

Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu im. Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku
Zakład Fizjologii
Jędrzej Śniadecki Academy of Physical Education and Sport, Gdańsk
Department of Physiology

ANNA SZCZĘSNA-KACZMAREK,
PRZYBYSŁAWA KACZMAREK-USZNIEREWICZ, EWA ZIEMANN,
TOMASZ GRZYWACZ, MARCIN ŁUSZCZYK

Physiological cost of long-lasting physical effort

Koszt fizjologiczny długotrwałej pracy fizycznej

Wysiłek fizyczny nazywamy długotrwałym, jeżeli czas jego kontynuowania przekracza pół godziny. Pod względem zabezpieczenia energetycznego są to wysiłki, do wykonania których energia jest czerpana z procesów tlenowych (Saltin i inni, 1990). Niewielka ilość kwasu mlekowego, który powstaje na początku pracy, podczas 3 – 5 minutowego deficytu tlenu, ulega spalaniu w mięśniach szkieletowych i mięśniu sercowym oraz wchodzi w proces glukoneogenezy w wątrobie w dalszych minutach kontynuowania pracy. Na początku pracy głównym substratem energetycznym są węglowodany (glukoza krwi i glikogen mięśniowy). W trakcie kontynuowania pracy także udział kwasów tłuszczowych w uwalnianiu energii do pracy progresywnie rośnie. Po upływie 3-godzin pracy w około 80 % zapotrzebowanie energetyczne jest pokrywane ze spalania kwasów tłuszczowych.

Ponieważ zapasy cukrów w organizmie są ograniczone i w trakcie pracy progresywnie są wyczerpywane, to czynnikiem zmęczenia w trakcie wysiłków długotrwałych jest niedobór cukru (wyczerpanie glikogenu mięśni i wątroby) oraz tendencja do hipoglikemii. Kolejnym ważnym czynnikiem zmęczenia jest wzrost temperatury mięśni nawet do 42° C oraz konsekwencje nasilonych procesów termoregulacji usuwających nadmiar ciepła – odwodnienie organizmu. W trakcie kontynuowania pracy obok rozwijających się czynników zmęczenia, także mechanizmy obronne organizmu ulegają nasileniu.

Rośnie koszt fizjologiczny pracy, ponieważ nasilają się mechanizmy przystosowawcze w układzie oddechowym, nerwowym, krążenia itp. (Share i inni, 2004, Whyte i inni, 2000). Zmienia się poziom hormonów metabolicznych oraz napięcie układu nerwowego wegetatywnego – czyli zmienia się poziom regulacyjny czynności i funkcji narządów i tkanek organizmu (Evans i inni, 2001, Noterge i inni, 1991).

Celem naszej pracy jest ocena zmian wybranych parametrów układu krążenia i oddechowego charakteryzujących czynność tych układów podczas 2-godzinnej pracy, w odniesieniu do zmian w metabolizmie.

MATERIAŁ I METODY

Badaniami objęto studentki AWFIS (n = 15) w wieku 20 – 22 lat. Badane obciążono dwukrotnie wysiłkiem fizycznym wymiernym na cykloergometrze w odstępie jednego tygodnia. Wysiłek fizyczny pierwszy - to praca o wzrastającym obciążeniu na cykloergometrze kontynuowana aż do odmowy. Podczas tej pracy mierzono co 30 s objętość zużywanego przez organizm tlenu (VO₂), objętość wydalanego dwutlenku węgla (VC O₂)

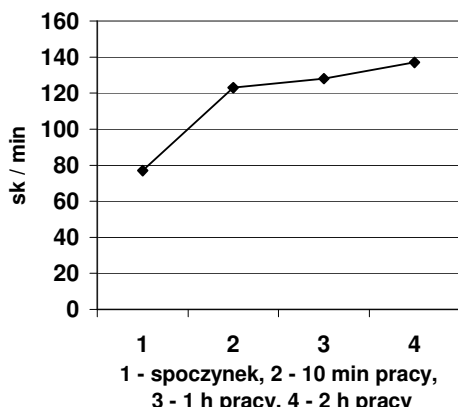
Częstość skurczów serca (HR), częstość oddechów, głębokość oddechów, wentylację minutową (VE), współczynnik oddechowy (RER), współczynnik metaboliczny (MET). Pomiaru wymienionych parametrów dokonano przy użyciu analizatora gazów wydechowych Eos-Sprint firmy Jaeger. Opisany test służył do pomiaru maksymalnej mocy tlenowej badanych, maksymalnego poboru tlenu i oceny progu przemian anaerobowych (AT).

