach naturalnych (kiedy mamy do czynienia z ruchem wody), narastające zmęczenie może prowadzić do zmniejszonej produkcji ciepła. Następująca hipotermia nasila istniejące zmęczenie mięśni prowadząc do dalszego zmniejszenia produkcji ciepła i zagrożenia życia (4). W przeciwieństwie do uogólnionego wysiłku, aktywność fizyczna ograniczona tylko do nóg pozwala na lepsze utrzymanie głębokiej temperatury ciała niż spoczynek. Może to wiązać z wyższym stosunkiem powierzchni do masy w kończynach górnych i mniejszą produkcją ciepła przez kończyny górne związaną z mniejszą masą mięśni (20).

Kontrola nerwowo – hormonalna podczas wysiłku w wodzie o niskiej temperaturze

W warunkach nasilonej utraty ciepła do otoczenia następuje zwiększenie wydzielania hormonów stymulujących wzrost przemiany materii. Ekspozycja organizmu na zimną wodę pobudza aktywność układu współczulno – nadnerczowego i wydzielanie noradrenaliny, adrenaliny i kortyzolu (26,27). Impulsy z ośrodka termoregulacji powodują silną aktywację układu współczulnego, czego następstwem jest stymulacja receptorów α -adrenergicznych i silny skurcz naczyń skórnych, zapobiegający przenoszeniu ciepła z wnętrza ciała do skóry i dalszej jego utraty do otoczenia za pośrednictwem wyżej wymienionych mechanizmów fizycznych. Do otoczenia zostaje oddane tylko to ciepło, które zostanie przepuszczone przez izolator, jaki stanowi tkanka tłuszczowa podskórna. Dzięki temu mechanizmowi utrata ciepła przez skórę może być zmniejszona ośmiokrotnie w stosunku do warunków normalnych. Innym ważnym czynnikiem jest unaczynienie powłok ciała w okolicach najbardziej narażonych na działanie niskiej temperatury – głowa, małżowiny uszne, ręce i stopy, a szczególnie obecność spłotów żylnych na pograniczu skóry i tkanki tłuszczowej podskórnej, które mogą otrzymywać krew zarówno z włosniczek jak i bezpośrednio z małych tętnic za pośrednictwem połączeń tętniczo-żylnych. W zależności od temperatury otoczenia i sytuacji cieplnej organizmu przepływ krwi przez spłoty żyłne może wahać się od prawie 0 do 30% objętości wyrzutowej serca (28).

W dalszej kolejności zostają uruchomione mechanizmy powodujące zwiększenie wytwarzania ciepła określane jako termogeneza. Wyróżniamy jej dwa rodzaje: termogenezę drżeniową (*shivering thermogenesis*) oraz termogenezę bezdrżeniową (*non-shivering thermogenesis*). W tych fizjologicznych reakcjach też pośredniczy układ współczulny. Termogeneza drżeniowa jest następstwem pobudzenia ośrodka motorycznego zlokalizowanego w grzbietowo-przyśrodkowej części tylnej okolicy wzgórza. W wyniku tego w niewykonujących pracy zewnętrznej mięśniach wytwarzana energia przekształca się w ciepło. W czasie maksymalnej aktywności drżeniowej organizm wytwarza cztero- pięciokrotnie więcej ciepła niż w warunkach normalnych. Ten rodzaj termogenezy nie jest ekonomiczny, gdyż zwiększenie czynności mięśni szkieletowych wymaga zwiększenia dopływu do nich krwi, zwiększając w ten sposób utratę ciepła z wnętrza organizmu.

Wzrost krążących we krwi amin katecholowych wpływa również na zwiększenie metabolizmu komórkowego, co określa się terminem termogenezy bezdrżeniowej. Ten rodzaj termogenezy zwiększa produkcję ciepła o 10–15% (10).

Noradrenalina wpływa na termoregulację przez mięśnie szkieletowe (metaboliczna produkcja ciepła)

poprzez receptory β -adrenergiczne w mięśniach szkieletowych (28). Poziom noradrenaliny może zwiększyć się do 180% z jego podstawowego poziomu w ciągu 2 minut od zanurzenia w wodzie o temperaturze 10°C (29). Również Srámek i wsp. (30) zwrócili uwagę na wyższy poziom noradrenaliny (aż o 530 %) w temperaturze wody 14°C. Obniżenie poziomu noradrenaliny zaobserwowano tylko w grupie regularnie „pływającej w zimie” co autorzy tłumaczą adaptacją do tych warunków (31). Odpowiedź na zimną wodę układu współczulnego może być aktywowana lub zniesiona bardzo szybko i jest zależna od temperatury skóry (29).

