

Małgorzata Kurpesa¹Katarzyna Jerka¹Alicja Bortkiewicz²

SPIROERGOMETRYCZNA PRÓBA WYSIŁKOWA – ZASTOSOWANIE W KARDIOLOGII I MEDYCYNIE PRACY

CARDIOPULMONARY EXERCISE TESTING – ITS APPLICATION IN CARDIOLOGY
AND OCCUPATIONAL MEDICINE

¹ Uniwersytet Medyczny / Medical University, Łódź, Poland
Katedra i Klinika Kardiologii / Department of Cardiology

² Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland
Zakład Fizjologii Pracy i Ergonomii / Department of Work Physiology and Ergonomics

STRESZCZENIE

Spiroergometryczna próba wysiłkowa jest wykorzystywana do oceny wydolności fizycznej. W kardiologii znajduje zastosowanie w diagnostyce, planowaniu terapii, ocenie jej skuteczności i ocenie rokowania. Badanie to jest również wykorzystywane przez lekarzy innych specjalizacji, np. medycyny sportowej i medycyny pracy. Test spiroergometryczny polega na bezpośrednim pomiarze wymiany gazowej podczas próby wysiłkowej. W artykule przedstawiono najważniejsze parametry oceniane podczas testu oraz wskazania i przeciwwskazania do jego przeprowadzenia. Opisano też wyniki, najciekawszych według autorów, opublikowanych w ostatnim czasie badań klinicznych dotyczących wykorzystania testu spiroergometrycznego u pacjentów z chorobami układu krążenia i osób narażonych na niekorzystne dla zdrowia czynniki związane z pracą zawodową. W publikacjach tych oceniano zmienność parametrów oddechowych podczas testu spiroergometrycznego i po jego zakończeniu oraz ich wpływ na wartość prognostyczną badania. W niniejszej pracy przedstawiono ponadto doniesienia na temat optymalnego doboru obciążenia w treningu interwałowym w oparciu o zużycie tlenu na szczycie wysiłku. *Med. Pr.* 2014;65(5):665–674

Słowa kluczowe: ergometria, próba wysiłkowa, wysiłek fizyczny, medycyna pracy

ABSTRACT

Cardiopulmonary exercise testing is a method used to assess the exercise capacity. It is used in cardiology to define the diagnostic and prognostic information, the treatment and its effectiveness. This method is also useful in sport medicine and in occupational medicine. The cardiopulmonary exercise test involves measuring of gas exchange during exercise testing. The article presents the main parameters assessed during the test and the indications and contraindications for conducting the test. It also reveals the results of recently published clinical trials on the use of cardiopulmonary exercise test in patients with cardiovascular disease and in the working population. The study included variability of respiratory parameters during the cardiopulmonary exercise test and after its completion, as well as their impact on the prognostic value. In addition, the results of a study involving an optimal choice of interval training on the basis of oxygen consumption at peak exercise are summarized. *Med Pr* 2014;65(5):665–674

Key words: ergometry, exercise test, physical exertion, occupational medicine

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Małgorzata Kurpesa, Uniwersytet Medyczny, Szpital im. W. Biegańskiego, Katedra i Klinika Kardiologii, ul. Kniaziewiczza 1/5, 91-347 Łódź, e-mail: kurpesa@ptkardio.pl
Nadesłano: 8 lipca 2014, zatwierdzono: 30 października 2014

WSTĘP

Spiroergometryczna próba wysiłkowa (cardiopulmonary exercise test – CPET) jest najbardziej wiarygodną metodą wykorzystywaną do oceny wydolności fizycznej w celu uzyskania informacji prognostycznych niezbędnych w planowaniu leczenia i ocenie jego skuteczności. Dzięki tej szeroko stosowanej metodzie diagnostycznej uzyskuje się szczegółowe parametry pozwalające na dokładną ocenę kliniczną stanu pacjenta. Spiroergometryczna próba wysiłkowa, przeprowadza-

na na bieżni ruchomej lub cykloergometrze, jest połączeniem klasycznej próby wysiłkowej i pomiaru gazów w powietrzu oddechowym, co daje możliwość dokładnej oceny odpowiedzi organizmu na wysiłek fizyczny oraz wydolności fizycznej badanego.

Wydolność fizyczna to zdolność do wykonywania ciężkiej lub długotrwałej pracy fizycznej bez szybko narastającego zmęczenia i warunkujących jego rozwój głębszych zmian środowiska wewnętrznego organizmu oraz zdolność do szybkiego wycofania się ewentualnych zaburzeń homeostazy po zakończeniu wysiłku.

Jest to też dobra tolerancja zmian zmęczenia po wysiłku o dużej intensywności (1).

Spiroergometryczną próbę wysiłkową przeprowadza się u sportowców, osób uprawiających sport amatorsko oraz u pacjentów z chorobami pulmonologicznymi i kardiologicznymi. Wykonanie CPET w tej grupie pacjentów jest przydatne, ponieważ wiele schorzeń (zwłaszcza w początkowych stadiach) ujawnia się dopiero podczas wysiłku fizycznego. Wyniki pomiarów używane są również w procesie kwalifikowania pacjentów do różnych metod terapeutycznych, w tym przeszczepu serca, oraz do oceny skuteczności leczenia. Ponadto wyniki CPET służą do ustalenia programu rehabilitacji, w tym intensywności i częstotliwości ćwiczeń, oraz aktywności ruchowej w codziennym życiu pacjenta.

W rehabilitacji kardiologicznej uzyskane dzięki CPET parametry krążeniowo-oddechowe pozwalają precyzyjnie określić indywidualną intensywność wysiłku fizycznego podczas usprawniania chorych ze schorzeniami układu sercowo-naczyniowego o różnym stopniu zaawansowania. Celem rehabilitacji kardiologicznej jest m.in. jak najszybszy powrót pacjenta do aktywności zawodowej. Spiroergometryczna próba wysiłkowa umożliwia monitorowanie czynności układu krążeniowo-oddechowego i sprawności fizycznej pracownika zarówno przed podjęciem pracy zawodowej, jak i w trakcie badań okresowych.

W praktyce lekarza medycyny pracy CPET może być wykorzystywana podczas kwalifikowania badanego do podjęcia pracy fizycznej, zwłaszcza ciężkiej lub bardzo ciężkiej, czy pracy w trudnych warunkach (np. w kopalniach) i w narażeniu na czynniki szkodliwe, głównie pyły (2–4). Ponadto test spiroergometryczny znajduje zastosowanie w przypadku chorób, których konsekwencją jest zmniejszenie sprawności fizycznej, i w diagnostyce chorób zawodowych, np. astmy.