Kolejny test wysiłkowy to 2- godzinna praca na cykloergometrze o obciążeniu stałym (indywidualnym dla każdej badanej osoby) na poziomie 70 % AT. Podczas tego testu mierzono co 30 s VO_2 , VC O_2 , HR, VE, RER, MET przy użyciu analizatora gazów wydechowych Eos-Sprint firmy Jaeger. Przed pracą, po 1-szej godzinie pracy, po 2-godzinach pracy pobierano krew z opuszki palca w celu pomiaru hematokrytu, wysycenia hemoglobiny tlenem oraz parametrów równowagi kwasowo-zasadowej. Jedną dobę przed pracą oraz jedną dobę po pracy dokonano dobowej zbiórki moczu w celu pomiaru ilości mocznika i oceny ilości wydalanego azotu. Spoczynkową ilość mocznika wydalanego do moczu oraz po wysiłku fizycznym wykorzystano do oceny metodą kalorymetrii pośredniej wydatku energetycznego oraz ilości zużywanych cukrów, białek i tłuszczu do pokrywania wydatku energetycznego.

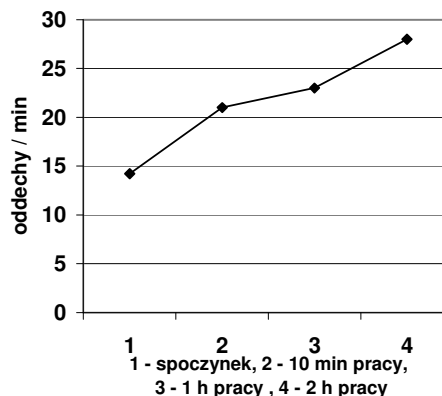
WYNIKI

Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1 oraz na rysunkach 1 – 9. W tabeli podano charakterystykę fizjologiczną badanych studentek. Pod względem parametrów wzrostowych i wieku jest to grupa osób o zbliżonej wysokości (śr. 168 cm \pm 3,3 cm), masie ciała (śr 57 kg \pm 4,7) oraz wieku (21 \pm 1,05 lat). Wartości VO_{2max} oraz wartości AT (tabela 1) wskazują, że jest to grupa osób o stosunkowo niskiej wydolności tlenowej. Badana grupa studentek nie uczestniczy w treningu fizycznym, jest jedynie zobligowana do wysiłku fizycznego w ramach zajęć dydaktycznych z przedmiotów praktycznych.

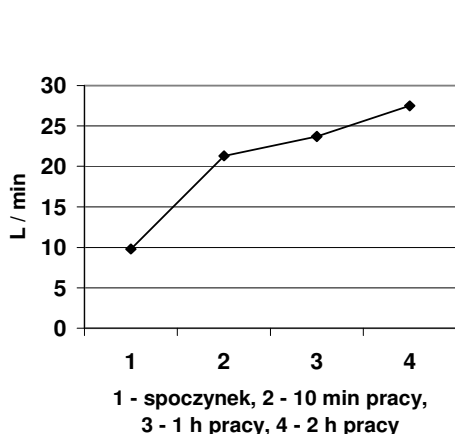
Pomiar VO_{2max} oraz progu przemian anaerobowych (AT) był konieczny nie tylko do oceny potencjalnych możliwości organizmu do wysiłku fizycznego, lecz także po to, by dobrać obciążenia indywidualne w właściwym teście wysiłkowym t.j. pracy długotrwałej, o stałym obciążeniu poniżej AT na poziomie około 40 % VO_2 max. Wszystkie badane wykonały 120 minutową pracę na cykloergometrze o stałym obciążeniu poniżej AT. Mierzone parametry charakteryzujące czynność układu krążenia i oddechowego oraz pomiar poboru tlenu i ilości wydalanego dwutlenku węgla (rys. 1 – 3, 5, 7) podczas trwania pracy (pomiar co 30 s, na rysunkach podano wartości po 10 min pracy, po 1 h i po 2 h) pozwalają ocenić zakres zmian przystosowawczych w tych układach do warunków wymuszonych przez wysiłek długotrwały.