Aminy katecholowe podczas wysiłku w niskiej temperaturze wpływają na zwężenie naczyń w nerkach, wolniejszy przepływ osocza przez nerki i spadek filtracji w kłębuszkach nerkowych (32-4).

Wydzielany przez korę nadnerczy kortyzol moduluje wiele fizjologicznych reakcji w odpowiedzi na zimno. Zwiększa on spoczynkowe zużycie energii, hamuje rozszerzenie naczyń, zwiększa dostępność wolnych kwasów tłuszczowych i wpływa na działanie współczulnego układu nerwowego. Wydzielanie kortyzolu jest regulowane przez hormon adrenokortykotropowy (ACTH). Wzrost poziomu kortyzolu w czasie wysiłku w zimnym środowisku wodnym wydaje się zależeć od zmian temperatury wewnętrznej organizmu (28).

Wykorzystanie substratów energetycznych dla procesów metabolicznych podczas wysiłku w niskiej temperaturze wody

Długotrwały wysiłek fizyczny prowadzi do zwiększonej mobilizacji i oksydacji wolnych kwasów tłuszczowych (FFA). Podstawowym bodźcem dla zwiększonego metabolizmu lipidów jest aktywacja układu współczulno – nadnerczowego i zwiększone uwalnianie amin katecholowych (35). Niska temperatura środowiska zewnętrznego znacznie nasila uwalnianie amin katecholowych, ale poziom wolnych kwasów tłuszczowych wzrasta w mniejszym stopniu niż podczas wysiłku w cieplejszej temperaturze. W niskiej temperaturze dochodzi do skurczu naczyń, nie tylko tych zaopatrujących skórę, ale również podskórną tkankę tłuszczową. Zmniejsza to dopływ krwi do tego potencjalnego magazynu lipidów, z którego kwasy tłuszczowe mogą być mobilizowane. Z tego powodu mobilizacja FFA jest mniejsza niż można byłoby przewidywać po poziomie amin katecholowych (4).

Poziom glukozy odgrywa ważną rolę w adaptacji zarówno do wysiłku jak i do zimna. Hipoglikemia może prowadzić do zahamowania drżenia mięśniowego i co za tym idzie obniżenia temperatury rektalnej. Zaobserwowano większe zużycie glikogenu przez mięśnie w czasie wysiłku w niskiej temperaturze zewnętrznej (28).

Poza aminami katecholowymi do powyższych reakcji przyczyniają się hormony tarczycy i trzustki (spadek insuliny) (28).

Mechanizm termoregulacji „morsów”

Funkcjonowanie mechanizmu termoregulacji badano również u „morsów” – osób pływających w zimnej wodzie, dla hartowania organizmu. U tych osób występuje zwiększona odporność na infekcje układu oddechowego. Zmniejszone występowanie różnych schorzeń u osób zahartowanych do zimnej wody łączy się z wyższym poziomem w osoczu IgA (6,36). Reakcją indukującą proces adaptacyjny u „morsów” podczas przebywania w zimnej wodzie jest zmniejszenie przepływu krwi przez skórę, co zwiększa jej wartość termoizolacyjną (37,38). Adaptacja ta obejmuje zmniejszenie pojemności minutowej serca i częstości akcji serca jak również zwiększonego zwężenia naczyń w skórze (39,40). Stwierdzono, iż u pływających w zimie metabolizm zwiększa się zarówno po zanurzeniu w wodzie, jak i po zakończeniu pływania. Jest to spowodowane pobudzeniem centralnego ośrodka termoregulacji w podwzgórzu, który jest mniej wrażliwy na informacje pochodzące z termoreceptorów skóry (40). Z tego też powodu termogeneza bezdrzeniowa jest głównym mechanizmem wytwarzania energii cieplnej u „morsów” w ciągu pierwszej godziny od zanurzenia w zimnej wodzie (38, 40). Należy w tym miejscu podkreślić, że mechanizmy termogenezy bezdrzeniowej u pływających w zimie nie są do końca zbadane.