Udowodniono, że parametry uzyskane podczas testu spiroergometrycznego mają istotną wartość prognostyczną w wielu populacjach pacjentów. Wydaje się jednak, że mimo wzrastającej liczby wskazań klinicznych do wykonywania CPET i wprowadzania nowych parametrów niezbędnych do dokładnej oceny stanu ogólnego pacjenta, ta metoda diagnostyczna jest wciąż zbyt mało wykorzystywana (5,6).

METODY I WYNIKI PRZEGLĄDU

W niniejszej pracy przedstawiono przegląd wybranych doniesień dotyczących wykorzystania próby spiroergometrycznej. Publikacje w języku angielskim wy-

szukiwano w bazie PubMed z wykorzystaniem słów kluczowych: cardiopulmonary stress test, cardiac rehabilitation i wielu pokrewnych. Celem niniejszej pracy jest omówienie zasad przeprowadzania i wykorzystania próby spiroergometrycznej u pacjentów kardiologicznych, także czynnych zawodowo. Przedstawiono też sposoby zastosowania uzyskanych parametrów w praktyce klinicznej, z uwzględnieniem treningów fizycznych prowadzonych w ramach rehabilitacji kardiologicznej.

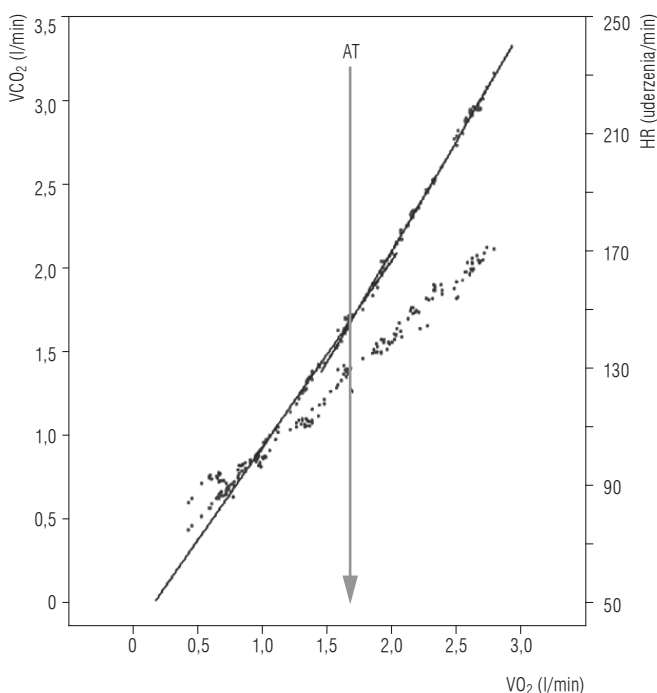
Najważniejsze parametry oceniane podczas CPET

Najważniejsze parametry, które można uzyskać podczas CPET, przedstawiono w tabeli 1. Głównym ocenianym parametrem jest maksymalne zużycie tlenu (maximal oxygen uptake – VO_{2max}). Z kolei u pacjentów z chorobami kardiologicznymi ocenia się zwykle szczytowe zużycie tlenu (peak oxygen uptake – VO_{2peak}) ze względu na trudne do osiągnięcia przez tych chorych VO_{2max} . Innymi ocenianymi parametrami są np.: zużycie tlenu (oxygen uptake – VO_2), eliminacja dwutlenku węgla (CO_2 production – VCO_2), zużycie tlenu na progu anaerobowym (oxygen uptake on anaerobic treshold – VO_{2AT}) oraz wielkość wentylacji (ventilation – VE) (3). Niektóre z nich są używane do oceny rokowania pacjentów z niewydolnością serca i mogą być pomocne w kwalifikacji chorych do przeszczepu serca. Do tych parametrów należą wskaźnik wentylacji wysiłkowej (ventilatory equivalent for CO_2 – VE/VCO_{2slope}), szczytowe zużycie tlenu (VO_{2peak}), wskaźnik wydajności zużycia tlenu (oxygen uptake efficiency slope – OUES), stężenie dwutlenku węgla w powietrzu końcowydechowym (end-tidal carbon dioxide partial pressure – $P_{ET}CO_2$) i powysiłkowy powrót częstotliwości rytmu serca (heart rate reserve – HRR).

Spiroergometryczna próba wysiłkowa umożliwia ustalenie progu beztlenowego (anaerobic treshold – AT), inaczej nazywanego progiem mleczanowym (lactate treshold – LT) lub wentylacyjnym progiem anaerobowym (ventilatory anaerobic treshold – VAT). Jest to taka intensywność wysiłku, przy której energia zaczyna być dostarczana w wyniku przemian beztlenowych. Próg beztlenowy można wyznaczać metodą inwazyjną lub nieinwazyjną. Pierwsza opiera się na przeprowadzaniu pomiaru stężenia mleczanu we krwi pobieranej od badanego w trakcie próby wysiłkowej o wzrastającej intensywności. Metoda nieinwazyjna polega na analizie gazów wydechowych podczas próby spiroergometrycznej.

Tabela 1. Parametry oceniane w teście spiroergometrycznym
Table 1. Rated parameters in cardiopulmonary exercise testing

	Parametr Parameter	Jednostka miary Unit of measurement
Zużycie tlenu / Oxygen uptake (VO_2) maksymalne / maximal (VO_{2max}) szczytowe / peak (VO_{2peak})		l/min
Zużycie tlenu w przeliczeniu na kilogram masy ciała / Oxygen uptake per kg (VO_2/kg)		ml/kg/min
Równoważnik wentylacyjny dwutlenku węgla / Ventilatory equivalent for CO_2 (VE/VCO_2)		–
Wentylacyjny próg beztlenowy / Ventilatory anaerobic threshold (VAT, AT, LT)		ml/kg/min
Współczynnik wymiany oddechowej / Respiratory exchange ratio (RER)		–
Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu końcowydechowym / End-tidal carbon dioxide partial pressure ($P_{ET}CO_2$)		mm Hg
Stężenie tlenu w powietrzu końcowydechowym / End-tidal oxygen partial pressure ($P_{ET}O_2$)		mm Hg
Eliminacja dwutlenku węgla / Carbon dioxide output (VCO_2)		l/min
Wentylacja / Ventilation (VE)		l/min
Powysiłkowy powrót częstości rytmu serca / Heart rate reserve (HRR)		uderzenia/min
Objętość oddechowa / Tidal volume (V_t)		l
Częstość oddechów / Breath frequency (B_f)		1/min
Puls tlenowy / Oxygen pulse (VO_2/HR)		ml



AT – próg beztlenowy / anaerobic threshold, VCO_2 – eliminacja dwutlenku węgla / carbon dioxide output, VO_2 – zużycie tlenu / oxygen uptake, HR – częstotliwość pracy serca / heart rate.