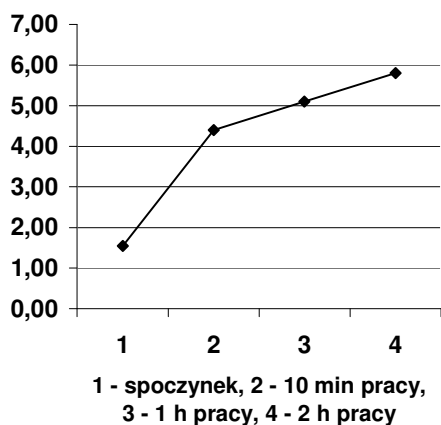
Rys. 1. Zmiany częstości skurczów serca podczas pracy ciągłej o stałym obciążeniu



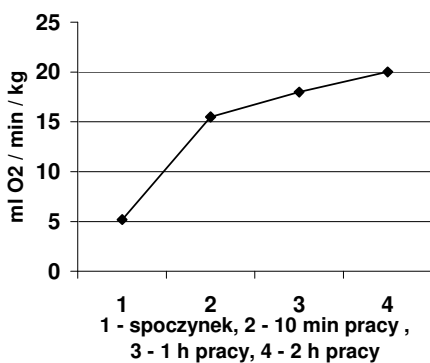
Rys. 2. Zmiany częstości oddechów w trakcie trwania pracy ciągłej o stałym obciążeniu



Rys. 3. Zmiany wartości wentylacji minutowej płuc w trakcie pracy ciągłej o stałym obciążeniu



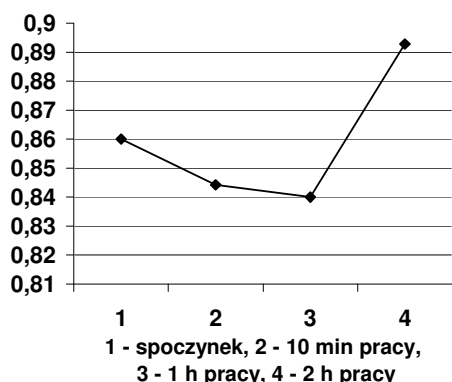
Rys.4. Zmiany wartości współczynnika metabolicznego (MET) podczas pracy ciągłej o stałym obciążeniu



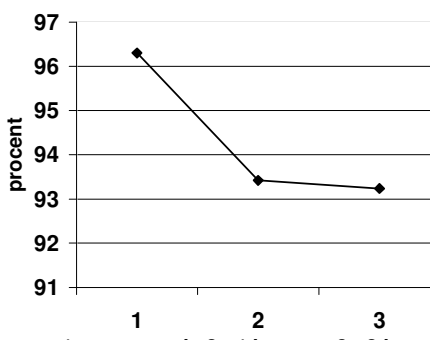
Rys.5. Zmiany objętości zużywanego tlenu podczas pracy ciągłej o stałym obciążeniu

Tabela 1. Charakterystyka fizjologiczna badanej grupy (wartości średnie)