Prawdopodobnie jest ona wywołana przez stymulację β -adrenoreceptora mięśni szkieletowych i/lub białą tkankę tłuszczową (38, 41). Najnowsze badania Janský i wsp. (42) donoszą, iż u zimowych pływaków pływających w wodzie o temperaturze od 12°C do 2°C zaobserwowano większą zdolność termogenezy bezdrzeniowej w której pośredniczą termoreceptory β_1 i β_2 .

Podsumowanie

Pływanie jest dobrym ćwiczeniem tlenowym z wynikającymi korzyściami dla zdrowia. Zaś pływanie w zimnej wodzie jest związane z dodatkowymi zmianami fizjologicznymi, które dla większości osób mogą mieć niekorzystne skutki. Jednakże regularne wystawienie na działanie czynnika zimna, skutkuje w zwiększonej tolerancji na zimno dzięki licznym mechanizmom adaptacyjnym.

Piśmiennictwo:

1. Pozos RS, Iaizzo PA, Danzl DF i wsp. Limits of tolerance to hypothermia. W: Bethesda MD. Handbook of Physiology. Environmental Physiology, wyd. Am Physiol Soc 1996, s. 557-575.
2. Straburzyńska – Lupa A, Straburzyński G. Wodolecznictwo W: Fizjoterapia z elementami klinicznymi t. 1, wyd. Wydawnictwo PZWL 2008, s. 86-271.
3. Golden F, Tripton M. Essentials of sea survival. Champaign, IL: Human Kinetics 2002a.

4. Wilmore JH, Costill DL. Exercise in hot and cold environments: Thermoregulation. W: Physiology of Sports and Exercise. Champaign: Human Kinetics 2008, s. 252-277.
5. Chukroun ML, Varene P. Adjustments in oxygen transport during head-out immersion in water at different temperatures, *J Appl Physiol* 1990, 68:1475-1480.
6. Janský L, Šramek P, Šavlikova J i wsp. Changes in sympathetic activity cardiovascular functions and plasma hormone concentrations due to cold water immersion in men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1996, 74:148-152.
7. Moran DS, Mendal L. Core temperature measurement: methods and current insights. *Sports Med* 2002; 32: 879-885.
8. Morseley PL. Exercise, heat, and thermotolerance: molecular mechanisms. W: Gisolfi CV, Lamb DR, Nadel ER, Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine: Exercise, Heat and Thermoregulation, wyd. Cooper Publishing Group 1993, s. 305-325.
9. Lim CL, Byrne C, Lee JK. Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings. *Ann Acad Med Singapore* 2008, 37: 347-353.
10. Benarroch EE. Thermoregulation: recent concepts and remaining questions. *Neurology* 2007, 69: 1293-1297.
11. Kozłowski S. Środowisko termiczne życia. W: Granice przystosowania. wyd. Wiedza Powszechna 1986, s. 313-377.
12. Hayward JS, Collis ML, Eckerson JD. Thermographic evaluation of relative heat loss areas of man during cold water immersion. *Aerosp Med* 1973; 44: 708-711.
13. Pretorius T, Cahill F, Kocay S i wsp. Shivering heat production and core cooling during head – in and head – out immersion in 17°C water. *Aviat Space Environ Med* 2008; 79: 495-499.
14. Gooden, BA, Lehman RG, Pym J. Role of the face in the cardiovascular responses to total immersion. *Aust J Exp Biol Med Sci* 1970, 48: 687-690.
15. Tripton M, Eglin C, Gennser M i wsp. Immersion deaths and deterioration in swimming performance in cold water. *Lancet* 1999; 354: 626-629.
16. Czabański B, Filon M, Zatoń K. Elementy teorii pływania. Wydawnictwo AWF Wrocław, 2003.
17. Pugh LGC, Edholm OG. The physiology of channel swimmers. *Lancet* 1955; 2: 761-768.
18. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Exercise physiology energy, nutrition and human performance. Philadelphia, Pa: Lippincott Williams & Wilkins 2007.
19. Golden F, Tripton M. Essentials of sea survival. Champaign, IL: Human Kinetics 2002b.
20. Golden F, Tripton M. Human thermal responses during leg – only exercise in cold water. *J Physiol* 1987; 391:399-405.
21. Keatinge WR. The effect of work and clothing on the maintenance of the body temperature in water. *Q J Exp Physiol Cogn Med Sci* 1961; 46: 69-82.
22. Galbo H, Houston ME, Christensen NJ i wsp. The effect of water temperature on the hormonal response to prolonged swimming. *Acta Physiol Scand* 1979;105: 326-337.
23. Hayward MG, Keatinge WR. Progressive symptomless hypothermia in water: possible cause of diving accidents. *Br Med J* 1979; 5:1(6172): 1182.
24. Zeman V. Aktywność fizyczna w zimnym środowisku; *Med Sport* 2005; 9 (suppl. 3): 225-234.
25. Hayward JS, Eckerson JD, Collis ML. Effect of behavioral variables on cooling rate of man in cold water. *J Appl Physiol* 1975; 38(6): 1073-1077.
26. Wilkerson JE, Raven PB, Bolduan N i wsp. Adaptation in man's adrenal function in response to acute cold stress. *J Appl Physiol* 1974; 36:183-189.
27. Bergh U, Hartley H, Landsberg L i wsp. Plasma norepinephrine concentration during submaximal and maximal exercise at lowered skin and core temperatures. *Acta Physiol Scand* 1979, 106:283 – 384.
28. Castellani JW, Degroot DW. Human endocrine responses to exercise – cold stress W: Kraemer J, Rogol AD, The endocrine system in sports and exercise, wyd. Willey – Blackwell 2008, s. 499-511.