Ryc. 1. Wentylacyjny próg anaerobowy (VAT) wyznaczany metodą V-slope
Fig. 1. V-slope method for determining ventilatory anaerobic threshold (VAT)

Nieinwazyjnie VAT można wyznaczać kilkoma sposobami. Najczęściej wykorzystuje się metodę V-slope, w której analizowana jest zależność zużycia tlenu (oxygen uptake – VO_2) od eliminacji dwutlenku węgla (VCO_2). Za próg beztlenowy uznaje się punkt, w którym wzrost produkcji VCO_2 przekracza wzrost zużycia O_2 (7,8). Wykres wyznaczania progu beztlenowego metodą V-slope przedstawiono na rycinie 1.

Wskazania i przeciwwskazania do wykonania CPET

Spiroergometryczną próbę wysiłkową wykonuje się w następujących przypadkach:

- ocena wydolności wysiłkowej i wyników terapii chorych z przewlekłą niewydolnością serca, u których rozważa się transplantację serca lub inny zabieg kardiochirurgiczny,
- różnicowanie sercowej lub płucnej przyczyny duszności wysiłkowej lub niskiej wydolności,
- ocena wydolności u pacjentów, jeśli subiektywna ocena wydolności jest niewiarygodna,
- ocena wydolności układu krążenia i oddechowego przed zabiegami operacyjnymi innymi niż kardiochirurgiczne,
- przewidywanie incydentów sercowo-naczyniowych i nagłej śmierci sercowej,

- określenie intensywności treningu fizycznego w ramach kompleksowej rehabilitacji kardiologicznej,
- ocena efektów leczenia i rehabilitacji kardiologicznej (9–11).

Przeciwwskazania do wykonania testu wysiłkowego, w tym spiroergometrycznego, można podzielić na bezwzględne i względne (10). Do przeciwwskazań bezwzględnych należą:

- ostra faza zawału mięśnia sercowego (pierwsze 2 dni),
- niestabilna dławica piersiowa,
- aktywne zapalenie wsierdza,
- niewyrównana arytmia,
- objawowa ciężka stenoza aortalna,
- niewyrównana niewydolność serca,
- ostra zatorowość płucna,
- zawał płuca,
- zakrzepica żył głębokich,
- ostre zapalenia mięśnia sercowego lub osierdza,
- ostre rozwarstwienie aorty,
- niepełnosprawność fizyczna uniemożliwiająca bezpieczne i właściwe przeprowadzenie badania.

Przeciwwskazania względne to:

- zwężenie pnia lewej tętnicy wieńcowej,
- umiarkowane zwężenie zastawki aortalnej,
- tachyarytmie z niekontrolowanym rytmem komór,
- nabyty zaawansowany lub całkowity blok serca,
- kardiomiopatia przerostowa z zawężaniem drogi odpływu i wysokim spoczynkowym gradientem w drodze odpływu,
- świeży udar mózgu i przemijający atak niedokrwienny,
- niepełnosprawność psychiczna uniemożliwiająca współpracę podczas badania,
- inne schorzenia (anemia, zaburzenia elektrolitowe itp.),
- nadciśnienie tętnicze powyżej 200/110 mm Hg.

Przegląd doniesień na temat wykorzystania CPET u pacjentów z chorobami układu krążenia i kwalifikowanych do rehabilitacji kardiologicznej

W piśmiennictwie publikowane są wyniki dotyczące możliwości wykonania i przydatności CPET nawet u najcięższych chorych, których stan wymaga hospitalizacji w warunkach intensywnej opieki medycznej.

Benington i wsp. przedstawili wyniki badań przeprowadzonych u pacjentów oddziału intensywnej terapii (OIT) poddanych mechanicznej wentylacji przez okres dłuższy niż 5 dni (12). Celem pracy było określenie możliwości wykonania po hospitalizacji w OIT

próby spiroergometrycznej i ocena wpływu na jej wynik długości prowadzenia wentylacji mechanicznej. Zbadano 50 pacjentów (średnia wieku: 57 lat), u których w ciągu 6 tygodni od opuszczenia szpitala wykonano CPET na cykloergometrze rowerowym. Chorych podzielono na 2 grupy w zależności od czasu trwania wentylacji mechanicznej (5–14 dni i powyżej 14 dni).

Pacjenci wentylowani mechanicznie przez dłużej niż 14 dni uzyskali znacznie niższy próg beztlenowy ($9,6 \pm 3,2$ ml/kg/min) w porównaniu z pacjentami wentylowanymi 5–14 dni ($11,7 \pm 2,2$ ml/kg/min) ($p = 0,009$). Szczytowe zużycie tlenu również było niższe w grupie dłużej wentylowanej ($12,9 \pm 3,7$ vs $15,3 \pm 4,2$ ml/kg/min, $p = 0,023$). Autorzy zwrócili uwagę, że wykonanie testu spiroergometrycznego u pacjentów poddanych wcześniej wentylacji mechanicznej na OIT może być utrudnione z powodu wielu ograniczeń. Najważniejsze z nich to ogólne osłabienie organizmu i osłabienie siły mięśniowej pacjentów. Wyniki badania pokazały jednak, że wczesne przeprowadzanie CPET u takich chorych może ułatwić dobór odpowiedniego zestawu ćwiczeń do rehabilitacji (głównie aerobowych i zwiększających masę mięśniową) oraz ocenę ich efektów.

Ważne, żeby proces usprawniania chorych poddanych intubacji rozpoczynać już w trakcie ich pobytu na oddziale intensywnej terapii. U takich pacjentów zaleca się wykonywanie ćwiczeń biernych w celu zmniejszenia powikłań związanych z unieruchomieniem, m.in. przeciwdziałania zmianom zatorowo-zakrzepowym, zanikom mięśniowym, powstawaniu odleżyn czy przykurczom mięśniowym. Wszystkie te ćwiczenia mogą wpłynąć na wynik dalszego usprawniania pacjenta, wyniki testów wysiłkowych i w konsekwencji na rokowanie.

Niedawno wprowadzonym parametrem stosowanym w interpretacji CPET jest wysiłkowa wentylacja oscylacyjna (exercise oscillatory breathing – EOB). Za kryterium jej rozpoznania przyjęto obecność 3 lub więcej regularnych oscylacji wentylacji minutowej (cyklicznych okresów hiper- i hipowentylacji) o minimalnej amplitudzie ok. 5 l z odchyleniem standardowym przerw między 3 kolejnymi oscylacjami mniejszym o co najmniej 20% od ich średniej. Oscylacje mogą występować zarówno podczas wysiłku, jak i w spoczynku, ale do rozpoznania EOB powinny być obecne przez ponad 60% czasu wysiłku i mieć amplitudę o ponad 15% większą niż oscylacje w spoczynku.