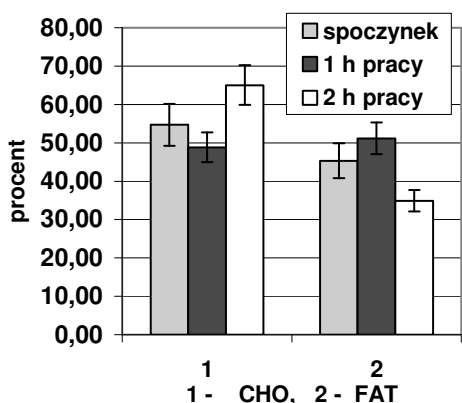
Badane N=14	Wiek (lata)	Masa ciała (kg)	Wzrost (cm)	VO _{2max} L/min	VO _{2max} ml/min/kg	AT % VO _{2max}	Moc tlenowa max.(W)
Średnia Arytmetycz.	21	57	168	2,0	42	59	223
Odchylenie standardowe	1,05	4,7	3,3	0,3	4,7	8,8	28,3



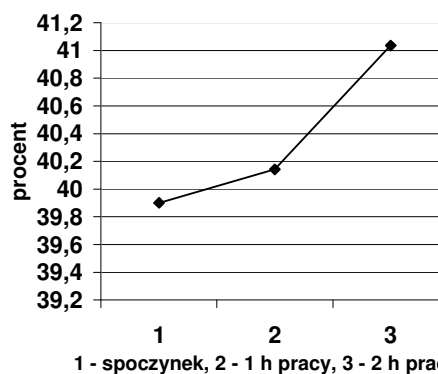
Rys.7. Zmiany wartości współczynnika oddechowego (RER) podczas pracy ciągłej o stałym obciążeniu



Rys.6. Zmiany wysycenia hemoglobiny tlenem podczas 2 h pracy ciągłej o stałym obciążeniu



Rys. 8. Zmiany zużycia substratów energetycznych w czasie 2 h pracy ciągłej o stałym obciążeniu



Rys.9. Zmiany wartości hematokrytu podczas pracy ciągłej o stałym obciążeniu

OMÓWIENIE WYNIKÓW I DYSKUSJA

Uzyskane wyniki wskazują, że mimo wysiłku fizycznego o stałym obciążeniu zewnętrznym, zużycie tlenu przez organizm jedynie na krótko stabilizuje się na poziomie $15,5 \text{ ml O}_2 / \text{min} / \text{kg}$ i po około 10 minutach pracy stwierdzamy progresywny wzrost VO_2 aż do jej zakończenia. Po pierwszej godzinie pracy zużycie tlenu wzrosło o około 180 ml/min , natomiast po dwóch godzinach pracy o stałym obciążeniu wzrost objętości zużywanego tlenu dochodził do 240 ml/min . Częściowego wytłumaczenia tego zjawiska możemy szukać w zmianie metabolizmu (Sahlin i inni, 1990, Horowitz and Klein, 2000). Stwierdziliśmy, że ze wzrostem czasu trwania pracy zmniejsza się zużycie cukrów na korzyść tłuszczów. W pierwszej godzinie pracy udział tłuszczów w uwalnianiu energii do pracy wzrósł o około 22 %. Utlenianie tłuszczów wymaga zwiększonego zużycia tlenu. W naszych badaniach stwierdziliśmy progresywny wzrost współczynnika metabolicznego MET skorelowany ze wzrostem utleniania tłuszczów. Współczynnik MET w stanie równowagi funkcjonalnej wynosił 4,4, natomiast po pierwszej i drugiej godzinie pracy wzrósł odpowiednio do 5,1 i 5,8. Zwiększenie zużycia tlenu wymusza natomiast wzrost obrotu krwi. Wzrost zużycia tlenu przez organizm o jeden litr na minutę jest możliwy przy wzroście objętości minutowej serca o około 6 litrów. Wzrost objętości minutowej serca podczas pracy długotrwałej dokonuje się w wyniku wzrostu częstości skurczów serca (Evans i inni,