29. Johnson D, Hayward J, Jacobs T i wsp. Plasma norepinephrine responses of man in cold water. *J Appl Physiol* 1977, 43:216-220.
30. Šrámek P, Šimečková M, Janský L i wsp. Human physiological responses to immersion into water of different temperatures. *Eur J Appl Physiol* 2000; 81(5): 436-442.
31. Hirvonen J, Lindeman S, Matti J i wsp. Plasma catecholamines, serotonin and their metabolites and beta – endorphin of winter swimmers during one winter. Possible correlations to psychological traits. *Int J Circumpolar Health* 2002; 61(4): 363-372
32. Zeman V, Holeček V, Novák J. Funkce ledvin při plavání v ledově a teplé vodě u osob adaptovaných k chladu. *Čas Lék Čes* 1983; 122: 143-146.
33. Zeman V, Topolčan O, Karliček V. Hormonální odezva na plavání v ledově vodě u osob adaptovaných k chladu. *Lékař a Těl Vých* 1984; 2: 67-70.
34. Zeman V, Topolčan O, Karliček V. Sezónní změny v hladinách thyroxinu, TSH a kortizolu u sportovních otužilců. *Lékař a Těl Vých* 1984; 3: 63-67.
35. Stokcs JM, Taylor NAS, Tripton MJ i wsp. Human physiological responses to cold exposure. *Aviat Space Environ Med* 2004, 75(5):444-457.
36. Henning J, Laschefski U, Becker H i wsp. Immune cell and cortisol responses to physically and pharmacologically induced lowering of body core temperature, *Neuropsychobiology* 1993, 28(1-2):82-86.
37. Bittel J. The different types of general cold adaptation in man. *Int J Sports Med* 1992; 13(suppl.1): S172-S176.
38. Simeckova M, Jansky L, Lesna I i wsp. Role of beta adrenoceptors in metabolic and cardiovascular responses of cold exposed humans. *J Therm Biol* 2000; 25:437-442.
39. Zenner RJ, De Decker DE, Clement DL. Blood pressure response to swimming in ice-cold water. *The Lancet* 1980; 1(8160): 120-121.
40. Vybiral S, Lesná I, Janský L i wsp. Thermoregulation in winter swimmers and physiological significance of human catecholamine thermogenesis. *Exp Physiol* 2000; 85: 321-326.
41. Simonsen L, Stallknecht B, Bulow J. Contribution of skeletal muscle and adipose tissue to adrenaline-induced thermogenesis in man. *Int J of Obes Relat Metab Disord* 1993; 17(suppl.3): S47-S51.
42. Janský L, Vybiral S, Trubačova M i wsp. Modulation of adrenergic receptors and adrenergic functions in cold adapted humans. *Eur J Appl Physiol* 2008, 104(2):131-135.

Otrzymano: 28 października, 2008

Zaakceptowano: 4 grudnia, 2008

Adres do korespondencji:

mgr Aneta Teległów

Katedra Rehabilitacji Klinicznej

Wydział Rehabilitacji Ruchowej

Akademia Wychowania Fizycznego

Al. Jana Pawła II 78

31-571 Kraków

email:aneta.tegloglow@awf.krakow.pl