Obecność cyklicznych okresów hiperwentylacji i hipowentylacji podczas wysiłku i spoczynku jest niezależna od zdolności wykonania maksymalnego testu wysiłkowego, ale występuje częściej u osób z zaawansowa-

ną niewydolnością serca. Uważa się, że obecność EOB jest w tej populacji predyktorem zwiększonego ryzyka zgonu, w tym nagłej śmierci sercowej.

W celu oceny wartości prognostycznej pomiaru EOB i innych parametrów wentylacyjnych u pacjentów w starszym wieku z niewydolnością krążenia Scardovi i wsp. przeprowadzili maksymalną próbę spiroergometryczną u 370 osób (średnia wieku: 74 lata) na cykloergometrze (13). Wentylację (VE), zużycie tlenu (VO_2), eliminację dwutlenku węgla (VCO_2) i inne wskaźniki mierzono podczas testu w 10-sekundowych odstępach. W trakcie badania i po nim oceniano wzmożoną wentylację wysiłkową ($VE/VCO_{2\text{ slope}}$) i szczytowe zużycie tlenu ($VO_{2\text{ peak}}$). Współczynnik wymiany oddechowej (respiratory exchange ratio – RER) określono na podstawie maksymalnego wysiłku.

Wśród badanych 21 pacjentów (5,6%) miało wszczepiony stymulator resynchronizujący lub kardiowerter defibrylator. Występowanie EOB stwierdzono u 215 pacjentów (58%), wśród których przeważali mężczyźni (87%). W trakcie obserwacji zmarły 84 osoby (w tym 72 z przyczyn sercowo-naczyniowych), a u 90 stwierdzono pogorszenie niewydolności krążenia. Szczytowe pochłanianie tlenu ($VO_{2\text{ peak}}$) wyniosło średnio 11,9 ml/kg/min (9,9–14 ml/kg/min), a wzmożony wskaźnik wentylacji wysiłkowej ($VE/VCO_{2\text{ slope}}$) – 33 (29,3–39,2).

Scardovi i wsp. wykazali, że stosunek $VE/VCO_{2\text{ slope}}$ do $VO_{2\text{ peak}}$ oraz wysiłkowa wentylacja oscylacyjna były najsilniejszymi predyktorami śmiertelności w badanej grupie, niezależnymi od funkcji mięśnia sercowego. Podkreślili też, że występowanie EOB było częstsze u osób starszych niż pacjentów w średnim wieku.

Od dawna zwraca się uwagę na istotność fazy wypoczynku (recovery) w interpretacji próby wysiłkowej. Również w przypadku CPET ta faza testu może dostarczyć ważnych informacji o pacjencie, choć wciąż znaczenie wszystkich zjawisk obserwowanych w fazie odpoczynku (recovery) nie zostało jednoznacznie wyjaśnione. Należy do nich m.in. wzrost VO_2 (puls tlenowy, oxygen pulse – VO_2/HR) oraz VCO_2 powyżej wartości obserwowanych podczas maksymalnego wysiłku.

Znaczenie tego zjawiska u pacjentów kardiologicznych ocenili Suzuki i wsp. (14). Do badania włączono 227 pacjentów (średnia wieku i odchylenie standardowe: 62,3±11,7 lat) z różnymi chorobami układu sercowo-naczyniowego, którym wykonano CPET na cykloergometrze. Po 4-minutowej fazie rozgrzewki (0 W lub 20 W) obciążenie co 6 s zwiększano o 1 W (10 W/min). W trakcie badania analizowano VO_2/HR , VO_2 oraz VCO_2 . Próg beztlenowy określono metodą V-slope.

Pacjentów podzielono na 2 grupy – grupę 1, która osiągnęła tymczasowy wzrost VCO_2 (12 pacjentów), VO_2 (11 pacjentów) lub VO_2/HR (43 pacjentów) w fazie odpoczynku, oraz grupę 2, w której nie obserwowano tego zjawiska. U części chorych z grupy 1. w fazie odpoczynku (recovery) rejestrowano tymczasowy wzrost więcej niż 1 z badanych parametrów. Nie było istotnych statystycznie różnic w płci, wieku, wzroście, wadze i wskaźniku masy ciała (body mass index – BMI) między obiema grupami. U pacjentów z kardiomiopatią rozstrzeniową i kardiomiopatią przerostową stwierdzano jednak częściej przejściowy wzrost VO_2 niż u pacjentów z innymi schorzeniami.

W grupie 1., w której zużycie tlenu wzrosło w fazie odpoczynku, frakcja wyrzutowa lewej komory (left ventricular ejection fraction – LVEF) (39,9±22,8%) była niższa niż w grupie 2. (55,8±16,8%) ($p = 0,003$). Chorzy z grupy 1. podczas wysiłku osiągnęli znacznie niższe $VO_{2\text{ max}}$ (12,3±3,7 ml/kg/min vs 17,9±6,2 ml/kg/min, $p = 0,003$). Ponadto mieli niższy próg beztlenowy (9,4±1,7 ml/kg/min vs 12,4±3,3 ml/kg/min), ale wyższy $VE/VCO_{2\text{ slope}}$ (38±5,2 vs 33,2±9,6; $p = 0,013$) w porównaniu z grupą 2.

Na podstawie uzyskanych wyników Suzuki i wsp. (14) stwierdzili, że tymczasowy wzrost VO_2 , VO_2/HR lub VCO_2 podczas fazy odpoczynku powyżej wartości obserwowanych na szczycie wysiłku występuje u osób z obniżoną wydolnością wysiłkową układu krążenia. Przyczyną obserwowanego zjawiska może być zaburzenie mechanizmów regulacyjnych, które powoduje przemijającą rozbieżność („mismatch”) między funkcją skurczową miokardium a spadkiem obciążenia następczego. Wyniki omówionej pracy wskazują ponadto, że faza odpoczynku (recovery) jest integralną częścią badania CPET i nie należy jej skracać ani tym bardziej pomijać.

Między niektórymi parametrami uzyskiwanymi podczas CPET zachodzą wzajemne zależności. Dla przykładu VCO_2 jest ściśle związana z wentylacją wysiłkową VE. Stosunek VE/VCO_2 nazywa się wentylacyjnym równoważnikiem dwutlenku węgla i oznacza taką objętość wentylacji minutowej, która jest niezbędna do usunięcia jednego litra CO_2 . Podczas wysiłku VE/VCO_2 sukcesywnie się obniża, a po osiągnięciu najniższej dla danego pacjenta wartości ponownie wzrasta.