2001). Stwierdzony więc podczas pracy wykonywanej przez studentki wzrost HR średnio o 8 sk. /min po pierwszej godzinie pracy i w kolejnej godzinie jej trwania wzrost o dalsze 12 sk. /min, jest zmianą przystosowawczą w czynności układu krążenia do warunków wymuszonych przez długotrwały wysiłek fizyczny. O rosnącym koszcie pracy układu krążenia w trakcie wysiłku długotrwałego świadczy wzrost stosunku VO_2 / HR . Wartość współczynnika tętna tlenowego wzrosła w stosunku do wartości spoczynkowej 2,1-krotnie i 2,33-krotnie odpowiednio po pierwszej i drugiej godzinie pracy, podczas gdy zużycie tlenu w tych samych warunkach było 3-krotnie wyższe niż w spoczynku po pierwszej godzinie pracy oraz 3,5-krotnie wyższe po drugiej godzinie. Natomiast malejący stosunek V_E / VO_2 (w spoczynku 1,7, po 10 min pracy – 1,37, po 1-szej godzinie 1,29 i po 2-h pracy – 1,3) wskazuje na rosnący koszt procesu oddychania zewnętrznego. Podsumowując można stwierdzić, że podczas pracy długotrwałej o stałym obciążeniu nie dochodzi do stabilizacji HR proporcjonalnie do zużycia tlenu. Pomiar wartości stosunku VO_2 / HR oraz V_E / VO_2 podczas pracy ciągłej, długotrwałej pozwala ocenić stopień zmęczenia oraz rosnący koszt pracy układu krążenia i układu oddechowego, czyli rosnący koszt fizjologiczny pracy.

PIŚMIENNICTWO

1. Evans J., M. et al. Gender differences in autonomic cardiovascular regulation: Spectral, hormonal and hemodynamic index. *J. Appl. Physiol.* 91: 2611-2618, 2001.
2. Horowitz J.F. and Klein S. Lipid metabolism during endurance exercise. *Am. J. Clin. Nutr.* 72: 558-563, 2000
3. Noterge A.C. et al. Cardiovascular responses to active and passive cycling movements. *Med. Sci. Sports Exercise.* 26: 709-714, 1991
4. Sahlin K. et al. Tricarboxylic acid cycle intermediates in human muscle during prolonged exercise. *Am. J. Physiol.* 259, (Cell Physiol 28) C834-C841, 1990
5. Share R.E. et al. Altered cardiac function and maximal cardiac damage during prolonged exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36: 1098-1103, 2004
6. Whyte G., K. et al. Cardiac fatigue following prolonged endurance exercise of different distance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32: 1067- 1072, 2000

STRESZCZENIE

W tej pracy oceniano koszt fizjologiczny 2-h pracy o stałej intensywności poniżej indywidualnego progu przemian anaerobowych (AT), wykonywanej na cykloergometrze przez młode kobiety (20 – 21 lat) (studentki AWFIS w Gdańsku). Podczas tej pracy stwierdzono progresywny wzrost współczynnika metabolicznego (MET) o około 32 % w drugiej godzinie pracy w stosunku do wartości w stanie równowagi funkcjonalnej oraz wzrost udziału tłuszczów w pokrywaniu zapotrzebowania energetycznego o około 22 %. Zmiany metaboliczne oraz rosnąca temperatura wewnętrzna pracujących mięśni wymuszają zmiany ciągłe w czynności układu krążenia i oddechowego. Stwierdzono ciągły, jednak nieproporcjonalny (obniżony) do wzrostu zużycia tlenu wzrost wartości VO_2 / HR oraz malejące wartości V_E / VO_2 . Wyniki te wskazują na rosnący w sposób ciągły koszt fizjologiczny pracy długotrwałej o stałym obciążeniu.

SUMMARY

The purpose of this paper was to examine the physiological cost of 2-h lasting cycloergometric exercise performed by young women (20-21 years old students of AWFIS Gdansk). The results shown that during endurance exercise at intensity below AT increased in progressive manner VO_2 , MET (about 32 % after 2-h lasting work), and FAT uptake (about 22 %). Moreover, increased values of VO_2 / HR , but this increase was not correlated with increase of VO_2 . In contrast V_E / VO_2 decreased following the work. The lack of proper changes of VO_2 / HR and V_E / VO_2 may suggest the increase of physiological cost of long lasting physical effort.