Ingle i wsp. zbadali związek czasu potrzebnego do osiągnięcia minimalnej wartości VE/VCO_2 (czas do $VE/VCO_{2\text{ nadir}}$) z rokowaniem pacjentów z niewydolnością serca (15). W tym celu przeprowadzili CPET na bieżni ruchomej u 501 osób. W grupie badanej

znajdowało się 423 pacjentów (80% mężczyzn) z przewlekłą niewydolnością serca (średni wiek: 63±12 lat). Grupę porównawczą stanowiło 78 zdrowych osób (62% mężczyzn, średni wiek: 61±11 lat).

Równoważnik wentylacyjny dwutlenku węgla (VE/VCO_2) obliczono w przebiegu całego testu w oparciu o liniowy wzrost VCO_2 i VE . W grupie badanej $VO_{2\text{ peak}}$ wyniosło 22,3±8,1 ml/kg/min, a w grupie porównawczej było istotnie wyższe. Czas do $VE/VCO_{2\text{ nadir}}$ był istotnie krótszy w grupie porównawczej (327±204 s) niż w grupie badanej (514±187 s) ($p = 0,0001$). U pacjentów z niewydolnością serca czas ten był wprost proporcjonalnie skorelowany z wartością frakcji wyrzutowej lewej komory, a odwrotnie proporcjonalnie z wiekiem chorych.

Pacjentów obserwowano przez 8,6±2,1 lat. W tym czasie zmarło 118 chorych (28%). W analizie wieloparametrycznej niezależnymi predyktorami śmiertelności okazały się $VO_{2\text{ peak}}$ oraz $VE/VCO_{2\text{ nadir}}$. Z kolei przy użyciu krzywych operacyjno-charakterystycznych (receiver operating characteristics – ROC) autorzy wykazali, że związek $VE/VCO_{2\text{ nadir}}$ ze śmiertelnością w ciągu 12 miesięcy był podobny jak w przypadku czasu do osiągnięcia jego minimalnej wartości. Jest to pierwsze w piśmiennictwie doniesienie dokumentujące istotną niekorzystną wartość rokowniczą czasu do osiągnięcia minimalnej wartości VE/VCO_2 . Autorzy (15) podkreślili, że czas ten u pacjentów z niewydolnością serca był istotnie krótszy niż u osób zdrowych.

Jedną z form treningu fizycznego w rehabilitacji kardiologicznej jest trening interwałowy. Polega on na zmiennej intensywności wysiłku i skróconych przerwach na wypoczynek, co sprawia, że każdy następny etap obciążenia jest wykonywany po niepełnym wypoczynku. Taki wysiłek – podzielony na interwały o różnym stopniu intensywności, częstotliwości, czasie trwania i tempie narastania obciążenia – stanowi podstawę rehabilitacji kardiologicznej i treningu sportowego.

Najpowszechniej używanym wzorem do określania limitu tętna jest wzór Karvonena:

$$HR_{\text{w trakcie wysiłku}} = (HR_{\text{max}} - HR_{\text{w trakcie spoczynku}}) \times \% \text{ intensywności} + HR_{\text{w trakcie spoczynku}} \quad [1]$$

gdzie:

HR (heart rate) – częstotliwość pracy serca.

Obecnie uważa się, że intensywny trening interwałowy daje u pacjentów kardiologicznych lepsze wyniki niż trening ciągły. Intensywność treningu prowadzo-

nego w ramach rehabilitacji kardiologicznej określana jest indywidualnie dla każdego pacjenta na podstawie jego zbadanej wyjściowej tolerancji wysiłku. Badaniem służącym do kwalifikowania chorego do odpowiedniego modelu rehabilitacji jest próba wysiłkowa.

Sporo kontrowersji budzi dobór odpowiedniego modelu treningowego, zwłaszcza dla pacjentów z niewydolnością serca. W celu znalezienia optymalnego maksymalnego protokołu treningu interwałowego dla tej grupy chorych Meyer i wsp. przeprowadzili badanie 20 mężczyzn (w wieku 44–80 lat) z udokumentowaną przewlekłą niewydolnością serca w klasie I–III według Nowojorskiego Towarzystwa Kardiologicznego (New York Heart Association – NYHA) i frakcją wyrzutową lewej komory poniżej 40% (16). U większości badanych przyczyną niewydolności serca była choroba niedokrwienna serca – wszyscy otrzymywali optymalną farmakoterapię zgodnie z aktualnie obowiązującymi wytycznymi.

Wyjściowo u wszystkich pacjentów wykonano maksymalny test spiroergometryczny na cykloergometrze. Po początkowej 2-minutowej fazie z obciążeniem 20 W obciążenie zwiększono do 30 W, a następnie zwiększano o 10 W po każdej kolejnej minucie aż do przerywania próby z powodu zmęczenia badanego. Obciążenie uzyskane w ostatnim w pełni zakończonym etapie CPET określano jako maksymalne obciążenie (peak power output – PPO).

W ciągu tygodnia od wykonania CPET rozpoczęto treningi realizowane w 4 wariantach. Pacjentów przyporządkowano do nich w sposób randomizowany, żeby każdy badany wziął udział w każdym z 4 wariantów treningu w ciągu 3 tygodni (crossover study). Obciążenie w każdym treningu było na poziomie 100% PPO określonego w wyjściowym CPET.

Warianty treningów różniły się długością interwałów wysiłku (30 s dla wariantu A i B vs 90 s dla C i D) oraz rodzajem fazy odpoczynku (aktywny odpoczynek 50% PPO w wariantach B i D vs bierny odpoczynek 0% PPO w wariantach A i C). Każdy trening trwał do momentu zmęczenia pacjenta, ale nie dłużej niż 30 min. W czasie treningu w sposób ciągły przeprowadzano EKG i pomiary gazów oddechowych. W rezultacie stwierdzono, że całkowity czas wysiłku był istotnie dłuższy w wariantach A (1651±347 s) i C (1574±382 s) niż w B (986±542 s) i D (961±556 s). Czas treningu prowadzonego na poziomie powyżej 100%, powyżej 95% i powyżej 90% $VO_{2\text{ peak}}$ był krótszy w wariantach A niż w pozostałych 3 wariantach treningu ($p < 0,05$).

Wszystkie warianty okazały się bezpieczne, przy czym tolerancja wysiłku była najlepsza podczas treningu zgodnego z wariantem A – 12 pacjentów (60% grupy) wskazało go jako preferowany spośród 4 proponowanych. Wobec powyższego Meyer i wsp. (16) stwierdzili, że dla pacjentów z umiarkowaną skurczową niewydolnością serca najbardziej optymalny spośród protokołów treningu opartych na maksymalnym tolerowanym wysiłku jest ten, w którym krótkie, 30-sekundowe interwały wysiłku są przeplatane biernym odpoczynkiem bez żadnego obciążenia.

Omówione badanie jest interesujące, jednak ma wiele ograniczeń, dlatego autorzy przestrzegają przed ekstrapolowaniem wyników uzyskanych w grupie relatywnie młodych osób bez schorzeń współistniejących na całą populację chorych z niewydolnością serca. Potwierdzenie skuteczności i bezpieczeństwa treningu z dużym obciążeniem w tej grupie niewątpliwie wymaga badań w dużej populacji z obserwacją odległą po zakończeniu rehabilitacji.

O korzystnym wpływie rehabilitacji kardiologicznej na zwiększenie wydolności fizycznej pacjentów kardiologicznych decyduje wiele czynników. Ważna jest m.in. regularność i systematyczność podejmowania wysiłku fizycznego. Optymalny czas trwania rehabilitacji kardiologicznej jest jednak wciąż przedmiotem dyskusji.

Balsam i wsp. przeprowadzili badanie w grupie 52 pacjentów po zawale serca, leczonym pierwotną angioplastyką wieńcową (17). U wszystkich badanych wykonano próbę wysiłkową, a u osób z jej ujemnym wynikiem – również CPET. Następnie chorych poddano rehabilitacji, ustalając obciążenie wysiłkiem na podstawie progu beztlenowego i rezerwy częstotliwości pracy serca. Treningi prowadzono 3–5 razy w tygodniu. Kontrolną CPET wykonywano po pierwszych 12 sesjach rehabilitacyjnych, a następną po kolejnych 12.

Największą poprawę parametrów obserwowano po pierwszych 12 treningach – szczytowe pochłanianie tlenu wzrosło z 32,32 do 36,75 ml/kg/min ($p < 0,001$). Z kolei kontynuowanie rehabilitacji nie przyniosło już tak spektakularnych korzyści, ponieważ po kolejnych 12 sesjach treningowych zaobserwowano jedynie nieistotny statystycznie trend w kierunku wzrostu $VO_{2\text{peak}}$. Autorzy (17) pokreślili korzystny wpływ regularnego treningu fizycznego na wydolność wysiłkową pacjentów po zawale serca. W swojej pracy wykazali, że do uzyskania istotnej poprawy parametrów CPET wystarczy już 4 tygodnie systematycznego treningu w ramach rehabilitacji kardiologicznej.

Przegląd doniesień na temat wykorzystania CPET u osób wykonujących różne rodzaje pracy

Jest bardzo mało doniesień na temat wykorzystania CPET do oceny wpływu różnych czynników środowiska (zarówno komunalnego, jak i środowiska pracy) na czynność układu krążeniowo-oddechowego. Badania dotyczyły głównie osób ekspozowanych na pyły.

Badanie, w którym połączono test wysiłkowy i spirometrię, opisali Wang i wsp. (18). Autorzy przeprowadzili test wysiłkowy na ergometrze rowerowym u 153 pracowników (średnia wieku: 43 ± 10 lat) ekspozowanych zawodowo na pył zawierający krzemionkę, o stażu pracy w narażeniu co najmniej 3 lata (średnia: 16 ± 8 lat), bez zmian w obrazie rtg. oraz u 62 pacjentów (w wieku 53 ± 9 lat) ze stwierdzoną pylicą krzemową.

Tętno submaksymalne podczas testu wysiłkowego osiągnęło 67% pracowników i 23% pacjentów. U pozostałych osób test musiał zostać przerwany z powodu różnych dolegliwości, głównie duszności i zmęczenia. Na duszność wysiłkową skarżyło się 77 pracowników (50% badanych) i 53 pacjentów (85% badanych).

Przed testem i po teście wysiłkowym u osób badanych wykonywano badanie spirometryczne. Nie stwierdzono istotnej różnicy między pracownikami a pacjentami w zakresie częstości skurczów serca przed testem i po nim, natomiast pracownicy mieli po teście istotnie wyższe ciśnienie skurczowe, a pacjenci istotnie wyższe ciśnienie rozkurczowe. W zakresie parametrów oddechowych nie stwierdzono istotnej różnicy w wartościach wentylacji minutowej (V_E) ani maksymalnej wentylacji wysiłkowej ($V_{E\text{max}}$). U pacjentów z pylicą istotnie wyższa była jednak częstość oddechów i indeks duszności (ID) wyrażony jako proporcja między $V_{E\text{max}}$ a maksymalną, dowolną wentylacją (maximal voluntary ventilation – MVV). Z kolei istotnie niższe były VO_2 , $VO_{2\text{max}}$ i rezerwa oddechowa (breathing reserve – BR), wyrażona jako różnica $MVV - V_{E\text{max}}$. Autorzy (18) stwierdzili, że ID i BR są parametrami najtrafniej określającymi stopień zaawansowania duszności wysiłkowej.

W badaniu przeprowadzonym w Chinach przez Liu i wsp. porównano wydolność oddechowo-krążeniową u 15 zdrowych osób pracujących w warunkach dużego zapylenia i 15 pracowników nieekspozowanych na pyły (grupa porównawcza) (4). U wszystkich wykonano test spirometryczny w spoczynku, pomiar ciśnienia tętniczego i częstości skurczów serca oraz CPET. U osób ekspozowanych na pyły stwierdzono istotnie wyższą spoczynkową częstość skurczów serca. Podczas wysiłku osoby z grupy porównawczej miały istotnie wyższe

wartości $VO_{2\max}$, $VO_{2\max}/\text{kg}$ i pO_2 (ciśnienie parcjalne tlenu), natomiast HRR u osób eksponowanych był istotnie wolniejszy w porównaniu z grupą porównawczą. Autorzy (4) podkreślają istotną rolę CPET w diagnostyce pracowników eksponowanych na pyły.

Z kolei Duvenkamp i wsp. przeprowadzili badania u górników z rozpoznaną pylicą płuc (19). U osób tych w badaniach okresowych standardowo wykonywana jest spirometria spoczynkowa i rentgen płuc. Nie są natomiast oceniane zmiany czynnościowe podczas testu wysiłkowego. U 20 osób z pylicą węglowo-krzemową (*anthracosilicosis*) w wieku $64,5 \pm 3,8$ lat i 24 ochotników w wieku $58,1 \pm 4,7$ lat podczas testu spiroergometrycznego ze stałym obciążeniem 50 W na cykloergometrze rowerowym oceniano wszystkie parametry krążeniowo-oddechowe (tab. 1). Stwierdzono, że u zdrowych ochotników wartości VE/VO_2 i VE/VCO_2 , VE i $P_{ET}O_2$ były istotnie wyższe niż u osób z pylicą płuc. Autorzy (19) wnioskują, że CPET jest wartościowym badaniem, które pozwala ocenić funkcjonalne zaburzenia oddechowo-krążeniowe u osób z pylicą płuc.

Istotną przewagę CPET nad spoczynkowymi testami spirometrycznymi wykazali Volpino i wsp. (3), którzy przeprowadzili badania u 68 policjantów „drogówki” (wiek: $46,3 \pm 5,7$ lat), eksponowanych podczas pracy na pyły spalinowe, i u 62 biurowych pracowników policji w wieku $40,8 \pm 5,4$ lat (grupa porównawcza). Grupy dobrano pod względem wieku, miejsca zamieszkania i stażu pracy, nie różniły się też istotnie BMI, częstością występowania czynników ryzyka chorób układu krążenia, fizycznej aktywności pozazawodowej ani nawykiem palenia tytoniu. U wszystkich mężczyzn przeprowadzono badania spoczynkowe (pomiar ciśnienia tętniczego, EKG spoczynkowe, pełną spirometrię) i test wysiłkowy ze wzrastającym obciążeniem.

Po obciążeniu wstępnym nie stwierdzono istotnych różnic między grupami w wynikach badań spoczynkowych, natomiast grupy różniły się istotnie w zakresie wielu parametrów krążeniowo-oddechowych podczas testu wysiłkowego. U istotnie większej liczby policjantów „drogówki” niektóre parametry krążeniowo-oddechowe ($VO_{2AT}/VO_{2\max\text{ predicted}}$, HRR, VCO_2) znajdowały się poniżej wartości uznanych za prawidłowe. W grupie tej czas trwania testu (do odmowy dalszego wykonywania testu) i osiągnięte obciążenie były istotnie niższe w porównaniu z grupą porównawczą. Po 3 min odpoczynku wszystkie analizowane parametry różniły się istotnie między grupami. Na podstawie przeprowadzonego badania autorzy (3) wnioskują, że długotrwałe zawodowe narażenie na pyły w środowisku pracy zmniejsza

tolerancję wysiłku fizycznego oraz może zwiększać ryzyko chorób układu krążenia i układu oddechowego.

Interesujące badanie przeprowadzili Mao-Chang Su i wsp. (20), którzy u 13 pracowników medycznych w 14. miesiącu po przebytych ostrym zespole oddechowym (severe acute respiratory syndrome – SARS) oprócz innych badań zastosowali także test spiroergometryczny. Autorzy porównywali wyniki z wynikami testu CPET uzyskanymi w dobranej pod względem wieku grupie zdrowych pracowników medycznych. W teście spiroergometrycznym w żadnym z analizowanych parametrów nie stwierdzono istotnych różnic między osobami po przebytych SARS a osobami zdrowymi. W obu grupach podobny był także odsetek osób z obniżoną zdolnością wysiłkową. Autorzy (20) stwierdzili, że obniżona zdolność wysiłkowa nie była związana z zaburzeniami funkcjonowania układu oddechowego.

Z kolei Sörensen i wsp. porównali wyniki oceny wydolności krążeniowo-oddechowej, uzyskane z zastosowaniem 2 różnych metod, z wynikami samooceny stanu zdrowia, jakości życia i zdolności do pracy pracowników fizycznych w Finlandii (21). U 104 mężczyzn w wieku 45–55 lat określono wydolność fizyczną, czyli $VO_{2\max}$ na podstawie maksymalnego testu na ergometrze rowerowym z oceną parametrów oddechowych. Po tygodniu badane osoby musiały pokonać w szybkim tempie 2-kilometrowy dystans, na otwartej przestrzeni, podczas którego monitorowano częstość skurczów serca. Na tej podstawie oszacowano $VO_{2\max}$ metodą pośrednią. Ponadto badane osoby wypełniały kwestionariusze dotyczące samooceny stanu zdrowia i jakości życia (RAND) oraz zdolności do pracy (work ability index – WAI). Stwierdzono, że wyniki oceny wydolności fizycznej uzyskane podczas testu marszowego lepiej korelowały z samooceną stanu zdrowia i zdolności do pracy niż wyniki uzyskane podczas testu spiroergometrycznego (21).

Yoopat i wsp. porównywali trafność testu spiroergometrycznego ze step-testem dla oceny wydolności fizycznej ($VO_{2\max}$) (22). U 15 młodych kobiet i mężczyzn w wieku 19–20 lat wykonano 3 rodzaje testów – próbę wysiłkową na cykloergometrze z oceną parametrów wymiany gazowej i HR, step-test I, podczas którego monitorowano tylko HR, oraz step-test II z oceną HR i parametrów wymiany gazowej.

Stwierdzono, że u mężczyzn średnia różnica w ocenie $VO_{2\max}$ na podstawie step-testu I i testu spiroergometrycznego wynosi 15% i jest istotna statystycznie ($p < 0,05$). U kobiet takiej różnicy nie stwierdzono. Autorzy (22) wnioskują, że prosty step-test nie pozwala

na dokładną ocenę wydolności fizycznej u mężczyzn, ale podkreślają, że wynik powinien być potwierdzony w badaniu większej grupy pracowników w różnym wieku i z różnych grup zawodowych.

WNIOSKI

Spiroergometryczna próba wysiłkowa jest jedną z najważniejszych metod diagnostycznych wykorzystywanych w kardiologii i medycynie sportowej. Pomiar, obejmujący parametry wymiany gazowej podczas wysiłku fizycznego, charakteryzują się wysoką wartością prognostyczną u pacjentów nie tylko z niewydolnością serca, ale również z chorobami układu oddechowego. Zaprezentowane w niniejszej publikacji wyniki skłaniają do dalszych badań w celu najefektywniejszego wykorzystania uzyskanych wyników próby spiroergometrycznej do dalszych procedur leczniczych, w tym do indywidualnego określania programu rehabilitacji kardiologicznej.

Należy również podkreślić, że regularne wykonywanie testu spiroergometrycznego pozwala oszacować ryzyko zaostrzenia objawów choroby układu sercowo-naczyniowego, co umożliwi odpowiednio wczesne wdrożenie profilaktyki. Uczestnictwo pacjenta w programie rehabilitacji umożliwi jego szybszy powrót do pracy.

W odniesieniu do zastosowania testów spiroergometrycznych w medycynie pracy należy zauważyć, że są one związane z niewielkim, ale mierzalnym ryzykiem powikłań sercowo-naczyniowych (23). Z tego względu należy je wykonywać tylko w określonych sytuacjach – kwalifikowania do pracy i monitorowania zdrowia pracowników zatrudnionych na wybranych stanowiskach, na których ocena wydolności fizycznej ma szczególne znaczenie (m.in. u osób wykonujących ciężką i bardzo ciężką pracę fizyczną w trudnych warunkach środowiska, w tym strażaków, górników itp.). W tym przypadku korzyść związana z prawidłową kwalifikacją do pracy znacznie przewyższa ryzyko ewentualnych powikłań sercowo-naczyniowych podczas badania.

PIŚMIENNICTWO

1. Kozłowski S., Nazar K., Kaciuba-Uściłko H.: Fizjologia wysiłków fizycznych. W: Kozłowski S., Nazar K. [red.]. Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. PZWL, Warszawa 1999, ss. 169–332
2. Favre M.N., Roche F., Januel B., Rigaudière P., Seydoux D., Fournel P. i wsp.: Exercise test and evaluation of exertional dyspnoea in former coal miners. *Rev. Mal. Respir.* 2002 Jun;19(3):315–322
3. Volpino P., Tome F., La Valle C., Tomao E., Rosati M.V., Ciarrocca M. i wsp.: Respiratory and cardiovascular function at rest and during exercise testing in a healthy working population: Effects of outdoor traffic air pollution. *Occup. Med. (Oxf.)* 2004;54(7):475–482, <http://dx.doi.org/10.1093/occmed/kqh102>
4. Liu X., Song X., Meng Z.: Effects of airborne pollution on cardiopulmonary function of healthy person. *Wei Sheng Yan Jiu* 2008;37(4):429–432
5. di Thommazo-Luporini L., Jørgensen S.P., Castello-Simões V., Catai A.M., Arena R., Borghi-Silva A.: Metabolic and clinical comparative analysis of treadmill six-minute walking test, and cardiopulmonary exercise testing in obese and eutrophic women. *Rev. Bras. Fisioter.* 2012;16(6):469–478, <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-35552012005000036>
6. Guazzi M., Adams V., Conraads V., Halle M., Mezzani A., Vanhees L. i wsp.: Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assesment in specific patient populations. *Circulation* 2012;126: 2261–2274
7. Albouaini K., Egred M., Alahmar A., Wright D.J.: Cardiopulmonary exercise testing and its application. *Postgrad. Med. J.* 2007;83(985):675–682, <http://dx.doi.org/10.1136/hrt.2007.121558>
8. Stringer W., Casaburi R., Older P.: Cardiopulmonary exercise testing: Does it improve perioperative care and outcome? *Curr. Opin. Anaesthesiol.* 2012;25(2):178–184, <http://dx.doi.org/10.1097/ACO.0b013e32834f6c32>
9. Piotrowicz R., Dylewicz P., Jegier A., Rudnicki S., Tylka J., Mazurek K. i wsp.: Kompleksowa rehabilitacja kardiologiczna. Stanowisko Komisji ds. Opracowania Standardów Rehabilitacji Kardiologicznej Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego. *Folia Cardiol.* 2004;(11) (Supl. A):A8–A19
10. Fletcher G.F., Ades P.A., Kligfield P., Arena R., Bala-dy G.J., Bittner V.A. i wsp.: Exercise standards for testing and training: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2013;128:873–934, <http://dx.doi.org/10.1161/CIR.0b013e31829b5b44>
11. Kośmicki M.A.: Choroba niedokrwienna serca. Badania ergometryczne w diagnostyce choroby wieńcowej. *KOF* 2010;3:229–249
12. Benington S., McWilliams D., Eddleston J., Atkinson D.: Exercise testing in survivors of intensive care – Is there a role for cardiopulmonary exercise testing? *J. Crit. Care* 2012;27:89–94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrc.2011.07.080>

13. Scardovi A.B., de Maria R., Ferraironi A., Gatto L., Celestini A., Forte S. i wsp.: A case for assessment of oscillatory breathing during cardiopulmonary exercise test in risk stratification of elderly patients with chronic heart failure. *Int. J. Cardiol.* 2012;155(1):115–119, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcard.2011.02.033>
14. Suzuki T., Koike A., Nagayama O., Sakurada K., Tsuneoka H., Kato J. i wsp.: Overshoot phenomena of respiratory gas variables during exercise recovery in cardiac patients. *Circ. J.* 2012;76(4):876–883, <http://dx.doi.org/10.1253/circj.CJ-11-1279>
15. Ingle L., Sloan R., Carroll S., Goode K., Cleland J.G., Clark A.L.: Abnormalities of the ventilator equivalent for carbon dioxide in patients with chronic heart failure. *Pulm. Med.* 2012(2012), <http://dx.doi.org/10.1155/2012/589164>
16. Meyer P., Normandin E., Gayda M., Billon G., Guiraud T., Bosquet L. i wsp.: High-intensity interval exercise in chronic heart failure: Protocol optimization. *J. Cardiol. Fail.* 2012;18(2):126–133, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cardfail.2011.10.010>
17. Balsam P., Głowczyńska R., Zaczek R., Szmit S., Opol-ski G., Filipiak K.J.: The effect of cycle ergometer exercise training on improvement of exercise capacity in patients after myocardial infarction. *Kardiol. Pol.* 2013;71(10): 1059–1064, <http://dx.doi.org/10.5603/KP.2013.0261>
18. Wang X., Araki S., Yano E., Wang M., Wang Z. Dyspnea and exercise testing in workers exposed to silica. *Ind. Health.* 1995;33(4):163–171, <http://dx.doi.org/10.2486/indhealth.33.163>
19. Duvenkamp I., Bauer T.T., Schmidt E.W., Emming B., Lemke B., Schultze-Werninghaus G.: Submaximal spi-roergometric stress study in patients with mixed dust pneumoconiosis. *Pneumologie* 1998;52(3):171–177
20. Su M.C., Hsieh Y.T., Wang Y.H., Lin A.S., Chung Y.H., Lin M.C.: Exercise capacity and pulmonary function in hospital workers recovered from severe acute respiratory syndrome. *Respiration* 2007;74(5):511–516, <http://dx.doi.org/10.1159/000095673>
21. Sörensen L., Honkalehto S., Kallinen M., Pekkonen M., Louhevaara V., Smolander J. i wsp.: Are cardiorespiratory fitness and walking performance associated with self-reported quality of life and work ability? *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 2007;20(3):257–264, <http://dx.doi.org/10.2478/v10001-007-0023-3>
22. Yoopat P., Vanwonterghem K., Louhevaara V.: Evaluation of a step-test for assessing the cardiorespiratory capacity of workers in Thailand: A pilot study. *J. Hum. Ergol. (Tokyo)* 2002;31(1–2):33–40
23. Shephard R.J., Bonneau J.: Supervision of occupational fitness assessments. *Can. J. Appl. Physiol.* 2003;28(2): 225–239, <http://dx.doi.org/10.1139/h03-018>